

ARI ASP

**Elementtipohjaisten  
asuinkerrostalojen  
ulkokuoren  
signaalivaimennus  
nykyisten ja  
lähitulevaisuudessa  
käyttöön tulevien  
matkaviestinverkkojen  
taajuuksilla**



ARI ASP

Elementtipohjaisten asuinkerrostalojen  
ulkokuoren signaalivaimennus nykyisten ja  
lähitulevaisuudessa käyttöön tulevien  
matkaviestinverkkojen taajuuksilla

AKATEEMINEN VÄITÖSKIRJA

Esitetään Tampereen yliopiston

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan

suostumuksella julkisesti tarkastettavaksi

Tampereen yliopiston Rakennustalon salissa

RH 201, Korkeakoulunkatu 1,

Tampere, 30.5.2024, klo 12

# AKATEEMINEN VÄITÖSKIRJA

Tampereen yliopisto, Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta

*Vastuuohjaaja  
ja Kustos*

Professori  
Mikko Valkama  
Tampereen yliopisto  
Suomi

*Ohjaaja*

Yliopistonlehtori, TkT  
Jari Kangas  
Tampereen yliopisto  
Suomi

*Esitarkastajat*

Professori  
Jouni Punkki  
Aalto Yliopisto  
Suomi

Vanhempi yliopistolehtori, TkT  
Kalle Ruttik  
Aalto Yliopisto  
Suomi

*Vastaväittäjä*

Professori  
Jari Iinatti  
Oulun yliopisto  
Suomi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

Copyright ©2024 tekijä

Kannen suunnittelu: Roihu Inc.

ISBN 978-952-03-3416-1 (painettu)  
ISBN 978-952-03-3417-8 (verkkojulkaisu)  
ISSN 2489-9860 (painettu)  
ISSN 2490-0028 (verkkojulkaisu)  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-3417-8>



ClimatePartner.com  
PunaMusta Printing

Tampereen yliopiston painetuissa väitöskirjoissa on kompensoitu painatuksesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt.

PunaMusta Oy – Yliopistopaino  
Joensuu 2024

# KIITOKSET

Kiitokset tämän opinnäytetyön eri vaiheissa saadusta avusta kuuluvat Tampereen yliopiston henkilökunnan lisäksi yhteistyötahoja edustaneille henkilöille, alkaen VTT:llä työskentelevistä radiotekniikan asiantuntijoista Arto Hujanen, Ismo Huhtinen, Jouko Aurinsalo ja Matti Somersalo. Kiitokset ansaitsevat myös ministeriöiden Pekka Kalliomäki ja Jyrki Kauppinen, sekä ikkunateollisuuden Hannu Saarinen ja Marko Mökönen. Erityiskiitoksilla on syytä mainita betoniteollisuuden toimitusjohtajaa Jussi Mattilaa ja rakennusfysiikan professoria Jukka Lahdensivua. Kirjan eri vaiheissa tehdyistä tarkastuksista kuuluvat kiitokset Tampereen yliopiston tietoliikennetekniikan Joonas Sakeelle ja Jari Kankaalle samoin kuin ohjauksesta laitosjohtajalle professori Mikko Valkamalle.

Varsinaisen työn tekemisessä olivat ansioituneesti mukana Yaroslaw Sydorov, Vili Kilpinen, Anil Baniya, Mikko Keskikastari, Tuomo Hentilä, Syed Yunas ja Olli Hytönen. Työn alussa ohjaajana toimi korvaamattomia neuvoja antanut Jarno Niemelä. Suurena apuna ovat olleet Markus Allen, Jukka Talvitie ja Matias Turunen. Kiitokset ansaitsee vielä Tampereen yliopiston rakennushallin henkilökunta ja erityisesti Jussa Pikkuvirta. Kiitokset kuuluvat myös Elina Oravalle, joka kärsivällisesti neuvoi kirjaan liittyvien erilaisten hallinnollisten muutoseikkojen hoitamisessa.

Kirjan esitarkastuksesta kiitokset kuuluvat Kalle Ruttikille ja Jouni Punkille, joista kumpikin antoi asiantuntevia korjausohjeita.

Luonnollisesti suuret kiitokset ansaitsevat vastaväittäjänä toiminut Jari Iinatti ja kirjan taittamisesta vastannut Sirpa Randell.

Lopuksi on todettava, että kiitokset kuuluvat myös perheelle tuesta pitkään jatkuneen kirjoitustyön eri vaiheissa.



# TIIVISTELMÄ

Matkapuhelinverkon kuuluvuusongelmia on raportoitu etenkin uusissa asuinkerrostaloissa tasaisesti koko ajan vuoden 2010 jälkeen. Usein on esitetty perusteltu kysymys, ”miksi uusissa asuinkerrostaloissa on matkapuhelinten käytössä ongelmia, mutta vanhemmissa taloissa niitä ei ole?” Tämä väitöstutkimus pyrkii esittämään vastauksia tähän kysymykseen.

Kysymys itsessään on tärkeä koko yhteiskunnan näkökulmasta, sillä matkaviestinverkkojen käyttökulttuuri on muuttunut. Matkapuhelimia käytetään enimmäkseen muuhun kuin puhelujen soittamiseen. Riittävän luotettava ja nopea laajakaistayhteys onkin muodostunut jo kansalaisten perustarpeeksi.

Tässä väitöstutkimuksessa keskitytään asuinkerrostalojen ulkokuoren materiaalien ja rakenteiden RF-vaimennuksiin eri taajuuksilla. Päähuomio on matkapuhelinverkkojen teknologioiden sijaan taajuuksissa, sillä asuintalojen elinkaaren aikana matkapuhelinten sukupolvet ja niiden käyttämät taajuudet vaihtuvat todennäköisesti useaan kertaan. Asuinkerrostalojen ulkokuoren pääasialliset rakenneosat ovat betonielementeistä valmistetut ulkoseinät ja ikkunarakenteet. Tämän kirjan ensimmäisissä luvuissa tarkastellaan asuinkerrostalojen ikäjakaumaa ja ulkoseinien rakennetta. Samalla todetaan asuinkerrostalorakentamisen ulkoseinien perustuneen viimeisten vuosikymmenien aikana lähes yksinomaan betonin käyttöön seinärakenteen rungon osalta. Toinen merkittävä rakenneosatyyppeiksi, ikkunat, on kokenut 1990-luvun jälkeen merkittävän muutoksen. Nykyisin markkinoilla olevissa ikkunatyypeissä on lähes poikkeuksetta ainakin yhdessä lasipinnassa niin kutsuttu selektiivipinnoite. Tämä pinnoite parantaa ikkunoiden energiatehokkuutta, mutta samalla kasvattaa ikkunan signaalivaimennusta merkittävästi. Tästä syystä uusia ikkunoita onkin pidetty perinteisesti matkapuhelinverkon heikon sisätilakuuluvuuden syynä.

Tämä väitöstutkimus sisältää paljon mittaustuloksia, joiden pohjalta on kirjoitettu lukuisia erilaisia raportteja erityisesti suomalaisille lukijoille ja yhteistyötahoille, mutta myös seitsemän kansainvälistä konferenssijulkaisua. Asuinkerrostalojen ulkoseinissä käytettävien betonilaatujen lisäksi tarkasteluun on otettu mukaan myös kosteuden merkitys betonin signaalivaimennukseen. Näiden mittausten tulokset osoittavat, että syy uusien asuinkerrostalojen heikkoon signaalitasoon ei johdu pelkästään ikkunoista.

Ikkunoiden osalta mielenkiintoinen yksityiskohta on mahdollisuus selektiivikalvon muokkaamiseen, jota tässä kirjassa on tutkittu sekä laboratoriomittausten, simulaatioiden että käytännön kenttäkokeiden avulla. Näistä kokeista saatujen tulosten perusteella nykyisin markkinoilla olevien, normaalilla selektiivikalvolla varustettujen, ikkunoiden signaalivaimennusta on mahdollista pienentää merkittävästi, joten ikkunoista on mahdollista tulla jälleen helpoin reitti signaaleille asuinkerrostalon ulko- ja sisäpuolen välille.

Erilaisista sementtilaaduista valmistettujen betonielementtien oma vaimennus on tässä väitöstutkimuksessa esitettyjen tulosten valossa melko yhdenmukainen matkaviestinverkkojen matalimmilla taajuuksilla, mutta taajuuksien kasvaessa ja erityisesti betonin kastuessa vaimennuksissa on hyvin suuria eroja. Nämä erot aiheuttavat tilanteen, jossa asuinkerrostalojen seinien signaalivaimennukset ovat erilaisia eri vuodenaikoina, erityisesti kohteissa, joissa ulkoseinän pinnoite on vaurioitunut.

Oman mielenkiintoisen tilanteensa aiheuttaa ulkoseinäremontti, jossa ulkoseinän pinnoitteeksi valitaan rappausverkolla tuettu paksurappaus. Tämä on tavallinen tapa peruskorjata laajasti vaurioituneita ulkoseiniä. Paksurappauksen laasti on huokoista ja imee helposti vettä, mikä aiheuttaa vaihtelua rappauskerroksen RF-vaimennukseen. Itse laastin vaimennusta paljon tärkeämpi havainto liittyy rappausverkon omaan signaalivaimennukseen, joka on huomattavan suuri erityisesti matkaviestinjärjestelmien matalimmilla taajuuksilla. Rappausverkolla vahvistettu paksurappaus siis käyttäytyy täysin päinvastoin kuin muut rakennusmateriaalit RF-vaimennuksen näkökulmasta. Tällä ilmiöllä on vaikutusta erityisesti nopeasti yleistyvien ja matalilla taajuuksilla toimivien IoT-verkkojen toimintaan.



# SISÄLLYS

Lyhenteet ja merkinnät .....	xxii
------------------------------	------

## OSA 1 TYÖN TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT

1	Johdanto.....	33
1.1	Väitöstutkimuksen tarkoitus ja kohderyhmä.....	33
1.2	Väitöstutkimuksen sisällön jakautuminen.....	34
1.2.1	Radiotekniikan näkökulma .....	36
1.3	Tutkimusalueen yhteiskunnallinen vaikutus .....	37
1.4	Kuuluvuusongelmien herättämä keskustelu .....	37
1.4.1	Ministeriöt ovat ottaneet kantaa kuuluvuusongelmiin .....	38
1.5	Matkapuhelinverkoissa on paljon puheyhteyksiä .....	38
1.6	Datansäilytys matkapuhelinverkoissa kasvaa nopeasti .....	39
1.7	Taajuudet matkaviestinverkoissa ovat kasvussa.....	41
1.8	Tämän väitöstutkimuksen näkökulma.....	41
1.9	Työhön liittyneet tutkimushankkeet, yhteistyökumppanit ja tehdyt tieteelliset julkaisut .....	43
1.9.1	Mittaukset Vuoreksen asuntomessualueella.....	44
1.9.2	Tutkimushanke polyuretaanisten lämmöneristelevyjen signaalivaimennuksesta.....	44
1.9.3	Rakennusteollisuuden laaja mittauskampanja.....	44
1.9.4	FSS-kuvion toiminnan arviointiin keskittynyt tutkimushanke.....	45
1.9.5	Muita pienempiä hankkeita.....	45
1.9.6	LuxTurrim-tutkimusprojekti .....	45
2	Ilmastonmuutos.....	47
2.1	Ilmastonmuutoksen havaitseminen .....	47
2.2	Kioton sopimus.....	48
2.3	Pariisin sopimus .....	49
3	EU:n ja Suomen asuntokannat.....	51
3.1	Katsaus EU:n asuntokantaan.....	51
3.1.1	Euroopan vanha rakennuskanta .....	52

3.2	Sodan vaikutus asuinrakennuksiin.....	53
3.3	Jälleenrakentaminen.....	53
3.4	Rakentaminen alkaa harmonisoitua Euroopassa .....	54
3.5	Suomen asuntokanta.....	56
3.6	Asuinkerrostalojen perustyytit .....	57
3.7	Korttelit .....	57
3.8	Jälleenrakentaminen Suomessa .....	58
3.9	Kerrostalorakentaminen 1970-luvulla.....	60
3.10	Kerrostalorakentaminen 1980- ja 1990-luvuilla .....	61
3.11	Huonetilojen muuttuminen .....	62
3.12	Kerrostalorakentaminen 2000-luvulla.....	63
3.13	Kerrostalorakentaminen matkapuhelinverkkojen näkökulmasta .....	64
4	Lämmön siirtyminen rakenteissa .....	66
4.1	Materiaalien lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ).....	66
4.2	Materiaalien lämmönvastus (R).....	69
4.3	U-arvo .....	70
4.4	U-arvon kiristyminen kuluneina vuosikymmeninä .....	71
5	Asuinkerrostalojen ulkoseinärakenteet viime vuosikymmeninä .....	74
5.1	Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 1950–1975.....	74
5.1.1	Ikkunat asuinkerrostalojen julkisivuissa.....	77
5.1.2	Kantavat päätyseinät .....	78
5.1.3	Kirjahyllyrunгон ei-kantavat seinät (sivuseinät) .....	78
5.1.4	1970-luvun kantavat seinät.....	80
5.1.5	1970-luvun ei-kantavat seinät .....	80
5.2	Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 1975–2000.....	81
5.3	Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 2000-luku .....	83
5.3.1	Ulkoseinien paksuus.....	84
5.3.2	Rappaus ulkoseinässä.....	85
5.3.3	Lämmöneristeet .....	85
5.3.4	Tyypillisiä sandwich-elementtejä .....	86
5.3.5	Tiilen käyttö julkisivuissa.....	87
5.4	Kerrostalojen julkisivut tilastojen valossa .....	89
6	Lämmöneristeet .....	91
6.1	Mineraalivilla .....	93
6.2	Paisutettu polystyreeni, eli EPS-eriste.....	93
6.3	Polyuretaani-pohjaiset eristeet .....	94
6.4	Eriyryppisten lämmöneristeiden kuivuminen.....	95

7	Ulkoseinien rappaus.....	96
7.1	Julkisivun peruskorjauksen syyt.....	97
7.1.1	Peruskorjaus energiatehokkuuden parantamiseksi .....	97
7.1.2	Seinien ulkopintojen vauriot julkisivuperuskorjauksen syyinä .....	98
7.2	Rappaus ja sen korjaustarve 1950-luvun kerrostaloissa.....	99
7.3	Julkisivujen korjaustarve 1960–1970 luvun kerrostaloissa.....	99
7.4	Julkisivun peruskorjauksen perusratkaisut.....	100
7.5	Rappausmenetelmät ja laastit .....	101
7.5.1	Ohutrappaus .....	102
7.5.2	Paksurappaus .....	103
8	Kosteus ja sen siirtyminen ulkoseinissä .....	105
8.1	Materiaalin kosteus .....	105
8.2	Materiaalin kosteuspitoisuus .....	106
8.3	Hygroskooppiset materiaalit .....	106
8.3.1	Kosteuden käyttäytyminen hygroskooppisella alueella.....	107
8.4	Kapillaarikondensaatio.....	108
8.4.1	Kosteuden käyttäytyminen kapillaarisella alueella.....	109
8.5	Ilmassa oleva kosteus .....	110
8.6	Kosteuden siirtyminen rakennusmateriaaleissa ja niiden välillä.....	111
8.7	Diffuusio kosteuden siirtäjänä .....	111
8.8	Konvektio kosteuden siirtäjänä .....	112
8.8.1	Luonnollinen konvektio.....	112
8.8.2	Pakotettu konvektio.....	113
8.9	Kosteuden lähteet.....	113
8.10	Viistosade .....	114
8.10.1	Rakennuksen muodon vaikutus viistosateen määrään.....	115
8.11	Sadeveden vaikutus seinäpinnoissa.....	120

## OSA 2 ASUINKERROSTALON ULKOKUOREN RAKENNEOSAT

9	Ikkunat ja niiden rakenteet .....	125
9.1	Ikkunoiden U-arvo .....	126
9.1.1	Ikkunan valoaukon lämmönläpäisy.....	127
9.1.2	Ikkunan puu- ja karmiosan lämmönläpäisy .....	127
9.1.3	Ikkunan keskimääräinen lämmönläpäisy .....	128
9.1.4	Ikkunan ominaislämpöhäviö .....	128
9.2	Ikkunoiden rakenne.....	129
9.3	Lämmön siirtyminen lasituksissa.....	131
9.3.1	Lämmön johtuminen.....	132

	9.3.2	Konvektio .....	132
	9.3.3	Säteily.....	133
9.4		Ikkunan emissiviteetti.....	134
	9.4.1	Ikkunan g-arvo.....	136
	9.4.2	Ikkunan L-arvo .....	136
9.5		Lasin valmistus .....	137
	9.5.1	Ikkunalasin karkaisu .....	138
9.6		Yksittäiset ikkunalasit ja niiden väri .....	139
	9.6.1	Sävytetyt lasit.....	139
9.7		Ikkunalasien permittiivisyys.....	140
9.8		Ikkunalasien RF vaimennukset .....	141
9.9		Ikkunalasien pinnoitteet.....	142
	9.9.1	Pehmeät (off-line) pinnoitteet .....	142
	9.9.2	Kovat (on-line) pinnoitteet .....	143
9.10		Väliolistat .....	144
10		Taajuusselektiiviset rakenteet.....	146
	10.1	Yksikkösoluista muodostuvat rakenteet.....	146
	10.1.1	Floquet'n periaate.....	146
	10.1.2	FSS peruskuviot.....	148
	10.2	FSS-kuvion mitoitus .....	151
	10.3	FSS-rakenteen kaistanleveys.....	152
	10.4	FSS-rakenteet ovat aktiivisen tutkimuksen kohteena.....	153
11		Betoni ja sen rakenne .....	155
	11.1	Betonin ainesosat .....	155
	11.1.1	Sementti .....	157
	11.1.2	Klinkkeri .....	157
	11.1.3	Kiviaines.....	159
	11.1.4	Vesi .....	160
	11.2	Betonin hydrataatio.....	161
	11.2.1	Alkuvaihe .....	161
	11.2.2	Lepovaihe.....	163
	11.2.3	Kiihtyvä vaihe (Pääreaktio).....	163
	11.2.4	Hidastuva vaihe.....	164
	11.2.5	Hydrataation päättyminen.....	165
	11.3	Betonin huokoisuus ja vesi/sementti -suhde.....	166
	11.3.1	Huokostyytit ja niiden jakaumat.....	167
	11.3.2	Geelihuokokset .....	167
	11.3.3	Kapillaarihuokokset.....	168
	11.3.4	Suojahuokokset.....	170
	11.3.5	Tiivistyshuokokset.....	170
	11.4	Vesi betonissa .....	171

11.4.1	Absorboitunut vesi.....	171
11.4.2	Kerrosten välissä oleva vesi.....	171
11.4.3	Kemiallisesti sitoutunut vesi.....	171
11.5	Betonin valmistuksessa käytettävät lisäaineet.....	172
11.5.1	Notkistimet.....	172
11.5.2	Huokostimet .....	172
11.5.3	Kiihdyttimet .....	173
11.5.4	Hidastimet .....	173
11.6	Yhteenvedo .....	173

### OSA 3 RADIOSIGNAALIT JA NIIDEN MITTAUSMENETELMÄT

12	Matkapuhelinverkkojen taajuudet Suomessa.....	177
12.1	Taajuuksia EU:n alueella hallinnoivat organisaatiot.....	178
12.2	Suomessa taajuuksia hallinnoiva viranomainen .....	179
12.3	Taajuusalueet muuttuvat .....	179
12.4	Käsivälitteiset matkapuhelinverkot .....	180
12.5	Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkot .....	181
12.6	Toisen sukupolven matkapuhelinverkot.....	181
12.7	Matkapuhelinverkkojen 2,5. sukupolvi.....	184
12.8	Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot.....	184
12.9	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkot.....	187
12.9.1	450 MHz:n taajuusalue LTE:lle .....	187
12.9.2	700 MHz:n taajuusalue LTE:lle .....	188
12.9.3	800 MHz:n taajuusalue LTE:lle .....	188
12.9.4	900 MHz:n taajuusalue LTE:lle .....	188
12.9.5	1800 MHz:n taajuusalue LTE:lle .....	189
12.9.6	2 GHz:n taajuusalue LTE:lle .....	189
12.9.7	2,6 GHz:n taajuusalue LTE:lle.....	189
12.10	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkot.....	190
12.10.1	5G-verkon taajuudet 3,5 GHz:n alueella.....	190
12.10.2	5G-verkon korkeammat taajuudet .....	192
12.11	Internet-of-Things-verkkojen taajuudet.....	193
12.11.1	Iot-verkkojen lisensoimattomat taajuudet.....	193
12.11.2	NB-IoT-verkkojen taajuudet.....	194
12.11.3	LoRa-verkkojen taajuudet.....	194
12.11.4	ZigBee-verkkojen taajuudet.....	195
12.11.5	SigFox-verkkojen taajuudet .....	196
12.11.6	LTE Cat M1 .....	196
12.11.7	LTE-M vai eMTC?.....	197
12.11.8	Wirepas .....	198
12.11.9	Google Thread taajuusalue (ISM).....	198

	12.11.10	EC-GSM:n taajuusalue .....	199
	12.11.11	EC-GSM-IoT .....	199
12.12		Yhteenveto .....	199
	12.12.1	Operaattorit .....	200
13		Sähkömagneettiset aallot ja materiaalit .....	202
	13.1	Permittiivisyys RF-vaimennuksen avainparametrina .....	202
	13.2	Aaltoluku $k$ .....	205
	13.3	Aaltojen eteneminen väliaineessa .....	206
	13.3.1	Eteneminen häviöttömässä aineessa (ilma) .....	206
	13.3.2	Eteneminen häviöllisessä materiaalissa .....	208
	13.4	Signaalin nopeus ja ilmarajapinnan impedanssi .....	210
	13.5	Signaalin eteneminen ilmasta materiaaliin .....	211
	13.5.1	Rajapinnoissa tapahtuvat heijastukset impedansseilla .....	212
	13.6	Signaalit ja erilaiset materiaalikerrokset .....	215
	13.6.1	Rajapinnoissa tapahtuvat heijastukset permittiivisyyden avulla .....	215
	13.6.2	Kentät ja heijastukset useissa rajapinnoissa .....	217
	13.6.3	Kentät ja heijastukset kerroksellisessa materiaalissa .....	218
	13.7	Vinosti saapuvat signaalit .....	221
14		Mittausmenetelmät .....	224
	14.1	Muut kuin vapaan tilan mittauksiin perustuvat menetelmät .....	224
	14.1.1	Ensimmäiset aaltoputkiin perustuvat mittausmenetelmät .....	225
	14.1.2	Kapasitanssiin perustuvat menetelmät .....	225
	14.1.3	Aaltoputkimittaukset .....	226
	14.1.4	Onteloresonaattorimittaukset .....	227
	14.2	Vapaan tilan vaimennusmittausten periaate .....	228
	14.2.1	Antennien säteilykuvio .....	229
	14.3	Antennien lähi- ja kaukokenttä .....	230
	14.3.1	Reaktiivinen lähikenttä .....	232
	14.3.2	Säteilevä lähikenttä .....	233
	14.3.3	Kaukokenttä .....	234
	14.4	Kenttien vaikutus mittausvirheeseen .....	238
	14.5	Torviantennit .....	239
	14.6	Vapaan tilan vaimennukseen perustuvat menetelmät .....	239
	14.6.1	Vapaan tilan vaimennus seinien tai materiaalien läpi .....	240
	14.6.2	Vapaan tilan vaimennus kaukokentässä .....	242
	14.6.3	Vapaan tilan vaimennus lähikentässä .....	243
	14.6.4	Piirianalysointorin kalibrointi kenttämittauksissa .....	244
	14.6.5	Vapaan tilan vaimennus laboratorio-olosuhteissa .....	245
	14.7	Todellisten rakennusten mittausten erityiskysymyksiä .....	247
	14.7.1	Monimutkaiset rakenteet .....	249

14.7.2	Ikkunoiden puuosat ja viistosti tulevat signaalit.....	250
14.8	S-parametrit permittiivisyyden taustalla .....	252
14.9	S-parametrien ja permittiivisyyden yhteys.....	254
14.10	Aikatason ikkunointi.....	255
14.11	Mittausdatan muuntaminen permittiivisyydeksi .....	256
14.11.1	NRW-menetelmä .....	257
14.11.2	Uusi menetelmä NIST:ltä .....	260
14.11.3	Pelkkään heijastukseen perustuva menetelmä .....	262
14.11.4	Pelkkään läpäisyyn perustuva menetelmä.....	263
14.12	Tässä väitöstutkimuksessa sovelletut menetelmät.....	263

## OSA 4 TULOKSET

15	Ikkunoiden RF-läpäisymittausten tuloksia.....	267
15.1	Taustaa.....	267
15.2	Tavallisten ikkunoiden RF-vaimennukset.....	269
15.2.1	Tavallisen float-lasin permittiivisyys ja vaimennus .....	270
15.2.2	Selektiivikalvojen vaikutus .....	272
15.3	FSS-prototyypin valmistus ja simulointi.....	274
15.3.1	FSS-rakenteen alustava mitoitus .....	274
15.3.2	FSS-rakenteen valmistaminen .....	276
15.3.3	FSS-rakenteen tarkempi simulaatio.....	278
15.4	FSS-rakenteen kenttämittaukset .....	279
15.4.1	FSS-mittaustulokset DNA-GSM.....	281
15.4.2	FSS -mittaustulokset DNA-3G.....	282
15.5	Ikkunoiden puitteiden ja karmien vaikutus .....	283
15.5.1	Puuosien simulointien tulokset.....	286
15.5.1.1	Vertikaalinen polarisaatio .....	288
15.5.1.2	Horisontaalinen polarisaatio, 5GHz:n taajuus.....	289
16	Lämmöneristeiden RF-vaimennusmittausten tulokset .....	293
16.1	Villapohjaiset lämmöneristemateriaalit.....	293
16.2	EPS-tyyppiset lämmöneristemateriaalit.....	295
16.3	Johtopäätöksiä lämmöneristeiden vaimennuksista.....	297
17	Betonin mittaustulokset .....	298
17.1	Tutkimuksen lähtökohta ja tavoite.....	298
17.2	Näytekappaleiden valmistaminen.....	299
17.2.1	Näytteiden kuivaus.....	300
17.2.2	Näytteiden erot.....	301
17.3	Mittaustulokset eri betonilaaduille .....	302

17.4	Erilaisten betonisten sisäkuorien RF-vaimennukset .....	309
17.5	Betonin kosteuden vaikutus .....	311
17.5.1	Betoninäytteiden painojen muutokset kosteuden mukaan .....	315
17.5.2	Betoninäytteiden painojen muutokset kuivumisen aikana .....	316
17.5.3	Betoninäytteiden permittiivisyys niiden kastuessa .....	319
17.5.4	Betoninäytteiden permittiivisyys niiden kuivuessa .....	322
17.6	Sandwich-elementin ulkokuoren vaimennus .....	324
17.7	Yksinkertaistettu uuden ja vanhemman talon vertailu .....	327
17.8	Johtopäätökset betonin vaimennuksen arvioinnista .....	329
18	Rappausverkon tulokset .....	332
18.1	Aaltoputkiin perustuva verkkomaisen rakenteen analyysi .....	332
18.2	Verkkomaisen rakenteen admittansseihin perustuva analyysi .....	336
18.3	Ulkoseinärappauksen kokonaisvaimennus .....	339
18.3.1	Rappauslaastien kosteuden arvionti .....	340
18.3.2	Rappauslaastien permittiivisyys .....	341
18.3.3	Rappausverkon vaimennus .....	345
18.3.4	Rappauslaasti ja verkko yhdessä .....	346
18.4	RF-vaimennuksen muutoksen arviointi peruskorjauksen yhteydessä .....	348
18.5	Yksinkertaistettu käytännön arviointi peruskorjauksen yhteydessä .....	349
19	Johtopäätökset .....	351
19.1	Datansiirron tarve ja matkaviestinverkkojen taajuudet .....	351
19.2	Tässä väitöstutkimuksessa esitetyt tulokset .....	351
19.2.1	Ikkunoiden vaimennus .....	352
19.2.2	Betonin osuus ulkoseinissä .....	352
19.2.3	Betonin kosteuden vaikutus .....	353
19.2.4	Rappaus ja rappausverkko .....	354
19.3	Mahdollisia ratkaisuja matkaviestiverkkojen kuuluvuusongelmiin .....	354
19.3.1	Passiiviset järjestelmät .....	355
19.3.1.1	Rakennusmateriaaleihin perustuvat ratkaisut .....	355
19.3.1.2	Ikkunat .....	356
19.3.1.3	Polyuretaaniset lämmöneristeet .....	356
19.3.2	Passiivisten järjestelmien rajoitukset .....	356
19.3.3	Aktiiviset järjestelmät .....	357
19.4	Kokonaisia taloja ja asuinalueita koskevat ratkaisut .....	358
19.5	Milloin signaalitaso on riittävä? .....	358
19.6	Tulevaisuuden näkymiä .....	359
19.7	Loppuyhteenvedo .....	360
	References .....	362



## *Kuvioluettelo*

<b>Kuva 1.1</b>	Datansiirron kasvu matkaviestinverkoissa Suomessa. ....	40
<b>Kuva 3.1</b>	Asuinrakennusten ikäjakauma EU:n alueella. ....	55
<b>Kuva 3.2</b>	Umpikorttelien periaate kaupunkikuvassa. ....	58
<b>Kuva 3.3</b>	Asuntorakentaminen talotyypeittäin 2000-luvun alussa. ....	64
<b>Kuva 3.4</b>	Tavanomainen asuinkerrostalon signaalitason kartta. ....	65
<b>Kuva 4.1</b>	Seinien U-arvojen tiukentuminen viimeisten vuosikymmenien aikana. ....	72
<b>Kuva 4.2</b>	Ikkunoiden U-arvojen tiukentuminen viimeisten vuosikymmenien aikana. ....	72
<b>Kuva 5.1</b>	1950-luvun kevytbetoniin perustuvia seinä. ....	75
<b>Kuva 5.2</b>	Havainnollistavia kuvia 1950-luvun ulkoseinien perusratkaisuista. ....	76
<b>Kuva 5.3</b>	Kirjahyllyrungon periaate. ....	77
<b>Kuva 5.4</b>	Kantavia päätyseinä. ....	78
<b>Kuva 5.5</b>	Kirjahyllyrunkoisen talon ulkoseiniä. ....	79
<b>Kuva 5.6</b>	Kantavia seinä 1970-luvun taloissa. ....	80
<b>Kuva 5.7</b>	Ei-kantavia ulkoseinärakenteita 1970-luvun taloissa. ....	81
<b>Kuva 5.8</b>	Esimerkkejä tavanomaisista 1970–2000-lukujen ulkoseinistä. (Neuvonen, 2006) .....	83
<b>Kuva 5.9</b>	2000-luvun sandwich-elementin rakenne. ....	86
<b>Kuva 5.10</b>	Sandwich-elementti, jossa ulkopinnalla rappaus. ....	87
<b>Kuva 5.11</b>	Sandwich-elementti, jossa täystiilinen julkisivu. ....	88
<b>Kuva 5.12</b>	Tiililaattapintainen sandwich-elementti. ....	88
<b>Kuva 5.13</b>	Kerrostalojen ulkoseinärakenteiden materiaalien jakauma. ....	89
<b>Kuva 5.14</b>	Kerrostalojen ulkoseinien julkisivumateriaalien jakauma. ....	90
<b>Kuva 7.1</b>	Ulkoseinän peruskorjauksen tavallisimmat vaihtoehdot. ....	101
<b>Kuva 7.2</b>	Ohut- ja paksurappaus eristekerroksen päällä. ....	102
<b>Kuva 7.3</b>	Rappausverkon sijainti rappauksen keskellä. ....	104
<b>Kuva 8.1</b>	Kuvassa huokossäteen ja vesihöyrypitoisuuden vastaavuus kapillaarikondenssissa. ....	109
<b>Kuva 8.2</b>	Vuotuinen auringonpaiseen keskimääräinen suunta ja vuotuinen yleisin sateen suunta. ....	115

<b>Kuva 8.3</b>	Esimerkkikuva erilaisten rakennustyyppien RAF-arvoista. ....	118
<b>Kuva 8.4</b>	Tuulen suunnan muuttuminen talojen ympärillä. ....	119
<b>Kuva 8.5</b>	Tuulen pyörteily tapauksessa, jossa viereinen rakennus muuttaa ilmavirtauksia. ....	119
<b>Kuva 9.1</b>	Ikkunoiden perustyyppien nimitykset. ....	130
<b>Kuva 9.2</b>	Auringon säteilyteho eri aallonpituuksilla. ....	134
<b>Kuva 9.3</b>	Selektiivikalvon erilaisia sijoittelumahdollisuuksia. ....	145
<b>Kuva 10.1</b>	Yksikkösoluista muodostuva sarja. ....	147
<b>Kuva 10.2</b>	FSS-peruselementtien sarjan toiminta eri taajuuksilla. ....	149
<b>Kuva 10.3</b>	FSS-peruskuvioita. ....	150
<b>Kuva 10.4</b>	Perustapaukset, joissa FSS-pinta on substraatin pinnalla tai kahden substraattilevyn välissä. ....	152
<b>Kuva 11.1</b>	Betonin ainesosat. ....	156
<b>Kuva 11.2</b>	Hydrataation kehittyminen. ....	162
<b>Kuva 11.3</b>	Hydrataation kehittyminen hydrataatio tuotteiden näkökulmasta. ....	165
<b>Kuva 11.4</b>	Betonin huokosrakenteen kokojakauma karkeasti. ....	170
<b>Kuva 12.1</b>	Matkaviestinverkkojen markkinaosuudet vuosittain. ....	200
<b>Kuva 13.1</b>	Periaatekuva aallonpituuden vaihtelusta eri väliaineissa. ....	206
<b>Kuva 13.2</b>	Radiosignaalin eteneminen materiaalinäytteen läpi. ....	207
<b>Kuva 13.3</b>	Periaatekuva etenevästä ja heijastuneesta aallosta. ....	213
<b>Kuva 13.4</b>	Periaatekuva yhden homogeenisen materiaalin heijastuksista. ....	216
<b>Kuva 13.5</b>	Materiaalinäyte, jossa on kaksi materiaalia liitetty yhteen. ....	219
<b>Kuva 13.6</b>	Kappaleen rajapinnoissa syntyvät heijastukset. ....	220
<b>Kuva 13.7</b>	Aallon eteneminen (a) ja heijastuminen (b) materiaalinäytteessä. ....	222
<b>Kuva 14.1</b>	Antennin säteilyn kuvaus pallokoordinaatistossa. ....	230
<b>Kuva 14.2</b>	Antennin läheisyydessä olevien kenttien vyöhykejako. ....	231
<b>Kuva 14.3</b>	Tasomaisen säteilijän eri pisteiden etäisyyden periaatekuva havaintopisteestä P. ....	232
<b>Kuva 14.4</b>	Antennelementissä olevan virta-alkion aiheuttama kenttä tarkastelupisteessä. ....	234
<b>Kuva 14.5</b>	Torviantennin aukon suurin mitta. ....	236
<b>Kuva 14.6</b>	Kaukokentän laskennallinen raja taajuuden funktiona. ....	237
<b>Kuva 14.7</b>	Kentän taipumisen aiheuttama virhe. ....	238

<b>Kuva 14.8</b>	Vapaan tilan mittaus kaukokentässä. ....	242
<b>Kuva 14.9</b>	Seinän lähikenttämittaus. ....	244
<b>Kuva 14.10</b>	Tavallinen mittausmenetelmä (a) ja fokuoivat antennit (b). ....	246
<b>Kuva 14.11</b>	Fokusoiviin antenneihin perustuva mittausjärjestelmä. ....	246
<b>Kuva 14.12</b>	Erilaisten laajojen pintojen mittausperiaate. ....	247
<b>Kuva 14.13</b>	Mittausperiaatteen monitulkintaisuus liitoskohdissa. ....	248
<b>Kuva 14.14</b>	Ikkunan puitejärjestelmän liittyminen karmiin. ....	249
<b>Kuva 14.15</b>	Ikkunan mittaus kohtisuoraan pintaa vastaan tulevalla signaalilla. ....	250
<b>Kuva 14.16</b>	Ikkunan mittaus vinossa kulmassa pintaa vastaan tulevalla signaalilla. ....	251
<b>Kuva 14.17</b>	S-matriisin yleinen rakenne. ....	252
<b>Kuva 14.18</b>	Kaksiporttijärjestelmän kuvaus. ....	253
<b>Kuva 15.1</b>	Satunnaisesti valittujen asuinkerrostalojen ikkunoiden kokonaisvaimennukset. ....	269
<b>Kuva 15.2</b>	S-parametrit 4 mm (a) ja 6 mm (b) laselle. ....	270
<b>Kuva 15.3</b>	Mitattujen float-lasien permittiivisyys taajuuden funktiona. ....	271
<b>Kuva 15.4</b>	4 millimetrin ja 6 millimetrin lasien vaimennukset eri taajuuksilla. ....	271
<b>Kuva 15.5</b>	4 millimetrin lasi, jolla on selektiivi- tai huurtumaton kalvo. ....	272
<b>Kuva 15.6</b>	Yksi 6 mm float-lasi (a), ja eristyslasipaketissa normaali low-e-kalvo (b). ....	273
<b>Kuva 15.7</b>	Yksi 6 mm huurtumaton lasi (a), ja eristyslasipaketissa normaali low-e-kalvo (b). ....	273
<b>Kuva 15.8</b>	Testauksissa käytettyjen yksikkösolujen mitoitus. ....	275
<b>Kuva 15.9</b>	FSS-kuvion prototyypin valmistuksen eteneminen. ....	276
<b>Kuva 15.10</b>	Vaimennukset eri signaalin tulokulmilla horisontaalisella (a) ja vertikaalisella (b) polarisaatioilla. ....	277
<b>Kuva 15.11</b>	Vaimennukset eri signaalin nollan ja 40 asteen tulokulmilla horisontaalisella (a) ja vertikaalisella (b) polarisaatioilla. ....	277
<b>Kuva 15.12</b>	Kuvion mittausten ja simulointien vertailu. ....	278
<b>Kuva 15.13</b>	Kenttämittauspaikan pohjapiirros. ....	280
<b>Kuva 15.14</b>	Mittausdatat DNA:n GSM-verkolla. ....	281
<b>Kuva 15.15</b>	FSS-rakenteen ja puhtaan alumiinipinnan välinen keskimääräinen signaalin tasoero huoneessa, 90 cm etäisyydellä materiaalista. ....	282
<b>Kuva 15.16</b>	Mittausdatat DNA:n 3G-verkolla. ....	282

<b>Kuva 15.17</b>	FSS-rakenteen ja puhtaan alumiinipinnan välinen keskimääräinen 3G-signaalin tasoero huoneessa, 90 cm etäisyydellä materiaalista. ....	283
<b>Kuva 15.18</b>	Tilanne, jossa kohtisuoraan ikkunaa vastaan tuleva signaali kohtaa nykyaikaisen, alumiiniprofililla varustetun ikkunan. ....	284
<b>Kuva 15.19</b>	Tilanne, jossa signaali kohtaa alumiiniprofililla varustetun ikkunan vinossa kulmassa ja ohittaa rakenteen metallipinnat kulkemalla puuosien kautta. ....	285
<b>Kuva 15.20</b>	Simulointien lähtötiedot seinärakenteen osalta. ....	286
<b>Kuva 15.21</b>	Simulointien lähtötiedot ikkunan osalta. ....	286
<b>Kuva 15.22</b>	Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofilia. ....	287
<b>Kuva 15.23</b>	Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden puuosien edessä on alumiiniprofiili. ....	287
<b>Kuva 15.24</b>	Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofilia, vertikaalinen polarisaatio. ....	288
<b>Kuva 15.25</b>	Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden puuosien edessä on alumiiniprofiili, vertikaalinen polarisaatio. ....	289
<b>Kuva 15.26</b>	Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofilia. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on horisontaalisesti polarisoitu. ....	290
<b>Kuva 15.27</b>	Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä on alumiiniprofiili. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on horisontaalisesti polarisoitu. ....	290
<b>Kuva 15.28</b>	Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofilia. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on vertikaalisesti polarisoitu. ....	291
<b>Kuva 15.29</b>	Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä on alumiiniprofiili. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on vertikaalisesti polarisoitu. ....	291
<b>Kuva 16.1</b>	Lasivillan (a) ja mineraalivillan (b) S-parametrit eri taajuusalueilla . ....	294
<b>Kuva 16.2</b>	Lasivillan (a) ja mineraalivillan (b) permittiivisyydet eri taajuusalueilla. ....	294
<b>Kuva 16.3</b>	EPS-eristeen permittiivisyyden arvot eri taajuusalueilla kosteuden vaihdellessa. ....	295
<b>Kuva 16.4</b>	Kuivan villapohjaisen eristeen paksuuden vaikutus sandwich-elementin kokonaisvaimennukseen. ....	296
<b>Kuva 17.1</b>	Muoteista saadut betoninäytteet ja niiden katkaisu mittauksia varten. ....	300

<b>Kuva 17.2</b>	Betoninäytteiden uunikuivaus. ....	301
<b>Kuva 17.3</b>	Esimerkkikuva S-parametrimittausten tuloksista (a) ja lasketuista permittiivisyyden arvoista (b). ....	303
<b>Kuva 17.4</b>	Mitattujen betoninäytteiden $\varepsilon_r'$ -arvot. ....	305
<b>Kuva 17.5</b>	Mitattujen betoninäytteiden $\varepsilon_r''$ -arvot. ....	306
<b>Kuva 17.6</b>	Tangentti $\delta$ :n arvot eri näytteillä. ....	307
<b>Kuva 17.7</b>	Uunikuivatuksen vaikutus permittiivisyyden arvoon. ....	308
<b>Kuva 17.8</b>	Eri betonilaatujen vaimennus elementin sisäkuoressa. ....	310
<b>Kuva 17.9</b>	Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista. ....	313
<b>Kuva 17.10</b>	Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista ja niistä lasketuista permittiivisyyden arvoista. ....	313
<b>Kuva 17.11</b>	Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista ja niistä lasketuista permittiivisyyden arvoista. Esimerkkinä tässä näyte numero 8. ....	314
<b>Kuva 17.12</b>	Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista ja niistä lasketuista permittiivisyyden arvoista. Esimerkkinä tässä näyte numero 11. ....	314
<b>Kuva 17.13</b>	Kappaleiden painon suhteellinen muutos kuivauksen aikana. ....	315
<b>Kuva 17.14</b>	Betoninäytteiden painon suhteellinen muutos kuivauksen aikana. ....	318
<b>Kuva 17.15</b>	Ulkoseinäateriaalien näytteiden painon suhteellinen muutos kuivauksen aikana. ....	319
<b>Kuva 17.16</b>	Betoninäytteiden $\varepsilon_r'$ -arvojen muuttuminen kosteuden mukaan. ....	321
<b>Kuva 17.17</b>	Betoninäytteiden $\varepsilon_r''$ -arvojen muuttuminen kosteuden mukaan. ....	322
<b>Kuva 17.18</b>	Betoninäytteiden $\varepsilon_r'$ -arvojen muuttuminen näytteiden kuivaessa. ....	323
<b>Kuva 17.19</b>	Betoninäytteiden $\varepsilon_r''$ -arvojen muuttuminen näytteiden kuivaessa. ....	323
<b>Kuva 17.20</b>	Vesi-sementtisuhteen vaikutus RF-vaimennukseen. ....	324
<b>Kuva 17.21</b>	Uuden ja vanhan betonin vertailua 75 mm kuoressa. ....	326
<b>Kuva 17.22</b>	Lisäainestetun sementin vaikutus RF-vaimennuksiin. ....	327
<b>Kuva 17.23</b>	Uusien ja vanhempien asuinkerrostalojen seinien vaimennukset. ....	328
<b>Kuva 18.1</b>	Aaltoputken fyysiset mitat. ....	333
<b>Kuva 18.2</b>	Laskennassa esiintyvät verkon mitat. ....	337
<b>Kuva 18.3</b>	Eri kaavojen antamien tulosten vertailu verkon vaimennukselle. ....	339
<b>Kuva 18.4</b>	Näytteen 1 permittiivisyyden arvot. ....	341
<b>Kuva 18.5</b>	Näytteen 2 permittiivisyyden arvot. ....	342

<b>Kuva 18.6</b>	Näytteen 3 permittiivisyyden arvot. ....	342
<b>Kuva 18.7</b>	Laastinäytteiden vaimennukset, kun näytteiden paksuudet olivat 30 mm. ....	343
<b>Kuva 18.8</b>	Laastinäytteiden vaimennukset, kun laastikerrosten paksuudet olivat paksurappauksella 30 mm ja ohutrappauksella 10 mm. ....	344
<b>Kuva 18.9</b>	Eri silmäkoolla olevien rappausverkkojen simuloitua ja mitatua vaimennukset. ....	345
<b>Kuva 18.10</b>	Rappauskerroksen vaimennus, kun rappauksen eri osien kosteus vaihtelee. ....	346
<b>Kuva 18.11</b>	Koko ulkoseinän vaimennus kun rappauksen kosteus vaihtelee. ....	347
<b>Kuva 18.12</b>	Koko ulkoseinän vaimennuksen muutos erilaisilla ulkoseinäremonteilla. ....	348
<b>Kuva 18.13</b>	Yksinkertaistettu arvio ulkoseinän vaimennuksen muutoksen tasosta ulkoseinäremontissa. ....	350

### *Taulukkoluetelo*

<b>Taulukko 4.1</b>	Rakennusmateriaalien tiheyksiä ja lämmönjohtavuuksia. ....	68
<b>Taulukko 4.2</b>	Kaasujen lämmönjohtavuuksia. ....	68
<b>Taulukko 6.1</b>	Ulkovaipan suuntaa antavia vertailuarvoja. ....	91
<b>Taulukko 6.2</b>	Lämmöneristeiden paksuuksia eri aikoina. ....	92
<b>Taulukko 6.3</b>	Lämmöneristepaksuuksia eri tuotteilla. ....	94
<b>Taulukko 8.1</b>	Korjaustermi $\alpha$ erilaisille ympäristöille. ....	117
<b>Taulukko 9.1</b>	Ikkunatyypien tyypillisiä U-arvoja. ....	131
<b>Taulukko 9.2</b>	Materiaalien emissiviteettien arvoja. ....	135
<b>Taulukko 9.3</b>	Ikkunoiden L-arvoja. ....	137
<b>Taulukko 9.4</b>	Lasien värisävyt metallien mukaan. ....	139
<b>Taulukko 12.1</b>	Lisensioimattomat ISM-taajuudet. ....	193
<b>Taulukko 12.2</b>	NB-IoT taajuuksia. ....	194
<b>Taulukko 12.3</b>	LoRa-järjestelmän taajuuksia. ....	195
<b>Taulukko 12.4</b>	Zigbee-taajuuksia. ....	196
<b>Taulukko 12.5</b>	LTE Cat M1 -taajuuksia. ....	197
<b>Taulukko 12.6</b>	EC-GSM-IoT. ....	199
<b>Taulukko 12.7</b>	Suomessa käytössä olevat taajuusalueet. ....	201
<b>Taulukko 17.1</b>	Näytteiden permittiivisyyden arvot. ....	304

<b>Taulukko 17.2</b>	Näytteiden painojen muutokset kosteuden muuttuessa. ....	317
<b>Taulukko 17.3</b>	Materiaalinäytteiden permittiivisyyden muutos kosteuden muuttuessa. ....	320
<b>Taulukko 18.1</b>	Rappausmateriaalien painon muutokset materiaalin kastuessa. ....	341
<b>Taulukko 18.2</b>	Rappauksen permittiivisyys kosteyden muuttuessa. ....	343

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

1G	engl. First Generation, ensimmäisen sukupolven puhelinjärjestelmä (NMT)
2G	engl. Second Generation, toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, GSM
3G	engl. Third Generation, kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, 3GPP tai UMTS
3M	rakentamisen perusmoduli
3GPP	engl. 3rd Generation Partnership Project, useista telekommunikaatitahoista koostuva organisaatio, joka kehittää ja hallinnoi matkaviestinteknologiaihin liittyviä järjestelmäspesifikaatioita
4G	engl. Fourth Generation, neljännen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, Suomessa LTE
5G	engl. 5th Generation wireless systems, viidennen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä yleisesti käytetty nimitys
6G	engl. 6th Generation wireless systems, kuudennen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä yleisesti käytetty nimitys
AFm	Portlandsementin faasi hydratoitumisessa
AFt	Portlandsementin faasi hydratoitumisessa
Aggregaatti	betonin valmistukseen käytettävä kiviaines
ARP	AutoRadioPuhelin, ensimmäinen matkaviestinjärjestelmä
CEPT	engl. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
COMSOL	COMSOL Multiphysics, kaupallinen simulointiohjelmisto
CDMA	engl. Code-division Multiple Access, kanavointitekniikka
SR	engl. split-ring, eräs tajuusselektiivinen tyyppikuvio
BES	betonin elementtejä koskeva standardointijärjestelmä
BPIE	Building Performance Institute Europe -tutkimusjärjestö
BSS	engl. Base Station Subsystem, tukiasemajärjestelmä
C <sub>3</sub> S	trikalsiumsilikaatti
C <sub>2</sub> S	dikalsiumsilikaattia, beliitti
C <sub>3</sub> A	trikalsiumalumiinaatti



C <sub>3</sub> S	aliitti
C <sub>4</sub> AF	tetrakalsiumalumiinaatti-ferriitti
CBDR–RC	Common but Differentiated Responsibilities and Respective Capabilities
CH <sub>4</sub>	metaani
C-H-S	kalsium-silikaatti-hydraatti -geeli, betonin perusosa
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
Cl	kloori
dB	desibeli, logaritmisen asteikon dimensioton yksikkö tehojen tai jännitteiden suhteen esittämiseen
dB <sub>i</sub>	engl. decibel isotropic, antennivahvistus suhteessa ideaalisen isotrooppisen antennin lähettämään säteilyyn
DBPSK	engl. Differential Binary Phase-Shift Keying
dBm	teho desibeleinä suhteutettuna yhteen milliwattiin
DCS-1800	engl. Digital Cellular System 1800
DC-HSPA	engl. Dual Carrier -HSPA
DC-HSDPA	engl. Dual Carrier -HSPA alalinkin suunta
DECT	engl. Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DR	engl. double ring, eräs taajuusselektiivisen kuvioinnin tyyppi
DRF	viistosadekerroin
DSL	engl. double square-loop, eräs taajuusselektiiviseen kuviointiin liittyvä perustyyppi
EDGE	engl. Enhanced Data Rates for GSM Evolution, pakettikytkentäisen tiedonsiirron teknologia GSM-verkossa
ECC	engl. Electronic Communications Committee
EC-GSM-IoT	GSM-järjestelmän avulla toimiva IoT-tekniikka
EESS	Earth exploration-satellite service
EMEA	maantieteellinen alue (Europe, Middle East ja Africa)
eMTC	engl. (enhanced Machine Type Communication) (parannettu konetyyppinen tiedonsiirto, yksi IoT -järjestelmä
EPS	paisutettuun polystyreenimuoviin perustuva eristemateriaali
ERC	European Radiocommunications Committee
ETACS	European Total Access Communication System
EU	Euroopan unioni
Eurocode	komposiittirakentamisen komitean julkaisu
FDD	engl. Frequency Division Duplex, taajuusjakoon perustuva duplexi

Float-lasi	tavallinen pinnoittamaton ikkunalasi
FR	engl. frequency range, taajuusalue yleensä
FSS	engl. frequency selective surface, taajuusselektiivinen pinta
g-arvo	materiaalin läpäisemän auringon infrapunasäteilyn määrän
GFSK	engl. Gaussian Frequency Shift Keying
GPRS	engl. General Packet Radio Service, GSM-verkon pakettikytkentäisen tiedonsiirron teknologia
GSM	engl. Global System for Mobile communication, 2. sukupolven matkaviestinteknologia
HSDPA	engl. High-Speed Downlink Packet Access
HSUPA	engl. High-Speed Uplink Packet Access
HSPA	High-Speed Packet Access -teknologia yleisesti, 3G-matkapuhelinten pakettidatan parannettu siirtoprotokolla
HSPA+, Hydrataatio	Evolved High Speed Packet Access betonin kemiallinen kovettumisprosessi
IN	engl. Intelligent Network Subsystem, matkapuhelinverkon lisäpalveluja tarjoava osa
IMT	engl. International Mobile Telecommunications
IoT	engl. Internet-Of-Things (Esineiden Internet)
IP-protokolla	engl. Internet Protocol
IR	engl. infrared, infrapuna
ISM-taajuudet	Lisensioimattomat taajuudet (Industrial, Scientific and Medical)
ITU	engl. International Telecommunication Union
Lamellitalo	talotyyppi, jossa useita erillisiä portaikkoja
L-arvoa	ikkunoiden ilmanpitävyys
LoRa	engl. Long Range IoT
LoRAWAN	engl. Low Power Wide Area network
low-e	engl. low emissivity, matala emissiviteetti, matalan emissiviteetin lasi
LPWA	engl. Low Power Wide Area -tyyppinen IoT-järjestelmä
LHCP	engl. left-hand circularly polarized, vasenkätinen pyöröpolarisaatio
LTE	engl. Long Term Evolution, 4G matkaviestinteknologia
LTE-A	engl. Long Term Evolution Advanced, 4G matkaviestinteknologia
LTE-M	teollisuuden käyttämä termi Cat-M1-verkoille
LTE Cat M1	IoT-järjestelmä, jolla on muita suurempi kaistanleveys

MAL	maankäytön, asumisen ja liikenteen sopimukset
MATLAB	numeerisen laskennan tietokoneohjelmisto
MEK	kiinteä kolmilasinen ikkunatyyppe
MIMO	engl. multiple-input and multiple-output antennijärjestelmä
MS	vanha kaksilasinen ikkunatyyppe
MSE	nykyinen kolmilasinen ikkunatyyppe
MS2E	nelilasinen ikkunatyyppe
MS3E	nelilasinen ikkunatyyppe, jossa 3-lasinen eristyslasipaketti
MSK	vanhempi kolmilasinen ikkunatyyppe
N <sub>2</sub> O	typpioksidi
NB-IoT	engl. Narrow-Band IoT, kapeakaistainen esineiden Internet
NMT	ensimmäinen matkapuhelinstandardi Nordisk MobileTelefon
NSS	engl. Network SubSystem, GSM-verkon käyttäjien ja puheluiden hallintaan liittyvä palvelu
O <sub>2</sub>	happi
off-line-lasi	pehmeäpinnoitettu lasi, jolla matala emissiviteetti
on-line-lasi	kovapinnoitettu lasi, jolla matala emissiviteetti
PCF	perfluorihäilivedyt
PEC	engl. perfect electric conductor, ideaalijohdin
Pistetalo	talotyyppe, jossa yksi portaikko keskellä taloa
PIR	eristetyyppe, jossa perusmateriaali on polyisosyanuraattia
PUR	eristetyyppe, jossa perusmateriaali on Polyuretaani
RAF	rakennuksen muotokerroin sateessa (Rain admittance factor)
R-arvo	konvektion ja lämpösäteilyn huomioiva lämpöresistanssi $\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}\right]$
RF	engl. radio frequency, radiotaajuus, tai radiotaajuinen signaali
RHPC	engl. right-hand circularly polarized, oikeakätinen pyöröpolarisaatio
RT	kokonaislämmönvastus $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$ .
RX	engl. receiving, vastaanottava (esimerkiksi antenni)
SE	kiinteä kolmilasinen ikkunatyyppe
SEK	kolmilasinen ikkunatyyppe
Selektiivilasi	pinnoitettu ikkunalasi, katso low-e -pinnoite
SigFox	ranskalaisen operaattorin IoT-verkkotekniikka
SF <sub>6</sub>	rikkiheksafluoridi
SO <sub>4</sub>	sulfaatti-ioni

S-matriisi	engl. Scattering matrix, verkkoa kuvaavien S-parametrien matriisi
SRS	engl. space research service
TACS	engl. Total access communication System
TBC	engl. transition boundary condition, siirtymäreunaehto
TDD	engl. Time Division Duplex, aikajakoinen dupleksi
TE	engl. transverse electric, kohtisuora polarisaatio
TM	engl. transverse magnetic, rinnakkaispolarisaatio
Traficom	entisten turvallisuus-, viestintä-, ja liikennevirastojen yhteinen organisaatio
TX	engl. transmitting, lähettävä (esimerkiksi antenni)
QAM	engl. Quadrature amplitude modulation -modulaatiojärjestelmä
U-arvo	lämmönläpäisykertoimesta $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ käytetty termi
UHF	Ultra High Frequency, esim. vanhojen TV-järjestelmien taajuudet
UMTS	engl. Universal Mobile Telecommunication System, matkaviestinteknologia
UNFCCC	engl. United Nations Framework Convention on Climate Change
UTRA	engl. Universal Terrestrial Radio Access, verkon radio-osa
UV	ultravioletti
WCDMA	engl. Wide Band Code-Division Multiple Accessista
W/C	betonin vesi/sementti -suhde
WLAN	engl. wireless local area network, langaton lähiverkko
Wimax	engl. Worldwide Interoperability for Microwave Access
Wirepas	hajautetulla tiedonsiirtoprotokolla erilaisille IoT-päätelaitteille
WRC-xx	World Radio communication Conference -20xx
Zigbee	Anturi- ja ohjausverkkojen IoT-sovellus

( $\perp$ )	Kohtisuora (horisontaalinen) polarisaatio
( $\parallel$ )	Yhdensuuntainen (vertikaalinen) polarisaatio
$A$	pinta-ala [ $m^2$ ]
$\bar{B}$	magneettivuon tiheys [T]
$c$	valonnopeus [ $\frac{m}{s}$ ]
$\bar{D}$	sähkövuon tiheys [ $\frac{C}{m^2}$ ]
$d$	etäisyys [m]
$\bar{E}$	sähkökentän voimakkuus [ $\frac{V}{m}$ ]

$E_z, E_x, E_y$	sähkökentän komponentit karteesisessa koordinaatistossa
$E^+$	aallon normaalin etenemissuunnan sähkökenttä [ $\frac{V}{m}$ ]
$E^-$	aallon normaalin etenemissuunnan vastakkainen sähkökenttä [ $\frac{V}{m}$ ]
$f$	taajuus [Hz]
$g$	aineen johtavuus [ $\frac{S}{m}$ ]
$G_{RX}$	vastaanottavan antennin teho [dBi]
$G_{TX}$	lähettävän antennin teho [dBi]
$h$	korkeus [m]
$\bar{H}$	magneetikentän voimakkuus [ $\frac{A}{m}$ ]
$H_z, H_x, H_y$	magneetikentän komponentit karteesisessa koordinaatistossa
$H$	lämpövirta [W]
$H$	rakennustekniikassa ikkunan ominaislämpöhäviö
$\bar{J}$	virrantiheys [ $\frac{A}{m^2}$ ]
$\bar{J}_s$	virran lähde, varaustiheys
$k$	aaltoluku [ $\frac{1}{m}$ ]
$k_{zn}$	jaksollisen funktion vaihetta kuvaava termi
$k_h$	lämmönjohtavuus [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]
$L$	pituus, paksuus [m]
$L_0$	etenemisvaimennus [dB]
$L_M$	muu häviö tai vaimennus [dB]
$L_{MAT}$	mitattavan materiaalin vaimennus [dB]
$L_{RX}$	vastaanottavan laitteen häviö [dB]
$L_{TX}$	lähettävän laitteen häviö [dB]
$\lambda$	lämmönjohtavuus materiaalitekniikassa [W/(m·K)]
$\lambda$	aallonpituus sähkömagneetiikassa [m]
$m$	kaasun massa kemiassa [kg]
$M$	kaasun moolimassa kemiassa [kg/mol]
$\bar{n}$	pinnan normaalivektori
$n$	taitekerroin
$n_1$	taitekerroin materiaalissa 1
$n_2$	taitekerroin materiaalissa 2
$P_{MAT}$	mitattu teho materiaalin ollessa paikallaan [dBm]
$P_v$	mitattu teho vapaassa tilassa ilman materiaalia [dBm]

$P_{RX}$	vastaanotettu teho [dBm]
$P_{TX}$	lähetetty teho [dBm]
$p$	paine (kaasun) [Pa]
$p_v$	vesihöyrypitoisuus (kemia)
$Q$	lämpö [J] (siirtynyt lämpömäärä)
$q_{cd}$	stationäärinen lämmön virtaus
$R$	etäisyys [m]
$R$	Materiaalin lämmönvastus rakennustekniikassa
$R$	yleinen kaasuvakio [8,31 J/(K mol)], kemiassa
$R_{ff}$	kaukokentän etäisyys [m]
$R_{th}$	lämpöresistanssi [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]
$R_{tot}$	kokonaislämpöresistanssi [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]
$R_i$	yksittäisen rakennekerroksen lämpöresistanssi [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]
$r$	rakennusfysiikassa huokosten säde [m]
$r_h$	rakennusfysiikassa sateessa tunnin aikana maahan kertyvä sademäärä [mm/m <sup>2</sup> /h]
$r_v$	rakennusfysiikassa sateessa tunnin aikana pystysuoraan pintaan kertyvä sademäärä [mm/m <sup>2</sup> /h]
$S$	pinta [m <sup>2</sup> ]
$\bar{S}$	Poyntingin vektori
$S_{11}$	S-parametri (1,1), portin 1 heijastuskerroin
$S_{21}$	S-parametri (2,1), myötäsuuntainen vahvistus
$S_{12}$	S-parametri (1,2), vastakkaisuuntainen vahvistus
$S_{22}$	S-parametri (2,2), portin 2 heijastuskerroin
$T$	lämpötila [°C, K]
$T_H$	lämpötila, kuuma [°C, K]
$T_C$	lämpötila, kylmä [°C, K]
$U$	U-arvo, lämmönläpäisykerroin [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]
$U_g$	Lasin keskellä mitattava U-arvo
$U_f$	Ikkunan puuosien U-arvo
$U_w$	Ikkunan keskimääräinen U-arvo
$u$	materiaalin vesimäärä [kg/m <sup>3</sup> ]
$\vec{v}$	nopeusvektori [ $\frac{m}{s}$ ]
$v$	vesihöyrypitoisuus [kg/m <sup>3</sup> ] (kemia)
$v_p$	aallon etenemisnopeus [ $\frac{m}{s}$ ]

$V$	tilavuus [ $\text{m}^3$ ]
$V$	rakennusfysiikassa tuulen nopeus [ $\text{m/s}$ ]
$V_1^+$	2-porttisen järjestelmän porttiin 1 syötetty aalto [V]
$V_1^-$	2-porttisen järjestelmän portista 1 heijastunut aalto [V]
$V_2^+$	2-porttisen järjestelmän porttiin 2 syötetty aalto [V]
$V_2^-$	2-porttisen järjestelmän portista 2 heijastunut aalto [V]
$\hat{x}$	$x$ -suuntainen vektori
$\hat{y}$	$y$ -suuntainen vektori
$w$	materiaalin sisältämä vesimäärä [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\alpha$	vaimennusvakio signaalien etenemisessä
$\beta$	vaihevakio signaalien etenemisessä
$\gamma$	kompleksinen etenemisvakio
$\Gamma$	heijastuskerroin
$\Gamma_{\text{TE}}$	heijastuskerroin TE-polarisoituneelle aallolle
$\Gamma_{\text{TM}}$	heijastuskerroin TM-polarisoituneelle aallolle
$\delta$	tunkeutumissyvyys [m]
$\varepsilon$	permittiivisyys [ $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ ]
$\varepsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys [ $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ ]
$\varepsilon_{\text{eff}}$	aineen efektiivinen permittiivisyys [ $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ ]
$\varepsilon_r$	aineen suhteellinen permittiivisyys
$\varepsilon$	emissiviteetti
$\eta$	aaltoimpedanssi [ $\Omega$ ]
$\theta$	nousukulma (engl. elevation angle) [ $^\circ$ ]
$\theta_1$	saapuvan signaalin kulma [ $^\circ$ ]
$\theta_2$	läpäisevän signaalin kulma [ $^\circ$ ]
$\theta_3$	heijastuvan aallon kulma [ $^\circ$ ]
$\theta_B$	Brewsterin kulma [ $^\circ$ ]
$\lambda$	aallonpituus [m]
$\lambda$	materiaalien lämmönjohtavuus [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]
$\mu$	permeabiliteetti [ $\frac{\text{H}}{\text{m}}$ ]
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti [ $\frac{\text{H}}{\text{m}}$ ]
$\mu_r$	suhteellinen permeabiliteetti
$\rho$	varaustiheys [ $\frac{\text{C}}{\text{m}^3}$ ]
$\rho$	heijastuskerroin

$\rho$	nesteen tai aineen tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\varrho$	ominaisvastus [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]
$\sigma$	Stefan-Bolzmännin vakio [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ ]
$\sigma$	nesteen pintajännitys [ $\text{N}/\text{m}$ ]
$\tau$	läpäisykerroin signaalin edetessä aineessa
$\tau_{\text{TE}}$	läpäisykerroin TE-polarisoituneelle aallolle
$\tau_{\text{TM}}$	läpäisykerroin TM-polarisoituneelle aallolle
$\varphi$	horisontaalinen kulma (engl. azimuth angle) [ $^\circ$ ]
$\phi$	vektorikenttä
$\phi_1$	heijastuneiden aaltojen vaihe-ero [ $^\circ$ ]
$\phi_{cv}$	konvektion aiheuttama lämpövirta
$\phi_G$	FSS-rakenteen sivukeilojen sijainti [ $\text{rad}$ ]
$\omega$	kulmataajuus [ $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ]



OSA 1  
TYÖN TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Väitöstutkimuksen tarkoitus ja kohderyhmä

Tässä väitöstutkimuksessa on tutkittu asuinkerrostalojen ulkokuoren signaalivaimennusta nykyisten ja lähitulevaisuudessa käyttöön tulevien matkaviestinverkkojen taajuuksien näkökulmasta. Tätä muotoilua on käytetty myös tutkimuskysymyksen taustalla. Tarkemmin määriteltynä tutkimuskysymys on *Mitkä seikat vaikuttavat eri ikäisten elementtipohjaisten asuinkerrostalojen ulkokuoren RF-signaalivaimennukseen matkaviestinverkkojen käyttämällä taajuuksilla.*

Väitöstutkimuksesta muodostui tavallista tekniikan alojen väitöskirjaa selvästi pitempi, sillä tarkoituksena on antaa aiheeseen liittyvät perustiedot laajemmalle lukijakunnalle kuin on yleisesti tapana väitöskirjoissa. Vaikka tämä väitöstutkimus on ensisijaisesti opinnäytetyö, laaja-alaisuutensa vuoksi se mahdollisesti palvelee myös matkaviestinverkkojen suunnittelijoita, verkkojen rakentajia, asuintalojen rakentajia ja rakennuttajia, asuinalueiden kaavoittajia, virkamieskunnan edustajia, ulkoseinäremontteja suunnittelevien taloyhtiöiden edustajia ja luonnollisesti myös matkaviestinverkkojen käyttäjiä.

Tämä kirja on pituutensa vuoksi jaettu neljään osaan, jotka ovat seuraavat: 1. osa Työn tavoitteet ja lähtökohdat, 2. osa Asuinkerrostalojen ulkokuoren rakenneosat, 3. osa Radiosignaalit ja niiden mittausten menetelmät, 4. osa Tulokset, missä kuvataan työn aikana saadut tulokset.

Koska lukijakunta voi olla hyvin laaja ja omaa todennäköisesti hyvin erilaisen radiotekniikkaa, rakennustekniikkaa ja rakennusfysiikkaa koskevan perustietojen tason, on tässä teoksessa pyritty avaamaan radiosignaalien vaimentumiseen vaikuttavia erilaisia tekniikan ja rakennusfysiikan osa-alueita sekä teoreettisesti että käytännönläheisin tulkinnoin.

Asuinkerrostalojen ulkoseinien materiaaleissa tapahtuvan signaalien etenemisen ja vaimentumisen mittauksissa sekä tulosten käsittelyssä on teoreettinen tarkastelu rajattu perusteoriaan, joka muodostaa välttämättömän pohjan mittaustulosten analyttiselle tutkimiselle. Yhtenä väitöstutkimuksen tavoitteena onkin antaa mahdollisille rakennustuoteteollisuutta edustaville lukijoille kuvaus siitä, miten yksittäisten

rakennusmateriaalien tuotekehityksessä tulisi ottaa jatkossa huomioon myös materiaalien ja rakenteiden RF-vaimennukset.

Mikäli kotimaisten yritysten tuotekehityksessä onnistutaan luomaan uusiin innovaatioihin perustuvia ratkaisuja matkapuhelinverkkojen signaalien vaimennuksen pienentämiseksi, on niillä todennäköisesti mahdollisuuksia menestyä myös kaupallisesti ainakin Euroopan alueella. Tämä arvio perustuu luvuissa 2 ja 3 esiteltyihin tunnuslukuihin EU:n energiatehokkuusstrategista, asuntokannasta ja vanhojen asuntojen ulkoseinärakenteisiin kohdistuvasta korjaustarpeesta.

## 1.2 Väitöstutkimuksen sisällön jakautuminen

Tämä monografi jakautuu yhdeksääntoista lukuun, joista tämä johdanto on ensimmäinen. Väitöstutkimuksen toinen luku antaa lyhyen kuvauksen Euroopan maiden ponnistuksista ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja niiden kytkeytymisestä EU:n yhteiseen ilmastostrategiaan. Tämä strategia ohjaa jäsenmaiden sisäistä päätöksentekoa ja vaikuttaa myös asumisen ja asuintalojen energiatehokkuutta koskeviin vaatimuksiin. Energiatehokkuuden merkitys onkin muodostumassa koko ajan merkityksellisemmäksi myös rakentamisen ja asumisen alueella, joten se on otettava entistä enemmän huomioon myös rakennusmateriaalien kehittämisessä. Tässä väitöstutkimuksessa energiatehokkuuden käsittely linkittyy siihen, että energiatehokkuutta parantavien rakennusmateriaalien suunnittelussa ja käytössä tulisi ottaa huomioon myös materiaalien radiotekniset ominaisuudet.

Luku kolme esittelee asuntorakentamista koko EU:n näkökulmasta viimeisten vuosikymmenien aikana. Luvun tarkoitus on valottaa signaaliakuuluvuuden parantamiseen mahdollisesti syntyvien innovaatioiden markkina-alueen laajuutta.

Koska asumiseen liittyvässä energiatehokkuuden parantamisessa nojataan tavallisesti tietoon lämmön siirtymisestä materiaalien tai rakenteiden läpi, käydään luvussa 4 läpi lyhyesti lämmön siirtymisen perusmekanismit ja käsitteet. Luku 5 esittelee asuinkerrostaloissa viimeisimpinä vuosikymmeninä toteutettujen ulkoseinäratkaisujen tavallisimpia materiaalivalintoja. Koska suurin osa ulkoseinistä perustuu elementtiratkaisuihin, käsitellään luvussa 6 erikseen myös elementtien keskellä olevaa lämmöneristekerrosta. Eristekerrosta tarkastellaan tässä tutkimuksessa vain lyhyesti, vaikka sen merkitys energiatehokkuudelle on oleellinen. Lämmöneristeen vaikutus matkaviestinjärjestelmien signaalivaimennukseen on kuitenkin hyvin pieni, joten lämmöneristeiden tarkempi tutkiminen ei ole tämän väitöstutkimuksen varsinaista ydinsisältöä.

Luku 7 käsittelee ulkoseiniä rappausta. Rappaus on paitsi yleinen julkisivumateriaali asuinkerrostaloissa, se on myös RF-vaimennuksen kannalta erityisen mielenkiintoinen. Rappausta käytetään suurelta osin julkisivuremonteissa, joissa laajasti vaurioitunut seinän julkisivu uusitaan. Julkisivujen peruskorjausten yhteydessä usein päädytään käyttämään paksurappausta, joka tuetaan metallisella rappausverkolla. Tämä rappausverkko aiheuttaa luvussa 18 esiteltyjen tulosten mukaisesti merkittävän lisävaimennuksen erityisesti matkaviestinjärjestelmien matalammille taajuuksille. Langattomassa tiedonsiirrossa näiden matalampien taajuuksien käyttöön on ollut erityistä kiinnostusta erityisesti niiden paremman etenemisen vuoksi, joka johtuu yleisesti materiaalien pienemmästä vaimennuksesta matalammilla taajuuksilla. Matkaviestiteknologioiden käyttämiä taajuuksia käsitellään laajemmin luvussa 12, jossa pyritään välittämään lukijalle kuva taajuusalueiden muuttumisesta uusien teknologioiden vallatessa alaa vanhoilta, käytöstä vähitellen poistuvilta tekniikoilta.

Varsinaisten asuinkerrostalojen ulkokuoreen liittyvien yksittäisten rakenteiden ja materiaalien tarkastelu alkaa ikkunoista luvussa 9. Siinä esitellään tavallisimmat lasien ja ikkunoiden tyypit sekä lämmön siirtyminen ikkunoissa. Luvun lopussa esitellään ikkunoiden energiatehokkuutta parantavien selektiivipintojen (low-e-pinnoitteiden) rakenne ja toiminta. Ikkunoiden selektiivipintoihin mahdollisesti sovellettavat taajuusselektiiviset pintakuviointit, niin sanotut FSS-kuviot (Frequency Selective Surface) esitellään lyhyesti luvussa 10, ja FSS-rakenteen vaikutusta matkaviestinverkkojen signaalitasoihin tutkitaan kenttämittausten avulla luvussa 15. Nämä kenttämittaustulokset ovatkin yksi tämän väitöstitelmän esille tuomista uusista aiheista, sillä tähän asti muissa julkaisuissa FSS-kuvioiden toimintaa on tutkittu lähinnä simulaatioihin ja laboratoriotesteihin perustuvilla menetelmillä.

Luku 11 on tässä teoksessa antamassa taustatietoa luvussa 17 esitettyihin tuloksiin betonin kosteuden vaikutuksesta betonisandwich-elementin RF-vaimennukseen. Betonin kosteuden vaikutus on yllättävän suuri, ja tulosten valossa näyttää siltä, että tutkittaessa betonin vaimennusta on näytteen kosteus aina otettava huomioon. Luku 8 esittelee kosteuden liikettä materiaaleissa ja pyrkii antamaan kuvan siitä, miten materiaali kostuu ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta. Tässä kappaleessa on tutkittu kosteuden tunkeutumista aineeseen ja sen siirtymistä yleisesti eri materiaaleissa ottamatta erityisesti kantaa mitä rakennusmateriaalia tarkastellaan. Kappaleessa painotetaan materiaalin huokoisuuden merkitystä kosteuden siirtymisessä ja se antaa tarpeelliset taustatiedot luvuissa 17 ja 18 esiteltyjen mittaustulosten tulkinnoille.

Luvussa 8 esitetty kosteuden siirtyminen antaa taustaa sen arvioimiselle, mitä tapahtuu eri vuodenaikoina ulkoseiniä yleisimmässä materiaalissa eli betonissa. Luvun 8 jälkeen nouseekin esille kysymys; onko betoni huokoinen materiaali ja jos on, niin

milloin ja miksi huokoisuus syntyy? Tähän kysymykseen etsitään vastausta luvussa 11, jossa kuvataan betonin raaka-aineita, valmistusta, lisäaineita, kovettumista ja huokosrakennetta.

## 1.2.1 Radiotekniikan näkökulma

Koska tämän väitöstutkimuksen tarkoituksena on arvioida matkapuhelinverkkojen signaalien vaimenemista niiden edetessä asuinkerrostalon ulkokuoren läpi, on tarpeen kerrata lukijoille sähkömagneettisten aaltojen käyttäytymisen perusmekanismit, painottuen erityisesti radioaaltojen etenemiseen kerroksellisessa materiaalissa. Radioaaltojen etenemistä materiaaleissa ja materiaalien sähköisten parametrien mittaamista käsitellään luvuissa 13 ja 14. Radiotekniikan teorian osalta on käsittely pyritty rajaamaan siten, että väitöstutkimus antaa tarpeelliset tiedot esim. rakennustuoteteollisuutta edustaville henkilöille heidän mahdollisesti kehittäessään uusia, radiosignaaleita vähemmän vaimentavia tuotteita.

Teoksen luvut jakavat väitöstutkimuksen neljään loogiseen osaan, joista luvut 2–11 esittelevät rakennusten materiaaleja, rakennetta ja kosteusteknistä toimintaa, luku 12 johdattaa matkapuhelinverkkojen kehitykseen käytössä olevien taajuuksien ja teknologioiden kautta. Luvut 13 ja 14 kuvailevat materiaalien vaimennuksen taustalla olevat sähköiset parametrit sekä niiden mittaamisen ja luvut 15–18 esittelevät asuinkerrostalon ulkokuoren tavallisimpien rakenteiden sähköisten parametrien mittaustulokset. Luku 19 esittelee tiivistetysti väitöstutkimuksen tulokset ja laajentaa näkökulmaa tulosten merkityksestä yhteiskunnan eri osa-alueille.

Matkapuhelinverkkojen toimintaa tässä väitöstutkimuksessa ei käsitellä, osin teoksen pituuden rajaamiseksi ja toisaalta koska matkaviestinteknologiat ja niissä käytettävät taajuudet muuttuvat asuinrakennusten elinkaaren aikana, kuten luvun 12 perusteella voidaan todeta. Koska tarkastelun keskiössä ovat tässä väitöstutkimuksessa asuinkerrostalojen rakennusmateriaalit, niiden elinkaaren voidaan olettaa olevan huomattavasti pitempi kuin matkaviestinteknologioiden. Siksi radioteknisessä mielessä materiaaleja on tarkasteltu teknologiariippumattomasti, vain eri taajuuksien näkökulmasta.

## 1.3 Tutkimusalueen yhteiskunnallinen vaikutus

Koska matkapuhelinverkkojen käyttö on tunnetusti muuttunut ja laajentunut merkittävästi verrattuna perinteisiin puheyhteyksiä painottaneisiin verkkoihin, voidaan tämän väitöstutkimuksen aihealuetta perustellusti pitää yhteiskunnallisesti merkittävänä. Esimerkiksi kelpaavat erilaisten laskujen, pankkipalvelujen, viranomaispalvelujen, lääkäripalvelujen ajanvarausten yms. siirtyminen vain verkossa toimiviksi palveluiksi. Tämä kehitys yhdistettynä tosiasiaan, jonka mukaan yhä suurempi osa internetin käytöstä tapahtuu matkaviestinverkkojen päätelaitteiden avulla, kertoo matkaviestinverkkojen riittävän toimintavarmuuden merkityksestä. Matkaviestinverkkojen toiminta riippuu ratkaisevasti käytettävissä olevan signaalin tehostasosta, ja mikäli signaalitaso heikkenee rakennuksen ulkokuoren läpi kulkiessaan odotettua enemmän, ei signaalin taso enää riitä matkaviestinverkon päätelaitteen moitteettomaan toimintaan.

Aikaisemmin matkapuhelinverkkojen ajateltiin palvelevan lähinnä perinteisistä lankaliittymistä matkapuhelinverkkoon siirtyneitä puhelujä, mutta jo 2000-luvun alussa matkapuhelinverkoissa kulkeva datan määrä ylitti puheluiden aiheuttaman verkon kuorman. Tämä on syytä huomioida arvioitaessa matkaviestinverkkojen sisätilakuuluvuuden merkitystä eri sovellusten käytölle. Rakennusten sisätiloissa olevaa heikkoa signaalitasa ja puhelinyhteyksien huonoa laatua on laajasti arvosteltu. Tosiasiallisesti nykypäivänä ja lähitulevaisuudessa suurimmat haasteet liittyvät puheyhteyksien sijaan matkaviestilaitteiden käyttöön datansiirtoa vaativiin tarkoituksiin.

## 1.4 Kuuluvuusongelmien herättämä keskustelu

Matkapuhelinverkkojen kuuluvuusongelmat ovat nousseet yhä useammin esiin 2010-luvulla. Ensimmäisen kerran puhelinten heikon signaalitason aiheuttamat ongelmat nousivat laajemman keskustelun aiheeksi Tampereella sijaitsevan Vuoreksen asuntomessualueen pientalojen rakentamisen yhteydessä, jolloin ongelmien aiheuttajaksi nimettiin uudet, energiatehokkaat ikkunat. Varsin nopeasti kuitenkin todettiin ikkunoiden olevan vain yksi osa signaaleja väimentävässä rakennuksen ulkokuoressa, ja kuuluvuusongelmat lisääntyivät samaan aikaan nopeasti pientalojen ohella myös asuin-kerrostalojen uudistuotannossa.

Matkaviestinjärjestelmien kuuluvuusongelmien yleistymisen ajoittui samaan aikaan kun asunnoissa aikaisemmin olleista perinteisistä lankapuhelinliittymistä

luovuttiin ja toisaalta matkapuhelimien käyttö laajeni yhä enemmän erilaisten palvelujen käyttämiseen aikaisemman peruspuhelinkäytön sijaan.

### 1.4.1 Ministeriöt ovat ottaneet kantaa kuuluvuusongelmiin

Matkapuhelinkuuluvuudesta on ollut paljon keskustelua myös yhteiskunnallisena kysymyksenä. Siitä on osoituksena muun muassa matkapuhelinkuuluvuuden sisällyttäminen uudistettuun maankäyttö- ja rakennuslakiin, johon eduskunnan päätöksellä lisättiin 117 j §, jossa todetaan että ”Asuin-, majoitus- tai työtiloja sisältävän rakennuksen teknisten ratkaisujen on kustannustehokkuus huomioon ottaen mahdollistettava edellytykset matkaviestinten kuuluvuudelle sisätiloissa, ellei kysymyksessä ole rakennus, jonka sisätilakuuluvuutta on vaimennettava.” Samassa yhteydessä eduskunta näki matkaviestiverkkojen toiminnan niin tärkeäksi, että velvoitti ”ympäristöministeriön ja liikenne- ja viestintäministeriön laatimaan yhteistyössä tarvittavat säädökset siitä, että kansalaisten ja yhteiskunnan turvallisuuden kannalta välttämättömien yleisten matkaviestinverkkojen sisätilakuuluvuus asuinrakennuksissa varmistetaan rakentamisessa tarkoituksenmukaisella ja rakennuksen energiatehokkuuden ja muut olennaiset tekniset vaatimukset huomioon ottavalla tavalla.” (Valtioneuvoston julkaisu, 2020.)

Edellä mainittua lainmuutosta on edeltänyt laaja keskustelu, johon myös tämän teoksen kirjoittaja on osallistunut. Rakennusneuvos T. Lehtinen on koonnut ministeriöiden näkökulmasta selvityksen vuoteen 2016 mennessä erilaisista matkapuhelinkuuluvuuden kartoittamiseen liittyvistä toimista. (Lehtinen, 2016.) Sen jälkeen on matkapuhelinkuuluvuutta käsitelty erilaisissa työryhmissä. Kuuluvuuden merkitystä yhteiskunnan kannalta kuvaa liikenne- ja viestintävaliokunnan lausuntoon vuonna 2017 kirjattu toteamus; ”Matkaviestinverkkojen toimivuus on kansalaisille, yrityksille ja viranomaisille tänä päivänä välttämättömyys ja perustarve”, (Liikenne- ja viestintävaliokunta, 2017), joten valtionhallinnon tahtotila moitteettoman sisätilakuuluvuuden varmistamiseksi on ilmeinen.

## 1.5 Matkapuhelinverkoissa on paljon puheyhteyksiä

Vaikka edellä olevassa kappaleessa 1.3 todettiin puheluiden merkityksen vähentyneen matkapuhelinten käytössä, on kuitenkin muistettava, että puheluilla on edelleen



suuri merkitys. Tämä nousee esiin erityisesti pohdittaessa turvallisuuteen liittyviä kysymyksiä.

Turvallisuutta koskeva näkökulma liittyy erityisesti yhden hengen asuntokuntiin, joissa tapaturman tai sairauskohtauksen saaneen ihmisen on itse kyettävä hälyttämään apua. Asia koskee suurta ihmisryhmää, sillä yksin asuvien henkilöiden määrä on kasvanut viimeisten vuosien aikana tasaisesti ja yhden hengen talouksien osuus kaikista asuntokunnista oli noin 45 % jo vuonna 2019. (Tilastokeskus, 2020d.)

Ulkopuolista apua tarvitsevien, useimmiten ikääntyneiden, ihmisten kohdalla tämänhetkinen vallalla oleva käytäntö on kotihoidon suosiminen laitoshoidon sijaan. Käytännössä tämä näkyy niin, että ikääntyneet asuvat entistä pitempään kotona, ja yhä useammin yksin. Vanhusten sairauskohtausten sattuessa ensimmäinen avunpyyntö tavallisesti ohjautuu matkapuhelimesta hätäkeskukseen tai ainakin avunpyyntö kulkee matkapuhelinverkon välityksellä. Mikäli hätäpuhelua ei onnistuta soittamaan asunnon normaalien asuintilojen jokaisesta kohdasta, ollaan asukasturvallisuuden näkökulmasta perustavien kysymysten äärellä.

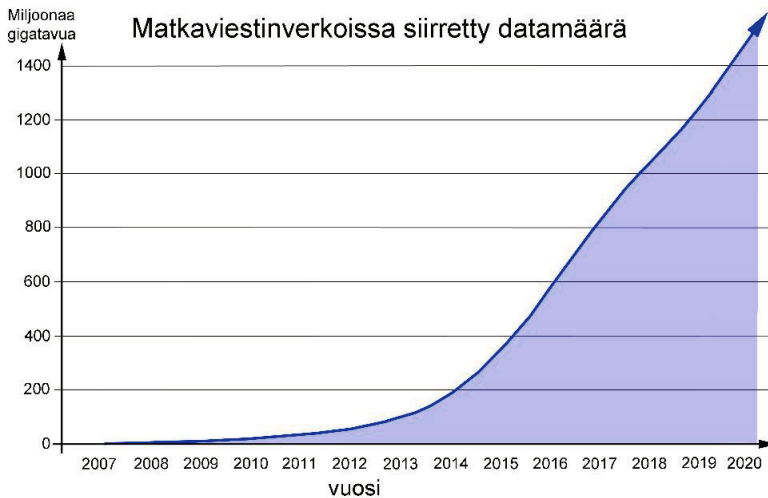
Toisaalta vaikka varsinaisia hätäpuheluja ei ajateltaisikaan, perustuvat ikääntyneiden ihmisten sosiaaliset kontaktit usein valtaosin puheluihin. Vaikka osa ikääntyneistä käyttääkin videopuheluja ja etäkokouksiin suunniteltuja tekniikoita, suuri osa yli 1,5 miljoonasta yli 60-vuotiaasta haluaa käyttää matkapuhelinverkon puheluita merkittävässä osassa sosiaalisia kontakteja, ellei suora kasvotusten tapahtuva kohtaaminen ole mahdollista. (Tilastokeskus, 2020a; Tilastokeskus, 2021b.)

Tässä yhteydessä voidaan tietysti todeta, että uudet verkkoteknologiat korjaavat vanhojen verkkojen puheluihin liittyneet ongelmat, kunhan verkot ja päätelaitteet yleistyvät. Tämä varmasti on totta, mutta on myös vahvaa näyttöä siitä, että ikääntyneet ihmiset eivät hanki uusia puhelimia. He kokevat älypuhelimet vaikeakäyttöiseksi ja kohtuuttoman hintaisiksi. Siksi suurella osalla ikääntyneistä on käytössään vain 2G- ja 3G -verkkoja hyödyntävät puhelimet, ja nämä puhelintyypit täyttävät monien käyttäjien tarpeet viestinnän osalta. (Honkanen, J., 2016.)

## 1.6 Datansiirto matkapuhelinverkoissa kasvaa nopeasti

Datansiirron kokonaismäärästä suurin osa on viihdekäyttöä, mutta entistä enemmän dataa käytetään erilaisten palvelujen hankkimiseen ja yhteyksiin viranomaisten, palveluntarjoajien ja pankkien kanssa. Tästä johtuen matkaviestinverkkojen luotettava toiminta onkin edellytys yhä moninaisempiin käytännön toimiin. Tästä esimerkkinä on mobiilivarmenteella tapahtuva tunnistautumisen erilaisiin järjestelmiin.

Suomalaisten keskuudessa datan siirtäminen matkapuhelinverkkojen välityksellä on ollut koko maailman mittaluokassakin poikkeuksellisen suurta. Tästä kertoo esimerkiksi jo vuonna 2016 koottu tilasto (Tefficient, 2016), eikä suunta näytä muuttuneen sen jälkeenkään. Toisesta lähteestä otettu kuva 1.1 perustuu Traficomin operaattoreilta vuoden 2020 loppuun mennessä keräämään data-aineistoon. Kuvassa näkyvä kehitys vastaa muissa julkaisuissa esitettyä kuvaa tähänastisesta tiedonsiirron kokonaismäärän muutoksesta, joten on oletettavaa, että kehitys jatkuu Suomessa samanlaisena myös tulevaisuudessa. (Traficom, 2021.)



**Kuva 1.1** Datansiirron kasvu matkaviestinverkoissa Suomessa. (Traficom, 2021)

Matkaviestimien käyttö on jo tälläkin hetkellä ensisijaisesti muuta kuin peruspuhelujen soittamista suurimmalla osalla väestöstä. Esimerkiksi tilastokeskuksen kokoaman aineiston mukaan internetiin kytkeydytään 82 % matkapuhelimella ja noin 42 % tablettitietokoneella (Tilastokeskus, 2020b) ja noin 70 % väestöstä on käyttänyt internetiä jonkun julkisen palveluntarjoajan tai viranomaisen lomakkeen täyttämiseen. Eniten matkapuhelimen avulla palveluja käyttävät nuoret ja työikäiset, sillä alle 65-vuotiaista noin 75 % väestöstä käyttää viranomaisten kanssa asiointiin internet-palveluja. (Tilastokeskus, 2021a.) Jos puhdas viihdekäyttö jätetään huomiotta, eniten internetiä käytetään pankkipalveluiden käyttöön, uutisten ja verkkolehtien selaamiseen ja sähköpostin käyttöön. Näihin osa-alueisiin käyttää jotakin internetin päätelaitetta yli 70 % alle 74-vuotiaista. (Tilastokeskus, 2020c.) Matkapuhelimien käyttö on muuttunut vuosien 2020 ja 2021 aikana myös etätyöskentelyn yleistymisen vuoksi.

## 1.7 Taajuudet matkaviestinverkoissa ovat kasvussa

Niin kuin aikaisemmin kappaleessa 1.2.1 todettiin, tässä väitöstutkimuksessa käsitellään matkaviestinverkkojen signaaleja vain niiden käyttämien taajuuksien näkökulmasta. Eri taajuuksilla tapahtuva erilainen radiosignaalin vaimeneminen on keskeinen osa matkapuhelinverkkojen suorituskyvyn arviointia, ja uusien matkaviestimien teknologioiden kehittäminen perustuu pääsääntöisesti entistä korkeampien taajuuksien käyttöönottoon. Korkeampien taajuuksien käyttö johtuu kahdesta syystä; ensiksikin matalia taajuuksia ei ole enää vapaana ja toisaalta uudet ja nopeammat yhteydet vaativat entistä leveämmän vapaan taajuuskaistan.

Rakennusmateriaalien radiosignaalien vaimennuksen tutkiminen eri taajuuksien näkökulmasta on perusteltua siksi, että eri taajuusalueet eivät ole samanarvoisia signaalivaimennuksen ja matkaviestinjärjestelmien näkökulmasta. Matalat taajuudet yleensä tarjoavat matkapuhelinteknologiolla laajemman peittoalueen, sillä ne etenevät rakenteiden läpi pienemmällä vaimennuksella. Korkeampien taajuuksien peittoalue on pienempi suurempien materiaalivaimennusten vuoksi mutta korkeammilla taajuusalueilla on enemmän nopeampien yhteyksien vaatimaa vapaata taajuuskaistaa. (GSMA, 2017.)

## 1.8 Tämän väitöstutkimuksen näkökulma

Ihmisten toimintaympäristössä tapahtuva kehitys, jossa matkaviestimien teknologiat vanhenevat paljon nopeammin kuin rakennusten materiaaleja on mahdollista muuttaa, jossa lankaliittävät poistuvat, jossa väestö asuu yhä pitempään yksin mahdollisesti vain GSM-tekniikkaa käyttävän matkapuhelimen varassa ja jossa asuinkerrostalojen signaalivaimennukset kasvavat, aiheuttaa vaikeasti ratkaistavan ongelmavyyhdin.

Tässä väitöstutkimuksessa on lähestytty edellä mainittua ongelmakenttää tarkastelemalla syitä, jotka mahdollisesti aiheuttavat odotettua suuremman radiosignaalien vaimennuksen asuinkerrostalojen ulkovaipan alueella.

Tämän väitöstutkimuksen alkuperäinen tarkoitus oli etsiä mahdollisia selityksiä kappaleessa 1.9.3 esitetyille edellisten tutkimustulosten johtopäätökselle, jonka mukaan vanhemmissa asuinkerrostaloissa ulkokuoren RF-vaimennus on noin 13 dB:ä pienempi kuin uudemmissa vastaavissa rakennuksissa. Yksinkertaisin selitys vaimennuksen huomattavaan eroon on ikkunoihin 1990-luvusta alkaen nopeasti yleistyneet selektiivikalvot, jotka tunnetusti vaimentavat radiosignaaleja noin 20 dB:n verran. Tarkemmassa tarkastelussa tämä selitys ei kuitenkaan vaikuttanut täysin kattavalta,

sillä ikkunaremonttien jälkeen vanhoissa kerrostaloissa vaimennukset eivät edelleenkään vastanneet täysin uusien asuintalojen vastaavia arvoja. Tämä antoi aiheen olettaa, että myös ulkoseinien rakenteet tai materiaalit ovat vuosikymmenien aikana muuttuneet. Ulkoseinien materiaalien tutkimus aloitettiin tutkimalla erilaisten betonityyppien signaalivaimennuksia itse valmistettujen betoninäytteiden avulla, ja tuloksissa näytti olevan merkittäviä eroja erilaisilla betoneilla. Samalla tuli ilmi betonin valmistuksessa käytetyn vesimäärän ratkaiseva vaikutus betoninäytteen signaalivaimennukseen eri taajuuksilla. Tämän havainnon jälkeen nousi esiin luonnollinen kysymys; missä määrin betonin kosteus vaikuttaa käytännössä ulkoseinäelementin RF-vaimennukseen? Tätä tutkittiin erityisesti kuivattamalla betoninäytteet ja kastelemalla ne sen jälkeen hallitusti täysin märäksi. Eri kosteusarvoilla suoritettujen betoninäytteiden vaimennusmittausten tulokset osoittivat betonin vaimennuksen riippuvan merkittävästi materiaalin kosteudesta. Tämä lopputulos jäisi irralliseksi toteamukseksi, ellei pohdintaa jatkettaisi käytännön tilanteiden arviointiin. Silloin aihepiiriin liittyviä merkittäviä kysymyksiä olisivatkin seuraavat: Millä mekanismeilla betonin kosteus vaihtelee, millainen on ulkoseinän oletettavissa oleva suurin kosteus ja miten pitkiä aikoja betoniseinän voidaan olettaa olevan kostea? Kosteuden ajallinen kesto kiinnostanee erityisesti operaattoreita, sillä jos on osoitettavissa, että ulkoseinien vaimennus on suuren osan vuodesta oletettua korkeampi, tulee matkaviestinverkkojen suunnittelussa aikaisemmin käytettyjä mitoitusperusteita korjata.

Koska ulkoseinärakenteen rakennusfysikaaliset ilmiöt ovat oma tieteenalansa, päädyttiin tässä työssä esittelemään lähinnä täysin kuivan ja täysin märän betonin tarjoamat ääripäät erilaisten betonilaatujen signaalivaimennuksille eri taajuuksilla. Taustateorian avulla pyrittiin antamaan lukijoille kuvan niistä tekijöistä, jotka kastelevat ulkoseiniä ja miten kosteus siirtyy betonirakenteessa. Aikaisemmissa julkaisuissa on betonin signaalivaimennusta käsitelty vain betonin paksuuden ja sen raudoituksen vaikutuksen näkökulmasta, kosteuden vaikutus on jäänyt huomioimatta. Tämä seinärakenteiden signaalivaimennuksen herkkyyks betonin rakenteelle ja kosteuden vaikutukselle on uusi aihe tutkimuskentässä, ja tästä temasta oletettavasti syntyy jatko-tutkimusta.

Käytännön lähtötilanteesta käynnistyi myös tämän väitöstutkimuksen toinen uutta tutkimustietoa tuottanut osa, jossa tutkittiin rappauksen ja rappausverkon vaikutusta asuinkerrostalojen seinävaimennuksiin. Ennen tätä tutkimusta oli havaittu, että joissakin vanhemmissa asuinkerrostaloissa ennen ulkoseinien peruskorjausta matkapuhelimien kuuluvuudessa ei ollut ongelmia, mutta ongelmat alkoivat välittömästi ulkoseinäkorjauksen jälkeen. Tämä ei kuitenkaan tapahtunut säännönmukaisesti, vaan näennäisen sattumanvaraisissa kohteissa. Ongelman aiheuttajaksi paljastui

rappausverkko, jota tässä työssä tarkastellaan sekä mittausten että simulaatioiden avulla. Rappausverkkoa ei muissa julkaisuissa ole käsitelty signaalivaimennuksen kannalta, vaikka verkkomaista rakennetta on käytetty signaalin vaimentamiseen muissa yhteyksissä. Näissä sovelluksissa verkon silmäkoko on ollut rappausverkon silmäkoko huomattavasti pienempi.

Uusi avaus tässä väitöstutkimuksessa on myös ikkunoiden puuosien vaikutuksen arviointi ikkunan RF-vaimennusta tarkasteltaessa. Vaimennusta tutkittaessa suoraan ikkunarakennetta kohti edenneen signaalin kannalta puuosilla ei ole merkitystä, mutta signaalin edetessä viästossa kulmassa saattaa ikkunarakenteeseen muodostua reitti, joka tarjoaa signaalille polun paljon muita lasituksen osia pienemmällä vaimennuksella.

## 1.9 Työhön liittyneet tutkimushankkeet, yhteistyökumppanit ja tehdyt tieteelliset julkaisut

Tämä väitöstutkimus kokoaa yhteen osan pitkällisen tutkimussarjan tuottamista tuloksista. Seuraavassa on esitelty mittaushankkeita, jotka yhdessä antavat kuvan asuintaloissa esiintyvien matkapuhelinkuuluvuuden ongelmien syihin liittyviin tutkimusprojekteihin, joissa allekirjoittaja on ollut mukana. Luvun seuraavissa alikappaleissa on esitelty tarkemmin myös työn aikana kirjoitetut tieteelliset julkaisut, jotka lyhyesti listattuna aikajärjestyksessä ovat seuraavat:

1. Vuoreksen messualueen pientalojen seinävaimennukset, kappale 1.9.1 (Asp, Sydorov, Valkama, & Niemelä, 2012)
2. Asuinkerrostalojen ulko/sisäsignaalitasot, kappale 1.9.3 (Asp, Sydorov, Kesikikastari, Valkama, & Niemelä, 2014)
3. Ikkunoiden FSS-kuvion suunnittelu ja mittaukset, kappale 1.9.4 (Asp, Baniya, Yunas, Niemelä, & Valkama, 2015)
4. Sisäantenniverkkojen intermodulaatio, kappale 1.9.5 (Asp, Yunas, Kilpeläinen, Niemelä, & Valkama, 2016)
5. Erilaisten betonilaatujen RF-vaimennukset, kappale 1.9.6 (Asp et al., 2019b)
6. Betonin RF-vaimennusten riippuvuus materiaalin kosteudesta, kappale 1.9.6 (Asp et al., 2019a)
7. Rappausverkon vaikutus pinnoitteen RF-vaimennukseen, kappale 1.9.6 (Asp, Hujanen, Huhtinen, Pikkuvirta, & Valkama, 2020).

### 1.9.1 Mittaukset Vuoreksen asuntomessualueella

Ensimmäinen matkapuhelinten kuuluvuusongelmiin liittyneiden yksittäisten tutkimushankkeiden sarjassa oli Tampereen Vuoreksen asuntomessualueen pientalojen ulkoseinien mittausprojekti, jonka rahoittajana toimivat puhelinoperaattorit. Näissä lähinnä omakotitaloihin painottuneissa mittauksissa todettiin ikkunoiden vaimennusten olevan aikaisemmin oletettua muutaman desibelin signaalivaimennusta huomattavasti suurempia uudemmilla, selektiivikalvolla varustetuilla, ikkunoilla. Samassa yhteydessä todettiin alumiinipäällysteisten polyuretaanipohjaisen lämmöneristelevyjen suuret signaalivaimennukset. Nämä mittaukset toteutettiin sekä mittausten että tulosten analysoinnin osalta yhdessä Yaroslav Sydorovin kanssa ja tuloksista kirjoitettiin konferenssijulkaisu. (Asp et al., 2012.)

### 1.9.2 Tutkimushanke polyuretaanisten lämmöneristelevyjen signaalivaimennuksesta

Asuntomessualueen mittausten tulosten julkaisemisen jälkeen aloitettiin tutkimushanke Suomalaisen lämmöneristevalmistajan kanssa, ja jonka tuloksena hahmoteltiin käytännöllinen ratkaisu pientaloissa käytettävän polyuretaanilevyn signaalivaimennuksen pienentämiseksi. (Kingspan, 2016.) Tässäkin työssä mittaukset ja tulosten analyysi tehtiin yhdessä Yaroslav Sydorovin kanssa.

### 1.9.3 Rakennusteollisuuden laaja mittauskampanja

Matkapuhelinsignaalien vaimennusta rakennusten ulkokuoren osalta tutkittiin Rakennusteollisuus Ry:n rahoittamassa laajassa tutkimushankkeessa, jossa verrattiin rakennusten sisäpuolisia signaalitasoja ulkopuolella olevaan kentänvoimakkuuteen kymmenissä suomalaisissa asuintaloissa. Tästä työstä kirjoitettiin laaja raportti sekä konferenssijulkaisu. (Asp et al., 2014; Asp, Sydorov, Kesikastari, & Niemelä, 2013.) Tässä tutkimushankkeessa kirjoittaja toimi vastuututkijana. Mittauskampanja oli merkittävä, sillä yksi sen keskeisimmistä tuloksista osoitti uusien ja vanhempien asuinkerrostalojen ulkokuorien vaimennuksen eron olevan noin 13 dB:ä sekä 900 MHz:n että 2100 MHz:n taajuuksia käyttävillä matkapuhelinverkoilla. Tämä tulos oletetaan tunnetuksi tässä väitöstutkimuksessa esitettävien analyysien yhteydessä.

## 1.9.4 FSS-kuvion toiminnan arviointiin keskittynyt tutkimushanke

Rakennusteollisuus Ry:n tutkimushaketta seurasi joukko pienempiä tutkimusprojekteja rakennustuoteollisuuden toimijoiden kanssa. Selektiivikalvolla varustettujen ikkunalasiain vaimennuksen pienentämistä taajuusselektiivisen kuvion avulla tutkittiin yhdessä Anil Baniyan kanssa, joka kirjoitti aiheesta diplomityönsä allekirjoittaneen ohjauksessa. Tämän tutkimuksen tuloksiin viitataan tämän kirjan luvussa 15 ja aiheesta kirjoitettiin konferenssijulkaisu. (Asp et al., 2015.) Tässä tutkimushankkeessa taajuusselektiivisen rakenteen peruskuvio ja mitoitus tehtiin yhdessä Baniyan kanssa, samoin kuin kenttämittaukset. Rakenteen simuloinneista vastasi Baniya.

## 1.9.5 Muita pienempiä hankkeita

Tämän jälkeen kirjoittaja on osallistunut lukuisiin matkapuhelinten sisätilakuuluvuutta koskeviin työryhmiin, joista näkyvin on ehkä Rakennustiedon ja muiden toimijoiden kanssa yhteistyössä kirjoitettu RT-kortti matkaviestintakuuluvuuden huomioidemisesta kaavoituksessa ja rakennuksen suunnitteluvaiheessa. (RT 80-11252, 2017.) Tässä julkaisussa allekirjoittaja on toiminut käsikirjoittajana. Rakennusten suunnitteluvaiheeseen liittyy myös mahdollisen rakennuksen sisäverkon tarpeen arviointi, ja matkapuhelinverkkojen signaalitasoja parantavan sisäverkon antennien sijoittelun haasteita on tutkittu yhdessä Syed Yunasin ja Vili Kilpeläisen kanssa passiivista intermodulaatiota käsittelevässä julkaisussa. (Asp et al., 2016.) Matkapuhelinten kuuluvuusongelmat koskettavat yhä useammin myös ikääntyneitä kansanosaa heidän asuessaan uusissa kerrostaloissa. Monet kotona asumista tukevat älyteknologiaan perustuvat ratkaisut käyttävät tiedonsiirtoon matkapuhelinverkkoja, ja tästä johtuen allekirjoittaja osallistui vuonna 2017 myös ikääntyneiden asumista koskevan selvityksen laatimiseen. (Ympäristöministeriö, 2017a.) Yhteistyö ympäristöministeriön kanssa on ollut tiivistä ja allekirjoittaneen tuottamat taustaselvitykset on otettu huomioon maankäyttö- ja rakennuslain muotoilussa.

## 1.9.6 LuxTurrim-tutkimusprojekti

Edellä esitettyjen tutkimusprojektien jälkeen seuraava suurempi hanke oli osallistuminen laajaan Business Finlandin rahoittamaan LuxTurrim-projektiin, jossa allekirjoittaja toimi rakennusmateriaalien vaimennusta tutkivan työpaketin vetäjänä yhdessä ikkunateollisuutta edustaneen Marko Mökkösen kanssa. Tässä tutkimushankkeessa

tuotettiin suuri osa tässä kirjassa esiteltävistä tuloksista. Projektissa ikkunoiden lasien tutkimuksesta vastasivat lähinnä Lammin Ikkunat Oy ja Aalto Yliopisto, mutta muiden materiaalien tutkimus tehtiin yhteistyönä diplomityöntekijä Tuomo Hentilän ja VTT:n tutkijoiden Arto Hujasen ja Ismo Huhtisen kanssa. Nämä muut tutkitut materiaalit olivat betoneita, eristeitä ja rappausmateriaaleja. Työnjako useimpien materiaalien osalta jakautui niin, että näytteiden valmistus ja mittaussarjojen suunnittelu kuului Tampereen Yliopistolle ja mittausten toteutus VTT:n tutkijaryhmälle. Tämä työnjako perustui siihen, että VTT:llä oli näytekappaleiden mittauksiin tarvittava foku-soiviin antenneihin perustuva mittausjärjestelmä valmiina projektia aloitettaessa. Tulosten analysointi tehtiin Tampereen Yliopiston ja VTT:n yhteistyönä. Edellä kuvattu yhteistyö tuotti erilaisten betonilaatujen vaimennusta koskevan julkaisun (Asp et al., 2019b), betonin kosteuden vaikutusta rakenteen vaimennukseen käsittelevän julkaisun (Asp et al., 2019a) ja rappausverkon vaikutusta kuvaavan julkaisun (Asp et al., 2020). Ikkunoiden puuosien käyttäytymistä RF-signaalien näkökulmasta koskevat simulaatiot toteutti VTT:n Matti Somersalo allekirjoittaneen määrittämien rakennemitoitusten ja parametrien pohjalta.



## 2 ILMASTONMUUTOS

Tämän väitöstutkimuksen ensimmäinen osa alkaa ilmastonmuutoksen arvioinnista, mutta ei niinkään sen etenemisen kiistanalaisuudesta tai nopeudesta, vaan sen vaikutuksesta energiatehokkuusvaatimuksiin eri elämän alueilla. Päähuomio on tässä tutkimuksessa luonnollisesti rakentamiseen liittyvien sääntöjen ja määräysten kiristymisessä, erityisesti rakennusten ulkovaippojen energiatehokkuuden alueella. Yleinen huoli ilmaston muuttumisesta antaa perusteet arviolle, jonka mukaan energiatehokkuuden vaatimukset eivät tule ainakaan lähitulevaisuudessa lieventymään. Päinvastoin, viime aikoina järjestetyissä kansainvälisissä tapaamisissa äänenpainot ovat olleet aikaisempia tiukempia vaadittaessa enemmän ja konkreettisempia toimia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Onkin odotettavissa muiden muassa rakennustuoteteollisuudelta jälleen uudenlaista innovaatioiden sarjaa, jonka taustalla on pyrkimys tuoda markkinoille energiatehokkuutta entisestään parantavia yksittäisiä rakenneosia ja ratkaisuja. Samalla kuitenkin tulee ottaa huomioon myös muut rakennusmateriaaleille asetettavat vaatimukset, jotka nekin muuttuvat ympäröivän yhteiskunnan kehittyessä. Esimerkiksi kelpaavat rakennusmateriaalien radioaaltojen vaimennukseen liittyvät ominaisuudet, joiden merkitys korostuu koko ajan uusien ja entistä korkeampia taajuuksia käyttävien matkaviestinteknologioiden tullessa markkinoille.

Ennen asuinkerrostalojen ulkovaipan ja rakenteiden RF-vaimennuksiin paneutumista on kuitenkin syytä luoda lyhyt katsaus ilmastonmuutoksen nykytilaan ja sen aiheuttamaan tarpeeseen arvioida rakenteiden energiatehokkuutta entistä kriittisemmin.

### 2.1 Ilmastonmuutoksen havaitseminen

Ilmastonmuutos havaittiin laajemmin jo 1970-luvulla ja sen vaikutusten arvioinnista koko ihmiskuntaan järjestettiin ensimmäinen konferenssi 1979. Sen jälkeen seuraava merkittävä ympäristökokous pidettiin Rio da Janeirossa 1992, jossa perustettiin erityinen YK:n ilmastosihteeristö ja luotiin pohjaa Kioton sopimukselle. Kansainvälinen yleissuunnitelma ilmastomuutoksen torjumiseksi (United Nations Framework

Convention on Climate Change (UNFCCC)) tuli voimaan jo vuonna 1994. Siinä kirjattuna tavoitteena on vakauttaa kasvihuonekaasut ilmakehässä tasolle, joka ei vielä aiheuta vaaralliseksi katsottavia muutoksia ilmastoon. (Taalas, 2021.)

## 2.2 Kioton sopimus

Kioton sopimus on yksi merkittävimmistä kokouksista ilmaston muutoksen torjumisen historiassa, sillä se oli ensimmäinen, joka velvoitti valtiot luomaan strategian kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi ja noudattamaan laatimaansa suunnitelmaa. Päätöslauselmaa edelsi pitkä keskustelu siitä, voidaanko ylipäättään todeta, että ilmasto muuttuu ja onko muuttuminen seurausta ihmisen toiminnasta. Tästä tulkinasta päästiin yhteisymmärrykseen ja pöytäkirja hyväksyttiin Kiotossa joulukuussa 1997. Voimaan pöytäkirja tuli vasta 16. helmikuuta 2005. Pöytäkirja velvoittaa allekirjoittajamaita tarkkailemaan ja vähentämään erityisesti kasvihuonepäästöjään ja tarkaraja asetettiin tuolloin vuoteen 2020. Kioton pöytäkirjaa sovelletaan kuuteen kasvihuonekaasuun: hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>), typpioksidi (N<sub>2</sub>O), fluorihilivedyt (HFC), perfluorihilivedyt (PFC) ja rikkiheksafluoridi (SF<sub>6</sub>). Suurin mielenkiinto on tähän mennessä kohdistunut hiilidioksidiin, sillä sen määrän muutoksella selittyy noin 60 % ilmaston lämpenemisestä, ja sen määrän lisääntymisen on yleisesti todettu johtuvan ihmisen toiminnasta. (Rao & Riahi, 2006.) Myös muihin kuin hiilidioksidipohjaisiin kasvihuonekaasuihin kiinnitetään nykyisin yhä enemmän huomiota, sillä näiden kaasujen määrän hillitseminen on taloudellisesti helpompaa kuin hiilidioksidin (Rao & Riahi, 2006).

Kioton kokouksessa päädyttiin tuomaan käyttöön uusi termi (Common but Differentiated Responsibilities and Respective Capabilities (CBDR–RC)), joka tunnustaa yksittäisten valtioiden erilaiset mahdollisuudet ja kyvyt torjua ilmastonmuutosta. Pöytäkirjan liitteeksi muotoiltiin lista ”ryhmään 1 kuuluvista maista” ja ”ryhmään 1 kuulumattomista maista”. Käytännössä kehittyneet maat erotettiin kehitysmaista. Sopimuksen päätöslauselmassa kehittyneiden maiden katsotaan olevan kyvykkäämpiä vähentämään päästöjään, ja toisaalta ne ovat historian aikana tuottaneet eniten kasvihuonekaasuja. (Taalas, 2021.)

Pöytäkirjan jako eri ryhmiin, joilla on erilaiset velvoitteet, toivat kuitenkin nopeasti ongelmia. Esimerkiksi kelpaa Kiina, jonka talous on noussut hyvin nopeasti, ja joka nykyisen tilanteensa perusteella luokiteltaisiin kehittyneisiin maihin. Kiina on myös vastuussa suuresta osasta kokonaishiilidioksidipäästöistä. Vuoden 2017

tilastoinnissa Kiinan tuottamat hiilidioksidipäästöt olivat noin 28 % koko maailman päästöistä, kun samassa tilastossa koko Euroopan osuus oli 12,5 %. (BP statistical, 2019.)

## 2.3 Pariisin sopimus

Ilmastonmuutoksen käsittelemiseksi laajemmin neuvoteltiin niin sanottu Pariisin sopimus, joka hyväksyttiin 2015. Tämä vuonna 2016 voimaan tullut sopimus edellyttää kaikilta osapuolilta ilmastonmuutoksen hillitsemistä ja siihen sopeutumista vuoden 2020 jälkeen. Pariisin sopimuksen tavoitteena on rajoittaa globaalin keskilämpötilan nousu alle 2 asteeseen, ja jatkaa pyrkimyksiä tämän nousun hillitsemiseksi 1,5 asteeseen. Tavoitteeksi on kirjattu myös lisätä sopimuksen osapuolilta kykyä sopeutua ilmastonmuutoksen haitallisiin vaikutuksiin. Suuressa kuvassa tavoitteena on edetä tiellä kohti selvästi vähäisempiä kasvihuoneilmiötä kiihdyttäviä päästöjä ja kehittää kestävää ilmastopolitiikkaa. (EU parlamentti, 2020.)

Ilmastonmuutoksen yhtenä vakavimpana syynä pidetään kasvihuonekaasuja, joista merkittävin on hiilidioksidi. Jotta ilmastonmuutos saataisiin taittumaan, olisi hiilen osalta saavutettava nopeasti ns. hiilineutraalisuus. Sillä tarkoitetaan tilannetta, jossa hiilen sitoutuminen hiilinieluihin on yhtä nopeaa kuin hiilen vapauttaminen ilmakehään. Hiilieliksi nimitetään kaikkia järjestelmiä, jotka kykenevät sitomaan hiiltä enemmän kuin ne vapauttavat. Merkittävimpiä hiilinieluja ovat metsät, valtameret ja maaperä. Nykyisen arvion mukaan em. luonnolliset nielut kykenevät poistamaan noin 9–11 Gt hiilidioksidia vuodessa. Ongelmana on, että vuotuiset hiilidioksidipäästöt ovat paljon suuremmat. Vuonna 2017 hiilidioksidipäästöjen määrän arvioitiin olevan noin 37 Gt, eli noin kolme kertaa niiden poistumista suuremmat. (Taalas, 2021.)

Tällä hetkellä luonnolliset nielut ovat ainoita, jotka kykenevät laajassa mitassa poistamaan hiilidioksidia ilmakehästä. Tilannetta vaikeuttavat vielä nyt jo nähtävissä olevat ilmastonmuutoksen vaikutukset, jotka kuivuuden vuoksi altistavat suuret metsäalueet metsäpaloille. Tämä luonnollisesti vähentää hiilinielujen määrää, ja toisaalta samaan aikaan vapauttaa metsiin jo varastoitunutta hiiltä ilmakehään. (EU parlamentti, 2019.)

Ilmastokokousten henkenä ja strategiana on ollut ajatus, jonka mukaan ilmastonmuutoksen torjuntaan sitoutuneet maat asettavat viiden vuoden välein omat tavoitteensa ja niiden on tarkoitus tiukentua aina uuden tarkistuskierroksen yhteydessä. Aikaisempien sopimusten allekirjoittajamailta odotettiin päivityksiä

omiin tavoitteisiinsa vuoden 2020 aikana. Tavoitteiden tiukentamisella on ainakin kansalaisten tuki, sillä EU:n oman tutkimuksen mukaan 92 % eurooppalaisista on yhtä mieltä kasvihuonekaasujen minimoinnin tarpeellisuudesta. (EU komissio, 2019.)

Hiilineutraalisuuden nähdään olevan ainoa kestävä tie maapallon lämpenemisen rajoittamiseksi 1,5 asteeseen, ja neutraalisuus on saavutettava vuoteen 2050 mennessä. Tavoite on ollut nähtävissä jo pitkään, ja se on muun muassa kirjattu Pariisin sopimukseen, jonka allekirjoittajina on 195 maata.

Marraskuussa 2018 Euroopan komissio esitteli EU:lle pitkän aikavälin strategian ilmastonutraalin talouden saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä, ja kesäkuussa 2019 EU:n johtajat kehottivat EU-maita ja komissiota edistämään työtä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja varmistaa siirtyminen ilmastonutraaliin EU:iin Pariisin sopimuksen mukaisesti. (EU parlamentti, 2019.)

EU on ilmoittanut sitoutuvansa hyvin tiukkaan ja kunnianhimoiseen ilmastopoliitiikkaan. EU:n parlamentti on 3.10.2019 ilmoittanut tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 40 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna. (EU parlamentti, 2020.)

Euroopan parlamentti esitti maaliskuussa 2019 antamassaan päätöslauselmassa myös tätä kirjoitettaessa kunnianhimoiselta vaikuttavaa päästövähennystavoitetta vuodelle 2030, jonka avulla olisi mahdollista päästä hiilineutraalin Eurooppaan vuoteen 2050 mennessä. Tällä hetkellä kaksi EU-maata on asettanut ilmastonutraalisuuden tavoitteen osaksi omaa kansallista lainsäädäntöään: Ruotsi pyrkii saavuttamaan nollapäästöt vuoteen 2045 mennessä ja Ranska vuoteen 2050 mennessä. (EU parlamentti, 2020.) Englanti on ilmoittanut ottaneensa saman tavoiteaikataulun kuin Ranska. (EU parlamentti, 2020.)

## 3 EU:N JA SUOMEN ASUNTOKANNAT

### 3.1 Katsaus EU:n asuntokantaan

Tässä väitöstutkimuksessa näkökulma on kaupunkien asuinkerrostalojen sisätiloissa vaikuttavissa signaalinvoimakkuuksissa erilaisilla matkaviestinverkkojen taajuuksilla tilanteissa, jossa signaali tulee rakennuksiin sisälle talojen ulkopuolelle sijoitetuista tukiasemista. Kysymys on siis rakennusten ulkovaippon signaalivaimennuksesta.

Koska signaalien vaimennukseen vaikuttavat oleellisesti rakentamisessa käytetyt materiaalit ja rakenteet, on yleiskuvan saamiseksi aiheellista tarkastella ensin koko Euroopan kerrostalorakentamista ja siinä tapahtuneita muutoksia viimeisten vuosikymmenien aikana. Asuntokannan tarkastelun ulottaminen koko Eurooppaa koskevaksi selittyy tässä teoksessa sillä, että matkaviestiverkkojen toiminta ja käytettävät teknologiat ovat yhtenäistä koko Euroopan alueella, joten matkaviestinjärjestelmien kuuluvuusongelmatkin todennäköisesti kohtaavat lähitulevaisuudessa yhä useampia maita. Luomalla lyhyt yleiskatsaus Euroopan asuntokantaan on mahdollista arvioida myös matkapuhelinkuuluvuutta parantavien mahdollisten innovaatioiden markkina-alueiden laajuutta.

Tämän luvun lopussa huomio keskitetään Suomen kerrostalorakentamisen aikaan-kausiin ja kerrostalo- ja asuntotyyppien muuttumiseen. Tämän tarkastelun motiivina on selkeyttää kuvaa talojen sisäisestä rakenteesta, ja auttaa ymmärtämään asunnoissa tapahtuvan signaalitason vaihtelua.

Kerrostalorakentamisen muutosten pääsiallisina motiiveina on ollut sekä rakennustuotannon tehostuminen, kaupunkeihin suuntautuneen muuttoliikkeen aikaansaama asuntopula ja toisaalta erityisesti 1970-luvulle sijoittuneen ensimmäisen öljykriisin aiheuttamat paineet rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi. Energiatehokkuuden parantaminen on noussut 2000-luvulla keskeiseksi tavoitteeksi lähes kaikilla elämän alueilla, ja tämä näkyy vahvasti myös rakennussektorilla. Erityisesti on huomattava, että uudisrakennustuotannon ohella myös korjausrakentamisessa tavoitteena on tavallisesti tilojen lämmitykseen tarvittavan energiamäärän minimoiminen. Usein on jopa niin, että merkittävä osa ulkoseinien ja ikkunoiden peruskorjauksien rakenne- ja materiaalisuunnittelusta perustuu energiakustannuksiin ja niihin liittyviin laskelmiin investoinnin takaisinmaksuajasta. (Heljo & Vihola, 2012.)

Koska laajojen peruskorjausten osalla uusien, remontin yhteydessä asennettävien materiaalien energiatehokkuusvaatimukset vastaavat uudisrakennusten materiaalmääräyksiä, tulevat myös vanhojen talojen ulkokuorien materiaalit muuttumaan peruskorjauksien yhteydessä. Vanhojen talojen yhteydessä rakennuksen ulkoseinän rakenne ei kuitenkaan vastaa uusien rakennusten seinää, sillä edes peruskorjauksissa seinää ei vaihdeta kokonaan. Sisimmät rakenteet jäävät aina paikoilleen ja vain uloimmat kerrokset uudistetaan. Tuloksena on usein monikerroksinen seinärakenne, jossa on päällekkäin uusia ja vanhoja materiaaleja ja jonka todellista RF-vaimennusta on sen vuoksi haastavaa arvioida. (Kouhia, Nieminen, & Pulakka, 2010; Lahdensivu, Annala, & Pikkuvirta, 2016a; Vinha et al., 2013.)

Yleisesti on havaittavissa, että energiatehokkuusvaatimusten tiukentuessa myös rakennustuoteollisuus pyrkii vastaamaan mahdollisimman nopeasti ja tehokkaasti omilla tuotteillaan markkinoiden muuttuviin vaatimuksiin. Tämän seurauksena energiatehokkailla tuotteilla on rakennusteollisuudessa etulyöntiasema ja selvä kilpailuetu. Kilpailuetu on olemassa vaikka itse tuotteiden yksikköhinta olisi hieman muita vastaavia tuotteita korkeampi. Energiatehokkaissa rakennustuotteissa tai rakenteissa on kuitenkin toisinaan yksittäisiä rakenneosia tai pintoja, jotka vaimentavat radiosignaaleja merkittävästi. Energiatehokkaita rakennuksia on helppo rakentaa ilman että radiosignaalit vaimenevat rakenteissa kohtuuttomasti, mutta uudisrakennuksen tai peruskorjauksen suunnitteluvaiheessa on aina syytä arvioida materiaalien RF-vaimennuksia samaan tapaan kuin muitakin materiaalien aiheuttamia vaikutuksia kokonaisrakenteen toimivuuteen.

### 3.1.1 Euroopan vanha rakennuskanta

Edellä kerrotun perusteella on syytä luoda lyhyt katsaus koko Euroopan alueen rakennuskantaan, sillä sen ikäjakauma auttaa arvioimaan rakennuksissa käytettyjä materiaalivalintoja ja toisaalta arvioimaan peruskorjausten tarvetta ja siinä yhteydessä mahdollisesti tapahtuvaa signaalinvaimennuksen muuttumista. (Fabbri, 2017.)

Euroopan rakennuskannan energiatehokkuudella on huomattava vaikutus kasvi-huonekaasujen vähentämisessä, sillä Euroopan alueella rakennuskanta käyttää noin 40 % kokonaisenergian kulutuksesta, energiamielessä tehottomia on 75 % taloista, ja rakennuskannasta korjataan vuosittain vain noin 1 %. (Fabbri, 2017.)

Suurimmassa osassa Euroopan maista 20–39 % koko asuntokannasta on rakennettu ennen toista maailmansotaa. Tästä keskiarvosta suurin poikkeus on Suomi, jossa tämän ikäisiä rakennuksia on vain 10 %. Sodan ja ensimmäisen, 1970-luvulla

esiin nousseen, öljykriisin välillä rakentaminen kiihtyi voimakkaasti ja noin kolmasosa koko Euroopan rakennuskannasta on peräisin tältä ajalta. (Meijer, Itard, & Sunikka-Blank, 2009.)

## 3.2 Sodan vaikutus asuinrakennuksiin

Sodan vaikutusta on tarkasteltava koko Euroopan mittakaavassa, vaikka paikalliset vaihtelut olivat tietysti huomattavan suuria. Euroopassa oli laajoja alueita, jotka käytännössä säästyivät sodan vaikutuksilta kokonaan, ja toisaalta jotkut kaupungit tuhoutuivat lähes täydellisesti. Seuraavassa esitetään muutamia tunnuslukuja, jotka kuvaavat sodan jälkeistä asuntotilannetta. Vuonna 1939 Euroopan alueella arvioitiin olevan noin 65 miljoonaa asuntoa, ja määrä lisääntyi vuosittain noin 820 000 asunnolla. Sodan aikana asunnoista kuitenkin tuhoutui Euroopassa arviolta 2 800 000 asuntoa täysin, ja 2 900 000 vaurioitui osittain. Sodan loppuessa oli siis noin 5,7 miljoonaa käyttökeltotonta asuntoa asumiskäyttöä ajatellen. Ihmisiä menehtyi toisen maailmansodan aikana noin 6 miljoonaa, ja vuonna 1949 ihmisten määrä oli palautunut vuoden 1939:ää vastaavaan määrään, eli noin 243 miljoonaan. (Meijer et al., 2009.)

## 3.3 Jälleenrakentaminen

Sodan jälkeisen jälleenrakentamisen aikana asumisen tasoa pyrittiin parantamaan ja pienentämään yhteen huoneeseen sijoitettavaa henkilömäärää. Osa ennen sotaa rakennetuista asunnoista oli selvästi epäterveellisiä, ellei jopa vaarallisia. Näiden peruskorjausvaatimusten ja sodan aikana tuhoutuneiden asuntojen korjaaminen vaati noin 11 miljoonan asunnon lisärakentamisen tarvetta nopealla aikataululla. Toteutunut vuosittainen asuntotuotanto oli tuolloin noin 960 000 asuntoa. (Dodd, 2018.)

Taustana tälle voimakkaalle rakennustoiminnan vilkastumisen vaatimukselle oli sodan raunioittamien kaupunkien jälleenrakennus ja voimakas muuttoliike kaupunkeihin. Sotien jälkeen sijoittuva ajanjakso oli kuitenkin rakentamisen näkökulmasta poikkeuksellinen, sillä rakentamisen tarve oli suuri, mutta materiaaleista oli jatkuva pula. Näiden kahden ristiriitaisen tekijän seurauksena materiaaleiksi hyväksyttiin muitakin kuin varsinaisia rakennusmateriaaleja ja tämä näkyi paitsi vaihtelevana laatuna, myös pakon sanelemina poikkeuksellisina rakenneratkaisuuina. (Meijer et al., 2009.)

Jälleenrakentamisen aikana valmistuneiden rakennusten yhteisenä piirteenä on melko heikko eristystaso ja siksi näille rakennuksille on tällä hetkellä laaja korjaus-tarve. Tavallisesti tuon ajan seinien perusrakenne perustui paikalla tehtyyn tiilimuu-raukseen, jossa vaikeasti saatavia tiiliä yritettiin mahdollisuuksien mukaan korvata muilla saatavissa olevilla materiaaleilla. 1950-luvulla havahduttiin tilanteeseen, jossa paikalla tehtävä tiiliseinän rakentaminen oli paitsi hidasta, myös liian paljon työvoi-maa vaativaa toimintaa. Tästä johtuen etsittiin tapaa tuottaa kustannustehokkaasti kokonaisia seinä yhdellä kertaa. Ratkaisuksi löydettiin betonin käyttö, jossa valamalla kyettiin tuottamaan kokonaisia seinäelementtejä kerralla. Vaikka betonin valaminen johti vääjäämättä kohti standardoitua rakentamista, olivat alkuvaiheen betoniseinät keskenään ja eri kohteissa hyvin erilaisia. Betoniseinän perusrakenne oli tavallisesti paikalla valettua ns. kevytbetonia, jossa raudoituksen osuus oli vaihtelevaa. Usein raudoitus jätettiin kokonaan pois. Tämä kehityskulku oli nähtävissä koko sodanjäl-keisen Euroopan alueella, koska koko maanosa kärsi sodan jälkeisestä asuntopulasta ja materiaalien saatavuusongelmista. (Meijer et al., 2009.)

### 3.4 Rakentaminen alkaa harmonisoitua Euroopassa

Jälleenrakentamisen aikana asuntopula oli vakava lähes kaikissa Euroopan kaupun-geissa ja kaikkialle vaadittiin tehokkaasti tuotettuja kaupunkiympäristöön sopivia asuintaloja. Suunnittelun ja rakentamisen nopeuttamiseksi päätettiin aloittaa toimet seinärakenteiden suunnittelun yhdenmukaistamiseksi.

Vuonna 1957 Euroopan unionin jäsenmaat sopivat Rooman sopimuksessa kau-pan esteiden poistamisesta, joka liittyi myös rakennustuotannon materiaaleihin ja me-netelmiin. Erot kansallisissa rakenteiden suunnittelumenetelmissä oli yksi näistä pois-tettavista esteistä. 1970-luvulla perustettiin komposiittirakentamisen sekakomitea valmistelemaan yhdenmukaisempaa eurooppalaista säännöstöä. Se toimi enimmäk-seen ranskaksi ja saksaksi, mutta pian sen jälkeen, kun Yhdistynyt kuningaskunta liit-tyi Euroopan unioniin, sen työkieli muuttui englanniksi. Pian koko Eurocode-työ tehtiin englanniksi. Koodit käännettiin sen jälkeen ranskaksi ja saksaksi. (Johnson, R.P., 2007.)

Öljykriisin jälkeen, vuosina 1970–1990, rakennetut asuinrakennukset edustavat useimmissa Euroopan maissa noin neljännestä koko rakennuskannasta. Poikkeuksia ovat Ranska ja Alankomaat, joissa tällä ajanjaksolla rakennetuilla asuinrakennuksilla on noin 35 prosentin osuus koko rakennuskannasta. Suomessa tämän aikakauden rakennuksia on yli 43 prosenttia. Uusien, vuoden 1990 jälkeen rakennettujen,

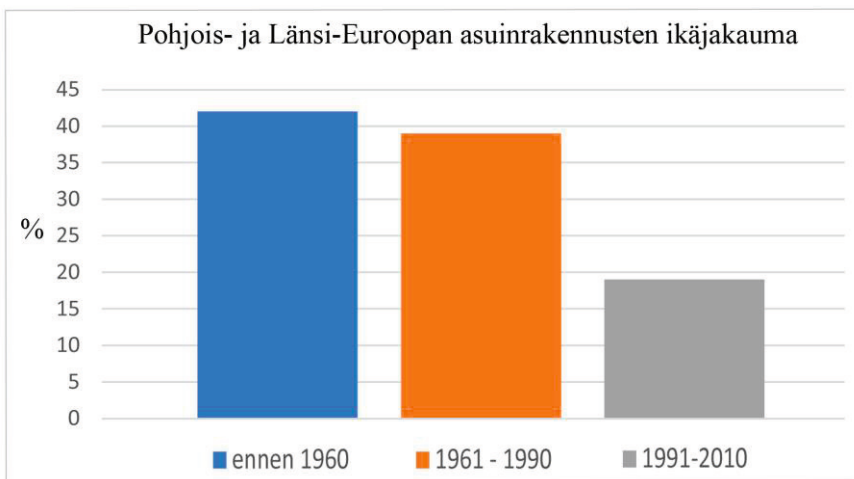


asuntojen keskimääräinen prosenttiosuus on 14 % koko rakennuskannasta ja vaihtelee Euroopassa yleisesti maasta riippuen 8 prosentista 22 prosenttiin. (Economidou, 2011; Fabbri, 2017.)

EU:n alueella kaikista rakennuksista 75 % on erilaisia asuinrakennuksia, joista puolestaan 64 % on useamman perheen asuttamia taloja ja 36 % omakotitaloja. Useamman perheen asuttamat talotyypit voidaan jakaa erikseen kerrostaloihin, joita on asuinrakennuksista noin 35 % ja erilaisiin pari- rivi ja kytkettyihin talotyyppisiin, jotka muodostavat loput asuinrakennusten kokonaismäärästä. (Economidou, 2011.)

Asukkaiden jakautumisesta edellä mainittuihin talotyyppisiin on vaikea saada luotettavaa kuvaa, sillä useissa maissa muuttoliike maaseudulta kasvukeskuksiin on edelleen kiivasta. Ääripäinä voidaan todeta, että Englannissa ja Irlannissa noin 90 % väestöstä asuu omakotitaloissa ja Espanjassa näyttäisi asuminen on keskittynyt useamman perheen asuttamiin rakennuksiin, jolloin omakotitalossa asuvien osuus väestöstä on noin 30 %. Suomessa omakotiasuminen edustaa noin 65 % kaikkien kansalaisten asumismuodoista.

EU:n alueella olevien asuinrakennusten ikäjakaumasta on saatavissa hieman erilaisia tilastoja, mutta suuruusluokka on kaikissa samanlainen. Usean perheen taloista, joista suurin osa on kaupunkien tai esikaupunkien kerrostaloja, suurin osa on vanhoja. Esimerkiksi BPIE:n tilastossa (Economidou, 2011) kuvassa 3.1, näkyy, että ennen vuotta 1960 valmistuneiden talojen määrä on ylivoimaisesti suurin.



**Kuva 3.1** Asuinrakennusten ikäjakauma EU:n alueella. (Lähde: Economidou, 2011, muokattu)

Asuintaloista noin 35 % on kerrostaloja, tosin tilanne vaihtelee eri maiden osalta hyvin paljon. (Economidou, 2011.) Vuonna 2018 yli neljä kymmenestä henkilöstä (46,0 %) EU:n jäsenmaiden alueella asui kerrostaloasunnoissa, lähes viidennes (18,6 %) paritaloissa ja hieman yli kolmasosa (34,7 %) omakotitaloissa. (Eurostat, 2020.)

### 3.5 Suomen asuntokanta

Tässä kappaleessa tarkastellaan Suomen asuntorakentamista ja tarkoituksena on arvioida erilaisten ja eri aikakausina rakennettujen määrää. Tämä määrällinen arviointi auttaa luomaan käsitystä siitä, miten suuressa roolissa eri ikäiset ja rakenteeltaan erilaiset asuinkerrostalot ovat matkaviestinverkkoja suunniteltaessa ja mahdollisten kuuluvuusongelmien yleisyyttä arvioitaessa.

Kohdistettaessa tarkastelu kansalliseen asuntokantaan, voidaan todeta, että kerrostalorakentaminen Suomessa alkoi käytännössä 1870-luvulla, pääasiallisesti Helsingissä. Talot olivat tyyliltään kopioituja Euroopan suuremmista kaupungeista. Samalla vuosikymmenellä kerrostalorakentaminen levisi Suomen suurimpien kaupunkien keskustoihin. Turkuun ensimmäinen asuinkerrostalo valmistui kauppatorin laidalle ja Tampereella keskustorin kupeeseen.

Talojen rakenteellista suunnittelua hoitivat ensimmäisissä kerrostaloissa arkkitehdit ja myöhemmin myös ansioituneet rakennusmestarit, jolloin vanhoissa rakennuksissa onkin nähtävissä vahva käsityön leima. Tällä selittyy se, että vanhimmat asuinkerrostalot ovat ratkaisuiltaan erilaisia, vaikka aikakauden yleiset piirteet ovat erotettavissa myös rakenteissa. 1800-luvulla valmistuneita taloja on Suomessa jäljellä vähän, eikä niissä ei ole rakenteellisesti erotettavissa yhtä vallitsevaa tyylisuuntaa. Monikerroksisen rakentamisen osuus rakennustuotannosta oli kuitenkin kaupunkien keskustoissakin vielä pieni, esimerkiksi Helsingissä yksikerroksisia taloja oli vuoteen 1880 valmistuneista taloista 75 %. Vanhoille monikerroksisille asuinrakennuksille yhteisenä piirteenä tämän väitöstutkimuksen näkökulmasta on kuitenkin paksu ulkoseinä rakenne, joka on kivisen sokkelin päälle rakennettu paksu tiiliseinä. Tiiliseinän ulkopinta on tavallisimmin rapattu. Rappaus oli tyypillisesti sileä rappauspinta, joskin 1870-luvulla tehtiin ensimmäisiä kokeiluja roiskerappauksella. Radiosignaalin näkökulmasta on todettava vielä, että välipohjat olivat puurakenteisia kellarikerroksia lukuun ottamatta. Niissä oli tavallisesti rakenteena tiiliholvi, jotka oli tuettu rataaksoilla. (Hannula, 2007.)

## 3.6 Asuinkerrostalojen perustyyppit

Asuinkerrostalot yleensä jaetaan rakenteensa osalta kahteen perustyyppiin, joita ovat pistetalo ja lamellitalo. Pistetalon tunnusmerkkinä on lähellä rakennuksen massakeskipistettä oleva porraskäytävä, jonka ympärille sijoittuvat erilaiset asuntotyypit. Talosta muodostuu rakenteensa vuoksi yleensä tornimainen, jonka kerrostasojen pohjien muoto on lähellä neliötä. Talo on tyypillisesti hieman erillään muista ympäröivistä rakennuksista.

Lamellitalo on pitkänomainen rakennus, jota voidaan ajatella useita pistetaloja liitettyinä yhteen. Käytännössä lamellitalossa on useita erillisiä porraskäytäviä, jolloin usein isompien asuntojen määrä oli rajoitetumpi. Tämä johtuu siitä, että isommat asunnot ovat lähes aina niin sanottuja läpitalon huoneistoja, ja niitä voi olla luonnollisesti vain rakennuksen päissä.

Kiivaimman rakennusvaiheen aikana, 1970-luvulla, matalahkot lamellitalot olivat kustannustehokkaita rakentaa, sillä kolme tai neljä kerroksisiin taloihin ei ollut välttämätöntä rakentaa hissiä. Nykyisin hissien rakentamista ei voi kiertää kerrosmäärää rajoittamalla, ja porraskäytävien suunnittelusta onkin tullut eri tavoitteiden optimointia. Yhteen kerrostasanteeseen on edullista sijoittaa mahdollisimman monta asuntoa, jolloin hissien kustannuksien jakoon osallistuvien määrä kasvaa. Toisaalta kerrostasanteen venyttäminen johtaa tilanteeseen, jossa käytävämaiseksi venyneen portaikon molemmille puolille sijoittuu useita pieniä asuntoja, joissa ikkunat ovat vain yhteen ilmansuuntaan. Samassa yhteydessä myös erilaisten asuntojen määrän keskinäinen suhde muuttuu, ja tuloksena on paljon pieniä asuntoja ja talojen päissä sijaitsevat muutamat, selvästi muita isommat asunnot. (Hannula, 2007.)

## 3.7 Korttelit

Rakennusten yhteydessä on myös huomattava, että vanhojen kerrostalojen asemakaavakuva noudatteli korttelin muotoja ja katujen sijoittelua kaupunkikuvaan. Tällöin muodostui hyvin tiiviitä umpikortteleita, joissa talo muodosti sisäpihaa ympäröivän yhtenäisen rakennusmassan. Tämä rakennusmuoto on omiaan aiheuttamaan haasteellisen ympäristön sellaisille radioverkoille, joilla verkkotekniikka perustuu talon ulkopuolella sijaitseviin tukiasemiin. Esimerkkinä umpikortteleista on alla oleva kuva 3.2, joka on ilmakuva Tampereen Amurin kaupunginosasta. (Tampereen kaupunki, 2018.)



**Kuva 3.2** Umpikorttelien periaate kaupunkikuvassa. (Lähde: Tampereen kaupunki, 2018, muokattu)

Kuvassa 3.2 näkyy Tampereen Amurin kaupunginosaan eri aikakausina rakennuttuja asuinkerrostaloja, joiden sijoittelu ympäristöön kuvastaa kulloisenkin vuosikymmenen kaavoituksen henkeä. Kuvan oikeanpuoleisessa osassa näkyy melko väljästi sijoiteltuja piste- ja lamellitaloja, joiden kattaminen matkaviestinverkkojen signaaleilla on yksinkertaista. Näiden talojen valmistuminen sijoittui ajallisesti noin 1970- ja 1980-luvuille. Vasemmalla kuvassa on ympyröity kaksi aikaisemmin, noin 1950-luvulla valmistunutta umpikortteliin perustuvaa taloryhmää, joiden ulkoseinät seuraavat korttelin rajoja. (Tampereen kaupunki, 2018.)

Näissä taloryhmissä matkapuhelinverkkoihin perustuvissa radiojärjestelmissä on suunnittelun alueella paljon enemmän haasteita, etenkin pienien, talon sisäpihaan suuntautuneiden asuntojen osalta. Tasaisen signaalitason luomiseksi koko talon alueelle, tulisi talon sisäpihalle asentaa monissa tapauksissa oma pienitehoinen tukiasemansa.

Umpikorttelien suosio näyttää useiden vuosikymmenien jälkeen nousevan nykyisin uudestaan, sillä eri puolilla Suomea on käynnissä useita umpikorttelimaisen rakentamisen kaavoittamisen tai ainakin alustavan suunnittelun projekteja. (Hämeenlinnan kaupunki ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy, 2013; Heinänen, 2014.)

## 3.8 Jälleenrakentaminen Suomessa

Energiätehokkuuden näkökulmasta sodan jälkeen rakennettu rakennuskanta on erityisen ongelmallista. Ennen sotaa rakennetuissa tiilirakennuksissa paksu seinäpinta

muodosti hyvän lämmöneristeen, sillä vanhat tiilet sisälsivät jo itsessään paljon lämmöneristeen tavoin toimivaa ilmaa. Betonirakenteen syrjäyttäessä paksun tiiliseinäraakenteen, ei suunnittelun lähtökohtana ollut mahdollisimman hyvä lämmöneristystaso, eikä jälleenrakennuksen aikana ollut saatavissa edullisia ja laadukkaita lämmöneristemateriaaleja. Näiden syiden vuoksi ensimmäisten 1950- ja 1960-luvuilla rakennettujen betonitalojen eristystaso on alun perin ollut jopa vanhempia tiilirakennuksia heikompi. Kuitenkin uudet betonin käyttöön perustuvat menetelmät saavuttivat nopeasti suuren suosion, sillä se antoi mahdollisuuden rakentaa seinärakenteet valmiiksi talon ulkopuolella, kuljettaa ne rakennukselle oikeaan aikaan ja pystyttää seinät nosturia käyttäen. Tavoitteena oli suorittaa kaikki rakentamisen vaiheet niin nopeasti ja halvalla kuin mahdollista. (Hannula, 2007.)

Rakentamisen toteutuksessa tapahtui erityisesti noin 1950-luvulla oleellinen muutos, jolla on ollut ratkaiseva merkitys talojen muodoille, rakenteelle ja materiaaleille useiksi vuosikymmeniksi. Tämä muutos oli yksinkertaisesti suurien rakennusliikkeiden syntyminen. Juuri rakennusliikkeiden koon kasvaminen mahdollisti betonielementtien teollisen sarjatuotannon alkamisen. Tämän entistä tehokkaamman ja nopeamman rakennustuotannon kehittyminen vaati tuekseen myös systemaattista kaupunkisuunnittelua ja kaavoitusta. Näin syntyi toimintamalli, jossa rakennusliikkeet hankkivat kokonaisia maa-alueita uusia esikaupunkialueita varten. Koska kaupunkien omat organisaatiot olivat sotien jälkeen henkilömääriltään ja muiltakin resursseiltaan vaatimattomat, siirtyivät perinteiset kaupunkien velvollisuudet aluerakentamisen osalta suurelta osin rakennusliikkeille itselleen. Erityisen haasteellisen tilanteesta teki rakennusvalvonnan ja laadunvalvonnan ajautuminen omavalvonnaksi rakennusliikkeille.

Koska muuttoliike ja kaupungistuminen jatkui kiivaana, oli vapaista asunnoista jatkuva pula. Tämä yhdistettynä vielä sodanjälkeisen jälleenrakentamisen ajan materiaalien epävarmaan saatavuuteen, tuloksena oli usein laadultaan vaihtelevaa rakentamista. (Hannula, 2007.)

Samaan aikaan ulkoseinien ratkaisuihin minimalismin ihanne alkoi nousta esiin ja koristeellisten yksityiskohtien määrää alettiin rajoittaa osana uutta arkkitehtonista ajattelutapaa. Tämä suuntaus sopi luonnollisesti hyvin yhteen sarjatuotannon tavoitteiden kanssa, jolloin etuna nähtiin tehokkuuden ja taloudellisuuden lisäksi myös materiaalien ja työajan säästöt. Ajan henki oli vastaanottavainen myös pelkistettyjen pintojen näkymiselle ulospäin, jolloin uutta rakentamista kuvaavien betonielementtien ulkopinta jätettiin usein ulkonäkösystä paljaalle betonipinnalle. (Bilby, 2017.)

1960-luvulle tultaessa oli betonirakentaminen jo tiilirakentamista yleisempää ja elementtitekniikan kehitystyö intensiivistä. Suurin muutos oli paikallavalun sijaan

muotin tekeminen sisähalleissa täytettäväksi, jolloin märkätyövaiheet siirtyivät suojaan ulkona vaikuttavilta olosuhteilta ja säiden vaihteluilta. Vakio-olosuhteet lisäsivät tuottavuutta, mutta myös paransivat elementtien laatua. Myös raudoituksen tekeminen helpottui, ja raudoitus saatiin asennettua tarkemmin oikeille paikoilleen. Suurin yksittäinen etu oli kuitenkin puhtaasti tuotannollinen, sillä suurissa sisähalleissa voitiin valaa ja valmistaa elementtejä ympäri vuoden, ilman että pakkaset tai sateet keskeyttivät toimintaa. (Hannula, 2007.)

Vakio-olosuhteet pienensivät seinäelementtien välisiä laatueroja, mutta myös aiheuttivat tarpeen käyttää samoja muotteja uudelleen. Tämä puolestaan johti seinäelementtien mittojen vakioitumiseen ja arkkitehtien ja rakennusinsinöörien toteuttamaan määrittelyn niin sanotulle standardielementille. Vuonna 1967 luonnosteltiin betonituotteille perusmoduli 3M, jonka kerrannaisina suunniteltiin lähes kaikki peruselementit. 1960-luku oli todellista rakentamisen kulta-aikaa, sillä erityisesti vuosikymmenen loppupuolella valmistui Suomessa uudisrakennuksia enemmän kuin milloinkaan aikaisemmin. Paineet tuotannon tehostamiseksi olivat kuitenkin vielä olemassa, sillä merkittävää kustannuseroa ei vielä saatu perinteiseen paikallavaluun verrattuna. (Niskanen, 2016.)

Haasteeksi nousi elementtirakentamisen saralla 60-luvun lopulla yhä kovemmaksi noussut kritiikki monotonista rakentamista ja jäykkiä pohjaratkaisuja kohtaan. Standardoitu rakentaminen, samanlaisina toistuvat rakenteet ja pitkät valmistussarjat rajoittivat tilojen suunnittelua. Samanaikaisesti myös asukkaiden tarpeet monipuolistuivat. Erityisesti perheiden asumisväljyyden osalta tapahtui voimakas muutos, ja yhä useammin lapset saivat kerrostaloissa oman huoneensa. Arkkitehdit eivät kuitenkaan enää voineet paljontaan vaikuttaa talojen perusrakenteeseen, sillä teollisen sarjatuotannon tarjoama taloudellisuus nähtiin yleisesti kaikkein tärkeimpänä arvona. Koko rakennustuotanto nojasi tyyppilamellitaloon, jonka perusrakenteen määrittivät rakennusliikkeiden ja elementtitehtaiden suunnittelemat standardit. (Sundqvist, 2019.)

### 3.9 Kerrostalorakentaminen 1970-luvulla

1970-luvun asuinkerrostalojen rakentamista hallitsivat esikaupunkialueille sijoitetut osaelementteihin tai täysiin elementteihin perustuneet kirjahyllyrunkoiset lamellitalot. Ulkoseinät perustuivat jo pääosin elementteihin, mutta kantavien väliseinien osalta turvaututtiin vielä paikan päällä valettuihin ratkaisuihin. 1970-luvun edetessä alkoi BES-järjestelmän (BetoniElementtiStandardi) laajempi käyttö, joka mahdollisti rakenteissa pidempien jänneväliden käytön, jolloin kantaviksi väliseiniksi riittivät

asuntojen väliset väliseinät. BES-järjestelmä oli uusi, ja se helpotti ja nopeutti talojen suunnittelua. Asunnoissa olevat väliseinät tehtiin BES-pohjaisissa taloissa useimmiten puu- tai metallirunkoihin perustuvina levyrankaseininä, joissa ei käytetty eristeitä. Pintalevyt olivat useimmiten kipsikartonkilevyä, lastulevyä tai selluloosalevyä. (Betoniteollisuus ry, 2009.)

Arkkitehtoniselta kannalta 1970-luvun taloissa näkyi tuotantokeskeisyys, jolloin asuinkerrostalojen yleisilme näkyi monotonisena ruutuelementtien sarjana. Ikkunoiden koot yhtenäistyivät mm. aravaohjeistuksen vuoksi, sillä näin saavutettiin sarjatuotannossa kustannussäästöjä. Julkisivujen pinnoite oli usein pelkkää maalattua betoniseinää, mutta paljon käytettiin myös kivirouhepinnoitusta ja pesubetonipintoja.

Itse betonielementtien laadussa oli paljon hajontaa. Yleisimmät laatuvirheet olivat seurausta kustannussäästöistä ja rakennusteknisten tietojen puutteista. Elementtejä kuivattiin lämpökäsittelyssä, joka näkyi myöhemmin heikentyneenä laatuina. Toinen yleinen virhe oli betoniin sisällytettyjen raudoitusten ruostumisvaaran vähätteleminen, ja tilannetta pahensi raudoituksen asentaminen liian lähelle elementin ulkopintaa. 1970-luvulla betonin pakkasenkestävyyttä parantavia huokostimia ei vielä yleisesti käytetty, ja tuloksena oli useissa rakennuksissa seuraavilla vuosikymmenillä havaittavat laajat ulkoseinäelementtien pintavauriot. (Lahdensivu, 2012.)

Ikkunoiden osalta 1970-luku merkitsi muutosten aikaa, sillä 1960-luvulla tavallisin ikkuna oli yksiruutuinen, kaksilasinen ikkuna, jonka sivussa oli 20–30 senttimetriä leveä tuuletusluukku. Ikkunat vielä 60-luvulla olivat usein niin sanottuja nauhaikkunoita, mutta niiden suosio väheni melko nopeasti niiden vaatiman käsityön määrän vuoksi. Nauhaikkunat korvautuivat suorakaiteen muotoisilla yksittäisillä ikkunoilla, jotka oli mahdollista asentaa ruutuelementtiin jo elementtitehtaalla. Ikkunoiden karmit ja muut puuosat petsattiin tai käsiteltiin puunsuoja-aineilla. 1970-luvulle sijoittunut energiakriisi kohdisti huomion ikkunoiden energiatehokkuuteen ja sen seurauksena ikkunoiden keskimääräinen koko pieneni ja ikkunoihin tuli kolmas lasipinta. Ikkunoiden paikka määräytyi ulkoseinäelementtien valmistustekniikan sanelemana keskelle ruutuelementtiä, ja ikkunoiden koko rajoitettiin 17 %:iin huoneiston kokonaispinta-alasta. Näiden rajoitusten jälkeen mahdollisuus vaikuttaa asuinkerrostalojen ilmeeseen ikkunoiden avulla oli hyvin pieni. (Sundqvist, 2019.)

### 3.10 Kerrostalorakentaminen 1980- ja 1990-luvuilla

1980-luvun alusta lähtien asuntoja rakennettiin runsaasti, sillä rahamarkkinoilla tapahtunut vapautuminen mahdollisti kotitalouksien omistusasunnon hankinnan.

Aikaisempaan asuinkerrostalojen nopean rakentamisvauhdin tilanteeseen verrattuna rakennettujen talojen tyyppi muuttui. Rakentamisen huippuvuosina 1970-luvun alussa rakennettiin pääasiassa asuinkerrostaloja (noin 65–70 % koko asuntotuotannosta), mutta 1980-luvun lopun rakentaminen painottui pientaloihin, noin 65–70 % osuudella. (Vainio, 2008.)

1980-luvun lopulla ilmeni ennen lamaa tapahtunut talouden ja varsinkin rakentamisen ns. ”ylikuumeneminen”, koska muihin kuin kiinteeseen omaisuuteen sijoittaminen koettiin yleisesti epävarmaksi. Tämän vuoksi asuntojen kysyntä nousi nopeasti, joka johti asuntojen hintojen jyrkkään nousuun ja inflaatioon. 1990-luvun alkuun sijoittui bruttokansantuotteen nopea lasku, ja aikaisemmin vallinnut asuntojen suuri kysyntä vaihtui nopeasti koko rakennusalaan koskeneeseen lamaan. Rakennusurakoitsijoille jäi paljon myymättömiä asuntoja ja se johti lukuisten konkurssien sarjaan. Rakentamisen lamaa kuvaa aloitettujen asuntojen rakentamisen lukumäärä, joka on viimeisten vuosikymmenien ajan ollut keskimäärin noin 30 000 asunnon vuositasolla. Vuonna 1995 aloitettujen asuntojen lukumäärä laski 18 000:een. Tilanne normalisoitui kuitenkin 1990-luvun loppuun mennessä. (Vainio, 2008.)

Uudisrakentaminen keskittyi 1980- ja 1990-luvuilla edellisten vuosikymmenien tapaan kasvukeskuksiin, mutta asuntotuotannon tarpeet olivat alkaneet muuttua. Väestönkasvun osuus uudistuotannon tarpeesta pienentyi noin 20 %:iin, ja kolmasosa tarpeesta selitti väestörakenteen muutos. Väestörakenteen muutos näkyy väestön ikääntyessä pienempien, palveluiden lähellä olevien asuntojen tarpeena. Samoin rakennusten esteettömyyden vaatimukset saivat aikaan uudenlaisten asuntojen kysynnän. (Vainio, 2008.)

### 3.11 Huonetilojen muuttuminen

Yksittäisten asuntojen pohjaratkaisujen tutkiminen ei kuulu tämän väitöstutkimuksen aihealueeseen, mutta siitä on syytä nostaa esiin muutamia trendejä. Tämän mielenkiinnon selittää se, että etenkin käytävätilojen muuttuminen vaikuttaa koko rakennuksen sisällä olevien matkaviestinverkkojen signaalien tasojen jakautumiseen. Tämän luvun lopussa on kuvattu lyhyesti erityisesti käytävien vaikutusta sisätilakuuluvuuteen.

Vuoden 1980 jälkeen valtion tukemassa asuntotuotannossa on yhdeksi tavoitteeksi asetettu eri huonetilojen rauhoittaminen niin, että niissä tarjotaan aito mahdollisuus itsenäiseen asuinkäyttöön. Tämä käytännössä vaatii pohjaratkaisulta sitä, että

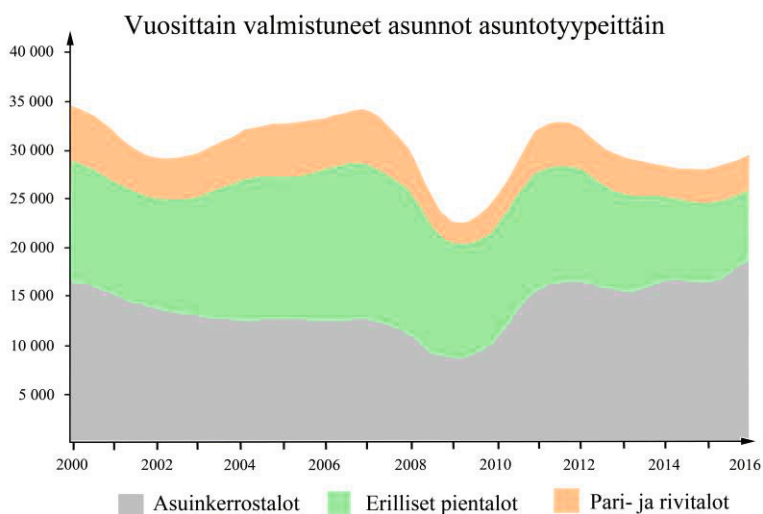


kaikkiin asuinhuoneisiin tulee päästä eteistilasta, ilman että on kuljettava esimerkiksi olohuoneen läpi. Tämä kasvattaa luonnollisesti eteisen osuutta huoneiston kokonaispinta-alasta. Tämä periaate on kuitenkin väistymässä ja makuuhuoneisiin kuljetaan usein juuri olohuoneiden kautta. Näin on helpompi täyttää esteettömyysvaatimukset ja säästää eteisen tilassa. (Vainio, 2008.)

Koko asuinkerrostalon kerrostasoa tarkasteltaessa on myös havaittavissa ero vanhempien talojen ratkaisuihin. 1990-luvun lopun taloissa on yleistynyt lamelli- ja pistetalon yhdistelmä, jossa kerrostasolla olevien kalliiden yhteisiä tarpeita palvelevien ratkaisujen määrää on pyritty minimoimaan. Tällöin yksi porraskuilu ja hissi palvelee mahdollisimman suurta määrää asuntoja. Tämä johtaa väistämättä aikaisempaa pitempiin käytäviin kerrostasojen yhteisissä tiloissa. Samalla ratkaisusta usein seuraa se, että talon päähän sijoittuvat suuremmat asunnot ja käytävien keskivaiheille jää sarja pienempiä asuntoja. Edellä kuvatun kehityksen voikin tiivistää niin, että asuntojen sisällä käytävätilat ovat pienentyneet mutta kerrostasolla yhteisten käytävätilojen osuus on noussut. (Vainio, 2008.)

### 3.12 Kerrostalorakentaminen 2000-luvulla

Rakentaminen Suomessa oli 2000-luvun alussa vielä tavanomaisessa laajuudessaan, mutta vauhti hiipui koko vuosituhatosen ensimmäisen vuosikymmenen ajan. Käänte tapahtui vuonna 2010, jonka jälkeen asuntotuotanto kiihtyi nopeasti muutaman vuoden aikana. Erityisen nopeasti asuntojen määrä on kasvanut vuoden 2015 jälkeen ja sen on arveltu synnyttävän jopa ylitarjontaa kasvukeskuksissa. Vuoden 2010 jälkeen valmistuneiden asuntojen jakauma kuitenkin muuttui voimakkaasti, jolloin uusien kerrostaloasuntojen määrä nousi rajusti pienentäen erillisten pientalojen, lähinnä siis omakotitalojen suhteellista osuutta. Tätä kehitystä kuvaa seuraava kuva 3.3, missä vuotuisia vaihteluita kuvaavien käyrien terävät kulmat on poistettu. (PTT, 2018.)



**Kuva 3.3** Asuntorakentaminen talotyypeittäin 2000-luvun alussa. (PTT, 2018)

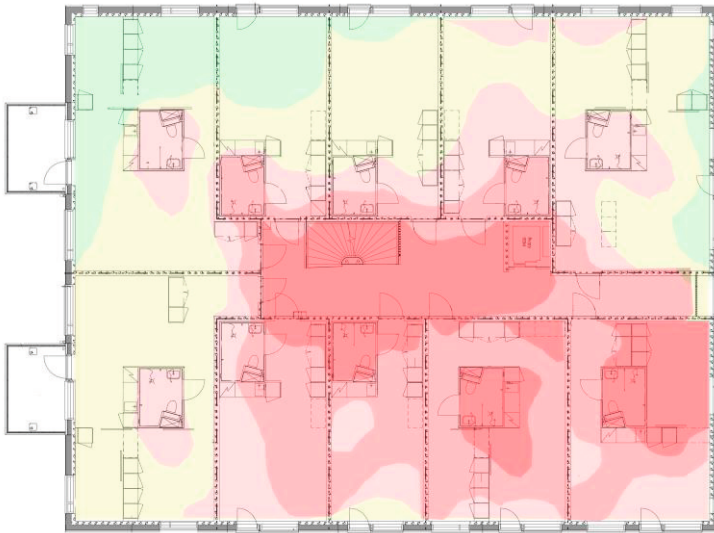
Kuvasta 3.3 voidaan havaita trendi, jossa vuosittain valmistuneiden kerrostaloasuntojen määrä vuoden 2011 jälkeen on tasaantunut noin 17 000 asuntoon, kun niiden määrä 2000-luvun alussa on ollut noin 13 000. Vuoden 2012 jälkeen vallinnutta kerrostalorakentamisen tasoa voidaan pitää poikkeuksellisen suurena, sillä se on viimeksi ylittynyt vuonna 1975 vallinneen historiallisen suuren rakennusbuumin aikana. (PTT, 2018.)

Vuoden 2015 jälkeen nähtävissä ollut voimakkaan rakentamisen aika on ainakin osin seurausta kaavoituksen lisääntymisestä. Nykyisin suurimpien kasvukeskusten asuntotuotannon tavoitteista sovitaan maankäytön ja liikenteen kehittämissuunnitelmien avulla kaupunkiseutujen ja valtion yhteisillä maankäyttöä asumista ja liikennettä koskevilla MAL-sopimuksilla. MAL-sopimuksia on tehty jo Helsingin, Tampereen, Turun ja Oulun seuduille vuosiksi 2016–2019. (Ympäristöministeriö, 2017b.)

### 3.13 Kerrostalorakentaminen matkapuhelinverkkojen näkökulmasta

Eri aikakausina rakennettujen asuinkerrostalojen erilaisten ulkokuoriratkaisujen ohella myös talojen sisäinen tilajako on matkapuhelinverkkojen kannalta hyvin olennainen tekijä, sillä käytännössä rakennuksen keskelle sijoittuva käytävä jakaa talon erilaisiin kuuluvuusalueisiin. Tämä selittyy sillä, että tavallisesti voimakkaimman signaalitason tarjoama tukiasema sijoittuu maantieteellisesti talon jommallekummalle

puolelle, ja tukiaseman puoleisissa asunnoissa on havaittavissa tavallisesti parempi signaalin voimakkuus verrattuna ”katveen puoleisiin” asuntoihin. Näin pitkä käytävä muodostaa ikään kuin vedenjakajan signaalitasoille. Uudemmissa asuintaloissa jako on aikaisempaa selvempi, sillä rakennuksen palo-osastointien vuoksi käytävien ja asuntojen väliset seinät ovat yli 150 millimetrin paksuista raudoitettua betonia. (Jämsä, 2014; Pohjanmaan pelastuslaitos, 2018.) Uudemmissa asuinkerrostaloissa on noudatettu elementtisuunnittelun yleisohjetta, jonka mukaan asuntojen välisten seinien paksuuden tulisi olla minimissään 200 millimetriä (Elementtisuunnittelu.fi, 2010.)



**Kuva 3.4** Tavanomainen asuinkerrostalon signaalitason kartta. (Kuva: Asp)

Kuvassa 3.4 on esitetty tavanomainen signaalitason värikartta uudehkossa asuinkerrostalossa. Kuvan värialueet kuvaavat matkaviestinjärjestelmän signaalitasa niin, että punainen edustaa huonoa kenttää, keltainen keskinkertaista ja vihreä moitteettomaan toimintaan riittävää signaalitasa. Asuinhuoneistojen välisistä paksuista betoniseinistä johtuen signaalitasa muuttuu huomattavasti asuntojen välillä. Useimmissa eri taloissa tehdyissä mittauksissa on ollut todettavissa kaikkein heikoimpien signaalitasojen sijaitsevan lähellä talojen kerrostasojen massakeskipistettä, eli käytävöissä, portaikoissa ja hissien läheisyydessä. Tämä perussääntö pätee sekä uusiin että vanhempiinkin asuinkerrostaloihin.

## 4 LÄMMÖN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA

Tässä väitöstutkimuksessa asuintalojen rakennusteknisiä ratkaisuja ja materiaalien lämmöneristystä käsitellään vain pintapuolisesti ja sillä tasolla, joka on tarpeen rakenteiden ja materiaalien kehityksen syiden hahmottamiseksi. Yksi suurimmista kannustimista viime vuosikymmenien aikana tapahtuneessa rakenteiden muuttumisessa on ollut juuri energiatehokkuuden parantaminen. Seinissä tämä näkyy lämmöneristeiden muuttumisena ja/tai eristekerroksien paksuuntumisena. Ikkunoiden osalle energiatehokkuuden parantaminen on tuonut metallien oksideista valmistettuja kalvoja ikkunalasien pinnoille, ja nämä kalvot muuttavat radiosignaalien etenemistä ikkunan läpi oleellisesti. Tässä luvussa käsitellään U-arvoa ja sen määräytymistä, sillä ikkunoiden valinnan yhtenä keskeisenä perusteena käytetään uudistuotannossa ja remonttikohteissa markkinoilla olevien ikkunoiden U-arvoja.

Niin kuin edellä todettiin, U-arvo on yleisestikin yksi tärkeimmistä rakennusmateriaalien tai rakenteiden energiatehokkuuden mittareista. Se voidaan joko laskea tai mitata. Mittausten tulkinnaissa kuitenkin tulee ottaa huomioon, että mittaustulokset pätevät vain mitatulle koerakenteelle, ja siihenkin vain mittausten aikana vallinneissa ja niitä vastaavissa olosuhteissa. Mittauksista kuitenkin saadaan rakenteen käytännön soveltuvuutta kuvaava arvo, johon voidaan nojata perussuunnittelussa ja materiaalien valinnoissa. (SUOMEN RakMK C4, 2002; SUOMEN RakMK C3, 2008.)

Laskettaessa U-arvoa sovelletaan EN-standardien mukaisia suunnitteluarvoja ja taulukoita esim. materiaalien lämmönjohtavuudelle. U-arvojen matemaattisessa tarkastelussa käytetään materiaaliikohtaisia arvoja lämmönjohtavuudelle ja lämpövastukselle, jotka on kuvattu tarkemmin seuraavassa luvussa.

### 4.1 Materiaalien lämmönjohtavuus ( $\lambda$ )

Materiaalin lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ), [W/(m·K)], kuvaa materiaalissa siirtyvää lämpövirran tiheyttä, kun materiaali oletetaan homogeeniseksi yhden pituusyksikön paksuiseksi, ja kun lämpötilan ero pintojen välillä on asteen (tai Kelvinin) suuruinen. (SUOMEN RakMK C4, 2002; Lindberg, 2004.)

Lämmönjohtavuus on siis mittausperusteisesti todettu ja taulukoitu materiaali-kohtainen lukuarvo, joka kuvaa lämmön johtumista materiaalissa. Suuria lämmönjohtavuuden arvoja on lähinnä metalleilla, ja pienen lämmönjohtavuuden omaavia materiaaleja käytetään yleisesti lämmöneristeinä. (SUOMEN RakMK C4, 2002.)

Yhden materiaalikerroksen läpi tapahtuvalle lämmön virtaukselle on kerroksen pinta-alasta ja materiaalin eri puolilla vallitsevasta lämpötilasta riippuva yhteys seuraavasti (Forsberg, 2020):

$$Q = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{l}, \quad (4.1)$$

jossa

$Q$  = kerroksen läpi siirtynyt lämpömäärä, [W]

$A$  = pinta-ala [m<sup>2</sup>],

$T_1 - T_2$  = lämpötilaero pintojen välillä [C<sup>0</sup> tai K],

$l$  = materiaalin paksuus [m], ja

$\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuutta kuvaava kerroin [W/(m·K)].

Taulukossa 4.1 on esitetty esimerkinomaisesti muutamien rakennusmateriaalien normaalisia lämmönjohtavuuden lukuarvoja. Muutamille materiaaleille on erotettavissa eri tuotetyypit niiden kuivapainon mukaan, esimerkiksi kipsilevyjen kohdalla niin kutsutut ”tavallinen” ja ”EK”-tyypit. (SUOMEN RakMK C4, 2002.) Taulukossa EK-tyyppisen kipsilevyn erottaa sen kuivan tuotteen tiheysarvosta 900 kg/m<sup>3</sup>.

<b>Taulukko 4.1</b> Rakennusmateriaalien tiheyksiä ja lämmönjohtavuuksia. (RakMK C4)		
<b>Materiaali</b>	<b>kuiva tiheys <math>\rho</math> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>normaalinen lämmönjohtavuus <math>\lambda</math> n w/(m · K)</b>
kipsilevy	800	0,21
kipsilevy	900	0,23
puu, mänty ja kuusi	450	0,12
lastulevy	600	0,14
betoni	2300	0,7
Float-lasi	2500	1
laasti (kalkki, sementti)	1800	1
kalkkiahkatiilet	1900	0,95
reikätiilet	1500	0,6
täystiilet	1500	0,65
alumiini (puhdas)	2700	220
teräs	7900	50
lasivilla	18–50	0,06
kivivilla	30–60	0,06
solumuovilevy	30–60	0,03

Taulukosta 4.1 nähdään tavallisten ulkoseinämateriaalien lämmönjohtavuuksien erot, jossa lasi ja betoni asettuvat hyvin johtavien materiaalien ja lämmöneristeiden väliin. Ikkunoiden lasituksen osalta käytännön tilanne ei ole aivan suoraviivainen, sillä lasipintojen paksuus koko lasituksen paksuuteen verrattuna on pieni. Siksi on tarpeen arvioida myös lasien välissä olevan ilmatilan ja eristyslasipaketin sisällä olevan kaasun lämmönjohtavuuksien suuruusluokkia. Tavallisimpia eristyslasipaketin ilmatilan täytekaasuja on koottu taulukkoon 4.2 (ASHRAE, 2013).

<b>Taulukko 4.2</b> Kaasujen lämmönjohtavuuksia. (ASHRAE, 2013)	
<b>Kaasu</b>	<b>lämmönjohtavuus <math>\lambda</math> n w/(m · K)</b>
argon	0,016
helium	0,142
hiilidioksidi	0,015
ilma	0,025

Ikkunoiden osalta toinen vaikeasti määritettävä lämmönjohtavuuden osa-alue ovat ikkunoiden puitteet ja karmit, joiden puu- ja alumiiniprofilin lämmönjohtavuudet poikkeavat toisistaan paljon. Edellä esitetyt taulukkoarvot koskevat perusikkuna-

rakenteen osia. Tilanne muuttuu oleellisesti, jos ikkunalasin pintaan muodostetaan lasin valmistuksen yhteydessä niin sanottu selektiivikalvo tai low-e (Low emissivity) -kalvo. Tämän kalvon vaikutusta arvioidaan tarkemmin erityisesti ikkunoita käsittelevässä luvussa 9.

## 4.2 Materiaalien lämmönvastus (R)

Määritelmänsä mukaan termisessä jatkuvuustilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastus,  $R$ , ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. (SUOMEN RakMK C4, 2002.)

$$R = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q}, \quad (4.2)$$

jossa

$T_{s1} - T_{s2}$  = tasomaisen ja paksuudeltaan tasaisen ainekerroksen pintojen lämpötilat, joissa  $T_{s1} > T_{s2}$ , yksikö K tai Celsius -aste, ja  
 $q$  = lämpövirran tiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

Yleisesti on käytössä myös kokonaislämmönvastusta kuvaava niin sanottu RT-arvo, joka on laskettavissa lämpötilaa  $T$  hyväksi käyttäen seuraavalla kaavalla 4.3, kun lämpö siirtyy tasapaksussa ja homogeenisessä aineessa kohtisuoraan aineen pintoja vastaan:

$$RT = \frac{d}{\lambda}, \quad (4.3)$$

jossa

$d$  = materiaalin paksuus [m], ja  
 $\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ].

Edellä kuvatuttujen suureiden, lämmönjohtavuuden, ja siitä johdetun lämmönvastuksen sekä materiaalin paksuuden ja avulla voidaan ilmoittaa lämmönläpäisykerroin eli U-arvo.

## 4.3 U-arvo

U-arvoa käytetään kuvaamaan, kuinka suuri on lämpövirran tiheys neliometriä kohti, kun materiaalin tai rakenteen kummankin puolen välillä on yhden asteen suuruinen lämpötilaero. Rakennustekniikassa U-arvoa käytetään ilmaisemaan rakenteen tai rakennusosan lämmöneristyskykyä. (SUOMEN RakMK C4, 2002.)

Lämmönläpäisykertoimen laskenta perustuu rakenneosan kokonaislämmönvastukseen seuraavasti (SUOMEN RakMK C4, 2002):

$$U = \frac{1}{RT}, \quad (4.4)$$

jossa  $RT$  on rakenneosan tai kerroksellisen materiaalin kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön. Kaavan 4.4 käytössä tulee ottaa huomioon, että  $RT$ -arvot sisältävät pintavastukset. Teoreettisesti  $RT$  kuvataan ainekerrosten paksuuksiin ja lämmönjohtavuuksiin perustuen seuraavasti:

$$RT = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{qn} + R_{se}, \quad (4.5)$$

jossa

$R_{si} + R_{se}$  = sisäpuolisen ja ulkopuolisen pintavastuksen summa,

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1}, R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2}, \dots, R_m = \frac{d_m}{\lambda_m},$$

$d$  = ainekerroksen  $n$  paksuus, ja  $\lambda$  on ainekerroksen  $n$  lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo,

$R_g$  = rakennusmateriaalissa tai osassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus,

$R_b$  = maan lämmönvastus, ja

$R_{q1}, R_{q2}, \dots, R_{qn}$  = materiaalikerrosten lämmönvastukset.

U-arvon laskennallinen määrittely perustuu yksittäisten, homogeenisiksi oletettujen, materiaalikerrosten perusteella, joilla on suunnitteluarvoihin perustuva paksuus ja lämmönjohtavuus. Lämmönläpäisykertoimeen voidaan tehdä korjauksia, jos esim. kylmäsilat aiheuttavat merkittäviä muutoksia lukuarvoihin. (SUOMEN RakMK C4, 2002.)

U-arvot ilmoitetaan standardoiduissa olosuhteissa, joten U-arvojen perusteella eri tuotteita ja materiaaleja on mahdollista vertailla. Todelliseen rakennukseen asennettujen materiaalien tai rakennusosien U-arvo ei kuitenkaan ole aina tarkalleen ilmoitetun suuruinen, sillä se riippuu ympäristön olosuhteista. Kokonaislämmönläpäisykerroin ja sen määrittely on kuvattu standardissa SFS-EN ISO 6946 (SFS julkaisut,



2017). Siinä otetaan huomioon ilmaraot, mahdolliset kiinnitysmekanismien kylmäsil-  
lat, rakenteiden epähomogeenisuudet ja muut samantyyppiset tekijät.

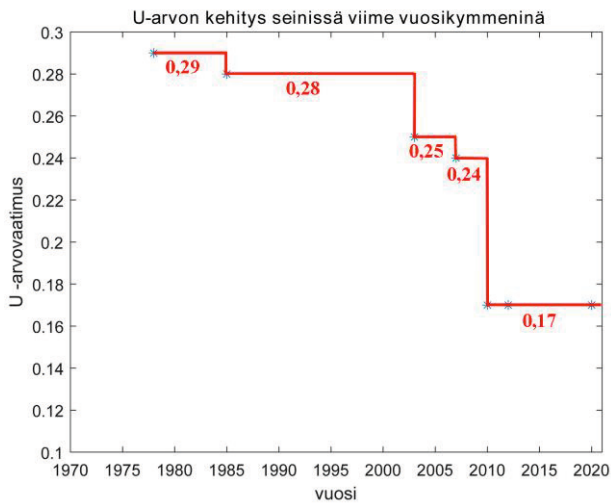
Aikaisemmin U-arvojen sijaan on ilmoitettu k-arvo, ja käytännössä näillä kahdella arvolla ei ole merkittävää eroa. U-arvojen ollessa eurooppalaisten/kansainvälisten EN ISO -standardien mukaan laskettuja lämmönläpäisykertoimia, olivat k-arvot kansallisen ohjeistuksen mukaan laskettuja rakenneosien (kuten ulkoseinien) lämmönläpäisykertoimia. Siirtymä k-arvoista U-arvoihin on tapahtunut 2000-luvun alussa. Kummassakin tapauksessa rakenteen lämmönläpäisykertoimen yksikkö on  $W/(m^2K)$ , eli lämpövirran tiheys ajasta riippumattomassa tilanteessa neliömetrin suuruista seinän tai muun rakenteen pinta-alaa ja yksikön suuruista sisä- ja ulkopuolen välistä lämpötilaeroa kohti.

U- ja k-arvojen välillä on pieniä eroja, jotka syntyvät siitä, miten lämpövirran suuntaan olevia vierekkäisiä materiaalikerroksia käsitellään, miten materiaalien lämmönjohtavuudet on määritelty ja miten rakennuksissa olevien kolojen ja rakojen ilmavirtauksia otetaan laskentaan mukaan. U- ja k-arvojen vertailu todellisissa rakennuksissa on kyseenalaista, sillä ennen SI-järjestelmän käyttöä Suomessakin käytettiin joulen sijaan kilokaloria, ja vanhemmissa taloissa rakenteet olivat erilaisia verrattuna nykyisiin ratkaisuihin ja materiaaleihin.

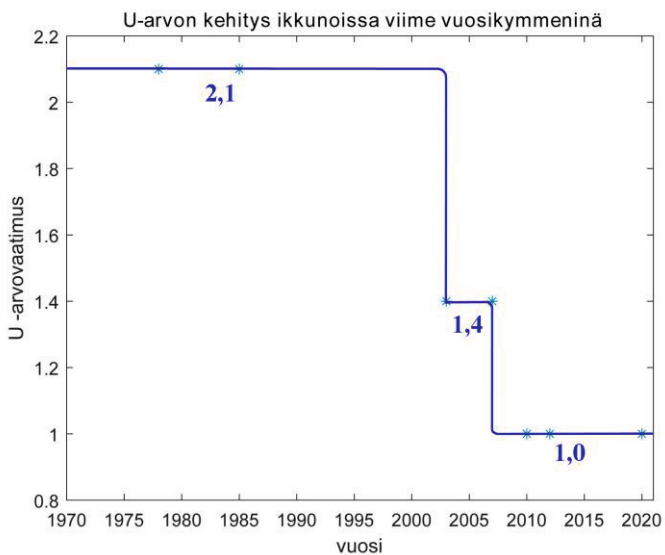
## 4.4 U-arvon kiristyminen kuluneina vuosikymmeninä

Rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi viime vuosikymmeninä on kiristetty rakennusmateriaalien U-arvojen vaatimuksia, ja kuvissa 4.1 ja 4.2 on esitetty lämpimän huonetilan ulkoseinän ja siihen asennetun ikkunan vaatimustason muutumista. Tarkasti tulkittuna U-arvot eivät kuitenkaan ole ehdottomia, sillä energiatehokkuutta tarkastellaan nykyisin vertailuarvoilla, joita käyttämällä lasketaan rakennuksen vertailulämpöhäviö. Vertailuarvolla tarkoitetaan laskennassa käytettävää rakennusosan lämmönläpäisykertoimen arvoa tai rakennuksen yhteenlasketun ikkunapinta-alan määrää. (SUOMEN RakMK C3, 2008.) Rakennuksen vertailulämpöhäviöllä kuvataan rakennuksen koko vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon vertailuarvoilla laskettua lämpöhäviötä. (FINLEX 1010/2017, 2017.)

On huomattavaa, että energiatehokkuutta koskevat vaatimukset ovat koskeneet uudisrakentamista tai laajaa peruskorjausta, mutta normaaleissa olosuhteissa olevien valmiiden rakennusten rakenneosia ei ole tarvinnut näiden vaatimusten mukaisiksi muuttaa. (Kauppinen, 2018; Ympäristöministeriö, 2018.)



**Kuva 4.1** Seinien U-arvojen tiukentuminen viimeisten vuosikymmenien aikana. (Lähteet: Kauppinen 2018; ympäristöministeriö 2018, muokattu)



**Kuva 4.2** Ikkunoiden U-arvojen tiukentuminen viimeisten vuosikymmenien aikana. (Lähteet: Kauppinen 2018; ympäristöministeriö 2018, muokattu)

Kuten kuvista 4.1 ja 4.2 havaitaan, ovat energiatehokkuusvaatimukset kiristyneet huomattavasti lähinnä viimeisten kolmen vuosikymmenen aikana. Ajallisesti ensimmäinen selvä syy energiatehokkuuden parantamiseen oli vuoden 1973 öljykriisi,

jonka seurauksena energian hinta nousi tuntuvasti. (Geller, Harrington, Rosenfeld, Tanishima, & Unander, 2006.)

Toinen, erityisesti 1990-luvun jälkeen esiin noussut, syy energiatehokkuuden kohentamisen vaatimuksiin perustuu uhkaan kasvihuonekaasujen lisääntymisestä ja ilmaston lämpenemisestä. Kumpikaan edellä mainitusta maailmanlaajuisista ympäristömuutoksista ei pysähdy lähimpien vuosikymmenien aikana, joten energiatehokkuusvaatimukset eivät käytännössä voi lieventyä. (Taalas, 2021.) Näin ollen on odotettavissa rakennustuoteteollisuudenkin taholta aika ajoin yhä uusia tuoteperheitä, joissa energiatehokkuus on entisestään parantunut.

Ikkunoiden osalta on syytä todeta, että tällä hetkellä käytössä olevilla ikkunatyypeillä U-arvovaatimukset täyttävässä ikkunassa on oltava vähintään yksi low-e eli selektiivikalvo. Toinen tapa täyttää U-arvojen vaatimukset on varustaa ikkuna monilla yksittäisillä lasilla. Moniin lasihin perustuvat ratkaisut antavat vielä odottaa itseään, sillä ne lisäävät ikkunan painoa, vaikeuttavat puhdistusta ja vaativat syvyysuunnassa enemmän tilaa. (Hemmilä & Saarni, 1999.)

# 5 ASUINKERROSTALOJEN ULKOSEINÄRAKENTEET VIIME VUOSIKYMMENINÄ

Tämä luku käsittelee Suomessa lähinnä 1960-luvun jälkeen yleisimmin käytettyjä rakenteellisia ratkaisuja kerrostalojen ulkoseinissä. Luvun pääpaino keskittyy rakennusten ulkoseinien kerrokselliseen rakenteeseen, paksuuteen ja niissä käytettyihin materiaaleihin matkapuhelinverkkojen signaalivaimennuksen näkökulmasta. Luvussa esitetyt perusratkaisut kattavat valtaosan Suomessa nykyisin käytössä olevien asuinkerrostalojen ulkoseinätyypeistä.

Valittu tarkastelun lähestymistapa johtuu tutkimuskysymyksestä, jossa arvioidaan uusien ja vanhempien kerrostalojen kerroksellisten ulkoseinärakenteiden keskimääräisten radiosignaalien vaimennusten muutoksia ja niiden syitä. Koska useiden aiemmin esitettyjen tutkimusten mukaan rakennusten seinissä käytettyjen materiaalien laadut ja paksuudet vaikuttavat oleellisesti rakennusten RF-vaimennuksiin (Johnson, G., 2013; Rudd, Craig, Ganley, & Hartless, 2014; Sagnard & Zein, 2005), on huomiota kiinnitetty erityisesti betonin ja tiilen kerrospaksuuksiin eri vuosikymmeninä. Seinien betonikuorten kokonaispaksuudella onkin ikkunoiden ohella ratkaiseva merkitys seinäpintojen radiosignaalien kokonaisvaimennuksen muodostumisessa.

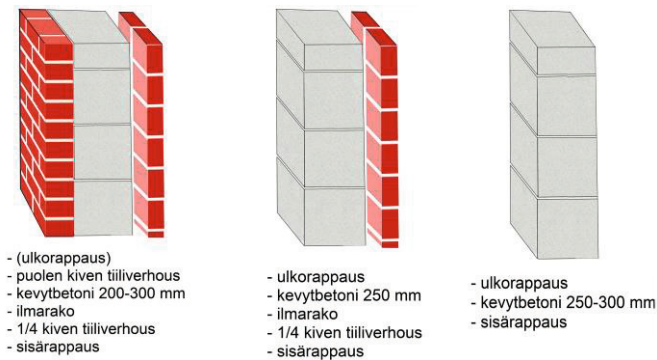
## 5.1 Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 1950–1975

Kerrostalorakentaminen muuttui peruuttamattomasti 1950-luvun alkupuolella, kun maailmansodan jälkeinen väestönkasvu ja suuri maalta kaupunkiin suuntautunut muuttoliike saivat aikaan ennennäkemättömän asuntopulan. Edellä mainittujen seikkojen perusteella asuntorakentamista alettiin toteuttaa suurina kokonaisuuksina, jolloin rakenteiden valmistuksen teollistumisen myötä rakennustavat ja materiaalit yhdenmukaistuivat. Ennen 1960-luvulla tapahtunutta murrosta kerrostalot perustuivat erityisesti kantavien rakenteiden ja niin ollen myös ulkoseinien osalta lähes pelkästään erilaisiin tiilirakenteiden yhdistelmiin. 1950-luvun lopulla mukaan tulivat yhä enenevässä määrin erityisesti ulkoseinissä betonin ja tiilen yhteiskäyttöön perustuvat

rakennerratkaisut. Melko nopeasti 50- ja 60-lukujen taitteessa betoni syrjäytti tiilen yleisimpänä runkoratkaisuna kerrostaloissa. Ensimmäisessä vaiheessa ulkoseinät ja kantavat väliseinät valettiin paikalla betonista. Huomioitavaa kuitenkin on, että erityisesti 50-luvulla asuinkerrostaloissa oli monia erilaisia ulkoseinävaihtoehtoja, eikä mikään niistä edustanut selvästi muita suurempaa osuutta rakennusten ulkoseinäratkaisujen kokonaismäärästä. (Ilonen, 2010; Neuvonen, 2006.)

1940- ja 1950-luvuilla rakennetut asuinkerrostalot perustuivat rungoltaan niin sanottuun sekarunkoon, jolle leimallista on kaksi erillistä pystyrakennejärjestelmää. Ensimmäisen niistä muodostaa massiiviseen kantavaan tiiliseinään perustuva ulkoseinä, johon on voitu liittää erillinen lämmöneristekerros. Toisena kantavana pystyrakenteena toimii betonista valmistettujen pilarien joukko, joka tukee rakennuksen keski-osaa. Sekarunkoon perustuvien talojen kerrosluvut vaihtelevat tavallisesti kolmesta neljään kerrosta, mutta tällä runkoratkaisulla on rakennettu jopa seitsemän kerroksen asuintaloja. Julkisivut näissä ratkaisuissa ovat aukkojulkisivuja, joissa ikkunat asettuvat yksittäin kerrostason keskelle. (Sorri, 2006.)

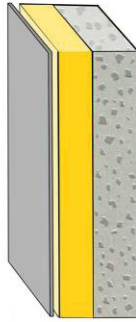
Kuvissa 5.1 ja 5.2 esitetään havainnollistavia esimerkkejä sodan jälkeisen jälleerakennuksen ajan tiileen, kevytbetoniin ja raudoitettuun betoniin perustuvista ulkoseinärakenteista. 50-luvun aikana rakennettujen asuinkerrostalojen ulkoseinien kokonaispaksuudet sijoittuivat tyypillisesti 300 ja 400 millimetrin väliin. (Neuvonen, 2006.)



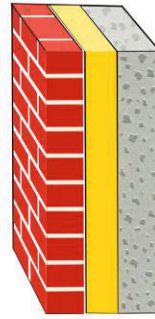
**Kuva 5.1** 1950-luvun kevytbetoniin perustuvia seiniä. (Neuvonen, 2006, muokattu)



- ulkorappaus
- kevytbetoni 200 mm (tai kevytsorabetoni)
- teräsbetoni 150 mm
- sisärappaus (tasoite)



- asbestisementtilevy (tai teräs / kupari / alumiini-pelti / julkisivulasi)
- ilmarako
- (tuulensuojalevy)
- mineraalivilla 75-100 mm
- teräsbetoni 150 - 160 mm
- sisärappaus / tasoite



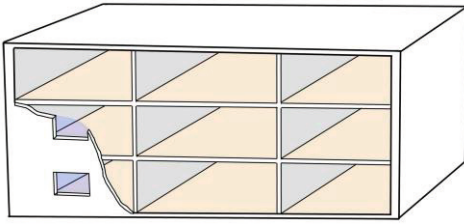
- (ulkorappaus)
- puolen kiven tiiliverhous
- mineraalivilla 50-100 mm
- teräsbetoni 150-160 mm
- sisärappaus / tasoite

**Kuva 5.2** Havainnollistavia kuvia 1950-luvun ulkoseinien perusratkaisuista. (Neuvonen, 2006, muokattu)

Kuten kuvista 5.1 ja 5.2 voidaan todeta, kyseinen aikakauden rakentaminen ja rakenteiden tyypit olivat hyvin moninaisia, sillä rakennustuotannon laajempi teollistuminen ja asuinkerrostalojen talotyyppien yhtenäistyminen olivat vasta alkamassa.

1960-luvulla muuttoliike maalta kaupunkeihin kiihtyi, jonka seurauksena kerrostalorakentaminen muuttui vallitsevaksi rakennustavaksi kasvavissa kaupungeissa ja kaupunkimaisissa ympäristöissä. Tämä oli myös ensimmäisten asuntolähiöiden rakentamisen aikaa. Rakennustavat teollistuivat nopeasti ja useita asuinkerrostalojen perusratkaisuja alettiin valmistaa sarjatuotantona. Tiilen käyttö kantavien rakenteiden pääasiallisena materiaalina väheni nopeasti kyseisen vuosikymmenen aikana erilaisten betonikuoriin perustuvien rakenneratkaisuiden vallatessa markkinat. (Ilonen, 2010; Neuvonen, 2006.)

Asuinkerrostalorakentamisen alueella suosituimmaksi perusratkaisuksi nousi 1960-luvun alussa rakennuspaikalla tehty niin sanottu kirjahyllyrunko, jonka perusmateriaali oli betoni. Osassa rakenteista kuitenkin käytettiin jo tuolloin valmiita elementtejä ja ulkoseinän eristyksessä hyödynnettiin kevytbetonin luontaista eristyskykyä. (Neuvonen, 2006.)



**Kuva 5.3** Kirjahyllyrungon periaate. (Neuvonen, 2006, muokattu)

Kirjahyllyrungon perusajatus on esitetty kuvassa 5.3, jossa on nähtävissä kantavien rakenteiden käyttö rakennuksen pääty- ja väliseinissä, jolloin sivuseinistä on mahdollista tehdä ohuempia ja kevyempiä (Ilonen, 2010).

1960-luvun alun jälkeen tyypillinen asuinkerrostalo perustui lamellitalon perusratkaisuun ja suorakulmaiseen muotoon. Julkisivuksi valikoitui usein harjattu tai maalattu betonipinta ja näihin yhdistettiin usein erilaisia levyratkaisuja. Erityisesti 1970-luvulla kokeiltiin klinkkerilaattojen käyttöä elementtien julkisivuna. (Sorri, 2006.)

### 5.1.1 Ikkunat asuinkerrostalojen julkisivuissa

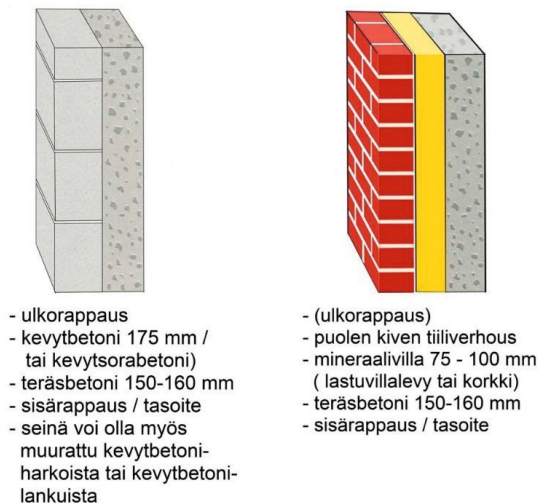
Tässä väitöstutkimuksessa ikkunoiden käsittely rajoittuu asuinkerrostalojen ulkoseinien ikkunoihin, jotka tyypillisesti sijoittuvat keskelle sandwich -elementtiä. Toimistorakennuksille tyypilliset suuret kiinteät ikkunat eivät kuulu tässä esitettävän tarkastelun piiriin.

Ikkunoiden osalta vielä 1960-luvun puolella suosittiin nauhaikkunajulkisivuja, joissa ikkunoiden välissä olevat seinämateriaalit jätettiin mahdollisimman kapeiksi. 1970-luvulle tultaessa nauhaikkunat vaihtuivat aukkoikkunoiksi, jolloin ikkuna-aukot sijoittuivat kerroksen korkeisten betonielementtien keskelle. Ikkunoiden koko oli vielä 1960-luvulla seinäpintaan nähden suuri, mutta keskimääräinen ikkunakoko supistui 1970-luvun energiakriisin tuloksena. (Sorri, 2006.)

Arvioitaessa matkapuhelinverkkojen RF-signaalitasoja tietylle talolle tulisi ensin selvittää tämän aikakauden talon kantava rakenne, sillä päätyseinien ja sivuseinien osalta betonin kokonaispaksuus vaihtelee huomattavasti kantavien ja ei-kantavien seinien välillä. Signaalivaimennus puolestaan riippuu betonikerrosten paksuuksista.

## 5.1.2 Kantavat päätyseinät

Kuvassa 5.4 on esitetty kantavien päätyseinien tavallisimmat rakenteet 1960-luvulla. Suurin ero sivuseiniin verrattuna on elementin sisäkuori, joka perustuu tavallisesti noin 150–160 millimetrin paksuiseen raudoitettuun betoniin. Ei-kantavien sivuseinien sisäkuoren paksuus on tavallisesti vain noin 80 mm suuruusluokkaa. (Neuvonen, 2006; Nykyri, 2020.) Vaikka kuvassa 5.4 oikealla on kuvattu eristetyn päätyseinän osalta vain tiilipintainen versio, alkoivat myös teollisesti tuotetut kokonaan betoniin perustuvat ratkaisut yleistyä. Tällöin sekä sisimmäinen kuorirakenne, että julkisivuna toiminut ulkokuori olivat molemmat raudoitettua betonia. (Pentti & Hyypöläinen, 1999.)

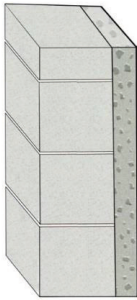


**Kuva 5.4** Kantavia päätyseinä. (Neuvonen, 2006, muokattu)

## 5.1.3 Kirjahyllyrungon ei-kantavat seinät (sivuseinät)

Kuvassa 5.5 on esitetty tavallisimpien ei-kantavien seinien materiaalit ja niiden paksuudet. 1960-luvulla oli tavallista, että rakenteet tehtiin rakennuspaikalla. Näiden seinätyyppien kirjo on hieman laajempi kuin kantavien seinien, ja ei-kantavien seinärakenteiden valintaan vaikuttivat rakennesuunnittelun ja arkkitehtisuunnittelun ohella myös paikallisten materiaalien saatavuus ja hinta. (Neuvonen, 2006.)

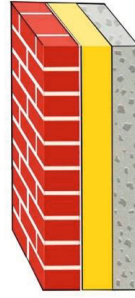




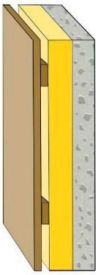
- ulkorappaus
- kevytbetoni 175-200 mm
- teräsbetoni 80 mm
- sisärappaus / tasoite



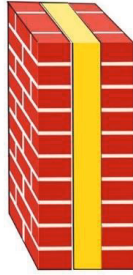
- ulkorappaus
- kevytbetoni 250-300 mm
- sisärappaus
- seinä voi olla muurattu kevytbetoniharkoista tai kevytbetonilankuista



- puolen kiven tiiliverho
- mineraalivilla 50-100 mm
- teräsbetoni 80 mm
- sisärappaus / tasoite



- julkisivulevy (asbestisementti, pelti, lasi)
- tuuletusrako
- (asbestisementtilevy 3 mm)
- mineraalivilla 75-100 mm
- teräsbetoni 80 mm
- sisärappaus / tasoite



- puolen kiven tiiliverho
- mineraalivilla 50-100 mm
- puolen kiven tiiliverho
- sisärappaus

**Kuva 5.5** Kirjahyllyrunkoisen talon ulkoseiniä. (Neuvonen, 2006, muokattu)

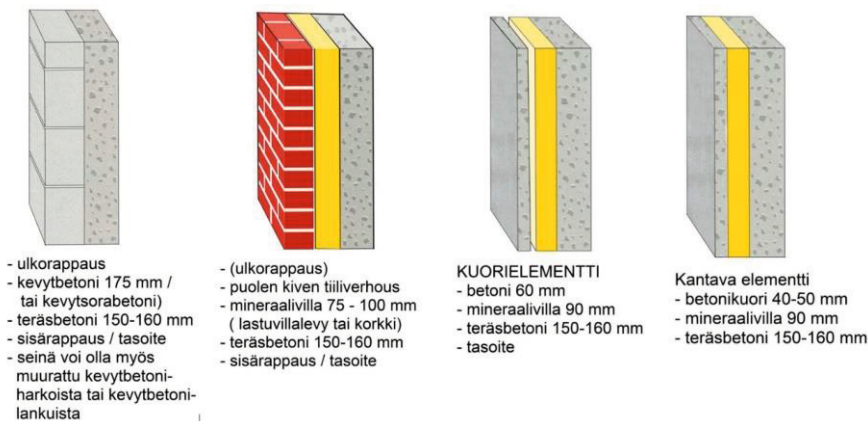
1960-luvun puolenvälin jälkeen uusien asuinkerrostalojen ulkoseinien suunnittelu ja toteutus perustui jo pääosin betonielementtien käyttöön. Julkisivujen perusratkaisuksi muodostui teollisesti tehty betonisandwich-elementti, jonka sisin ja uloin kerros ovat raudoitettua betonia, ja joiden välissä lämmöneristekerros.

Suomessa kehitettiin 1969 julkaistu Betonielementtistandardi, joka sai nimekseen BES-järjestelmä. BES-järjestelmä sisälsi useita erilaisia valmiita seinätyyppiratkaisuja, joten sen mukaan suunnitellut ja valmistetut kerrostalot olivat täysielementtitaloja. 1970-luvulla BES-standardin käyttö yleistyi niin nopeasti, että valtaosa tuona aikana valmistuneista taloista perustui jo kyseisen standardin käyttöön. (Betoniteollisuus ry, 2009; Rakennustieto, 2013.)

Standardimuotoisenkin rakentamisen aikana yleisimpänä perusrunkoratkaisuna säilyi pitkään kirjahyllyrunko. Kerrostalorakentamisella tuotettujen asuntojen määrän huippuvuosi oli 1974 jolloin Suomeen valmistui yli 45 000 kerrostaloasuntoa. (Betoniteollisuus ry, 2009; Ilonen, 2010; Neuvonen, 2006; raxsystems, 2017.)

## 5.1.4 1970-luvun kantavat seinät

1970-luvulle tultaessa ei tapahtunut suuria muutoksia edellisen vuosikymmenen perusratkaisuihin verrattuna. Kantavien seinien osalta mahdollisten rakenteiden lukumäärä kasvoi hieman, joka selittyy betonielementtien valmistuksen siirtymisellä elementtitehtaisiin paikalla rakentamisen sijaan. Seuraavassa kuvassa on koottu 70-luvun tavallisimpia kantavien seinien ratkaisuja. (Neuvonen, 2006.)

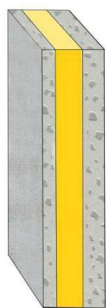


**Kuva 5.6** Kantavia seinä 1970-luvun taloissa. (Neuvonen, 2006)

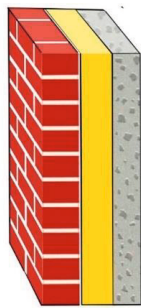
Kuvassa 5.6 esitetyistä sandwich-ulkoseinäratkaisuihin kaksi oikeanpuoleista ovat yleisimmät perusratkaisut, kaksi vasemmanpuoleista edustavat yksittäistapauksia 1960- ja 1970-lukujen kerrostaloissa. Muuraukset tehtiin rakennuspaikalla.

## 5.1.5 1970-luvun ei-kantavat seinät

Ei-kantavien seinien rakenne pysyi melko samanlaisena 60- ja 70-lukujen aikana, selkeimpänä erona oli kuitenkin tiilimuurauksen suosion hiipuminen. Tiilivuoraus toteutettiin tuolloin tavallisesti paikalla muuraten, joka oli elementtirakentamiseen verrattuna hitaampaa ja työn käytännön suorittamista rajoittivat säävaihtelut.



ei-kantava sivuseinä  
 - betoni 40-50 mm  
 - mineraalivilla 90 mm  
 - teräsbetoni 80 mm



- puolen kiven tiiliverhous  
 - mineraalivilla 100 mm  
 - teräsbetoni 80 mm



- ulkorappaus  
 - kevytbetoni 250-300 mm  
 - sisärappaus

**Kuva 5.7** Ei-kantavia ulkoseinärakenteita 1970-luvun taloissa. (Neuvonen, 2006, muokattu)

Aikakauden ulkoseinärakenteiden paksuudet vaihtelivat edelleen pääsääntöisesti 300 ja 400 millimetrin välillä. Kantavissa rakenteissa myös esiintyi luonnollisesti tätä paksumpia rakenteita. (Neuvonen, 2006.)

## 5.2 Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 1975–2000

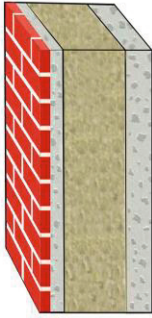
Kerrostalorakentamisen huippuvuotia kesti muutaman vuoden, jonka jälkeen asuntotuotannon kiivain tahti hieman hiipui. Asuinkerrostalojen rakentamisessa tiukan taloudellisuuden rinnalle nousivat asumisviihtyvyyteen ja erilaisiin visuaalisiin vivahteisiin liittyvät arvot. (Neuvonen, 2006; Vepsäläinen, 1972.)

Elementtirakentamiseen painottuneet BES-standardien mukaiset asuinkerrostalot pysyivät suurimpana kerrostalorakentamisen alueena, vaikka niiden rinnalla rakennettiin edelleen paikallarakentamisen keinoin osaelementteihin perustuneita kerrostaloja. Rakennusteollisuuden standardoituminen ohjasi kerrostalotuotantoa kuitenkin kohti yhtenäisempiä rakenteita, ja vallitsevaksi rakenteeksi muodostui kaikissa ulkoseinissä niin sanottu sandwich-elementti. Tämän elementin kustannustehokkuus perustui osaltaan siihen, että koko elementti valmistettiin erityisessä elementtitehtaassa, josta se kuljetettiin valmiina rakenneosana rakennuspaikalle. Kustannussäästö perustui erityisesti siihen, että laatua on helpompi valvoa elementtitehtaassa eikä elementtien valmistus kärsi ulkona vallitsevista olosuhteista. Elementtirakentamisen rinnalla kuitenkin säilyi perinteinen menetelmä, jossa julkisivu muurattiin rakennuspaikalla. (Betoniteollisuus ry, 2009.)

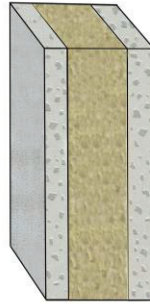
Aikavälillä 1975–2000 valmistettujen betonisandwich-elementtien ulkokuorien paksuudet pysyivät melko vakioina. Erityisesti sisäkuoren paksuus kuitenkin on vaihdellut eri rakennusten välillä koko elementtirakentamisen ajan. Suurimmat yksittäiset materiaalipaksuuteen vaikuttavat tekijät ovat rakennuksen korkeus ja rungon kantavien rakenteiden sijoittelu talon rungossa. Silloin kun talon kantaviksi rakenteiksi on valittu ulkoseinät, ovat betonielementtien sisäkuorien paksuudet vähintään 150 millimetrin suuruusluokkaa. Jos kysymyksessä on yli 8 kerrosta korkea rakennus, sisäkuoren paksuus voi nousta yli 200 millimetriin. Tosin lähiörakentamisen vilkkaimpina vuosina talojen korkeus ei vaihdellut niin paljon kuin esim. vuoden 2010 jälkeen, joten poikkeuksellisen korkeita taloja oli harvassa. Sandwich-elementteihin perustuvissa kirjahyllyrunkoisissa asuinkerrostaloissa ei-kantavat sisäkuoret ovat yleensä 80 millimetriä paksuja, joskin tämä keskiarvopaksuus vaihtelee jonkin verran.

Sandwich-elementtien energiatehokkuus on perustunut koko elementtirakentamisen ajan rakenteen sisä- ja ulkokuoren väliin sijoittuvaan lämmöneristekerrokseen, jonka paksuus on kasvanut tasaisesti energiatehokkuusvaatimusten tiukentuessa. Ajanjaksolla 1975–2000 lämmöneristekerros on yleisesti perustunut mineraalivillaan, jonka kerrospaksuus on em. aikavälin alussa ollut noin 90 millimetriä, ja josta se on 25 vuoden aikana kasvanut 140–160 millimetriin. Tällä aikavälillä rakennustuoteollisuus on tuonut markkinoille laajemmin myös polyuretaaniin perustuvia eristeitä, joiden etuna ovat paremmat lämmöneristävyysarvot. Polyuretaaniin perustuvilla eristeillä saavutetaan sama eristystaso kuin mineraalivillalla, mutta ohuemmalla kerrosvahvuudella. Mineraalivillapohjaiset lämmöneristeet ovat kuitenkin säilyttäneet markkina-asemensa erityisesti matalamman hintatasonsa vuoksi. (Ojanen, Seppä, & Koukkari, 2014.)

Sandwich-elementtien ulkokuoren paksuus on tyypillisesti ollut noin 70–80 millimetriä, eikä ulkokuoren mitoitus riipu seinän mahdollisesta kantavuudesta. Kuvassa 5.8 on esitetty kaksi esimerkkirakennetta, jotka edustavat vuosien 1975–2000 välillä rakennettua tyypillistä elementtiä. Niin kuin kuvasta voidaan todeta, elementti edustaa kirjahyllyrakenteisen asuinkerrostalon sivuseinää, sillä sisäkuoren paksuus vastaa karkeasti ulkokuoren paksuutta. Kuvissa olevat esimerkkiseinät eroavat toisistaan vain ulkokuoren ulomman pinnan osalta, joka on oikeanpuoleisessa kuvassa eri tavoin käsiteltyä betonia ja vasemmanpuoleisessa kuvassa tiililaattapinnoite. Tässä tapauksessa tiililaattapinnoite on ohut, tyypillisesti 25–35 millimetriä, ja sen tarkoitus on lähinnä luoda värikkäämpi ilme kuin mitä pelkällä perinteisellä betonipinnalla on tarjottavana. (Neuvonen, 2006.)



- tiililaatta + betoni  
(keraaminen laatta + betoni)
- tiilipintaisena ulkokuoren  
paksuus yleisimmin 85 mm
- mineraalivilla:
- \* 1976 -> n. 90 mm
- \* 1976 - 1985 -> n. 120 mm
- \* 1985 - 2003 -> n. 140 mm
- \* 2003 -> n. 160 mm
- \* 2012 -> n. 200 mm
- teräsbetoni 80 mm



- betoninen ulkokuori  
(70 - 80 mm)
- Villaeriste
- sisäkuori  
(80 mm teräsbetoni)

**Kuva 5.8** Esimerkkejä tavanomaisista 1970–2000-lukujen ulkoseinistä.  
(Neuvonen, 2006)

Betonipintaan perustuva uloin kerros voi olla puhdas tai maalattu betonipinta, tai hierretty, telattu, harjattu, pesty tai ruiskutettu. Huomioitavaa kuvassa on erityisesti mineraalivilloituksen kerrospaksuuden kasvaminen samaisella aikavälillä, mikä johtuu kerrostalojen ulkoseinien energiatehokkuuden tiukentuneista vaatimuksista. Kuvassa 5.8, jossa sekä ulko- että sisäkuoret edustavat 80 millimetrin paksuisia rakenteita, eristekerroksen osuus on noin 170 millimetriä, eli hieman paksumpi kuin silloiset minimivaatimukset edellyttäisivät. Varsinaiset betoniset rakenteet ovat kuitenkin säilyneet melko samanlaisina. (Kiukkonen, 2011.)

### 5.3 Kerrostalojen ulkoseinärakenteet 2000-luku

Kerrostalojen rakentamisvauhti oli 2000-luvun ensimmäisinä vuosina tasaisen rakennustuotannon vaiheessa, jonka jälkeen uudisrakentaminen elpyi jälleen uuteen nousuun. Nousu selittyi kansallisesti ainakin osin kasvukeskusten muuttovoitolla. Tähän vaikuttivat verrattain harvoihin kasvukeskuksiin keskittyneet opiskelu- ja työpaikat.

Kaupunkien uudistuminen on näkynyt erityisesti vuoden 2010 jälkeen, sillä monissa suurissa kasvukeskuksissa 60- ja 70-luvuilla valmistuneita kaupunkien keskusta- tai esikaupunkialueita ollaan purkamassa ja rakentamassa uudelleen. Tämän lisäksi

vanhoista teollisuusalueista on vapautunut tonttimaata vanhan savupiipputeollisuuden lopetettua toimintansa. Lähelle kaupunkien keskustoja on syntynyt vanhojen asuinalueiden tilalle kokonaan uusia asuinalueita esimerkiksi Helsingin Jätkäsaaren ja Kalasatamaan.

2000-luvulla kerrostalorakentaminen on kulkenut tasaisesti kohti entistä parempaa energiatehokkuutta, mikä tarkoittaa erityisesti elementtien lämmöneristeiden kerrospaksuuksien kasvamista. Energiatehokkuuden parantamisen suuntaan ovat ohjanneet erilaiset ohjeet, sopimukset ja energiatehokkuusstrategiat, joiden seurauksena koko asumisen ja rakentamisen kenttään kohdistetut energiavaatimukset ovat tiukentuneet. Lämmöneristekerroksen paksuudet vaihtelevat tällä hetkellä rakennettavissa kerrostaloissa tyypillisesti 220–240 millimetrin välillä, kun eristeen vertailupaksuutena käytetään mineraalivillaa. Lämmöneristekerros voi olla tätä ohuempi, jos käytettävä eriste on polyuretaanilevyä. Käytetyin lämmöneristemateriaali on kuitenkin edelleen mineraalivilla, lähinnä sen edullisuuden vuoksi. (Teriö & Sorri, 2013.)

2010-luvulla rakennettujen kerrostalojen ulkoseinien kuvausten saamiseksi haastateltiin neljän Suomalaisittain suuren rakennusyhtiön edustajaa. Haastattelupyynnöön vastasivat myöntävästi Lujabetoni Oy, Optiplan Oy, Pohjola rakennus Oy Suomi ja Skanska talonrakennus. Haastattelujen mukaan sandwich-tyyppinen elementti nousi yksimielisesti esiin kaikkein eniten käytettynä ulkoseinäratkaisuna. Suunnittelijoiden näkökulmasta sandwich-elementti on edelleen kustannustehokas ja tarvittaessa hyvin energiatehokas perusratkaisu, silloin kun halutaan rakentaa perinteisiin muotoihin perustuvia asuinkerrostaloja. Sandwich-elementtien lisäksi haastatteluissa nousivat esiin rappaukseen perustuvat julkisivut ja tiilipinnalla vuoratut julkisivut. Tiilipinnaiset julkisivuratkaisut voidaan jakaa kahteen ryhmään, joista ensimmäinen on kuvassa 5.8 esitetty ratkaisu, jossa tiililaattainen ulkokuori on valettu betonikuoren päälle. Toista ryhmää edustaa ratkaisu, jossa koko ulkokuori koostuu tiiliverhouksesta. Sen rakennusfysikaalinen toiminta eroaa edellisestä, sillä tiiliverhouksen ja lämmöneristeen väliin jätetään ilmarako. Haastattelujen perusteella rappauksen suosio on kasvamassa, osin ohuen ja kevyen rakenteensa vuoksi ja osin alhaisen hintatasonsa ansiosta.

### 5.3.1 Ulkoseinien paksuus

Tarkasteltaessa erilaisia viime vuosikymmenien aikana laajasti käytettyjä asuinkerrostalojen ulkoseinäratkaisuja, voidaan todeta niiden eroavan toisistaan käytännössä vain lämmöneristepaksuuden ja ulkokuoren osalta. Itse lämmöneristemateriaalin

sijainti ja sisäkuori ovat kaikissa ratkaisuissa hyvin samanlaiset, joskin kummankin paksuus vaihtelee rakennuskohtaisesti.

Sisimmän kuoren paksuus kantavissa ulkoseinissä on tällä hetkellä 150–200 millimetriä, riippuen rakennuksen korkeudesta ja kantavien rakenteiden suunnittelusta. Yleisesti yli kahdeksankerroksisten rakennusten ainakin alimmaisten kerrosten ulkoseinien betonikuoret ovat tavallista paksimmat, sillä niiden pitää kannatella ylempien kerrosten massaa. (Pentti, Lahdensivu, Vaarala, & Pakkala, 2020.)

Ulkokuoren paksuus on riippuvainen siinä käytetystä materiaalista. Kaikista suosituimmassa julkisivuratkaisussa, jossa uloin kerros on teräsbetonia, paksuus vaihtelee 70 ja 85 millimetrin välillä. Elementtirakentamisen alkuaikoina on joissakin tapauksissa käytetty vain 50–60 millimetrin paksuisia ulkokuoria. (Pentti et al., 2020.)

### 5.3.2 Rappaus ulkoseinässä

Rappaus on yleinen pinnoitusmenetelmä, ja siinä on erotettavissa kaksi erilaista rappausmenetelmää. Nämä menetelmät ovat ohutrappaus ja paksurappaus. Ohutrappauksessa noin 6–8 millimetriä paksu ja rappaus kiinnittyy alustaan liimamaisella tartunnalla. Rappauksen tukena käytetään lasikuituverkkoa. (Lahdensivu et al., 2016a; Ojanen, Nykänen, & Hemmilä, 2017.)

Paksua rappautta käytettäessä uloimman rappauskerroksen paksuus vaihtelee 10 ja 35 millimetrin välillä, ja se saadaan aikaan muutamalla erillisinä työvaiheina tehtävillä rappauskerroksilla. Tämän kirjan näkökulmasta on myös tärkeä huomioida, että paksurappauksella toteutetut julkisivut sisältävät silmäkooltaan 19 millimetrin silmäkoolta olevan, RF-signaalien näkökulmasta tiheän metalliverkon. (Lahdensivu et al., 2016a.) Tällä metalliverkolla on huomattava vaikutus seinän radiosignaalien vaimenukseen, ja sitä tutkitaan lähemmin tämän väitöstutkimuksen luvussa 18.

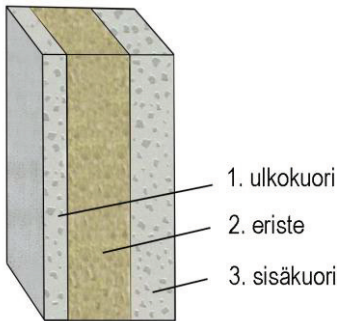
### 5.3.3 Lämmöneristeet

Kuvat 5.9–5.12 kuvaavat esimerkinomaisesti neljää tällä hetkellä käytetyintä julkisivurakennetta kerrospaksuuksineen. Huomioitavaa on, että kaikki esimerkkikuvista ovat kantavia seinä, jolloin niiden paksuus on noin 70 millimetriä suurempi kuin ei-kantavissa seinissä. Kaikissa esimerkeissä on lämmöneristeinä käytetty mineraalivillaa, mutta eristekerroksen mineraalivilla voidaan korvata uudemmilla EPS- tai polyuretaanipohjaisilla lämmöneristeillä. Käytettäessä polyuretaanieristeitä lämmöneristyskerros ohenee verrattuna mineraalivillapohjaiseen lämmöneristekerrokseen.

Tässä väitöstutkimuksessa erilaisiin lämmöneristemateriaaleihin kiinnitetään melko vähän huomiota, sillä eristemateriaalien RF-signaalien vaimennus on hyvin pieni ja niiden vaikutus matkaviestiverkkojen käyttämällä taajuuksilla seinien kokonaisvaimennukseen on vähäinen. Edellä todettu RF-vaimennuksen matala taso perustuu tämän teoksen luvussa 16 esiteltäviin mittaustuloksiin. Tilanne muuttuu kuitenkin täysin, jos lämmöneristeinä käytettävissä tuotteissa on metallisia pintoja tai metallien oksideita sisältäviä pintoja tai pinnoitteita. (Ojanen et al., 2014.)

### 5.3.4 Tyypillisiä sandwich-elementtejä

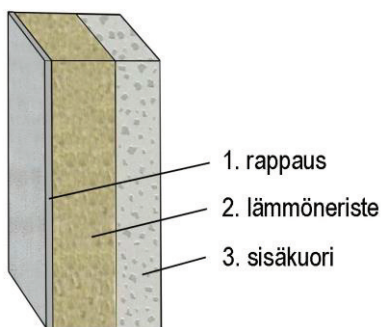
Teollisen rakentamisen alettua muodostui tavallisimmaksi rakenteeksi sandwich-elementti, jossa elementti koostuu kahdesta betonikuoresta, joiden välillä on lämmöneristekerros.



**Kuva 5.9** 2000-luvun sandwich-elementin rakenne. (Neuvonen, 2006, muokattu)

Esimerkkikuvassa 5.9 esitetään uudehkon asuinkerrostalon tyypillinen betonisandwich-elementti, jossa kerros uloin kerros (1) on ulkoilmaa vastaan oleva kerros. Materiaaliltaan se on noin 70 millimetriä paksua teräsbetonia. Kerros 2 on paksuudeltaan 150–220 millimetriä olevaa mineraalivillaa ja huoneiston sisäpuolelle näkyvä kerros 3 on 150 millimetriä paksua teräsbetonia, mikäli kyseessä on kantava seinärakenne. Kuvan oikeanpuoleisin reuna on rakennuksen asunnon puoleinen seinäpinta ja siinä tavallisesti on pinnalla tasoite ja maalipinta tai tapetti. Kokonaispaksuudeltaan kyseinen elementti on yleensä 370–460 millimetriä, riippuen lähinnä lämmöneristekerroksen paksuudesta. (Neuvonen, 2006.)





**Kuva 5.10** Sandwich-elementti, jossa ulkopinnalla rappaus. (Neuvonen, 2006, muokattu)

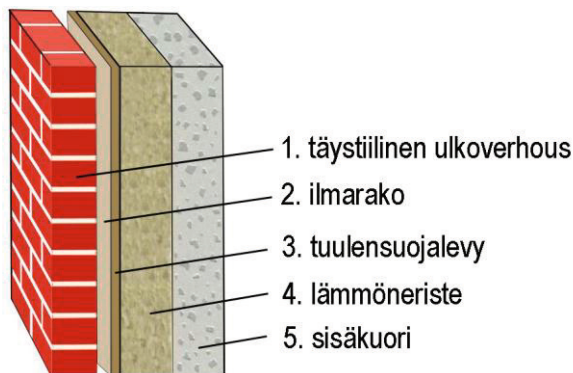
Kuvassa 5.10 on esitetty ulkopinnaltaan rapattu elementti, jossa kerros 1 sisältää pinta- sekä pohjarappauksen rappausverkkoinen. Kerros 2 kuvaa 220 millimetrin paksuista mineraalivillakerrosta ja kerros 3 on 150 millimetrinen teräsbetonikuori, tyypillisen kantavan seinän tapaan. Kokonaispaksuus esimerkkielementille on noin 380–400 millimetriä, riippuen rappauksen tyypistä. Kyseinen elementtirakenne on esimerkkikuvien ohuin julkisivutyyppejä, jos verrataan rakenteita samalla lämmöneristepaksuudella.

### 5.3.5 Tiilen käyttö julkisivuissa

Tiilipintaisia julkisivuja on pääasiassa kahdenlaisia. Ensimmäinen variaatioista on pelkästään tiilestä muodostuva uloin kerros, jolloin sen paksuus on yleisesti 80–85 millimetriä. Tätä ratkaisua käytetään lähinnä pientaloissa. Asuinkerrostaloissa tyypillinen ratkaisu on 130–135 millimetriä paksu tiilikuori rakennusten ulkoseinissä. Rakenne ei ole elementti, sillä täystiilinen ulkoverhous tehdään rakennuspaikalla rungon pystytyksen jälkeen. Kerrostaloissa käytettävän täystiilisen ulkokuoren periaate on esitetty kuvassa 5.11.

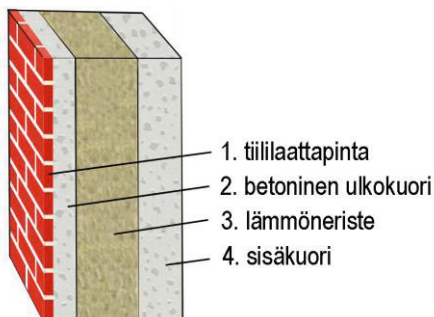
Pelkän tiilestä muodostuvan uloimman kerroksen takana on nykyisin ilmarako, joka alkoi yleistyä 1970-luvulla. Sitä aikaisemmin ilmarakoa ei käytetty. Ilmarako oli ensin noin 20 millimetriä, mutta sen leveys on kasvanut nykyiseen 40 millimetriin. Ilmarakoa seuraa kerros 3, joka on 30 millimetriä paksu tuulensuojalevy suojaamassa kuvan 5.11 esimerkissä vain 150 millimetriä paksua mineraalivillakerrosta. Sisäkuori, eli kerros 5, on 150 millimetriä paksua teräsbetonia. Elementin kokonaispaksuus on tällöin ohuesta, 150 millimetrin lämmöneristekerroksesta huolimatta 550 millimetriä, joka on esimerkkijulkisivuista paksuin.

Rakenteen paksuuden kasvaessa on huomioitava kaksi mahdollisesti erityisratkaisuja vaativaa kohtaa. Ensimmäinen liittyy ulkokuoren kiinnittämiseen lämmöneristekerroksen läpi sisäkuoreen ja toisaalta ikkunoiden asentaminen paksuun seinään vaatii yleensä pieniä lisärakenteita.



**Kuva 5.11** Sandwich-elementti, jossa täystiilinen julkisivu. (Neuvonen, 2006, muokattu)

Toinen variaatio tiilipintaisesta julkisivusta on tiililaattapintainen julkisivu, jossa on ohuesta tiilikerroksesta ja teräsbetonista muodostuva ulkokerros. Tällöin tiilivuorauksen paksuus on tyypillisesti 20–45 millimetrin välillä ja teräsbetonin osuus on noin 60–80 millimetriä, jolloin koko uloimman kerroksen paksuudeksi tulee 80–115 millimetriä. (Tiili-info, 2002.)



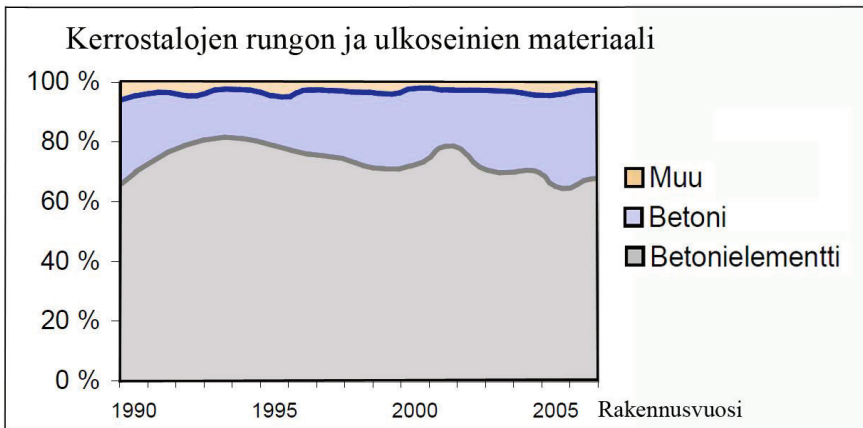
**Kuva 5.12** Tiililaattapintainen sandwich-elementti. (Neuvonen, 2006, muokattu)

Kuvassa 5.12 on tiililaattapintainen betonielementti. Kerroksen 3 lämmöneristeenä on 220 millimetrin paksuinen mineraalivilla ja sisin kerros 4 on 150 millimetriä paksu teräsbetonikuori. Kuvan oikeanpuoleisin reuna on tässäkin kuvassa rakennuksen asunnon puoleinen seinäpinta, jonka pinnoitteena on tyypillisesti tasoite ja maalipinta

tai tapetti. Elementin kokonaispaksuus 455 millimetriä esitetyillä tiilipinnoitteen ja eristeen paksuuksilla.

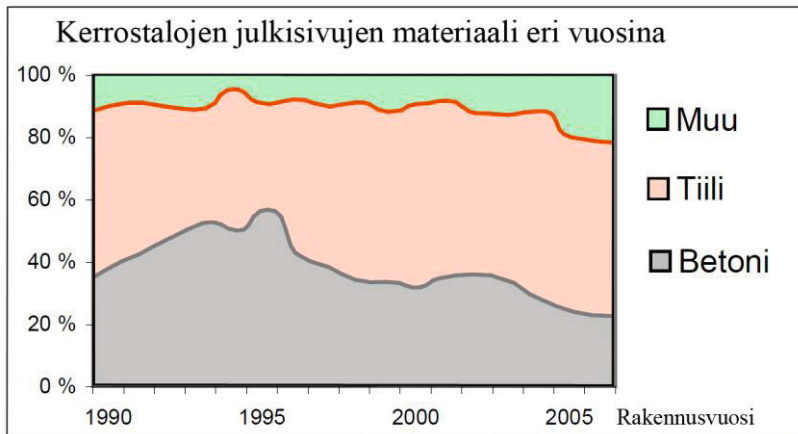
## 5.4 Kerrostalojen julkisivut tilastojen valossa

Betonielementtien todettiin jo edellä olevan yleisin runkomateriaali asuinkerrostaloissa. Tämän päätelmän vahvistaa myös VTT:n julkaisema Terttu Vainion selvitys, jonka mukaan kerrostalojen seinä- ja runkorakenteet ovat viimeisten vuosikymmenien ajan olleet yli 90-prosenttisesti betoniin tai betonirakenteeseen pohjautuvia. Runkorakenteen materiaalin osuutta eri osuuksina kuvataan kuvassa 5.13. Kuvassa on erotettu toisistaan paikalla valetut betoniset seinärakenteet ja betonielementit. Kuvan perusteella voidaan todeta, että betonielementit ovat viimeisten vuosikymmenien ajan edustaneet vähintään 65 % uudisrakennusten joukossa olleiden asuinkerrostalojen ulkoseinistä.



**Kuva 5.13** Kerrostalojen ulkoseinärakenteiden materiaalien jakauma. (Vainio, 2008)

Samassa julkaisussa tarkastellaan myös julkisivujen materiaaleja kuluneina vuosikymmeninä, ja niidenkin osalta betonin ja niihin liitettyjen erilaisten tiilipintaisten ratkaisujen osuus on suuri. Huomattavaa kuitenkin on, että uusien talojen osalta puhtaan betonipinnan osuus on laskenut tasaisesti 1990-luvun huippuvuosista, mutta tiili on julkisivuna säilyttänyt suosionsa lähes tasaisena ainakin vuodesta 1990 lähtien. (Vainio, 2008.)



**Kuva 5.14** Kerrostalojen ulkoseinien julkisivumateriaalien jakauma. (Vainio, 2008)

Kuvan 5.14 mukaan tiili- ja betonipinnat yhdessä hallitsevat kerrostalorakentamisessa käytettyjä ulkoseinien julkisivuja yhdessä yli 80 % osuudella. Tiilijulkisivun suosion nousu selittyy yleisellä rakennusten ilmeen muuttumisella kohti värikkäämpiä ja visuaalisesti heterogeenisempiä ratkaisuja. Rakennusten ulkonäköön liittyviin ratkaisuihin vaikuttavat arkkitehtien ja rakennuttajien lisäksi myös kaavoittajat, jotka voivat halutessaan määrätä julkisivujen väristä ja materiaaleista. (Vainio, 2008.)

## 6 LÄMMÖNERISTEET

Ulkoseinärakenne suunnitellaan aina sellaiseksi, että rakennuksen kantavuusvaatimukset täyttyvät, talon sisäosiin muodostuvat halutunlaiset lämpötila- ja kosteusominaisuudet ja että rakennuksen ulkopuolella olevat lämpötila- ja kosteusolosuhteet eivät välity talon sisäosiin. Tavoitteena on myös rakenteen säilyminen riittävän kuivana ulkopuolisesta kosteustasosta huolimatta, joten kosteus ei saa kerääntyä haitallisessa määrin rakenteisiin. Luonnollisesti edellä mainitut kriteerit tulee täyttyä mahdollisimman energia- ja kustannustehokkaalla rakenteella.

Ulkoseinän lujuus, kantavuus- ja taloudellisuusvaatimukset kerrostalorakentamisessa saavutetaan yleensä tarkoituksenmukaisesti betonielementtirakenteella, mutta energia- ja kustannustehokas rakenne vaatii lisäksi lämmöneristekerroksen betonikuorien väliin.

Niin kuin luvuissa 4 ja 5 on esitelty, rakennusten ulkoseinien U-arvo vaatimukset ovat viime vuosikymmeninä kiristyneet, ja tämä on yleisesti kompensoitu seinärakenteissa lisäämällä eristekerroksen paksuutta tai vaihtamalla rakenteeseen paremman lämmöneristyskyvyn omaavaa materiaalia.

Lämmöneristyksen tasosta ja sen muutoksesta kertoo alla oleva taulukko 6.1, jossa verrataan erilaisten talotyyppien 2000-luvun ulkoseinien ja ikkunoiden energiatehokkuusvaatimuksia U-arvon näkökulmasta. Taulukossa olevat arvot ovat vain suuntaa antavia, eikä niitä tule sellaisenaan käyttää suunnittelussa. (Motiva, 2020.)

<b>Taulukko 6.1</b> Ulkovaipan suuntaa antavia vertailuarvoja. (Motiva, 2020).				
<b>Ulkovaipan U-arvojen vertailuarvot</b>	<b>normaali talo 2008</b>	<b>normaali talo 2010</b>	<b>matalaenergia-talo</b>	<b>passiivitalo</b>
ulkoseinä [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,24	0,17	0,12	0,08–0,1
ikkuna [W/(m <sup>2</sup> K)]	1,4	1	0,8	0,4–0,7

Koska ulkoseinien osalta betonielementin kuorien energiatehokkuuteen on vaikea vaikuttaa, niiden parantaminen tehdään käytännössä lämmöneristekerroksen energiatehokkuutta parantamalla. Seuraavassa on koottu karkeasti erilaisia villaeristysten paksuuksia eri vuosikymmenien aikana valmistuneissa asuinrakennusten ulkoseinissä. Numeroarvot on koottu eri lähteistä, joten niissä on pieniä eroja. Suunta on

kuitenkin selvä; lämmöneristekerrosten paksuudet ovat kasvamassa, tai mineraalivil-lapohjaisten eristeiden tilalle asennetaan ohuempia polymeeripohjaisia lämmöneris-televyjä. (Lammi, 2011; Ympäristöministeriö, 2018.)

<b>Taulukko 6.2</b> Lämmöneristeiden paksuuksia eri aikoina. (Ympäristöministeriö, 2018)		
Rakennuksen valmistumisvuosi	Eristepaksuus villa [mm]	Polyuretaanieristepaksuus [mm]
1972	95	
1976	100	
1980	125	
1984	135	
1990	150	
1990–2000	150–200	
2000-luku	250–300	120–170

Vaikka taulukossa 6.2 on 2000-luvun lämmöneristepaksuutena mainittu 250–300 mi-neraalivillaa, on käytännössä tavallisesti valittu mineraalivillan paksuudeksi 200–240 millimetriä. Tämä johtuu siitä, että myös mineraalivillan valmistuksessa on tuoteke-hityksellä kyetty parantamaan eristeen lämmöneristysominaisuuksia. (Betoniteollis-uus ry, 2013; Betoniteollisuus ry, 2014.)

Tutkittaessa ulkoseinien lämpöteknistä käyttäytymistä on otettava huomioon käy-tettyjen rakennusmateriaalien lämmönjohtavuus, ilman- ja vesihöyryn läpäisyyn lii-tyvät seikat ja rakenteen ratkaisut. Rakenteen ratkaisuihin liittyvät materiaalien liittä-miseen ja kytkemiseen mahdollisesti liittyvät kylmäsilat yms. Usein tarkastelu perus-tuu materiaalien U-arvoihin, kokonaisrakenteen ilmatiivyyteen, lämpötilajakaumaan ja kosteustekniikan osalla kondensoitumisen estämiseen.

Lämmöneristeen ja ulkoseinän näkökulmasta lämpö siirtyy johtumalla kiinteiden materiaalien kautta, johtumalla materiaaleissa olevien ilmalla tai vedellä täyttyneiden huokosten kautta ja konvektiona. Jonkin verran lämpöä siirtyy myös säteilyn välittä-mänä.

Konvektio asuinkerrostaloissa käytettyjen sandwich-elementtien eristetilassa on hyvin pientä, jos lämmöneristemateriaali täyttää koko betonikuorien välisen tilan.

Niin kuin edellä olevassa luvussa 4 todetaan, on vuoden 2010 alusta alkaen läm-pimän tilan ulkoseinien U-arvon oltava korkeintaan 0,17 W/(m<sup>2</sup>K) normaaleille asuintaloille. Matalaenergiatalojen yhteydessä ilmoitetaan prosenttiarvo, esim. 85 %, joka ilmaisee ominaislämpöhäviön olevan 85 % vertailuarvosta, joka on edellä mai-nittu 0,17 W/(m<sup>2</sup>K). Aivan suoraan tämä ei johda vastaavan suuruiseen lämmöneris-terroksen lisäämiseen, sillä ulkoseinienkin mahdollisesti hieman tavoitearvoa

heikompi U-arvo on mahdollista kompensoida muiden rakenneosien vertailuarvoja paremmilla U-arvoilla. Passiivitaloille ei ole esitetty suoraa tavoitearvoa, mutta ulkoseinien osalle niille on vakiintunut oletusarvoksi U-arvo  $0,09 \text{ W}/(\text{Km}^2)$ . (Lampinen, J., 2014.)

Seuraavassa on esitelty tavallisimmin käytettyjä betonisandwich-elementin lämmöneristeitä ja niiden perusmateriaaleja.

## 6.1 Mineraalivilla

Mineraalivillat perustuvat epäorgaanisiin kuituihin ja niitä sitoviin orgaanisiin sideaineisiin. Niitä valmistetaan hieman erityyppisinä erilaisiin käyttökohteisiin. Mineraalivillapohjaisten lämmöneristeiden ryhmään luetaan kuuluviksi suurimpina ryhminä lasi- ja kivivillat. Lasivillan ja kivivillan valmistus perustuu kvartsihiekkään, soodaan ja kalkkikiveen. Kvartsihiekan lisäksi suositaan kierrätyslasia, jonka osuus voi nousta 50 %:iin mineraalivillan lasimateriaalin kokonaisuudesta. Mineraalivillan etuna on hyvä ilmanläpäisevyys, jolloin se mahdollisesti kastuttuaan kuivuu tehokkaasti. Se myös muotoutuu asennustilaan helposti puristamalla kasaan ja tarpeen vaatiessa se palautuu entiseen muotoonsa ulkoisten puristusvoimien vähentyessä. Joustavuutensa vuoksi se myös kestää ulkopuolisten rakenteiden pientä liikkumista.

Mineraalivillan tiheys vaihtelee suuresti lämmöneristeen käyttötarkoituksen mukaan välillä  $18\text{--}60 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Normaalinen lämmönjohtavuus on noin  $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ja sen ominaislämpö huoneenlämmössä on noin  $840 \text{ (J/kg}\cdot\text{C)}$ . Mineraalivilla on palonlevitysluokaltaan ensimmäisessä luokassa, joten se syttyy ja palaa huonosti. (SUOMEN RakMK E1, 2002; Jokinen, 2016; Siikanen, 2001.)

## 6.2 Paisutettu polystyreeni, eli EPS-eriste

EPS-eristeet valmistetaan vesihöyryn avulla paisuttamalla polystyreeniä muottiin. Sen ilmakuplia sisältävä rakenne muodostuu käyttämällä paisuttamisen ponnekaasuna esimerkiksi pentaania. Lopullisessa eristelevyssä raaka-aineena olleen polystyreenin osuus on vain 2–5 tilavuusprosenttia. EPS-tuotteita käytetään eristelevyinä seinäelementeissä, joissa sen palo-ominaisuudet eivät rajoita käyttöä. Sen käyttäminen betonielementtien valmistuksessa yksinkertaistaa valmistusprosessia hieman, sillä EPS kestää hyvin puristusta. Puristuskestävyydestä johtuen se on myös suosittu lattioiden eristyksissä. (Siikanen, 2001.)

EPS-eriste ei siitä kertovien esitteiden mukaan ime vettä, joten sen ominaisuudet eivät muutu kosteuden vaikutuksesta. EPS-eristeen ehkä suurin rajoitus käyttökohteiden näkökulmasta liittyy paloturvallisuuteen, ja siksi P1 paloluokituksen saavassa rakennuksessa onkin EPS-eristekerrokset pinnoitettava palonkestävällä materiaalilla, esimerkiksi 30 millimetrin kerroksella mineraalivillaa. (Haavisto, 2015; Hoikkala.)

### 6.3 Polyuretaani-pohjaiset eristeet

Polyuretaaniin perustuvat eristeet jakautuvat PUR- ja PIR-eristeisiin, joista PUR on polyuretaanista valmistettu tuote ja PIR pohjautuu polyisosyanuraattiin.

Polyuretaanien (PUR/PIR) eristysominaisuudet saadaan aikaan käyttämällä umpisoluisen rakenteen muodostamiseen tarkoitettuja ponneaineita. Pelkkiin ilmalla täytettyihin huokosiin verrattuna parempi eristyskyky saavutetaan käyttämällä ponneaineita, joilla on pienempi lämmönjohtavuus kuin ilmalla, ja yleisimmin ponneaine on pentaania tai pentaanin ja syklopentaanin seosta. Ilman lämmönjohtavuus on 10 asteen lämpötilassa noin  $\lambda_{\text{ilma}} = 0,024 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ja pentaanin seoksella se laskee noin  $0,012\text{--}0,013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ :iin. (Albrecht, 2000.)

Ponneaineen avulla huokoiseksi saatu vaahtomainen aine on ilmatiivis, eikä se sen vuoksi läpäise vettä eikä vesihöyryä. PIR/PUR eristettä voidaankin käyttää suoraan höyrynsulkuna. Toisaalta betonielementin sisällä tämä lämmöneristemateriaali estää kosteuden liikkeitä, joten se myös hidastaa betonin kuivumista lämmöneristetilän suuntaan.

Taulukossa 6.3 on esitetty esimerkinomaisesti kirjahyllyrunkoisen lamellitalon sivuseinien eristepaksuuksien eroja.

<b>Taulukko 6.3</b> Lämmöneristepaksuuksia eri tuotteilla. (Suutarinen, 2009)			
<b>Seinän rakenne</b>	<b>Mineraalivilla (mm)</b>	<b>EPS (mm)</b>	<b>PIR/PUR (mm)</b>
Sandwich-elementti sisäkuori > 80 mm ulkokuori > 70 mm	220	180	150
eristerapattu seinä sisäkuori > 120 mm	220	180	150

Taulukon 6.3 perusteella voidaan todeta, että erityisesti hyvin eristäviä seinä tavoiteltaessa polymeeripohjaiset lämmöneristeet ovat korkeammasta hintatasostaan



huolimatta vartenotettava vaihtoehto, sillä seinän kokonaispaksuuden kasvaessa vaaditaan liitosrakenteissa usein erikoisratkaisuja.

## 6.4 Erityyppisten lämmöneristeiden kuivuminen

Rakennusfysiikan alueella on luonnollisesti tutkittu eri mineraalivillalaaatujen kykyä imeä kosteutta ja toisaalta niiden kuivumista. Mielenkiintoinen havainto on, että kosteuden päästyä mineraalivillakerroksen sisään, se kuivuu paljon hitaammin kuin jos vain eristekerroksen pintaa olisi kastellut vastaava vesimäärä. Esimerkiksi eristekerroksen pintaa kasteltaessa noin 7 kg/m<sup>2</sup> vesimäärällä, eriste kuivuu noin 24 tunnin kuluessa, mutta saman vesimäärän joutuessa eristekerroksen sisään, sen kuivuminen kestää noin kolme vuorokautta. (Seppänen, 2020.)

Lämmöneristeiden kastuminen tai kostuminen on ongelmallista, sillä se vaikuttaa paitsi lämmön läpäisyyn, myös sähkömagneettisten kenttien käyttäytymiseen lämmöneristekerroksessa.

Betonielementtien kuivumisesta eri lämmöneristemateriaaleja käytettäessä on tehty tutkimuksia, ja johtopäätöksenä on, että mineraalivillapohjaisia eristeitä käytettäessä betonikuorien voidaan todeta kuivuvan molempiin suuntiin ja polymeeripohjaisten eristeiden kanssa vain toiseen suuntaan. Käytännössä tämä tarkoittaa radiosignaalien vaimennuksen yhteydessä sitä, että betonikuoren kastumisen jälkeen esim. pitkäaikaisen viistosateen vaikutuksesta, betonielementin kuorikerros on pidempään kostea, jos eristeenä on EPS, PIR tai PUR-eriste. Mineraalivillapohjainen eriste sen sijaan sallii kosteuden siirtymisen sekä betonin ulkopinnalle että myös eristetilan läpi sisäkuoren suuntaan. Nuoren betonin kuivumista on tutkittu erikseen (Sekki, 2019), jolloin mielenkiinnon kohteena on ollut rakenteessa olevan ylimääräisen, hydrataatioon osallistumattoman, veden poistuminen rakenteesta. Viistosateen ja syksyn pitkällisten syysateiden aiheuttaman kosteuden kuivumista on käsitelty puolestaan Kōliön julkaisussa vuodelta 2016. (Kōliö, 2016.)

## 7 ULKOSEINIEN RAPPAUS

Rappaus on tätä kirjoitettaessa melko yleinen julkisivujärjestelmän osa sekä uusissa että vanhemmissakin asuinkerrostaloissa. Koko kansallisen rakennuskannan näkökulmasta uudistuotanto on kuitenkin melko pienessä osassa ja sen vuoksi uudisrakennuksien rakenteisiin ja työtapoihin tehtävät muutokset näkyvät koko rakennuskantaa arvioitaessa pitkällä viiveellä. Seuraavassa tarkasteltava julkisivujärjestelmä sisältää betonisen sisäkuoren, lämmöneristekerroksen ja julkisivun rappauksen.

Signaalien vaimennuksen näkökulmasta erityisesti metalliverkolla lujitetun paksurappauksen on havaittu muuttavan rakennusten matkapuhelinverkkojen sisätilakuuluvuutta huomattavasti ja tästä syystä rappausten käsittelylle on varattu tässä kirjassa oma lukunsa. Laajaa käsittelyä puoltaa myös se, että jos voidaan todeta matkapuhelinverkkojen signaalitasojen muuttuvan rappauksella tehtävän ulkoseinien peruskorjauksen yhteydessä, tapahtuu tämä olemassa olevan rakennuskannan keskellä olevissa kohteissa. Ulkoseinien peruskorjaukset tehdään yleensä lähellä taajamien keskustoja sijaitseviin, vuosikymmeniä sitten rakennettuihin asuinkerrostaloihin yksittäinen talo tai taloyhtiö kerrallaan. Operaattoreiden ylläpitämien verkkojen näkökulmasta tilanne on ongelmallinen, sillä kyseiselle alueelle on aina suunniteltu matkapuhelinverkkojen peitto aikaisempien rakennusten keskimääräisten vaimennusten perusteella, ja muutokset yksittäisten asuintalojen vaimennuksissa ovat vaikeasti kompensoitavissa.

Tässä kirjassa rappausta käsitellään lähinnä peruskorjauskohteiden näkökulmasta, mutta ilmiöt luonnollisesti esiintyvät samanlaisina kaikissa kohteissa, joissa ulkoseinien ulkopintana käytetään metalliverkolla tuettua rappausta. Peruskorjauskohteissa, joissa laajoja alueita asuinkerrostalojen ulkoseinistä korjataan, rappaus on hyvin usein valittu uudistetun seinärakenteen pintamateriaaliksi. (Lahdensivu, 2005; Lahdensivu et al., 2016a.)

## 7.1 Julkisivun peruskorjauksen syyt

Ulkoseinien laajamittaiseen peruskorjaukseen johtaa yleensä monien syiden summa, mutta tärkeimmät ovat yleensä julkisivujen huono kunto ja samalla tavoitteet parantaa energiatehokkuutta. Energiatehokkuuden parantaminen onkin nousemassa koko ajan tärkeämmäksi syyksi julkisivujen peruskorjauksiin, sillä aikaisempina vuosikymmeninä valmistuneiden elementtien eristyskyky oli nykyvaatimuksiin verrattuna lähes poikkeuksetta heikko. Pelkän energiatehokkuuden parantamisen vuoksi suunniteltavat ulkoseinien peruskorjaukset eivät ole taloudellisesti perusteltuja, mutta laajojen ulkoseinien pakkasrapautumisen tai raudoitusten korroosion vuoksi tehtävien ulkoseinien peruskorjausten yhteydessä lämmöneristystä pyritään aina parantamaan. (Heljo & Vihola, 2012.)

### 7.1.1 Peruskorjaus energiatehokkuuden parantamiseksi

Energiatehokkuuden parantaminen on laaja ilmastonmuutoksen torjuntaan liittyvä kokonaisuus, jolla on sekä kansallinen- että myös EU:n tuki. (EU komissio, 2006.)

EU:n vuoden 2006 energiatehokkuutta koskevassa toimintasuunnitelmassa todettiin, että asuin- ja liikerakennussektorit tarjoavat kaikkein kustannustehokkaimmat energiansäästöpotentiaalit vuoteen 2020 mennessä, ja niiden energiansäästön mahdollisuudet ovat asuinrakennuksille noin 27 prosenttia ja 30 prosenttia liikerakennuksille (EU komissio, 2006).

Lisäksi toimintasuunnitelmassa todetaan, että liikerakennuksissa suurin potentiaali energiatehokkuuden parantamiseen on energianhallintajärjestelmien parantamisessa, mutta asuinkerrostaloissa ulkoseinien ja kattorakenteiden eristystason parantaminen tarjoaa merkittävimmät mahdollisuudet kokonaisenergiankulutuksen pienentämiseen. (Lechtenböhrer & Schüring, 2011.) Kattorakenteiden osuus mahdollisessa parannuksessa on Suomessa kuitenkin pieni, noin kahden prosentin suuruusluokkaa. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Arvioitaessa suomalaisen asuinkerrostalon energiatehokkuutta, voidaan energiankulutus jakaa kolmeen lähes yhtä suureen osaan. Nämä ovat ilmanvaihto, lämpimän veden kulutus ja ulkovaipan johtumishäviöt. Kahden ensin mainitun osalta voidaan todeta tehokkaimpien energiansäästötoimien kohdistuvan ilmanvaihdon tulo-poistojärjestelmien lämmön talteenottoon, lämmityksen säätöön ja pienempään vedenkulutukseen johtaviin asumistottumusten muuttamiseen. (Boström, Uotila, Linne, Hilliaho, & Lahdensivu, 2012.)

Rakennuksen ulkovaipan energiatehokkuutta parannettaessa on ensimmäinen toimenpide yleensä vanhojen ikkunoiden vaihtaminen uusiin, jolloin voidaan johtumishäviöitä pienentää. Ulkoseinien osalta energiatehokkuuden parantaminen vaatii lisälämmöneristämistä ja/tai vanhojen eristeiden vaihtamista. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Julkisivujen Energiatehokkuuden voidaan olettaa ulkoseinäremontin yhteydessä tehtävällä lisäeristyksellä parantuvan keskimäärin noin 9–13 %, riippuen arvion tekijästä. (Linne, 2009; Uihlein, 2010.) Linnen tutkimuksessa tarkasteltiin kohteita, joissa esiintyi mm. ilmavuoto-ongelmia, joten niiden tuloksia ei tule suoraan verrata vain energiatehokkuuden parantamiseksi tehtyjen peruskorjausten aiheuttamiin parannuksiin. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

### 7.1.2 Seinien ulkopintojen vauriot julkisivuperuskorjauksen syynä

Suomessa kerrostalorakentamisen erityisen aktiivinen ajanjakso sijoittui vuosikymmenille 1960 ja 1970, joidena aikana rakennettiin noin 550 000 asuntoa. Kiihkeää asuntorakentaminen saavutti huippunsa vuonna 1974, jolloin valmistui 46 200 uutta kerrostaloasuntoa. (Kouhia et al., 2010; Neuvonen, 2006.)

Asuinkerrostaloja nykyisin suunniteltaessa niiden elinkaaren arvioidaan yleensä olevan yli 50 vuotta, mutta betonielementteihin perustuviissa ulkoseinissä on havaittu vakavia ongelmia jo noin 30 vuoden jälkeen. (Lahdensivu, 2012; Méquignon, Haddou, & Bonneaud, 2012.) Käyttöikään liittyvä tavoite on tullut virallisesti suunniteltuun vasta vuonna 2004, joten suoranaisia vaatimuksia rakennusten käyttöiän huomioimiselle ei tätä aikaisemmin ole ollut. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Ulkoseinien rakenteiden pitkälle edenneet vauriot näkyvät suoraan rakennusten julkisivuissa, ja julkisivukorjaukset ovatkin yksi vanhan asuinrakennuksen kalleimmista yksittäisistä korjausinvestoinneista. Odotettua nopeampi ulkoseinien kunnan heikkeneminen johtuu suurelta osin ilmaston ja etenkin viistosateen aiheuttamista rasituksista sekä virheistä raudoituksen valinnasta ja asennuksesta. Kosteuden ja rapautumisen vaikutukset julkisivuihin ovat yleensä esteettisiä, mutta laajat ja massiiviset vauriot voivat joskus aiheuttaa jopa turvallisuusriskin. (Lahdensivu, 2012.)

Jos julkisivu on kärsinyt vain lievästi, vahingot voidaan korjata konservatiivisilla, paikkaukseen perustuvilla toimenpiteillä. Lievillä vaurioilla tarkoitetaan paikallisen teräksen, esimerkiksi kulmien ja yksittäisten betonipintojen korroosiovaurioita. Suurimmat ja laajojen seinäpintojen korjaustarpeet johtuvat yleensä raudoitusten

korroosiosta ja/tai ulkokuoren osien halkeilusta tai irtoamisesta. Ne johtavat yleensä koko taloa koskevaan julkisivuremonttiin. (Hirsimäki, 2013; Köliö, Niemelä, & Lahdensivu, 2016; Lahdensivu, 2012; Méquignon et al., 2012.)

## 7.2 Rappaus ja sen korjaustarve 1950-luvun kerrostaloissa

Julkisivuremontteja pohdittaessa on ensin syytä tarkastella ulkoseinien korjaustarvetta asuinkerrostaloissa, joissa alkuperäinen julkisivu on ollut rappauspinta, ja se on vaurioitunut.

Asuinkerrostalojen ulkoseinien rakennetta on tarkasteltu jo luvussa 5, ja rappauksen korjaustarve ennen 1960-lukua valmistuneissa, paikalla rakennetuissa taloissa johtuu yleisimmin pinnoitteen rapautumisesta ja irtoamisesta runkona toimivan tiilikuoren pinnasta. Koko ulkoseinärakenne ei näissä kohteissa yleensä ole kärsinyt vaurioita, vaan esimerkiksi viistosateen vaikutuksesta kosteudelle on altistunut vain seinän uloin osa. Toinen syy rappauksen irtoamiseen alustastaan on sodan jälkeinen materiaaalipula, joka johti vaihtelevan laatuisten materiaalien, esimerkiksi tiilen käyttöön myös talojen ulkoseinissä. Laatuvaihtelut aiheuttivat eroja myös seinien eri osien pakkaskestävyydessä, sillä veden imeytyminen muuttuu esimerkiksi tiilien laadun vaihdellessa. Ulkoseinissä, joissa uloimpana rakenteena on 20–30 millimetrin paksuinen rappauskerros, ei tiilen ominaisuuksien vaihtelulla ole merkitystä. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

## 7.3 Julkisivujen korjaustarve 1960–1970-luvun kerrostaloissa

Rakentamisen huippuvuosina 1960- ja 1970-luvuilla valmistuneissa kerrostaloissa ulkoverhouksen korjaustarve selittyy lähes aina sandwich-elementtien pakkasvaurioihin ja betonirakenteessa käytettyjen raudoitusten korroosiolla. Pakkasvaurioiden synty perustuu betonissa olevien kapillaarihuokosten täyttymiseen vedellä syksyn pitkien sateiden aikana. Syksyllä tavallisesti ilmankosteus on pitkään korkea, joten rakenteissa oleva kosteus ei kuivu. Lämpötilan laskiessa riittävästi, seiiniin imeytynyt vesi jäätyy, ja jäätyessään laajeneva vesi rikkoo ympärillään olevia rakenteita. Nykyisin ulkokuorissa käytetään betonilaatuja, joihin betonin hydratoituessa kehityy erityisiä suojuhuokosia torjumaan pakkasesta aiheutuvaa betonin murtumista. (BY-koulutus, 2012.)

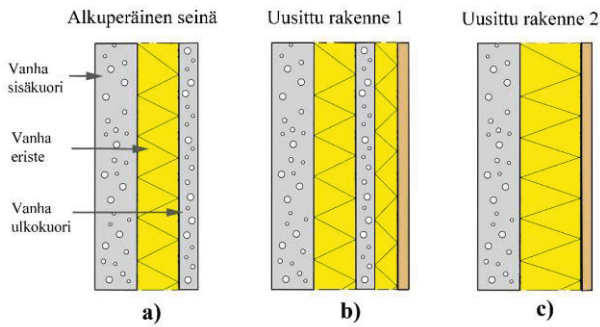
Myös rakenteiden sisällä olevan raudoituksen korroosio on johtanut laajoihin vaurioihin vanhojen talojen ulkoseinissä. Korroosioista johtuvat ongelmat havaittiin vasta suurten rakennusmassojen ikääntyessä, sillä uudessa betonissa oleva alkaalisuus toimii jonkin aikaa riittävänä suojana betonissa käytetyille teräksille. Rakenteen ikääntyessä kuitenkin ilmassa oleva hiilidioksidi reagoi betonissa olevan kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Karbonatisoituminen vähentää materiaalin alkaalisuutta ja alkuperäinen suojausvaikutus heikkenee. Karbonatisoituminen etenee hitaasti rintamana seinärakenteen ulkopinnalta kohti betonisen rakenteen sisäosia. Kemiallisen reaktion edetessä betonikuoren sisällä se saavuttaa vuosien kuluttua rakenteeseen upotetut teräkset ja korroosio alkaa, mikäli kosteutta on raudoituksen ympäristössä riittävästi. (BY-koulutus, 2012.) Korroosion rakenteessa etenemisen ehtona ovat suotuisat ympäristötekijät, jotka ovat rautojen pinnalla vaikuttava vähintään 10 °C-asteen lämpötila ja yli 80% suhteellinen kosteus.

Kummankin vauriotyyppin, sekä pakkasvaurioiden että korroosion, perimmäinen syy on rakenteessa oleva kosteus. Kosteuden pääsyä rakenteisiin on toisinaan pyritty hillitsemään maalaamalla sandwich-elementin ulkopinta, mutta se toimii vain niin pitkään kun maalipinta on täysin ehjä, eikä kosteus pääse rakenteisiin muuta kautta, esimerkiksi ikkunoiden pellityksistä. Jos kosteus pääsee maalipinnasta huolimatta elementin sisäosiin, muuttuu tilanne täysin. Silloin maalipinnasta voi olla lähinnä haittaa, sillä se hidastaa betonielementin kuivumista ulkona olevan ilmankosteuden alentuessa. (Kouhia et al., 2010; Vinha et al., 2013.) Maalipinnan vaikutus riippuu luonnollisesti maalityypistä, sillä esim. silikaattimaalit ovat vesihöyrylle avoimia, eivätkä vaikuta betonin kuivumiseen. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

## 7.4 Julkisivun peruskorjauksen perusratkaisut

Julkisivujen peruskorjauksissa käytettävät rakenneratkaisut valitaan julkisivun kunto- tutkimuksen perusteella, jolloin määritetään tekniset korjaustarpeet ja mahdolliset korjausmenetelmät.

Betonielementteihin perustuvien julkisivujen peruskorjausten yhteydessä voidaan rakenneratkaisut jakaa lähtökohtaisesti kolmeen erilaiseen peruskorjausvaihtoehtoon. Nämä vaihtoehdot on esitetty seuraavassa kuvassa 7.1, jossa vasemmanpuoleinen kuva esittää alkuperäistä, korjattavaa ulkoseinän rakennetta.



**Kuva 7.1** Ulkoseinän peruskorjauksen tavallisimmat vaihtoehdot. (Kouhia, Nieminen, & Pulakka, 2010, muokattu)

Ensimmäisessä peruskorjausvaihtoehdossa (a) korjataan vain julkisivun ulkopinta paikallisesti. Toisessa vaihtoehdossa (b) vanha julkisivu jätetään paikalleen sekä lisäksiinnitetään, ja sen päälle asennetaan mahdollisesti lisäeristystä ja kokonaan uusi julkisivu. Kolmannessa vaihtoehdossa vanhan julkisivun uloimmat kerrokset poistetaan ja siinä yhteydessä uusitaan myös vanha lämmöneristys korvaamalla se uudella ja paksummalla, nykyiset vaatimukset täyttävällä villaeristyskerroksella tai muulla lämmöneristysmateriaalilla. Tätä vaihtoehtoa kuvaa kuvan 7.1 oikeanpuoleinen kuva (c). Kuvassa näkyy kummankin uusitun rakenteen ulkopintana ruskealla värillä esitetty uusi julkisivupinta, joka voi olla rappauksen ohella muukin rakenteellinen ratkaisu. (Kouhia et al., 2010.)

## 7.5 Rappausmenetelmät ja laastit

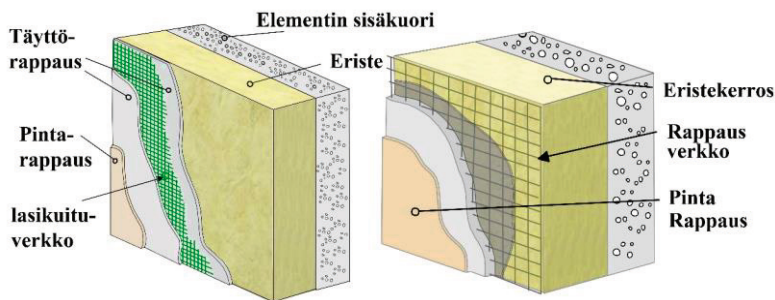
Usein julkisivujen peruskorjauksessa suositetaan ns. eristerappausa, jossa perustyyppit ovat niin sanotut ohutrappaus-eristejärjestelmä ja paksurappaus-eristejärjestelmä. Eristerappauksen nimitystä käytetään vain silloin, kun rappaus tehdään suoraan eristekerroksen päälle. Paksuuden lisäksi niiden rappausyoppien periaatteellisena erona on rappauskerroksen alla oleva materiaali, joka ohutrappauksen tapauksessa yleensä on kovaa lamellivillaa tai EPS-eristettä ja paksurappauksessa pehmeää mineraalivillaa. EPS-lämmöneristeen kanssa voidaan käyttää vain ohutrappausa. (Linne, 2009.)

Eri rappausyoppiä käytettävät laastit ovat ominaisuuksiltaan täysin erilaisia. Ohutrappaus-eristejärjestelmissä käytetään aina sementtilaasteja, jotka ovat usein polymeerimodifioituja. Paksurappaus-eristejärjestelmissä puolestaan käytetään KS-

laasteja, joiden kalkin ja sementin suhde tavallisesti vaihtelee eri järjestelmätoimituksilla. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Kalkin ja sementin seokseen pohjautuville laasteille käytetään merkintätapaa, joka suoraan kertoo sideaineiden koostumuksen. Alkukirjaimina on aina KS, ja sen jälkeen ilmoitettava suhdeluku kertoo kalkin ja sementin paino-osien suhteen. Tämän suhteen jälkeen voidaan ilmoittaa myös runkoaineena käytettävän hiekan määrän. (Kivitaloinfo, 2003; Lehtonen, 2016; Pietarila, 2001.)

Ohut- ja paksurappausjärjestelmiä käsitellään seuraavassa tarkemmin, ja niiden rakennetta seinän ulkopintana esitetään kuvassa 7.2.



**Kuva 7.2** Ohut- ja paksurappaus eristekerroksen päällä. (Asp, Hujanen, Huhtinen, Pikkuvirta, & Valkama, 2020, muokattu)

### 7.5.1 Ohutrappaus

Ohutrappaus tehdään nimensä mukaan ohuemmaksi kuin paksurappaus. Ohutrappauksen etuna onkin kevyt rakenne, jossa liimalaastikiinnityksen lisäksi ovat vain harvaan asennettavat varmuuskiinnikkeet, joilla varmistetaan laastikerroksen kiinnittyminen rakennuksen runkoon. Niitä asennetaan vain noin 4 kpl/m<sup>2</sup>. Ohutrappauksen kiinnitys perustuu liimalaasteihin sekä eristemateriaalin- että rappauksen osalta. Lämmöneristekerroksen kiinnitykseen käytetään erillisiä kiinnikkeitä, jos eristeenä on lämmöneristelevy. Ohutrappauksen suurimpana erona paksurappaukseen verrattuna on tämän kirjan näkökulmasta rappausverkon materiaali, joka ohutrappauksessa on muovipinnoitettuun lasikuituun perustuvaa tiheäsilmäistä verkkoa. Verkko ei itsessään sisällä metallisia rakenteita. Ohutrappaus ei sovellu oikaisua vaativille epätasaisille pinnoille, sillä ohutrappauksen kokonaispaksuus on vain 5–10 millimetriä. Itse rappaus tehdään useassa vaiheessa, ensin liimalaastilla tehtävä verkotuskerros, johon sijoitetaan lasikuituverkko, ja sen jälkeen ohut verkotuslaastikerros ja pinnoitekerros.



Verkotuslaasti pohjautuu sementtiin, johon on lisätty erilaisia polymeerejä ja mahdollisesti muovikuituja. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Ohutrappauksella saadaan muodostettua julkisivu, jonka rakennusfysikaalinen toiminta perustuu rappauskerroksen vedenpitävyyteen. Lisäksi ohutrappauksella saadaan julkisivuun haluttuja struktuureita ja erilaisia väri vaihtoehtoja. (Lahdensivu et al., 2016a.)

## 7.5.2 Paksurappaus

Paksurappauksessa rappauskerroksen kokonaispaksuus on 20–30 millimetriä, riippuen alla olevan pinnan mahdollisesta oikaisutarpeesta. Suurempaa täyttöä vaativat oikaisut on tehtävä ennen lämmöneristelevyjen asentamista, sillä niiden rakenteellisten ponttien vuoksi lämmöneristelevyjen välinen tasoero on rajoitettu vähäiseksi.

Paksurappauksessa käytetään rappauksen lujittamiseksi kuumasinkittyä teräsverkkoa, jonka silmäkoko on yleisimmin noin 19 millimetriä. Langan paksuus verkossa tavallisesti on yhden millimetrin suuruusluokkaa. Sekä silmäkoossa että langan paksuudessa voi olla tuotekohtaisia eroja, sillä verkon soveltuvuutta rappauskäyttöön eivät rajoita verkon pienehköt erot mitoituksessa. Verkon ensijaisena tarkoituksena on estää rappauspinnan halkeilua ja lujittaa rappausta. Joissakin tapauksissa verkolla pyritään myös minimoimaan sen alla olevan rakenteen liikkumisen aiheuttamat vauriot. (Hänninen, 2014.)

Paksurappausjärjestelmä eroaa täysin ohutrappausjärjestelmän rakennusfysikaalisesta toimintaperiaatteesta. Paksurappauksessa rappauskerros muodostaa lämmöneristeiden päälle mekaanisesti jäykän levymäisen rakenteen, joka tarvitsee liikunta- saumoja kosteus- ja lämpöliikkeiden vuoksi. Ohutrappauksessa puolestaan rappauskerros muodostaa lämmöneristeiden pintaan kauttaaltaan kiinnitetyn joustavan pinnan, jonka liikkeet seuraavat alustarakenteiden liikkeitä. (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Paksurappauksen kerrosrakenne ja metallinen rappausverkko ovat näkyvissä leikkauksessa 7.3.



**Kuva 7.3** Rappausverkon sijainti rappauksen keskellä. (Valokuva: Asp)

Paksurappauksen ensimmäinen rappauskerros on pohjarappaus, jonka tarkoituksena on peittää alla olevien lämmöneristeiden pinta kauttaaltaan noin 3 millimetrin paksuisella laastikerroksella. Näin saadaan myös lisättyä tartuntapinta-alaa täyttölaastikerrokselle. Tässä vaiheessa tasoittuvat myös eristepinnan pienet epätasaisuudet. Seuraava kerros on täyttörappaus, jolla oikaistaan laajemmat epätasaisuudet ja johon sijoitetaan metallinen rappausverkko. Viimeinen kerros on pintarappaus, johon voidaan käyttää erilaisilla väriaineilla seostettua rappauslaastia antamaan halutun värisävyn lopulliselle rakennuksen ulkopinnalle. Pinta voidaan myös maalata tai käsitellä vettä hylkivillä pinnoitteilla. (Gröhn, 2014; Lahdensivu, Annila, & Pikkuvirta, 2016b.)

Kuvassa 7.3 näkyy verkon sijoittuminen täyttörappauksen keskelle, mutta oikaistaessa mahdollisia laaja-alaisia pinnan epätasaisuuksia verkon paikka rappauksen sisällä vaihtelee.

Yhtenä tai useampana kerroksena toteutettavan paksurappauksen kokonaispaino on ohutrappausta merkittävästi suurempi, ja se joudutaankin kiinnittämään eristekerroksen läpi alla olevaan tiili- tai betonirunkoon mekaanisilla kiinnikkeillä. Paksurappauksen paino on suuruusluokkaa  $60 \text{ kg/m}^2$ . (Lahdensivu henkilökohtainen tiedonanto, 2021.)

Tämän väitöskirjan näkökulmasta kiinnostavinta on kuitenkin rappauksen ja erityisesti rappausverkon aiheuttama vaimennus matkapuhelinverkkojen käyttämille signaaleille. Tätä vaimennusta on tutkittu tarkemmin tämän kirjan luvussa 18.

## 8 KOSTEUS JA SEN SIIRTYMINEN ULKOSEINISSÄ

Koska tässä väitöstutkimuksessa myöhemmin esitetään ulkoseinärakenteiden kosteuden olevan hyvin merkittävä tekijä seinien radiosignaalien vaimennusta määrittäessä, on paikallaan tarkastella materiaalien kostumisen mekanismeja hieman tarkemmin. Tässä luvussa taustoitetaan kosteuden olemusta ja siirtymistä materiaaleissa lähinnä sadeveden aiheuttamana ja toisaalta ilmankosteuden vaihdellessa.

Tämän kappaleen tarkoituksena on antaa pohjaa RF-vaimennuksen arvioinnille, kun tarkastelu kohdistetaan kysymykseen ulkoseinän merkittävän kastumisen todennäköisyydestä ja toisaalta arvioidaan siitä, miten pitkään seinäpinnan voidaan olettaa olevan kostea.

Tässä väitöstutkimuksessa tarkastellaan ulkoseinää ympäröiviä kaasuja lähtökohdaisesti ilman näkökulmasta (pois lukien kuitenkin ikkunan lasituksen eristyslasipaketin välitilassa olevat suojakaasut) ja kosteutta puhtaan veden näkökulmasta. Puhtaan veden oletus on hieman epätarkka, sillä rakennusmateriaalien ympäristössä on aina erilaisia ilman ja ympäröivien materiaalien aiheuttamia tai mukanaan tuomia epäpuhtauksia, joilla ei kuitenkaan itse radiosignaalien vaimennuksen kannalta ole merkitystä.

### 8.1 Materiaalin kosteus

Aineen sisältämä kosteus määritelmän mukaan tarkoittaa materiaalissa olevaa kemiallisesti sitoutumatonta vettä, joka voi olla kaasumaisessa olomuodossa (vesihöyrynä), nestemäisenä tai kiinteässä muodossa (jäätynyt vesi). Kosteuspitoisuus ilmoitetaan prosenttilukuna, joka kuvaa materiaalin sisältämän kosteuden massan suhdetta kuivan aineen massaan. Kuvattaessa kosteuden määrää painoprosenteina se on helppo todentaa yksinkertaisillakin välineillä. (Siikanen, 2008.)

Kaikki huokoiset rakennusmateriaalit sisältävät tavallisissa olosuhteissa jonkin verran kosteutta. Kosteuden määrään vaikuttavat ympäröivän ilman lämpötila ja kosteus, sekä luonnollisesti materiaalin omat ominaisuudet. Lisäksi kosteutta saattaa olla peräisin tavallisuudesta poikkeavia määriä rakentamisesta ja tilojen käytöstä johtuen. Rakennusmateriaalien tarkastelussa yleisesti tulee huomioida, että materiaalien ja

rakenteiden kosteus- ja lämpötekninen toiminta ovat aina yhteydessä toisiinsa. Kosteus heikentää aina lämmöneristeiden toimintaa ja toisaalta lämmöneristeillä voidaan ainakin jossain määrin ohjata kosteuden käyttäytymistä ja siirtymistä sekä valita paikka tai pinta, johon kosteus tiivistyy. (Kauppila, 2014; Siikanen, 2008.)

Materiaaleissa oleva kosteus on sitoutuneena tavallisimmin materiaalin omaan huokosrakenteeseen, jota voidaan kuvata huokostilavuuden ja huokosjakaumien avulla. Huokosiin varastoitunutta kosteutta nimitetään hygroskooppiseksi kosteudeksi, ja se varastoituu erityisesti pieniin huokosiin. Kosteus pyrkii aina tasapainotilaan, jossa eri huokosten välillä vallitsee sama kosteuspitoisuus, eli lähekkäin sijaitsevien huokosten sisältämä ilma on yhtä kosteaa. Vesimolekyyleillä on pyrkimys sitoutua materiaalissa olevien ilmaa sisältävien huokosten seinämiin. Näihin huokosseinämiin sitoutunut kosteus riippuu lämpötilasta ja huokosilman suhteellisesta kosteudesta. Tasapainossa oleva kosteuspitoisuus on suurimmillaan 0° C lämpötilassa, sillä kosteuspitoisuus laskee ilman lämpötilan noustessa tai laskiessa tästä raja-arvosta. (Tuominen, 2016; Vinha, 2011.)

## 8.2 Materiaalin kosteuspitoisuus

Kosteuden määrää arvioitaessa sen lämpötilariippuvuutta ei aina oteta huomioon, vaan materiaalin kosteuspitoisuus ( $u$ ) ilmoitetaan yksinkertaisesti painoon perustuvana vertailuna tarkasteltavan materiaalin vesimäärän ( $w$ ) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ja kuivan materiaalin tiheyden  $\rho_{dry}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] suhteena.

$$u = \frac{w}{\rho_{dry}}. \quad (8.1)$$

Kaavassa esiintyvä kuivatiheys voidaan määrittää kuivaamalla tietyn tilavuuden omaavaa kappaletta 105° C-asteessa useiden vuorokausien ajan. (Hagendoft, 2001.)

## 8.3 Hygroskooppiset materiaalit

Erilaiset materiaalit käyttäytyvän kosteuden näkökulmasta eri tavoin, ja usein ne ryhmitelläänkin hygroskooppisuuden perusteella ryhmiin. Ainetta tai materiaalia kutsutaan yleisesti hygroskooppiseksi silloin, kun se kykenee sitomaan kosteutta ja luovuttamaan sitä takaisin ympäröivään ilmaan ympäristön suhteellisen kosteuspitoisuuden alentuessa.

Kosteuden sitoutuminen hygroskooppisilla aineilla tapahtuu sekä absorptio että kapillaarikondensaation avulla. Absorptio kuvaa lähinnä pintavoimien avulla huokosten pintaan tapahtuvaa kiinnittymistä, kun taas kapillaarikondensaatio syntyy huokosissa olevan ilmankosteuden tiivistyessä huokosvedeksi lämpötilan laskiessa ilman suhteellisesta ilmankosteudesta riippuvan kastepistelämpötilan alapuolelle. (Kohonen & Ojanen, 1983; Palviainen, 2009.)

Ei-hygroskooppisina materiaaleina pidetään yleisesti materiaaleja, joilla huokoskoko on suurempi kuin  $10^{-7}$  metriä. Silloin kosteuden sitoutuminen perustuu vain absorptioon. Käytännössä jakolinja näkyy niin, että ei-hygroskooppisen materiaalin ollessa kosketuksissa vain kosteaan ilmaan, pysyy rakenne kuivana. Kosteus alkaa lisääntyä materiaalissa vasta kun se kastuu ulkopuolisen veden vaikutuksesta. Kun hygroskooppisen materiaalin kosteus on saavuttanut ympäristön kosteuspitoisuuden, syntyy tasapainotila, jota nimitetään hygroskooppiseksi tasapainokosteudeksi. (Künzel, 1995.) Tasapainotila järkkyy vasta ympäristön kosteuden tai lämpötilan muuttuessa. Mikäli ympäröivän ilman kosteuspitoisuus alkaa laskea, seuraa materiaaliin sitoutunut kosteus viiveellä ympäröivien olosuhteiden muutoksia. Viiveen lisäksi materiaalin kosteuden muuttumiseen liittyy hystereesi, joka edellyttää ympäristön kosteuden riittävän suurta muutosta, jotta materiaalin kosteus alkaa muuttua. Käytännössä tämä näkyy niin, että kapillaarisesti sitoutunut vesi ei poistu huokosverkostosta ennen kuin ympäristön kosteus tai laskenut selvästi. (Björkholtz, 2010; Bomberg, 1974.)

### 8.3.1 Kosteuden käyttäytyminen hygroskooppisella alueella

Tavallisten kiviainekseen perustuvien rakennusmateriaalien näkökulmasta kosteus sitoutuu huokosten yksittäisiin molekyylikerroksiin silloin kun suhteellinen kosteuspitoisuus on matala. Nimityksenä ilmiölle käytetään monomolekylaarista absorptiota. Suhteellisen kosteuden noustessa yksittäiset molekyylikerrokset paksuuntuvat, jolloin siirrytään kohti polymolekylaarista absorptiota. Tällä alueella materiaalin tasapainokosteus nousee suhteellisen kosteuden funktiona lähes lineaarisesti. Suhteellisen kosteuden noustessa edelleen alkaa kapillaarikondenssi, jonka aikana huokokset alkavat täyttyä vedellä. Tämä täyttyminen alkaa kaikkein pienimmistä huokosista ja jatkuu kooltaan suurempiin huokosiin. (Hagentoft, 2001; Krus & Kiebl, 1998; Tuominen, 2016.) Vedellä täyttyminen aikana tasapainokosteus alkaa nousta ja päättyy hygroskooppiseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Yleisesti voidaan todeta, että materiaalin

kosteuspitoisuus ei nouse hygroskooppisen alueen yläpuolelle, ellei materiaali ole suorassa kosketuksessa nestemäiseen veteen. (Björkholtz, 2010.)

Tarkemmin tarkasteltuna erilaisten materiaalien huokosrakenne on hyvin erilainen. Esimerkiksi puu eroaa kivipohjaisista materiaaleista selvästi. Sen orgaanisuudesta johtuen huokosten lisäksi myös puun soluseinät varastoivat vettä. (Hagentoft, 2001; Tuominen, 2016.) Puun käytön osalta voidaan todeta, että pientalojen ulkoverhousta ja runkorakenteita lukuun ottamatta se on ainakin toistaiseksi betoniin verrattuna paljon vähemmän käytetty kaupunkien keskustojen kerrostalorakentamisen materiaali.

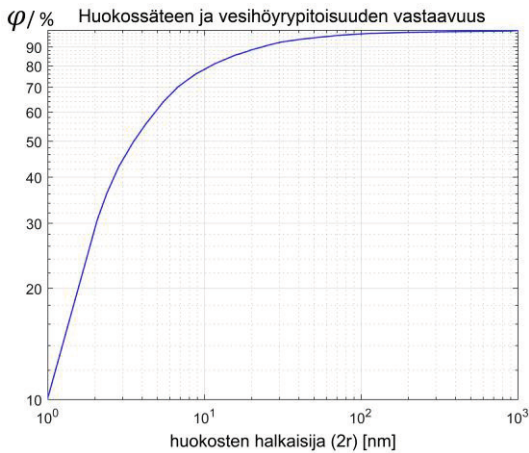
## 8.4 Kapillaarikondensaatio

Kapillaarikondenssi on paljon tutkittu ja erityisesti betonin yhteydessä laajaa keskustelua herättänyt aihe. Siinä veden (tai muun nesteen) molekyylit kiinnittyvät materiaalin yksittäisten huokosten seinämille. Molekyylien määrän kasvaessa riittävästi seinämiin muodostuu yhtenäinen pinta, jonka muoto seuraa huokosten seinämien pintoja. Tälle yhtenäiselle kaarevalle pinnalle syntyy paine-ero, jonka vaikutuksesta höyry tiivistyy nesteeksi jo kyllästyskosteuspitoisuutta matalammissa kosteuden pitoisuuksissa. Kapillaarikondenssin syntymiseen vaikuttaa oleellisesti huokosten koko ja suhteellinen kosteus. Näiden yhteyttä kuvataankin yleisesti tunnetulla niin sanotulla Kelvinin kaavalla (Krus & Kiebl, 1998)

$$\varphi = e^{\frac{-2 \sigma M_w \cos(\phi)}{r \rho R T}}, \quad (8.2)$$

jossa  $\varphi$  on suhteellinen kosteus,  $\sigma$  on nesteelle vallitseva pintajännitys [N/m],  $M_w$  kuvaa veden moolimassaa [kg/mol], nesteen ja materiaalin välistä reunakulmaa kuvataan  $\phi$ :llä [aste],  $r$  [m] on huokosten keskimääräinen säde,  $\rho$  on nesteen tiheys [kg/m<sup>3</sup>],  $T$  on lämpötila [K] ja  $R$  on yleinen kaasuvakio [8,31 J/(K mol)].

Huokosten keskimääräinen säde on vaikeasti havaittavissa tai arvioitavissa oleva suure, sillä huokosten muoto on satunnainen, mutta jonkinlaisten karkeiden arvioiden perusteella voidaan kuitenkin taulukoida vesihöyrypitoisuuksien ja huokossäteiden välistä vastaavuutta. (Hagentoft, 2001.)



**Kuva 8.1** Kuvassa huokossäteen ja vesihöyrypitoisuuden vastaavuus kapillaarikondenssissa. (Hagentoft)

Kuvasta 8.1 nähdään, että pienillä huokosilla (alle 1 nanometriä) suhteellinen vesihöyrypitoisuus  $\varphi$  on prosenttilukuna ilmoitettuna noin 10 prosentin luokkaa, kun taas yli 10 nanometriä halkaisijaltaan olevilla huokosilla se on jo 80 % suuruusluokkaa. (Hagentoft, 2001; Tuominen, 2016.)

#### 8.4.1 Kosteuden käyttäytyminen kapillaarisella alueella

Ennen kuin hygroskooppisesta kosteuspitoisuudesta siirrytään kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen, kohdataan niin sanottu kriittinen kosteuspitoisuus. Tällä tarkoitetaan raja-arvoa, jonka jälkeen materiaalin sisällä vesihöyryn liikkeistä johtuvat kosteuden virtaus eivät enää ole eniten merkitsevä mekanismi, vaan hallitsevaksi kosteuden siirtymisessä tulee kapillaarivirtaus. (Vinha, 2011.)

Materiaalin kostumisessa kapillaarisen alueen katsotaan alkavan yleisesti siinä tilanteessa, jolloin materiaali on kosketuksessa veteen, ja silloin kappale voi saada paljon suurempia kosteuspitoisuuksia kuin hygroskooppisessa tilanteessa voi syntyä ilman ulkopuolisten paine-erojen vaikutusta. Kapillaarisen alueen tasapainokosteuden määrittäminen on epävarmaa, sillä tasapainokosteus muuttuu pienelläkin kosteuden vaihteluvälillä. (Krus & Kiebl, 1998.)

Aineen tai materiaalin ollessa kapillaarisella alueella se pystyy sitomaan nesteistä vettä, kunnes materiaali saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden  $w_{cap}$ . Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden voidaan määrittellä kosteuspitoisuudeksi, joka normaalissa ilmanpaineessa voidaan saavuttaa veden luonnollisella

imeytymisellä ilman, että asiaan vaikuttaa ulkoisia voimia. (Krus & Kiebl, 1998.) Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden määrittäminen materiaaleille tarkasti on yksinkertaisilla koejärjestelyillä vaikeaa, sillä upottamalla kappale veteen, se altistuu veden paineelle ja myös osa ei-kapillaarisista huokosista täyttyy vedellä. Tätä ei tapahdu normaaleissa materiaalien käyttöön liittyvissä olosuhteissa. Jos kappale pyritään kastelemaan alapinnan kautta, imeyttämällä vettä kappaleeseen, aiheuttaa erikokoisten huokosten luonnollinen kapillaarinen nousukorkeus eroa teoreettisiin malleihin. Huokosverkoston täyttäminen vedellä aiheuttaa epävarmuutta kappaleen kastumisen määrittämiseen, sillä normaalipaineessa osaan huokosista jää aina kapseloitunutta ilmaa. Ilmanpaineella on erityinen rooli esim. betonin suojahuokosissa, joiden sisältämä paine tulee olla normaalia ilmanpainetta suurempi. Tällöin normaaliolosuhteissa vallitseva hydrostaattinen paine ei riitä syrjäyttämään suojahuokosissa olevaa ilmaa. Suojahuokosten tavoitekin on olla puskurina ulkopuolisille paine-eroille, joita syntyy esimerkiksi kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessä ja niiden tilavuuden kasvaessa. (Kohonen & Ojanen, 1983; Krus & Kiebl, 1998; Wilson, Carter, & Hoff, 1999.)

## 8.5 Ilmassa oleva kosteus

Ilmankosteutta tarkasteltaessa lähdetään tavallisesti toteamuksesta, että ilmaa voidaan ilmakehän alaosissa käsitellä vesihöyryn ja kuivan ilman seoksena. Kuivalla ilmalla ja vesihöyryllä on omat osapaineensa ja ilman kokonaispaine onkin näiden osapaineiden summa. Ilmanpainetta ja tilavuutta voidaan kuvata ideaalikaasun yhtälöllä, joka on yleisestikin kaasujen tilanyhtälö (Björkholtz, 2010; Mäkitalo, 2012).

$$pV = \frac{m}{M} R T, \quad (8.3)$$

jossa  $p$  on kaasun paine [Pa],  $V$  = kaasun tilavuus [ $\text{m}^3$ ],  $m$  = kaasun massa [kg],  $M$  = kaasun moolimassa [kg/mol],  $R$  on yleinen kaasuvakio (8314,3 [J/kmol·K]), ja  $T$  on ilman lämpötila [K].

Ideaalikaasun ja käytännössä esiintyvän ilman välinen ero on tämän työn näkökulmasta lähinnä teoreettinen, eikä sillä ole merkitystä RF-vaimennusta arvioitaessa. Yleisesti, rakennusfysikaalisessa mielessä, ideaalikaasun pistemäisiksi oletetut molekyylit vuorovaikuttavat toisiinsa lähinnä törmäysten kautta. Korkeampi lämpötila tarkoittaa aina suurempaa molekyylien liikettä ja sitä kautta enemmän törmäyksiä.



Todellisilla kaasuilla kuitenkin on erilaisten hiukkasten välillä muutakin vuorovaikutusta kuin törmäykset. (Mäkitalo, 2012.)

## 8.6 Kosteuden siirtyminen rakennusmateriaaleissa ja niiden välillä

Kosteuden esiintyminen rakennusmateriaaleissa riippuu materiaalin huokosrakenteesta ja osin lämpötilasta. Tavallisimmat rakenteissa olevan kosteuden olomuodot ovat neste, vesihöyry, lumi ja jää, joissa kahdessa ensimmäisessä olomuodoissa kosteus myös voi siirtyä. Kosteuden siirtyminen edellyttää jonkin suureen potentiaalieroita kahden pinnan välillä, näistä voivat olla esimerkiksi tuulenpaine lämpötila tai höyrynpaine. Vetenä esiintyvän kosteuden siirtämiseen tarvittavana voimana voi edellisten paine-erojen lisäksi olla vedenpaine, gravitaatio tai kapillaarinen imu. Vesihöyryn siirtymisen mekanismit perustuvat diffuusioon tai konvektioon. (Laine, 2010; Lindberg, 2004.) Seuraavissa kappaleissa kuvataan hieman tarkemmin näitä vesihöyryn siirtymisen kahta perusmekanismia.

## 8.7 Diffuusio kosteuden siirtäjänä

Diffuusion yhteydessä tarkastelukohteena ovat jonkin rajapinnan tai useamman rajapinnan eri puolilla olevat kaasut. Useimmissa tapauksissa itse kaasut ovat samat, mutta niillä on erilaiset osapaineet tai pitoisuudet. Nämä erot pyrkivät luonnostaan tasoittumaan ja sen seurauksena esim. vesihöyry pyrkii siirtymään suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta kohti pienempää. Käytännössä tämä tarkoittaa siirtymistä suuremmasta vesihöyryn osapaineesta kohti pienempää. Mitä suurempi on pitoisuus tai osapaine-ero, sitä voimakkaampi ja nopeampi on diffuusiovirtaus. (Lindberg, 2004; Mäkitalo, 2012; Vinha, 2011.)

Kaasun siirtymisen nopeus materiaalissa ei kuitenkaan selity vain pitoisuuksien tai osapaine-erojen perusteella. Suurin kaasujen siirtymistä selittävä tekijä on varsinkin rakennusmateriaalien osalta kunkin materiaalin ominaisuus, joka on nimetty vesihöyrynläpäisevyydeksi. Tällä parametrilla on suuret materiaalikohtaiset erot, ja esimerkiksi voidaan todeta että 0,2 millimetrin paksulle muovikalvolle vesihöyryn läpäisevyys on vain noin kymmenen prosenttia 100 millimetrin paksun puhtaan betonirakenteen vastaavasta arvosta. Jos esimerkkinä käytetään edelleen sandwich-betonielementin tavallisia rakenneosia, voidaan vertailun vuoksi arvioida, että elementin

keskellä olevan 100 millimetrin mineraalivillapohjaisen lämmöneristeen vesihöyryn läpäisevyys on puolestaan noin 100-kertainen 100 millimetrin paksuiseen betoniin verrattuna. (Lindberg, 2004.)

Syynä diffuusioon kohdistuvaan mielenkiintoon on erityisesti ulkoseinien kaikkein eniten RF-signaaleita vaimentavien osien (jos jätetään varsinaisia yhtenäisiä metallipintoja sisältävät materiaalin tämän tarkastelun ulkopuolelle), kostuminen ja kuivuminen syksyn kaltaisissa olosuhteissa, joissa esiintyy pitkiä korkean ilmankosteuden ajanjaksoja. Näissä ajanjaksoissa seinämateriaalien kosteus nousee, ilman että rakenne välttämättä kastuu sateen tuoman vapaan veden vaikutuksesta.

Niin kuin aikaisemmin todettiin, on kaasujen osapaineiden erot diffuusion varsinaisen syy. Syitä voi itse asiassa olla kaksi, osapaineiden tai pitoisuuksien erot, mutta nämä ovat toisistaan riippuvia suureita, niin kuin alla olevasta yksinkertaistetusta ideaalikaasun tilanyhtälöstä 8.4 nähdään. Siinä tuloksena saatava vesihöyryn osapaine  $p_v$  [Pa] lasketaan suhteellisen vesihöyrypitoisuuden  $\theta$  [%RH], vesihöyrypitoisuuden  $v$  [kg/m<sup>3</sup>], ja empirisesti määriteltyjen vakioiden avulla (Hagentoft, 2001; Tuominen, 2016.)

$$p_v = 461,4 \cdot (\theta + 273,15) \cdot v, \quad (8.4)$$

jossa vakioon 461,4 on sisällytetty kaikki olennaiset vesihöyryyn liittyvät vakiotermit.

## 8.8 Konvektio kosteuden siirtäjänä

Maan pinnalla oleva ilmakehä koostuu tunnetusti typestä (78 %), hapestä (21 %) ja joukosta muita yksittäisiä kaasuja. Kaasujen joukossa on 0,1–4 % vesihöyryä, jonka pitoisuuden vaihtelu liittyy ilman lämpötilaan. Lämmin ilma yleisesti sisältää vesihöyryä enemmän kuin kylmä. (Euroopan ympäristökeskus, 2013.)

Koska vesihöyry on ilmakehän osakaasu, se liikkuu tuulen ja muiden ilmavirtausten mukana. Suljetussa tilassa esiintyvää kiertävää ilmavirtausta nimitetään konvektioksi. Rakenteiden tarkastelun yhteydessä konvektio voidaan jakaa kahteen osaan, luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. (Kokko, Ojanen, & Salonvaara, 1997.)

### 8.8.1 Luonnollinen konvektio

Luonnollinen konvektio esiintyy ilman kiertoliikkeenä erityisesti suljetuissa kerroksellisissa rakenteissa, joissa on pystysuoria rakenneosia. Tyyppillisiä esimerkkejä näistä

ovat seinät ja ikkunat. Pystysuora konvektio syntyy, kun ilman tiheyserot saavat ilman liikkumaan suuremmasta tiheydestä kohti pienempää. Seinissä luonnollinen konvektio liittyy lähinnä tilanteisiin, joissa eristeenä on tiheydeltään pieniä ja kevyitä villaeristeitä ja joissa eristekerros on yli 125 millimetriä paksu. Ikkunoissa luonnollinen konvektio tapahtuu erityisesti eristyslasipaketissa, jossa lasien välinen etäisyys vaikuttaa sekä lämmön- että ääneneristykseen. On esitetty, että lasien ilmaväliä kasvatettaessa luonnollinen konvektio voimistuu niin, että yli 50 millimetrin ilmaväli ei paranna enää lasituksen lämmöneristystä. Suurempi ilmaväli kuitenkin parantaa ääneneristyskykyä. (Shankar & Hagentoft, 2000; Siikanen, 2008.)

### 8.8.2 Pakotettu konvektio

Pakotettu konvektio syntyy, kun rakenteiden ulkopuolinen tekijä saa aikaan paineeron, joka aiheuttaa jonkin kaasun, esim. vesihöyryn siirtymistä. Pakottavana tekijänä voivat toimia LVI-laitteet, savupiippuvaikutuksen aiheuttamat rakenteelliset raot ja aukot sekä tuuli. Huomattavaa on, että pakotetun konvektion aikaansaaminen edellyttää aina ainakin jonkinasteista rakenteellista epätiiviyttä. (Lampinen & Kotiaho, 2015.)

Tuulen vaikutus ilman ja sen mukanaan kuljettaman vesihöyryn siirtymiseen on suuri. Vaikeaksi tuulen vaikutuksen arvioinnin tekee se, että sekä tuulen suunta että sen voimakkuus vaihtelee voimakkaasti lyhyenkin ajan sisällä. Lisäksi rakennuksen korkeudella ja sen ympäristöllä on merkittävä vaikutus paikallisiin tuuliolosuhteisiin. Tuuli myös aiheuttaa hyvin epätasaisen painekuvion rakennuksen ympärille, ja yli- ja alipaineiden erot voivat olla niin suuria, että niiden vaikutukset on huomioitava lujuuslaskennassa. (Siikanen, 2008.) Tuulen vaikutusta on arvioitu lähemmin luvussa 8.10.1.

## 8.9 Kosteuden lähteet

Kosteuden lähteitä arvioitaessa tässä työssä keskitytään ulkokuoren kosteuteen, joka ei ole peräisin rakennuksen sisätilojen käytöstä, peseytymisestä, ruuanlaitosta tai pyykkien kuivatuksesta. Ulkokuoren kosteus on peräisin lähinnä sateesta, ulkoilman kosteudesta tai rakennusaikaisesta kosteudesta. (Pitkäranta, 2016.) Rakennuksen kosteuteen vaikuttavat huomattavasti ympäristön olosuhteet ja vuodenaajat. Syksyisin on pitkiä kosteita jaksoja, jolloin ei välttämättä ole päivittäistä sadetta, mutta viileän ja

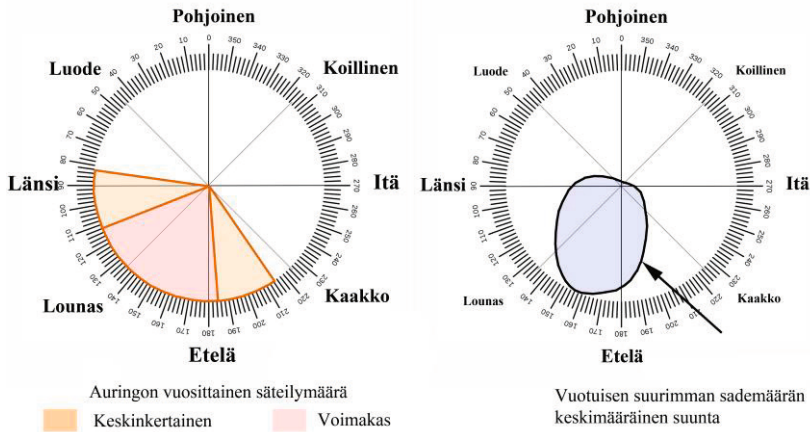
hyvin kostean ilman ympäröivä rakenne ei kuivu sateiden välillä. Samoin rakentamisen aikana materiaaleja valmistettaessa, varastottaessa, asennettaessa ja kuljettaessa niihin voi joissakin olosuhteissa kerääntyä kosteutta. (Mäkitalo, 2012.) Rakennuskäytännön kosteuden määrä on hyvin vaikeasti arvioitavissa ja osin sen vuoksi sen arviointi jätetään tämän työn ulkopuolelle. Sen sijaan rakennuksen tavanomaisen elinkaaren kuluessa erilaisten rakenteiden kosteuteen liittyvien tekijöiden lähempi tarkastelu on perusteltua, sillä kuten tulokappaleesta nähdään, on materiaalien kosteudella huomattava vaikutus niiden RF-vaimennuksiin ja niiden vaihteluun.

Rakennusten ulkokuoren näkökulmasta näkyvin kosteuden lähde on sadevesi. Sade voi esiintyä erilaisissa olomuodoissa, tavallisena vesisateena, räntänä tai lumena. Sateen aikaansaama vedenpaine luonnollisesti kohdistuu erityisesti vesikattoon, mutta matkapuhelinsignaalien kannalta kiinnostavinta on tarkastella erityisesti viistosateen vaikutusta ulkoverhoukseen ja ulkoseinäelementtien ulkopintaan.

Kastumisen kannalta mielenkiintoinen on räntäsade, sillä otollisissa olosuhteissa se voi kiinnittyä joksikin aikaa jopa pystysuorille seinäpinnoille. Räntäsade esiintyy nollan asteen lämpötiloissa, jolloin ympäröivä ilma ei yleensä kuivata kastuneita rakenteita.

## 8.10 Viistosade

Seinien kannalta viistosade on huomionarvoinen, sillä sen kannalta eri ilmansuuntiin olevat seinät ovat hyvin eriarvoisessa asemassa. Viistosateen aiheuttama kastuminen liittyy jäljempänä kuvattavaan tuulen aiheuttamaan paine-eroon, ja voidaankin todeta, että viistosateeseen liittyvät aina voimakkaat tuulet. Suomessa erityisesti syksyisin maan yli kulkevat matalapaineet määräävät tuulien suunnat, jotka ovat erilaisia ennen matalapainetta, niiden aikana ja niiden ohitettua tarkastelupaikan. Yleisimmin viistosade kuitenkin kastelee seinäpinnan lounaasta. Kevään ja kesän aikana sateen vaikutusta kuitenkin pienentää se, että auringon säteilyn aiheuttama kuivuminen ja lämpötilan nousu kohdistuu erityisesti etelän ohella kaakon ja luoteen puoleisille seinille ja rakenteille. Viistosadetta pidetäänkin merkittävimpana rakennusten ulkokuoreen tai ulkovaippaan kohdistuvana ulkoisena rasitustekijänä. (Ojanen & Salonvaara, 2002; Siikanen, 2008.)



**Kuva 8.2** Vuotuinen auringonpaiseen keskimääräinen suunta ja vuotuinen yleisin sateen suunta. (Rakennusfysiikan tutkimusryhmä 2018 ja Kauppila 2014, muokattu)

Kuvassa 8.2 esitetään vuotuinen rakennusten ulkopintaan vaikuttavat auringonvalon ja sateen keskimääräiset suunnat. (Kauppila, 2014; Rakennusfysiikan tutkimusryhmä, 2018.) Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty auringon rakenteita kuivattava vaikutus ilmansuunnan mukaan, jolloin suurin vuosittainen auringonpaisteen määrä osuu etelä-lounaan alueelle, ja voimakkaimman säteilyn alueen molemmin puolin voidaan hahmotella vielä keskinkertaisen säteilyn suunnat. Säteilyn määrää mitataan yksiköllä [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{vuosi}$ ].

Yllä olevassa kuvassa 8.2 ei pyritä antamaan mitään absoluuttisia arvoja vaan yleisen kuvan ilmansuunnan vaikutuksesta rakennuksen seinien kastumiseen ja kuivamiseen. Luonnollisesti tämäkin on tapauskohtaista, sillä siihen vaikuttavat oleellisesti rakennuksen ympäristö, siinä olevat mahdollisesti varjostavat muut rakennukset, maaston muodot ja puusto. (Kauppila, 2014; Mäkitalo, 2012.)

Vuoden sademäärästä keskimäärin noin puolet kertyy syys–marraskuun aikana, ja viistosateen määrä on 20–30 % pystysuoran sateen määrästä. (Björkholtz, 2010.) Suomessa on suuria alueellisia eroja vuosittaisissa sademäärissä, ja rannikoilla sateen määrä on keskimäärin erilainen kuin sisämaassa.

### 8.10.1 Rakennuksen muodon vaikutus viistosateen määrään

Kun voimakas tuuli kohtaa rakennuksen ulkopinnan, syntyy talon ympärille paikallisesti vaihtelevia painegradientteja. Näiden painegradienttien vaikutus ohjaa ilmavirtauksia ja tuulen mukana kulkevia sadepisaroihin. Kullekin yksittäiselle seinän osalle

lankeavan sateen määrän arvioiminen on kuitenkin teoreettisesti hyvin monimutkaista, sillä vaikuttavina tekijöinä ovat pisaroiden koon, tuulen voimakkuuden, tuulen suunnan, talon muodon ja sateen voimakkuuden lisäksi myös ympäröivät rakennukset sekä ympäristössä olevan mahdollisen puuston tyyppi, korkeus ja sijainti.

Yksinkertaisin lähestymistapa viistosateen määrän arviointiin on laskea viistosateen määrä häiriöttömän tuulen tapauksessa ja sovittaa se tarkasteltavat rakennuksen geometriaan. Häiriöttömän tuulen tapauksen arvioinnissa on käytettävä alue- ja ilmastokohtaisia viitearvoja sateen tyyppille ja keskimääräisille pisaroiden kokojakaumille. Arvioinnin pohjaksi on esitetty kokemukseräisesti muotoiltua kaavaa (Lacy, 1965; Straube & Burnett, 2000):

$$r_v = 0.28 \cdot V \cdot r_h = DRF \cdot V \cdot r_h, \quad (8.5)$$

missä  $r_v$  on pystysuuntaisen pinnan kohtaama sateen määrä [mm/m<sup>2</sup>/h],  $V$  on keskimääräinen tuulen nopeus [m/s] ja  $r_h$  on sateessa maahan tunnissa kertyvä vesimäärä [mm/m<sup>2</sup>/h]. DRF (Driving Rain Factor) on viistosadekerroin, joka kuvaa pisaroiden siirtymistä sivusuunnassa tuulen vaikutuksesta. Kaavasta nähdään, että pystypinnalle keskimäärin lankeavan vesimäärän voidaan arvioida olevan likimain vakio, mutta useissa tapauksissa kaavan antama arvio on liian ylimalkainen.

DRF-arvo vaihtelee paljon, ja riippuu sadepisaroiden keskimääräisestä koosta ja tarkastelukorkeudesta. Lähtöarvona voidaan pitää lukuarvoa 0,2 tai 0,22, mutta ne soveltuvat vain ”normaalille” sateelle, jossa sadekertymä on 1–3 mm/h. Muilla sateen intensiteeteillä virhe kasvaa nopeasti. Sadepisaroiden koko luonnollisesti määrää niiden massan ja suurempimassaisia pisaroita tuuli siirtää vähemmän sivusuunnassa. Edellä mainitusta ”normaalista” sateesta poiketen esimerkiksi tiikusateessa arvo saattaa nousta 0,5:een. Kaavan oletuksena on vapaan viistosateen koostuminen suunnilleen samankokoisista pisaroista, joiden keskimääräinen halkaisija on 1,2 millimetriä. Pisaroiden koko ja massa määrittävät putoamisnopeuden, joka on yleensä noin 4,5 m/s. (Blocken & Carmeliet, 2004.) Tuulen nopeus ei kuitenkaan ole vakio rakennuksen eri puolilla, joka vähentää kaavan tarkkuutta.

Edellisen kaavan tarkentamiseksi on ehdotettu otettavaksi mukaan lisäparametrejä seuraavassa esitettävän kaavan 8.6 mukaisesti (Straube & Burnett, 2000.)

$$r_{bv} = RAF \cdot DRF_{r_h} \cdot v_h \cdot \cos(\theta) \cdot r_h, \quad (8.6)$$

missä  $r_{bv}$  kuvaa sateen kerrostumisnopeutta pystysuoraan pintaan (litraa/m<sup>2</sup>/tunnissa), RAF (Rain Admittance Factor) on rakennuksen muodosta riippuva termi,

joka ottaa huomioon rakennuksen oman aerodynamiikan ja rakennuksen suunnan tuulen suuntaan nähden. DRF-termi on edellisen kaavan tapaan tietyn tuulen vaikutuksesta pystysuoralle pinnalle kääntyvää vesimäärää kuvaava termi ja  $\theta$ -muuttuja kuvaa normaalin seinäpinnan ja tuulen suunnan välistä kulmaa. Muuttuja  $v_h$  kuvaa tuulen voimakkuutta (m/s). (Straube & Burnett, 2000.)

Pisaroiden käyttäytyminen tuulen mukana ei ole suoraviivaista, sillä pisaroiden koko on lähes aina niin pieni, että tuulenpuuskat kestäessään yli muutaman sekunnin, aiheuttavat merkittäviä suunnanmuutoksia sateeseen. Lisäksi tarkemmissa tarkasteluissa tulee ottaa huomioon, että tuulen nopeudet heikkenevät merkittävästi maanpinnan läheisyydessä. Tämän vuoksi tasaisenkin tuulen tapauksessa sateen suunta on kaareva.

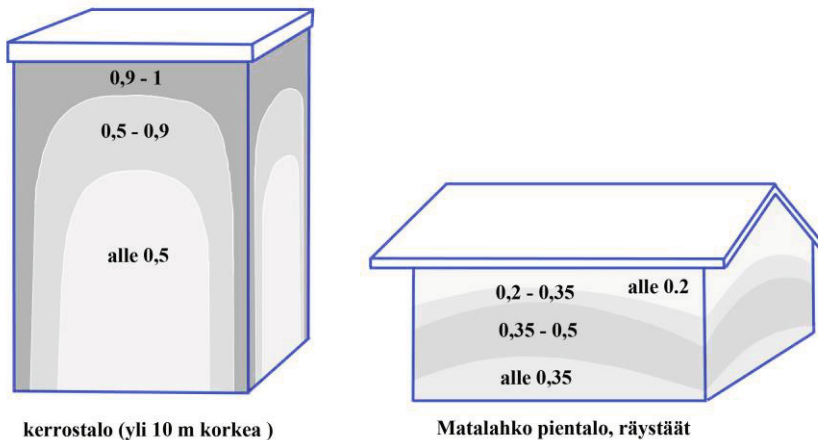
Tuulen nopeuden tiedetään kasvavan tarkastelukorkeuden kasvaessa, ja tämän vuoksi korkeilla kerrostaloilla seinien kastuminen on paljon voimakkaampaa kuin matalammissa taloissa. Koska tuulen voimakkuus korkeussuunnassa vaihtelee merkittävästi, on ilmiölle esitetty laskennallinen korjauskerroin (Straube, 2010):

$$v_z = v_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha, \quad (8.7)$$

jossa  $v_{10}$  on tuulen nopeus [m/s] 10 m normaalin tuulimittarin tason yläpuolella,  $z$  on tarkasteltava korkeus maanpinnan tason yläpuolella [m] ja  $\alpha$  on kaavan sovittamiseen käytettävä eksponentti. Seuraavassa taulukossa 8.1 on esitetty muutamia korjauseksponentin lukuarvoja. (Straube, 2010.)

<b>Taulukko 8.1</b> Korjaustermi $\alpha$ erilaisille ympäristöille. (Straube, 2010)	
<b>Korjaustermin kuvaus</b>	<b>Eksponentti <math>\alpha</math></b>
avoimen maan ympäristö, peltoja, vesialueita ja vain harvoja esteitä tuulelle	0,14
esikaupunkialue, puistoja ja matalia kerrostaloja	0,25
kaupunkien keskustat, korkeita kerrostaloja	0,36

Alla oleva kuva kuvaa erityyppisten rakennusten ulkoseinissä keskimäärin esiintyvän RAF-arvon alueita, jotka ovat riippuvaisia rakennuksen muodosta, tuulipinnoista ja luonnollisesti räystäiden rakenteesta ja pituudesta. (Straube & Burnett, 2000.)



**Kuva 8.3** Esimerkkikuva erilaisten rakennustyyppien RAF-arvoista. (Straube, 2010 muokattu)

Kuvassa 8.3 on nähtävissä kahden erilaisen talotyypin tyypillisiä ulkoseinälle lankeavia sadekerrostuman korjaustermien arvoja. Erityisen mielenkiintoisia ovat tyypillisten kerrostalojen ulkoseinien kulmien arvot, joissa korjaustermien arvo lähestyy ykköstä. Näissä alueissa sateen määrä lähestyy vapaan häiriöttömän tuulen aiheuttamaa vaakasuuntaisen sadekertymän siirtymistä pystysuoralle pinnalle, ja nämä poikkeukselliset alueet ulottuvat jopa metrin päähän reuna-alueista. Sen sijaan rakennusten ulkopinnan keskiosassa on laajahko alue, jossa sademäärä on enintään puolet vapaan tuulen tapauksesta. (Straube & Burnett, 2000; Henriques, 1992; Lacy, 1965.)

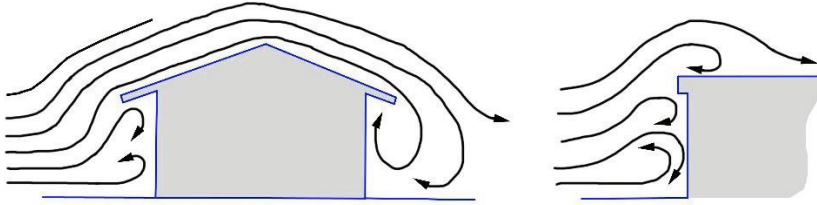
RAF-arvoja on tutkittu kokeellisesti useissa julkaisuissa, joiden pohjalta on mahdollista laskea arvioita RAF-arvoille tuulen suunnan ja rakennuksen perusmuodon perusteella. Useimmissa lähteissä tavallisen suorakaiteen muotoisen kerrostalon julkisivun keskellä olevalla alueella RAF-luku on noin 0,3 (Blocken & Carmeliet, 2004; Henriques, 1992; Lacy, 1965.)

Koska tuulen nopeus kasvaa mitä korkeammalle maanpinnalta nouseaan, voidaan 30 kerroksisen kerrostalon seinän olettaa kastuvan melkein kaksi kertaa niin voimakkaasti kuin matalan kaksikerroksisen talon seinän. Lisäksi on otettava huomioon ympärillä olevien rakennusten tuulelta suojaava vaikutus, joka vähentää erityisesti matalien talojen kastumista. (Straube & Burnett, 2000.)

Viistosateen kokonaismäärä on suoraan verrannollinen tuulen voimakkuuteen ja sen suuntaan rakennuksen seinää kohti. Tuulen nopeus vaihtelee suuresti paikkakuntakohtaisesti ja ympäröivän rakennuskannan, maaston muotojen ja kasvillisuuden mukaan. Voimakkaimmillaan tuulet ovat rannikoilla ja maanpinnan muodoiltaan tasaisien alueiden peltoaukeilla. (Blocken & Carmeliet, 2004.)

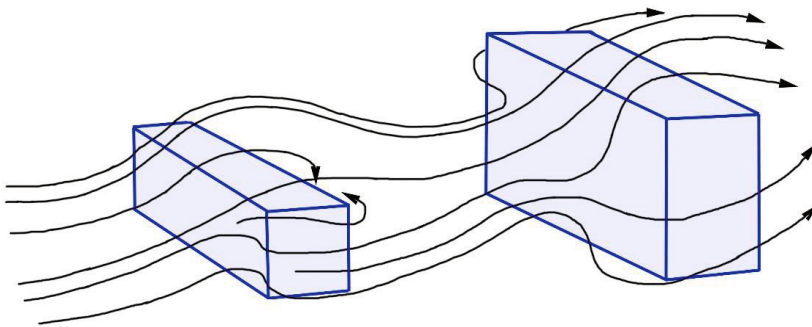


Edellä olevassa kaavassa 8.6 esiintynyt tuulen suunnan suhdetta seinäpinnan suuntaan kuvaava  $\theta$ -kulma on myös vaikeasti arvioitava parametri. Alle olevat kuvat 8.4 kuvaavat rakennuksen muodon aiheuttamia pyörteitä tuulen suunnassa. (Straube, 2010.)



**Kuva 8.4** Tuulen suunnan muuttuminen talojen ympärillä. (Straube, 2010 muokattu)

Mikäli maastonmuodot tai muut rakennukset eivät vaikuta tuulen suuntaan, ovat viistosateille kaikkein alttiimpia rakennusten etelän tai lounaan suuntaan aukeavat sivut. Tuuli muodostaa rakennuksen ympärille virtauskentän, jota voidaan kuvata paine-eroilla rakennuksen eri puolilla. Virtauskentän periaate on esitetty kuvassa 8.4, jossa vasemmalta tuleva tuuli kohtaa ensin harjakattoisen rakennuksen. Tuulen paine on suoraan tuulta vastaan olevalla seinällä huomattavasti suurempi kuin tuulen suunnan kannalta rakennuksen takapuolella, jonne erilaisten pyörteiden vuoksi voi syntyä paikallisia suuriakin paine-eroja. Yleisesti kuitenkin voidaan olettaa, että talon takapuolella tuulen paine on keskimäärin pienempi kuin tuulen puolella. (Straube, 2010; Straube & Burnett, 2000.)



**Kuva 8.5** Tuulen pyörteily tapauksessa, jossa viereinen rakennus muuttaa ilmavirtauksia. (Straube, 2010, muokattu)

Kuvassa 8.5 esitetään tilanne, joka tulisi ottaa huomioon viistosateen arvioinnissa. Siinä tutkittavan rakennuksen lähellä olevat muut rakenteet muuttavat ilmavirtausten

suuntaa. Mikäli DRF:n mallinnuksessa rajoitetaan tarkasteltavan rakennuksen omiin aerodynaamisiin muotoihin, jää tuloksiin merkittävä virhelähde. On kuitenkin huomioitava, että mallinnuksen kohteena saattaa olla uuden asuntoalueen yksi ensimmäisenä rakennettavista taloista, eikä viereen rakennettavan talon korkeudesta, sijainnista tai muista muodoista ole vielä tietoja käytettävissä.

Talon räystäät ja muut ulokkeet paitsi suojaavat viistosateelta estämällä pisaroiden kaareutumista seinäpinnalle suoraan, myös ohjaamalla voimakkaasti ilmavirtauksia rakennuksen lähiympäristössä. Harjakattomaiseen rakenteeseen tavallisesti liittyvät pitkähköt räystäät, mutta jo pelkän harjakaton muoto vähentää ulkoseinien kastumista kääntämällä tuulen suuntaa. Sen sijaan kerrostaloille tyypillinen tasakatto aiheuttaa katon reunaan pyörteitä, jotka häiritsevät ilmavirtausten kulkua katon yli. (Mäkitalo, 2012; Straube, 2010.)

## 8.11 Sadeveden vaikutus seinäpinoissa

Se, miten paljon viistosateen määrä todellisuudessa kastelee rakennuksen seinää, riippuu luonnollisesti itse viistosateen tuomasta vesimäärästä, mutta myös seinän omista ominaisuuksista, pinnan kuvioinnista ja seinän kyvystä imeä vettä. Myös tarkasteltavan alueen ympäristössä olevat alueet, erityisesti sen yläpuolella olevat pinnat, vaikuttavan alueen kastumiseen. Mikäli yläpuoliset pinnat ovat puhtaita ja vettä imemättömiä, esimerkiksi laajoja metalli tai muovipintoja, niille esim. viistosateen mukanaan tuoma vesi valuu alemmille seinän alueille. Myös viistosateen sisältämällä vesimäärällä on merkitystä. Mikäli seinän pystysuoraan pintaan kohdistuu lyhyessä ajassa suuri vesimäärä, muodostuu seinän pinnalle vesikalvo, joka ei läpäise enää enempää vettä. Vesikalvon tavoin käyttäytyy myös huokoinen, täysin kastunut materiaali. Silloin kun se on täysin kyllästynyt vedestä, se käyttäytyy kuin mikä tahansa vettä läpäisemätön materiaali. Yhteenvetona edellisistä voidaan todeta, että esim. viistosateen aikana todellisen seinään imeytyvän vesimäärän luotettava arviointi on hyvin haasteellista. Siihen vaikuttavat pelkän seinän osalta ympäristö, pinnan kosteus, sateen kesto ja jopa pinnan aikaisempi kosteus- ja kuivumishistoria. (Pentti & Hyypöläinen, 1999.)

Ulkoseinien kastumista arvioitaessa on erityisesti huomioitava paikalliset veden kuormitusta lisäävät alueet tai rakenteet, jotka rasittavat erityisesti alapuolella olevia pintoja ja rakenteita. Paikallisista erityisalueista tavallisin lienee ikkuna, joka käyttäytyy sadeveden kanssa muiden seinäpintojen tapaan, mutta jolla veden imeytyminen on muita pintoja oleellisesti pienempää. Ikkunaan osuva viistosade valuu alaspäin ja

ohjautuu erilaisten pelti- ja pielirakenteiden avulla alaspäin. Ikkunoiden puitteisiin on usein suunniteltu erityisiä vedenohjausjärjestelmiä, joiden tarkoitus on ohjata valuva vesi kauemmas rakenteista. Näiden imemättömien rakenteiden ympäristössä, erityisesti alapuolella, olevien liitosten ja saumakohtien vedeneristys joutuu poikkeuksellisen suurelle rasitukselle. Käytännön kokemukset ovat osoittaneet, että vaikka liitokset ja saumat on suunniteltu toimimaan vaatimusten edellyttämällä tavalla, joissain tapauksissa imeytymättömiin pintoihin osuva vesi valuu hallitsemattomasti alaspäin, tunkeutuu kapillaarisesti ympäröiviin materiaaleihin tai voi tunkeutua suoraan rakenteisiin. (Kudder & Erdly, 1998.)

Veden imeytymistä rakenteisiin on mallinnettu monissa tutkimushankkeissa, ja on kehitetty verraten yksinkertaisiakin matemaattisia arviointimenetelmiä sateen imeytymiskertoimen selvittämiseksi. Arvioinnissa usein käytetään ulkoisia voimia apumuuttujina, esim. paine-eroja, mutta niiden arviointi on vaikeaa ja ne lisäävät mallinnettavan ympäristön monimutkaisuutta merkittävästi. Ilmanpaineissa esiintyvät erot eivät kuitenkaan ole merkittävä veden tunkeutumista rakenteeseen kuvaava voima silloin, kun kysymyksessä on kosteutta läpäisevät materiaalit. Sitä vastoin seinän pinnotteella on suuri merkitys. Esimerkiksi maalatun betonipinnan osalla sadeveden imeytyminen pintaan on tehokkaasti estetty niin kauan, kun maalipinta on kauttaaltaan ehjä. Maalipinnan murtuessa tai hilseillessä tilanne kuitenkin muuttuu merkittävästi. Tämän jälkeen huonokuntoinen maalipinta muodostuu kosteudenhallinnan kannalta pikemminkin rasitteeksi, sillä maali hidastaa kostuneen materiaalin kuivumista. (Boyd & Scheffler, 1999; Sandberg, 1970.) Suuressa osassa asuinkerrostaloja betonipintaa ei kuitenkaan ole maalattu, vaan pintaan on tehty hiertämällä, telaamalla tai töpöttämällä haluttu visuaalinen ilme.



OSA 2  
ASUINKERROSTALON ULKOKUOREN  
RAKENNEOSAT



## 9 IKKUNAT JA NIIDEN RAKENTEET

Tämän väitöstutkimuksen keskeinen sisältö on esitellä tutkimustuloksia koskien matkaviestinjärjestelmien RF-signaalien vaimennusta tavanomaisten asuinkerrostalojen ulkokuoressa. Sen vuoksi tutkittavat rakenteet ovat rakennuksen ulkokuoren eri rakenneosia, joista tyypillisimmät ovat erilaiset seinärakenteet ja niihin sijoitetut ikkunat. Siis ikkunarakenteiksi lasketaan kaikki ikkuna-aukkoon asennettavat yksittäiset rakenteet, joita ovat puitteet, puitteisiin asennetut varsinaiset lasipinnat sekä seinää vasten kiinnitettävät karmit. (Hemmilä & Saarni, 1999.)

Ikkunan varsinainen tehtävä on luonnonvalon välittäminen sisätiloihin ja toisaalta näkymän tarjoaminen talon ulkopuolelle. Ikkunat koetaankin asuinhuoneissa välttämättömiksi, ja viime vuosikymmeninä ikkunapintojen pinta-alat ovat olleet kasvussa talojen julkisivuissa. (Vikberg, Lylykangas, & De Luca, 2019.)

Ikkunoiden koon kasvua on kuitenkin rajoittanut rakentamismääräyskokoelman muotoilu, jonka mukaan ikkunoiden pinta-ala ei saa ylittää 15 % kiinteistön kerrosalasta ilman, että heikentyntä energiatehokkuutta pitää kompensoida muilla ratkaisuilla. Tämän taustalla on ikkunoiden perinteisesti seinärakenteita heikompi lämmöneristyskyky. (Honkanen, H., 2010.)

Ikkunoiden koon merkitys onkin paitsi radiosignaalien läpäisyn kannalta, myös asumisviihtyvyyden ja energiatehokkuuden näkökulmasta monimutkainen kokonaisuus. Tätä problematiikkaa kuvaavat erilaiset ohjeet ja suositukset, joista seuraavassa mainitaan vain muutama. Maankäyttö- ja rakennuslain aikaisemmassa versiossa on ollut lausuma, jonka mukaan ”asuinhuoneen tulee saada riittävästi luonnonvaloa” (MRL 51§ 1 ja 2 mom.). Myös rakentamismääräyskokoelman osan G1:n mukaan asuinhuoneessa tulee olla ikkunan valoaukkoa vähintään 1/10 huoneen lattiapinta-alasta. Ikkunan sijoituksen tulee olla valoisuuden ja viihtyisyyden kannalta tarkoituksenmukainen, ja osan ikkunasta tulee olla avattavissa. (SUOMEN RakMK G1, 2004; Lylykangas, Andersson, Kiuru, Nieminen, & Päätaalo, 2015.)

Oman lähestymistapansa ikkunoiden kokoon ja ilmansuuntaan antaa lämpöhäviön tasauslaskelman näkökulma, jonka mukaan laskelman vertailutason karmien mitoituksen ikkunapinta-alana on käytettävä 15 %:ia yhteenlasketusta maanpäällisistä kerrostasojen aloista, mutta kuitenkin enintään 1/2 julkisivujen pinta-alasta. Tasaus-

laskenta ei kuitenkaan ole suoraan sovellettavissa oleva suunnitteluohje, sillä ikkunapinta-ala riippuu varjostuksista, rakennuksen käyttötarkoituksesta ja rungon syvyydestä. Erityisesti rakennuksen ilmansuunnalla on merkittävä vaikutus, sillä erään suosituksen mukaan pohjoiseen tai itään avautuvien julkisivujen ikkunapinta-alan ei tulisi ylittää 10–15 % lattia-alasta, kun taas etelä- ja länsisivujen ikkunapinta voisi olla 30 % lattia-alasta. (Lappalainen, 2010; Lylykangas et al., 2015.)

Viime vuosikymmeninä kasvaneen ikkunapinta-alan vaikutus kokonaisenergiakulutukseen ei kuitenkaan vastaa suoraan yksinkertaisista laskentamalleista saatuja arvoja, sillä lämmityskauden aikana on mahdollista hyödyntää auringon säteilemää energiaa passiivisesti. Tätä passiivienergiaa ja massaan sitoutunutta energiaa ei kuitenkaan oteta säännönmukaisesti huomioon energiatehokkuutta koskevassa laskennassa. Isot ikkunapinnat vaikuttavat laskentaan myös muuta kautta, sillä ne vaikuttavat tarvittavan valaistuksen määrään.

Ikkunoiden osalta rakenteen elinkaaren mittainen matkaviestinsignaalien vaimennustasojen tarkastelu ja arviointi eroaa hieman rakennuksen muun ulkokuoren vastaavasta, sillä erityisesti aikaisempina vuosikymmeninä ikkunoiden elinkaari on ollut seinien elinkaarta merkittävästi lyhyempi. Ikkunoiden osia vanhentavat auringonsäteily ja sade. Erityisesti puuikkunoissa niiden yhteisvaikutus vaurioittaa puitteen ja karmin osia, ellei maalipinta ole koko ajan moitteettomassa kunnossa. Huoltamattomina ikkunat kärsivät nopeasti lahovaurioista, eikä huonokuntoisten puuosien korjaaminen ole yleensä järkevää. Tavallisesti heikkoon kuntoon päässeet ikkunat päätetäänkin vaihtaa. (Kanko, 1979.) Tämän väitöstutkimuksen näkökulmasta ikkunoiden vaihtaminen on merkittävää siksi, että siinä yhteydessä rakennuksen ulkokuoren signaalivaimennus yleensä muuttuu olennaisesti.

## 9.1 Ikkunoiden U-arvo

Rakennusmateriaalin tai rakenteen U-arvoa on käsitelty jo luvussa 4, mutta koska sen yhteys ikkunan RF-läpäisyyn on keskeinen, on tarpeen tarkastella erityisesti ikkunan U-arvon määrätymisperusteita ja low-e- tai selektiivikalvon roolia U-arvon määräytymisessä. Low-e-termiä käytetään englanninkielisissä teksteissä, mutta suomenkieliseen keskusteluun on vakiintunut ilmaisu selektiivikalvo. Nimitysten taustaa ja tulkintaa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 9.9, ikkunalasien pinnoitteet.

Koska ikkunan U-arvo kuvaa koko lasituksen kokonaislämmön siirtymistä, se riippuu ikkunan rakenteesta. Kokonaisuutena tarkasteltavan ikkunarakenteen U-arvoon vaikuttavat lasin ohella myös puitteiden, karmien ja käytettyjen tiivisteiden



fysikaaliset ominaisuudet. Yleisesti voidaan todeta, että mitä suurempi on ikkunan rakenteen vastus lämpövirtaukselle, sitä pienempi on U-arvo ja sitä parempi on lämmöneristyskyky. U-arvon koskiessa koko ikkunarakennetta, se voidaan jakaa eri rakenneosia kuvaaviin lukuarvoihin, joista tavallisimmat ovat lasin keskellä mitattava  $U_g$ -arvo ja vastaavasti  $U_f$ -arvo puitteen ja karmin alueella. (Ojanen et al., 2017.)

U-arvon määrittämisen yksityiskohtaiset laskentakaavat ja niiden sisältämien muuttujien sisältävät taulukot esitetään muun muassa rakentamismääräyskokoelmassa. (SUOMEN RakMK C4, 2002.) Siinä esitettyjen kaavojen käyttöä esitellään seuraavassa erikseen ikkunan valoaukolle sekä puite- ja karmiosalle.

### 9.1.1 Ikkunan valoaukon lämmönläpäisy

Ikkunan valoaukolle lämmönläpäisykerroin  $U_g$  määritetään kaavalla 9.1

$$U_g = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum R_{sj}}, \quad (9.1)$$

jossa

$R_{si} + R_{se}$  = sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa,

$\lambda_j$  = lasin lämmönjohtavuus [W/(m·K)],

$d_j$  = lasin ainekerroksen paksuus [m], ja

$R_{sj}$  = lasivälin  $j$  lämmönvastus [(m<sup>2</sup>·K)/W].

### 9.1.2 Ikkunan puu- ja karmiosan lämmönläpäisy

Tavanomaisen puuikkunan kehälle puolestaan lasketaan oma lämmönläpäisykerroimensa kaavalla 9.2.

$$U_f = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{\beta d}{\lambda_n}}, \quad (9.2)$$

jossa

$R_{si} + R_{se}$  = sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa,

$\lambda_n$  = karmin ja puitteen aineen normaalin lämmönjohtavuus [W/(m·K)],

$d$  = karmin ja puitteen keskimääräinen paksuus [m], ja

$\beta$  = moniulotteisen lämpövirtauksen vaatima korjauskerroin 0,7.

### 9.1.3 Ikkunan keskimääräinen lämmönläpäisy

Usein ikkunan U-arvon tarkastelussa riittää keskimääräisen lämmönläpäisykertoimen laskeminen, joka voidaan suorittaa kaavan 9.3 avulla seuraavasti

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \psi_g}{A_g + A_f}, \quad (9.3)$$

jossa

$A_g$  = valoaukon pinta-ala [m<sup>2</sup>],

$U_g$  = valoaukon lämmönläpäisykerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)],

$A_f$  = puitteen ja karmin pinta-ala lasituksen tasossa [m<sup>2</sup>],

$U_f$  = puitteen ja karmin lämmönläpäisykerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)],

$l_g$  = valoaukon reunassa olevan viivamaisen kylmäsilan pituus [m], ja

$\psi_g$  = valoaukon reunan viivamainen lisäkonduktanssi [W/(m·K)].

Koska edellä esitetyt matemaattiset tarkastelut nojaavat pitkälti taulukoissa esitettäviin arvoihin, tehdään kaupallisesti saatavissa oleville materiaaleille ja rakennesille yleensä myös U-arvon mittaus laskennallisesti saadun tuloksen varmistamiseksi. U-arvon kokeellinen määrittäminen tapahtuu aina vakioituissa olosuhteissa, joten rakenteen koko tai massa eivät vaikuta saatuun arvoon. Mittausmenetelmästä on erotettu myös ilmavirtausten osuus ja mahdollinen auringon säteily. Esimerkiksi lämmöneristeille, jotka läpäisevät ilmavirtoja, käytetään korjauskerrointa, joilla ilmavirtojen vaikutus kompensoidaan. (SUOMEN RakMK C4, 2002.)

Toisinaan U-arvon sijaan ilmoitetaan RT-arvo, eli lämmönläpäisykerroin, joka on U-arvon käänteisarvo. R-arvoa on käytetty aikaisemmin satunnaisesti kattojen ja seinien eristystä koskevilla asiakirjoissa, mutta nykyisin U-arvoa käytetään yleisesti kaikkien rakenteiden yhteydessä.

### 9.1.4 Ikkunan ominaislämpöhäviö

Tarkasteltaessa useampien ikkunoiden vaikutusta lämmitystarpeeseen tai lämpöhäviöiden tasauslaskentaan, voidaan ikkunoiden ominaislämpöhäviö ( $H$ ) laskea ikkunoiden keskimääräisten lämmönläpäisykertoimien ja pinta-alojen avulla seuraavasti (TASAUSLASKENTAOPAS 2018, 2017; SUOMEN RakMK D5, 2018) kaavalla 9.4

$$H = \sum U_w \cdot A_w , \quad (9.4)$$

jossa

$U_w$  = Ikkunan keskimääräinen lämmönläpäisykerroin [ $W/(m^2 \cdot K)$ ], ja

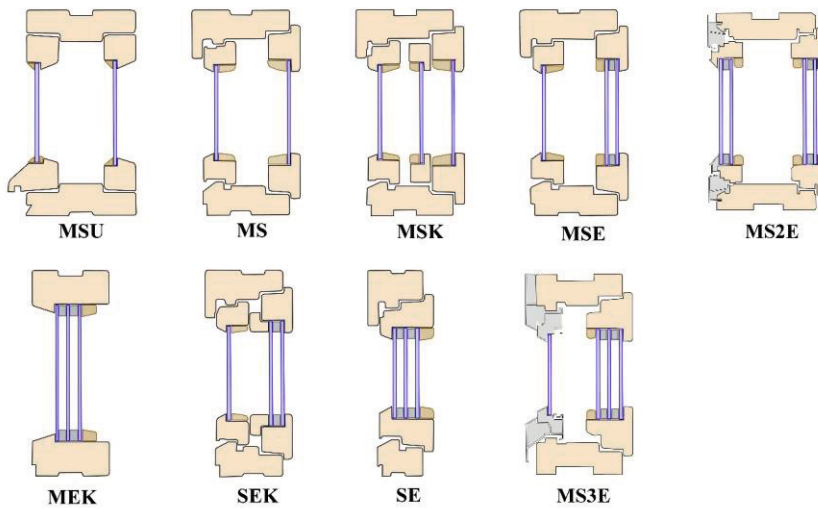
$A_w$  = ikkunan pinta-ala [ $m^2$ ].

## 9.2 Ikkunoiden rakenne

Markkinoilla on tällä hetkellä useita erilaisia ikkunatyyppejä ja niiden lisäksi rakennuskannassa on pitkään nähtävissä jo myynnistä poistuneita malleja. Mallien poistumisen syinä ovat lähes aina olleet alan kilpailu, valmistuksen keskittyminen sekä kirstytyneet energiatehokkuus- ja ääneneristysvaatimukset, joita vanhat ikkunamallit eivät enää täytä.

Teollisen rakentamisen yleistymisen 1960-luvun alussa toimi ikkunoidenkin saralla vedenjakajana, sillä sitä aikaisemmin ikkunat olivat tyypillisesti kaksilasisia puuikkunoita. Niiden aukeamissuunta oli joko ulos- tai sisäänpäin. Tämän jälkeen elementtirakentamisen nopeasti laajentuessa yleistyivät MS-ikkunat asuintalojen ulkoseinissä. 1970-luvun energiakriisin seurauksena energiatehokkuuteen kiinnitettiin aikaisempaa enemmän huomiota ja ikkunoiden osalla se näkyi lämpimien tilojen valoaikon lämmönläpäisyä kuvaavan U-arvon pienentymisenä. Tämän seurauksena uudisrakennusten kohdalla markkinoilla yleistyivät kolmipuitteiset- ja kolmilasiset MSK-ikkunat. Näiden ikkunoiden markkinaosuus säilyi suurimpana noin kymmenen vuoden ajan, ja 1990-luvulle tultaessa vallitseva ikkunatyyppejä oli jo MSE, jossa lasia on edelleen kolme, mutta sisimmäisistä kahdesta lasista on koottu kiinteä lasipaketti. Tätä lasipakettia kutsutaan yleisesti eristyslasipaketiksi, ja siinä voi olla täytekaasuna ilman sijaan jokin jalokaasu ja lasipaketissa voi olla selektiivi- tai low-e-kalvo. 2000-luvun alusta lähtien markkinoilla on ollut MSE-ikkunan lisäksi neljällä lasipinnalla varustettuja ikkunoita, MS2E-tyyppisiä, joissa on kaksi erillistä eristyslasipakettia, tai MS3E, joissa on 3-lasinen eristyslasipaketti sisäpuiteessa. Käytännössä kaikissa 2000-luvulla myydyissä ikkunoissa on vähintään yksi selektiivipinta laskemassa ikkunan U-arvoa määräysten vaatimalle tasolle. (Hemmilä & Saarni, 2002.)

Ikkunoille on standardoitu perustyyppisiä, jotka on esitetty seuraavassa kuvassa 9.1.



**Kuva 9.1** Ikkunoiden perustyyppien nimitykset. (Lähde: RT 103241, 2020, muokattu)

Yleisimmin käytetyt lasitusten ja rakenteiden merkinnät ovat seuraavat;

Yleisimmin käytetyt ikkunoiden ja ikkunaovien rakennemerkinnot:

MSU – Sisään/ulos aukeava kaksipuitteinen kaksilasinen ikkuna

MS – Sisäänaukeava kaksipuitteinen kaksilasinen ikkuna

MSK – Sisäänaukeava kolmipuitteinen kolmilasinen ikkuna

MSE – Lasimäärältään kuin MSK, mutta sisäpuiteessa eristyslasi

MEK – Kiinteä ikkuna, jossa kolmin- tai kaksinkertainen eristyslasi

SEK – Sisäänaukeava kaksipuitteinen kolmilasinen kytketty ikkuna

SE – Sisäänpäin aukeava yksipuitteinen ikkuna, jonka puitteessa kolminkertainen eristyslasi

MS2E – Sisäänpäin aukeava kaksipuitteinen ja nelilasinen ikkuna, jossa kaksi kaksilasista eristyslasipakettia

MS3E – Sisäänpäin aukeava kaksipuitteinen ja nelilasinen ikkuna, jossa sisäpuiteessa kolmilasinen eristyslasipaketti

Taulukkoon 9.1 on kerätty suuntaa-antavia viitearvoja erilaisten ikkunatyyppien U-arvoista. Taulukosta nähdään, että ikkunoiden lasien ja selektiivikalvojen lukumäärän ohella myös eristyslasipaketin täytekaasulla on merkitystä ikkunan U-arvon määrittämisessä. Taulukossa esiintyvät float-lasit ovat tavallista pinnoittamatonta kirkasta ikkunalasia. Niitä esitellään tarkemmin kappaleessa 9.5.

**Taulukko 9.1** Ikkunatyypin tyypillisiä U-arvoja. (Hemmilä & Saarni, 1999)

Ikkunan tyyppi	Lasipinnat	Täytekaasu	Lämmönläpäisykerroin (U-arvo)	
			Ikkuna keskimäärin	Lasipinta
MSU	2 kpl float	ei	2,4–2,8	2,8–2,9
MS	2 kpl float	ei	2,5–2,9	2,7–2,8
MSK	3 kpl float	ei	1,65–1,8	1,7–1,8
MSK	2 kpl float + 1 selektiivi	ei	1,3–1,4	1,3–1,4
MSE	3 kpl float	ilma	1,7–1,9	1,8–1,95
MSE	2 kpl float + 1 selektiivi	ilma	1,3–1,5	1,1–1,5
MSE		Argon	1,15–1,4	0,95–1,35
MSE	1 kpl float + 2 selektiivi	Krypton	1,1–1,35	0,85–1,1
MSE		ilma	1,25–1,5	1,0–1,4
MSE		Argon	1,1–1,35	0,9–1,25
MSE		Krypton	1,05–1,3	0,8–1,0
MS3E	4 kpl float	ilma	1,25–1,45	1,3–1,4
MS3E	3 kpl float + 1 selektiivi	ilma	1,1–1,3	0,9–1,25
MS3E		Argon	1,0–1,25	0,75–1,1
MS3E		Krypton	0,9–1,15	0,7–0,95
MS3E	2 kpl float + 2 selektiivi	ilma	0,9–1,2	0,7–1,05
MS3E		Argon	0,75–0,95	0,55–0,9
MS3E		Krypton	0,7–0,9	0,45–0,75
MS3E			0,7–0,9	0,45–0,75

Taulukon 9.1 mukaan U-arvoa parannettaessa muutos on lasipintojen osalta saavutettavissa lisäämällä lasien ja/tai selektiivikalvojen määrää. Varsinkin eristyslasipaketeissa parannusta saadaan käyttämällä täytekaasuna ilman sijaan Argonia tai Kryptonina. Sen sijaan puitteen ja karmin osalle näillä toimenpiteillä ei ole vaikutusta ja siksi koko ikkunaa koskevan U-arvon pieneneminen ei seuraa lasiosien numeroarvojen laskua tähdättäessä kohti hyvin pieniä U-arvoja. (Hemmilä & Saarni, 1999.)

### 9.3 Lämmön siirtyminen lasituksissa

Kokonaista ikkunarakennetta tarkasteltaessa voidaan todeta sen sisältävän huomattavan määrän erilaisia rakenneosia ja materiaaleja, joista ilmeisimmät ovat ikkunan lasit, puitteet ja karmit. Koska ikkunoiden valinnassa viime vuosikymmenien aikana korostunut energiatehokkuus, on tarpeen luoda lyhyt katsaus edellä esitetyn U-arvon lisäksi myös lämmön siirtymisen mekanismeihin ikkunarakenteissa.

Koko rakennuksen ulkovaippaa tarkasteltaessa, kriittinen rakenne lämmöneristävyyden kannalta on ikkunan ja sandwich-elementin liitoksen tiiviys. Se on rakennuksen tyypillisimpiä ilmavuotokohtia. Tässä teoksessa rakenteiden tiivistyskohtia ei

kuitenkaan tarkastella erikseen, sillä niiden vaikutus radiosignaalien etenemisessä on pieni.

Lämmön siirtyminen tapahtuu yleisesti rakenteen sisällä kolmella erilaisella mekanismilla; johtumalla, konvektiolla ja säteilyllä. (Rafnet, 2004.)

### 9.3.1 Lämmön johtuminen

Johtuminen (konduktio) kuljettaa lämpöä erityisesti metallien kaltaisissa hyvissä johteissa, jolloin lämmön siirtyminen perustuu vapaiden elektronien siirtämään lämpöön, ja huonommin lämpöä johtavien materiaalien tapauksessa molekyylien värähtelyn liike-energian tasoittumiseen. Lämpö virtaa rakennusmateriaaleissa aina lämpimämmästä kylmempään päin. Yleisesti johtumista tapahtuu kiinteiden aineiden lisäksi nesteissä. Molekyylien liikemäärä pyrkii tasoittumaan lämpövirran avulla, ja se voidaan laskea kaavoilla 9.5 ja 9.6, joista ensimmäinen kuvaa yksikerroksisen rakenteen stationääristä virtausta

$$q_{cd} = \frac{\lambda(T_{s1}-T_{s2})}{d} = \frac{T_{s1}-T_{s2}}{R}, \quad (9.5)$$

jossa

$\lambda$  = lämmönjohtavuus [W/m·K],

$d$  = ainekerroksen paksuus [m],

$T_{s1}$  ja  $T_{s2}$  = tasomaisen tasapaksuisen materiaalin pintojen lämpötilat ( $T_{s1} > T_{s2}$ ) [K],

$R = d/\lambda$  = materiaalin lämmönvastus [ $m^2K/W$ ].

Monikerroksiselle rakenteelle pätee stationäärisessä tapauksessa

$$q_{cd} = \frac{T_{s1}-T_{s2}}{RT}, \quad (9.6)$$

jossa  $RT$  = rakenteen kokonaislämmönvastus [ $(m^2 \cdot K)/W$ ]. (Rafnet, 2004.)

### 9.3.2 Konvektio

Konvektio kuljettaa lämpöä virtaavan aineen, yleensä ilman tai veden, välityksellä. Konvektio jaetaan luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon, jossa luonnollinen syntyy, kun nesteessä tai kaasussa on lämpötilaeroja ja pakotetun konvektion aiheuttajana on ulkopuolinen voima, esim. tuuli tai ilmanvaihto. Konvektion aiheuttamaa

lämpövirtaa  $\phi_{cv}$  [W] esimerkiksi ilman tapauksessa voidaan teoreettisesti käsitellä kaavan 9.7 avulla. (Rafnet, 2004)

$$\phi_{cv} = c \cdot \rho \cdot (T_1 - T_2) \cdot V, \quad (9.7)$$

jossa

$c$  = ilman ominaislämpökapasiteetti [Ws/kgK],

$\rho$  = ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>],

$T_1 - T_2$  = lämpötilaero [K], ja

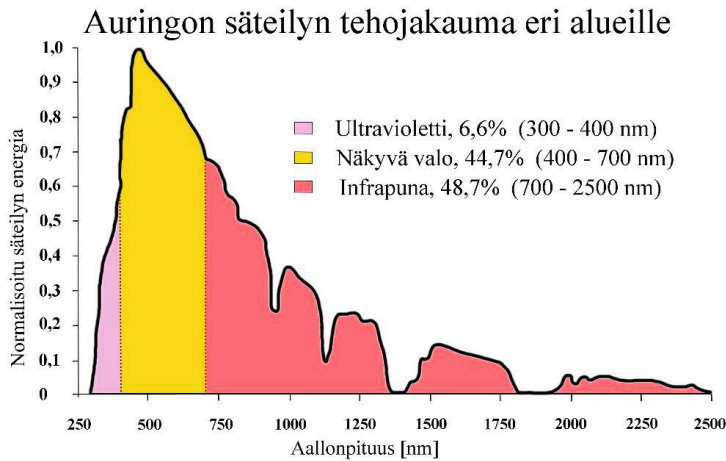
$V$  = tilavuusvirta [m<sup>3</sup>/s]

### 9.3.3 Säteily

Vaikka säteily yleisesti liittyy kaikkien materiaalien ominaisuuksiin, käsitellään sitä tässä erityisesti ikkunoiden näkökulmasta. Syy tähän ikkunoiden erityisasemaan perustuu nykyaikaisissa ikkunoissa olevista erityisistä selektiivi- eli low-e-pinnoitteista, joiden tarkoitus on muuttaa ikkunan lasien alkuperäisiä ominaisuuksia erityisesti säteilyn läpäisyn osalta.

Energian tai lämmön siirtymisessä säteily käyttäytyy radiosignaalien tapaan, eli energia siirtyy valon nopeudella. Lämpösäteily on kaikkialla oleva ilmiö, sillä kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet lähettävät lämpösäteilyä eli emittoivat sitä. Vertailuarvona tavallisesti käytetään mustaa kappaletta, joka emittoi säteilyä eniten, ja jonka emittoivan säteilyn arvona on 1. (Rafnet, 2004.)

Rakennustekniikassa lämpösäteily jakautuu kahteen ryhmään, joista auringonsäteily on lyhytaaltoista ja rakenteiden ja tilojen emittoiva säteily kuuluu pitkäaaltoiseen ryhmään. Ulkoseinän materiaaleihin kohdistuva auringon energian säteilyenergian suurin osa sijoittuu näkyvän valon aallonpituuksille ja sen läheisyydessä oleville infrapunon aallonpituuksille. Näkyvän valon spektri verrattuna infrapunaan on kapea, aallonpituuksiltaan välillä 400–700 nanometriä, kun infrapuna kattaa auringon säteilytehon näkökulmasta 700–2500 millimetrin alueen, jakautuen siinä useisiin pienempiin osiin alla olevan kuvan 9.2 mukaisesti. (Jelle, Kalnæs, & Gao, 2015.)



**Kuva 9.2** Auringon säteilyteho eri aallonpituuksilla. (Jelle et al., 2015)

Auringon säteilyn energia jakautuu laajalle alueelle kuvan 9.2 mukaisesti ja materiaalin pinnan läpi etenevä energia riippuu aallonpituudesta, materiaalin pinnan heijastusominaisuuksista ja kulmasta, jolla säteily kohtaa pinnan. Energian jakautuminen rajapinnassa voidaan jakaa heijastuvaan ( $R$ ), absorboituvaan ( $A$ ) ja pinnan läpäisevään osaan ( $T$ ) kaavan 9.8 mukaisesti:

$$T(\lambda) + R(\lambda) + A(\lambda) = 1 \quad (9.8)$$

Ikkunoiden lasipinnassa olevien selektiivikalvojen tai low-e-pinnoitteiden emissiivisyyden arvot ovat hyvin matalia, joten rakennuksen ulko- ja sisäpuolen välinen lämmön siirtyminen saadaan näillä mahdollisimman pieneksi. Tämä aiheuttaa lämpötilan nousua sisätiloissa, sillä aallonpituudeltaan pidempi infrapunasäteily, jota huoneessa sisällä olevat materiaalit säteilevät, ei läpäise low-e-materiaaleja.

## 9.4 Ikkunan emissiviteetti

Kappaleen tai materiaalin emissiviteetti ( $\epsilon$ ) on materiaalin pinnan lähettämän säteilytehon suhde mustan pinnan säteilemään tehoon.

Mustalle kappaleelle kokonaissäteily on laskettavissa kaavalla 9.9,

$$q_m = \sigma \cdot T^4 \text{ [w/m}^2\text{]}, \quad (9.9)$$



missä

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$ , joka on S. Boltzmannin säteilyvakio, ja

$T =$  lämpötila [K].

Tavalliselle rakennusmateriaalille emissiviteetti on 0,8–0,95 luokkaa, mutta kiiltävillä pinnoilla se on huomattavasti pienempi.

Yksittäiselle materiaalille lämpösäteilyn teho lasketaan kaavalla 9.10

$$q_r = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (9.10)$$

josta nähdään suoraan, että sen lukuarvo sijoittuu välille 0–1. (Rafnet, 2004.)

Emissiviteetissä siis on kysymys siitä, miten paljon kappale absorboi, eli imee energiaa itseensä ja toisaalta vapauttaa sitä emittoimalla. Vertailuna käytettävä musta kappale absorboi kaiken säteilyn. Kappaleen ollessa ympäristön kanssa termisesti tasapainotilassa, se lähettää yhtä paljon lämpösäteilyä kuin vastaanottaa. Kappale ei siis lämpene eikä jäähydy. Koska mustan kappaleen absorptio on 1, on sen emissiviteetti myös 1. Tärkeä huomio erityisesti ikkunoiden näkökulmasta on se, että koska korkea emissiviteetti merkitsee kaiken säteilyn imeytymistä kappaleeseen, se ei heijasta siihen ulkopuolelta tulevaa säteilyä. Taulukossa 9.2 on esitetty muutamien ulkoseinien rakennusmateriaalien tyypillisiä emissiviteetin arvoja. (Engineering ToolBox, 2003a; Hemmilä, K., 2006.) Taulukosta nähdään, että suurin osa rakennusten ulkoseinien pintamateriaaleista kuuluu emissiviteetiltään noin 0,8–0,9 suuruusluokkaan. Laastin ja betonin osalta luonnollisesti emissiviteetin määrää pintakäsittely. Lasin osalta emissiviteetti ei poikkea merkittävästi muista materiaaleista, mutta jos lasin pinnalla on esimerkiksi hopean oksideista muodostettu low-e-pinnoite, tilanne muuttuu täysin.

<b>Materiaali</b>	<b>Emissiviteetti (<math>\epsilon</math>)</b>
kiillotettu hopea	0,02–0,03
puu, mänty ja kuusi	0,9
betoni	0,85
tiili, punainen	0,93
lasi	0,92–0,94
laasti	0,87

Tavallisen kirkkaan lasin emissioarvo on karkeasti 0.93, eli noin 93 % auringon säteilemästä ja lasin pinnalle osuneesta energiasta absorboituu lasiin ja säteilee siitä pois.

Eri pinnoitusmenetelmät tuottavat johtavan kalvon lasin sisään tai pinnalle, joka vähentää lasin absorptiota ja säteilyä. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

Lasin itsensä melko korkea emissiviteetin arvo kertoo myös lämmön siirtymismekanismeista, joista säteileminen näyttää olevan varsin merkittävässä osassa. Muiden rakennusmateriaalien osalla tilanne on vastaavanlainen emissiviteetin osalta, mutta niissä säteily on katkaistu lämmöneristekerroksella.

### 9.4.1 Ikkunan g-arvo

Ikkunoille on U-arvon lisäksi usein ilmoitettu auringonsäteilyn kokonaisläpäisyysuhde, eli g-arvo, joka ilmaisee rakenneosan (ikkunalasin) läpäisemän auringon säteilyn määrän suhteessa rakenteen ulkopinnalle osuvasta kokonaissäteilyn tehosta. Yksikkönä g-arvolle on %-osuus tai lukuarvo välillä 0–1. Matala g-arvo edustaa pientä säteilyenergian läpäisyä.

Koko ikkunan energiategokkuutta arvioitaessa käytetään keskimääräistä  $g_w$  -arvoa, joka saadaan alla esitetyllä kaavalla 9.11

$$g_w = g_g \cdot \frac{A_g}{A_w}, \quad (9.11)$$

jossa

$g_w$  = ikkunan auringon infrapunasäteilyn kokonaisläpäisy [-],

$g_g$  = valoaukon auringon infrapunasäteilyn kokonaisläpäisy [-],

$A_g$  = valoaukon pinta-ala (m<sup>2</sup>), ja

$A_w$  = karmin äärimittojen mukaan laskettu ikkunan pinta-ala (m<sup>2</sup>).

Kaavan perusteena on se tosiasia, jonka mukaan säteilyn lähes koko määrä tulee ikkunan tapauksessa lasiosan valoaukon kautta. (Hemmilä, K., 2006)

Laskennalliset g-arvon tarkastelut perustuvat tavallisesti standardiin EN 410. Kun ikkunalle määritellään energialuokitusta, käytetään U-arvon lisäksi g-arvoa ja ilmanpitävyyttä kuvaavia L-arvoja. (BS EN 410:2011, 2011.)

### 9.4.2 Ikkunan L-arvo

Ikkunoiden ilmanpitävyyttä, eli L-arvoa, on mahdollista tutkia vain koeikkunan mitausten avulla. Laskennallisesti arvoa ei yleensä edes pyritä mallintamaan. Erityyppisille ikkunoille on tehty mittaussarjoja, joiden perusteella ikkunatyypin L-arvoja

voidaan luokitella. Muutamien ikkunoiden L-arvoja on esitetty taulukossa 9.3. (Hemmilä, K., 2006.)

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tekemien mittausten perusteella suosituk-  
sena onkin, että MS, MSE, MSK, SK, SE ja SEK-tyyppisille ikkunoille L-arvona käytettäisiin viitearvoa 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h ja kiinteille ikkunoille, kuten MEK:lle, vastaava arvo olisi 0,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h.

<b>Taulukko 9.3</b> Ikkunoiden L-arvoja. (Hemmilä, 2006)			
<b>Ikkunatyyppe</b>	<b>Ikkunoiden L-arvot (50 Pa paineessa)</b>		
	<b>keskiarvo</b>	<b>mediaani</b>	<b>keskihajonta</b>
Puiset MSE ikkunat	0,34	0,17	0,38
Puu-alumiini MSE-ikkunat	0,32	0,22	0,27
Kiinteät ikkunat	0,04	0,04	0,03

## 9.5 Lasin valmistus

Rakentamisessa tavallisimmin käytetty ikkunalasi pohjautuu lähes aina niin sanottuun float-lasiin, joka on mahdollisesti hiottu ja pinnoitettu metallioksidikalvolla U-arvon parantamiseksi. Float-lasi on valmistusmenetelmänsä takia melko edullinen ja nykyteknikalla tuotettuna varsin tasalaatuinen ja virheetön.

Rakennusten ikkunoissa käytettävää lasia on laajamittaisemmin tuotettu teollisesti 1920-luvulta lähtien, mutta tuolloin valmistuksen yhteydessä lasien pinnat hiottiin ja kiillotettiin erillisissä tuotantovaiheissa. Lasien paksuuteen ja väriin jäi kuitenkin suuria vaihteluita. Vasta 1960-luvun alussa Pilkington kehitti ja otti käyttöön uuden, tinahauteeseen perustuvan float-lasin valmistusmenetelmän, joka on käytössä tälläkin hetkellä. Länsimaissa lasin valmistus on hyvin keskittynyttä, ja markkinoita hallitsevat Asahi Glass, NSG / Pilkington, Saint-Gobain ja Guardian Industries. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

Tavallisen ikkunoissa käytetyn float-lasin valmistus perustuu piioksidiin (73 %), joka on oleellisilta osiltaan hiekkaa, natriumkarbonaattiin (13 %), joka tunnetaan soodana, kalsiumkarbonaattiin (8,4 %), joka on kalkkikiveä sekä dolomiittiin (4 %) ja alumiinioksidiin (1 %). Tavallisesti lasin valmistuksen aikana seokseen lisätään pieniä määriä muita aineita puhdistamaan seosta ja säätämään lopullisen tuotteen väriä. (De Jong, 2010; Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

Valmistuksen ensimmäisessä vaiheessa raaka-aineet sekoitetaan ja seokseen lisätään mahdollisesti kierrätettyä lasimurskaa. Kierrätetyn lasin määrä raaka-aineiden joukossa on kasvussa, sillä maailmanlaajuisesti hyvälaatuisen hiekan kysyntä ylittää

tarjonnan ja siksi sen hinta nousee. Hiekan vähenemiseen vaikuttaa erityisesti betonteollisuuden vaatimat suuret hiekkamäärät. Raaka-aineiden sekoituksen jälkeen seos syötetään noin 1500-asteiseen, yhdeksän metriä leveään ja 45 metriä pitkään uuniin, josta valmistuu levymäinen tasolasi. Tämän jälkeen lämpötilaa lasketaan asteittain homogeenisuuden varmistamiseksi ja lasin sisäisten jännitysten vähentämiseksi. Tämän jälkeen sula lasimassa johdetaan tinahauteeseen, jossa se leviää tinakerroksen pinnalle halutun paksuiseksi kerrokseksi. Näin saadaan varmistettua lasin alapinnan tasaisuus, yläpinta tasoittuu luonnollisesti sulan lasimassan tapauksessa painovoiman avulla. Tinakylpy toimii hyvin alustana sulalle lasimassalle, koska tinalla on suuri ominaispaino. Ongelmia tuottaa kuitenkin tinan nopea reagointi hapen kanssa, joka synnyttää lasiin tarttuvaa, lialta näyttävää tinadioksidia. Hapettumisen estämiseksi on tinahauteen ympärille muodostettava typen ja vedyn avulla paineistettu tila, jossa hapen määrä on mahdollisimman pieni. Sulan lasimassan virratessa tinakylvyssä sen lämpötilaa lasketaan ja noin 600-asteisena lasimassa nostetaan teiloille, jolla sitä liikutetaan vetämällä ahiota halutulla nopeudella. Teloilla voidaan säädellä float-lasiarkin paksuutta, ja tämän jälkeen tuotettua lasia kuljetetaan uunisarjan läpi hitaasti jäähdyttäen. Kuljetinmekanismin toisessa päässä, kun lasi on jäähtynyt noin 60 celsiusasteeseen, se tarkastetaan ja leikataan. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

Haluttuun mittaan leikattuja laseja usein jälkikäsitellään, esimerkiksi hiotaan, taivutetaan tai karkaistaan. Lasin taivuttaminen ja karkaisu ovat erillisiä työvaiheita ja vaativat lasin uudelleenkuumentamisen. Näin ollen jälkikäsitelyssä kustannuksia syntyy sekä tarvittavista investoinneista koneisiin ja laitteisiin, myös tarvittavasta energiasta. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

## 9.5.1 Ikkunalasin karkaisu

Laseja karkaistaan, jotta saadaan muodostettua tavalliseen float-lasiin verrattuna fyysisiä iskuja paremmin kestävä lasi. Karkaisussa käytettävä menetelmä perustuu lasin pintakerroksen runkokerrosta nopeampaan supistumiseen jäähdytyksen aikana, jolloin saadaan lasin pinnalle puristusjännitys. Lasin runko-osaan jää puolestaan vetojännitys. Puristusjännitys lisää lasin lujuutta ja aiheuttaa lasin murenemisen pieniin osiin lasin mahdollisesti rikkoutuessa. (Hemmilä & Heimonen, 2005; Leftheriotis & Yianoulis, 2013.) Laseja voidaan luokitella erilaisiksi lasityypeiksi puristusjännityksen perusteella, jolloin karkaistun lasin pintapuristusjännityksen tulee olla ainakin 69 MPa ja turvalasiksi lasi kelpaa, jos puristusjännitys ylittää 100 MPa. Turvalasia edellytetään

kohteissa, joissa yleisön ja/tai lasten käyttöön tarkoitetuissa tiloissa lasipinnan korkeus lattiasta on alle 700 millimetriä. Ovilla ja niiden vieressä olevissa ikkunoissa turvalasi vaaditaan, jos lasipinnan alareuna sijoittuu alle 1500 millimetrin korkeudelle lattiatasosta. (SUOMEN RakMK F2, 2001.)

## 9.6 Yksittäiset ikkunalasit ja niiden väri

Kirkkaasta yksinkertaisesta lasista koostuva ikkuna on lasituksena tänä päivänä Suomessa harvinainen, ja vaikka sen luonnonvalon läpäisy on erinomainen, sen energiatehokkuus on vaatimaton. Yksittäisen ikkunan muut ominaisuudet, kuten ilmaääneneristys, ovat niin ikään heikkoja, joten yksilasisia ikkunoita käytetäänkin lähinnä historiallisissa kohteissa tai tuomaan luonnonvaloa toisarvoisiin kylmiin tai puolilämpimiin tiloihin.

### 9.6.1 Sävytetyt lasit

Sävytettyjen lasien tärkein käyttökohde ovat suuret julkisivupinnat, joihin halutaan arkkitehtonisista syistä tietynlaista sävyä. Muut sävytettyjä laseja vaativat rakennukset ovat historiallisissa kohteissa, kun tavoitellaan oikean vaikutelman luomiseksi lasihin tavallisuudesta poikkeavaa värisävyä.

Sävytettyjen lasien valmistus ei poikkea tavallisen float-lasien prosessista muuten kuin raaka-aineiden osalta. Sävytettyihin lasihin on lisätty metallijauheita värisävyn ja pitoisuuden vaatima määrä. Yleisimmät käytetyt väriaineet ovat seuraavat:

<b>Taulukko 9.4</b> Lasien värisävyt metallien mukaan. (Letheriotis & Yianoulis, 2013)	
<b>Lisätty metalli</b>	<b>Värisävy</b>
rauta	vihreä
mangaani	violetti
kromi	keltainen, vaaleanpunainen
vanadiini	vihreä, sininen, harmaa
kupari	punainen, sininen, vihreä
titaani	violetti, ruskea
hiili ja rikki	keltainen, ruskea

Sävytettyjen lasien luonteenomaisena piirteenä on poikkeavan värisävyn ohella suurempi absorptio ja tavallista kirkasta lasia huonompi valonläpäisykyky. Sävytettyjä

laseja voidaan käyttää vähentämään häikäisyä. Koska valon läpäisyn väheneminen on seurausta kasvaneesta absorptiosta, alkuperäisen säteilyn energia muuttuu lasissa lämmöksi. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013; Shelby, 2015.)

## 9.7 Ikkunalasien permittiivisyys

Tarkasteltaessa puhdasta, pinnoittamatonta lasia, sen lämmönläpäisyä oleellisempi parametri radiotaajuisten signaalien läpäisyä arvioitaessa on lasin permittiivisyys. Lasien sähköinen käyttäytyminen voidaan täysin selvittää, kun lasille ominaiset arvot; permittiivisyys  $\epsilon$ , permeabiliteetti  $\mu$  ja johtavuus  $g$  tunnetaan. Permittiivisyyttä ja sen suhdetta RF-signaalien vaimennukseen on käsitelty tarkemmin luvussa 13, mutta lasipintojen yhteydessä voidaan todeta käytettävän poikkeuksetta suhteellista permittiivisyyttä  $\epsilon_r$ , jossa lasin permittiivisyyttä verrataan tyhjiön permittiivisyyteen  $\epsilon_0 \approx 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ . Permittiivisyys on määräävä parametri yleisestikin sekä lämmön- että sähköneristeinä käytettäville johtamattomille materiaaleille.

Toinen parametri, permeabiliteetti, on lasille samoin kuin muillekin ei-magneettisille materiaaleille käytännössä ykkösen suuruinen, joka sekkin on suhteellinen arvo, ja jonka vertailuarvona on tyhjiön permeabiliteetti  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ .

Kolmas parametri, eli johtavuus, on peruslasille lukuarvoltaan hyvin pieni arvo, joka eri lähteissä annetaan hieman eri suuruisena. Yleisiä arvoja ovat johtavuuden ylärajaksi ilmoitetut  $10^{-4} \frac{S}{m}$  tai  $5 \cdot 10^{-4} \frac{S}{m}$ , joskin lukuarvoksi on esitetty myös arvoa  $10^{-12} \frac{S}{m}$ . (Gustafsson, Karlsson, Rebelo, & Widenberg, 2006; Kiani, G., Karlsson, Olsson, & Esselle, 2007.) Johtavuutta voidaan tarkastella myös sen käänteisarvon, eli ominaisvastuksen tai resistiivisyyden avulla.

Ikkunalaseille permittiivisyys vaihtelee jonkin verran tuotanto- ja valmistuserästä riippuen, sillä permittiivisyyteen vaikuttavat lasin valmistuksessa käytetyt väriin ja muihin optisiin ominaisuuksiin liittyvät lisäaineet. Luonnollisesti myös lasin perusraaka-aineet, piioksidi ja natriumoksidi vaikuttavat permittiivisyyden perustasoon. Yleinen perussääntö on, että pienentämällä piioksidin suhteellista osuutta kasvatetaan permittiivisyyden arvoa. (Bansal & Doremus, 1986.)

Eri lähteissä permittiivisyydelle on annettu erilaisia arvoja, ja tavallisesti ääripäät sijoittuvat arvoille  $5,6 < \epsilon_r < 9,1$ . (Kiani, G. et al., 2007; Philippakis et al., 2004.) Edellä mainittujen raja-arvojen keskelle saadaan permittiivisyys asettumaan esimerkiksi seostamalla lasia suhteella 11,9 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 88,1 %  $\text{SiO}_2$  ja 27,2 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 72,8 %  $\text{SiO}_2$ . (Bansal & Doremus, 1986.)

Poikkeuksellisen alhaista arvoa,  $\epsilon_r = 4$ , ehdotetaan eräässä julkaisussa (Gustafsson et al., 2006), ja tätä hieman korkeampaa arvoa 4,8 esitetään Pozarin kirjan ”Microwave Engineering” -liitteitä osassa, jota on käytetty viitteenä monissa tutkimuksissa. (Pozar, 2012.) Tavallisesti eri julkaisuissa esiintyvät arvot liikkuvat kuitenkin melko pienellä alueella  $\epsilon_r = 6,1-7,05$ . (Kiani, G. et al., 2007; Rudd et al., 2014; Sohail, Kiani, & Esselle, 2011.)

Tavallisesti permittiivisyyden arvo ei ole aivan vakio yli koko radiotaajuuksien kaistan, vaan se vaihtelee taajuudesta riippuen.

## 9.8 Ikkunalasien RF vaimennukset

Tavallisesti matkapuhelinten kuuluvuusongelmia käsittelevissä keskusteluissa nostetaan selittävänä tekijänä esiin nykyaikaisten ikkunoiden korkeat RF-signaalien vaimennukset. Totta on, että selektiivi- tai low-e-kalvoilla varustettujen ikkunoiden signaalivaimennukset ovat merkittävästi suurempia kuin tavallisen float-lasin vastaavat arvot. On kuitenkin muistettava, että sisätalakuuluvuus muodostuu rakennuksen ulkokuoren osalta hyvin monien erillisten rakennusmateriaalien aikaansaamasta kokonaisvaimennuksesta, johon liittyvät ikkunalasien lisäksi liitospintojen, karmien ja erilaisten ulkoseinäarakenteiden RF-vaimennukset.

Ikkunalasien RF-vaimennuksia on tutkittu erilaisissa julkaisuissa, ja niiden näkökulma on ollut joko teoreettinen, lasin sähköisiin ominaisuuksiin perustuva, tai käytännöllinen, koko ikkunapinnan vaimennusmittauksiin perustuva tutkimus. Kummatkin lähestymistavat antavat samansuuntaisen signaalivaimennuksen ikkunapinnalle. Kiani esittää vuonna 2007 päivätyssä julkaisussaan selektiivikalvolla päällystetyn ikkunalasin vaimennukseksi 33,8 dB:n arvoa, joka perustuu Pilkingtonin Optitherm tuotepereheen lasiin. Sille on käytetty Kianin simulaatioissa johtavuuden arvoa  $10^{-4}$  S/m ja impedanssin arvoa 4 ohmia/neliö (Kiani, G. et al., 2007). Samansuuntaisia tuloksia simulaatioihin perustuen esittää myös Sohail, jonka julkaisussa Selektiivikalvolla varustetun lasin RF-vaimennus on jo alle 2 GHz taajuuksilla lähes 40 dB ja vaimennus nousee edelleen taajuuden kasvaessa. (Sohail, 2011.)

Mittauksista saaduissa tuloksissa on luonnollisesti hajontaa, ja esimerkiksi Ångskog kumppaneineen toteaa mittaustulosten perusteella, että selektiivikalvolla varustetun ikkunan RF-vaimennukset ovat 10–30 dB:n suuruusluokkaa, kun se tavalliselle kirkkaille float-lasille on lähes nolla (Ångskog, 2015).

Rakennuksen ulkokuorien mittauksissa puolestaan Rodriguez ryhmineen on todennut, että selektiivikalvolla varustettujen ikkunoiden vaimennus on noin 25–32 dB:ä taajuuksilla 800 MHz–18 GHz. (Rodriguez, 2014.)

## 9.9 Ikkunalasien pinnoitteet

Tässä väitöstutkimuksessa tarkastellulla selektiivikalvolla tarkoitetaan siis lasin pinnoitetta, jolla tavoitellaan ensisijaisesti low-e-ominaisuutta, eli lasin emissiviteetin laskua. Toisinaan tuotteita kutsutaan selektiivipintaisten lasien lisäksi matalan emissiviteetin tai low-e-laseiksi.

Varsinaisena tarkoituksena selektiivipinnoitteilla on estää lämpösäteilyn aallonpituuksien eteneminen, lähinnä heijastamalla ne, mutta mahdollistaa näkyvän valon aallonpituuksien eteneminen mahdollisimman pienellä vaimennuksella lasirakenteen läpi. Koska pinnoite toimii tässä mielessä taajuusselektiivisen rakenteen tapaan kais-tanpäästösuotimena, on termi selektiivikalvo perusteltu ja ymmärrettävä. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

Itse selektiivikalvo on rakenteena hyvin ohut metalli- tai metallioksidikalvo, jonka oma emissiviteetti on paljon pienempi kuin lasin. Matalan emissiviteetin omaava metallikalvo absorboi hyvin heikosti eri aallonpituuksilla etenevää säteilyä, ja se toimii muilla kuin näkyvän valon taajuuksilla tehokkaana heijastimena. Voimakas heijastus on tavoiteltu ominaisuus, sillä valtaosa, noin 2/3, lämmön siirtymisestä tapahtuu ikkunan osalta säteilyn välityksellä, ja lämpösäteilyn heijastaminen takaisin sisätiloihin vähentää merkittävästi lämmön kulkeutumista ikkunarakenteen läpi. Sama heijastuminen toimii myös toisin päin, eli helteillä lämpösäteily ei kulje ikkunan läpi ulkoti-loista sisälle, mikä vähentää asunnon jäähtytyksen tarvetta. (Berning, 1983; Lee, C. C., Chen, & Jaing, 1996.)

Pinnoitteen tulee luonnollisesti olla staattinen ajan suhteen, jolloin pinnoitteen mikään osa tai ominaisuus ei saa muuttua ikkunan asennuksen jälkeisen elinkaaren aikana.

### 9.9.1 Pehmeät (off-line) pinnoitteet

Pehmeänä pinnoitteena tunnetun off-line-pinnoitteen valmistus perustuu siihen, että valmistuksen jälkeen kovettuneen tasolasin päälle luodaan tyhjiöpinnoituksella erityisten liimakerrosten avulla low-e-pinnoite. Liimakerroksina käytetään tavallisesti



hyvin ohuita puolijohde- ja metallikerroksia. Varsinainen low-e-pinnoitekerros on yleensä hopeakerros sen hyvien optisten ominaisuuksien ja muita kiiltäviä metalleja edullisemmän hintatason vuoksi. Muita mahdollisia metalleja ovat kulta ja kupari, mutta niiden käyttöä rajoittaa hinnan ohella myös ei-toivotut absorptiot etenkin lyhemmillä aallonpituuksilla. Lisäksi kupari ja kulta aiheuttavat muutoksia lasin väriin. Kulta on muista poikkeava materiaali, sillä se ei vaadi muiden metallioksidien tapaan suojakerrosta itselleen, koska se ei kärsi hapettumisesta. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.) Sen käyttöä rajoittaa luonnollisesti korkea hinta.

Hopeakerros muodostaa low-e-peruskerroksen, jonka paksuus on tavallisesti 10 nanometrin suuruusluokkaa. Sen yhteyteen voidaan muodostaa muita kerroksia, yleensä sinkin, tinan, vismutin tai titaanin oksideista. Näiden paksuus jää lähes aina alle 40 nanometrin ja niiden tarkoituksena on optimoida jonkin tietyn aallonpituuden heijastusta tai korjata muun pinnoituksen tai lasin itsensä värivirheitä. (Lee, C. C. et al., 1996.)

Pehmeä pinnoitus on kalliimpaa kuin kovapinnoitus, sillä se on aina tehtävä erikoislaitteilla ja omana työvaiheenaan varsinaisen lasin valmistuksen jälkeen. Pinnoitteen sijoituessa lasin pinnalle, se on herkkä mekaanisille vaurioille eikä sen vuoksi kestä hankausta. Pehmeäpinnoitettua lasia ei voi esimerkiksi pestä. Lisäksi pinnoite on arka kemiallisille altistuksille. Näiden syiden vuoksi pehmeäpintaista off-line-pinnoitetta käytetäänkin lähinnä eristyslasipaketin osana niin, että pinnoite jää lasipaketin sisäpinnalle myöhemmin esitettävän kuvan 9.3 osoittamalla tavalla. Pinnoitteen sijoittelu tulee harkita tarkasti, sillä lämpösäteilyn tulosuunta vaikuttaa ikkunan todelliseen energiategokkuuteen. Jos pitkäaaltoisempi lämpösäteily joutuu kulkemaan lasikerrosten läpi ennen heijastumistaan takaisin, osa säteilystä absorboituu lasimateriaaliin ja lämmittää laseja. Tämä lasien lämpötilan nousu aiheuttaa konvektion kautta tapahtuvaa lämpöhäviöiden kasvua. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.) Pinnoitteena käytetyn hopean emissiviteetti on ilmoitettu taulukossa 9.2.

## 9.9.2 Kovat (on-line) pinnoitteet

Kova pinnoite tehdään levittämällä low-e-kerros suoraan lasimassaan sen valmistuksen yhteydessä. Koska seostettuja metallioksiedeja sisältävän pinnoitteen levitys tapahtuu kuumaan ja joustavaan lasiaihioon, sitä kutsutaan usein pyrolyttiseksi päällystysmenetelmäksi. Yleisin menetelmä on kemiallinen höyrysaostus, jossa fluori-seostettua tinaoksidia saostetaan lasimassaan yhden ilmakehän paineessa. Tuloksena syntyy lasia, jolla on hyvä valon läpäisy näkyvän valon aallonpituuksilla, korkea

heijastus infrapunalla ja hyvin mekaanista räsitusta kestävä pinta. Mekaanisen räsituksen kesto on samaa luokkaa lasin itsensä kanssa koska pinnoite muodostuu valmistusprosessissa osaksi lasia. Samasta syystä pinnoite on hyvin suojassa myös kemiallista räsitusta vastaan ja kestää lasin pinnan naarmuttamista. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

Koska pinnoite on osana lasimassaa, voidaan kovapinnoitettua lasia käyttää yksittäisenä lasina ja lasin pintaa voidaan pestä normaalisti. Siitä voidaan myös tehdä muotoiltuja lasituksia ja lasi voidaan tarvittaessa karkaista. (Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

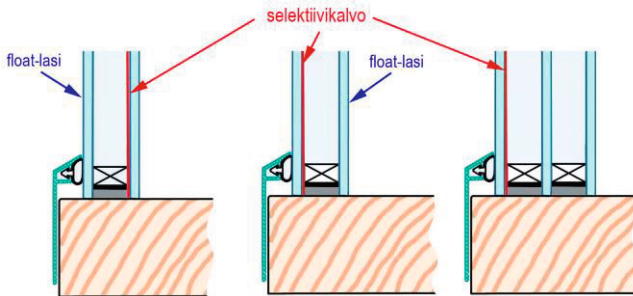
Kovapinnoitetun lasin pinnoitteen paksuutta ei ole mahdollista määritellä samalla tarkkuudella kuin pehmeän pinnoitteen, sillä metallioksidin jakautuminen sulaan lasimassaan ei ole tarkkarajaista. Kokonaisuutena paksuus on kuitenkin 400–600 nanometrin suuruusluokkaa, eli kerrospaksuus on huomattavasti pehmeätä pinnoitetta suurempi. Kovapinnoitetun lasin emissiviteetti asettuu tavallisesti arvojen 0,16–0,2 väliin, joten emissiviteetin lasku jää hieman heikommaksi kuin off-line-pinnoitusmenetelmällä. Suurin ero kuitenkin radiosignaalien näkökulmasta on se, että kovapinnoitetun lasin pinnoitteeseen ei voi tehdä kuvioiteja samalla tavoin kuin pehmeäpinnoitettuun, vain lasin pinnalla olevaan kalvoon. Pinnoitteen poistaminen edellyttää lasin työstämistä varsin syvältä, ja se jättää selvästi näkyvän jäljen ja samalla heikentää merkittävästi lasin kestävyttä mekaanista räsitusta vastaan. Lasin sisällä oleva pinnoite asettaa haasteita mm. RF-vaimennusten simuloinneissa, sillä kysymyksessä ei enää ole tasomainen ja tarkkarajainen johtava pinta, jolle voitaisiin määritellä tarkka paikka ja paksuus. (Jelle et al., 2015; Leftheriotis & Yianoulis, 2013.)

## 9.10 Välilistat

Eristyslasipaketin lasien välinen tila täytetään tavallisesti kaasulla ja paketin reunoilla, lasien välissä, kiertää noin 16 millimetrin paksuinen pinnaltaan eristetty välilista. Eristyslistan laadulla on suuri merkitys lasipaketin elinkaaren aikana, sillä sen on oltava toisaalta hyvin tiivis mutta samaan aikaan myös joustava. Tämän lisäksi sen on toimittava lämmöneristeen tavoin, jotta eri lasien välille ei synny johtumalla lämpöä siirtävää rakennetta. Tyypillisesti välilista on muotoiltua ohutta alumiinia tai ruostumattonta terästä ja sen molemmiin puolin on sijoitettu tiivistäinekerros. Alumiini- tai teräslistan leveys on optimissaan yleensä noin 14–16 millimetriä, sillä jos etäisyys lasipaketissa olevien lasien välillä on pieni, syntyy täytekaasun lämmönjohtavuudesta aiheutuvia häviöitä ja liian suuri lasien välinen etäisyys kasvattaa konvektiota.

Kuvassa 9.3 on esitetty välilistan sijoitus ikkunoiden välissä. Kuvassa näkyy myös pehmeäpintaisen selektiivikalvon mahdolliset sijainnit eristyslasipaketeissa, joissa kalvo on aina lasipaketin lasien sisäpinnalla. Kuvassa punainen väri kuvaa lasin pinnalle muodostettua selektiivipinnoitetta.

Vuonna 2017 on alettu suosia välilistan teräslistaa, sillä alumiinia suuremman lujuuden vuoksi sen paksuus voi olla huomattavasti alumiinilistaa pienempi ja näin ikkunan valoaukkoa voidaan hieman suurentaa. Myös lämmönjohtavuus, joka on ohuelle ja kiillotetulle listateräkselle noin  $17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ja alumiinille  $220 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , puhuu teräksen puolesta (Kaikkonen, 2017).



**Kuva 9.3** Selektiivikalvon erilaisia sijoittelumahdollisuuksia. (Kuva: Asp)

Ikkunapaketin täytekaasuna lasien välissä käytetään yleensä jotakin jalokaasua, Argonia, Kryptonaa tai Xenonia, tai niiden sekoitusta. Kaasu ei saa vuotaa pois lasien välistä, joten välilistan eristeen tulee säilyä elastisena vuosikymmenien ajan. Kaasu osin suojaa low-e-pinnoitetta ja osin parantaa U-arvoa. Kaasutiiveys ja elastisuus ovat oleellisia, sillä kaasun paine vaihtelee ikkunan ympärillä olevan ilmanpaineen, lämpötilan ja jopa tuulen vaikutuksesta. Suuri ikkunapinta kaareutuu huomattavasti ympäröivän paineen vaikutuksesta ja näin kaasutilan tilavuus muuttuu.

Lasien välinen optimietäisyys riippuu hieman täytekaasun tyypistä, Argonilla optimaalinen vastaa ihanteellista lasien etäisyyttä ilmassa, eli on noin 14–16 millimetriä, mutta Kryptonilla se laskee 10 millimetriin ja Xenonia käytettäessä noin 6 millimetriin. (Manz, 2008.)

# 10 TAAJUUSSELEKTIIVISET RAKENTEET

FSS (Frequency Selective Surface) on taajuusselektiivinen rakenne tai pinta, jonka käyttäytyminen on nimensä mukaisesti erilaista eri taajuuksilla. Ikkunoiden yhteydessä näitä taajuusselektiivisiä rakenteita käytetään läpäisemään tiettyjä taajuuksia ja estämään toisia. Tietyntyylinen taajuusselektiivinen rakenne muodostuu jo ikkunoiden selektiivikalvoista, joilla erotetaan näkyvän valon aallonpituudet lämpösäteilystä, mutta kiinteillä yhtenäisillä kalvoilla aikaan saatava taajuuksien erottelu on liian karka matkapuhelinverkkojen signaalien yhteydessä tarvittavaa suodatusta ajatellen. (Dewani ym., 2018; Sung, Sowerby, Neve, & Williamson, 2006.)

Hienorajaisempi taajuuksien erottelu on mahdollista muokkaamalla johtavaa pintaa, esim. ikkunan selektiivikalvoa. Tässä väitöstutkimuksessa ei kuitenkaan rajoituta vain ikkunan selektiivikalvon tutkimiseen, vaan tarkastelu on tehty yleisemmällä tasolla. Tällöin samaa tekniikkaa voidaan soveltaa kaikenlaisiin materiaaleihin, joissa on yhtenäisiä johtavia ohuita pintoja. (Philippakis et al., 2004.)

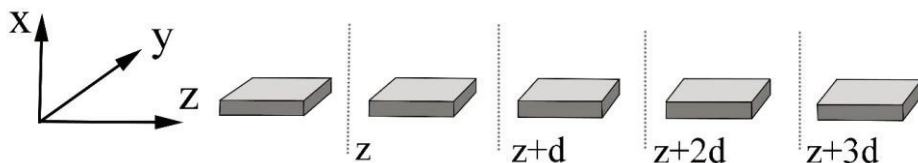
Johtavien pintojen muokkaamista FSS-pinnoiksi voidaan tehdä erilaisilla menetelmillä, jotka tavallisimmin perustuvat johtavien alueiden poistamiseen. Silloin johtavaan pintaan muodostetaan sarja yksittäisiä, keskenään samanlaisia kuvioita. Kuvioiden tulee olla jaksollisia, ja yleisesti voidaan todeta yksittäisten kuvioiden määrän lisäämisen parantavan FSS:n toimintaa. (Itoh, 2005.)

## 10.1 Yksikkösoluista muodostuvat rakenteet

### 10.1.1 Floquet'n periaate

Kun tarkastellaan virtoja ja sähkömagneettisia kenttiä rakenteessa, joka on jaksollinen ja käsittää useita samanlaisia peruskuvioita, on kokonaisuus mahdollista yksinkertaistaa yhden alkion tutkimiseen niin sanotun Floquetin periaatteen nojalla. Floquetin periaate sanallisesti ilmaistuna voidaan kiteyttää seuraavasti: Jos rakennetta voidaan pitää jaksollisena ja äärettömän kokoisena, niin rakenteessa esiintyvät virrat

ja säteilykentät ovat jaksollisia ja samankaltaisia paitsi vaiheen osalta. (Itoh, 2005; Jackson, 2015.)



**Kuva 10.1** Yksikkösoluista muodostuva sarja. (Lähde: Jackson, 2015, muokattu)

Tutkittaessa Floquetin teoreemaa RF-signaalien läpäisyn parantamiseen tarkoitettun jaksollisen rakenteen näkökulmasta, voidaan sähkö- tai magneettikenttä kuvata edellä olevan kuvan 10.1 perusteella seuraavasti (Jackson, 2015; Munk, 2005):

$$\phi(x, y, z + d) = e^{-jk_{z0}d} \phi(x, y, z), \quad (10.1)$$

jossa tekijä  $k_{z0}$  kuvaa kompleksista vaihesiirtoa yhdistettynä vaimennuksen termiin, ja  $d$  edustaa elementtien välistä etäisyyttä. Eli yhteenvetona voidaan todeta, että kenttä  $\phi$  yksikkösolujen sijaintien  $z$  ja  $z + d$  välillä voidaan erottaa vierekkäisistä soluista vain  $k_{z0}$  termin osalta, eli käytännössä ero liittyy vain vaiheeseen. Sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksien erot yksikkösolujen välillä voidaan olettaa merkityäksettömän pieniksi. Kenttä  $\phi(x, y, z)$  on esitettävissä myös muodossa (Itoh, 2005)

$$\phi(x, y, z) = e^{-jk_{z0}z} P(x, y, z), \quad (10.2)$$

jolloin edelliseen perustuen on kirjoitettava  $P(x, y, z) = P(x, y, z + d)$ . Näin muotoiltuna  $P(x, y, z)$  on jaksollinen funktio, jossa siirryttäessä suuntaan  $z$  muuttujan  $d$  osoittaman määrän, lausekkeelle tulee aina yhtä suuri arvo. Pyöriviin osoittimiin perustuvassa kuvauksessa tämä tapahtuu täyden ympyrän monikertojen kohdalla, eli vaiheen muuttuessa  $n \cdot 2\pi$ :n verran. Tästä johtuen funktio  $P(x, y, z)$  voidaankin kuvata Fourier'n sarjana (Itoh, 2005)

$$P(x, y, z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(x, y) e^{-j\frac{2\pi n}{d}z}, \quad (10.3)$$

jossa  $a_n(x, y)$  ilmaisee kentän  $x$ - ja  $y$ -akselien suuntaan tapahtuvaa jaksottaista vaihtelua ja eksponenttifunktio kertoo  $z$ -suunnassa tapahtuvan kenttien jaksollisen vaihtelun. Yhdistämällä kaavat saadaan kaava muotoon

$$\phi(x, y, z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(x, y) e^{-jk_{zn}z}, \quad (10.4)$$

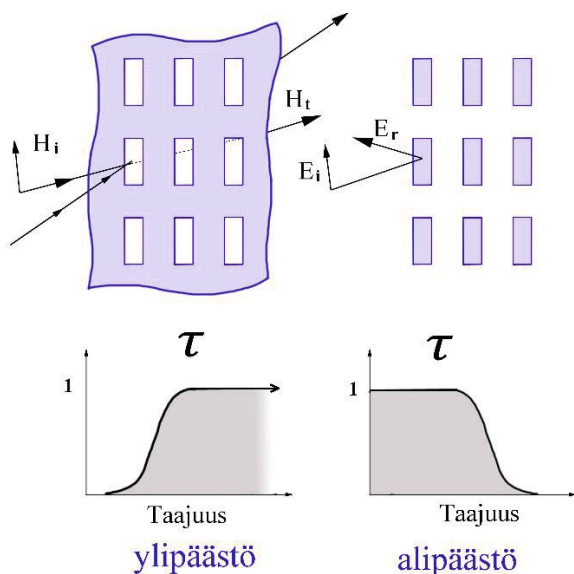
jossa  $k_{zn} = k_{z0} + \frac{2\pi n}{d}$  ja jossa  $n$  on mielivaltainen kokonaisluku. (Itoh, 2005.)

Edellä kuvattu teoria johtaa päätelmään, jossa materiaalissa esiintyvä kokonaiskenttä syntyy äärettömän monen yksittäisen solun muodostaman kentän yhteisvaikutuksena. Käytettäessä edellä mainittua teoriaa päinvastaiseen suuntaan, voidaan todeta, että kokonaiskenttä voidaan palauttaa äärettömän monen samanlaisen yksittäisen solun ominaisuuksiin, ja kenttää voidaan tarkastella riittävällä tarkkuudella tarkastelemalla yhden solun käyttäytymistä. (Dewani ym., 2018; Itoh, 2005.)

Käytännön tilannetta Floquet'n teorian mukainen tilanne ei täysin vastaa, sillä FSS-pinnoista ei voi tehdä äärettömiä. Käytännössä Floquet'n FSS-rakenne murtuu kokonaiskuvion reunoilla, joka näkyy esto- tai päästökaistan epäjatkuvuuskohtina. Äärettömiä kuvion pinta-aloja voidaan kuitenkin hyödyntää simuloitaessa usean yksikkösolun sisältäviä rakenteita.

### 10.1.2 FSS peruskuviot

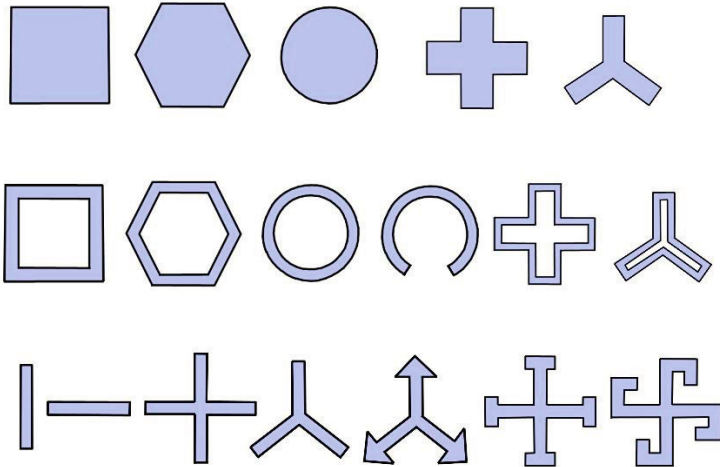
Taajuusselektiivisiä pintoja voidaan tehdä periaatteessa kahdella päinvastaisella lähestymistavalla, josta ensimmäisellä pinnoitetta poistetaan yhtenäisestä johtavasta pinnasta ja toisessa lisätään johtavaa pintaa jollekin alueelle. Menetelmällä, jossa pintaa poistamalla luodaan johtavalle pinnalle kuvio (tai kuviosarja), saadaan aikaan ylipäästösuojin ja luomalla yksittäisistä johtavista elementeistä kuvioita johtamattoman substraatin päälle tuotetaan alipäästösuojin. Kuvassa 10.2 esitetään komplementtien toiminnan periaate. On muistettava, että kuva esittää vain periaatetta, todellisten rakenteiden ollessa kysymyksessä johtavien alueiden johtavuus ei ole ääretön, pinnan paksuus ei ole äärettömän pieni, eivätkä kuviot jatku jaksottaisesti äärettömyyteen. Jos nämä edellä mainitut ehdot kuitenkin toteutuisivat, olisi kuviosarja niin sanotun Babinet'n periaatteen mukainen. (Bozzi, 2005; Saunders & Aragón-Zavala, 2007.)



**Kuva 10.2** FSS-peruselementtien sarjan toiminta eri taajuuksilla. (Lähde: Saunders & Aragón-Zavala, 2007, muokattu)

Seuraavassa kuvassa 10.3 on esitetty muutamia FSS-rakenteiden yksikkösolujen rakenteita. Ylimmäisellä rivillä ovat yksinkertaisimmat peruskuviot, jotka voivat olla aukkoja johtavassa pinnassa tai vastaavasti johtavia alueita eristemateriaalin päällä. Yksinkertaisimmat kuviot ovat todellisissa rakenteissa haastavia, sillä jos niiden koko vastaa rajataajuuden aallonpituuden suuruusluokkaa, useamman solun sisältävä kokonaiskuvio muodostuu pinta-alaltaan epäkäytännöllisen suureksi. (Bozzi, 2005; Mittra, Chan, & Cwik, 1988; Munk, 2005.)

### FSS -peruskuvioita ja niiden muunnelmia



**Kuva 10.3** FSS-peruskuvioita. (Mittra et al., 1988; Munk, 2000)

Peruselementtejä käytetään harvoin suoraan yksikkösoluina, vaan erilaisista viiva-, neliö-, ja ympyrämuodoista on kehitetty erilaisia muunnelmia. (Bozzi, 2005; Mittra et al., 1988.)

Kuvan 10.3 keskimmaisella rivillä on peruskuvioista johdettuja niin sanottuja silmukatyyppisiä rakenteita, joilla voidaan sisäkkäin aseteltuna tuottaa useammalla resonanssitaajuudella toimivia rakenteita. Perussääntönä on, että suuremman kehän omaava kuvion osa resonoi matalammalla taajuudella ja pienempi (sisempi) kuvio vastaavasti suuremmalla taajuudella. (Munk, 2000.)

Alimmalla rivillä kuvassa 10.3 on esitetty muutamia dipolirakenteita, joissa viivamaiset alkiot on kytketty eri tavoin toisiinsa. Dipolirakenteista syntyy käytännössä useimmiten erilaisia ristejä, joiden käyttäminen FSS-yksikkösoluina aiheuttaa usein ongelmia. Ongelmien taustalla ovat kuviossa syntyvät useat, lähellä toisiaan olevat resonanssit, joiden keskinäiset vaikutukset korostuvat erityisesti vinosti pintaan nähden tulevilla signaaleilla. Periaatteessa ristimäinen rakenne vaikuttaa käyttökelpoiselta, koska siinä on valmiiksi kahta eri polarisaatiota palveleva elementti. Vinosti tulevien signaalien vuoksi kuitenkin tulisi ristimäistä rakennetta virittää, mikä tavallisesti tapahtuu ristin päihin lisättävän ylimääräisen elementin avulla. Tämän lisäyksen seurauksena kuvion alkuperäinen ristimäinen muoto lähenee ns. Jerusalemin ristiä tai hakaristiä. Virittäminen korjaa tilanteen kuitenkin vain kapealla taajuusalueella tai tiettyllä signaalin tulokulmalla. (Bozzi, 2005; Munk, 2005.)



## 10.2 FSS-kuvion mitoitus

Taajuusselektiivisen rakenteen mitoituksen perusteena on jonkin taajuuden tai taajuusalueen vaimennuksen pienentäminen tai kasvattaminen. Matkapuhelinverkkojen tapauksessa yleensä tavoitteena on rakennuksen materiaalien RF-vaimennuksen pienentäminen, joka aiheuttaa rakennuksen sisätiloissa olevan signaalinvoimakkuuden voimistumisen.

FSS-rakenteen mitoitus perustuu yksikkösolujen muodostaman matriisimaisen rakenteen resonanssitaajuuden säätämiseen, mutta laskennallisesti resonanssitaajuuden hallinta on haastavaa. Vaikeudet liittyvät johtavan materiaalin ja siinä olevien yksittäisten elementtien muotojen ja kokojen määrittämiseen, yksittäisten yksikkösolujen välisiin etäisyyksiin, johtavan pinnan todelliseen johtavuuteen, signaalien tulokulmiin ja polarisaatioihin sekä kuvion alla olevan substraatin ominaisuuksiin. Substraatti on käytännössä välttämätön, sillä todellisessa rakenteessa tulee aina olla jokin pinta, jonka päälle yksittäiset johtavat elementit voidaan sijoittaa. (Dewani ym., 2018.)

Substraatiksi on syytä valita materiaali, jonka oma johtavuus on mahdollisimman pieni, mutta joka on mekaanisesti kyllin tukeva FSS-rakenteen koossapitämiseksi, ja jonka ominaisuudet eivät muutu ympäristön muuttuessa tai ajan kuluessa. Tarkoituksenmukaisimmin nämä vaatimukset yleensä täyttyvät silloin, kun substraatin oma paksuus on pieni, yleensä muutaman millimetrin suuruusluokkaa. (Dewani ym., 2018.)

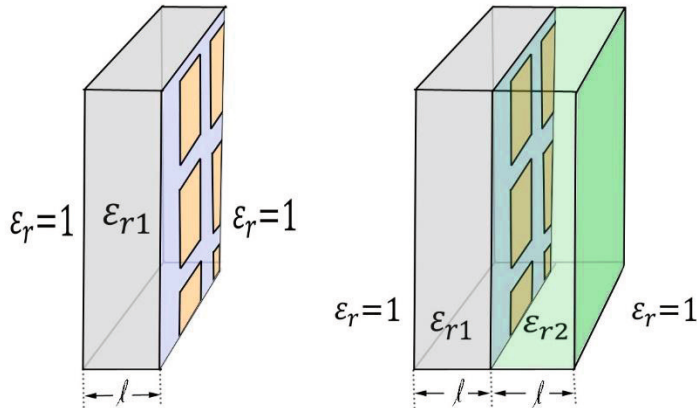
Kun substraatilla on äärellinen paksuus, se muuttaa vapaassa tilassa olevan FSS-rakenteen laskennallista resonanssitaajuutta karkeasti seuraavan kaavan 10.5 mukaan

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}}, \quad (10.5)$$

jossa  $f_0$  on ilman substraattia olevan FSS-rakenteen resonanssitaajuus, ja  $\epsilon_r$  on substraatin permittiivisyys. (Munk, 2005.)

Kaavassa ei esiinny tekijänä substraatin paksuutta, ja sen vuoksi voidaankin  $\epsilon_r$ -termi korvata niin sanotulla efektiivisellä permittiivisyydellä. Efektiivisen permittiivisyyden taustalla on itse asiassa substraatin ja sen toisella puolella olevan materiaalin vaikutuksen hallitseminen. Tavallisesti substraatin toisella puolella on ilmaa, mutta välttämättä näin ei tarvitse olla. Seuraavassa kuvassa 10.4 esitetään tilanteet, joissa FSS-pinta on sijoitettu vain substraatin toiselle puolelle (vasemmalla) ja oikeanpuoleisessa kuvassa on FSS-rakenteen johtavat elementit sijoitettu kahden substraatin

väliin. Tässä tapauksessa substraattien ei tarvitse olla samoja materiaaleja. (Munk, 2005.)



**Kuva 10.4** Perustapaukset, joissa FSS-pinta on substraatin pinnalla tai kahden substraattilevyn välissä. (Kuva: Asp)

FSS-rakenteen toiminnan kannalta on edullisinta, jos johtavat pintaelementit sijoituvat eristemateriaalina käytetyn substraatin keskelle, sillä silloin erityisesti reuna-alueilla syntyvien epäsovitusvaikutusten vaikutukset ovat pienempiä. Epäsovitusvaikutusten pienentämisen aiheuttaa ilman ja substraatin rajapintojen vastakkaiset vaiheet, jolloin optimitilanteessa virhelähteet kumoavat toisensa. (Saunders & Aragón-Zavala, 2007.)

### 10.3 FSS-rakenteen kaistanleveys

FSS-rakenteen toivottavin vaikutus yleensä olisi RF-signaalien näkökulmasta hyvin teräväreunaisen taajuusvasteen omaava suodatinrakenne, jossa määrätty taajuudet pääsisivät rakenteen läpi pienellä vaimennuksella ja niiden ympäristössä oleville taajuuksille vaimennus olisi mahdollisimman suuri. Käytännön rakennusmateriaaleille tämä olisi kuitenkin lyhytnäköinen suunnitteluperuste, sillä rakennuksen tyypillisen elinkaaren aikana matkaviestimien taajuudet ja taajuusalueet todennäköisesti vaihtuvat useaan otteeseen.

Rakennusmateriaaleihin liittyville FSS-rakenteille ilmeisesti olisi kuitenkin edullisinta tavoitella mahdollisimman laajaa kaistanleveyttä, sillä se yksinkertaistaisi kuvioointeja.

Kaistanleveyden määrää FSS-kuvioinnissa elementtien välinen etäisyys ja niiden muoto. Peruseriaatteena periodisten rakenteiden näkökulmasta voidaan pitää

kaistanleveyden kasvamista, kun solujen välistä etäisyyttä pienennetään. Yksinkertaisten dipolirakenteiden optimoiminen kaistanleveyden suhteen on erityisen ongelmallista, sillä niiden elementtien välisiä suhteita muutettaessa muuttuu sekä kaistanleveys että resonanssitaajuus. Toinen tarkkaa suunnittelua vaativa ryhmä on silmukoihin perustuvat rakenteet, sillä silmukan pituus vaikuttaa resonanssitaajuuden ohella myös kaistanleveyteen. (Bozzi, 2005.) Suurimmat kaistanleveydet ovat valmiiksi yhtenäisillä rakenteilla, esim. ympyrällä ja kuusikulmiolla.

Niin kuin edellä todettiin, kaistanleveyttä voi kasvattaa asettelemalla yksikkösolut lähemmäs toisiaan. Asia ei kuitenkaan ole täysin suoraviivaista, sillä lähellä toisiaan olevien elementtien keskinäinen kapasitanssi nousee, joka siirtää resonanssitaajuutta tyypillisesti kohti matalampia taajuuksia. Tämä täytyy kompensoida muuttamalla yksikkösolujen johtavien alueiden mitoitusta, joka taas muuttaa yleensä vierekkäisten solujen välistä etäisyyttä. (Bozzi, 2005.)

## 10.4 FSS-rakenteet ovat aktiivisen tutkimuksen kohteena

Viimeisen vuosikymmenen aikana rakennusten sisätiloissa vaikuttavaa signaalinvoimakkuutta on pyritty parantamaan erityisesti rakennusten ikkunoihin liittyvien innovaatioiden avulla. Lasipintaan muodostettujen FSS-kuvioiden mahdollisuuksia kasvattaa matkaviestimien käyttämiä signaalitehoja on tutkittu runsaasti, ja yksi ensimmäisistä hyvin karkeilla kuvioilla tehtyjä kokeiluja on Kianin julkaisema työ. (Kiani, G. I., Olsson, Karlsson, Esselle, & Nilsson, 2011.) Siinä pinnoitetun puhtaan lasin vaimennus arvioitiin noin 25–30 dB:ksi, hieman taajuudesta riippuen, ja itse lasimassalle esitettiin johtavuudeksi 0.00005 S/m. Itse kuvio oli risti, ja siinä poistettavan pinnoitteen osuus oli verraten suuri, noin 10 %. Tämän vuoksi kuvio ei sovellu ainakaan siinä muodossa nykyiset vaatimukset täyttävissä ikkunoissa käytettäväksi ratkaisuksi, sillä poistettavan pinnoitteen suuri määrä heikentää U-arvoa huomattavasti.

Myös Lundin yliopistossa on tehty aktiivista tutkimusta, ja heidän yhtenä tutkimusaiheenaan on ollut kapeiden viiltomaisten rakojen käyttö FSS-rakenteena lasin pinnalla olevalle pinnoitteelle. Niin kuin voidaan olettaa, tämä ratkaisu on herkkä polarisaation muutoksille, mutta toisaalta poistettavan pinnoitteen määrä on pieni. Heidän arvionsa lasin johtavuudelle poikkeaa Kianin arviosta, ollen noin  $10^{-12}$  S/m suuruusluokkaa. (Widenberg & Rodriguez, 2002.)

Nopeasti etenevästä tutkimustyöstä kertoo myös Fleuryn tutkimustyö, jossa viivan leveys kavennettiin 25  $\mu\text{m}$ :n suuruusluokkaan laserin avulla tehtävällä pinnoitteen poistomenetelmällä. Pinnan läpäisyä tutkittiin nykyisiä taajuuksia korkeammilla,

56–40 GHz:n taajuuksilla. (Fleury et al., 2020.) Ohut viivanleveys poistettavalla alueella jättää U-arvon käytännössä ennalleen, joten kuviointi ei vaikuta lasin energiatehokkuuteen.

FSS-tekniikkaa on tutkittu myös muiden kuin ikkunoiden osalta, esim. Korealaisien tekemästä tutkimuksesta on Lee julkaissut artikkelin, jossa noin 80 senttimetrin etäisyydelle sijoitetuilla antennilla ja piirianalysointilaiteilla tutkittiin kehysmäisten kuvioiden sisään sijoitettujen johtavien nelikulmioiden vaikutusta RF-läpäisyyn. (Lee, I. et al., 2014.)

Tutkimus FSS-rakenteiden osalta jatkuu koko ajan. Tässä väitöstutkimuksessa esitetty FSS-rakenteita koskeva tulosten esittely sisältää kuitenkin muista julkaisuista poiketen myös FSS-rakenteen vaikutuksen arviointia kenttäkokeen avulla, jonka tuloksia avataan luvussa 15. FSS-rakenteiden vaikuttavuutta on käsitelty muissa julkaisuissa lähinnä laboratoriomittauksiin ja simulaatioihin perustuen.

# 11 BETONI JA SEN RAKENNE

Tässä kirjassa keskitytään asuinkerrostalojen ulkokuoren RF-vaimennuksiin, ja ulkokuoren pääasialliset rakenneosat voidaan ryhmitellä ikkunarakenteisiin ja seiniin. Seinät ovat kerrostaloissa tavallisesti kahdesta betonikuoresta ja niiden väliin sijoitettavasta lämmöneristekerroksesta koostuvia elementtejä (Lahdensivu, 2012), joten betonin aiheuttama signaalivaimennus on yksi keskeisimmistä tutkittavista ja tarkasteltavista asiakokonaisuuksista.

Betonin ollessa ylivoimaisesti eniten käytetty rakennusmateriaali asuinkerrostalojen ulkoseinissä (Vainio, 2008), on tarpeen luoda katsaus betonin raaka-aineisiin, valmistukseen ja sisäiseen rakenteeseen. Betonin sisäisen rakenteen tunteminen tarjoaa myös perustiedot myöhemmin esiteltävien tutkimustulosten analysointiin, ja mahdollisten johtopäätösten tekoon.

Rakennuksen ulkokuoren signaalivaimennus liittyy vahvasti ulkoseinärakenteen sandwich-elementin betonikuorien sisäiseen rakenteeseen ja sen materiaalien kykyyn sitoa kosteutta. Siksi sen todellisen vaimennuksen arvioimiseen liittyy lukuisia haasteita. Tämä kappale pyrkii valaisemaan betonin kosteuden muutosten takana olevia rakenteen ominaisuuksia.

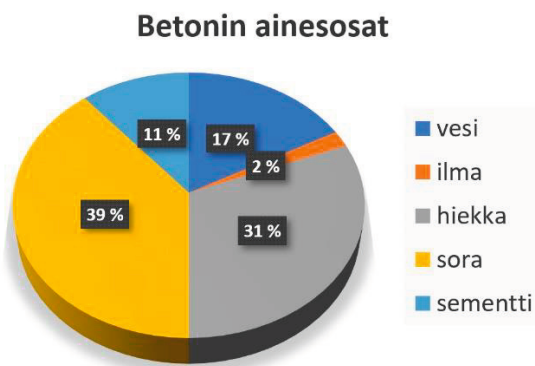
## 11.1 Betonin ainesosat

Betonilla, kuten useimmilla muillakin sementtipohjaisilla materiaaleilla on monimutkaisia sisäisiä rakenteita, jotka muodostuvat ensin kemiallisissa reaktioissa ja jähmettyvät sitten hitaasti muuttuvaksi materiaalikonaisuudeksi. Rakennusmateriaalien RF-vaimennuksen näkökulmasta kaikkein mielenkiintoisin yksitäinen asia on betonin ainesosana olevan sementtipastan huokoisuus, joka vaikuttaa ratkaisevasti lopullisen betonin ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi huokoisuuteen, kuormitettavuuteen, tiheyteen, lujuuteen ja kutistumiseen. (Iso-Mustajärvi, 2013; Neville, 2011; Winslow & Liu, 1990.)

Betoni on yksi maailman tärkeimmistä rakentamisessa käytettävistä raaka-aineista, ja sen vuoksi sitä onkin laajasti tutkittu. Betonia voidaan luonnehtia moni-

komponenttiseksi, sillä se koostuu kiviaineksesta, sementistä ja vedestä. Näiden lisäksi siihen voi olla sekoitettuna lisäaineiksi laskettavia ainesosia. (Fricks, 2007.)

Seuraavassa kuvassa 11.1 on suuntaviivoja antava kuvaus betonin eri ainesosien suhteista tilavuusosina, mutta on huomioitava, että jakauma vaihtelee betonilaadun ja käyttötarkoituksen mukaan. Vaikka veden osuus alla olevassa kuvassa 11.1 näyttää olevan vain 11 %:n luokkaa, on sen määrällä hyvin merkittävä vaikutus lopullisen betonin ominaisuuksiin. Veden määrää kuvataankin vesi/sementti -suhteella, joka useimmiten osoitetaan w/c -merkinnällä. (Kosmatka & Wilson, 2016; Neville, 2011; Singh, Munjal, & Thammishetti, 2015.)



**Kuva 11.1** Betonin ainesosat. (Fricks, 2007; Knaack & Kurama, 2013)

### Sementti

Sementti on betonin kallein ainesosa paljon energiaa vaativan valmistusprosessinsa vuoksi. Tämän vuoksi erilaisissa betoneissa sementin määrää on pyritty pienentämään, ja korvaamaan sitä muilla saatavissa olevilla tarkoitukseen sopivilla aineilla. (Al-Zuhairi, 2017; NCDOT, 2019.) Sementtiä kuvataan tarkemmin seuraavissa kappaleissa 11.1.1 ja 11.1.2.

### Vesi

Vesi on betoni valmistuksessa hyvin merkittävässä roolissa, sillä sen määrä sanelee pitkälti valmiin betonin ominaisuudet. Veden roolia betonin valmistuksessa ja hydrataatiossa on esitetty seuraavissa kappaleissa 11.1.4–11.3.

### Kiviaines

Kiviaines on tilavuudeltaan ja painoltaan suurin yksittäinen betonin valmistuksessa käytetty aine, ja sen raekoon jakaumaa muuttamalla voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Tätä optimointia tehdäänkin kaikissa kaupallisissa betonitehtaissa, ja

siihen motivoi varsinaisen sementin ja kiviaineksen hankintahinnan moninkertainen ero. Betonissa käytettävää kiviainesta nimitetään erityisesti kansainvälisissä yhteyksissä aggregaateiksi, ja ne jaetaan luokkiin karkeuden tai raekoon mukaan.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan betonin eri ainesosia tarkemmin.

### 11.1.1 Sementti

Betonin valmistuksessa sideaineena käytettävä sementti on pohjimmiltaan kalkkikivestä tehty seos, joka toimii betonissa liiman tavoin. Sementin osuus betonista on noin 8–16 painoprosenttia, ja reagoidessaan veden kanssa se muodostaa niin sanotun sementtikiven. Tämä sementtikivi sitoo aggregaatit yhteen ja muodostaa yhdessä raudoituksen kanssa varsinaisen betonirakenteen. (Betoniteollisuus ry, 2019.)

Sementtinä tavallisesti pidetään vain kuivaa ja reagoimatonta jauhetta, sen kastuessa nimitys muuttuu sementtipastaksi. Nimitykset johtuvat niin sanotuista portlandsementeiksi kutsutuista kaliumsementeistä, joihin kuuluu suurin osa maailmassa käytetyistä sementtilaaduista. (Kosmatka & Wilson, 2016.)

Sementin raaka-ainetta, kalkkikiveä, esiintyy luonnossa lähes kaikkialla, joten sementin suosio rakentamisessa selittyy osin helposti saatavilla olevilla materiaaleilla. Sementtiklinkkeri koostuu maankuoren viidestä yleisemmästä alkuaineesta, eli hapesta (O), piistä (Si), alumiinista (Al), raudasta (Fe) ja kalsiumista (Ca). Suomessa tavattava luonnon kalkkikivi on kovempaa kuin esim. Euroopan keskiosissa, joten sen murskaaminen vaatii enemmän energiaa. (BY-koulutus, 2012; Finnsementti Oy, 2011.)

### 11.1.2 Klinkkeri

Klinkkeri valmistetaan pääosin kalsiumkarbonaattia ( $\text{CaCO}_3$ ) sisältävästä kalkkikivestä murskaamalla, ja tätä pääkomponenttia on tyyppillisessä portlandsementtiklinkkerissä noin 67 %. Muita komponentteja, joita sementin valmistuksessa käytetään vähäisempiä määriä, eli piidioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), 22 %, alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) noin 5 % ja rautaoksidia ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) noin 3 %, saadaan niin ikään kalkkikivilouhoksista tai teollisuuden sivutuotteina. Nämä perusraaka-aineet jauhetaan hienoiksi jauheiksi ja esikuumentetaan noin 900 °C-asteeseen hiilidioksidin poistamiseksi. Sen jälkeen lämpötilaa nostetaan noin 1400 °C-asteeseen, jolloin kiviaines alkaa sulaa ja komponentit muodostavat yhdessä klinkkerin. Tätä kutsutaan yleisesti klinkkerin polttamiseksi. (Finnsementti Oy, 2011; Greenspec, 2020.)

Sementtejä koskevissa kemiallisissa esityksissä raaka-aineet esitetään usein oksidimuodossa. Yleisimmille oksideille käytetään lisäksi lyhenteitä, joita ovat muun muassa seuraavat: C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S = SO<sub>3</sub>, H = H<sub>2</sub>O, ja CH = Ca(OH)<sub>2</sub>. (Virola, H., 2000.)

Polttamisessa syntynyt klinkkeri jauhetaan esimerkiksi kuulamylyssä, joka on täytetty erikokoisilla teräspalloilla. Erilaiset pallojen koot mahdollistavat klinkkerin hienoisuuden säätämisen. Samassa sekoituksessa lisätään seokseen kipsiä, jonka määrällä voidaan hallita betonin alkuvaiheen kovettumisaikaa. Mikäli kipsiä ei lisätä klinkkeriin, alkaa seoksen kovettuminen sementin ja veden sekoituksen jälkeen lähes välittömästi, eikä valamisen yhteydessä tarvittavaa työstöaikaa jää riittävästi. (Green-spec, 2020; Taipalus, 2016.)

Klinkkerin komponenteilla voidaan vaikuttaa betonin hydratoitumisessa tapahtuviin prosesseihin mm. seuraavasti: Trikalsiumsilikaatti (C<sub>3</sub>S):lla saadaan sulfaatinkestävää betonia, jolla on nopea lujuudenkehitys ja suuri loppulujuus. Dikalsiumsilikaattia (C<sub>2</sub>S) käyttämällä saadaan myös sulfaatinkestävää ja lujaa lopputuotetta, mutta lujuuden kehittyminen on hidasta. Trikalsiumalumiinaatin (C<sub>3</sub>A) käyttö tuottaa nopeasti reagoivaa seosta, joka ei kestä sulfaatteja. Tetrakalsiumalumiinaatti-ferriitti (C<sub>4</sub>AF) hidastaa lujuuden kehittymistä ja antaa valussa työaikaa, ja lopputuote kestää sulfaatteja. (Finnsementti Oy, 2011; Iso-Mustajärvi, 2013.)

Sementin valmistuksessa käytetään halvempia materiaaleja täydentämään pääraaka-aineena olevaa klinkkeriä, ja näitä täydentäviä aineita saadaan tavallisesti paikallisen teollisuuden sivutuotteina. Suurin osa näistä sivutuotteista liittyy energia- tai metalliteollisuuden prosessien aikana syntyviin toissijaisiin tuotteisiin kuten muun muassa lentotuhkaan tai masuunikuonaan. (Kosmatka & Wilson, 2016.) Osin sivutuotteiden käytöstä johtuen rakentamisessa käytettävät lopulliset sementit eroavat toisistaan, sillä täydentävien raaka-aineiden määrä ja laatu riippuvat paikallisista olosuhteista, esimerkiksi siitä, onko lähitöillä edullisesti sivutuotteita tarjoavaa metalliteollisuutta.

Sementin korkea hinta selittyy mekaanisen murskaamisen ja jauhamisen sekä korkeassa lämpötilassa tapahtuvan polttamisen vaatimalla suurella energiamäärällä. Tämän vuoksi ilmastonmuutosta koskevissa keskusteluissa on yhä useammin nostettu esiin betonin valmistuksen aiheuttama ilmastorasitus.

Portland-sementin erilaisia variaatioita käytetään lähinnä vastaamaan käyttökohteen ja betonin valamiseen liittyviin vaatimuksiin. Käyttökohteissa tulee huomioida betonin mahdollinen altistuminen sulfaateille, joko pohjavesien tai maaperän kautta. Toinen vaatimus, joka liittyy betonin valamiseen, koskee hydrataation nopeutta.



Joissakin käyttökohteissa sitä pyritään hidastamaan ja toisissa nopeuttamaan. (Lyons, 2007.)

### 11.1.3 Kiviaines

Betonin sisältävällä kiviaineksella ja sen laadulla ei ole suoraa vaikutusta valmiin betonin radiosignaalien läpäisyyn. Koska kiviaineksen määrä on betonissa kuitenkin suuri, ja sen raekoon jakauma vaikuttaa hydratoitumisessa vaadittavan veden määrään, on paikallaan kuvata lyhyesti myös kiviaineksen valintaa ja käyttöä betonia valmistettaessa.

Valmiin betonin massasta ylivoimaisesti suurin osa koostuu kiviaineksesta, joka Suomessa on pääosin luonnonkiveä. Kiviaines jaetaan karkeaan ja hienoon, karkean koostuessa tyypillisesti kalliosta louhitusta murskeesta tai luonnon sorasta. Hieno kiviaines on puolestaan luonnon hiekkaa tai murskeen pienikokoisempaa osaa. Betonissa käytetty kiviaines on varustettu CE-merkinnällä ja sen tärkeimmät tekijät ovat raekoon ja sen jakauman ohella rakeiden muoto ja lujuus. Kiviaineksen käsittelyssä tulee erityisesti huomioida, että pienikin määrä humusta kiviaineksen joukossa heikentää merkittävästi lopullisen betonin ominaisuuksia. (BS EN 12620:2002, 2008; Kosomaa, Mattila, & Tepponen, 2015; Neville, 2011.)

Aggregaatit, eli betonin valmistuksessa käytettävät erilaiset kiviainekset, muodostavat noin 70–85 % kokonaisbetonin massasta (60–75 % tilavuudesta) ja ne vaikuttavat betonin sitoutumisessa ja kovettumisessa tapahtuviin reaktioihin veden määrän kautta. (Kosmatka & Wilson, 2016.) Luonnollisesti myös vastavaletun betonin työstettävyyttä riippuu osaltaan myös kiviaineksen raekoon jakaumasta. Kovettuneessa betonissa kiviaineksen laatu vaikuttaa betonin lujuteen ja kestävyYTEEN. Tämän vuoksi varsinkin karkeamman kiviaineksen, kuten soran, huokoisuus ja mahdollinen hauraus on otettava huomioon. (Yang, 2015.)

Suomen olosuhteissa betonin lujuus ei määrity tavallisesti käytettävien aggregaattien mukaan, sillä pohjoismaissa aggregaatit ovat lujempia ja kestävämpiä kuin hydrataatiossa syntynyt sementtipasta. Betonin mahdollisesti rikkoutuessa syy ei yleensä ole kiviaineksen heikkoudessa. Tilanne vaihtelee kuitenkin Euroopan alueella, sillä luonnosta saatavan kiviaineksen laatu eroaa huomattavasti eri maiden välillä.

Niin kutsutut luonnolliset aggregaatit ovat luonnon omaa soraa ja hiekkaa, joita saadaan sorakuopilta, joista ja järvien tai merenpohjasta. Kiviaineksen laatu riippuu ympäröivästä kallioperästä ja maakerroksista. Veden ja jään kanssa tekemisissä ollutta pyöreäksi hioutunutta kiviainesta pidetään yleensä korkealaatuisena mutta liuske-

kivityyppistä kiviainesta pyritään välttämään. Toisaalta hyvin sileä luonnonkivien pinta voi vähentää sementtipastan kiinnittymislujuuutta ja sitä kautta vaikuttaa betonin kokonaislujuuteen.

Hienona kiviaineksena tavallisesti pidetään aggregaatteja, joiden läpimitta on alle 5 millimetriä, ja karkean aineksen koko vaihtelee yleensä 5 millimetrin ja 37 millimetrin välillä. Karkean kiviaineksen suurin koko vaihtelee kuitenkin maakohtaisesti ja tapauskohtaisesti, ja siihen liittyvät mm. rakennuskohteen tyyppi, rakenteen mitat ja raudoitus. (Venkatarama Reddy & Gupta, 2008; Yang, 2015.)

Betonia valmistettaessa kiviaineksen raekokoa pyritään yleensä painottamaan karkeampaan suuntaan, jolloin raekoon maksimiarvo kasvaa. Syynä on tarve säästää sementtiliimaa ja samalla vähentää lopullisen rakenteen halkeilua ja kutistumaa. (Autere, 2018.)

Hyvin hienon hiekan vaikutusta lopulliseen betoniin on tutkittu karkean aineen käyttöä vähemmän, mutta näyttää siltä, että suuri hienon hiekan osuus vaikuttaa betonin työstettävyyteen heikentävästi, ellei seokseen lisätä ylimääräistä vettä. (Yalley, 2018.)

Karkeapintainen ja kulmikas kiviaines vaatii enemmän sementtiliimaa ja varsinkin betonin kovettumisen alkuvaiheessa betonin lujuus tällaista kiviainesta käyttämällä paranee. Myöhemmin, kun betonin sidosten jo katsotaan syntyneen, erot pienenevät verrattuna sileäpintaiseen kiviainekseen. (Autere, 2018.)

Ulkomailla kiviaineksen tilalla on käytetty myös kierrätettyä betonia, mutta näissä tapauksissa uuden betonin käyttökohteet ovat tavallisesti jalkakäytäviä tai muita rakenteita, joissa betonin kovuuden ja lujuuden vaatimukset eivät ole kriittisiä. (Kosmatka & Wilson, 2016.)

#### 11.1.4 Vesi

Vesi on välttämätön osa betonin valmistusta ja sen määrä vaikuttaa valmiin betonin ominaisuuksiin ratkaisevasti. Veden rooli on tämänkin kirjan näkökulmasta tärkeä, sillä veden ja sementin suhde betonin valmistuksessa määrää betonin huokosrakenteeseen liittyvät ominaisuudet, joilla puolestaan on hyvin tärkeä merkitys betonin kastumiseen ja kuivumiseen. Betonin kosteudella on hyvin oleellinen merkitys betonikerroksen RF-vaimennusta arvioitaessa, kuten myöhemmin esitettävistä tuloksista voidaan todeta.

Sementin hydratoitumiseen vaaditaan aina jossakin muodossa olevaa vettä. Hydrataatio voi tapahtua osittain hyvin kosteassa ilmassa, mutta ilmassa oleva kosteus ei

riitä täydelliseen hydratoitumiseen. Teoreettisesti arvioituna hydrataatio vaatii 25 % sementin painoa vastaavan vesimäärän, ja ns. geelihuokosiin sitoutuu noin 15 % sementin painosta oleva vesimäärä. (Gilkey, 1961; Neville, 2011; Viirola, H., 2000.) Veden vaikutusta hydrataation eri vaiheissa tarkastellaan tarkemmin seuraavissa kappaleissa 11.2 ja 11.4.

## 11.2 Betonin hydrataatio

Hydrataatio on hyvin monimutkainen tapahtumaketju, joissa useat prosessit tapahtuvat osin samanaikaisesti ja osin peräkkäin. Nämä prosessit voidaan luokitella esim. seuraavasti: 1. vaihe, jossa aineita liukenee, ja johon liittyy molekyylien irtoaminen kiinteän aineen pinnalta aineen kastuessa, 2. vaiheessa liuenneet komponentit kulkevat läpi sementtipastan rakenteen joko kiinteän aineen pinnalla tai kapillaarihuokosten avulla, 3. vaiheessa tapahtuu reaktiotuotteiden kiinnittyminen toisten aineiden pintoihin, 4. vaiheessa lähtöaineydinten ympärille saostuu uusia ainekerrostumia ja 5. vaiheessa muodostuu ionikomplekseja ionien välillä tapahtuvissa reaktioissa. Viimeisessä 6. vaiheessa seuraa ionien tai molekyyliyksiköiden kerääntyminen rajapinnoille.

Hydrataatio kokonaisuutena on ollut tutkimuksen kohteena vuosikymmeniä, johdettua eri prosessien vuorovaikutuksesta keskenään ja niiden erottamisen vaikeudesta.

Hydrataation lähdeaineina ovat aggregaatit, sementti ja vesi, ja lopputuotteena valmis betoni, jonka pääasiallinen komponentti on Kalsium-Silikaatti-Hydraatti-geeli (C-H-S), joka vastaa noin 50 % koko pastan tilavuudesta ja suurimmasta osasta sementtiliiman ominaisuuksista. Geelin merkinnässä olevat väliviivat ovat painottamassa hydrataatiotuotteen komponenttien suhteiden mahdollista vaihtelua. C-H-S ei itsessään ole erityisen vahvaa, mutta sillä on kyky sitoa yhteen muista hydrataatiotuotteista muodostuneet hyvin vahvat kiteet, jolloin kokonaisuus muodostuu lujaksi. (Neville, 2011; Viirola, H., 2000.)

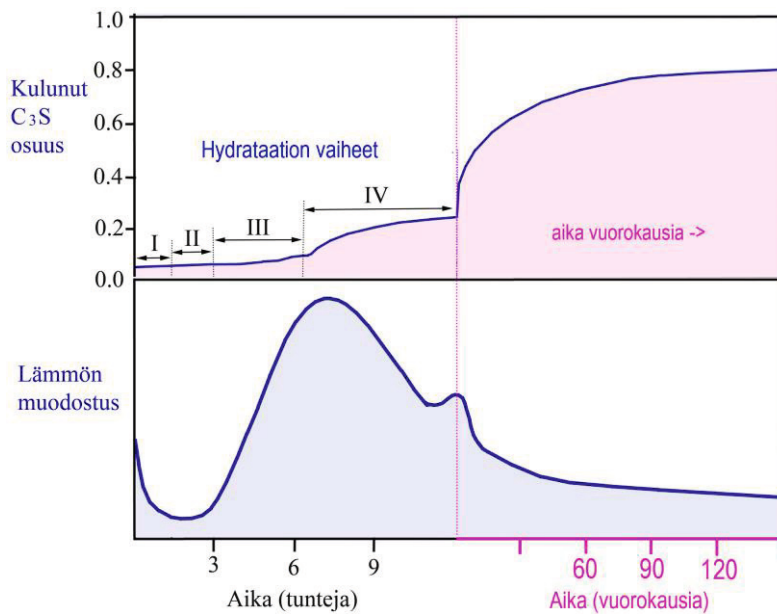
### 11.2.1 Alkuvaihe

Lähes heti veden lisäämisen yhteydessä osa klinkkerisulfaateista ja kipsistä alkaa liueta ja muodostaa alkalista ja sulfaattipitoista liuosta. Tässä vaiheessa reagoivat sementin sisältämät C<sub>3</sub>A-aluminaattiyhdisteet, jotka muodostavat alumiinirikasteista geeliä. Niillä ei kuitenkaan ole vaikutusta betonin lopulliseen lujuuteen. Alkulujuuden

määrää seoksessa epäpuhdas trikalsiumsilikaatti, jota nimitetään aliitiksi ( $C_3S$ ), ja jonka geelimäinen muoto reagoi vesi-sementtiliuoksessa olevan sulfaatin kanssa. Trikalsiumsilikaatin hydrataatio on merkittävin sementin kemiallinen reaktio, sillä aliitti on portland-sementissä tärkein yksittäinen ainesosa, joka vaikuttaa sementtipastan sitoutumiseen.

Sementin mineraalit  $C_3A$  ja  $C_3S$  ovat hyvin liukoisia, ja niiden nopea liukeneminen sekoitusveden muodostaa lyhyessä ajassa ylikyllästyneen huokosliuoksen, jossa ioneille on edullisempaa muodostaa uusia faaseja kuin pysyä liuenneina. Nämä uudet faasit ovat kiinteitä, ja tapahtumaa sanotaan saostumiseksi. Hydrataatiotuotteiksi nimittävät saostumat laskevat alkuperäisten mineraalien pitoisuutta huokosliuoksessa, johon voi jälleen liueta lisää mineraaleja. Hydratoituminen onkin jatkuva prosessi, jonka kuluessa syntyvät hydrataatiotuotteet korvaavat alkuperäiset mineraalit, ja jossa veden avulla tuotettu huokosliuos toimii siirtymävyöhykkeenä. (Virola, H., 2000.) Tästä reagoinnista syntyy pieniä muodoiltaan saumamaisia kiteitä. Tämä tapahtuma tuottaa hyvin voimakkaasti lämpöä, mutta on ajalliselta kestoiltaan vain muutamien minuuttien suuruusluokkaa.  $C_3S$ :n hydrataatiota on tutkittu intensiivisesti kymmenien vuosien ajan, mutta prosessin monimutkaisuuden vuoksi sitä ei vielääkään täysin tunneta. (Barron, 2020; Virola, H., 2000.)

Alla oleva kuva kuvaa hydratoitumisprosessia  $C_3S$ :n kulumisen ja lämmöntuoton näkökulmasta (Barron, 2020).



**Kuva 11.2** Hydrataation kehittyminen. (Barron, 2020, muokattu)

Kuvassa 11.2 esitetty lämmön kehittyminen liittyy betonin lujuuden kehittymiseen, joka riippuu oleellisesti käytetystä sementtityypistä. Lämmöntuotannon osalta ensimmäinen huippu alkaa välittömästi veden sekoittamisen jälkeen, toinen noin 4–10 tunnin päähän sekoittamisesta ja kolmas, huomattavasti matalampi, noin 18–30 tunnin päähän. Kolmas huippu on havaittavissa useimmilla sementtilaaduilla, mutta ei kuitenkaan kaikilla. (Neville, 2011.)

## 11.2.2 Lepovaihe

Alkuvaiheen jälkeen seuraa niin sanottu lepovaihe, jolloin lämmön kehitys on pientä ja betonia voidaan vielä muokata ja työstää lopulliseen muotoonsa. Tässä vaiheessa  $C_3S$ :n reagointi hidastuu merkittävästi, mutta ilmiön syystä ei toistaiseksi olla yksimielisiä, vaikka tutkimusta tällä saralla on tehty runsaasti. (Barret & Ménétrier, 1980; Barret, Ménétrier, & Bertrandie, 1983; Damidot & Nonat, 1994; Garrault-Gauffinet & Nonat, 1999; Gartner & Jennings, 1987; Jennings & Pratt, 1979; Stein & Stevels, 1964.)

Lepotilan lähetessä loppuaan, alkaa C-H-S:n suhteellinen tilavuus ja samalla reaktionopeus nousta voimakkaasti ja siirrytään pääreaktioon (Bullard et al., 2011).

## 11.2.3 Kiihtyvä vaihe (Pääreaktio)

Lepotilan lopussa sementissä oleva aliitti ja beliitti ( $C_2S$ ) alkavat reagoida muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumhydroksidia. Tämä äkillinen reaktionopeuden muutos tapahtuu noin 2–4 tunnin kuluttua veden sekoittamisesta ja saavuttaa reaktionopeuden maksimiarvonsa 5–10 tunnin kuluttua. Betoniseoksen lopullinen lujuus syntyy beliitin ( $C_2S$ ) vaikutuksesta, joka reagoi aliittia huomattavasti hitaammin. (Täipalus, 2016.)

Tämä vastaa päähydraatiojaksoa (3. vaihe), jonka aikana betonin lujuus kasvaa. Yksittäiset sementtihiukkaset reagoivat ensin sementtipastan pinnalla ja prosessi jatkuu kohti massan sisäosia, ja veden täyttämät alueet seoksessa pienenevät nopeasti. ( $C_3A$ )-hydrataatio jatkuu myös tässä vaiheessa, kun vielä jäljellä oleva vesi kohtaa tuoreita kiteitä. Tämän kiihtyvän vaiheen lopussa noin 30 % alkuperäisestä sementistä on hydratoitunut, ja tälle vaiheelle on luonteenomaista pääasiassa C-S-H-geelin ja CH-muotoisten reaktiotuotteiden jatkuva saostuminen kapillaarihuokosiin, jotka aikaisemmin olivat sekoitusveden täyttämiä. Tämä kehitys johtaa luonnollisesti kapillaariveden vähenemiseen ja betonimassan lujuuden kasvuun. (Neville, 2011.)

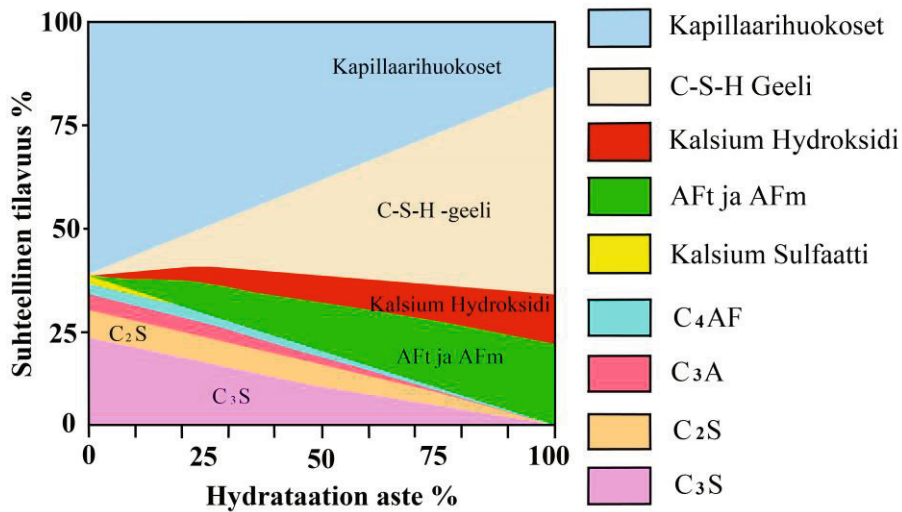
Tässä vaiheessa betonin sementtipasta koostuu reagoimattomista sementtihiukkasista, joita ympäröi hydrataatiotuotteiden kerros sekä vedellä täyttyneistä kapillaarihiukkasista.

#### 11.2.4 Hidastuva vaihe

Hidastuvassa vaiheessa reaktionopeus on jo saavuttanut huippunsa ja se laskee melko tasaisesti ajan kuluessa. Hidastuminen johtuu vapaan  $C_3S$ :n vähenemisestä. Täydellinen voi viedä kymmeniä vuosia, edellyttäen että hydrataation vaatimaa vettä on saatavilla. Hidastuvassa vaiheessa tapahtuva hydrataation eteneminen edellyttää, että sementistä peräisin olevat lienneet ionit siirtyvät diffuusion avulla ulospäin kohti kapillaarihuokosia ja saostua niihin, ja samaan aikaan veden on siirryttävä samoihin huokosiin huokosten pinnan läpi. Tämä siirtymisprosessi hidastuu koko ajan, sillä hydrataatiotuotteet paksuntavat kapillaarihuokosten pintaa ja vaikeuttavat niin sementtihiukkasten kuin vedenkin liikkeitä.

28 vuorokauden kuluttua veden sekoituksesta yleisesti katsotaan pääasiallisen hydrataatiotuotteen, eli kalsiumsilikaattihydraatin (C-S-H), hallitsevan seosta ja betonin saavuttaneen lähes lopullisen lujutensa. (Neville, 2011; Taipalus, 2016; Virola, H., 2000.)

Alla oleva kuva 11.3 esittää sementin hydratoitumisessa tapahtuvia muutoksia mineraalien, hydrataatiotuotteiden, veden ja huokosrakenteen suhteellisten määrien muutoksina hydrataation edetessä veden sekoittamisesta kohti täydellistä hydrataatiota. (Kosmatka & Wilson, 2016.)



**Kuva 11.3** Hydrataation kehittyminen hydrataatiotuotteiden näkökulmasta. (Kosmatka & Wilson, 2016)

Kuvassa esiintyvät AFm ja AFt ovat portland-sementin  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ -mono- ja -trifaaosit, jotka molemmat kuuluvat tavallisten portland-sementtien hydrataatiotuotteisiin. Ne vaikuttavat merkittävästi asettumisaikaan, varhaiseen lujuuden kasvuun ja pidemmän aikavälin suorituskyvyssä erityisesti sulfaattiresistanssiin. (Feng, Miao, Bullard, & Riman, 2016; Irassar, 2009; Le Saoût, Lothenbach, Hori, Higuchi, & Winnefeld, 2013; Lothenbach, Le Saout, Gallucci, & Scrivener, 2008.)

### 11.2.5 Hydrataation päätyminen

Hydrataatio kestää normaaliolosuhteissa ja sopivilla ainejakaumilla hyvin pitkään. Prosessin kesto riippuu pastan vesi-sementtisuhteesta (w/c), sementin hiukkasten koosta ja olosuhteista. Myös lisäaineet luonnollisesti vaikuttavat asiaan. (Heikkinen, 2013; Tikkanen, 2016.) Hydratoituminen jatkuu ensimmäisten vaiheiden jälkeen hitaasti, kunnes jokin seuraavasta kolmesta ehdosta täyttyy:

- kaikki sementti on reagoinut. Tämä on mahdollista, jos alkuperäinen w/c-suhde on riittävän korkea ja muiden aineiden suhteet mahdollistavat reagoinnin. Tässä tapauksessa betonin lujuus ei kuitenkaan ole välttämättä optimaalinen, sillä w/c-suhde on voinut olla tarpeettoman korkea. Tämä aiheuttaa betonin rakenteen heikkenemistä.
- Nestemäistä vettä ei ole enää käytettävissä prosessin jatkamiseen. Hydratoituminen voi pysähtyä veden puutteeseen tilapäisesti, ja jatkua esimerkiksi kastelun tai

sateen vaikutuksesta. Tilanne on kuitenkin epäedullinen, sillä lähes kovettunutta sementtipastaa ei onnistuta kastelemaan kuin pinnalta. Sementin täydellinen hydratoituminen vaatii vähintään 0.4:n w/c-suhdetta. Jos sementin hydrataatio käynnistyy, mutta päättyy veden puutteeseen ja kuivumiseen, jää betonin lopullinen lujuus odotettua paljon heikommaksi.

- c) Tila loppuu uusilta reaktiotuotteilta. Tämä on tavoiteltavin tilanne, sillä käytännössä se tarkoittaa kapillaarihuokosrakenteen vähenemistä tiettyyn minimitilaan, jonka jälkeen prosessi ei enää jatku, vaikka vettä ja reagoimatonta sementtiä olisi jäljellä. Tämä on mahdollista vain, jos w/c-suhde on lähellä 0.4:n optimaalista arvoa.

## 11.3 Betonin huokoisuus ja vesi/sementti-suhde

Betonin huokoisuus määrittää valtaosaa lopullisen betonin ominaisuuksista, ja sillä on keskeinen osa betonin kosteuden arvioimisessa. Koska betonin kosteus vaikuttaa ratkaisevasti betonirakenteen RF-signaalivaimennukseen, on tarpeen tarkastella vielä tarkemmin betonin hydrataation yhteydessä syntyneitä huokosia ja niiden muodostamia järjestelmiä.

Betonin huokosjärjestelmään perustuva arvio on useimmiten luotettavampi ja käyttökelpoisempi betonin suorituskyvyn mittari kuin hydratoitumisessa muodostuneen kiinteän faasin muiden ominaisuuksien arviointi. Ongelmaksi muodostuu kiinteän sementtipastan huokoisuuden mittaamisen käytännön vaikeus, sillä mikään yksittäinen mittausmenetelmä ei kykene kuvaamaan kovettuneen pastan koko huokosrakennetta, johtuen huokosten erilaisesta sijainnista, hyvin erilaisesta koosta ja vaikutuksesta erilaisiin betonin ominaisuuksiin. Useimmat huokoisuuden mittaamiseen käytetyt menetelmät edellyttävät huokosissa olevan nesteen mahdollisimman tarkkaa poistamista, mutta kuivattamiseen liittyvä esikäsitteily usein muuttaa huokosrakennetta niin, että sen jälkeen saatavat tulokset eivät enää ole luotettavia.

Sementin hydrataatiota voidaan ajatella tapahtumasarjana, jossa nestemäisen sekoitusvesi asteittain muuntuu kiinteiden hydrataatiotuotteiden kapillaarihuokosten sitomaksi vedeksi. Jos kaikkien hydrataatiotuotteiden oletetaan olevan kiteiden muodossa, voidaan kokonaisvesimäärä jakaa likiarvoisesti kemiallisesti sitoutuneeseen rakenteelliseen veteen ja vapaaseen veteen. Sementtipastan tilanteessa jakolinja ei ole näin yksinkertainen, sillä vaikka hydrataatiotuotteiden kemiallisesti sitoutuneen veden määrä on huomattava, sisältää lopputuloksena oleva C-S-H-geelifaasi vapaan veden ohella myös tiiviimmin sidottua vettä geelihuokosten yhteydessä, joka on



absorboituneena huokosten välikerroksissa. Lisäksi sementtipastassa oleva vapaa vesi on olennainen tekijä ionien kuljetuksessa. (Neville, 2011; Winslow & Liu, 1990.)

Vaikka sementtipastan huokosjärjestelmä on ollut tutkimuksen kohteena jo kymmeniä vuosia, ei täsmällistä kuvausta koko järjestelmälle ole pystytty kehittämään. Suurimmat ongelmat liittyvät hydrataation aikana esiintyviin erilaisiin prosesseihin, jotka liittyvät tapahtumaketjun aikana muodostuviin tai väheneviin huokosiin.

Huokosjärjestelmien kehittyminen alkaa sekoitettaessa vettä sementtiin. Silloin sementtihiukkasia kuluttavat reaktiot alkavat yhdessä kiinteiden reaktiotuotteiden muodostumisen kanssa. Näiden syntymiseen liittyy kemiallinen kutistuminen, sillä hydrataatiossa syntyvien lopputuotteiden tilavuus on pienempi kuin alkuperäisten kiintoaineiden ja veden yhteinen tilavuus. Hydrataatiossa syntyvien kiinteiden tuotteiden tilavuus on kuitenkin alkuperäisten kiintoaineiden tilavuutta suurempi, joten alkuperäinen vedellä täytetty tilavuus korvautuu kiintoaineilla hydrataation edetessä. Sitä tilaa, jota eivät kiinteät hydrataatiotuotteet ole täyttäneet, on yleensä nimitetty kapillaarihuokosten täyttämäksi tilaksi. Hydrataatiossa muodostuva pääasiallinen lopputuote, C-S-H-geeli, sisältää kuitenkin runsaasti pieniä huokosia, joita kutsutaan geelihuokosiksi. Tästä näkökulmasta tarkasteltuna järjestelmä sisältää kahdenlaisia huokosia, joista toisen määrä vähenee ja toisen lisääntyy hydrataatioprosessin edetessä. (Jennings et al., 2008; Neville, 2011.)

### 11.3.1 Huokostyyppit ja niiden jakaumat

Valmiissa betonissa olevien huokostyyppien jakaumat vaihtelevat käytetyn sementin tyyppin ja lisäaineistuksen mukaan, joten seuraavassa esitettäviä lukuarvoja on pidettävä viitteellisinä. On kuitenkin syytä vertailla ainakin suuruusluokkatasolla betonin erilaisten huokosten kokoa, jotta niiden erilaisten roolien perusteet selittyvät.

Tavallisimman kategorisoinnin mukaan sementtikivi sisältää useita erilaisia huokosia, jotka ryhminä ovat; geelihuokokset, kapillaarihuokokset, ja tiivistyshuokokset. (Hearn, Hooton, & Mills, 1994; Neville, 2011; Winslow & Liu, 1990.)

### 11.3.2 Geelihuokokset

Geelihuokokset ovat hyvin pieniä, suuruusluokaltaan noin 0,5 nanometristä 10 nanometriin olevia sementtigelikiteiden väliin jääviä vedellä täyttyneitä tiloja. Näiden huokosten pienestä koosta johtuen veden liike on hyvin hidasta, eikä niissä oleva vesi yleensä tavallisissa olosuhteissa jäädy. Geelihuokosiin sitoutunut vesi on noin 15 %

sementin painosta. Kuivumisen aikana geelihuokosissa oleva vesi ja niiden pinnalle absorboitunut vesi poistuvat yhtä aikaa, joten huokosten pintaveden ja sisällä olevan veden roolit ovat olleet pitkällisen kiistelyn aiheena. Geelihuokokset ovat merkittäviä betonin ominaisuuksien kannalta, sillä niiden osuus C-S-H:n kokonaispinta-alasta on suuri ja niiden osuus on noin 28 % sementtigelin tilavuudesta. (Iso-Mustajärvi, 2013; Neville, 2011.)

### 11.3.3 Kapillaarihuokokset

Betonia valettaessa muottiin ja työstettäessä tasaiseksi vaaditaan yleensä enemmän vettä kuin teoreettisesti olisi välttämätöntä. Tällöin ketjuuntuneiden sementtipartikkeleiden väleihin jää tyhjiä tiloja, joita geelikiteet eivät täytä. Ne täyttyvät sekoitusvedellä ja siitä nimitetään kapillaarihuokosiksi. Sementtikiven kapillaarihuokosten määrä ja koko kasvaa suurennettaessa valmistuksessa käytettävää vesi-sementtisuhdetta. Kapillaarihuokosten sisältämän veden määrä kuitenkin muuttuu koko hydratoitumisprosessin ajan, sillä huokosissa oleva vapaa vesi sitoutuu kemiallisesti hydrataatio tuotteisiin. Tämä näkyy myös edellä esitetyssä kuvassa 11.3. Huomattavaa on, että w/c-suhteen ollessa alle 0,4, kapillaarihuokosten määrä vähentyy lähelle nollaa hydrataation päättyessä. Mikäli veden ja sementin suhdetta on kasvatettu välille 0,4–0,6, ovat kapillaarihuokokset erillisiä huokosia, eikä niissä olevalla vedellä ole yhteyttä toisiin kapillaarihuokosiin. Kun w/c-suhdetta kasvatetaan yli 0,6:n alkaa kapillaarihuokosten tilavuus kasvaa niin että ne ketjuuntuvat. Nämä ketjut mahdollistavat veden liikkeen betonin sisällä.

Kapillaarihuokosten koon ylittäessä 50 nanometrin rajan, niiden voidaan ajatella käyttäytyvän suurempiin tyhjiin tiloihin sitoutuneen vapaan veden tavoin. Ilman suhteellisen kosteuden laskiessa alle 100 % arvon, suurissa huokosissa ollut vesi haihtuu, ilman että betonin rakenne tai huokokset supistuvat merkittävästi.

Pienemmissä kapillaarihuokosessa, joiden halkaisija on alle 50 nanometriä, kapillaarivoimat pitävät vettä huokosten sisällä ja siksi niiden kuivuminen alkaa vasta suhteellisen kosteuden laskiessa alemmas. Kapillaarihuokosten pienentyessä vaaditaan aina matalampi suhteellisen kosteuden arvo huokosten kuivumiseen, jolloin esimerkiksi 5 nanometrin huokosten kuivumiseen vaaditaan suhteellisen kosteuden laskeminen 60 %:iin. Tässä tapauksessa havaitaan usein jo rakenteen kutistumista.

Koska kapillaarihuokokset ovat kooltaan erilaisia, ne käyttäytyvät veden kuljetuksessa eri tavoin. Jos vesi/sementtisuhte on betonin valmistuksessa ollut yli 0,4, jää lopulliseen betoniin kapillaarihuokosia, ja mahdollisesti myös kapillaarikäytäviä.

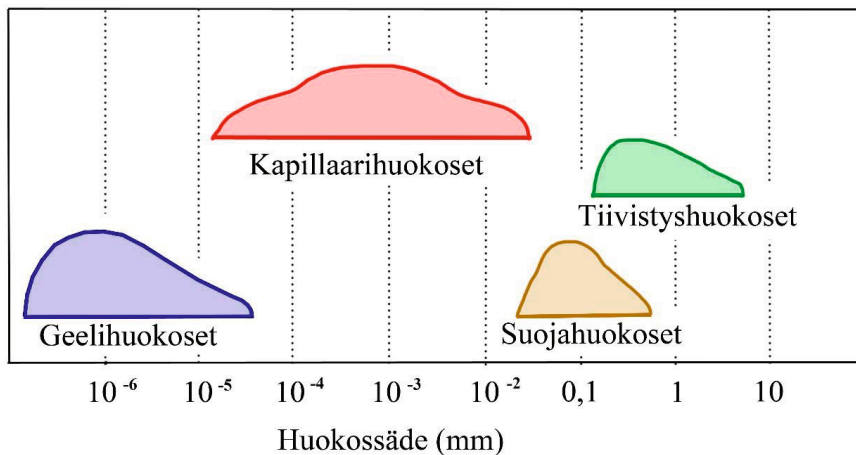
Yhdistyneiden kapillaarihuokosten voidaan ajatella olevan tilastollisesti jakautuneita pallomaisia tiloja, jotka yhdistyvät toisiinsa kapeilla käytävillä. Pienimmät kapillaarihuokosista täyttyvät vedellä ja tietyn suhteellisen kosteustason määräävää halkaisijaa suuremmat huokokset ovat ainakin suurimmalta osaltaan ilmalla täyttyneitä. Vedellä täyttyneillä huokosilla on merkittävä rooli kosteuden siirtymisessä betonin sisällä, sillä niissä kosteus siirtyy pääsääntöisesti kapillaarivoimien välityksellä, kun taas ilmalla täyttyneissä tiloissa kosteuden siirtyminen perustuu diffuusioon. Teoreettisesti pienemmällä huokosilla on niiden koosta johtuen suurempi kapillaarinen vaikutus kuin suuremmilla huokosilla, joskin huokosten koon pienentyessä nesteeseen kapillaarinen kuljetus hidastuu. (Hearn et al., 1994; Neville, 2011; Winslow & Liu, 1990.)

Diffuusio perustuu kaasujen paine-eroihin, jotka liittyvät kaasujen pitoisuuksiin. Kaasujen virtauksen suunta on suuremmista pitoisuuksista kohti pienempiä, joissa pitoisuuksien ohella myös kaasujen osapaineet ovat matalampia. Diffuusio kuljettaa kaasuja erityisesti ilmalla, tai ainakin osittain ilmalla täyttyneiden huokosten avulla, sillä diffuusion nopeus on ilmassa paljon nopeampaa kuin nesteellä täytetyissä huokosissa.

Kapillaarinen veden tai muun nesteeseen siirtyminen perustuu kapillaariseen imuun, jossa kapillaarinen alipaine aiheuttaa nesteeseen siirtymisen. Siirtymisen nopeuteen vaikuttaa nesteeseen viskositeetti, pintajännitys, nesteeseen tiheys, huokosten koko ja nesteeseen ja huokosten seinämän kosketuskulma. (Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., 2013.)

Kapillaarihuokosten rooli on hyvin suuri betonin lujituksen määrätymisessä, ja käytettäessä matalaa w/c-suhdetta tuloksena on vähemmän kapillaarihuokosia ja niin ollen tiiviimpää betonia. Kapillaarihuokokset ovat myös vastuussa suurimmalta osalta veden liikkeistä betonin sisällä, ja veden mukana voi kapillaarihuokosten synnyttämässä ketjuissa kulkea myös haitallisia aineita, kuten klorideja ja erilaisia suoloja.

Eri huokostyyppien halkaisijoiden raja-arvojen vaihtelut ovat suuria, ja siksi hiukastyyppien koot ovat osin päällekkäisiä niin kuin kuvasta 11.4 voidaan havaita. (Johansson, 2020.)



**Kuva 11.4** Betonin huokosrakenteen kokojakauma karkeasti. (Johansson, 2020)

### 11.3.4 Suojahuokokset

Suojahuokosten tehtävä on nimensä mukaan suojata rakennetta pakkasen aiheuttamilta vaurioilta. Suojahuokokset muodostetaan betonin valmistuksen yhteydessä lisättävällä lisäaineella, joka muodostaa betonimassaan halkaisijaltaan noin 0,02–0,8 millimetrin ilmatäytteisiä tiloja. Ne ovat hieman kapillaarihuokosia suurempia, sillä tarkoituksena on estää veden imeytyminen niihin kapillaarivoimien vuoksi. Suojahuokosten pysyessä kuivina, pakkasen aiheuttama tilavuuden kasvu kapillaarihuokosten veden jäätyessä ei riko rakenteita, vaan puristaa suojahuokosissa olevaa ilmaa kokoon samalla kun veden paineen nousu pakottaa veden virtaamaan kapillaarihuokosista suojahuokosiin. Suojahuokosten määrä lopullisessa betonissa on noin 2–8 % kokonaistilavuudesta. (Johansson, 2020.)

### 11.3.5 Tiivistyshuokokset

Tiivistyshuokokset syntyvät betonin valun aikana koko betonimassan alueelle, ja niitä voi helposti havaita muottipinnan ja tuoreen betonin rajapinnassa, johon tärytyksen aikana kerääntyy ilmaa ja vettä. Näidenkin huokosten kokojakauma on laaja, noin 0,2–8 millimetriä. (Iso-Mustajärvi, 2013.)

## 11.4 Vesi betonissa

Jos tarkastellaan betonin sisältämää vettä, on todettava, että edellä kuvattu kapillaarihuokosissa oleva vesi edustaa merkittävää vesimäärää. Vettä voi myös olla muualakin, joista seuraavassa on esitetty lyhyt yhteenveto. (Iso-Mustajärvi, 2013.)

### 11.4.1 Absorboitunut vesi

Betonirakenteen kuivaessa ensimmäiseksi haihtuu edellä kuvatulla mekanismilla kapillaarihuokosissa oleva vesi. Sen jälkeen kuitenkin vettä voi olla absorboituneena huokosten sisäpintaan hyvin ohuena kerroksena. Tämän veden poistuminen edellyttää suhteellisen kosteuden laskemista noin 30 %:iin. Tämä veden muoto on tiukasti sidottu, eikä se osallistu merkittävästi kosteuden siirtoon betonin sisällä. Tämän vesityypin poistuminen aiheuttaa kutistumista samoin kuin kapillaariveden poistumisenkin. (Iso-Mustajärvi, 2013.)

### 11.4.2 Kerrosten välissä oleva vesi

Hydrataation lopputuotteena olevan kerroksellisen C-S-H-geelin väleissä on jonkin verran vettä, joka poistuu, jos suhteellisen kosteuden taso laskee 11 %:iin. Tämä vesi ei vaikuta raudoituksen ruostumiseen, ja geelissä olevat hiukkaset sekä niissä olevat vesimäärät ovat niin pieniä, että veden siirtymisessä näillä ei ole vaikutusta.

### 11.4.3 Kemiallisesti sitoutunut vesi

Hydrataation yhteydessä osa vedestä sitoutuu kemiallisesti hydrataatiotuotteisiin, eli muodostuu osaksi C-S-H-geeliä, eikä sitä voi poistaa kuivaamalla betonia. Sen poistamiseksi betonia on kuumennettava yli 1000 °C-lämpötilaan. Tämäkään vesi ei osallistu kosteuden siirtymiseen betonissa (Iso-Mustajärvi, 2013.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että valmiissa betonissa olevan, eri tavoin sitoutuneen, veden määrä on haasteellinen arvioitava. Betonin kosteus kuitenkin on hyvin ratkaisevassa roolissa seinärakenteen RF-vaimennuksen määräytymisessä, joka on esitetty luvun 17 betoninäytteiden mittaustuloksia käsittelevässä osassa.

## 11.5 Betonin valmistuksessa käytettävät lisäaineet

Betonin valmistuksessa käytetään hyvin laajasti erilaisia lisäaineita, joista seuraavassa esitellään muutamia eniten käytettyjä. Tällä kappaleella on tarkoitus osoittaa, että vaikka betonin yhtenä raaka-aineena olevassa sementissä käytetään omia lisäaineita, on betonin valun yhteydessä käytössä erilaisia, lähinnä kemiallisia lisäaineita, joilla on useimmiten tarkoitus vaikuttaa valun suorittamiseen ja betonin sitoutumisen edistymiseen. (Neville, 2011.)

### 11.5.1 Notkistimet

Notkistimilla pyritään muuttamaan valuvaiheessa olevaa betonia juoksevammaksi, jolloin sen työstäminen on helpompaa. Notkistimien toiminta perustuu sementin ja veden rajapintaan muodostuvaan ohueen kalvoon, joka pitää sementtihiukkaset erillään.

Lähes kaikissa rakennustuotannon elementtivaluissa käytetään polykarboksylaatteihin perustuvia notkistimia, joilla voidaan tehokkaasti vähentää veden määrää. Notkistimien toimintaan kuitenkin vaikuttaa itse notkistinaineen määrän lisäksi myös sementin laatu, seosaineet, hienoainesmäärä ja lämpötila. Notkistinaineet ovat ennen olleet puunjalostusteollisuudesta saatavia lignosulfonaatteja, mutta niiden käyttö notkistimina on vähentynyt. Yleisesti notkistimia annostellaan noin 1 % sementin määrästä, jolloin niiden käytöllä on mahdollista vähentää tarvittavaa veden määrää noin 10 %:lla. (Neville, 2011; Sihvonen, 2010.)

### 11.5.2 Huokostimet

Huokostimilla pyritään luomaan jo edellä kappaleessa 11.3.4 kuvattuja suojahuokosia, jotka suojaavat betonia jäätymiseltä. Huokostimien käyttöön ja tehoon vaikuttavat hienon kiviaineksen laadun ohella seosaineet ja muut lisäaineet. Huokostimet vähentävät jonkin verran myös käytettävän veden tarvetta, mutta huokostimilla muodostettava ilma laskee betonin puristuslujuutta.

### 11.5.3 Kiihdyttimet

Kiihdyttimillä nopeutetaan hydrataation alkamista. Aikaisemmin kiihdyttimet pohjautuivat kalsiumkloridin käyttöön. Se aiheutti kuitenkin merkittävän riskin betonin raudoituksen ruostumiselle, jonka vuoksi kloridien käyttö on käytännössä loppunut. Markkinoille on tullut uudemman sukupolven kloridittomia kiihdyttimiä, mutta niiden käyttöä rajoittaa tuotteiden korkea hinta. Yleisesti voidaan todeta, että kiihdyttimiä käytetään harvoin, sillä saman asian voi toteuttaa käyttämällä nopeammin kovettuvia sementtilaatuja ja lämmittämällä betonia. (Neville, 2011.)

### 11.5.4 Hidastimet

Hidastimet perustuvat sokereihin ja niitä käyttämällä pyritään tavallisesti välttämään suurissa valuissa valusaumojen syntyminen. Hidastimia tarvitaan myös kohteissa, joihin betonia on kuljetettava pitkiä matkoja. Hidastimet hidastavat hydrataation alkamista, mutta hydrataation alettua niiden vaikutus lakkaa. (Neville, 2011; Tikkanen, 2016.)

## 11.6 Yhteenveto

Edellä esitetty betonin hydrataation kuvaus ja siihen liittyvä kemia ei sinällään ole tämän kirjan ydinsisältöä, mutta betonin huokosrakenteen syntyminen pääperiaatteiden tunteminen auttaa myöhemmin esitettävien tulosten analysointia. Kappaleessa 17 esitettävien tulosten valossa betonin kosteus näyttää olevan merkittävässä roolissa ulkoseinien kokonaisvaimennusta arvioitaessa, erityisesti uusien matkaviestinverkkojen käyttämällä korkeammilla taajuuksilla. Kosteuden vaikutusta arvioitaessa betonin huokosrakenteen tunteminen auttaa arvioimaan niitä olosuhteita, joissa ulkoseinäelementin kastuminen muuttaa rakenteen aiheuttamaa RF-vaimennusta. Samoin kosteuden siirtymisen pääperiaatteiden ymmärtäminen auttaa arvioimaan miten pitkään sateen mahdollisesti kastelema betoni pysyy kosteana, ja samalla arviomaan miten pitkiä ajanjaksoja matkaviestinverkkojen signaalien vaimennus pysyy kuivan betonin vastaavaa arvoa merkittävästi korkeammalla tasolla.





OSA 3  
RADIO SIGNAALIT JA NIIDEN MITTAUSMENETELMÄT



## 12 MATKAPUHELINVERKKOJEN TAAJUUDET SUOMESSA

Koska tämän kirjan aiheena on tutkia erilaisten matkapuhelinverkkojen signaalien vaimentumista erityisesti kaupunkiympäristöjen asuinkerrostalojen ulkokuoren rakenteissa ja materiaaleissa, on tarpeen luoda lyhyt katsaus matkapuhelinverkkojen käyttämiin taajuuksiin. Taajuudet ovat keskeisessä asemassa vaimennuksien arvioinnissa, sillä lähes kaikkien rakennusmateriaalien RF-vaimennus on hyvin taajuusriippuvaa. Yleisenä arviona voidaan pitää vaimennuksen nousemista taajuuden kasvaessa. Tämä riippuvuus ei kuitenkaan aina pidä paikkaansa, ja osalla materiaaleista riippuvuus voi olla hyvinkin taajuusselektiivistä, eli koko taajuusaluetta tarkasteltaessa taajuusvasteessa voi olla hyvin vaimentavia alueita, joiden keskellä on pienemmän vaimennuksen taajuuskaistoja.

Tässä luvussa tarkastelun keskiössä ovat taajuuksien lisäksi myös eri aikoina käyttöön tulleet matkapuhelinverkkojen teknologiat, jolloin on mahdollista arvioida verkkokotekniikoiden herkkyyttä mahdollisten materiaali muutosten aiheuttamalle vaimennuksen muutokselle. Luvun lopussa luodaan silmäys uusiin IoT:n (Internet of Things) ja 5G (5 Generation) -verkkotekniikoiden mukanaan tuomiin uusiin taajuusalueisiin.

Osassa eri tekniikoita käsittelevissä kappaleissa on kuvattu myös taajuuksia hallinnoivien ja koordinoivien kansainvälisten toimijoiden päätöksiä ja asiakirjoja. Tämän tarkoituksena on luoda lukijalle kuva muuttuvasta maailmasta ja yksittäisten taajuusalueiden muuttuvasta käytöstä. Tämän ajallisen riippuvuuden arvioiminen on rakennusmateriaalien ja rakenteiden kannalta välttämätöntä, sillä ulkoseinämateriaalien oletetaan pysyvän ennallaan lähes koko rakennuksen elinkaaren ajan, jonka arvioidaan olevan minimissäänkin 30–50 vuoden suuruusluokkaa. Mikäli rakennustuotetoteollisuus tai yksittäinen kuluttaja arvioi tietyn rakennusmateriaalin tai rakenteen vaikutusta talon sisällä olevaan matkapuhelinverkon signaalitasoon, tuleekin ensimmäiseksi kysyä mitä verkkotekniikkaa tarkoitetaan ja millaista vaikutusta tavoitellaan? Ottaen huomioon rakennusten pitkän elinkaaren, on huomioitava mahdollisuus, että tulevaisuudessa vain joidenkin taajuusalueiden mahdollisesti halutaan läpäisevän rakennuksen ulkokuoren ja toisien taajuuksien edellytetään pysyvän vain sisätiloissa.

Tässä kirjassa arvioidaan matkapuhelinverkkoja ja niiden taajuuksia nykytilanteen ja lähihistorian valossa, ja aloitetaan kartoittamalla kansainvälisesti ja kansallisesti taajuuksia hallinnoivat toimijat.

Muutokset matkaviestinten teknologioissa tapahtuvat karkeasti noin 10 vuoden välein. 1G eli NMT (Nordic Mobile Telephone) tuli käyttöön 80-luvulla, 2G eli GSM (Global System for Mobile Communication) -verkkojen vuoro oli 90-luvulla, 3G (3. Generation) eli UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) esiteltiin ja kaupallistettiin 2000-luvulla ja 4G (4. Generation) eli LTE (Long Term Evolution) tarjosi datansiirtoon suurempia nopeuksia 2010-luvulla. 5G (5. Generation) on tullut 2020-luvulla ja 6G (6. Generation) -tekniikkaa suunnitellaan parhaillaan ja sen odotetaan tulevan yleiseen käyttöön 2030-luvulla. (Ericsson, 2020.)

## 12.1 Taajuuksia EU:n alueella hallinnoivat organisaatiot

Taajuuksien maailmanlaajuisista kartoitusta tekee vuonna 1865 perustettu ITU (International Telecommunication Union), joka myös kehittää standardeja, joilla verkot voidaan saumattomasti kytkeä toisiinsa. Euroopan alueella samoja tehtäviä hallinnoi eurooppalaisen posti- ja telehallintojen välinen konferenssi (CEPT, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) ja sille on alisteinen vuonna 2001 perustettu sähköisen viestinnän komitea (ECC, Electronic Communications Committee). ECC on yksi CEPT:in lukuisista komiteoista, ja se yhdistää CEPT:n radioviestintäalojen ja televiestinnän alojen viranomaisia. (Weber, 2015.)

Arvioitaessa kansainvälisen taajuuksien suunnittelua ja harmonisointia suorittavien tahojen, esim. CEPT:n ja ECC:n dokumentteja, tulee huomioda, että niissä terministö on hieman erilaista verrattuna Suomessa yleisesti käytettäviin nimityksiin. Esimerkiksi ECC:n raporteissa käytetään nimityksiä IMT-järjestelmät (International Mobile Telecommunications). IMT-termi sisältää IMT-2000 järjestelmät, joihin kuuluu 3G tai UMTS, IMT-2010, johon kuuluu LTE-määrittely, IMT-Advanced, joka sisältää LTE:n Advanced-järjestelmän kuvauksen, vaikka LTE-Advanced määrittelyn onkin tehnyt 3GPP (3rd Generation Partnership Project) nimellä Release 10 keuhakuussa 2011. Lisää toiminnallisuutta tuotiin versioissa Release 11 ja 12. (Marques da Silva & Monteiro, 2014; Nakamura, 2009.) ITU:n termi IMT-2020 vastaa sisällöltään 5G-tekniikkaa, jonka standardointi ei vielä ole saanut lopullista muotoaan. (Andreev, 2017.)

3GPP on puolestaan organisaatio, joka huolehtii radiojärjestelmien tekniikkaan liittyvistä standardoinneista, mutta ei yleensä puutu varsinaisten taajuuksien hallinnoimiseen.

## 12.2 Suomessa taajuuksia hallinnoiva viranomainen

Tätä kirjoitettaessa taajuuksien hallinnointia kansallisesti käsittelee laki sähköisen viestinnän palveluista (917/2014), jonka pykälissä 95, 96 ja 97 vahvistetaan valtioneuvoston asetuksella yleiset periaatteet taajuuksien käytölle toimiluvanvaraisessa tele-, televisio- ja radiotoiminnassa.

Lakia ollaan kuitenkin tarkistamassa, ja sen kirjoittamisen tueksi valitun seurantar ryhmän toimikausi jatkui vuoden 2020 loppuun asti. Lakiluonnoksessa ehdotetaan muutamia tarkennuksia esimerkiksi liittymäsopimusten enimmäispituuteen mutta mielenkiintoisin kohta tämän kirjan näkökulmasta on jokaiseen vakinaiseen asuntoon tarjottavan yleispalvelulaajakaistan vähimmäisnopeuden nostaminen nykyisestä 2 Mbit/s:sta 5 Mbit/s:iin. (LVM, 2019.)

Suomessa matkapuhelinverkkojen sääntelijänä ja strategisena ohjaajana toimii viestintävirasto Traficom, joka myöntää luvat verkkojen ylläpidolle ja niissä käytettäville taajuuksille. Traficom perustettiin 1.1.2019 liikenteen turvallisuusviraston, Traficomin, Viestintäviraston ja Liikenneviraston toimintojen yhdistyessä. Traficomien yksi päätavoite onkin edistää yhteiskunnan palvelujen kehitystä tarjoamalla uusia taajuuskaistoja digitaalisille viestintäpalveluille. Traficom toimii kansallisesti myös rekisteri- ja valvontaviranomaisena. (Traficom, 2018.)

## 12.3 Taajuusalueet muuttuvat

Tarkasteltaessa matkapuhelinten ja matkapuhelinverkkojen yleistä historiaa 1970-luvulta 2020-luvulle, voidaan todeta taajuuksien nousseen pienin portain lähes poikkeuksetta koko ajan. Matkapuhelinverkkojen ensimmäiset taajuudet olivat 150 MHz:n ympäristössä, joista noustiin ensimmäisen sukupolven verkkojen käyttämiin 450 MHz taajuusalueisiin. Seuraava askel olikin jo GSM-teknologia, jossa taajuudet olivat 900 MHz ympäristössä ja 3G-verkoille varattiin jo 1800 MHz:n ja 2100 MHz:n taajuusalueita. Sama kehitys jatkuu edelleen, joskin askeleet taajuusakselilla ovat huomattavasti pidentyneet. Tarkemmin edellä mainituista verkoista ja niiden taajuuksista on kerrottu myöhemmin tässä kappaleessa. Taajuudet kasvavat aina uusien

teknologiasukupolvien myötä lisääntyneiden tiedonsiirron nopeusvaatimusten ja niiden vaatimien, suurempien kaistanleveyksien vuoksi. Kaistaleveyksien kasvaessa niille ei enää löydy vapaita taajuuksia etenkin perinteisillä, alle 2 GHz taajuusalueilla.

On kuitenkin huomattava, että kehitys ei ole kulkenut suoraviivaisesti kohti korkeampia taajuuksia, vaan aikaisemmin muissa käytöissä olleita taajuuksia on vapautettu uuteen käyttöön. Tästä näkyvimpänä esimerkkinä ovat vanhojen analogisen TV-lähetysten siirtoon käytetyt taajuudet, jotka myöhemmin huutokaupattiin operaattoreille käytettäväksi 4G-verkkojen lisäkaistana. (Taajuustalkoot, 2017.) Vanhat TV-lähetykset käyttivät UHF-taajuuksia välillä 470–790 MHz, ja EU:n komissio esitti vuonna 2016 taajuuksien välillä 694–790 MHz siirtämistä langattomiin yhteyksiin EU:n digitaalisten sisämarkkinoiden strategian mukaisesti. (EU komissio, 2016.)

EU:n sisämarkkinastrategia nojasi taajuusalueen harmonisoinnin kannalta asiasäällöltään ECC:n päätökseen ECC/DEC/(15)01, jossa todettiin että välittömästi marraskuussa 2015 pidetyn WRC-15-kokouksen jälkeen taajuuskaista 694–790 MHz varataan ensisijaisesti matkaviestimille. (ECC, 2015.)

Huutokauppa pidettiin Viestintäviraston järjestämässä tilaisuudessa vuoden 2016 lopussa ja siinä tarjottiin 700 MHz televisiotoiminnan taajuuksia nimenomaan 4G-verkkojen rakentamiseen vuoden 2017 alusta alkaen. (Traficom, 2020a; Valtioneuvosto, 2016.)

Tätä kirjoitettaessa kansallisesti matkapuhelinverkkojen operaattoreina toimii kolme isoa toimijaa: Elisa Oyj, Telia Finland Oyj ja DNA Oyj. Näiden lisäksi Digiset Oy:llä on lupa 450 MHz taajuusalueella toimimiseen ainakin 21.6.2025 asti. Ahvenanmaan maakunnassa verkkopalveluita tarjoaa Ålands Telekommunikation, joka ei toimi Ahvenanmaan ulkopuolella. (Traficom, 2020a.)

## 12.4 Käsivälitteiset matkapuhelinverkot

Ensimmäisinä matkapuhelinverkkoina voidaan pitää 150 MHz:n taajuusalueella toimintaa ARP (Autoradiopuhelin) -verkkoa, joka avattiin käyttäjille 1971 ja sitä laajennettiin vuosien ajan. Koko Suomen kattava peitto saavutettiin vuonna 1978. ARP:n käyttämät solujen koot olivat suuria, halkaisijaltaan noin 30 km alueita, joita palveli yksi solun keskelle sijoitettu tukiasema. Matalan taajuuden vuoksi signaalin vaimennus lähettimen ja vastaanottimen välillä pysyi pienenä, joten ajoneuvoaseman lähetystehona riitti 1–5 W tehoalue. Haasteena puheluiden muodostamisessa oli se, että käyttäjän tuli tietää oma ja kulloinkin lähinnä olevan tukiaseman sijainti puhelua muodostettaessa. Lisäksi oli pysyttävä samalla tukiaseman alueella koko puhelun

ajan. Tukiasemasta puhelu välittyi kyseisen alueen puhelinkeskukseen, josta se eteni yleiseen puhelinverkkoon. Järjestelmän käytön huippuvuodet sijoittuivat 1980-luvulle, jolloin uudempaa tekniikkaa edustanut NMT-verkko alkoi vallata nopeasti alaa puheluiden välittämisessä. ARP-verkkoa alettiin ajaa alas 1990-luvulla ja sen ylläpito lopetettiin vuonna 2003. (TKK Tietoverkkolaboratorio, 2007.)

## 12.5 Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkot

Automaattisten matkapuhelinverkkojen kehityksen katsotaan alkaneen ensimmäistä sukupolvea edustaneesta yhteispohjoismaisista NMT-verkoista. NMT-verkot toimivat nimensä mukaisesti pohjoismaissa, ja taajuusalueena ensimmäisessä vaiheessa järjestelmällä oli 450 MHz alue. (Laine-Lassila, 2018.) Verkot otettiin käyttöön muissa pohjoismaissa 1981 ja Suomen alueella 1982. NMT:n etuina olivat halvempien hintojen ja laajan peiton ohella mahdollisuus soittaa automaattisesti läntisiin naapurimaihin.

NMT-verkko oli ARP:n tapaan solukoverkko, mutta solujen kokoa oli mahdollista muuttaa kuormitustilanteen mukaan. Näin solujen koko vaihteli halkaisijaltaan 2–30 kilometrin välillä. Verkon käyttö laajeni nopeasti puhelinten hintojen laskiessa ja käytettävyyden parantuessa. 450 MHz taajuusalue täyttyi nopeasti ja siksi NMT-450:n rinnalle otettiin käyttöön NMT-900, joka hyödynsi tuolloin vapaana olevaa 900 MHz taajuusalueita.

NMT-verkoilla oli jo mahdollisuus siirtää dataa, joskin nopeudet olivat vaatimatonta 1200 tai 2400 bittiä sekunnissa. Vaikka NMT-900 verkko otettiin käyttöön NMT-450 verkon jälkeen, sen ylläpito lopetettiin vuoden 2000 lopussa. Sen sijaan NMT-450 jatkoi vielä sen jälkeen johtuen sen tarjoamasta laajemmasta peitosta. (TKK Tietoverkkolaboratorio, 2007.)

NMT-järjestelmän ohella muualla maailmassa kehitettiin omia järjestelmiä, joista tärkeimmät olivat TACS (Total Access Communication System) ja ETACS (European Total Access Communication System). Näissä järjestelmissä sekä teknologia että signaalit perustuivat analogiseen tekniikkaan. (Viz, 2010.)

## 12.6 Toisen sukupolven matkapuhelinverkot

GSM on nykyisin vanhin laajemmassa käytössä oleva kaupallinen matkapuhelinverkkojen teknologia, ja se perustuu taajuuksien näkökulmasta alueellisten puhelinlaitos-

ten yhdessä vuonna 1990 muodostaman Radiolinja Oy:n saamaan toimilupaan. Tällä hetkellä GSM-verkot hyödyntävät sekä 900 MHz että 1800 MHz taajuusalueita. (Laine-Lassila, 2018.)

GSM-järjestelmä Suomessa vihittiin käyttöön kuuluisalla pääministeri Harri Holkerin puhelulla 1.7.1991, jossa puheyhteys muodostettiin Helsingistä Tampereelle, silloiselle apulaiskaupunginjohtajalle Kaarina Suoniolle. (Laine-Lassila, 2018.)

Kaupalliseen käyttöön GSM-verkko tuli vuonna 1992. GSM-verkko on laajentunut alueellisesti merkittävästi laajemmalle verrattuna edeltäjiinsä ja myöhemminkin käyttöön otettuihin verkkoteknologioihin.

GSM järjestelmä nojautuu tukiaseman kannalta katsottuna 890–915 MHz vastaanotto- ja 935–960 MHz lähetykskaistoihin. Kantoaaltojen leveys on 200 kHz, joten taajuusalue jakautuu 124 erillisen kantoaallon käyttöön. Vastaanotto- ja lähetykskaistat ovat 45 MHz etäisyydellä toisistaan. (Jang, 2010.)

Näiden taajuuksien käytöstä GSM-verkkojen langattomalle liikenteelle oli sovittu jo vuonna 1994, ERC:n (European Radiocommunications Committee) antamassa päätöksessä ERC/DEC(94)01, (ECC, 1994) ja alueen käytölle on tullut lisäyksiä ja tarkennuksia myöhemmin ERC/DEC(97)02. (ECC, 1997) Jo varhaisessa vaiheessa, vuonna 1995, ERC otti GSM:n rinnalle 1800 MHz alueella toimivan järjestelmän DCS-1800 (Digital Cellular System 1800) päätöksellä ERC/DEC(95)03. (CEPT, 1995.)

GSM-standardin alle luettava DCS-1800 on järjestelmä, jossa vastaanottokaista sijoittuu välille 1710–1785 MHz ja lähetykskaista puolestaan taajuusalueelle 1805–1880 MHz. Siinäkin kaistan leveys on 200 kHz, mutta nyt taajuusalueelle mahtuu 373 kantoaaltoa. Lähetyks- ja vastaanottokanavien väli on DCS1800-teknologiassa 95 MHz. (Jang, 2010.)

GSM-järjestelmästä tuli käyttäjien keskuudessa heti sen kaupallistamisen jälkeen hyvin suosittu, ja se ruuhkautui melko nopeasti. Juuri ensimmäisen, vain 900 MHz alueella toimineen verkon ruuhkaisuuden vuoksi kehitettiin 1800 MHz taajuudella toimiva lisäverkko, jota kutsuttiin ”city-verkoksi” sillä se rakennettiin ensimmäisessä vaiheessa palvelemaan kaupunkien keskustojen kasvaneita tilaajamääriä. Suurempi taajuus kuitenkin pienensi solun kokoa, mutta toisaalta kantoaaltojen kasvanut määrä kompensoi tilannetta. (MTV uutiset, 1997.)

GSM järjestelmissä alkoivat digitaalisuuden edut olla näkyvissä, vaikka järjestelmä olikin suunniteltu ensisijaisesti puheen siirtoon. Datan siirtoon on GSM-teknikassa varattu hyvin pieni osa, ja sen vuoksi siirtonopeudet datalle ovatkin vain noin 9,6 tai 14,4 kilobittia sekunnissa. GSM-järjestelmän datansiirto on kankea, sillä siinä käytettävä teknologia nojaa piirikytkentäisyyteen. Piirikytkentäisyys tarkoittaa kiinteän



yhteyden luomista tai luovuttamista kahden käyttäjän välille, samoin kuin vanhoissa lankapuhelimissa. Piirikytkentäisyydessä oli datansiirron kannalta käyttäjän kokemana heikkoutena yhteyden aikaan sidottu laskutus, vaikka dataa ei yhteydellä saataisi liikkumaan lainkaan. (Narang & Kasera, 2006.) GSM-verkko on edelleen toiminnassa ja sen varaan on viime aikoinakin kehitetty uusia sovelluksia.

Verkkojen tulevaisuus on noussut esiin puheenvuoroissa aika ajoin. Esimerkiksi Yhdysvalloissa maan toiseksi suurin operaattori sulki GSM-verkkonsa saadakseen lisää taajuuksia 4G:n ja myöhemmin 5G:n tarpeisiin. Sulkemispäätös osoittautui kuitenkin ongelmalliseksi, sillä samalla operaattori tuli katkaistuksi yhteydet niiltä käyttäjiltä, joilla ei vielä ollut 3G-tekniikalla tai sitä uudemmallalla tekniikalla varustettuja matkapuhelimia. (Donovan, 2017.)

GSM-verkkojen käytöstä pääasiallisena yhteysmuotona ja sosiaalisten kontaktien ensisijaisena välineenä fyysisen kontaktin jälkeen ei ole tällä hetkellä luotettavaa tilastoa, mutta suuntaa antavana voidaan pitää Suomen virallisen tilaston (SVT, 2017) taulukointia. Sen mukaan 75–89 vuotiaista vain 41 % käyttää internetiä, ja vain osa heistä käyttää sitä kodin ulkopuolella. Tilastosta voidaan päätellä, että tämän ikäryhmän ihmiset käyttävät internetiä tietokoneeltaan, eikä heillä mahdollisesti ole datansiirtoon soveltuvia mobiililaitteita. Puhelimet ikääntyneillä ihmisillä siis suurelta osin ovat vanhoja, vain GSM-käyttöön soveltuvia laitteita. (Matinaho, 2017; Tilastokeskus, 2019c.)

Tätä tulkintaa tukee myös tilastokeskuksen taulukko vuodelta 2019, jonka mukaan yhden hengen kotitalouksissa on 3G tai 4G-verkkojen puhelimia vain 64 %:lla. Kahden hengen talouksissakaan luku ei ole kuin 73 %. (Tilastokeskus, 2019b.)

Koska lähes kaikissa kotitalouksissa on kuitenkin puhelin, on oletettavaa, että iäkkäimmillä henkilöillä kysymyksessä on juuri GSM-tyyppinen matkapuhelin. Omassa käytössä on 65–74-vuotiaista 3G tai 4G-verkkoon kytkeytyvä älypuhelin 63 %:lla ja yli 75-vuotiailla luku putoaa jo 29 %:iin. (Tilastokeskus, 2019a.)

Yhteenvetona voidaankin todeta, että erityisesti ikääntyneiden ihmisten matkapuhelinten käytön kannalta GSM-verkko on ratkaisevan tärkeä, ja sen peitto on hyvin laaja, lähes koko maan kattava. GSM-verkon varaan on myös rakennettu laajoja palveluja, joiden mahdolliset häiriöt näkyvät laajasti. Taajuuksien kannalta GSM-verkonkin käyttämä alle 1000 MHz alue on nousemassa yhä tärkeämmäksi, sillä uudet IoT-järjestelmät perustuvat osin tällä alueella tapahtumaan tiedonsiirtoon. (Haltian, 2019.)

## 12.7 Matkapuhelinverkkojen 2,5. sukupolvi

Toisen sukupolven verkkoteknologioita seurasi 2.5G, joka oli GPRS (General Packet Radio Service). GPRS-järjestelmä kehitettiin paikkaamaan GSM-järjestelmän varsin puutteellisia datansiirron ominaisuuksia, ja se otettiin käyttöön jo vuonna 2000. Sukupolvinimitys 2.5G on epävirallinen, ja lähinnä se onkin kuvannut enemmän tai vähemmän joustavaa siirtymistä kohti paremman datansiirron tarjoamaa 3G-tekniikkaa. GPRS-tekniikan ohessa suunniteltiin vielä edistyneempi datansiirtokonsepti, EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), jolla datansiirtonopeus nousi 384 kbps:iin, kun se GPRS:llä rajoittui noin 171 kbps:iin.

GSM-verkkojen toiminta näyttää jatkuvan ainakin toistaiseksi, sillä esimerkiksi etäluettavat sähkömittarit käyttävät GSM-pohjaisia GPRS-yhteyksiä. Toinen syy on vanheneva väestö, joka ei koe tarvitsevänsä muita kuin puheyhteyksiä. Esimerkiksi Elisa Oyj:n Timo Hietalahti totesi lehtihaastattelussa 2016 että ”Vanhoja gsm-puhelimia käyttävien asiakkaiden määrä on yllättävän iso. 2G-verkkoa käytetään käytännössä vain puheeseen. Datakäytön osuus siinä on häviävän pieni”. (Haltian, 2019; Honkanen, J., 2016.)

## 12.8 Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot

3G tunnetaan myös nimellä UMTS (Universal Mobile Telecommunications/Terrestrial System), jossa datan nopeus on 384 kilobittä sekunnissa, kun se oli GPRS:ssä 56–64 kilobittä sekunnissa ja EDGE:ssä 170 kilobittä sekunnissa (Laine-Lassila, 2018).

Datan siirtonopeuden huomattava kasvu edellisen sukupolven verkkoihin verrattuna selittyy erilaisella tekniikalla, vaikka UMTS-verkot ovat vielä osin piirikytkentäisiä (Ouyang & Fallah, 2010).

3G-verkkojen etu on ollut erityisesti niiden soveltuminen kohtuullisen nopeaan datansiirtoon ja samalla niiden sopiminen puheyhteyksiin. Lisäksi rakennusvaimenusten näkökulmasta UMTS-verkot käyttävät niin sanottua WCDMA-tekniikkaa (Wide Band Code-Division Multiple Accessista), jolla kaikki solun käyttäjät toimivat samalla taajuusalueella, mutta joiden signaalit erotetaan toisistaan käyttämällä erityistä hajotuskoodia. Hajotuskoodin pituus on huomattavasti yksittäistä signaalia pitempi, jolloin signaali leviää taajuustasossa paljon alkuperäistä signaalia leveämmälle alueelle. Kaistan kokonaisleveys on 5 MHz, jonka sisällä on 3,84 MHz levyisen, varsinaiseen tiedonsiirtoon käytettävän, signaalin kummallakin puolella 0,58 MHz

siirtymäkaistat. Signaalin kaistan levitessä sen teho kapealla kaistan osalla on pieni ja sen vuoksi tekniikka sietää hyvin kapeakaistaisia häiriöitä. Tekniikka sietää myös rakennusten ulkokuoren suurempia vaimennuksia, sillä signaalitaso voi olla lähellä vastaanottimien ja ympäristön omaa kohinasoa. (Wilson, K., Biglieri, & Wilson, 2016.)

3G-verkot toimivat 2 GHz taajuuksien ympäristössä, ja tämän taajuuskaistan määrittelyyn on pidetty lukuisia erilaisia kokouksia ja muotoiltu useita päätösasiakirjoja. Seuraavassa esitellään niistä lyhyt kooste.

Kolmannen sukupolven UMTS-verkkojen taajuuksia esiteltiin ensimmäiseksi ERC:n päätöksessä ERC/DEC/ (97)07, jossa päätettiin nimetä taajuusalueet 1900–1980 MHz, 2010–2025 MHz ja 2110–2170 MHz maanpäällisiä UMTS-sovelluksia varten. (ERC, 1997.) Suomalaisten UMTS-nimellä tuntemaa järjestelmää nimitetään ECC:n ja ITU:n (International Communication Union) raporteissa nimellä IMT-2000, ja sen radio-osaa nimitetään nimellä UTRA (Universal Terrestrial Radio Access). Alkuperäisessä asiakirjassa osoitettiin maanpäällisiin UMTS-järjestelmiin 155 MHz taajuuskaista ja sen lisäksi varattiin 60 MHz taajuuskaista UMTS:n satelliittipalveluihin. Euroopassa käytössä oli jo aikaisemmin määritelty 1885–1900 MHz alue DECT-järjestelmälle (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), joten sitä ei voinut ottaa UMTS:n käyttöön päätöksessä ERC/DEC/(97)07. Taajuuksia tarkasteltaessa alue vaikutti liian kapealta ja sen vuoksi Euroopan komissiolta saamansa mandaatin turvin CEPT laajensi alkuperäistä ERC/DEC/(97)07 linjausta asiakirjalla CEPT, ERC/DEC/(00)01, jossa hallintoviranomaisten velvoitettiin osoittamaan UMTS:lle ja muille IMT-2000 perheen järjestelmille 155 MHz levyinen taajuuskaista vuoden 2002 alkuun mennessä. (ECC, 2000.)

Koska UMTS-järjestelmälle odotettiin GSM:n tavoin suurta suosiota, Euroopan komissio antoi toimeksiannon määrittellä ja harmonisoida järjestelmälle lisäkaista otettavaksi käyttöön maailmanlaajuisesti vuosien 2005–2010 aikana. CEPT vastasi vaatimukseen osoittamalla 160 MHz levyisen lisätaajuusalueen, jonka tarkka määrittely perustuisi markkinoiden kehitykseen ja 3G-verkon käyttöasteeseen. Vuoden 2005 maaliskuussa ECC hyväksyi päätösasiakirjassaan ECC/DEC/(05)05 yhdenmukaisen käytön IMT-2000/UMTS-järjestelmille myös taajuusalueella 2500–2690 MHz. (ECC, 2005) Edellä kuvattujen päätösten yhdistäminen tehtiin asiakirjalla ECC/DEC/ (06)01, joka korvasi aikaisemmat 2 GHz -aluetta koskevat päätösasiakirjat. Siinä kuvattiin yhdenmukaistetut taajuuskaistat alueella 1920–1980 MHz, 2010–2025 MHz ja 2110–2170 MHz. (ECC, 2019a.)

Tällä hetkellä Traficomien taajuuslistan mukaan 1920–1800 MHz ja 2110–2169,7 MHz taajuuskaistaa käyttävät kaikki kolme operaattoria (Elisa, DNA ja Telia, matalimmasta korkeampaan taajuuteen järjestettynä) tekniikoilla UTRA, LTE ja 5G:n

New Radio (5G NR). Voimassaoloaika näille luville on 19.3.2019–31.12.2033. (Trafficom, 2020a.)

Modulaationa UMTS:n perusversio käyttää QPSK:hon perustuvaa tekniikkaa, jossa kahden bitin paketti esitetään yhdellä symbolilla. Datansiirron tarpeet kuitenkin lisääntyivät nopeasti ja perusversion rinnalle kehitettiin kummallekin siirtosuunnalle oma teknologiansa High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) ja High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA), jotka hyödynsivät tehokkaampaa QAM-modulaatiota. Tässä modulaatiossa yhdellä symbolilla kuvataan jo kuuden bitin pakettia. Jos tarkastellaan High-Speed Packet Access -teknologiaa yleisesti, erottelematta kumpaa siirtosuuntaa tarkoitetaan, käytetään nimityksenä vain HSPA:ta. UMTS-verkossa HSPA:han siirtyminen käy joustavasti, sillä jos verkko havaitsee signaali-kohinatason olevan riittävän hyvän, siirrettävän datamäärän olevan suuren ja sekä tukiaseman että päätelaitteen tukevan HSPA:ta, siirtyy yhteys automaattisesti HSPA-tilaan. Datan siirtotarpeen pienentyessä yhteys palautuu taas UMTS-tilaan. (Holma & Toskala, 2007.)

Verkon vaatimusten kasvaessa edelleen kehitettiin HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access), jonka teoreettinen tiedonsiirtonopeus oli 42,2 Mbit/s, kun se HSPA:lla jäi alalinkin suuntaan teoriassakin 14,4 Mbit/s nopeuteen. Alalinkin suunta oli 2000-luvulla selvästi tärkeämpi, sillä kuluttajat eivät yleensä ladanneet verkkoon päin suuria datamääriä. Tämä asiantila muuttui vasta 2010-luvulla, jolloin erilaisten videoiden lataus yleistyi etenkin nuorten käyttäjien kesken. Teoreettinen nopeus oli vaikuttava, joskin vaikeasti saavutettavissa käytännön tilanteissa. Suuret nopeudet edellyttivät MIMO-antennien käyttöä ja 64 QAM-modulaatiota. Korkeammat modulaatiot ovat kuitenkin herkkiä siirtotien kohinalle ja muille virheille, joten HSPA+ edellytti hyvää siirtotietä, jolla vaimennukset ovat pieniä. (Rohde & Schwarz, 2016.)

Suomessa 3G-verkoista ollaan luopumassa, Elisa Oyj ilmoitti tiedotteessaan 12.3.2020 että se aikoo ylläpitää 3G-verkkoa enää vuoden 2023 loppuun saakka. Sen jälkeen 3G-verkon taajuudet on suunniteltu ohjattavaksi 4G:n käyttöön. (Elisa Oyj, 2020.)

Samanlaisia viestejä kantautuu muualtakin, esimerkiksi Norjassa toimiva Telenor sulkee 3G-verkkonsa jo 2020, mutta GSM verkkoa pidetään yllä nykyisten suunnitelmien mukaan vuoteen 2025 asti. Tässäkin tapauksessa 3G-taajuudet siirretään 4G-verkkoon. (Kärkkäinen, 2020; Tekniikka&Talous, 2015.)

## 12.9 Neljännen sukupolven matkapuhelinverkot

Siirtyminen 3G:stä neljännen sukupolven verkkoihin ei ollut dramaattisen suuri askel, sillä ensimmäiset versiot LTE verkoista eivät täyttäneet ITU-R:n 4G-teknologioille asetettuja vaatimuksia. Tämä ei kuitenkaan estänyt niiden kutsumista markkinoinnissa 4G-verkoiksi. Tarkemmin tarkasteltuna ensimmäisiä LTE-verkkotekniikoita voitiin luonnehtia lähinnä optimoituina 3G-verkkoina. (Markkinaoikeus, 2013.)

Ensimmäisessä vaiheessa nimitystä LTE ja DC-HSPA (Dual Carrier -HSPA) käytettiin lähes synonyymeinä, ja kumpaakin nimitettiin yksinkertaisuuden vuoksi 4G-verkoiksi. Todellisuudessa DC-HSPA perustuu nimensä mukaan 3G-verkon edistyneeseen versioon HSPA:sta ja HSPA+:sta. Dual-Carrier-tekniikassa käytetään kahta erillistä kantoaaltoa, joiden tuoma etu nousee esiin varsinkin kohinaisessa tai muuten huonossa siirtotiessä. DC-tekniikkaa sovellettiin erityisesti alalinkin suuntaan, jolloin osuvampi nimitys olisikin DC-HSDPA-järjestelmä. (Electronicsnotes, 2015.)

Siirtyminen 3G:stä 4G:hen oli hieman epäselvää senkin vuoksi, että 4G:n virallinen määritelmä antoi odottaa itseään niin, että vielä 2010 ITU määritteli 4G-verkoiksi vain LTE-Advanced- ja Wimax 2.0 (Worldwide Interoperability for Microwave Access 2.0) -teknologiat. LTE-verkkojen tuli pystyä 1 Gbps nopeuteen paikallaan pysyvien päätelaitteiden tai kanavien tapauksessa ja 100 Mbps:een liikkeessä. (Kopakkala, 2012.)

Operaattorit kuitenkin vaativat määrittelyyn lievennyksiä, ja tuloksena olikin se, että ITU salli 4G-kategoriaan WiMAX-, LTE- ja UMTS:n Dual-Carrier-verkot. Aikaisempien määrittelyjen näkökulmasta nämä eivät olleet täysiverisiä 4G-verkkoja pienemmän nopeutensa vuoksi.

LTE-verkoilla on käytössään tällä hetkellä mittava määrä taajuuskaistoja. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin Suomessa käytössä olevia LTE:n käyttöön osoitettuja taajuuskaistoja, joilla 2,6 GHz:n aluetta lukuun ottamatta on voimassaoloaika vuoden 2033 loppuun asti. Huomattavaa on kuitenkin, että seuraavassa esitettävät kaistat ovat Traficomin teknologiariippumattomia kaistaan- tai taajuusalueeseen liittyviä toimituksia, jolloin operaattorit voivat tarjota ko. taajuusalueella palveluita eri teknologioilla oman harkintansa mukaan. (Traficom, 2020a.)

### 12.9.1 450 MHz:n taajuusalue LTE:lle

Matalimmat LTE verkot toimivat niin sanotulla 450 MHz:n taajuuskaistalla, jolla Digiset Oy tarjoaa manner-Suomen alueella LTE-verkon palveluja 452,425–456,925

MHz:n ja 462,425–466,925 MHz:n taajuusalueilla (tukiaseman vastaanotto- ja lähetykskaista). Matalasta taajuudesta johtuen yhden tukiaseman palvelema alue on korkeammilla taajuuksilla toimivia verkkoja hieman suurempi. Samaa taajuusaluetta käyttää Ålands telekommunikation -yhtiö Ahvenanmaan alueella myös LTE-verkoille.

### 12.9.2 700 MHz:n taajuusalue LTE:lle

Seuraava, Suomessa käytössä oleva 700 MHz:n alue, alkaa DNA Oyj:n taajuudesta 703 MHz, jatkuen Telia Finlandin 733 MHz:iin, niin että jokaisella kolmesta operaattorista on käytössään 10 MHz:n taajuuskaista. Tukiaseman vastaanottokaistat ovat välillä 758–788 MHz, samassa järjestyksessä. Tätä kirjoitettaessa 4G-verkkojen osalta 700 MHz käyttö on vähäistä, sillä kaistaa on pidetty tarkoituksella varattuna 5G:n maaseudun peittoalueen rakentamiseen.

### 12.9.3 800 MHz:n taajuusalue LTE:lle

800 MHz:n alue on laajasti käytössä ja se alkaa edellisen tapaan DNA:n kaistalla tukiaseman suuntaan taajuudesta 832 MHz ja jatkuu Telia Finlandin ja Elisan kaistoilla 862 MHz:iin asti niin, että jokaisella operaattorilla on 10 MHz kaista. Tällä taajuusalueella toimii edellisten lisäksi Ahvenanmaan alueella Telia Finland Oyj taajuuksilla 832–847 MHz rinnakkain Ålands Telekommunikation Ab:n kanssa, jolla on taajuudet 847–862 MHz.

800 MHz:n alueella tukiaseman lähetykskaistat alkavat DNA:n taajuudesta 791 MHz ja jatkuvat tukiaseman vastaanottokaistan tapaan Elisan 821 MHz:iin asti muualla kuin Ahvenanmaalla, jolla toimivat Telia Finland Oyj ja Ålands Telekommunikation Ab taajuusalueella 791–821 MHz, kummankin toimiessa 15 MHz kaistalla. (Traficom, 2020a.)

### 12.9.4 900 MHz:n taajuusalue LTE:lle

900 MHz kaistalla toimii Traficomien toimiluvan turvin useita eri verkkoteknologioita, ja luvat on myönnetty tällä alueella GSM:lle, UMTS:lle ja LTE:lle. LTE-tukiasema vastaanottaa valtakunnallisesti, pois lukien Ahvenanmaa, taajuuksilla 880,1–914,9 MHz. Operaattorit toimivat tällä alueella taajuusjärjestyksessä DNA, Telia ja Elisa. Kahden operaattorin kaistojen välissä on 0,2 MHz tyhjä kaista. Ahvenanmaan

alueella toimivat Telia Finland Oyj ja Ålands Telekommunikation Ab taajuusalueella 885,1–914,9 MHz.

900 MHz:n alueella LTE-tukiasemat lähettävät valtakunnallisesti, pois lukien Ahvenenmaa, taajuuksilla 925,1–959,9 MHz, jakautuen taajuusalueittain vastaavalla tavoin kuin vastaanottokaistoilla. Tällä alueella lähetys- ja vastaanottokaistojen väli on 45 MHz:iä. (Traficom, 2020a.)

### 12.9.5 1800 MHz:n taajuusalue LTE:lle

1800 MHz taajuusalueella toimii 900 MHz alueen tapaan, ainakin toimiluvan mahdollistamana, myös kolme erilaista matkaviestintekniikkaa, GSM, UMTS ja LTE. Tukiaseman vastaanottoon varattu taajuusalue on 1710,1–1784,9 MHz, pois lukien Ahvenanmaa, jossa vastaava kaista on 1710,1–1785 MHz. Tämä taajuusalue poikkeaa 900 MHz:n alueesta kuitenkin niin, että operaattoreiden järjestys on taajuusakselilla erilainen. Tällä alueella pienimpiä taajuuksia 1710,1–1734,9 MHz käyttää Telia Finland Oyj, jota seuraavat DNA Oyj ja Elisa Oyj.

1800 MHz:n taajuusalueella LTE-verkkojen tukiasemien lähetykseen varattu taajuusalue on 1805,1–1829,9 MHz, ja se jakautuu operaattoreiden taajuuksien osalta samaan tapaan kuin tukiasemien vastaanottokaista. Lähetyksen ja vastaanoton ero on 95 MHz:iä. (Traficom, 2020a.)

### 12.9.6 2 GHz:n taajuusalue LTE:lle

2 GHz taajuusalueella on tällä hetkellä jonkin verran 4G-verkkojen liikennettä, ja taajuudet 1920–1979 MHz käsittävä taajuusalue on muualla kuin Ahvenanmaan maakunnassa varattu 3G:lle, LTE:lle ja 5G NR:lle. Ahvenanmaan maakunnassa taajuudet tukiasemaan päin ovat 1920,3–1940,1MHz ja vastaavat taajuusalueet ovat päätelaitteeseen päin 2110,3–2130,1MHz. Muualla kuin Ahvenanmaalla tukiasemat vastaanottavat taajuuksilla 1920,3–1979,7 MHz ja lähettävät taajuuksilla 2110,1–2169,7 MHz. (Traficom, 2020a.)

### 12.9.7 2,6 GHz:n taajuusalue LTE:lle

2,6 GHz taajuusalueella on vähäisessä määrin LTE-verkkojen toimintaa ja taajuudet on Traficomien taulukossa jaettu LTE:lle ja 5G NR:lle. Taajuudet ovat Suomessa

taajuuskaistalla 2500–2570 MHz (tukiaseman vastaanotto) ja 2620–2690 MHz (päätelaitteen vastaanotto) muualla kuin Ahvenanmaan alueella. Ahvenanmaalla vastaavat alueet ovat ääripäissään samat, mutta sekä Telian että Ålands Telekommunikation Ab:n alueilla välistä puuttuu 5 MHz:n levyinen kaista. (Traficom, 2020a.)

## 12.10 Viidennen sukupolven matkapuhelinverkot

Neljännän sukupolven matkaviestinjärjestelmät ovat saavuttaneet todennäköisesti lähes lopullisen peittoalueensa 2010 luvun lopussa, ja tekniikka alkaa olla vakiintunutta niin tukiasemapuolella kuin kuluttajien päätelaitteissakin. Verkon rakentajien ja kehittäjien arki kuitenkin täyttyy seuraavan sukupolven verkkojen suunnitelmista. Tällä hetkellä uusin verkkosukupolvi onkin nimetty 5G:ksi, ja sitä markkinoidaan huomattavasti aikaisempia verkkoja suuremmilla datanopeuksilla. Koska tämän kirjan huomio keskittyy asuintalojen matkaviestiverkkojen kuuluvuuteen, on seuraavassa lyhyessä 5G-verkon yleiskuvauksessa keskitytty lähinnä tavallisten kuluttajien kotioloissa havaitsemille seuraavan verkkosukupolven tuomille muutoksille. Näille onkin kuluttajapuolella olemassa tilaus, sillä matkapuhelinverkkojen päätelaitteiden käyttö on muuttunut olennaisesti kahden viimeisen vuosikymmenen aikana. Puheluiden sijaan matkaviestimillä siirretään datamuotoisia viestejä, joissa erityisesti videoiden osuus on kasvanut nopeasti. Tämä asettaa aivan uudenlaisia haasteita verkon nopeudelle ja kuormituksen kestävyydelle.

5G-verkko lupaa huimaa parannusta datan siirtonopeuteen. Verkon luvataan pystyvän 10 Gigabitia sekunnissa yhteysnopeuksiin mobiililaajakaistalla, joten ero 4. sukupolven LTE-verkkoihin on 100-kertainen. Latenssiksi luvataan 1 millisekuntia, joten tässä suhteessa parannus LTE:n ensimmäisiin versioihin verrattuna on noin 30–50-kertainen. Nykyisin LTE-verkot ovat kehittyneempiä, ja niiden latenssit ovat 10–20 millisekunnin suuruusluokkaa. Yhteyksien määrän kaavaillaan satakertaistuvan aikaisempaan verkkoteknologiaan verrattuna. (Carugi, 2018.)

### 12.10.1 5G-verkon taajuudet 3,5 GHz:n alueella

Euroopan alueella olevat 3,5 GHz taajuudet ovat nousseet esiin ECC/DEC/(11)06 päätösasiakirjassa, jossa niiden todetaan omaavan suotuisia ominaisuuksia, kuten hyvän etenemisen ja käytettävissä olevien kaistanleveyksien yhdistelmän, ja siksi tämä taajuusalue onkin ensisijainen 5G:lle tarkoitettu taajuusalue. ECC onkin tuottanut



useita raportteja tämän taajuusalueen käyttöä koskien, esimerkiksi ECC Raportti 203, jossa tutkitaan kaistan mahdollisia rajoitteita ja ECC Raportti 254, jossa annetaan ohjeita taajuuskaistan jakamiseen. Raportissa 281 selvitetään teknisiä ohjeita 5G:n käytön sääntelyyn tällä taajuusalueella ja CEPT:n Raportti 67 valottaa teknisiä ehtoja taajuusalueen yhdenmukaistamisessa Euroopan unionin alueella. (ECC/DEC/(11)06, 2018.)

Asuintalojen sisäpeiton näkökulmasta matalat taajuudet ovat pääsääntöisesti käyttökelpoisempia kuin korkeammat, sillä matalat taajuudet vaimentuvat vähemmän läpäistessään erilaisia materiaaleja ja rakenteita. Sen vuoksi tällä hetkellä 5G-verkkojen kiinnostavin taajuusalue on niin sanottu 3,5 GHz:n alue, joka kattaa taajuusalueen 3410–3800 MHz. Sen kansallinen käyttö on päätetty langattoman laajakaistan käyttöön valtioneuvoston asetuksen (1246/2014) 9 §:n 15. huhtikuuta 2020 tehdyssä lisäyksessä. (Finlex, 2020.) Taajuusaluetta on voinut käyttää vuoden 2019 alusta lähtien. Asetuksen taustalla oli ennen mainittu taajuusalueen huutokauppa, jossa 26.9.2018 kaupattiin kolme 130 MHz:n taajuuskaistaa, kaista A (3,410–3,540) GHz, kaista B (3540–3,670) GHz ja viimeinen, kaista C (3,670–3,800) GHz, käytettäväksi yleiseen teletoimintaan vuoden 2033 loppuun asti.

Taajuuskaista A osoitettiin kaupassa Telia Finland Oyj:lle, mutta koska naapurimaista johtuen taajuusalueen käytössä on rajoitteita, lupa myönnettiin toissijaisten taajuusalueen käyttöön niin, että verkkotoimilupa oikeuttaa harjoittamaan yleistä teletoimintaa ensisijaisen taajuuskaistan A sijasta toissijaisilla taajuuskaistoilla A1 (3410–3480 MHz) ja A2 (3600–3660 MHz). (Valtioneuvoston päätös, 2018.)

Taajuuskaista B osoitettiin huutokaupassa Elisa Oyj:lle, mutta edelleen naapurimaiden taajuuksien käytön vuoksi Elisankin kaistalle annettiin lupa toissijaisten taajuuksien käyttöön seuraavasti: verkkotoimilupa oikeuttaa harjoittamaan yleistä teletoimintaa ensisijaisen taajuuskaistan B sijasta toissijaisilla taajuuskaistoilla B1 (3480–3540 MHz) ja B2 (3660–3730 MHz).

5G-verkon 3,5 MHz alueen taajuuskaistan C osti huutokaupassa DNA Oyj, jolle lupa myönnettiin edellisten tapaan toissijaisille taajuuksille seuraavalla määrittelyllä; yleistä teletoimintaa saa DNA harjoittaa ensisijaisen taajuuskaistan C sijasta toissijaisilla taajuuskaistoilla C1 (3540–3600 MHz) ja C2 (3730–3800 MHz). (Valtioneuvoston päätös, 2018.)

## 12.10.2 5G-verkon korkeammat taajuudet

Ylikansallisesti viestintäjärjestelmien taajuuksia pyrkivät yhdenmukaistamaan Eurooppaa käsittelevät CEPT sekä ECC, ja viime aikoina näiden organisaatioiden työ on suurelta osin keskittynyt 5G-verkkojen korkeampien taajuuksien koordinointiin. Tätä työtä tukemaan kutsuttiin koolle mm. WRC-19 (World Radio communication Conference 2019). 5G-verkkojen sijasta käytetään ITU-yhteisissä samasta verkko-tekniologiasta nimitystä IMT-2020. (WRC-19, 2019.)

5G-verkoille on 3,5 GHz alueen lisäksi tavoiteltu huomattavasti korkeampia taajuuksia, joista voidaan mainita WRC-19 keskittyneen seuraavien taajuuskaistojen mahdolliseen 5G-käyttöön; 24,25–27,5 GHz, 31,8–33,4 GHz, 37–40,5 GHz, 42,5–43,5 GHz, 45,5–47GHz, 47,2–50,2 GHz, 50,4–52,6 GHz, 66–76 GHz ja 81–86 GHz:n alueet. (Traficom, 2019a.)

Nykyisin käytössä olevat alle 6 GHz taajuudet eivät kykene tarjoamaan täysimääräisesti 5G:n vaatimia resursseja, sillä suureen tiedonsiirtonopeuteen kytkeytyy laaja kaistanleveys, joka voi olla useiden gigahertsien levyinen. Näin leveitä kaistoja on vapaana vain yli 24 GHz taajuuksilla. (ECC, 2020.)

Seuraavan vaiheen taajuudet, eli niin sanottu 26 GHz kaista, on jo hyvin valmisteltu 5G-käyttöönottoa varten. Siitä on ECC:n päätös (ECC/DEC/(18)06), joka esittelee yhdenmukaistetut ehdot 5G-verkkojen tuomiseksi tälle taajuusalueelle. (ECC/DEC/ (18)06, 2018) Vaikeuksia aiheuttaa erityisesti rinnakkain toimiminen EESS/SRS (Earth exploration-satellite service / space research service) maa-asemien kanssa, josta ECC julkaisi suosituksen maaliskuussa 2019 (ECC Recommendation (19)01). Nämä maa-asemat palvelevat esimerkiksi satelliittien etsintään liittyviä toimia ja avaruustutkimukseen liittyvää signaalointia avaruudessa oleviin esineisiin. (ECC, 2019b.)

Edellä mainitun 26 GHz:n kaistan jälkeen seuraava todennäköinen kaista on 40,5–43,5 GHz taajuusalue, jota kaavallaan niin kutsutuksi ”virityskaistaratkaisuksi”, jossa mahdollisesti toimittaisiin yhteistoiminnassa viereisen, 37,5–40,5 GHz, kaistan kanssa. Tämä edistäisi taajuusalueen maailmanlaajuisesta yhtenäistämistä. (ECC Newsletter, 2018.)

66–71 GHz:n taajuusalue varattiin maailmanlaajuisesti IMT-käyttöön WRC-19 kokouksessa. Todennäköisesti tälle kaistalle tulee luvasta vapaita taajuuskäyttäjää ainakin Euroopan alueella. (Traficom, 2019a.)

Asuintalojen kannalta 5G-verkon ylemmät taajuudet ovat hyvin ongelmallisia, sillä niiden ei voida olettaa läpäisevän rakennusten ulkokuorien yleisimpiä materiaaleja kohtuullisiksi katsottavilla vaimennuksella. Toisaalta ulkokuoren melko pienetkin

aukot tarjoavat jo kulkutien signaaleille, joiden aallonpituudet ovat millimetrien suuruusluokkaa. Osin korkeampien taajuuksien suuren vaimennuksen vuoksi WRC-19 päätöslauseelmassa osoitettiin kiinnostusta jälleen alle 15 GHz alueen taajuuksien tutkimiselle IMT:n käyttöön. Euroopan alueen osalta tutkimuksissa keskitytään ilmeisesti vain 6,425–7,125 GHz:n alueeseen. (Traficom, 2019a.)

## 12.11 Internet-of-Things-verkkojen taajuudet

5G-verkkojen laajentumisen mukana tulee markkinoille yhä uudempia, lähinnä koneiden ja laitteiden itsensä väliseen yhteydenpitoon liittyviä tekniikoita, jotka hyödyntävät lisensoimattomia ISM-taajuuksia (Industrial, Scientific and Medical) tai käyttävät matkapuhelinverkkoja. Seuraavassa luodaan lyhyt katsaus tällä hetkellä esillä oleviin IoT-verkkoihin. Katsaus on tarpeen siksi, että sen jälkeen on helpompi muodostaa käsitys siitä kokonaisuudesta, jolla erilaiset kodeissakin yleistyvät järjestelmät keskustelevat keskenään.

### 12.11.1 IoT-verkkojen lisensoimattomat taajuudet

Lisensoimattomia taajuuksia ovat niin sanotut ISM-taajuusalueen taajuudet (ITU-R:n mukaan) (Mazar, 2014), joiden käyttöön ei vaadita erillistä lupaa. Listasta on muutamia poikkeuksia, mutta pääsääntöisesti alla oleva taulukko 11.1 edustaa globaalia tilannetta.

<b>Taulukko 12.1</b> Lisensoimattomat ISM-taajuudet. (Mazar, 2014)	
<b>ISM-taajuusalue</b>	<b>Keskitaajuus</b>
6,765–6,795 MHz	6,780 MHz
13,553–13,567 MHz	13,56 MHz
26,957–27,283 MHz	27,120 MHz
40,66–40,70 MHz	40,68 MHz
433,05–434,79 MHz	433,92 MHz
902–928 MHz	915 MHz
2400–2500 MHz	2450 MHz
5725–5875 MHz	5800 MHz
24–24,5 GHz	24,125 GHz
61–61,5 GHz	61,25 GHz
122–123 GHz	122,5 GHz
244–246 GHz	245 GHz

ISM-taajuudet on tarjottu tieteen, teollisuuden ja lääketieteellisen tekniikan käyttöön, ja ne eivät välttämättä ole ensisijaisesti tietoliikenteen alueelle tarkoitettuja laitteita. Monet tämän alueen säteilijöistä onkin laitteita, joilla pyritään sähkömagneettisen kentän avulla kuumentamaan jotakin, esimerkiksi mikroaaltouunit. Tavoitteena on tietysti pitää laitteiden käyttämät kentät laitteiden kuorien sisällä, mutta toisinaan laitteiden aiheuttamat häiriökentät ovat havaittavissa ainakin lähiympäristössä. Tämä luonnollisesti aiheuttaa haasteita muille tällä taajuusalueella toimiville laitteille. (Klunder & Haseborg, 2010; Pulkkanen, 2010.)

### 12.11.2 NB-IoT-verkkojen taajuudet

NB-IoT:lle käyttöön ajateltuja taajuuskaistoja on yhteensä 26, ja yli 60 % niistä sijoittuu alle 1000 MHz taajuusalueille ja alle 30 % yli 1800 MHz:n alueelle. Neljä NB-IoT-taajuuskaistoista on varattu maailmanlaajuiseen käyttöön, ja alueellisesti jaettuina ryhmiä on viisi. Järjestelmille esitettyjä taajuuksia on luetteloitu taulukossa 12.2.

<b>Taulukko 12.2</b> NB-IoT taajuuksia. (Haltian, 2019)			
<b>Kanava</b>	<b>Alalinkki/MHz</b>	<b>Ylälinkki/MHz</b>	<b>Alue</b>
1	2140	1950	Global
3	1842,5	1747,5	Global
8	942,5	897,5	Global
20	806	847	EMEA
28	780,5	725,5	EU
31	465	455	Global
72	463,5	453,5	EMEA

NB-IoT on tarkoitettu hyvin häiriöitä kestäväksi, pienellä kaistanleveydellä toimivaksi ja vain hyvin pienen datamäärän siirtoon tarkoitetuksi järjestelmäksi, jonka energiankulutus on hyvin pieni. Taulukossa 12.2 mainittu EMEA-alue on lyhenne sanoista (Europe, Middle East ja Africa). (Haltian, 2019.)

### 12.11.3 LoRa-verkkojen taajuudet

LoRa (Long Range) -protokolla toimii lisensoimattomilla alle 1 GHz taajuuksilla, joista vain osa alueista on toistaiseksi määriteltä täysin (Eurooppa, Pohjois-Amerikan alue). Muualla taajuuskaistan määrittelyt ovat vielä kesken. Taajuuksina käytetään niin sanottuja ISM kaistan taajuuksia, ja protokollaa hallinnoi LoRa-allianssi.

Koska anturin ja etäsovelluksen välillä käytetään lisensoimattomia taajuuksia, ei käytöstä tule kustannuksia. Rajoituksena taajuuksien käytölle on, että yhteydellä ei saa ylittää 1 % koko kaistanleveydestä, joka voidaan tulkita niin, että anturilta on lupa siirtää enintään 140 kahdentoista tavun mittaista viestiä vuorokaudessa. (IoT Factory, 2020.)

LoRa tai LoRaWAN (Low Power Wide Area network) on langattoman ja nopean, mutta vähän tehoa kuluttavan verkon konsepti. Se on erityisesti pienten datamäärien siirron järjestelmä, jossa huomiota on kiinnitetty liikuteltavuuteen paikannukseen ja helppoon käyttöönottoon. LoRa:lle suunniteltuja taajuuksia on esitetty taulukossa 12.3.

<b>Taulukko 12.3</b> LoRa-järjestelmän taajuuksia. (Haltian, 2019)			
<b>Kanava</b>	<b>Alalinkki/MHz</b>	<b>Ylälinkki/MHz</b>	<b>Alue</b>
LoRa 1	434	433	Eurooppa
LoRa 2	870	863	Eurooppa

LoRa:n tyypillinen sovellus on useampaan anturiin perustuva mittausverkko, jossa tieto siirretään internetin toimielinten välityksellä, mutta joissa LoRaWAN päätelaitteet eivät käytä IP-protokollaa (Internet Protocol) eivätkä siten näy internetissä. Lähettimet käyttävät hajaspektritekniikkaa, jolloin niiden lähetysteho on mahdollista pitää hyvin matalana. Yleisin datan siirtonopeus on 0,3–50 kb/s suuruusluokkaa ja datamäärät kymmenien tavujen luokkaa. (Kuukka, 2020.)

#### 12.11.4 ZigBee-verkkojen taajuudet

Zigbee-tiedonsiirto soveltuu sekin erityisesti anturi- ja ohjausverkkoihin, ja sen määrittelyn taustalla on standardi IEEE 802.15.4. Myös Zigbee-konseptia hallinnoi oma Zigbee-allianssi, LoRan tapaan. Tyypillinen tiedonsiirtonopeus, noin 250 kilobittia sekunnissa, on hieman suurempi kuin LoRa:n vastaava. Zigbeelle luvataan 10–100 metrin kantamaa, ja se on laajennettavissa reitittimien avulla. Useat solmut voivat olla yhteydessä toisiinsa, joten maantieteellisesti laajan alueen kattava verkko on rakennettavissa taloudellisesti. Zigbeen taajuuksia on esitelty taulukossa 12.4.

<b>Taulukko 12.4</b> Zigbee-taajuuksia. (RF Wireless World, 2023)			
<b>Kanava</b>	<b>Alalinkki/MHz</b>	<b>Ylälinkki/MHz</b>	<b>Alue</b>
Zigbee	868	868,6	Global
Zigbee	902	928	Eurooppa
Zigbee	2400	2483,5	Eurooppa

Zigbeeen käyttösovelluksina nähdään asuinkerrostalojen näkökulmasta erilaiset etäyh-teydellä tapahtuvat taloautomaation tehtävät, kuten valojen hallinta, lämmityk-sen/jäähdytyksen ohjaukset ja valvontatekniikan hallinta yleisesti. Myös erilaiset tilo-ten monitorointiin liittyvät tehtävät, kuten esimerkiksi kulunvalvonta ja energianku-lutuksen seuranta. (Elprocus, 2020; Pulkkanen, 2010.) Nämä edellä mainitut tehtävät voi hoitaa millä tahansa IoT-järjestelmällä.

### 12.11.5 SigFox-verkkojen taajuudet

SigFox on taustaltaan ranskalainen operaattori, jonka liikeideana on tarjota erilaisia internet-pohjaisia ratkaisuja hyvin matalalla hintatasolla. Sigfox:n perusajatus on käyttää mahdollisimman kapeakaistaista signaalia, jolloin tehontarve pienenee, mutta toisaalta häiriönsieto saattaa muodostua ongelmaksi. Häiriönsietoa on pyritty paran-tamaan valitsemalla modulaatioksi ylälinkin suuntaan DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying) ja GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) alalinkille. SigFox toimii Euroopan alueella ylälinkin suuntaan 868,130 MHz ja alalinkin suuntaan 869,525 MHz taajuuksilla. Varsinaisesti SigFox:illa on tällä hetkellä kuusi erilaista kon-figuraatiota, riippuen maanosasta jolle tekniikkaa tarjotaan. Siksi myös taajuudet ovat hieman erilaisia, mutta kaikki sijoittuvat noin 900 MHz:n alueelle. (Haltian, 2019.)

### 12.11.6 LTE Cat M1

LTE Cat M1 tarjoaa enemmän kaistanleveyttä verrattuna NB-IoT:hen, ja LTE Cat M1 -määrittelyn mukainen taajuusalue sisältää myös enemmän kaistoja NB-IoT:ta korkeammilla taajuuksilla. Yli 20 % Cat M1:lle osoitetuista 29 taajuuskaistasta on yli 2 GHz:n alueella, verrattuna 15 %:n vastaavaan lukuun NB-IoT:ssa.

Viisi Cat M1 -taajuuskaistaa on varattu maailmanlaajuiseen käyttöön. EMEA:n alueella on kolme kaistaa ja EU:n alueen käyttöön on varattu yksi. (Haltian, 2019.) Taulukko 12.5, eli kokoelma LTE Cat M1 -taajuuksista on esitetty alla.

<b>Taulukko 12.5 LTE Cat M1 -taajuuksia. (Haltian, 2019)</b>			
<b>Kanava</b>	<b>Alalinkki/MHz</b>	<b>Ylälinkki/MHz</b>	<b>Alue</b>
1	2140	1950	Global
3	1842,5	1747,5	Global
7	2655	2535	EMEA
8	942,5	897,5	Global
20	806	847	EMEA
28	780,5	725,5	EU
31	465	455	Global
41	2496	2690	Global
72	463,5	453,5	EMEA

Parannettu konetyyppinen tiedonsiirto, eMTC (enhanced Machine Type Communication) on yksi LTE-M-verkon alatyyppeistä, jonka 3GPP julkaisee Release 13 -määrittelyssä. LTE Cat M1 on pienitehoinen laajan alueen palveluita tukeva tekniikka, joka tukee Internet-verkkoa yksinkertaisemmilla laitteilla ja tarjoaa laajennetun peittoalueen hyödyntämällä matkaviestinoperaattoreiden olemassa olevia LTE-tukiaseimia. LTE Cat M1 tarjoaa hieman tavallista NB-IoT:ta nopeampaa palvelua sovelluksille, joiden datansiirtotarpeisiin NB-IoT ei kykene vastaamaan. (Halberd Bastion, 2020.)

LTE Cat M1 onkin yksinkertaisesti vain muutos olemassa olevaan LTE-M-standardiin, koska julkaisussa 13 määritetään aivan uusi Cat M1 UE, joka kykenee toimimaan kaistaleveydellä 1,08 MHz olemassa olevan LTE-teknologiakehyksen sisällä tai 1,4 MHz kaistalla erillisessä (standalone) käytössä. (Halberd Bastion, 2020.)

### 12.11.7 LTE-M vai eMTC?

On tärkeää erottaa, että eMTC on LTE-M-verkon alatyyppeistä, vaikka usein kahta termiä käytetään toistensa synonyymeinä. Koneiden tiedonsiirtoon kehitetty eMTC Cat M1 -verkko rajoittuu 1,08 MHz:n kanavanleveyteen, jolloin sen suurin datanopeus on 1 megabittia sekunnissa, kun taas LTE-M-laitteen datanopeus voi olla jopa 10 megabittia sekunnissa käyttämällä mitä tahansa olemassa olevaa LTE-kanavaa. (Halberd Bastion, 2020.)

Teollisuuden hallintoelin GSMA on valinnut ”LTE-M” suositeltavaksi termiksi, kun viitataan julkaisuissa Cat M1 -verkkoihin.

Kaikkien tärkeimpien mobiililaitteiden, piirisarja- ja moduulivalmistajien tukeamana, LTE-M-verkot tulevat ilmeisesti toimimaan rinnakkain 2G-, 3G- ja 4G-matkapuhelinverkkojen kanssa ja hyötyvät kaikista matkaviestinverkkojen turvallisuus-

ja yksityisyysominaisuuksista, kuten tuesta käyttäjän identiteetin luottamuksellisuudelle, kokonaisuuden todennuksesta, luottamuksellisuudesta, tiedon eheydestä ja mobiililaitteiden tunnistuksesta. LTE-M onkin parhaimmillaan sovelluksissa, joissa vaaditaan massiivista koneiden välistä tiedonsiirtoa alhaisilla viiveillä.

3GPP ehdotti ITU-R:lle, että molemmat, sekä NB-IoT että LTE-M tulisi integroida tekniikkoina osaksi 5G-määrittelyä, koska molemmat tekniikat täyttävät 5G LPWA-vaatimuksen (Low Power Wide Area). LPWA käytännössä tarkoittaa sellaisten laitteiden määrittelyä, joiden on tarkoitus sijaita huoltotoimenpiteiden kannalta haastavissa paikoissa esimerkiksi kaivokset, ajoneuvojen rungot, kaivot yms. Näissä ympäristöissä huoltovarmuus ja laitteistojen sisältämien paristojen pitkät elinikä ovat keskeisiä valintakriteerejä. 5G:n New Radio on suunniteltu tukemaan erilaisia käyttöjä, taajuuksia ja laiteominaisuuksia. Yksi käyttöönoton skenaarioista, joita tuetaan 5G NR-työn alusta 3GPP:ssä, on sallia LTE-M- ja NB-IoT-lähetysten sijoittaminen suoraan 5G NR-taajuuskaistalle. Etuna tällä ratkaisulla olisi nyt käytössä olevien LPWA-laitteiden joustava siirtyminen suoraan osaksi 5G-verkkoja, ainoastaan ohjelmistopäivityksen avulla. (CableFree, 2020; Halberd Bastion, 2020; Lu, S., 2019.)

## 12.11.8 Wirepas

Wirepas Mesh on hajautetulla periaatteella toimivan tiedonsiirtoprotokolla erilaisille IoT-päätelaitteille. Leimallista tälle järjestelmälle on järjestelmän kaiken älykkyyden sijoittaminen päätelaitteisiin, jolloin laitteet itse tekevät tiedonsiirtoa koskevat päätökset. Laitteet ovat langattoman verkon välityksellä yhteydessä toisiinsa, joten järjestelmä skaalautuu vain laitteiden määrää lisäämällä.

Wirepas Mesh -protokolla käyttää BLE-protokollaa (Bluetooth Low Energy), joten se toimii globaalilla lisensoimattomalla ISM 2,4 GHz:n taajuuskaistalla. Se on rajoitettu välillä 2400–2500 MHz, joka sisältää muutaman MHz:n suojakaistat taajuusalueen kummassakin päässä. BLE-taajuuskaista on jaettu 40 kanavaan, joiden kaistanleveys on 2 MHz. (Haltian, 2019; TESI, 2019.)

## 12.11.9 Google Thread-taajuusalue (ISM)

Googlen Thread-järjestelmän taajuusalue perustuu IEEE-standardiin 802.15.4 langattomista protokollista. Se toimii Euroopan näkökulmasta lisensoimattomilla ISM-taajuuskaistoilla, joko Euroopan 868 MHz:illä tai Google Thread-protokollan globaalilla taajuusalueella 2450 MHz.



## 12.11.10 EC-GSM:n taajuusalue

Laajennetun peiton EC-GSM-IoT (Extended Coverage-GSM-IoT) protokollaa varten on varattu Euroopan mantereelle 11 erillistä taajuusakselin aluetta, jotka sijoittuvat alla olevan taulukon 12.6 mukaisesti välille 395–1842,5 MHz. Seuraavassa taulukossa on omaksi maantieteelliseksi alueekseen lisätty vielä ITU-Region 1, johon sisältyy Euroopan lisäksi Afrikka, osa Venäjää, Lähi-Idän läntinen osa, Persianlahti ja Irak.

Kanava	Alalinkki/MHz	Ylälinkki/MHz	Alue
380 T-GSM	395	385	Global
410 T-GSM	425	415	Global
450	464	454	Global
480	492,4	482,4	Global
710	737,2	707,2	Global
750	755,2	785,2	Global
810 T-GSM	858,7	785,2	Global
900 E	942,5	897,5	EMEA
900 P	947,5	902,5	ITU Region 1
900 R	940,5	895,5	ITU Region 1
1800 DCS	1842,5	1747,5	ITU Region 1

## 12.11.11 EC-GSM-IoT

EC-GSM-IoT on standardiin perustuva, pienitehoinen laajan kantaman tekniikka, joka on tarkoitettu suurta kapasiteettia vaativaan tiedonsiirtoon yksinkertaisilla laitteilla. Kyseessä on GSM-soluihin perustuva järjestelmä, jossa EC-GSM-IoT:n käyttöönottamiseksi tehtävät päivitykset ja optimoinnit voidaan suorittaa suoraan olemassa olevissa GSM-verkoissa. Itse laitteiden osalta tavoitellaan muiden LPWA (Low Power Wide Area) -laitteiden tapaan 10 vuoden paristojen/akkujen kestoa. (EU päätös 2018/637, 2018; GSMA, 2019.) Näiden järjestelmien kaupallistaminen aloitettiin jo vuonna 2017.

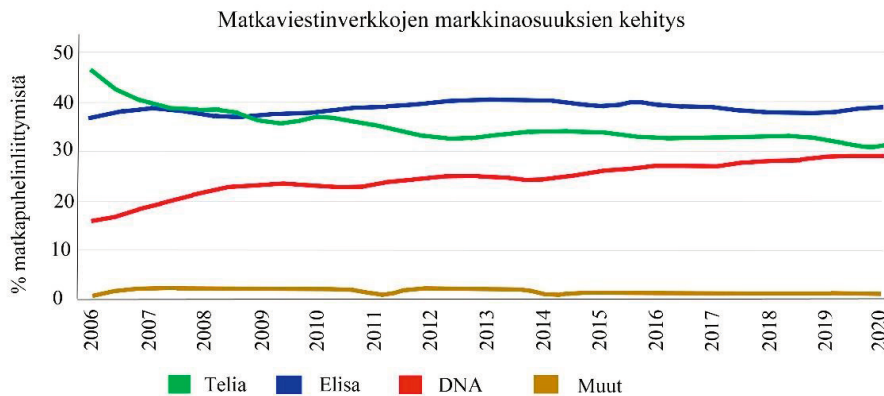
## 12.12 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan kysyä, miksi on kehitetty ja standardoitu erilaisia LPWA-tekniikoita (LTE-M, NB-IoT ja EC-GSM-IOT), joilla kuitenkin on hyvin samanlaiset

ominaisuudet ja ne soveltuvat hyvin samanlaisiin tarpeisiin? Vastaus on yksinkertainen ja perustuu tosiasiaan eri maiden erilaisista verkkopolitiikoista. Jokaisella maanosalla on oma sekoituksensa GSM- ja 4G-verkkojen infrastruktuuria, ja jokaisella on oma strategiansa siitä, miten laaja peittoalue kullakin verkkoteknologialla on. Jokainen edellä mainituista LPWA-tekniikoista; LTE-M, NB-IoT ja EC-GSM-IoT, hyödyntää olemassa olevaa matkapuhelinverkkojen verkkoinfrastruktuuria ja on otettavissa käyttöön lähinnä ohjelmistopäivityksillä. Niillä on kuitenkin käyttäjän kannalta muutamia vivahde-eroja. NB-IoT soveltuu erityisen hyvin yksinkertaisille anturisoveltuksille, joissa siirrettävän datan määrä on hyvin pieni. Vaikka standardi tukee GSM-siirtoa, lähes kaikki kaupalliset sovellukset on otettu käyttöön LTE-verkkojen välityksellä. LTE-M on puolestaan hyvin joustava, ja tukee pienimuotoisia anturisoveltuksia, joissa vaaditaan hieman liikkuvuutta ja hieman suurempaa datansiirtokykyä. EC-GSM-IoT on vahvimmillaan maissa, joissa GSM-verkkoa tiedetään pidettävällä pitkään ja/tai joissa 4G LTE-verkko on maantieteellisesti puutteellinen. (EU päätös 2018/637, 2018; Sinha, Wei, & Hwang, 2017.)

## 12.12.1 Operaattorit

Tätä kirjoitettaessa viimeisin tilastokeskuksen julkaisema tieto matkapuhelinliittymien markkinaosuuksista kertoo markkinoiden jakautuvan karkeasti ottaen kolmen suuren operaattorin kesken. Nämä suurimmat operaattorit ovat vuonna 2020 Elisa Oyj, Telia Finland Oyj ja DNA Oyj, joista viimeksi mainittu on hieman kasvattanut suhteellista osuuttaan viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana. (Traficom, 2020b.)



**Kuva 12.1** Matkaviestinverkkojen markkinaosuudet vuosittain. (Traficom, 2020b, muokattu)

Kuvasta 12.1 on nähtävissä, Suomessa kaikilla kolmella suurella operaattorilla on lähes yhtä suuret markkinaosuudet. Tämä helpottaa oleellisesti mahdollisista matkaviestimien kuuluvuusongelmista kärsivää kuluttajaa, sillä hän voi halutessaan vaihtaa operaattoria ja tarkistaa onko jokin kolmesta operaattorista selvästi muita vahvempi juuri hänen asuntonsa kohdalla.

Toisaalta kolmen suuren operaattorin markkinatilanne tuo turvallisuutta, sillä hätäpuhelijain tapauksessa matkapuhelin etsii kaikilta operaattoreilta signaalia. Jos yhdenkin operaattorin signaali on riittävän vahva, saadaan hätäpuhelu muodostettua.

Taulukossa 12.7 on vielä tehty lyhyt yhteenveto tämänhetkisistä taajuusalueista Suomessa. (Traficom, 2020a.)

<b>Taulukko 12.7</b> Suomessa käytössä olevat taajuusalueet. (Traficom, 2020a)			
<b>Taajuusalue (MHz)</b>	<b>Ala- ja yläraja (MHz)</b>	<b>Teknologiat</b>	<b>Luvanhaltijat</b>
450	452,425–466,925	LTE	(Digiset Oy), (Å)
700	703–788	LTE	(D), (E), (T)
800	791–862	LTE	(D), (E), (T), (Å)
900	880,1–959,9	GSM, UTRA, LTE	(D), (E), (T), (Å)
1800	1710,1–1880	GSM, UTRA, LTE	(D), (E), (T), (Å)
2000	1920,3–2169,7	UTRA, LTE 5G	(D), (E), (T), (Å)
2600	2500–2690	LTE 5G	(D), (E), (T), (Å)
3500	3410–3800	5G	(D), (E), (T), (Å)

(Å) = Ålands Telekommunikatio Ab  
(D) = DNA Oyj  
(E) = Elisa Oyj  
(T) = Telia Finland Oyj

Taulukkoa 12.7 tulkittaessa on muistettava, että operaattoreilla on mahdollisuuksia painottaa eri taajuusalueiden käyttöä eri tavoin, joten käyttäjän näkökulmasta omat, erityisesti LTE- ja 5G-yhteydet saattavat näkyä yllättävillä taajuusalueilla. Taulukko siis seuraa ajan vaatimuksia, joten eri teknologioille varatut taajuusalueet todennäköisesti muuttuvat vuosien kuluessa.

# 13 SÄHKÖMAGNEETTISET AALLOT JA MATERIAALIT

Tässä luvussa kuvataan sähkömagneettisten aaltojen etenemistä erityisesti erilaisten rakennusmateriaalien näkökulmasta. Kappaleessa esitetään aaltojen etenemisen yleiset merkintätavat ja pyritään valottamaan niiden tulkintaa. Varsinainen sähkömagneettisten aaltojen teoria on löydettävissä lähes kaikista radioaaltoja ja kenttiä esittelevistä oppikirjoista. Tämän luvun teoreettinen käsittely pohjautuu suurimmalta osin Pozarin kirjoittamaan aiheen kattavaan kuvaukseen. (Pozar, 2012.)

Tässä kirjassa on sivuutettu sähkömagneettisia aaltoja käsittelevät Maxwellin perusyhtälöt, jotka kuvaavat matemaattisesti kenttien suhdetta toisiinsa ja niiden etenemistä erilaisissa väliaineissa. Sen sijaan on pyritty selittämään teorian avulla eri materiaaleissa tapahtuva eteneminen niin, että nekin mahdolliset lukijat, joiden radiotekniikkaa koskevat taustatiedot ovat rajalliset, kykenevät hahmottamaan kuvatut ilmiöt ja tulkitsemaan kirjan viimeisissä luvuissa esiteltyjä mittaustuloksia. Sen vuoksi seuraavassa teoreettisessa kuvauksessa keskitytään aineen sähköisiä ominaisuuksia kuvaavien parametrien käsittelyyn, signaalin etenemiseen materiaalissa ja rajapinnoissa tapahtuviin heijastuksiin. Rajapinnat ja niiden heijastukset ovat erilaisten rakenteiden vaimennuksia arvioitaessa huomionarvoisia, sillä esimerkiksi seinärakenteet koostuvat useista päällekkäisistä materiaalikerroksista, joille jokaiselle on määriteltävissä omat sähköiset parametrinsa. Näiden parametrien vaihtuessa eri materiaalien rajapinnoissa syntyy aina heijastus, jolloin osa sähkömagneettisten kenttien kuljettamasta energiasta heijastuu pinnasta takaisin tulosuuntaansa, signaalin tulokulmasta riippuen.

Aivan ensimmäiseksi on syytä tarkastella lyhyesti materiaalien sähkömagneettisia ominaisuuksia, erityisesti materiaalien permittiivisyyttä ja sen jälkeen signaalin etenemistä aineen läpi.

## 13.1 Permittiivisyys RF-vaimennuksen avainparametrina

Materiaalin permittiivisyys,  $\epsilon$ , on RF-vaimennusten näkökulmasta tärkein ei-johtavan aineen ominaisuus, sillä se kuvaa ulkoisen sähkökentän vaikutusta aineen omaan

varausjakaumaan. Ulkoinen sähkökenttä pyrkii polarisoimaan aineessa olevia partikkeleita, ja tämä polarisoituminen aiheuttaa partikkeleiden kääntymisen sähkökentän suuntaan. Koska ulkoinen kenttä vaihtaa suuntaansa ulkoisen kentän vaihtaessa suuntaansa, tapahtuu tämä partikkelien kääntymisen jokaisen ulkoisen signaalin jakson aikana. Ulkoisen kentän taajuuden kasvaessa aineessa tapahtuva polarisoituminen ei enää ehdi täysin tapahtua ulkoisen sähkökentän muuttumisen tahdissa. Aineen polarisoitumiseen kulutettu energia näkyy seuraavassa tarkemmin esiteltävän permittiivisyyden häviötermissä.

Tyhjiölle määriteltyä permittiivisyyttä kuvataan merkinnällä  $\epsilon_0$ , jolla on numeroarvo  $8,854188 \times 10^{-12}$  [F/m]. Toinen sähkömagneettisten kenttien yhteydessä aineen käyttäytymistä kuvaava parametri on permeabiliteetti  $\mu$ . Tyhjiön permeabiliteetiksi on määritetty vakio,  $\mu_0$ , jonka numeroarvo on  $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]. Valon nopeus ilmassa on tunnetusti  $2,99792458 \times 10^8$  [m/s], ja joka kaavoissa usein esitetään symbolilla  $c_0$ . (Amiet, 2003; Pozar, 2012.)

Edellä esiteltyjen vakioiden suhde toisiinsa ja valon nopeuteen näkyy suoraan kaavasta 13.1. (Amiet, 2003.)

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (13.1)$$

Monissa kaavoissa käytetään aineen tai materiaalin ja tyhjiön permittiivisyyden suhdetta, jolloin vältetään käyttämästä pitkiä desimaaliosia sisältäviä pieniä lukuja. Tällöin lukujen suhteesta on helppo hahmottaa nopeasti permittiivisyyden suuruusluokka. Suhde ilmoitetaan suhteellisenä permittiivisyytenä  $\epsilon_r$  kaavan 13.2 mukaan. (Cheng, 1993; Pozar, 2012.)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (13.2)$$

ja vastaava kaava permeabiliteetille on

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (13.3)$$

Häviöllisen materiaalin ollessa kyseessä, sen läpi etenevään signaaliin vaikuttaa aineen kompleksinen permittiivisyys,  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ , jossa  $\epsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys ja  $\epsilon_r$  on aineen oma suhteellinen permittiivisyys. Aineen oma suhteellinen termi jakautuu kahteen osaan, joista ensimmäinen,  $\epsilon_r'$ , liittyy aallon etenemisnopeuteen aineessa ja toinen,  $j\epsilon_r''$ , on häviöitä tai signaalin vaimennusta kuvaava termi.

Häviökerroin on kaavassa olevasta miinus-merkistä huolimatta aina positiivinen luku, koska missään yksittäisessä materiaalissa signaali ei vahvistu. Koska tässä kirjassa keskeisessä osassa ovat rakennusmateriaalit, voidaan todeta, että kaikki käytännön materiaalit ovat ainakin jossain määrin häviöllisiä. Siksi jatkossa käytetäänkin tarkasteluissa toteamusta  $\varepsilon_r'' \neq 0$ . (Cheng, 1993.)

Permittiivisyyden häviötermin tulkinta vaihtelee ainakin merkinnän osalta jonkin verran eri kirjallisissa lähteissä. Esimerkiksi Pozar ja Kintner erittelevät häviötermin lisäksi vielä oman, johtavuudesta johtuvan, häviöitä kuvaavan tekijänsä, joka on esitetty kaavassa 13.4 toisena imaginaariosana permittiivisyyden lisäksi. Johtavuudesta syntyvää häviötermiä kuvataan  $\sigma$  :llä [S/m]. (Kintner, 2017; Pozar, 2012.)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' - j\frac{\sigma}{\omega}). \quad (13.4)$$

Aineen johtavuudesta syntyvät häviöt pohjautuvat siihen tosiasiaan, että käytännön materiaaleilla on nolosta poikkeava sisäinen johtavuus. Tämä johtavuus perustuu aineessa oleviin vapaisiin varauksenkuljettajiin, elektroneihin tai aukkoihin. Tavallisesti kuitenkin huonosti johtavien materiaalien kuvauksessa johtavuudesta johtuvat häviöt sisällytetään häviötermiin  $j\varepsilon_r''$ , sillä ei-johtavilla materiaaleilla johtavuuden merkitys kokonaishäviötermiin on hyvin pieni, eli  $j\frac{\sigma}{\omega} \ll j\varepsilon_r''$ . (Cheng, 1993.)

Käsiteltäessä permittiivisyyttä ja sen reaali- ja imaginääriosaa, tulee huomioida, että toisinaan permittiivisyys on voimakkaasti taajuudesta riippuvainen. Esimerkiksi maan pinta on matalilla taajuuksilla (noin 1 kHz suuruusluokassa) hyvä johde, mutta korkeammilla taajuuksilla (yli 10 GHz:n alueella) se käyttäytyy kuin hyvä eriste. (Cheng, 1993.) Aikaisemmin tällä taajuusvaihtelulla on ollut vain vähäinen merkitys, mutta jo lähitulevaisuudessa, jolloin matkaviestiverkkojen taajuudet laajenevat 700 MHz:stä 26 GHz:iin, useimpien aineiden ominaisuudet muuttuvat merkittävästi eri taajuusalueilla. Eri matkaviestinteknologioiden taajuuksien kehitystä on tarkasteltu lähemmin luvussa 12.

Monissa lähteissä aineen häviöllisyyttä kuvataan erillisellä ”tan  $\delta$ ”-arvolla, joka saadaan  $\varepsilon_r'$  ja  $\varepsilon_r''$ :n suhteesta seuraavasti

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}. \quad (13.5)$$

## 13.2 Aaltoluku $k$

Säteilyn etenemisen matemaattisessa käsittelyssä esiintyy aina kaksi keskeistä parametria, jotka ovat signaalin aaltoluku ja etenemisvakio. Tästä johtuen on tarpeen määrittellä ensin taajuudesta riippuva ja yleisesti kompleksinen aaltoluku  $k$ , [1/m]

$$k = 2\pi f\sqrt{\mu\varepsilon}, \quad (13.6)$$

jossa  $\mu$  edustaa tutkittavan aineen omaa permeabiliteettiä ja  $\varepsilon$  vastaavasti saman materiaalin permittiivisyyttä. Aaltoluku ( $k$ ) on suure, joka ilmaisee, kuinka monta kokonaista aaltoa sisältyy jonkin valitun pituusyksikön matkalle signaalin edetessä tietyssä aineessa. Niin kuin kaavassa 13.7 esitetään, yleisessä muodossa tulkinta on aallonpituuksien määrä täyden ympyrän eli  $2\pi$ :n matkalla. Ympyrän ja taajuuden avulla määrittellään kulmataajuus  $\omega$ , jonka matemaattinen määrittely on yleisesti tunnettu  $\omega = 2\pi f$ . Aaltoluvun numeroarvo riippuu siis paitsi taajuudesta, myös aineen ominaisuuksista. Esimerkiksi lasissa, jonka permittiivisyyden arvo poikkeaa tyhjiön arvosta, aallonpituus  $\lambda$  pienenee ja aallon etenemisnopeus hidastuu. Taajuus kuitenkin säilyy vakiona. Aaltoluku voidaan esittää kaavalla 13.7 seuraavasti (Cheng, 1993):

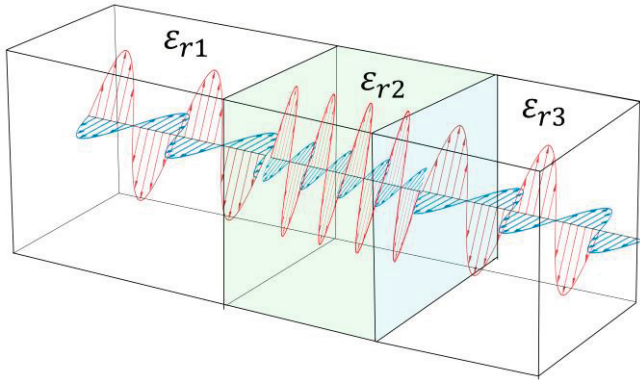
$$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (13.7)$$

ja yksinkertaistaen aaltoluku voidaan esittää pelkän permittiivisyyden perusteella useimmille ei-magneettisille materiaaleille, joilla  $\mu_r \approx 1$ , kaavoilla 13.8 ja 13.9.

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\varepsilon_r(f)} \quad (13.8)$$

$$= \frac{2\pi f}{c_0/\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{1 - j \tan \delta} \quad (13.9)$$

joissa kaavoissa valon nopeus on merkitty jo kaavassa 13.1 esiintyneellä muuttujalla  $c_0$ . (Sjöberg, 2016.) Seuraava kuva 13.1 pyrkii valottamaan tilannetta, jossa kahden väliaineen välissä on kolmatta materiaalia, jossa signaalin aallonpituus muuttuu.



**Kuva 13.1** Periaatekuva aallonpituuden vaihtelusta eri väliaineissa. (Shen & Kong, 2011)

Permittiivisyyden arvon vaikutus signaalin aallonpituuteen yhteen liitettyissä materiaaleissa nähdään kuvassa 13.1, jossa keskellä olevassa väliaineessa aallonpituus eroaa selvästi sen kummallakin puolella olevista vastaavista aallonpituuksista. Kuvassa  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3}$ , ja  $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$ .

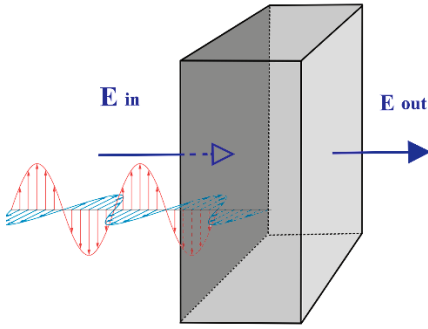
### 13.3 Aaltojen eteneminen väliaineessa

Koska matkapuhelinverkkojen tukiasemien ja päätelaitteiden signaalit etenevät lähetysantennien jälkeen aina jonkin aikaa ilmassa ja kohtaavat sen jälkeen ulkoseinärakenteen, on tarpeen käsitellä sähkömagneettisten aaltojen etenemistä erikseen sekä ilmassa että mielivaltaisessa häviöttömässä materiaalissa.

#### 13.3.1 Eteneminen häviöttömässä aineessa (ilma)

Käytännön ulkoseinärakennetta tarkasteltaessa voidaan aloittaa yksinkertaistetusta mallista, jossa RF-signaalin eteneminen tapahtuu ilma-materiaali-ilma järjestelmänä, ja jossa ilmarajapintojen välillä oleva materiaali voi olla monikerroksellinen tai homogeeninen materiaalikerroks. Tilanteen periaatekuva on 13.2, jossa ilmarajapintojen välissä oleva materiaali on homogeeninen.





**Kuva 13.2** Radiosignaalin eteneminen materiaalinäytteen läpi. (Kuva: Asp)

Tästä järjestyksestä johtuen on syytä tarkastella erikseen etenemistä häviöttömässä väliaineessa, jota ilma edustaa, ja sen jälkeen esitellä keskeisimmät erot häviöllisen materiaalin teoreettiseen etenemismalliin.

Ilma, mahdollisista pienistä leijuvista partikkeleista huolimatta, rinnastetaan sähkömagnetiikan teoreettisessa käsittelyssä häviöttömään tyhjiöön, jossa  $\sigma = 0$ ,  $\varepsilon'' = 0$  ja  $\varepsilon = \varepsilon_0$  ja  $\mu = \mu_0$ . Häviöttömässä tilanteessa alkuperäisistä Maxwellin kaavoista päästään Helmholtzin x-suuntaan polarisoituneen ja z-suuntaan etenevän aallon esitysmuotoon (Cheng, 1993; Pozar, 2012)

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0, \quad (13.10)$$

jossa lähtökohtaisesti oletetaan sekä  $\varepsilon$ :n että  $\mu$ :n olevan puhtaasti reaalisia vakioita, jolloin myös  $k$  on reaalinen. Seuraavissa merkinnöissä on esimerkinomaisesti lähdetty määrittelystä, jossa sähkökentällä on vain x-suuntainen komponentti. Etsittäessä ratkaisuja edellä esitettyyn kaavaan, löydetään kaksi eri suuntaan, (z+ ja z-) etenevää, sähkökentän suuntaan värähtelevää signaalia, jotka voidaan esittää havainnollisesti kaavalla (Pozar, 2012)

$$E = E^+ e^{-jkz} + E^- e^{jkz}, \quad (13.11)$$

jossa etumerkit  $E^+$  ja  $E^-$  ovat skaalaustermejä ja kuvaavat signaalin voimakkuutta eri suuntiin etenevillä signaaleilla. On syytä todeta, että samat signaalit esitetään toisiinsa myös kulmataajuuden ja ajan funktiona, jolloin kaavan muoto on seuraava:

$$E_x(z, t) = E^+ \cos(\omega t - kz) + E^- \cos(\omega t + kz), \quad (13.12)$$

jossa kuvataan etenevää ja palaavaa sähkökenttää samalla tavoin kuin edellä, ja  $t$  kuvaa signaalin ajallista vaihtelua.

### 13.3.2 Eteneminen häviöllisessä materiaalissa

Rakennusmateriaalien vaimennusta tutkittaessa on tarkoituksenmukaista seurata signaalin kulkua lähettävästä antennista kohti vastaanotinta. Silloin ilmassa edettyään RF-signaali kohtaa tutkittavan materiaalin, jonka sähköiset parametrit eivät enää vastaa häviötöntä tilannetta. Tämän rajapinnan jälkeen Helmholtz'n peruskaava tavallisesti esitetään seuraavassa muodossa, jossa etenemisvakiolla, eli  $\gamma$  -termillä, kuvataan materiaalissa tapahtuvia häviöitä. (Pozar, 2012; Räisänen & Lehto, 1996.)

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x = 0 \quad (13.13)$$

Kaavoja vertaamalla nähdään, että aaltolukutermin  $k$  on korvautunut etenemisvakiolla ( $\gamma$ ), joka määritellään seuraavasti (Cheng, 1993; Pozar, 2012):

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}}. \quad (13.14)$$

Yllä olevasta kaavasta 13.14 nähdään etenemisvakion jakautuvan reaali- ja imaginääriosiin, ja oikeanpuoleisimman neliöjuuren alla termit on jaettu permittiivisyyden reaalisosaan ja johtavuustermiin  $\sigma$ . Kaavassa esiintyvistä tekijöistä  $\alpha$  on nimitetty vaimennusvakioksi [Np/m] ja  $\beta$  :tä kutsutaan vaihevakioksi [rad/m]. Tutkittaessa tarkemmin materiaaleja, jotka voivat olla häviöllisiä sekä sähköisesti että magneettisesti, tulee kaava laajentaa erikseen sekä permittiivisyyden että permeabiliteetin osalta reaali- ja imaginaariosiin seuraavasti (Amiet, 2003):

$$\gamma^2 = -\omega^2 (\varepsilon'_e + j\varepsilon''_e)(\mu' + j\mu'') \quad (13.15)$$

$$= -\omega^2 (\varepsilon'_e \mu' - \varepsilon''_e \mu'') - j\omega^2 (\varepsilon'_e \mu'' + \varepsilon''_e \mu'), \text{ joten} \quad (13.16)$$

$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 (\varepsilon'_e \mu' - \varepsilon''_e \mu'') - j\omega^2 (\varepsilon'_e \mu'' + \varepsilon''_e \mu')} \quad (13.17)$$

$$= \alpha + j\beta. \quad (13.18)$$

Jos materiaalin johtavuus on edelleen pieni verrattuna aineen polarisoitumisesta joh-  
tuviin häviöihin, on etenemisvakion kaava esitettävissä myös muodossa (Cheng,  
1993)

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu\varepsilon' \left(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)}. \quad (13.19)$$

Kaavassa 13.19 havaitaan häviöllisyyden tuomat muutokset, sillä häviöttömässä ta-  
pauksessa, jossa  $\sigma = 0$ ,  $\varepsilon'' = 0$  ja  $\varepsilon' = \varepsilon$ , tulee vaimennustermin arvoksi nolla, eli  $\alpha = 0$   
ja  $\beta = k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ .

Kirjoittamalla etenemisvakio  $\gamma = \alpha + j\beta$  edelleen kaavassa 13.13 esiintyvässä dif-  
ferentiaalimuodossa ja hyödyntämällä kaavan 13.19 etenemisvakion määritelmää voi-  
daan erottaa etenemisvakion tekijät erikseen kaavojen 13.20–13.27 avulla.

$$\gamma^2 = \left(j\omega \sqrt{\mu\varepsilon' \left(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)}\right)^2 = (\alpha + j\beta)^2. \quad (13.20)$$

Suorittamalla tekijöittäin kertolasku (Hong, 2010)

$$\gamma^2 = (\alpha + j\beta)^2 = \alpha^2 - \beta^2 + j2\alpha\beta = -\omega^2\mu\varepsilon' + j\omega^2\mu\varepsilon'' \quad (13.21)$$

tekijät voidaan ryhmitellä permittiivisyyden kompleksisten osien perusteella seuraavasti (Hong, 2010):

$$\alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2\mu\varepsilon', \text{ ja} \quad (13.22)$$

$$2\alpha\beta = j\omega^2\mu\varepsilon''. \quad (13.23)$$

Tämän jälkeen voidaan ratkaista yhtälöt lopullisiin muotoihinsa (Hong, 2010)

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1}, \text{ ja} \quad (13.24)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1}. \quad (13.25)$$

Edellä esitettyjen kaavojen avulla muotoiltuun kuvaukseen on löydettävissä ratkaisut etenemisvakion osille myös häviötangentiin perustuen seuraavasti (Nelson, 1999):

$$\alpha(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(f)}{2} \sqrt{1 + (\tan\delta^2 - 1)}}, \quad (13.26)$$

$$\beta(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(f)}{2} \sqrt{1 + (\tan\delta^2 + 1)}}. \quad (13.27)$$

Yleisesti, jos tarkastelu rajoitetaan vain  $+z$  suuntaan etenevään aaltoon, saadaan sähkökentän kuvaukseksi etenemisvakion avulla (Cheng, 1993):

$$E_x = E_0 e^{-\gamma z} = e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}, \quad (13.28)$$

joka kuvautuu aikatasossa seuraavasti (Pozar, 2012):

$$E_x = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z). \quad (13.29)$$

Kaavasta 13.29 nähdään termin  $\alpha$ -termin kuvaama vaimeneminen, sillä matkan kasvaessa rajapinnasta eteenpäin, jolloin  $z > 0$ , miinusmerkkinen  $e$ :n eksponentti pienentää signaalin voimakkuutta signaalin kulkeman matkan kasvaessa.

## 13.4 Signaalin nopeus ja ilmarajapinnan impedanssi

Koska kussakin materiaalissa sähkömagneettinen säteily etenee eri tavoin, on aineille määriteltävissä omat sähköiset parametrinsa. Yksi perusparametri on vaihenopeus,  $v_p$ , joka esitetään kaavamuodossa seuraavasti (Pozar, 2012; Shen & Kong, 2011):

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c_0}{\sqrt{(\varepsilon_r \mu_r)}}. \quad (13.30)$$

Vaihenopeutta ei tule sekoittaa signaalin etenemisnopeuteen materiaalissa, vaan vaihenopeus kertoo, millä nopeudella signaalin kuten esim. sähkökentän vaihe etenee materiaalissa. Tilannetta voi kuvitella ottamalla siniaallon kuvaajasta esimerkiksi yhden maksimikohdan esim.  $+z$ -suuntaan etenevästä aallosta ja määrittämällä sille etenemisnopeus. Tällöin tulee muistaa, että tavallisesti heijastuksen yhteydessä esiintyy aina kaksi eri komponenttia, jotka etenevät eri suuntiin  $+z$  ja  $-z$ . (Pozar, 2012.)

Vapaassa tilassa ja tyhjiössä vaihenopeus on sama kuin valon nopeus tyhjiössä, joka on nähtävissä edellisen kaavan 13.30 oikeanpuoleisesta termistä, eli (Cataldo, De Benedetto, & Cannazza, 2011):

$$v_{p0} = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_0\mu_0)}} = c_0 = 2.998 \times 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]. \quad (13.31)$$

Toinen materiaalikohtainen etenemisparametri on aallonpituus, joka on erilainen eri materiaaleissa, vaikka signaalin taajuus pysyy vakiona.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi v_p}{\omega} = \frac{v_p}{f}. \quad (13.32)$$

Edellä esiteltyjen parametrien avulla päästään materiaalin oman, sisäisen impedanssin,  $\eta$ , määrittelyyn käyttäen kaavaa 13.33. Tämän sisäisen impedanssin avulla kuvataan rajapinnoissa tapahtuvia heijastuksia (Shen & Kong, 2011).

$$\eta = \frac{\omega\mu}{k} = \sqrt{\mu/\epsilon}. \quad (13.33)$$

Sisäinen impedanssi vapaalle ilmatilalle tai tyhjiölle määritellään kaavalla 13.34 (Burdetto, Cain, & Seals, 1980; Pozar, 2012; Räisänen & Lehto, 1996).

$$\eta_0 = \sqrt{(\mu_0/\epsilon_0)} = 120\pi = 377 \Omega. \quad (13.34)$$

Impedanssi myös määrittelee aineessa sähkökentän ja magneettikentän välisen suhteen. Esimerkkitalanteessa, jossa sähkökenttä on x-akselin suuntainen, pätee magneettikentälle  $H$  seuraavat määrittely  $H_x = H_z = 0$  (Shen & Kong, 2011) ja

$$H_y = \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-jkz} - E^- e^{jkz}). \quad (13.35)$$

## 13.5 Signaalin eteneminen ilmasta materiaaliin

Tutkittaessa rakennusmateriaalien vaimennusta on ensisijaisen tärkeää tuntea ainakin periaatteellisella tasolla ne ilmiöt, jotka tapahtuvat sähkömagneettisiin kenttiin perustuvilla signaaleilla erilaisten materiaalien rajapinnoissa. Käytännössä RF-signaali etenee ilmassa ja kohtaa esim. seinä- tai ikkunapinnan, jossa alkuperäisen signaalin energia jakautuu kahteen osaan, toinen heijastuu rajapinnasta takaisinpäin ja toinen osa

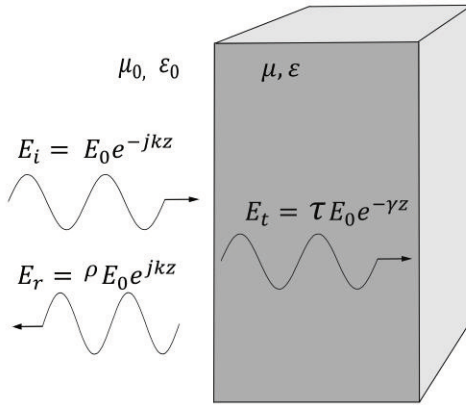
jatkaa kulkuaan materiaalin läpi. Tässä yhteydessä on painotettava, että seuraavaksi esiteltävä teoria käsittelee heijastusta ja läpäisyä ainoastaan rajapinnalla, jossa signaalin energia säilyy. Tavallisesti materiaalin läpi edetessään signaali vaimenee ainakin jonkin verran, ja vaimenemista itse materiaalissa käsitellään omana ilmiönään kappaleissa 13.6.1 ja 13.6.2.

Rajapinnoissa tapahtuva heijastus on ilmiönä paljon tärkeämpi kuin aluksi yleensä arvioidaan, sillä käytännön rakenteet ja jopa yksittäiset rakennusmateriaalit sisältävät lukuisia erilaisia rajapintoja. Rajapinta syntyy aina silloin, kun materiaalin sähköiset parametrit ovat erilaiset kuin ympäristössä. Näin ollen ylimääräinen sähköinen rajapinta syntyy esimerkiksi eristelevyn kummallekin pinnalle, silloin kun siinä on paperinen, muovinen tai alumiininen pinnoite. Sama tilanne on luonnollisesti myös tavallisessa ikkunalasissa, jossa lasin kummallekin puolelle syntyy oma rajapintansa.

Rajapinnat ja niiden määrät ovat oleellisia signaalin heijastusten arvioinnissa. Niin kuin todettiin, jokaisesta rajapinnasta syntyy heijastus, ja näin ollen kerroksellisen materiaalin sisään syntyy monia heijastuspintoja, joissa signaalin osan suunta muuttuu. Tämän vuoksi käytännön materiaalien läpäisyyssä nähdään aikatasossa tarkasteltaessa ensimmäinen, suoraan edennyt komponentti, jota seuraa joukko eri rajapinnoista heijastelleita komponentteja. Näiden heijastuksista syntyneiden komponenttien perusteella voidaan periaatteessa analysoida materiaalin tai rakenteen ainevahvuuksia ja ominaisuuksia, mutta käytännössä ne aiheuttavat haasteita materiaalin tai rakenteen vaimennuksen mittaamisessa.

### 13.5.1 Rajapinnoissa tapahtuvat heijastukset impedansseilla

Koska materiaalivaimennusten mittausta tehdään yleensä järjestelyllä, jossa tutkittavan materiaalin toisella puolella on lähetys- ja toisella vastaanotinantenni, on luontevaa aloittaa teoreettinenkin tarkastelu tilanteesta, jossa tasoaltomainen signaali kohtaa tutkittavan aineen pinnan suorassa kulmassa. Tällöin tilanne on alla olevan kuvan mukainen. (Pozar, 2012; Shen & Kong, 2011.)



**Kuva 13.3** Periaatekuva etenevästä ja heijastuneesta aallosta. (Kuva: Asp)

Yllä olevassa kuvassa 13.3 on esitetty ilmassa suuntaan  $+z$  etenevä signaali  $E_i$ , joka kohtaa materiaalin pinnan kohdassa  $z=0$ , joka vastaa kuvassa kappaleen vasemmanpuoleista rajapintaa. Tässä pinnassa signaali jakautuu heijastuneeseen komponenttiin  $E_r$  ja signaalin osaan, joka jatkaa kulkuaan materiaalissa, tässä merkittynä viittauksella  $E_t$ . Se, miten komponentit jakautuvat osiin rajapinnassa, määräytyy pinnan heijastus- ja läpäisykertoimien  $\rho$  ja  $\tau$  -perusteella kaavojen 13.38–13.41 avulla. Matemaattisesti ilmaistuna signaalin osat ovat ensimmäistä rajapintaa kohti etenevät komponentit (Pozar, 2012; Shen & Kong, 2011):

$$\bar{E}_i = \hat{x}E_0 e^{-jk_0 z}, \quad (13.36)$$

$$\bar{H}_i = \hat{y} \frac{1}{\eta_0} E_0 e^{-jk_0 z}, \quad (13.37)$$

joiden jälkeen merkitään vastaavat heijastuneet komponentit:

$$\bar{E}_r = \hat{x}\rho E_0 e^{jk_0 z}, \text{ ja} \quad (13.38)$$

$$\bar{H}_r = -\hat{y} \frac{\rho}{\eta_0} E_0 e^{jk_0 z}. \quad (13.39)$$

Näiden lisäksi voidaan määritellä komponentit, jotka etenevät tutkittavassa materiaalissa, eli

$$\bar{E}_t = \hat{x}\tau E_0 e^{-\gamma z}, \text{ ja} \quad (13.40)$$

$$\bar{H}_t = -\hat{y} \frac{\tau}{\eta_0} E_0 e^{-\gamma z}. \quad (13.41)$$

Varsinaisen heijastuksen voidaan ajatella syntyvän, kun etenevä signaali kohtaa rajapinnassa erilaiset, aineille luonteenomaiset, impedanssit. Impedanssi ilmalle on jo aikaisemmin esitetty kaavassa 13.34, ja yleisemmin, häviölliselle materiaalille, materiaalin rajapinnassa signaaleille näkyvä impedanssi on (Cheng, 1993; Pozar, 2012)

$$\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma}. \quad (13.42)$$

Hyvin pienihäviöisille materiaaleille, esimerkiksi lämmöneristeille, voidaan impedanssille käyttää likiarvokaavaa (Cheng, 1993)

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\epsilon'}\right)} \left(1 + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right). \quad (13.43)$$

Jos ajatellaan tilannetta todellisen RF-signaalin kannalta, tulee muistaa, että signaalin kokonaisenergia muodostuu sekä sähkö- että magneettikentän yhdessä muodostamasta summaenergiasta. Siksi on tarpeen erottaa em. kertoimet kummallekin kentälle erikseen. Samalla muutetaan merkintöjä niin, että signaali voi läpäistä myös rajapintoja, joissa toisella puolella ei ole enää ilmaa, vaan jokin mielivaltainen materiaali. Tämä laajennus on tarpeen, sillä käytännön rakenteissa usein on materiaaleja, joissa on sisäisiä rakenteita. Tästä helposti muistettavana esimerkkinä ovat betoniset sandwich-tyyppiset elementit, joissa on kahden betonikuoren välissä eristekerros. Tämän vuoksi on tarkoituksenmukaisinta esittää seuraavassa tarkastelussa eri materiaalien impedanssien indeksointi niin, että ensimmäiselle materiaalille muuttuja on  $\eta_1$  ja toiselle  $\eta_2$ . Tämän jälkeen materiaalit jatkuvat juoksevalla numeroinnilla eteenpäin. (Shen & Kong, 2011.)

Esimerkiksi ensimmäisen ja toisen materiaalin rajapinnassa heijastus- ja läpäisykertoimet sähkökentille ovat (Shen & Kong, 2011):

$$\rho_E = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \text{ ja } \tau_E = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1}. \quad (13.44)$$

Vastaavasti magneettikentille edellä mainitut kertoimet ovat (Pozar, 2012):

$$\rho_H = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \text{ ja } \tau_H = \frac{2\eta_1}{\eta_1 + \eta_2}. \quad (13.45)$$



Tällöin tehon heijastuskerroin saadaan edellisten yhdistelmästä

$$\rho_P = -\rho_E \rho_H^* = \frac{(\eta_2 - \eta_1)(\eta_1 - \eta_2)^*}{|\eta_1 + \eta_2|^2} = \frac{|\eta_2 - \eta_1|^2}{|\eta_1 + \eta_2|^2} = |\rho|^2, \text{ ja} \quad (13.46)$$

$$\tau_P = \frac{4 \eta_1 \eta_2^*}{|\eta_1 + \eta_2|^2}. \quad (13.47)$$

Rajapintaehtojen mukaan teho säilyy materiaalin pinnassa, joten

$$\rho_P + \tau_P = 1. \quad (13.48)$$

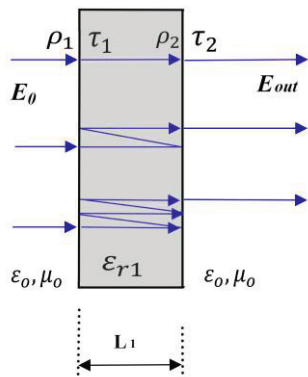
## 13.6 Signaalit ja erilaiset materiaalikerrokset

Tässä kappaleessa käsitellään kerroksellisen materiaalin heijastuksia teoreettisesta näkökulmasta, jolloin materiaalin rajapinnoissa tapahtuvat heijastukset otetaan mukaan rakenteen RF-vaimennuksen arviointiin. Signaalin oletetaan tässä tarkastelussa kohtaavan rakenteen ensimmäisen pinnan lähes kohtisuorasti, ja etenevää aaltoa käsitellään tasoaaltona. Tasoallon käsittelytapa on perusteltu erityisesti alalinkin suuntaan, sillä signaalin ajatellaan etenevän tasopintoina, kun etäisyys lähettävästä antennista (esimerkiksi tukiasemasta) on vähintään muutaman aallonpituuden suuruusluokkaa. Tasoaltotarkastelu sitä vastoin ei aina vastaa tarkasti käytännön tilannetta ylälinkin suuntaan, esim. tilanteessa, jossa lähettäjänä on esimerkiksi lähellä seinä- tai ikkunapintaa oleva matkapuhelin.

### 13.6.1 Rajapinnoissa tapahtuvat heijastukset permittiivisyyden avulla

Seuraavassa on tarkasteltu teoreettisesti tilannetta, jossa on vain yksi homogeeninen kappale, ja jonka rajapinnoissa tapahtuvia ilmiöitä tarkastellaan impedanssien sijaan  $\epsilon_r$ :n näkökulmasta. Tarkastelu muistuttaa läheisesti kappaleessa 13.5.1 kuvattua tapaa, mutta tässä tarkastelun perusteena läpäisy- ja heijastuskertoimille ovat eri materiaalien tunnetut permittiivisyyksien arvot. Aikaisemmin esitetyt impedanssit ovat usein kirjallisuudessa esitetty lähtökohta materiaalien sähköistä käyttäytymistä tutkittaessa, mutta käytännön mittausten menetelmillä tavallisesti saadaan erilaisten materiaalien S-parametrit, ja niiden perusteella laskennallisesti määritellään permittiivisyyksien arvot.

Erilaisten heijastusten teoria on tässäkin näkökulmasta syytä aloittaa yksinkertaisesta homogeenisesta kappaleesta, jossa on kaksi rajapintaa. Tarkastelu aloitetaan tutkimalla heijastuksia rajapinnoissa, mutta sen jälkeen otetaan mukaan tarkasteluun myös rajapinnoissa syntyvät moninkertaiset heijastukset.



**Kuva 13.4** Periaatekuva yhden homogeenisen materiaalin heijastuksista. (Kuva: Asp)

Kuvassa 13.4 olevien pintojen pelkän permittiivisyyden avulla lausutut heijastus- ja läpäisykertoimet  $\rho$  ja  $\tau$  määräytyvät kaavoilla 13.49–13.52. Kertoimien määrittäminen näillä kaavoilla edellyttää materiaalin suhteellisen permittiivisyyden selvittämistä. Tämä voidaan käytännössä tehdä esimerkiksi hyödyntämällä piirianalysaattorin S-parametrien mittaamenetelmiä. (Ida, 2015; Orfanidis, 2016b.)

$$\rho_1 = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} - 1}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} + 1} \text{ ja } \tau_1 = \sqrt{1 - \rho_1^2}, \quad (13.49)$$

$$\rho_2 = \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}}{1 + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}} = -\rho_1, \quad (13.50)$$

$$\tau_1 = \frac{\frac{2}{\sqrt{\epsilon_r}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} + 1} = \frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (13.51)$$

$$\tau_2 = \frac{2}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} + 1} = \frac{2\sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\epsilon_r} + 1}. \quad (13.52)$$

Tässä vaiheessa on syytä huomioida aaltoluvun kompleksinen luonne. Aaltoluku ( $k$ ) on esitelty jo kaavoilla 13.6–13.9, mutta tarkasteltaessa sitä permittiivisyyden näkökulmasta, voidaan kirjoittaa aaltoluvulle yksityiskohtaisempi kuvaus

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\frac{\varepsilon_r'}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2} \right)} + j \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\frac{\varepsilon_r'}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2} - 1 \right)}. \quad (13.53)$$

Jos suhde  $\varepsilon_r'' / \varepsilon_r'$  on pieni, voidaan aaltoluvulle käyttää likiarvokaavaa

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\varepsilon_r'} \left( 1 + j \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r' \sqrt{2}} \right) = \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\varepsilon_r'} \left( 1 + j \tan \delta \frac{1}{\sqrt{2}} \right). \quad (13.54)$$

On muistettava, että etenemisvakiolla  $\gamma$  ja aaltoluvulla  $k$  reaali- ja imaginääriosat ovat eri rooleissa, ja voidaan muotoilla muistisääntö, jonka mukaan (Pozar, 2012; Shen & Kong, 2011)

$$\gamma = -jk = \alpha - j\beta = k_i - jk_r, \quad (13.55)$$

jossa aaltoluvun  $k$  reaaliosta kuvaa vaiheen muutosnopeutta, eli toimii etenemiskertoimena, ja imaginääriosaa kuvaa signaalin vaimentumista.

### 13.6.2 Kentät ja heijastukset useissa rajapinnoissa

Seuraavassa tutkitaan signaalin heijastumista kummassakin rajapinnassa ja signaalin kulkua materiaalinäytteen läpi (Chalapat, Sarvala, Li, & Paraoanu, 2009; Ida, 2015; Orfanidis, 2016b). Tässä tarkastelussa käytetään kuvan 13.4 rakennetta ja merkintöjä. Kaavassa 13.56 oleva ensimmäinen termi kuvaa materiaalin läpi suoraan edennyttä signaalin osaa ja seuraavat termit käsittelevät eri pinnoista heijastuneita komponentteja.

$$E_{out} = E_0 \tau_1 \tau_2 e^{-jk(L_1)} - E_0 \rho_1 \rho_2 \tau_2 \tau_2 e^{-jk(3L_1)} + E_0 \rho_1^2 \rho_2^2 \tau_1 \tau_2 e^{-jk5(L_1)} + \dots \quad (13.56)$$

Mikäli kappaleen häviöt eivät ole lähes nollan tasoa, vaimentuvat heijastuneet komponentit lopulta ja kaava yksinkertaistuu muotoon (Chalapat et al., 2009):

$$E_{out} = \frac{(1 - \rho_1^2) e^{-jkL_1}}{1 - \rho_1^2 e^{-j2kL_1}} E_0 . \quad (13.57)$$

Jos oletetaan, että materiaalikappale on niin paksu tai sen sisäiset häviöt ovat niin suuret, että moninkertaiset heijastumat voidaan unohtaa, yksinkertaistuu tilanne kaavan 13.56 ensimmäisen termin muotoon

$$E_{out} = E_0 \tau_1 \tau_2 e^{-jkL_1} , \quad (13.58)$$

jolloin kappaleen takapuolella ja etupuolella olevien kenttien suhde on (Orfanidis, 2016b):

$$\frac{E_{out}}{E_0} = |\tau_1 \tau_2| |e^{-j(k_r + k_i)L_1}| = |\tau_1^2 \sqrt{\epsilon_r}| e^{k_i L_1} . \quad (13.59)$$

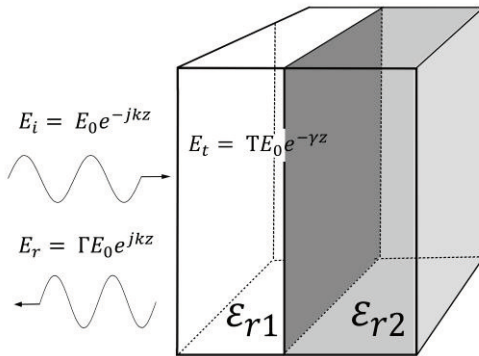
Näin voidaan kappaleen vaimennukselle kirjoittaa kahteen eri osaan jakautuva vaimennus seuraavasti (Nelson, 1999):

$$20 \text{Log}_{10} \frac{E_{out}}{E_0} = 20 \text{Log}_{10} (|1 - \rho_1^2|) + 20 \text{Log}_{10} (e^{k_i L}) , \quad (13.60)$$

jossa ensimmäinen termi kuvaa kappaleen sisään ensimmäisen rajapinnan läpi tunkeutunutta signaalin osaa ja toinen osa materiaalissa tapahtuvaa signaalin heikkenemistä.

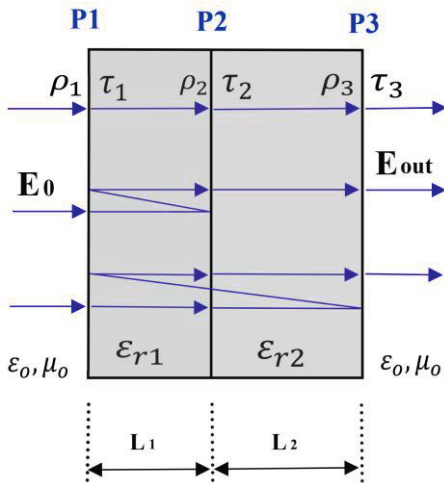
### 13.6.3 Kentät ja heijastukset kerroksellisessa materiaalissa

Seuraavassa teoreettisessa tarkastelussa on kerroksellista materiaalia käsittelevä käytännön tilanne yksinkertaistettu niin, että esitykseen on otettu materiaali, jossa on vain yksi sisäinen rajapinta normaalien kappaleen etu- ja takapintojen lisäksi. Rakenne esitetään kuvassa 13.5.



**Kuva 13.5** Materiaalinäyte, jossa on kaksi materiaalia liitetty yhteen. (Kuva: Asp)

Käytännössä tämänkaltainen tilanne syntyy silloin, kun kaksi erilaista materiaalia liitetään yhteen. Seuraavassa kuvassa 13.6 tarkastellaan lähemmin edellä kuvatun materiaalin rajapinnoissa tapahtuvia sähkömagneettisen aallon heijastuksia. Kuvassa yksinkertaisuuden vuoksi rajoitutaan tarkasteluun, jossa lähetetyn signaalin oletetaan saapuvan materiaalin ensimmäiseen rajapintaan vasemmalta, jolloin pinnalla näkyvä sähkökenttä on nuolen suuntaan etenevä  $E_0$ . Signaalin ei oleteta vaimenevan itse rajapinnassa, jolloin signaali on välittömästi rajapinnan jälkeen jakautunut kahteen osaan, heijastus- ja läpäisykertoimien  $\rho_1$  ja  $\tau_1$  mukaisesti. Koska signaalin ei oleteta vaimentuvan rajapinnassa, pätee yhtälö  $\rho_1 + \tau_1 \approx 1$ . Tarkasti ottaen kaava pätee silloin, kun rajapinta on äärettömän ohut ja häviötön. Käytännössä esiintyy kuitenkin joitakin tilanteita, joissa rajapinnassa voi olla hyvin ohut mutta häviöllinen kalvo. Tästä esimerkkinä ovat esim. ikkunoiden selektiivipinnat, joissa pinnoite on hyvin ohut ja heijastava kalvo. Tämän kalvon vaikutukset näkyvät häviöissä, läpäisyissä sekä heijastuksissa. Edellä mainittu kalvo voidaan ottaa huomioon laskennassa erillisenä pintana, mutta silloin kalvon paksuus ja ominaisuudet tulee tuntea tarkasti. Käytännössä riittävään tarkkuuteen yleensä päästään olettamalla kalvo äärettömän ohueksi, tietyn pintaresistanssin omaavaksi kalvoksi. Tässä kuvatussa teoriaosuudessa kuitenkin lähtökohdaksi otetaan yleinen rakenne, jossa materiaalien pinnoilla ei ole ohuita kalvomaisia pinnoitteita vaan homogeeniset materiaalit on liitetty toisiinsa suoraan. (Zurita-Sánchez, Halevi, & Cervantes-González, 2009.)



**Kuva 13.6** Kappaleen rajapinnoissa syntyvät heijastukset. (Kuva: Asp)

Kuva 13.6 esittää tilannetta, jossa ylin sinisellä merkitty viiva on suoraan kappaleen läpi edennyt signaalin osa. Keskimmäisellä sinisellä viivalla on esitetty signaalin osa, joka ei heijastu ensimmäisestä rajapinnasta P1, eli jatkaa ensimmäisen materiaalin läpi etenemiskertoimen  $\tau_1$  osoittamalla tavalla. Sen jälkeen ensimmäisen materiaalin läpäissyt signaalin osa kohtaa toisen rajapinnan P2, jossa signaali heijastuu heijastuskertoimen  $\rho_2$  määräämällä tavalla. Tämän jälkeen signaali etenee takaisin alkuperäistä tulosuuntaansa vastaan kohti ensimmäistä rajapintaa P1, jossa signaali heijastuu kertoimeen  $-\rho_1$  perustuen. Tämän jälkeen signaali jatkaa alkuperäiseen suuntaansa läpi keskellä olevan rajapinnan P2, jonka jälkeen se etenee toisessa materiaalissa. Tässä materiaalissa kenttien etenemistä kuvataan merkinnällä  $\tau_2$ . (Orfanidis, 2016a; Orfanidis, 2016b.)

Tässä vaiheessa ylimmäisellä sinisellä viivalla esitettyyn, suoraan kappaleen läpi edenneeseen signaaliin yhdistyy toinen (kuvan keskellä olevilla sinisillä viivoilla piirretty) komponentti, joka on viivästynyt  $2L_1$  vastaavan matkan. Tällä matkallaan se on myös vaimentunut kulkiessaan kolme kertaa ensimmäisen materiaalin läpi ja kerran toisen materiaalin läpi.

Kuvassa 13.6 alimmaisena oleva sininen viiva kuvaa vastaavasti tilannetta, jossa osa signaalista kulkee suoraan rajapintojen P1 ja P2 läpi, mutta heijastuu viimeisessä rajapinnassa P3. Tämä heijastus kulkee takaisinpäin läpi rajapinnan P2 ja heijastuu uudelleen rajapinnassa P1.

Edellä esitettyssä kuvassa on esitetty suoraan edenneen signaalin osan lisäksi vain kaksi heijastustapaa, mutta luonnollisesti heijastuksia voi tapahtua kaikissa rajapinnoissa, joten niiden määrä kasvaa nopeasti, erityisesti kun kysymyksessä on moni-

kerroksinen rakenne. Toisaalta materiaaleissa, joilla on suhteellisen suuri vaimennus, monikertaiset heijastukset vaimenevat huomattavasti matkatessaan useita kertoja vaimentavan materiaalin läpi. (Orfanidis, 2016a.)

Kuvat 13.5 ja 13.6 esittävät heijastuspinnan analysoinnin periaatteen rakenteelle, jossa on kaksi toisiinsa liitettyä materiaalia. Tilannetta voidaan matemaattisesti esittää seuraavalla kaavalla 13.61.

$$E_{out} = E_o \tau_1 \tau_2 \tau_3 e^{-jk(L_1+L_2)} - E_o \tau_1 \rho_2 \rho_1 \tau_2 \tau_3 e^{-jk(3L_1+L_2)} + E_o \tau_1 \tau_2 \rho_3 \tau_2 \rho_1 \tau_2 \tau_3 e^{-jk3(L_1+L_2)} + \dots \quad (13.61)$$

Edellä esitetyn kaavan heijastus- ja läpäisykertoimet riippuvat suoraan impedanssien ja heijastus- ja läpäisykertoimien suhteista rajapinnan molemmilla puolilla kaavojen 13.49–13.52 mukaan.

Edellä esitettyjen kaavojen käytössä tulee huomioida, että niissä signaalien oletetaan tulevan kohtisuoraan materiaalien pintoja vastaan.

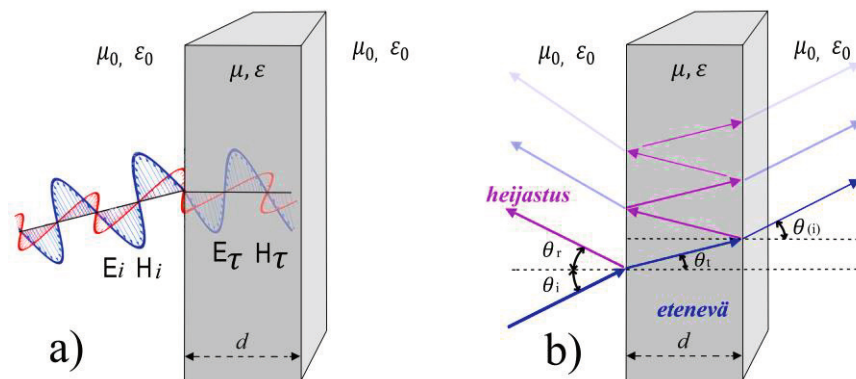
## 13.7 Vinosti saapuvat signaalit

Tavallisesti materiaaleja tutkittaessa signaalien oletetaan saapuvan materiaalin pintaan nähden kohtisuorassa kulmassa, mutta tämä on tosiasiaa vain yleisen tapauksen yksi erikoistapaus. Käytännön tilanteessa signaalin tulokulmasta ei yleensä voi sanoa mitään, sillä tukiaseman ja siihen liittyneen matkaviestinlaitteen välinen signaali koostuu monitiekomponenteista, joiden reitti voi olla hyvinkin erilainen ja monimutkainen. Silloinkaan, kun dominoiva reitti on suora etäisyys tukiaseman ja esim. puhelimen välillä, reitin ei tarvitse olla suorassa kulmassa rakennuksen seinärakenteisiin nähden. Tämän vuoksi on syytä ottaa teoreettiseen tarkasteluun myös signaalin tulokulman vaikutus, jolloin kaavat muodostuvat edellisiä huomattavasti monimutkaisimmiksi.

Tässä yhteydessä on tarpeen määrittellä polarisaatio, joka on kuvaus kentän suunnasta tietyssä avaruuden pisteessä ja amplitudin käyttäytymisestä ajan funktiona. (Räsänen & Lehto, 2003.) Polarisaatio voidaan jakaa kahteen komponenttiin, joita ovat horisontaalinen, eli kohtisuora polarisaatio ( $\perp$ ) ja vertikaalinen, eli yhdensuuntainen polarisaatio ( $\parallel$ ). (Wallen, 2016.)

Seuraavasta kuvasta 13.7 on helppo havaita polarisaation merkitys signaalin heijastumiseen. Tunnetusti vapaassa tilassa kulkevassa sähkömagneettisessa aallossa ovat sähkö- ja magneetikentät 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Kun signaali tulee vinossa kulmassa materiaalinäytteen pintaan, sähkö- ja magneetikentästä vain

toinen on (jos kumpikaan) pinnan suuntainen ja ainakin toinen kohtaa pinnan mieltävaltaisessa kulmassa.



**Kuva 13.7** Aallon eteneminen (a) ja heijastuminen (b) materiaalinäytteessä. (Kuva: Asp)

Vinosti materiaalin pintaan nähden saapuvan signaalin heijastuminen ja läpäisy riippuu signaalin polarisaatiosta. Pinnan normaaliin nähden vinosti tulevan signaalin periaate on esitetty kuvassa 13.7. Kuvan vasemmanpuoleisessa osassa on nähtävissä sähkö- ja magneettikentän erilainen kohtauskulma materiaalin pintaan ja sen normaaliin verrattuna. Tässä kuvassa punainen sinimuotoinen värähtely edustaa sähkökenttää, ja sinisellä esitetty aaltomuoto magneettikenttää. Koska sähkökenttä on kohtisuorassa materiaalin pinnan tasoa vastaan, vastaa kuvan tilanne horisontaalista, eli kohtisuoraa polarisaatiota. Kuvan oikeanpuoleisesta osasta nähdään kulmat, joihin kaavoissa 13.62–13.65 viitataan. Koska käytännön signaalin suuntaa eikä polarisaatiota yleensä tunneta tarkasti, on perusteltua tarkastella pysty- ja vaakapolarisaatiota erikseen. Todellinen polarisaatio ei yleensä ole tarkasti kumpikaan näistä, vaan näiden kahden yhdistelmä. (Pozar, s. 39.)

Horisontaaliselle polarisaatiolle

$$\rho = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, \text{ ja} \quad (13.62)$$

$$\tau = \frac{2 \eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}. \quad (13.63)$$

Vertikaaliselle polarisaatiolle

$$\rho = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}, \text{ ja} \quad (13.64)$$



$$\tau = \frac{2 \eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} . \quad (13.65)$$

On huomattava, että silloin kun tarkastellaan suoraan materiaalia kohti etenevää signaalia, eli kun  $\theta_i = \theta_r = \theta_t = 0$ , palautuvat kaavat yksinkertaisten peruskaavojen 13.42 ja 13.45 muotoon.

Tässä kirjassa kuitenkin ole tarpeen käsitellä vinoja signaaleja teoreettisesti tämän enempää, sillä mittaukset yleensä olettavat signaalin tulevan tutkittavaan materiaaliin kohtisuoraan. Vinosti tulevien signaalien osalta voidaan todeta yleisesti vaimennuksen kasvavan, sillä materiaalien osalla signaalit kulkevat niissä pidemmän matkan. Toisaalta vinosti tulevat signaalit voivat aiheuttaa yllätyksiä silloin kun vinoille tulokulmille avautuu poikkeavia reittejä materiaalien liitos- tai saumakohdissa.

# 14 MITTAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään rakentamisessa käytettävien materiaalien RF-vaimennusten mittauksiin soveltuvia ja niissä tavallisimmin käytettäviä menetelmiä. Mittausmenetelmät itsessään ovat yleisesti tunnettuja ja laajasti käytössä erilaisten materiaalien radioteknisiin ominaisuuksiin liittyvissä mittauksissa. Tässä kappaleessa näkökulma on erityisesti rakennusmateriaalien mittausten käytännön toteutuksissa ja niiden haasteissa.

Seuraavassa esiteltävät mittausmenetelmät on valittu niin, että niissä tarvittavat mittalaitteet ovat yleisesti kaupallisesti saatavissa, joskin mittalaitteiden ohjaamiseen ja tulosten käsittelyyn tarvittavat ohjelmistot on mittaajan muokattava kulloiseenkin tarkoitukseen sopiviksi tai hankittava erikseen. Lähtökohtana mittausmenetelmien käsittelyyn on siis tarjota esimerkiksi erilaisten rakennustuotteiden valmistajille lyhyt katsaus materiaalien RF-vaimennuksen tutkimiseen. Toisaalta radiotekniikkaan enemmän perehtyneille henkilöille saattavat monimuotoisten rakennusmateriaalien mittaamisen erityiskysymykset avata uusia näkökulmia.

Erilaisten materiaalien sähköisten ominaisuuksien tunteminen tuli entistä tärkeämmäksi jo 1970-luvulla, jolloin elektroniikan käyttö eri elämän alueilla kehittyi nopeammin kuin missään aikaisemman historian vaiheessa. Silloin alkoi erilaisten sähköisten laitteiden yleistyminen ja luonnollisesti elektronisten komponenttien tai piirien kanssa kosketuksiin joutuvien materiaalien ominaisuudet oli tunnettava. Hyvin nopeasti esiin tuli tarve tuntea myös niiden aineiden käyttäytyminen sähköisissä kentissä, jotka eivät olleet suorassa kontaktissa elektroniikan osiin, mutta olivat lähellä elektronisia piirejä. Näistä esimerkkeinä voi mainita laitekotelot ja antennien koteloinnit. Luonnollisesti elektronisten laitteiden yhä yleistyessä, materiaalien ominaisuuden sähkömagneettisen säteilyn näkökulmasta kiinnostivat yhä laajemmalla sovellusten alueella.

## 14.1 Muut kuin vapaan tilan mittauksiin perustuvat menetelmät

Seuraavassa mittausmenetelmien tarkastelu aloitetaan kuvaamalla yleisluontoisesti erilaisten materiaalien sähköisiä ominaisuuksia selvittävien mittausmenetelmien peri-

aatteita. Päähuomio tässä väitöstutkimuksessa kohdistetaan kuitenkin niin sanotun vapaan tilan mittauksiin, joita käsitellään tarkemmin kappaleissa 14.2 ja 14.6. Vapaan tilan vaimennuksen mittaus liittyy erityisesti rakennusmateriaalien mittaamiseen, sillä tällä menetelmällä on helppo mitata laajojen levymäisten kappaleiden sähköisiä ominaisuuksia. Ensin kuitenkin esitellään muutamia muita yleisesti käytettäviä muita menetelmiä, joilla materiaalien permittiivisyyttä tutkitaan.

### 14.1.1 Ensimmäiset aaltoputkiin perustuvat mittausmenetelmät

Ensimmäiset materiaalien kartoittamiseen käytetyt menetelmät olivat muunnelmia uriin perustuvasta menetelmästä, jossa tutkittava materiaali liitetään osaksi aaltoputkeen liitettyä oikosulkukappaletta. Tälle konstruktiolle mitataan ensimmäiseksi kompleksinen impedanssi. Tämän jälkeen järjestelmää siirretään neljännesaallon pituisen matkan alkuperäisestä sijainnista ja mitataan uudelleen. Nyt mittauksessa näkyy avoimen piirin impedanssi. Neljäsosa-aallonpituutta vastaava etäisyyden siirto riippuu luonnollisesti täysin mittauksessa käytetystä taajuudesta, joten mittaus tulee suorittaa erikseen jokaiselle kiinnostavalle taajuuspisteelle. (Amiet, 2003; Barlow & Cullen, 1950; Birks, 1948; Glancy B, 1987.)

### 14.1.2 Kapasitanssiin perustuvat menetelmät

Vanha ja aikaisemmin paljon käytetty menetelmä permittiivisyyden selvittämiseksi eristeinä pidettäville materiaaleille on kapasitanssin mittaukseen perustuvat menetelmät ja niiden muunnokset. Yksinkertaisimmillaan menetelmässä muodostetaan mitattavasta levymäisestä materiaalista johtavien pintojen väliin eristeenä toimiva kerros, joka muuttaa syntyvän kondensaattorin kapasitanssin arvoa suhteessa tilanteeseen, jossa eristeenä toimii vapaa ilma. Kapasitanssin arvo määräytyy alla olevan kaavan 14.1 mukaisesti (Tereshchenko, Buesink, & Leferink, 2011):

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (14.1)$$

jossa  $C$  = kapasitanssin lukuarvo,  $\epsilon_r$  ja  $\epsilon_0$  ovat materiaalin suhteellinen permittiivisyys ja tyhjiön permittiivisyys,  $A$  on levypintojen ala [ $\text{m}^2$ ] ja  $d$  on eristeen (tutkitavan materiaalin) paksuus [ $\text{m}$ ]. Kapasitanssin ero havaitaan mittaamalla ensin tilanne, jossa levyjen välissä on vain ilmaa, jolloin kaavassa vaikuttaa vain  $\epsilon_0$ . Asettamalla levyjen

väliin tutkittava materiaali, saadaan suoraan kapasitanssin muutos. Tämän muutoksen perusteella voidaan melko suoraviivaisesti päätellä materiaalin permittiivisyys. Keskeisimpänä rajoituksena kapasitanssiin perustuvilla menetelmillä on niiden rajoittuminen alhaisille taajuuksille. Tyypillisenä ylärajana näille mittauksille pidetään 1 GHz taajuutta. (Amiet, 2003; Rzepecka & Stuchly, 1975; Tereshchenko et al., 2011.)

### 14.1.3 Aaltoputkimittaukset

Materiaalien sähköisten ominaisuuksien määrittämiseksi tehtävät mittaukset suoritetaan usein käytettävissä olevien aaltoputkien avulla. Näiden perusrakenteet ovat joko suorakulmaisia tai ympyrälieriöitä. Koaksiaalisiin rakenteisiin perustuvat aaltoputket tarjoavat mahdollisuuden laajakaistaisiin mittauksiin laajalla taajuusalueella, mutta mitattavan kappaleen sovittaminen aaltoputkeen on haastavaa. Suorakaiteen muotoiseen rakenteeseen mitattavan kappaleen sovittaminen on luonnollisesti helpompaa, sillä sen työstäminen tavallisesti käytettävissä olevilla työkaluilla on yksinkertaisempaa kuin pyöreiden muotojen aikaansaaminen. Rajoituksena suorakaiteen muotoisien aaltoputkien käytölle on kuitenkin paljon suppeampi taajuusalue. (Abbas, Pollard, & Kelsall, 2001; Bois, Handjojo, Benally, Mubarak, & Zoughi, 1999; Dominek & Park, 1989; Janezic & Williams, 1997; Sheen, Mao, & Liu, 2009.) Kappaleiden sovittaminen aaltoputkimittauksiin on käytännössä mahdollista vain tasapintaisille ja homogeenisille materiaaleille, ja esimerkiksi hiekkaan tai kipsiin perustuvia rappauslaasteja ei ole mahdollista työstää niin tasaisiksi kuin niiden tarkka sovittaminen aaltoputkeen vaatisi.

Vaikka koaksiaaliseen kytkentään tai koaksiaalijohtoihin liittyvät ratkaisut mahdollistavat laajojen taajuusalueiden mittaukset, rajoitutaan tavallisesti alle 10 GHz mittaustaajuuksiin. Syynä tähän rajoitukseen on mittaustarkkuuden heikkeneminen mitattavien kappaleiden fyysisten mittojen lyhentyessä suhteessa aallonpituuksiin. (Rohde & Schwarz, 2012; Varadan, Ro, & Varadan, 1994.)

Koaksiaaliseen kytkentään liittyy erityisvaatimuksena mitattavan kappaleen hyvin tarkka sovittaminen pyöreään aaltoputkirakenteeseen. Yleisesti käytetyt mitat ovat ulkohalkaisijan osalta 7,00 millimetriä ja sisähalkaisijalta 3,04 millimetriä. Näytekanavan pituus on tavallisesti 100 millimetriä. Tarkkuusvaatimus pituudelle on kuitenkin paljon karkeampi kuin ulko- ja sisähalkaisijoille, sillä pituuden vaihtelut voidaan laskeudollisesti kompensoida. Johteen pituus näkyy erityisesti mittaussignaalin vaiheessa. Näytteen työstäminen täysin pyöreäksi ulkopuolelta ja siihen tarkalleen 3,04 millimetrin reiän poraaminen on yleisestikin vaikeaa, ja nämä vaatimukset rajoittavat

tähän mittaamenetelmään soveltuvia materiaaleja. Lisäksi mitattavalta materiaalilta vaaditaan suurta homogeenisuutta, sillä pienetkin poikkeamat rakenteessa aiheuttavat merkittäviä virheitä mittaustulokseen. Näytteen paksuudella on myös omat rajoituksensa. Jos näytteen sisällä oleva signaali on täsmälleen neljäsosa mittaussignaalin aallonpituudesta, syntyy summautuvista heijastuksista merkittävä virhe tulokseen. (Cataldo et al., 2011; Makul, Rattanadecho, & Agrawal, 2014.)

Koaksiaalisen kytkennän etuna on kuitenkin laajan taajuusalueen mittaumahdollisuus vain yhtä mittajärjestelyä käyttäen, joten se on suosittu menetelmä sille soveltuville materiaaleille parametrien testaamiseen mikroaaltoalueella. (Amiet, 2003; Rohde & Schwarz, 2012.)

#### 14.1.4 Onteloresonaattorimittaukset

Onteloresonaattori-ilmiöön perustuvissa mittauksissa valmistetaan mitattavaa kappaletta varten säännöllinen, yleensä ympyrälieriön tai suorakaiteen muotoinen, suljettu kappale. Mitattavaa materiaalia ympäröivään kappaleeseen jätetään kaksi pientä aukkoa, joista toisella syötetään värähtely putkeen sijoitettuun materiaaliin ja toiseen aukkoon kytketään mittapiste värähtelyn taajuuden ja voimakkuuden toteamiseksi. Onteloresonaattori siis perustuu mitattavan kappaleen omaan resonanssitaajuuteen, joka voidaan suljetun kappaleen sisältä todeta. Niin kuin useimmissa mittaajärjestelmissä, joissa mitattava materiaalinäyte asetetaan tavalla tai toisella osaksi ympäröivää metallirakennetta, muodostuvat näytteen epätasaisuudesta, riittämättömästä reunojen viimeistelystä tms. aiheutuneet ilmaraot merkittäväksi virhelähteeksi. Epätasisten pintojen epäyhtenäisyys ja paikalliset poikkeamat tekevät virheestä paitsi vaikeasti todettavan, myös matemaattisessa analyysissä hankalasti huomioon otettavan tekijän. Yksi tärkeimmistä virhelähteistä on tutkittavan materiaalinäytteen paksuuden vaihtelut. (Agilent Technologies, 2005; Makul et al., 2014.)

Resonanssiin perustuvat permittivisyyden mittaamenetelmät ovat käyttökelpoisia hyvän tarkkuutensa vuoksi erityisesti vähähäviöisillä materiaaleilla. Tässä yhteydessä vähähäviöisinä pidetään materiaaleja, joille  $\tan \delta$  -arvo on alle 0,005. Keskimääräisinä häviöitä pidetään silloin kun  $0,005 < \tan \delta < 0,1$  (Baker-Jarvis, 1998). Resonanssimenetelmien käyttökelpoisena taajuusalueena pidetään muutamien satojen megahertsien taajuuksista muutamien kymmenien gigahertsien alueeseen. Resonaattorin ympärillä olevan ontelon pituutta säätämällä voidaan vaikuttaa mittauksen taajuusalueeseen. Onteloon syntyy seisova aalto kappaleen ollessa resonanssissa. Resonanssi syntyy taajuudella, jolla ontelon pituus on taajuutta vastaavan aallonpituuden

puolikkaan monikerta. Koska monikertoja on  $1,2,3\dots n$ , on periaatteessa mahdollisia mittauspisteitä äärettömästi. (Makul et al., 2014; Räsänen & Lehto, 1996.)

Onteloresonaattorit perustuvat nimensä mukaisesti kappaleen resonanssiin, jolloin mittaustavan omat häviöt ovat pienet. Häviöitä syntyy lähinnä ontelorakenteen seinien omista häviöistä, jotka voidaan ottaa huomioon tulosten analysoinnissa las-kennallisesti. (Baker-Jarvis et al., 1998.) Poikkeuksellisen pienet häviöt selittyvät onteloresonaattorin tapauksessa sillä, että metallisen ontelon vuoksi järjestelmän sisä- ja ulkopuolen välillä ei ole sähkö- ja magneettikenttien kannalta yhteyttä, joten häviöitä ei synny säteilystä. Lisäksi korkeilla taajuuksilla hyvin johtava pinta heijastaa aal-lot lähes häviöttömästi.

Onteloresonaattoriin kytkeytyminen tapahtuu yleensä kytkentälenkin tai aukon avulla. Kytkeytyminen tulee varmistaa niin, että esim. kytkentälenkin paikka on koh-tisuoraan magneettikentän maksimikohtaa vastaan. Vastaavasti aukkoa käytettäessä tehon siirtyminen on tehokkainta, kun onteloon kytkeytyvällä aaltojohdolla ja reso-naattorilla on molemmilla yhteinen aukon kohdalla oleva kenttäkomponentti. (Räi-sänen & Lehto, 1996.)

Resonaattorirakenteen ei välttämättä tarvitse olla onteloresonaattori, muunkinlai-sia värähtelyyn perustuvia menetelmiä on tutkittu ja osoitettu käyttökelpoisiksi (Ba-ker-Jarvis et al., 1998).

Edellä kuvatut menetelmät toimivat hyvin ja antavat tarkkoja tuloksia, mutta ra-kennusmateriaalien sähköisten parametrien mittauksiin soveltuvat paremmin niin sa-notun vapaan tilan vaimennukseen perustuvat menetelmät, joita käsitellään seuraavassa kappaleessa tarkemmin.

## 14.2 Vapaan tilan vaimennusmittausten periaate

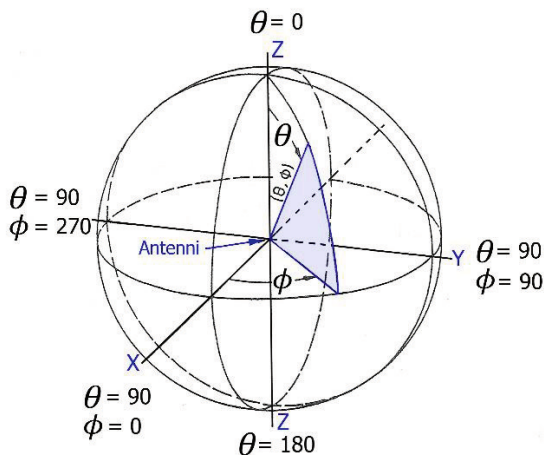
Vapaan tilan mittauksissa käytetään mitattavana kappaleena levymäistä pintaa, jonka molemmiin puolin asennetaan antennit. Antenneja syötetään tavallisesti generaatto-rilla tai piirianalysointorilla. Mitattava kappale voi olla pinta-alaltaan laaja tai vain muutamien kymmenien millimetrien kokoluokkaa. Ensimmäiset mitattavan kappaleen koon vaatimuksista tulevat luonnollisesti matalimmasta mittaustaajuudesta ja itse mittaajajärjestelmän asettamista vaatimuksista. Menetelmän etuna on se, että kap-paletta ei vaurioiteta ja mittauksella on mahdollista tutkia kappaleen heijastus- ja lä-päisyominaisuuksia laajalla taajuusalueella. (Akay, Kharkovsky, & Hasar, 2001; Makul et al., 2014; Tereshchenko et al., 2011.) Vapaan tilan vaimennukseen perustuvissa järjestelmissä mitattava materiaali ei ole välittömässä kosketuksessa mittalaitteisiin,

joten menetelmä sopii vaativiin mittauksiin, joissa ympäristörasitus on suurempi kuin tyypillisissä laboratorio-olosuhteissa tai esimerkiksi mitattavan kappaleen lämpötila tai kosteus on suuri. (Agilent Technologies, 2005.) Vapaan tilan mittauksissa tulee huomiota kiinnittää erityisesti laitteiston kalibrointiin, sillä tämän menetelmän käytössä kalibrointi on monimutkaisempaa kuin muissa menetelmissä. (Agilent Technologies, 2005; Friedsam & Biebl, 1997; Orlob, Reinecke, Denicke, Geck, & Rolfes, 2013.)

Koska antennit ovat keskeisiä komponentteja mittausjärjestelmissä, joissa tutkitaan materiaalien RF-vaimennusta ja materiaalien parametrejä, on tarpeen luoda lyhyt katsaus antennien ja erityisesti torviantennien toimintaan. Tämän kappaleen tarkoituksena on johdattaa käsittely kohti rakennusmateriaalien mittauksissa esiin tulevia kysymyksiä antennien tyypeistä ja sijoitteluista mitattavan rakenteen ympärille.

### 14.2.1 Antennien säteilykuvio

Koska materiaaleja mitattaessa tavallisimmin käytetään kahta samanlaista antennia, joiden väliin tutkittava materiaali sijoitetaan, on todettava, että antennit ovat muutamia erityistapauksia lukuun ottamatta yleisesti resiprookkisia. Käytännössä tämä tarkoittaa antennien toimivan samalla tavoin lähetys- ja vastaanottoantenneina. (Räisänen & Lehto, 1996.) Antennit eivät säteile ympäristöönsä kaikkiin suuntiin, vaan antenneille ilmoitetaan aina säteilykuvio. Kulmien funktiona ( $\theta, \phi$ ) ilmoitettavan säteilykuvion perusteella voidaan arvioida antennin säteilevän sähkömagneettisen tehon kentänvoimakkuutta, tehotiheyttä ja polarisaatiota. Kulmia on kaksi, joista toinen on elevaatio- ja toinen atsimuuttikulma.



**Kuva 14.1** Antennin säteilyn kuvaus pallokoordinaatistossa. (Räisänen & Lehto, 1996, muokattu)

Koska antennin säteilyä on kuvattava kolmiulotteisesti, on olemassa käyttötarkoituksesta riippuen erilaisia koordinaatistojärjestelmiä. Kuvassa 14.1 on esitetty pallokoordinaatisto, jossa antennin säteilylähde on sijoitettu origoon. Toisinaan säteilykuviolla tarkoitetaan suuntakuviota, jolla kuvataan antennin säteilemää tehoitiheyttä  $P(\theta, \phi)$ , ja toisinaan säteilyn kentänvoimakkuuden ja kulman funktiota  $E(\theta, \phi)$ . Yleisimmin käytössä on normalisoitu suuntakuvio  $P_n(\theta, \phi)$ , jossa säteilyn maksimi normeerataan ykköseksi tai 0 dB:ksi. Tällöin  $E_n(\theta, \phi)$  saadaan ottamalla normalisoidusta suuntakuvioista neliöjuuri. (Räisänen & Lehto, 1996.)

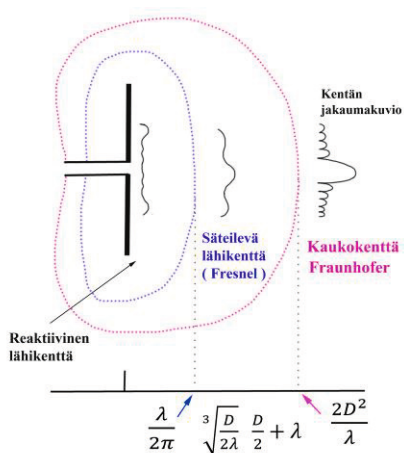
### 14.3 Antennien lähi- ja kaukokenttä

Varsin usein erilaisten materiaalien RF-vaimennuksia tai sähköisiä parametrejä mitattaessa nousee esiin kysymys sopivasta antennien etäisyydestä toisiinsa ja mitattavaan kappaleeseen nähden.

Kysymys on aiheellinen ja tyhjentävää vastausta on vaikea antaa. Antenneihin ja niiden sijoitteluun liittyy muutamia suureita ja ilmiöitä, jotka mittauksia suunniteltaessa on syytä tuntea. Ensimmäinen ja tärkein niistä on lähikentän ja kaukokentän välinen ero.

Tavallisesti antennin pääasiallisen säteilyn suuntainen ympäristö jaetaan kolmeen alueeseen tai vyöhykkeeseen. Vyöhykejaon periaate on esitetty kuvassa 14.2. (Gregson, McCormick, & Parini, 2007; Yaghjian, 1986.)

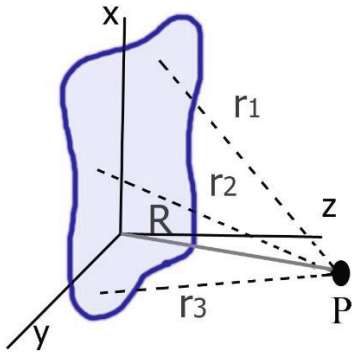




**Kuva 14.2** Antennin läheisyydessä olevien kenttien vyöhykejako. (Gregson, McCormick, & Parini, 2007, muokattu)

Ensimmäinen on lähinnä antenna oleva niin sanottu reaktiivinen lähikenttä, jossa nimensä mukaan kentän reaktiivinen osa on merkittävästi säteilevää osaa suurempi. Tämä reaktiivinen osa vaimenee kuitenkin nopeasti etäisyyden kasvaessa varsinaiseen säteilevään elementtiin, ja tässä vaiheessa säteilevästä lähikentästä muodostuu hallitseva kenttätyyppi. Reaktiivisen lähikentän jälkeenkin ollaan vielä lähikentän alueella, mutta nyt lähikentän säteilevällä alueella. Tällä alueella säteilyn tehon jakauma tiettyyn suuntaan riippuu etäisyydestä antenniin. Lähikentän jälkeen siirrytään kaukokenttään, joka jatkuu periaatteessa äärettömiin. (Capps, 2001; Johnson, R. C., Ecker, & Hollis, 1973.)

Antennin geometrian ja havaintopisteen välisten suuntavektoreiden periaatetta kuvaa seuraava kuva 14.3.



**Kuva 14.3** Tasomaisen säteilijän eri pisteiden etäisyyden periaatekuva havaintopisteestä P. (Johnson, 1973)

Kuva 14.3 esittää periaatteen, jossa antennielementtien muodostama kokonaisuus muodostaa sinisellä merkityn, X/Y-tasossa olevan pinnan. Antenni siis toimii tässä esimerkissä kuin tasomainen säteilijä. Tarkasteltaessa antennia eri havaintopisteistä, joita kuvassa edustaa vain yksi, P, kaikki tasopinnalta havaintopisteeseen kulkevat vektorit  $r_1, r_2 \dots r_n$  eroavat suunnaltaan ja pituudeltaan. Tässä tilanteessa havaintopisteen voidaan katsoa olevan reaktiivisen lähikentän alueella. (Johnson, R. C. et al., 1973.)

### 14.3.1 Reaktiivinen lähikenttä

Reaktiivisen lähikentän yleisesti katsotaan jatkuvan karkeasti ilmaistuna  $\lambda / 2\pi$  -etäisyydelle antennin pinnasta, mutta lähikentän mittauksissa on todettu reaktiivisen lähikentän realistisemmän rajan olevan aallonpituuden suuruusluokkaa. (Yaghjian, 1986.)

Teoreettisesti tarkasteltuna antennien reaktiivinen kenttä on mahdollista määrittellä Poyntingin lauseen ja vektoripotentialien avulla. On osoitettavissa, että antenniin sisään tulevan signaalin kohtaavan impedanssin reaktiivinen osa määräytyy osin antennia ympäröivien kenttien kompleksisen Poynting-vektorin imaginaariosan perusteella. Jos tarkastellaan vektoripotentialin integraalia ottamalla siitä roottori, saadaan magneetikenttä ja ottamalla edellisestä magneetikentästä matemaattisesti roottori vielä uudelleen saadaan sähkökentän vektorit. Näiden kenttien vaiheita vertailtaessa havaitaan, että tavallisesti ne ovat lähes 90-asteen kulmassa toisiinsa nähden.

Reaktiivinen osa kentistä vaimenee nopeasti, suhteessa  $1/r^2$  tai  $1/r^3$  etäisyyden kasvaessa antennin johtimiin, ja etäisyydellä  $\lambda / 2\pi$  -virta alkion reaktiivinen osa on jo samansuuruinen säteilevän osan kanssa. (Räisänen & Lehto, 1996.)

Eräs kirjallisuudessa esitetty rajausta reaktiiviselle lähikentälle on (Hum, 2018):

$$0 < r < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\gamma}}, \quad (14.2)$$

jossa, samoin kuin muissakin aiheen kaavoissa  $D$  on antennin suurin fysikaalinen dimensio [m].

### 14.3.2 Säteilevä lähikenttä

Antennista etäännyttäessä reaktiivisen lähikentän jälkeen tullaan säteilevän lähikentän alueelle, jossa reaktiivinen osa vaimenee ja pienenee lopulta merkityksettömäksi. Säteilevä lähikenttä muuttuu niin sanotuksi Fresnellin alueeksi seuraavasti (Yaghjian, 1986):

$$\sqrt[3]{\frac{D}{2\lambda} \frac{D}{2} + \lambda} < r < \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (14.3)$$

ja toisessa lähteessä se määritellään alueeksi (Hum, 2018)

$$0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\gamma}} < r < \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (14.4)$$

Mittalaittevalmistaja Keysight puolestaan ilmoittaa rajat seuraavasti (Orbit/FR, 2010):

$$\frac{\lambda}{2\pi} < r < \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (14.5)$$

Fresnellin alueella sähkö- ja magneettikenttien vaihe-ero on edelleen noin  $\pi/2$ . Tällä alueella havaintopisteen etäisyys antennirakenteen eri pisteisiin näkyy vielä suunta-vektorien eroina, mutta paljon heikommin kuin reaktiivisen kentän alueella. Tämän alueen sisällä maksimi vaihevirhe kentässä on  $\pi/8$ . Jos antennin suurin dimensio ei ylitä aallonpituutta, tämä alue voi kutistua lähes olemattomiin. (Buffi, Nepa, & Manara, 2012.)

### 14.3.3 Kaukokenttä

Siirryttäessä edelleen kauemmas antennista päästään säteilevän lähikentän ja kaukokentän rajalle, jossa Fresnellin alueeksi kutsuttu alue vaihtuu Fraunhoferin alueeksi. Yleisesti hyväksytyin määritelmän mukaan tämä tapahtuu seuraavan kaavan 14.6 osoittamassa rajapinnassa. (Räisänen & Lehto, 1996.)

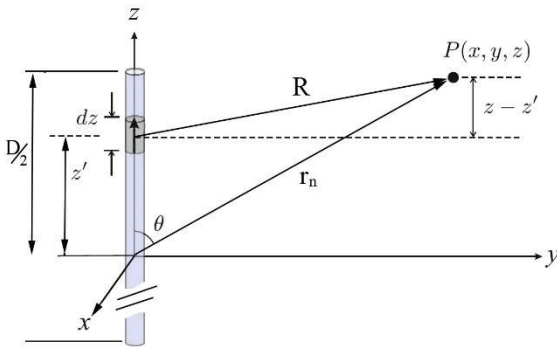
$$\frac{2 D^2}{\lambda} < r < \infty. \quad (14.6)$$

Sille on esitetty myös hieman etäämpänä olevaa rajaa (Yaghjian, 1986):

$$\frac{2 D^2}{\lambda} + \lambda < r < \infty. \quad (14.7)$$

Erona kaavoissa on alimmaisena kaavan sisältämä ”ylimääräinen” aallonpituustermi, jonka tarkoituksena on kattaa nekin tilanteet, joissa antennin fyysinen maksimimita on pienempi kuin aallonpituus.

Tarkasteltaessa edellä olevien kaavojen perusteita, havaitaan kriteerien perustuvan useimmiten antennielementin eri kohdissa vaikuttavien kuvitteellisten virta-alkioiden etäisyyden eroihin mielivaltaisesta havaintopisteestä. Teoreettisesti tarkasteltuna asiaa voidaan havainnollistaa seuraavasti.



**Kuva 14.4** Antennielementissä olevan virta-alkion aiheuttama kenttä tarkastelupisteessä. (Hum, 2018)

Kuvassa 14.4 esitetään virta-alkion aiheuttaman kentän etäisyys tarkasteltavasta havaintopisteestä P. Kuvassa pistemäiseksi oletettu alkuperäinen säteilyn lähde on origossa, josta havaintopisteeseen lähtee kenttää kuvaava suuntavektori  $r_n$ . Kuvassa sen lisäksi myös antennin elementistä lähtee toinen suuntavektori R, jolla on eri kulma ja

eri pituus kuin origosta lähteneellä suuntavektorilla. Kuvan perusteella on helppo kuvitella tilanne, jossa havaintopiste P etääntyy hyvin kauas antennielementistä. Silloin kumpikin kuvassa olevista vektoreista  $R$  ja  $r_n$  kohdistuu hyvin kaukana olevaan pisteeseen, jolloin vektorit ovat lähes yhdensuuntaisia ja joiden pituuksien ero kutistuu merkityksettömäksi. Tämä tilanne vastaa tyypillisesti kaukokentän säteilyä. Teoreettisesti kuitenkin ei voida tarkasti olettaa, että  $R = r_n$ , joten säteilevälle kentälle voidaan todeta seuraavasti (Hum, 2018):

$$e^{-j\beta r_n} \neq e^{-j\beta R}. \quad (14.8)$$

Yleisesti voidaan todeta kuvaa 14.4 koskien että

$$r^2 = z^2 + y^2, \quad (14.9)$$

$$z = r \cos \theta, \quad (14.10)$$

$$y = r \sin \theta, \quad (14.11)$$

$$R = \sqrt{y^2 + (z - z')^2}, \quad (14.12)$$

$$R = \sqrt{y^2 + z^2 - 2zz' + z'^2}, \text{ ja} \quad (14.13)$$

$$= \sqrt{r^2 + [-2z' r \cos \theta + z'^2]}. \quad (14.14)$$

Käyttämällä tunnettua binomikaavaa

$$(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2}b^2 + \dots \quad (14.15)$$

voidaan muotoilla R:lle lauseke

$$R = r + \frac{1}{2} (r^2)^{-1/2} (-2z'r \cos \theta + z'^2) + \dots \quad (14.16)$$

$$\approx r + \frac{1}{2r} (-2z'r \cos \theta + z'^2), \quad (14.17)$$

$$\approx r - z' \cos \theta + \frac{z'^2}{2r} \sin^2 \theta. \quad (14.18)$$

Kaavasta nähdään, että approksimaatiosta tulee tarkka kun  $r \rightarrow \infty$ , mutta tämä ei ole käytännöllinen oletus materiaalien mittauksia ajatellen. Siksi kenttien rajoja

pohdittaessa kysymys yleensä esiintyykin muodossa; milloin  $R \approx r$ , eli missä vaiheessa suuntavektorit ovat riittävän samanlaiset?

Palataksemme hieman vielä matemaattiseen tarkasteluun, sama kysymys voitaisiin esittää; Milloin kaavan 14.8 kolmannen termin (ja kaikkien sitä seuraavien, jotka edellisessä lyhennyksessä käsittelyssä on jätetty kirjoittamatta) voidaan katsoa olevan merkityksettömän pieniä?

Tutkittaessa tilannetta, jossa havaintopiste on antennin pääkeilan suunnassa, joten  $\theta = 90^\circ$ , kaavan toinen termi nolautuu ( $\cos 90 = 0$ ). Jäljelle jää arvioitavaksi suurin mahdollinen kaavan kolmannen termin aiheuttama virhe, eli tilanne, jossa virta-alkio on mahdollisimman kaukana origosta ( $z' = D/2$ ). Tällöin hyväksyttävän vaihevirheen voidaan olettaa olevan enintään  $\lambda/16$  suuruusluokkaa.

$$\frac{z'^2}{2r} \sin^2 \theta = \frac{\lambda}{16}, \quad (14.19)$$

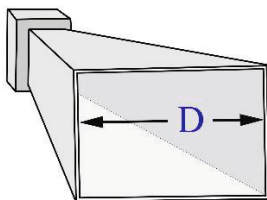
Tarkasteltavan pisteen etäisyyttä origosta voidaan merkitä  $z'$ :n sijaan  $D/2$ :lla, eli

$$\frac{(D/2)^2}{2r} = \frac{\lambda}{16}, \quad (14.20)$$

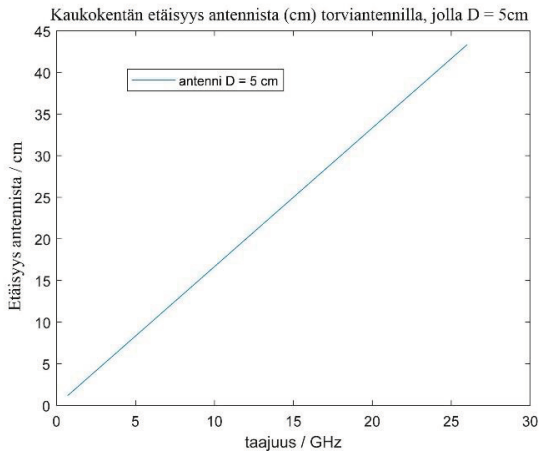
ja joka kääntyy suoraan edellä kaavoissa 14.3–14.5 esiintyneeseen kaukokentän kriteerin muotoon

$$r = \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (14.21)$$

Laskennallisesti kaukokentän raja esimerkiksi torviantennityypille, jonka suurin dimensio on alla olevan kuvan mukaisesti 50 millimetriä, on kaavan 14.21 perusteella kuvan 14.6 mukainen eri taajuuksilla.



**Kuva 14.5** Torviantennin aukon suurin mitta. (Kuva: Asp)



**Kuva 14.6** Kaukokentän laskennallinen raja taajuuden funktiona.

Kuvasta 14.6 nähdään usein väärää mielikuvia aiheuttanut antennin koon ja käytetyn taajuuden suhde kaukokentän rajaan. Kaukokentän raja on lähempänä matalilla taajuuksilla, joilla aallonpituus on suurempi. Vastaavasti antennin koon kasvattaminen loitontaa kaukokentän rajaa nopeasti.

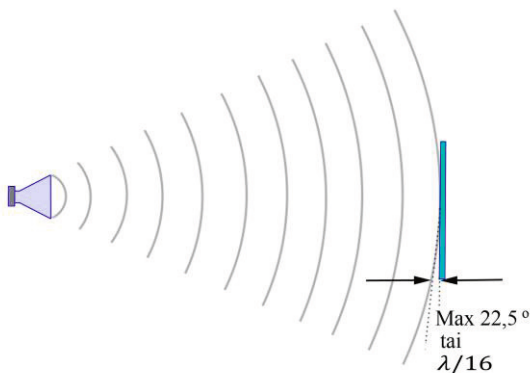
Niin kuin edellä esitettyjen lukuisten erilaisen kaavojen perusteella voi todeta, lähi- ja kaukokentän raja ei ole täysin kiinteä ja kaikkiin sovelluksiin yksikäsitteisesti lausuttavissa (Gregson et al., 2007). Materiaalien ominaisuuksia kartoittavissa mittauksissa raja riippuu tavoiteltavasta mittaustarkkuudesta, ympäristöstä ja muodostuu tavallisesti kompromissiksi mittaussjärjestelmien eri osien asettaessa omat vaatimuksensa. Teoreettisesti on turvallista sijoittaa antennit usean aallonpituuden etäisyydelle mitattavasta materiaalista, mutta käytettäessä kookkaita antennejä tai suurempia taajuuksia antennien etäisyydet kasvavat epäkäytännöllisen suuriksi. Jos antennien etäisyydet kasvavat useisiin metreihin, mittaussjärjestelmät eivät ole asennettavissa sisätiloihin ja vaikka tällainen mahdollisuus olisikin, aiheuttavat ympäröivät rakenteet ja materiaalit vaikeasti poistettavia heijastuksia.

Edellä mainituista syistä on joissakin tapauksissa mittauksissa päädytty lähikenttämittauksiin ja keskitytty laskennallisesti korjaamaan saadut mittaustulokset kaukokenttää vastaavaksi. Yleisesti voidaan kaavaa  $2D^2/\lambda$  pitää mittauksiin soveltuvana kaukokentän etäisyyden alarajana. Lähemmät tarkastelut tavallisesti koskevat säteilyn aaltorintaman kaareutumista ja sen aiheuttamaa virhettä. Kaukokentän rajaa tulkitaankin tavallisesti niin, että tämän rajan ylittävillä etäisyyksillä säteilevän kentän kaareutuminen on hyväksyttävän pientä. (Gregson et al., 2007.)

## 14.4 Kenttien vaikutus mittausvirheeseen

Materiaalien ominaisuuksia on mahdollista mitata lähikentässä, mutta silloin kentän vaikutukset on kalibroitava laskennallisesti. Aivan yksinkertainen toimenpide ei kuitenkaan ole. Lähtökohtaisesti silloin on tunnettava antennin lähikentän muoto ja säteilyominaisuudet, joiden mallintaminen on yleisesti monimutkaista. (Shankpal, Arur, Kadambi, & Shuttleworth, 2014.)

Mitattaessa kaukokentässä voidaan alla olevan kuvan 14.7 mukaan olettaa, että antennin säteilemä sähkömagneettinen aalto on lähes tasoaalto. Kuvassa näkyy havainnollisesti, että antennin välittömässä läheisyydessä (lähikentän alueella) antennista lähtevä aaltorintama kaareutuu voimakkaasti. Tällä alueella mitattaessa aaltorintaman keskikohdan ja mitattavan kappaleen reunaan osuvien aaltorintaman eri osien välillä on vaihe-ero, joka ilman korjausta aiheuttaa merkittävän virhelähteen mittauksiin. (Räisänen & Lehto, 1996.)



**Kuva 14.7** Kentän taipumisen aiheuttama virhe. (Räisänen & Lehto, 1996, muokattu)

Yllä oleva kuva 14.7 esittää kentän muotoa antennin säteilykentässä. Mitä kauemmas antennista etäännyttään, sitä tasomaisemmalta näyttää aaltorintama. Aaltorintaman eri osien vaihe-ero on yksi kriteeri kaukokentän rajalle. Hyväksyttävänä vaihe-erona pidetään alle 22,5 asteen tai  $\lambda/16$  eroa. (Räisänen & Lehto, 1996.)

Kaukokenttää voidaan kuvata muillakin kriteereillä, esimerkiksi sähkö- ja magneettikentän suhteella määräytyvällä impedanssilla. Kaukokentän alueella tyhjiön tai ilman impedanssi on vakiintunut 377 ohmiin. (Capps, 2001.)



## 14.5 Torviantennit

Tämän väitöstutkimuksen perustana olevissa mittauksissa on käytetty kenttäolosuhteissa pelkästään torviantenneja, ja ne ovatkin tavallisin antennityyppi mitattaessa materiaaleja vaihtelevissa olosuhteissa. Torviantennin etuina ovat tukevan rakenteen ohella suuri vahvistus ja laaja taajuusalue. Suuri taajuusalue johtaa suoraan pienempään suoritettavien mittausten määrään ja merkittävään ajansäästöön. Käytännön kenttämittauksissa torviantennien etuina ovat ajansäästön lisäksi niiden selkeä ja kompakti rakenne, jolloin niiden mekaaninen kestävyys on parempi kuin useita erilisiä heijastinelementtejä sisältävissä antennirakenteissa.

Torviantennien vahvistus ei kuitenkaan ole vakio, vaan tyypillisesti matalammilla taajuuksilla vahvistus pienenee. Tähän on syynä pienempien taajuuksien suuremmat aallonpituudet, joilla sovittaminen koaksiaaliseen siirtojohtoon on vaikeampaa. Antennin vahvistus kertoo suoraan antennin edessä olevan säteilykuvion leveydestä. Yleisesti antennille pätee, että vahvistuksen kasvaessa säteilykeila kapenee.

## 14.6 Vapaan tilan vaimennukseen perustuvat menetelmät

Vapaan tilan vaimennusmittaus on yleisnimitys mittaumenetelmille, joissa signaalin lähettämiseen käytetty antenni sijaitsee tutkittavan materiaalinäytteen toisella puolella ja vastakkaiselle puolelle on sijoitettu vastaanotinantenni.

Usein antennit pyritään sijoittamaan niin etäälle tutkittavasta materiaalista, että voidaan ainakin olettaa mittauksen tapahtuvan kaukokentän alueella. Tällä tavoin vältetään lähikentän vaatimilta matemaattisilta korjauksilta.

Tämän väitöstutkimuksen tulosten taustalla on suuri määrä mittauksia, jotka perustuvat materiaalivaimennusten osalta vapaan tilan vaimennusten määrittämiseen. Vapaan tilan vaimennusmittauksista on lukuisia erilaisia variaatioita, ja seuraavassa esitellään niistä kolme yleisintä; vapaan tilan kaukokenttämittaukset, vapaan tilan lähikenttämittaukset ja laboratoriomittaukset, joissa käytetään materiaalin eri puolille sijoitettuja antennejä. Nämä kolme edustavat tavallisimpia menetelmiä, joilla materiaalivaimennuksia mitataan erityisesti rakennusmateriaalien RF-vaimennuksia tutkivissa tutkimushankkeissa.

Tässä yhteydessä on ensimmäiseksi todettava, että rakennusmateriaaleja tutkittaessa vapaan tilan vaimennukseen perustuvilla menetelmillä on muutamia ominaisuuksia, joiden vuoksi nimenomaan ne ovat käyttökelpoisempia kuin esim. kapasitaanssiin tai resonointiin perustuvat menetelmät. Näitä ovat esimerkiksi tyypillisten

rakennusmateriaalien epähomogeenisuus, vaihteleva kosteus, vaikea työstettävyys, huokoisuus ja/tai joustavuus. Huokoisuuden tai joustavuuden aiheuttaman vaikean työstettävyyden esimerkiksi kelpaa villapohjainen eriste, jolle ei resonaattorirakenteeseen perustuva mittaustapa ole käyttökelpoinen määrämittaisuusvaatimustensa vuoksi. Ilmavaa villaa ei voi asettaa putken tai lieriön sisään niin, että se ei puristuisi kokoon, mutta täyttäisi tarkoitetun tilan millimetrien osien tarkkuudella. Kokoon puristumisen arviointi on tässä yhteydessä kriittistä, sillä tavoitteena on tutkia vaimennusarvoja sellaisissa olosuhteissa, joissa villa on seinän sisässä. Se, miten paljon villa on puristunut kokoon erilaisissa asennustavoissa ja eri kohteissa on haastava todennettava.

Lähtökohtana rakennusmateriaalien mittauksissa tulisikin olla sellainen mittausjärjestely, jossa materiaalit olisivat ”luonnollisesti omassa ympäristössään”. Päämäärä on epätäsmällisesti ilmaistu, mutta taustalla oleva ajatus perustuu niiden ympäristötekijöiden huomioimiseen, jotka ovat olemassa materiaalien lopullisissa asennusympäristöissä. Ympäristötekijöillä tässä yhteydessä tulee ymmärtää kaikki ne ulkopuoliset tekijät, aukot ja rakenteet, jotka liittyvät oleellisesti materiaalin tyyppilliseen asennukseen. Esimerkkeinä näistä ympäristötekijöistä ovat seinäelementeissä sandwich-elementin eri kuorien väliset erilaiset kosteudet, erilaiset pinnoitteet, elementin raudoitus, mahdolliset elementin valun yhteydessä rakenteen sisään jätetyt sähkö- tai vesiputket, elementtien kiinnittämiseen käytetyt ansaat jne. Tarkka seinäelementin vaimennuksen selvittäminen edellyttääkin tietoa materiaalin itsensä, esim. elementin kuorissa käytetyn betonin omasta vaimennuksesta, sekä tietoa käytetyn raudoituksen sijainnista ja silmäkoosta sekä valuun upotetuista putkista tai urista. Käytännössä tietoa raudoituksesta tai upotettujen putkien tarkasta sijainnista on vaikea saada, joten kenttämittaukset perustuvat hyvin moniin yksittäisiin mittauksiin seinäelementtien eri kohdista. Näissä elementtimittauksissa käytettävä mittausmenetelmä perustuu tavallisesti mitattavan seinän molemmille puolille sijoitettuihin antenneihin ja joko signaalia syöttävään generaattoriin ja vastaanottimeen (esimerkiksi spektrianalysaattori) tai piirianalysaattoriin.

## 14.6.1 Vapaan tilan vaimennus seinien tai materiaalien läpi

Tämä mittaustapa perustuu vapaan tilan vaimennukseen, jossa seinärakenteen tai materiaalin molemmiin puolin sijoitetaan samanlaiset antennit. Tässä kappaleessa esitellään yksi mittauslaitteisto, joka perustuu mitattavaa signaalia lähettävään signaali-generaattoriin ja vastaanotettavaan spektrianalysaattoriin. Mutta niin kuin edellä

todettiin, voi laitepari olla mikä tahansa muukin, joka täyttää taajuuden, tehon, dynamiikan ja tarkkuuden vaatimukset. Taajuusaluevaatimukset tulevat luonnollisesti suoraan mielenkiinnon kohteina olevien tekniikoiden käyttämisestä taajuuksista, tehovaatimukset puolestaan liittyvät siihen, että vastaanottimelle tulee riittävästi tehoa signaalin luotettavaan ilmaisuun, mutta toisaalta niin, että teho pysyy tasolla, joka ei aiheuta häiriöitä ympäröiviin radio- tai matkaviestimien verkkojen toimintaan. Tästä syystä mittauksista onkin syytä informoida viranomaisia sekä operaattoreita tai muita kyseistä taajuusaluetta käyttäviä toimijoita, jos on olemassa pienikin epäily häiriöiden syntymisestä. Mittauksissa käytettävät tehot ja taajuudet kytkeytyvät toisiinsa, sillä generaattoreissa on syytä suosia sellaisten taajuuspisteiden käyttöä, jotka eivät mittauspaikan ympäristössä ole muussa aktiivikäytössä mittausajankohtana. Näillä taajuuspisteillä voidaan käyttää hieman suurempia tehotasoja ja toisaalta vastaanottimen häiriötaso on pienempi vapaille taajuusalueilla. Vastaanottimen dynamiikka on tärkeä tekijä erityisesti sellaisten materiaalikerrosten mittauksissa, joissa vaimennus on suuri. Suuri dynaaminen alue on yhteydessä vastaanottimen herkkyyteen, joten herkällä vastaanottimella varustetulla mittausjärjestelmällä voidaan käyttää pieniä lähetystehoja.

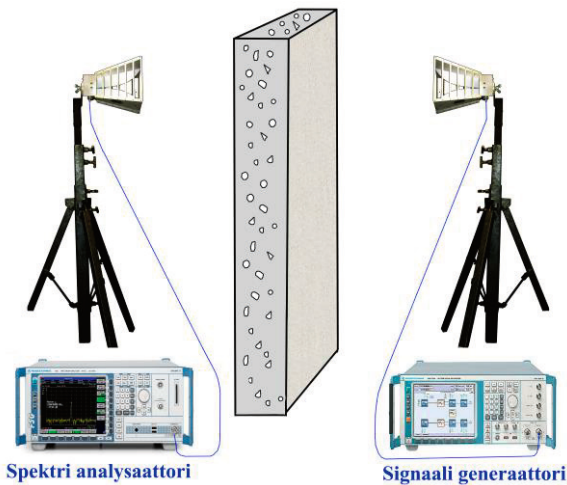
Todellisten rakennusten seiniä mitattaessa mittausjärjestelmän erilaiset säätömahdollisuudet nousevat keskeisiksi vaatimuksiksi. Yksinkertaisinta on käyttää samanlaisia antennejä mitattavan kappaleen kummallakin puolella. Tavallisesti seinistä vaaditaan lukuisia mittauksia luotettavan kuvan saamiseksi, ja jokaisessa niistä on antennit kyettävä sijoittamaan tarkasti oikeille paikoille seinän molemmin puolin. Tämä edellyttää monipuolisia säätömahdollisuuksia antennien jalustoilta, sillä varsin usein seinien läheisyydessä on erilaisia esteitä. Todellista rakennusta mitattaessa antennien asentaminen oikeille paikoille seinän molemmin puolin on haasteellista, jos lähellä ei ole läpivientä, ovea tai ikkunaa, joiden reunojen avulla on mahdollista kohdistaa antennit riittävän tarkasti. Tavallisesti myös antennien korkeuden arvioinnissa syntyy virhettä, sillä maanpinnan taso ja sisällä oleva lattiataso ovat lähes aina eri korkeudella. Lisävaikeudet syntyvät usein siitä, että mittaukset tulisi tehdä ainakin metrin etäisyydellä ovesta tai ikkunasta. Syinä tähän ovat elementissä aukkojen vieressä olevat tiheimmät raudoitukset ja mahdolliset valaisinkytkimille menevät elementtiin jos sen valmistusvaiheessa upotetut putket, mutta myös signaalin kiertäminen lähetysantennista vastaanotinantenniin ohi mitattavan alueen. Tämä tapahtuu erityisesti, kun antennit ovat kauempana mitattavasta seinästä, ja niin ollen valaistessa suuremman alueen.

Antennien etäisyys materiaalista (tai seinäpinnasta) onkin eräs tärkeimmistä päätöksistä mittauspaikkojen valinnan ohella kenttämittauksia valmisteltaessa. Mikäli

mittauksissa käytetään oletusta mitattavan materiaalin sijainnista kaukokentän alueella, mittausten jälkikäsitteily on helpompaa, mutta antenneilla valaistava alue kasvaa. Tällä suuremmalla valaisulla on sekä etuja että haittoja. Etuna on seinässä olevien pienempien yksityiskohtien vaikutuksen pieneneminen, jolloin seinän eri paikoista tehdyistä mittauksista saaduissa tuloksissa on vähemmän hajontaa. Toisaalta sille, että valaistulle alueelle sattuu poikkeava rakenteen osa, on suurempi, jolloin mittauksista saadaan tavallisesti pienempiä vaimennusarvoja kuin lähempää materiaalia tehdyistä mittauksista. Tämä ei todellisten rakennusten kuorien RF-vaimennuksia selvittäessä kuitenkaan ole, ainakaan alalinkin suuntaan, varsinainen virhelähde, sillä tukiasemien lähettämä signaali valaisee tavallisesti koko seinän alueen ja suhteellisesti suurin osa signaalin tehotiheydestä läpäisee seinäpinnan pienimmän vaimennuksen alueelta. Tämä edellyttää sitä, että paikallisen pienemmän vaimennuksen alueen mitat ylittävät aallonpituuden. Tällöin kuitenkin tulosten analysoinnissa ja johtopäätösten tekemisessä tulee olla huolellinen, sillä joissakin tapauksissa voi jäädä epäselväksi mitä materiaalia ja kuinka paksuna sitä lopulta mitattiin.

## 14.6.2 Vapaan tilan vaimennus kaukokentässä

Seuraavassa kuvassa 14.8 on esitetty kaukokenttään ja vapaan tilan vaimennukseen perustuva mittausmenetelmä, jota on hyödynnetty monissa tämän väitöstutkimuksen mittaustuloksia esittelevien lukujen taustalla. Periaate on yksinkertainen, siinä mitattavan materiaalin tai rakenteen kummallekin puolelle sijoitetaan antennit.



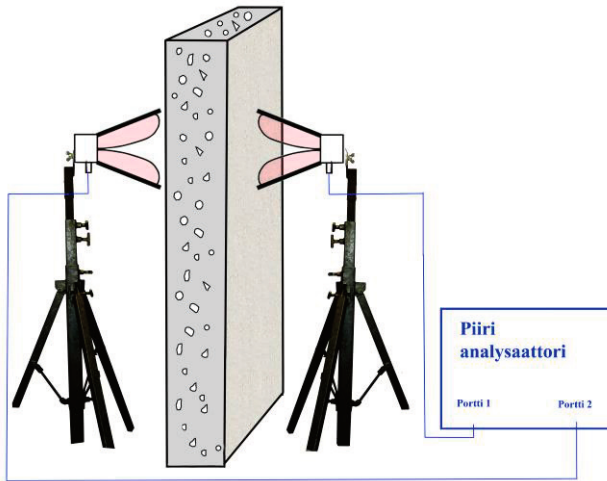
**Kuva 14.8** Vapaan tilan mittaus kaukokentässä. (Kuva: Asp)

Lähetysantennia syötetään joko signaaligeneraattorilla tai piirianalysoitsajan Tx-portilla. Perusperiaate on sijoittaa antennit niin etäälle tutkittavasta materiaalista, että lähikentän kompensointia ei tarvita. Ongelmaksi muodostuu kaukokentän menetelmässä etenkin korkeammilla taajuuksilla vapaan tilan vaimennuksen vertailumittauksen käytännön toteutus. Esimerkiksi rakennuksen ulkoseinän tapauksessa vertailumittaus tulisi suorittaa täysin samanlaisissa olosuhteissa kuin varsinaisen seinän mitaus. Silloin seinän paikalla siis olisi ilman mitään väliainetta oleva vapaa tila. Tämän mittauksen tekeminen edellyttää todellisten rakennusten mittausten yhteydessä antennien siirtämistä muuhun tilaan, jolloin ympäristön ohella myös kaapelien reitti ja taivutukset muuttuvat. (Cuinas & Sanchez, 2000.) Ympäristön muuttuessa signaalien heijastukset ovat erilaiset ja tulosten analysoinnissa tarvitaan erillisiä menetelmiä heijastusten käsittelyyn. Näistä esimerkkinä voidaan mainita aikatazon ikkunointi, jolla osa heijastuksista kytetään poistamaan.

Valaistaessa pienemmän alueen tuomalla antennit lähemmäs tutkittavaa materiaalia tai rakennetta, on aina ensin tarkistettava lähikentän raja, joka ei tämän luvun kapaleen 14.3 perusteella ole kaikissa tapauksissa suoraviivaista. Erityisesti on arvioitava millä taajuusalueella mittaukset halutaan suorittaa, sillä lähi- ja kaukokentän raja riippuu suoraan taajuudesta. Käyttämällä matalampia taajuuksia voidaan antennit sijoittaa lähemmäksi mitattavaa kohdetta. (Cuinas & Sanchez, 2000.)

### 14.6.3 Vapaan tilan vaimennus lähikentässä

Lähikentässä tapahtuva todellisten rakenteiden mitaus perustuu useimmiten torvi-antennien sekä generaattori ja spektrianalysoitsajan -pariin tai piirianalysoitsajan käyttöön. Lähikenttämittauksissa antennit sijoitetaan lähes kiinni tai ainakin hyvin lähelle mitattavaa materiaalia tai rakennetta. Näissä mittauksissa kentät eivät ole muodostuneet vastaamaan kauempana olevia kenttiä, joten tulosten analyysissä on laskennallisesti otettava huomioon lähikentän vaikutus. (Amiet, 2003; Johnson, R. C. et al., 1973.) Lähikenttämittauksissa suositaan useimmiten piirianalysoitsajan käyttöä, sillä kaapelointi on tavallisesti mahdollista pitää kohtuullisen lyhyenä mittalaitteen ja kummankin antennin välillä. Piirianalysoitsajien käytön toisena perusteena on vain yhden mittalaitteen kuljettaminen ja sijoittaminen mittaustaikalle.



**Kuva 14.9** Seinän lähikenttämittaus. (Kuva: Asp)

Niin kuin jo aikaisemmin todettiin, on seinärakenteen välittömään läheisyyteen sijoitetuilla antenneilla tarkempi valaisuala kuin etäämmälle sijoitetuilla antenneilla. Seinärakenteen pinnan tuntumaan sijoitetuilla antenneilla on virhelähteenä antennien keskinäinen kohdistus, joka käytännön mittauksissa asettaa usein haasteita. Toinen mittausaikaa lisäävä tekijä on vaadittavien mittausten lisääntynyt määrä, sillä pienemällä valaisualueella pienetkin poikkeamat rakenteen sisällä aiheuttavat huomattavia vaihteluita mitaustuloksiin. Siksi seinän todellisen vaimennuksen selvittämiseksi vaaditaan useita eri mittauksia eri seinän kohdista. Yhdessä aikaa vievän kohdistuksen kanssa tämä menetelmä on hieman hitaampi kuin tilanne, jossa antennit on sijoitettu kauemmas mitattavasta seinästä.

#### 14.6.4 Piirianalysoijan kalibrointi kenttämittauksissa

Kolmas usein mittauksissa esiin nouseva seikka on piirianalysoijamittausten kalibroinnin tarve ja kalibroinnin tarkkuus. Kalibrointi toimenpiteenä on suoraviivainen ja se tapahtuu piirianalysoijan lisävarusteena olevan kalibrointityökalun avulla. (Hiebel, 2007.) Käytännön vaikeudet syntyvät mittakaapeleiden taivuttelusta ja lämpötilan muutoksista. Kaapelien taivutteleminen aiheuttaa suuria haasteita todellisten seinien mittauksissa, sillä kalibrointia ei voi tehdä todellisessa mittausympäristössä, jossa toisen kaapelin pää on seinän toisella puolella ulkoilmassa ja toisen mittakaapelin pää vastaavalla kohdalla seinän sisäpuolella. Tällöin seinässä ei luonnollisestikaan saa aiotulla mittausalueella olla mitään aukkoa, jolla kaapelit voi yhdistää toisiinsa.

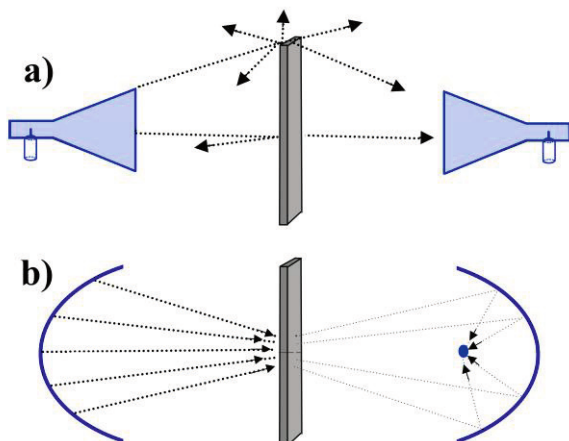
(Cuinas & Sanchez, 2000.) Kalibrointi on tästä syystä tehtävä joko ulkona tai sisällä, mutta joka tapauksessa kalibroinnin jälkeen antennikaapeleita kytkettäessä kiinni antenneihin niiden asento ja taivutus muuttuu. Samoin ainakin toisen antennikaapelin lämpötila muuttuu, riippuen onko kalibrointi tehty ulkona vai sisätiloissa. Piirianalysaattorin antennikaapelien erilaiset olosuhteet eivät tule merkittävästi näkyviin vielä alle 6 GHz:n taajuuksilla, mutta varsinkin yli 10 GHz alueella vaikutukset ovat nähtävissä suoraan tuloksista.

Yleensä piirianalysaattorien kaapelit on syytä valita mahdollisimman vaihestabieleista kaapelivaihtoehdoista, mutta valittavasti hyvät mittakaapelit ovat useiden satojen eurojen arvoisia. Lisäksi korkeampien taajuuksien vaatimat liittimet ovat pienempiä, tarkempia ja mekaanisesti heikompia. Tästä syystä piirianalysaattorimittauksissa kaapelit tulisi mahdollisuuksien mukaan kiinnittää paikalleen taivutusten, kiertymisten ja niiden mahdollisen liikkumisen minimoimiseksi.

#### 14.6.5 Vapaan tilan vaimennus laboratorio-olosuhteissa

Edellisessä kuvattujen kenttämittausten lisäksi rakennusmateriaalien sähköisiä ominaisuuksia selvitetessä käytetään laboratoriomittauksia, joissa tavallisesti tutkitaan kerrallaan vain yhden materiaalin ominaisuuksia. Koska yhden materiaalin tutkiminen perustuu rakennusmateriaalien yhteydessä tavallisesti levymäiseen näytteeseen, on helppo tarkistaa näytepalan tarkka paksuus ja homogeenisuus ennen mittausta. Silloin onkin tavoitteena varsinaisen vaimennusmittauksen sijaan tavoitella materiaalin permittiivisyyden määrittämistä, sillä permittiivisyyden perusteella voidaan laskennallisesti arvioida ko. materiaalista koostuvan seinärakenteen kokonaisvaimennus eri paksuisille rakenteille. (Gonçalves, Pinto, Mesquita, Silva, & Brancaccio, 2018; Rohde & Schwarz, 2012.)

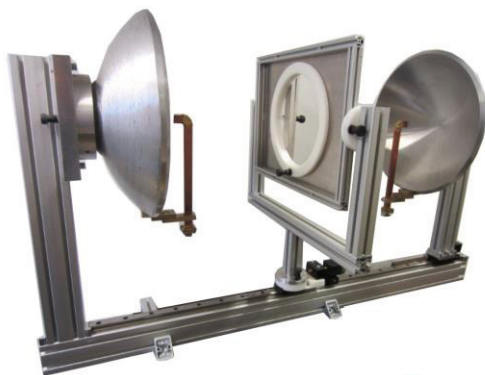
Ongelmaksi pienehköillä materiaalinäytteillä muodostuu mittaajajärjestelmän rakentaminen sellaiseksi, että signaali kulkee vain mitattavan kappaleen läpi, eikä kierrä tutkittavaa näytettä heijastusten, taittumisen tai muun ilmiön vuoksi. Kuva 14.10 a-kohta esittää tilannetta, jossa signaali pääsee kiertämään tutkittavan materiaalinäytteen siroamalla ja taittumalla kappaleen yläreunasta. Eräs tapa järjestää signaalin kulku vain näytteen läpi, on käyttää alla oleva kuvan 14.10 b-kohdan mukaista fokuoivien antennien järjestelmää. Tässä signaalit kohdistetaan telineessä olevan näytepalan keskelle tarkasti hiotuilla heijastimilla, jotka on sijoitettu materiaalin kummallakin puolelle. (Sauleau, Fernandes, & Costa, 2005; Silveirinha & Fernandes, 2001.)



**Kuva 14.10** Tavallinen mittausmenetelmä (a) ja fokusoivat antennit (b). (Kuva: Asp)

Kuvan 14.10 b-kohdassa esitetyt heijastavat elementit antennien takana on suunniteltava ja valmistettava niin, että niiden muoto taittaa radiotaajuuudet mahdollisimman tarkasti syöttökaapeleina toimivien aaltoputkien suulle ja toisaalta mitattavan kappaleen keskelle. (Sauleau, Ronan, Coquet, Thouroude, Daniel, & Matsui, 2003.) Aaltoputken pää on kuvassa esitetty sinisellä ympyrällä.

Eräs käytännön toteutus fokusoivasta järjestelmästä on esitetty seuraavassa kuvassa 14.11. Laitteisto on Arto Hujasen suunnittelema ja se on käytössä VTT:n tutkimuslaboratoriossa. Muiden mittausjärjestelmien ohella tätä laitteistoa hyödynnettiin tämän väitöstutkimuksen näytteiden mittauksissa, joissa materiaalien vaimennusta tutkittiin niiden S-parametreihin perustuen.



**Kuva 14.11** Fokusoiviin antenneihin perustuva mittausjärjestelmä. (Kuva: Asp)

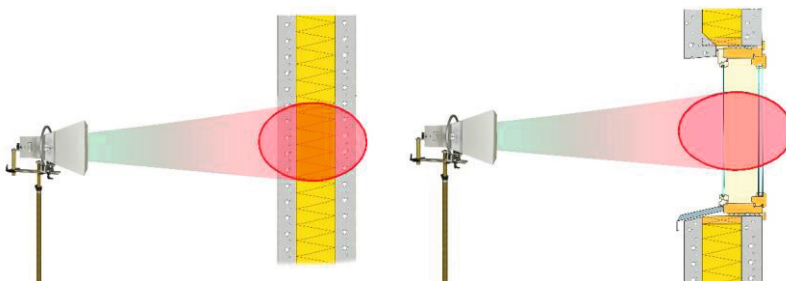


Laboratoriomittauksiin liittyy kuitenkin laitteiston kalibrointiin ja materiaalinäytteiden mitoitukseen liittyviä haasteita, joita tarkastellaan myöhemmin kappaleessa 14.11. Kappaleessa 14.8 kuvattujen S-parametrien löytämiseen vaaditaan käytännössä useita erilaisia mittauksia, joilla pyritään kartoittamaan erilaisten tekijöiden vaikutukset mittauksissa. (Friedsam & Biebl, 1997; Rolfes & Schiek, 2005.) Näillä mittauksilla kartoitetaan parametrit tilanteissa, joissa mittaustelineessä ei ole mitään materiaalia ja toisaalta tilanne, jossa siinä on mahdollisimman täydellinen heijastinpinta.

Laboratoriomittaukset ovat luonnollisesti tarkin menetelmä yksittäisten materiaalien sähköisen käyttäytymisen todentamiseen, mutta käytettäessä materiaalinäytteistä mittaamalla saatuja tuloksia kokonaisen seinärakenteen vaimennuksen arviointiin, liittyy kokonaisvaimennuksen hahmottamiseen haasteita. (Gonçalves et al., 2018.)

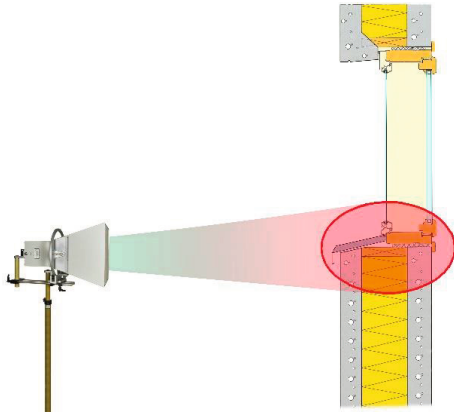
## 14.7 Todellisten rakennusten mittausten erityiskysymyksiä

Mittauksissa, joissa tarkastellaan kokonaista seinäpintaa, on erityisesti ulkoseinien osalta huomioitava rakenteen sisäinen epähomogeenisuus. Rakennuksen sisällä olevissa betoniseinissä rakenne on tavallisesti tasoitettua ja maalattua betonia, joissa pintakerrosten vaikutus kokonaisuuteen on pieni. Sen sijaan ulkoseinät ovat aina kerroksellisia rakenteita, joissa on erotettavissa erilaisia päällekkäisiä kerroksia. (Shi, Li, Z.-Y., Li, K., Li, L., & Liang, 2017.) Ulkoseiniä voidaan mitata sekä lähi- että kaukokenttämittaukseen perustuvilla menetelmillä, mutta erityisesti kaukokenttämittauksissa on huomioitava mittaasantennien valaiseman alueen mahdolliset yksityiskohdat ja epäjatkuvuudet. (Hock, 2006.) Konkreettisimmin tämä tulee esille, kun mitataan lähellä betonielementin reunoja, esim. ikkuna-aukkojen läheisyydessä. Seuraava kuva 14.12 kuvaa yksinkertaista tilannetta, jossa valaistu alue vaikuttaa rakenteeltaan yhtenäiseltä, vaikka se sisältää erilaisia materiaalikerroksia. Kuvan vasen puoli kuvaa puhtaasti seinärakenteen mittausta ja oikea puoli ikkuna-aukon lasiosan mittausta.



**Kuva 14.12** Erilaisten laajojen pintojen mittauseriaate. (Kuva: Asp)

Monimutkaisemmaksi tilanne muodostuu, kun mittausantennien valaisemalle alueelle sisältyy tarkoituksella tai mittajaan tahtomatta erilaisia rakenteita. Tästä esimerkkinä on ikkuna-aukkoon liittyvät karmirakenteet tai niiden osat. Tätä esimerkkitilannetta esittää seuraava kuva 14.13.

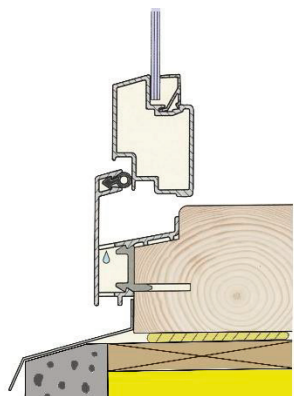


**Kuva 14.13** Mittausperiaatteen monitulkintaisuus liitoskohdissa. (Kuva: Asp)

Kuvassa 14.13 esitetty tilanne tulee esiin usein odottamattomalla tavalla, sillä rakenteiden sisään jäävien epäjatkuvuuskohtien löytäminen ja todentaminen käytännön mittauksen yhteydessä on haastavaa, ja toisaalta antennien valaisemien reuna-alueiden sijainnit jäävät tavallisesti vain arvioiden tasolle. (Yahalom, Pinhasi, Shifman, & Petnev, 2010.) Yleisimmin rakenteiden muuttuminen antennien valaisemalla alueella havaitaan vasta mittauspaikalta poistumisen jälkeen, tulosten vertailun ja analysoinnin yhteydessä. Aiheellinen kysymys on tietysti se, että eikö mittauksissa voida rajoittua vain yhtenäisiin laajoihin seinäpintoihin, joissa ainakaan näkyviä epäjatkuvuuksia ei ole. Tavallisesti käytännön tilanteissa, joissa mittauksen kohteena on tavallinen asuin-kerrostalo, huoneistojen sisäinen rakenne jakautuu väliseinillä erillisiin huonetiloihin, joita ulkoseinässä hallitsee ikkunapinta. Tällöin väliseinän ja ikkunan väliin jäävän vapaan seinän osa rajoittaa mittausaluetta ja samalla yleensä pyritään kaukokenttään perustuvissa mittauksissa sijoittamaan antennit etäälle seinäpinnasta. Toisen haasteen aiheuttaa seinän sisäinen rakenne, sillä elementtien raudoituksen tiedetään olevan aukkojen läheisyydessä tiheämpää kuin keskellä elementtiä. (Karvinen, 2015.) Kuitenkin tämänkin alueen vaimennus tulisi olla tiedossa arvioitaessa koko seinän kokonaisvaimennusta.

## 14.7.1 Monimutkaiset rakenteet

Malliesimerkkinä monimutkaisista rakenteista voidaan pitää ikkunan karmirakennetta, jonka mittaaminen muodostuu ongelmalliseksi kaikilla menetelmillä. Ikkunarakenteen sisältämät monimutkaiset muodot ja monet eri tavoin taivutetut rajapinnat tekevät vaimennuksen taajuuskäyttäytymisestä hyvin monimutkaista ja rakenteen vaimennus on herkkä mittaussignaalin tulokulmalle ja polarisaatiolle. Taajuuskäyttäytymisen vaikea ennustettavuus perustuu signaalin moniin heijastuksiin, taittumiin ja siroamisiin. Vaikka karmissa oleville yksittäisille materiaaleille on helposti löydettävissä materiaalikohtaiset arvot, vaikeudet syntyvät rakenteiden kaarevista ja kulmikkaista muodoista. Esimerkkinä rakenteen monimutkaisuudesta on kuvassa 14.14 esitetty ikkunan alumiiniprofilin leikkauskuva.



**Kuva 14.14** Ikkunan puitejärjestelmän liittyminen karmiin. (Haukijärvi, 2005, muokattu)

Ikkunan puitteiden ja karmirakenteiden vaimennuksen tarkastelussa onkin lähes mahdotonta löytää yhtenäistä tapaa vaimennuksen mittaamiseen. Käytännössä haasteen aiheuttavat erityisesti metallisten rakenteiden monimutkaiset muodot, mutta myös käytännön ikkunoiden toimittajien tuotevalikoimien laajuus. Hyvin monilla ikkunavalmistajilla on alumiinirakenteen osalta omat alihankkijansa, joten perusrakenteeltaan samanlaisissa ikkunatyypeissä metallirakenteet voivat olla hyvin erilaisia. Vaihtelua voi olla myös eri valmistuserien välillä, joten tietyn metallirakenteen tarkka mallintaminen simulaattorillakaan ei anna luotettavaa kokonaiskuvaa puite- ja karmiosien yleisestä vaimennuksesta.

Tässä väitöstutkimuksessa metallipintaisten puitteiden ja karmiosien vaikutusta ikkunan kokonaisvaimennukseen on tarkasteltu yksinkertaistetulla simulointimallilla,

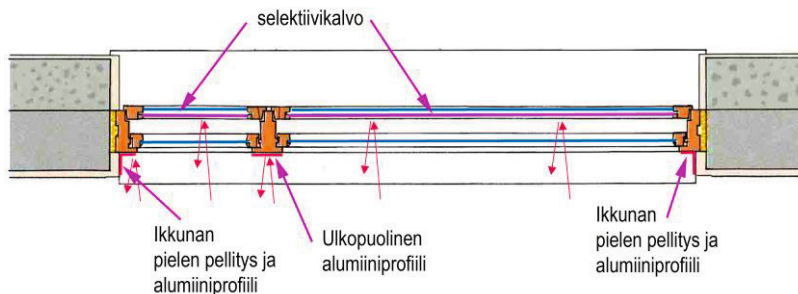
jossa alumiiniprofiilit on korvattu suorilla johtavilla alumiinipinnoilla. Näiden simuloitien tulokset on esitelty luvussa 15.

Ikkunoiden karmi- ja puiteosien RF-vaimennuksen arvioinnissa on signaalin suunnalla paljon merkittävämpi rooli kuin muita rakenteita tutkittaessa. Tämä ei varsinaisessa mittaustilanteessa ole ongelma, mutta koska ikkunarakenne näkyy signaaleille eri tavoin riippuen signaalin tulokulmasta, se muodostuu ongelmaksi tulosten tulkinnassa ja kokonaisvaimennuksen arvioinnissa. Todellisuudessa tukiaseman signaalilla on ikkunaan nähden jokin tapauskohtainen tulokulmien jakauma, eikä ikkunasta yleensä ole suoraa näköyhteyttä tukiasemaan. Näköyhteyden puuttuessa suurimman säteilyn tehotiheyden suunnasta ei yleensä osata sanoa edes arviota.

### 14.7.2 Ikkunoiden puuosat ja viistosti tulevat signaalit

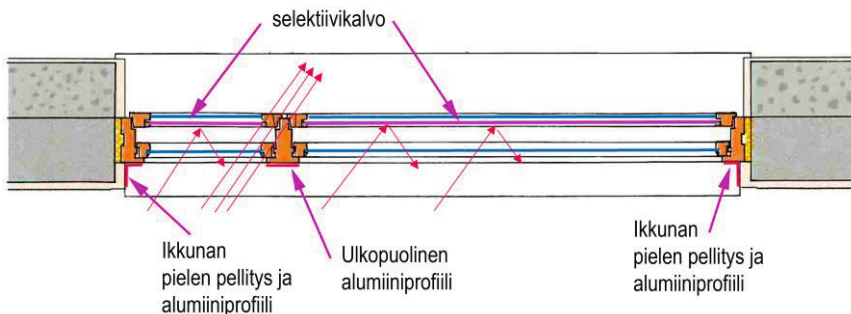
Ikkunan RF-vaimennusta tutkittaessa mittaustulosten herkkyys signaalin tulokulmalle riippuu mielenkiintoisesta ilmiöstä, joka on tähän asti jäänyt yleisessä keskustelussa melko vähälle huomiolle. Tämä ilmiö perustuu siihen, että suoraan ikkunaa kohti edennyt signaali kohtaa lähes yhtenäisen, vierekkäisten metallipintojen muodostaman alueen, mutta viistosti ikkunaa kohti lähestyvä signaalin osa voi kiertää ainakin osan metallipinnoista. Näin viistossa kulmassa eteneville signaaleille voi jäädä radiosignaalien kanalta lähes esteetön kulkutie ikkunarakenteen läpi.

Tukiasemasta lähteneelle, suoraan edenneelle tasoaltomaiselle signaalille, muodostaa ikkunan pieliä ja ympäröivää seinäpintaa vasten oleva pellitys ensimmäisen metallipinnan. Seuraava pinta on ikkunoiden puuosien ulkopintoja peittävä alumiiniprofiili. Alumiiniprofiili muodostaa eristyslasipaketin selektiivipinnan kanssa lähes yhtenäisen, joskin eri tasossa olevan metallipeitteen suoraan edestäpäin tulevalle tasoallolle. Tätä tilannetta kuvaa seuraava kuva 14.15.



**Kuva 14.15** Ikkunan mittaus kohtisuoraan pintaa vastaan tulevalla signaalilla.  
(Kuva: Asp)

Kuvissa 14.15 ja 14.16 tukiaseman signaali tulee kuvan alaosan suunnasta ja heijastuu violetilla värillä piirretyistä metallipinnoista. Mikäli signaalin suunta ei olekaan enää ikkunapintaan nähden kohtisuora, vaan esim. noin kolmenkymmenen asteen kulmassa lasipinnan normaaliin verrattuna, muuttuu tilanne oleellisesti. Tässäkin tilanteessa signaali heijastuu eristyslasipaketin selektiivipinnoitteesta, mutta pääsee etenevänsä kuvissa 14.15 ja 14.16 vasemmassa reunassa olevan tuuletusikkunan ja varsinaisen ikkunan välisen puurakenteen kautta sisätiloihin. Ilmiö johtuu siitä, että viistosti etenevä signaali läpäisee ulommaisena lasina tavallisesti olevan float-lasin noin 2–3 dB:n vaimennuksella ja pääsee tulokulmansa vuoksi puurakennetta suojaavan alumiiniprofiilin taakse. Tästä signaali voi edelleen edetä eristyslasipakettien välistä vaimentuen vain kuivan puun aiheuttaman RF-signaalien vaimennuksen verran. Tätä tilannetta selventää kuva 14.16.



**Kuva 14.16** Ikkunan mittaus vinossa kulmassa pintaa vastaan tulevalle signaalilla. (Kuva: Asp)

Kuten edellä olevista kuvista 14.15 ja 14.16 nähdään, syntyy ikkunan karmirakenteessa viistosti tuleville signaaleille etenemisväylä, jolla vaimennus on huomattavasti muita reittejä pienempi. Tämän signaalitien kokonaisvaikutus todellisessa rakennuksen ulkoseinässä riippuu luonnollisesti ikkunan tyypistä, karmirakenteen mitoista, signaalin suunnasta, käytetystä aallonpituudesta ja polarisaatiosta.

Arvioitaessa karmien vaikutusta tulee huomioida, että yllä olevissa esimerkeissä kysymys on vain yhdenlaisesta karmirakenteesta, jossa perusikkuna ja siihen liitetty tuuletusikkuna on varustettu yhden selektiivipinnan omaavalla erityislasi-paketilla. Kiinteillä ikkunoilla, joita useimmiten ovat rakennusten katutasossa olevien liikehuoneistojen ikkunat, ikkunoiden lasipintoja ympäröi tavallisesti kokonaan metallinen karmirakenne. Näiden rakenteiden yhteydessä edellä kerrottua pienemmän vaimennuksen signaalireittiä ei synny.

## 14.8 S-parametrit permittiivisyyden taustalla

Yleisesti kenttien sähkömagneettisen aaltoliikkeen tapauksessa, erityisesti tilanteissa, joissa aaltoliike ei enää vastaa tavallisessa ilmassa esiintyvää TEM-aaltoa, signaalin voimakkuuden toteaminen jännitteiden ja virtojen avulla on usein ongelmallista. Siksi korkeammilla taajuuksilla on yksinkertaisempaa tarkastella signaalien tehoja tutkittavassa aineessa etenevän, aineen läpi menneen ja sen rajapinnoista heijastuneiden signaalien avulla. (Caspers, 2012.) Yleisesti silloin puhutaan S-parametrien mittauksista.

S-parametrien mittausta on useimmiten käytössä myös rakennusmateriaalien laboratoriomittauksissa, joissa vapaan tilan menetelmällä pyritään arvioimaan materiaalien permittiivisyyttä, ja sen avulla vaimennusta. (Caspers, 2012; Pozar, 2012.)

S-parametrien selvittämiseen perustuva mittaustapa permittiivisyyttä tutkittaessa on ehkä laajimmin käytetty, sillä vektorikenttien mittauksiin kykeneviä piirianalysaattoreita on saatavilla yleisesti kohtuulliseen hintaan. Yleisessä muodossaan S-parametrejä N-porttiselle järjestelmälle kuvataan seuraavassa kuvassa esitettävän matriisin (kuva 14.17) avulla. Matriisissa esiintyvät  $V_n^-$  -termit kuvaavat  $n$ -portista heijastunutta jännitettä,  $V_n^+$  -termit kuvaavat  $n$ -portin kautta piirin läpi kulkenutta jännitettä ja  $S_{nn}$  -arvot esittävät matriisin heijastuneiden ja läpäisseiden signaalien suhdetta. (Mencarelli, Djafari-Rouhani, Pennec, & Pitanti, 2018; Pozar, 2012.)

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ \vdots \\ V_n^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ \vdots \\ V_n^+ \end{bmatrix}$$

**Kuva 14.17** S-matriisin yleinen rakenne.

Impedanssimatriisin kuvatussa jännitteiden ja virtojen suhteita piirissä, kertoo S-matriisi tai toiselta nimeltään sirontamatriisi heijastuneiden ja läpi menneiden signaalien suhteista. S-matriisin käyttökelpoisuutta lisää se, että se voidaan muuntaa pienellä vaivalla tarvittaessa myös jännite- ja virtamatriisiksi. (Pozar, 2012.)

Tarkasteltaessa piirin rajapinnoissa heijastuneita ja läpäisseitä signaaleja jännitteiden avulla, voidaan kirjoittaa

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+}, \quad (14.22)$$

joka sanallisesti tulkittuna kertoo syöttävältä portilta  $j$  etenevän komponentin  $V_j^+$  ja portissa  $i$  näkyvän heijastuneen jännitteen  $V_i^-$  suhteen. Tässä tulkinnassa oletetaan, että kaikki muut piirin portit on täydellisesti sovitettu, eikä niihin syötetä tehoa. Näin

ollen S-matriisin alkio  $S_{ii}$  kertoo suoraan piirin  $i$  portissa olevan heijastuskertoimen, ja  $S_{ij}$  kuvaa jännitteen vahvistumista tai vaimentumista, kun alkuperäinen jännite syötetään porttiin  $j$  ja se mitataan portista  $i$ . (Poazar, 2012.)

Molempien, materiaalin sähköistä käyttäytymistä kuvaavien kompleksisten suureiden, permittiivisyyden ja permeabiliteetin, mittaamiseen vaaditaan edellä kuvatun amplituditiedon lisäksi myös vaihetieto sekä materiaalin läpäisseydestä että materiaalin pinnoilta heijastuneista signaaleista. Tilannetta helpottaa, jos materiaalin tiedetään, tai voidaan ainakin vahvasti olettaa, olevan ei-magneettinen, jolloin on mahdollista käsitellä permeabiliteettia samanlaisena kuin se on ilmassa. Silloin sen permeabiliteettia kuvaavan kertoimen lukuarvon voidaan olettaa olevan riittävän lähellä ykköstä, ja sen vaikutus voidaan jättää huomiotta matemaattisessa käsittelyssä. Tällöin tilanne yksinkertaistuu myös mittausten osalta, sillä silloin tarvitaan pelkän permittiivisyyden selvittämiseen yksinkertaisimmillaan vain heijastunut tai läpi mennyt signaali.

Silloin kun voidaan olettaa mitattavan piirin sisältävän vain yhtä homogeenistä materiaalia, voidaan tilannetta tarkastella 2-porttisen järjestelmän avulla.

S-parametrit ovat 2-porttijärjestelmän tulo- ja lähtövaste. Kaksiporttijärjestelmän periaatekuva on esitetty alla olevassa kuvassa 14.18.



**Kuva 14.18** Kaksiporttijärjestelmän kuvaus.

Kaksiporttijärjestelmän tarkoituksena on määrittää yksikäsitteisesti piirin läpi kulkevat signaalit, sekä kummallekin portille omat kompleksiset, impedansseista riippuvat, heijastuskertoimensa. Kuvassa 14.18 muuttuja  $a_i$  edustaa piirin läpi kulkevaa signaalia ja  $b_i$  portista  $i$  heijastuvaa signaalia. Niiden määrittely perustuu normalisoiuihin jännitearvoihin  $V_i$ , virtoihin  $I_i$ , ja piirin porttien kompleksisiin impedansseihin  $Z_i$ . Piirin signaalit voidaan laskea käyttäen seuraavia kaavoja 14.23 ja 14.24, joissa  $Z_i^*$ -termi kuvaa impedanssin kompleksikonjugaattia.

$$a_i = \frac{V_i + Z_i I_i}{2 \sqrt{|Re(Z_i)|}}, \quad (14.23)$$

$$b_i = \frac{V_i - Z_i^* I_i}{2 \sqrt{|Re(Z_i)|}}. \quad (14.24)$$

Edellä esitettyjä muuttujia käyttämällä S-matriisi yksinkertaistuu muotoon

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}. \quad (14.25)$$

Mittaamalla heijastuneet ja portin läpi edenneet signaalit, saadaan määriteltyä tarvittavat S-parametrit seuraavasti:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{\text{kun } a_2 = 0}, \quad (14.26)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{\text{kun } a_1 = 0}, \quad (14.27)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{\text{kun } a_2 = 0, \text{ ja}} \quad (14.28)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{\text{kun } a_1 = 0}. \quad (14.29)$$

käytännössä S-matriisien kanssa toimittaessa tavallisesti oletetaan, että piirin eri porttien impedanssit ovat samanlaisia, yleensä 50  $\Omega$  suurusia. (Pozar, 2012.)

## 14.9 S-parametrien ja permittiivisyyden yhteys

Vaikka tässä väitöstutkimuksessa pääasiallinen näkökulma onkin erilaisten ulkoseinärakenteiden ja materiaalien RF-vaimennus erilaisilla taajuuksilla, on hyödyllistä tuntea erilaisten materiaalien permittiivisyyksien arvot. Permittiivisyyksien ja ainepaksuuksien avulla voidaan laskennallisesti määrittää materiaalikerrosten RF-vaimennukset eri taajuuksilla. Samoin permittiivisyyksien tunteminen antaa mahdollisuuden arvioida kokonaisvaimennusta, jos aineiden ominaisuudet muuttuvat kerroksittain. Tämä tilanne tulee esimerkiksi silloin, kun materiaalin ulkopinta on kostea, mutta sisäpinta pysyy kuivana.

Rakennusmateriaalien tapauksessa permittiivisyys tavallisesti määritellään piiri-analysointorin avulla, jolla saa suoraan taajuuspistekohtaiset arvot S-parametreille. Piiri-analysointoreille soveltuvia mittausten menetelmiä on useita, mutta seuraavassa keskitytään lähinnä ns. vapaan tilan mittaukseen. Vapaan tilan vaimennukset ovat ryhmänä kiinnostavia erityisesti siksi, että ne soveltuvat hyvin isohkojen, levymäisten materiaalinäytteiden mittauksiin.



Ennen varsinaista mittausta on antenneihin kytketty piirianalysointilaite kalibroitava. Kalibrointiin on käytettävissä useita hieman toisistaan poikkeavia menetelmiä, joista tunnetuimmat ovat TRL (through-reflect-line), (TRM) through-reflect-match ja (LRL) line-reflect-line. ”Line”-osuus voidaan tehdä myös siirtämällä antennia  $\frac{1}{4}$  aallonpituuden verran, jolloin menetelmä yksinkertaistuu hieman. Heijastus puolestaan tehdään yksinkertaisesti asettamalla näytteen tilalle RF-signaaleja heijastava levy, esim. alumiini- tai teräslevy, jota signaali ei läpäise. Heijastavan levyn tulee olla hyvin tarkasti tutkittavan materiaalin kokoinen ja pinnaltaan mahdollisimman tasainen.

Kalibroinnin jälkeen mitataan vertailumittaukseksi tilanne, jossa näytteen paikalla antennien välillä on puhdas aukko, jolloin tilanne vastaa puhtaassa ilmassa tapahtuvaa signaalin etenemistä. Tämän jälkeen mittaus toistetaan asettamalla antennien väliin mitattava kappale. Pelkän aukon avulla tehtävä mittaus on tarpeen, sillä siinä näkyvät kaikki kompensoimista vaativat ympäristön heijastukset.

Jos materiaalin oletetaan olevan resiprookkinen, mittauksilla on tarpeen selvittää ainakin  $S_{11}$  ja  $S_{12}$ . Myöhemmässä analyysissä voidaan tehdä aikatason ikkunointi, jolla on mahdollista erottaa heijastuneet signaalin komponentit suoraan edenneistä ja poistaa ne suodatuksella. (Rohde & Schwarz, 2012.)

## 14.10 Aikatason ikkunointi

Mittauksissa usein suurin yksittäinen epätarkkuuden aiheuttaja on mitattavien kappaleiden rajapinnoista syntyneet heijastukset. Niiden poistamiseksi tai ainakin vähentämiseksi yksi tehokkaimmista työkaluista on aikatason ikkunointi. Siinä tarkoituksena on aikatason tarkastelussa erottaa signaalin eri aikoina edenneet signaalin osat, joten pidemmän matkan kulkeneet heijastukset on mahdollista erottaa suoraan edenneestä alkuperäisestä signaalista.

Mitattu data on yleensä vektori, jossa parametriarvot on esitetty taajuusakselilla olevilla pistearvoilla. Taajuusalueen esitys on muunnettavissa aikatasoon Fourier-menetelmään perustuvalla muunnoksella. (Smith, 1999.)

Mitattu datavektori on pistemäinen, joten jatkuvaan funktioon perustuva Fourier muunnos ei mittauksen analysoinnissa tule kysymykseen. Pistemäisen datavektorin tapauksessa tulee pistejoukko kuitenkin laajentaa alkamaan negatiivisesta äärettömyydestä positiiviseen äärettömyyteen, ja käytännössä tämä tehdään lisäämällä nolliä mittausjoukon kumpaankin päähän.

Tietokoneella tuloksia tarkasteltaessa kannattaa hyödyntää nopeampaa Fast-Fourier muunnosta (FFT), joka nopeuttaa laskentaa oleellisesti (Cooley & Tukey, 1965).

Koska Fourier-muunnoksessa käytetty signaali muutetaan keinotekoisesti ääretömäksi, siinä tulee samalla teoreettisesti tilanne, jossa signaali aikatasossa jatkuu toistuen loputtomasti. Tämä jatkuva toistuminen aiheuttaa epäjatkuvuutta signaalin alussa ja lopussa, ja tämän virheen korjaamiseen voidaan käyttää ikkunointia. Käytävissä olevia ikkunoita on erityyppisiä ja niiden ominaisuuksia on esitelty eri julkaisuissa. (Ghodgaonkar, Varadan, & Varadan, 1990; Harris, 1978; Lu, K. & Brazil, 1993; Nuttall, 1981.) Esimerkiksi Harris tarjoaa hyvin kattavan kuvauksen erilaisten ikkunointien menetelmistä ja ikkunafunktioiden käyttäytymisestä (Harris, 1978).

## 14.11 Mittausdatan muuntaminen permittiivisyydeksi

Materiaalien dielektristen ominaisuuksien mittaus tähtää rakennusmateriaalien näkökulmasta lähes poikkeuksetta vain permittiivisyyden mittaamiseen, vaikka seuraavana kuvatut menetelmät soveltuvat myös permeabiliteetin selvittämiseen. Permittiivisyydestä tulee huomioda sen kompleksisuus, jolloin reaali-osaa voidaan ajatella materiaaliin varastoituneen sähkökentän määränä valaistaessa materiaalia ulkopuolelta tulevalle sähkömagneettisella kentällä. Kompleksisen suureen imaginaariosa puolestaan kertoo materiaalien häviöistä. Edellä mainituista osista toisinaan kootaan häviökerroin tai häviötangentti, joka on permittiivisyyden imaginaariosan suhde reaali-osaan.

Niin kuin edellä kuvattiin, on rakennustuoteteollisuuden materiaalien permittiivisyyden tutkimuksissa tavallisin tapa käyttää piirianalysointia ja siitä saatavia S-parametreja. S-parametrien muuntaminen permittiivisyydeksi vaatii kuitenkin matemaattista käsittelyä, joka voidaan tehdä useammalla eri tavalla, ja joista jokaisella on omat etunsa ja rajoituksensa. Usein tarkkoja tuloksia vaadittaessa on syytä soveltaa useampia menetelmiä, vaikka lähtötietoina kaikille käytettäisiin samoja S-parametreja. Seuraavassa esitellään lyhyesti menetelmistä tavallisimmat (Rohde & Schwarz, 2012) eli:

- NRW (Nicolson-Ross-Weir-menetelmä,
- NIST:n iteratiivinen menetelmä,
- Pelkkään heijastukseen perustuva menetelmä,
- Pelkkään läpäisyyn perustuva menetelmä.

### 14.11.1 NRW-menetelmä

NRW (Nicholson-Ross-Weir)-menetelmästä on tullut ehkä laajimmin käytetty menetelmä muutettaessa S-parametrit aineen sähköisten ominaisuuksien kuvaamisessa käytettäviksi  $\epsilon_r$  ja  $\mu_r$  -arvoiksi. Lähtökohtaisesti laskennassa tarvitaan kaikki S-parametrit  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$  ja  $S_{21}$ , mutta jos voidaan perustellusti olettaa, että materiaalinäyte on resiprookkinen, eli näkyy samanlaisena kummaltakin puolelta katsottaessa, voidaan käsittelyä yksinkertaistaa ottamalla laskentaan mukaan vain parametrit  $S_{11}$  ja  $S_{21}$ .

Menetelmän heikkoutena on matemaattista käsittelyä ja tulkintaa vaikeuttava vaiheen monikertojen esiintyminen kaavoissa. Tilanne syntyy silloin, kun mitattava kappale sisältää jonkin kokonaisluvun verran puolen aallonpituuden mittaisia signaali-komponentteja. Siksi menetelmää käytetäänkin lähinnä materiaalinäytteille, joiden paksuus on suuruusluokkaa  $\lambda/4$ .

Vaiheen epävarmuus johtuu puolen aallonpituuden kohdissa siitä, että heijastuskerrointa kuvaava  $S_{11}$ -arvo pienenee näissä pisteissä lähelle nollaa. Käytännössä tämä johtuu mitattavan kappaleen kummastakin rajapinnasta syntyvistä heijastuksista, jolloin niiden osuessa samaan kohtaan ja ollessa puolen aallonpituuden etäisyydellä ne lähes kumoavat toisensa. (Costa, Borgese, Degiorgi, & Monorchio, 2017.)

Hyvin lähellä nollaa olevilla arvoilla virhe kasvaa voimakkaasti ja näiden taajuuspisteiden läheisyydessä mittaustulokset eivät ole enää luotettavia. Huomattavaa on aallonpituuden vaihtelevuus erilaisissa väliaineissa, joten puolen aallonpituuden pituus ilmassa ei vastaa puolta aallonpituutta aineen sähköisenä pituutena. Niin kuin edellä todettiin, on optimaalinen näytekappaleen paksuus aallonpituuden neljäsosa, mutta sen vastaavuus fyysisenä paksuutena on vaikea arvioida tuntematta materiaalin  $\epsilon_r$  ja  $\mu_r$  -arvoja. (Rohde & Schwarz, 2012.)

Seuraavassa esitellään NRW-menetelmä, joka perustuu heijastus- ja läpäisykertoimien avulla tehtävään  $S_{11}$ - ja  $S_{21}$ -parametrien määrittelyyn kyseessä olevalle materiaalille. (Rohde & Schwarz, 2012.)

Koska heijastus materiaalinäytteen pinnasta (pinnoista) määräytyy tavallisessa, vapaan tilan vaimennukseen perustuvassa, mittaustuloksissa ilman ja materiaalin aaltoimpedanssien suhteesta, se voidaan tuttuun tapaan kirjoittaa

$$\rho_{\text{sisään}} = S_{11} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad (14.30)$$

jossa  $Z_1$  vastaa tilannetta, jossa mittauksessa tarkasteltava kappale on sijoitettu paikalleen mittaustelineeseen ja  $Z_0$  vastaavasti on vain pelkän ilman impedanssi. Teoreettisesti tarkasteltuna on huomattava, että yllä oleva impedanssiin perustuva

kaava pätee tarkasti vain silloin, kun materiaalinäyte on äärettömän paksu. (Nicolson & Ross, 1970.)

Edellä olevaa kaavaa käytettäessä tulee muistaa, että jos NRW-menetelmää sovelletaan aaltoputkimittauksiin, joissa signaali etenee TE<sub>10</sub>-moodissa, impedanssin määrittely poikkeaa tavallisesta TEM-moodin tilanteesta. (Rothwell, Frasch, Ellison, Chahal, & Ouedraogo, 2016.)

Koska mitattavalla kappaleella on tietty paksuus, ja paksuuden perusteella määntyvät heijastusten paikat ja sitä kautta heijastusten vaiheet, määritellään etenevää signaalin osaa kuvaava läpäisykerroin  $\tau$  paksuuden ja etenemisvakion avulla seuraavasti (Costa et al., 2017)

$$\tau = e^{-jkd} = e^{-\gamma d}, \quad (14.31)$$

jossa  $k$  = aaltoluku,  $d$  = näytteen paksuus ja  $\gamma$  on etenemisvakio. Seuraavassa määritellään S-parametrien ja heijastusten sekä etenevien signaalien väliset riippuvuudet seuraavasti (Costa et al., 2017; Rohde & Schwarz, 2012)

$$S_{11} = \frac{\rho(1-\tau^2)}{(1-\rho^2\tau^2)} \text{ ja} \quad (14.32)$$

$$S_{21} = \frac{\tau(1-\rho^2)}{(1-\rho^2\tau^2)}. \quad (14.33)$$

Tässä vaiheessa  $S_{11}$  ja  $S_{21}$  -arvoista lasketaan apumuuttuja  $X$ , jota tarvitaan heijastuskertoimen määrittämisessä (Rohde & Schwarz, 2012)

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2 S_{11}}. \quad (14.34)$$

Kaavoissa esiintyvä heijastuskerroin  $\rho$  on kompleksinen, ja sille on löydettävissä oikea juuren arvo valitsemalla  $|\rho_1| < 1$  seuraavan kaavan 14.35 tuloksesta

$$\rho = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \quad (14.35)$$

ja käyttämällä edellä laskettua heijastuskerointa ja S-parametreja saadaan läpäisykerroin (Rohde & Schwarz, 2012)

$$\tau = \frac{S_{11} + S_{21} - \rho}{1 - (S_{11} + S_{21}) \rho}. \quad (14.36)$$

Läpäisykerrointa tarkasteltaessa on syytä erottaa sen amplitudi ja vaihetermit toisistaan sekaannusten välttämiseksi, jolloin voidaan kirjoittaa

$$\tau = e^{-\gamma d} = |\tau| e^{-j\phi}, \quad (14.37)$$

jossa  $|\tau|$  on amplitudi ja  $\phi$  vaihe. (Costa et al., 2017.)

Edellisestä kaavasta on luonnollista logaritmia käyttämällä ratkaistavissa kompleksinen etenemisvakio, jonka kompleksisuus perustuu  $\tau$ :n edellä nähtyyn kompleksisuuteen. Seuraavan kaavan 14.38 avulla voidaan ratkaista etenemisvakion kompleksiset osat erikseen. Siinä  $\ln$ -funktion avulla saadaan esiin amplitudi ja etenemisvakion imaginaarinen osa kuvautuu hakasuluissa olevien kahden oikeanpuoleisen termin avulla seuraavasti (Costa et al., 2017; Rohde & Schwarz, 2012)

$$\gamma = jk = \frac{1}{d} [-\ln(|\tau|) - j\phi + j2\pi n], n = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (14.38)$$

Yllä olevasta kaavasta 14.38 on helppo nähdä menetelmälle rajoituksia aiheuttava vaihetermin monitulkintaisuus.

Edellä esitetyn monitulkintaisuuden saa kuitenkin kierrettyä, jos on mahdollista pitäytyä ohuissa kappaleissa. Niin kuin edellä on todettu, jos kappaleen paksuuteen on mahdollista vaikuttaa menettämättä mitään oleellista sen rakenteesta, valitaan paksuudeksi neljäsosa aallonpituudesta. Silloin edellä olevassa kaavassa  $n = 0$ , joten vaihetermiksi jää vain  $j\phi$ . (Costa et al., 2017; Rothwell et al., 2016.)

Kun etenemiskerroin  $\gamma$  on laskettu, voidaan siitä selvittää ainakin estimaatti permittiivisyydelle ( $\epsilon^*$ ) ja permeabiliteetille ( $\mu^*$ ) käyttäen seuraavia kaavoja (Costa et al., 2017.)

$$\epsilon^* = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right), \text{ ja} \quad (14.39)$$

$$\mu^* = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1+\rho}{1-\rho} \right). \quad (14.40)$$

Koska NRW-menetelmän rajoitus kappaleen paksuuden ollessa lähelle aallonpituuden puolikasta tai sen monikertaa on laajalti tiedossa, on sille ehdotettu monenlaisia korjauksia, joilla voidaan löytää ainakin yksi ratkaisu. (Costa et al., 2017; Rohde & Schwarz, 2012; Rothwell et al., 2016.)

## 14.11.2 Uusi menetelmä NIST:ltä

Tutkimuslaboratorio NIST (National Institute of Standards and Technology) on ollut hyvin aktiivinen S-parametrien ja permittiivisyyden välisen yhteyden selvittämisessä. (Kim & Baker-Jarvis, 2014.) Eräs käyttökelpoinen menetelmä perustuu Newton-Raphson -nimiseen menetelmään, jolla etsitään funktiolle juuria. Rajoituksena tälle menetelmälle on se, että sillä saadaan esiin estimaatti vain permittiivisyydelle. Sekin perustuu NRW:n tapaan kaikkien neljän S-parametrin käyttöön, joista tarvittaessa voidaan jättää pois toista suuntaa edustavat  $S_{12}$  ja  $S_{22}$ .

Menetelmä vaatii kuitenkin jollakin tavalla perustellun aloitusarvon  $\varepsilon$  :lle, jonka tarkkuus vaikuttaa laskenta-aikaan. Kysessä on iteratiivinen menetelmä, joka ei kärsi NRW:n tapaisista epätarkkuuksista tietyillä materiaalin paksuuksilla. Tämän vuoksi menetelmä sallii mielivaltaisia paksuuksia mitattaville materiaaleille, mutta soveltuu ensisijaisesti vähähäviöisille näytteille. Arvioitaessa tämän menetelmän käyttökelpoisuutta tulee huomioida, että tässä käsiteltävä versio pätee vain ei-magneettisille materiaaleille. (Rohde & Schwarz, 2012; Collier & Skinner, 2007.)

Menetelmän matemaattinen eteneminen (Rohde & Schwarz, 2012) esitetään seuraavassa kaavoilla, joissa esiintyvät tekijät on lueteltu seuraavassa:

$d$  = materiaalin paksuus, ja  $d_{\text{(ilma)}} = d_1 + d + d_2$  on antennien välinen etäisyys.  
 $\varepsilon_r$  = aineen suhteellinen permittiivisyys ja  $\mu_r$  = suhteellinen permeabiliteetti  
 $\lambda_0$  = vapaassa tilassa oleva aallonpituus ja  $\lambda_c$  = aallonpituus katkootaajuudella  
 $c$  = valon nopeus ilmassa ja  $\omega$  on kulmataajuus  $2\pi f$ .

$$\rho = \frac{\frac{\gamma_0 - \gamma}{\mu_0} \frac{\mu}{\mu_0 + \gamma}}{\frac{\gamma_0 + \gamma}{\mu_0} \frac{\mu}{\mu_0 + \gamma}}, \quad (14.41)$$

jossa tyhjiön tai ilman etenemiskerroin lasketaan kaavalla

$$\gamma_0 = j \sqrt{\left[\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2\right]}, \quad (14.42)$$

missä  $\lambda_c$  edustaa systeemin omaa katkootaajuutta. Tämä termi liittyy tilanteeseen, jossa S-parametrit on mitattu aaltoputken tai koaksiaalisen liitännän kanssa.

Tutkittavassa materiaalissa etenemiskerroin on

$$\gamma = j \sqrt{\left[\frac{\omega^2 \mu_r \varepsilon_r}{c^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2\right]}, \quad (14.43)$$

ja valon nopeus ilmassa totuttuun tapaan (kaava 13.1)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Sijoittamalla valon nopeuden kaava etenemiskertoimen kaavaan, saadaan

$$\gamma = j \sqrt{\left[ \omega^2 \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 - \left( \frac{2\pi}{\lambda_c} \right)^2 \right]}. \quad (14.44)$$

Tässä käsittelyssä on koko ajan voimassa oletus  $\mu_r = 1$ . Säilyttämällä tämä oletus edelleen, voidaan ensimmäinen kaava 14.41 kirjoittaa hieman lyhempään muotoon

$$\rho = \frac{\frac{\gamma_0 - \gamma}{\mu_0} \frac{\mu}{\mu_0}}{\frac{\gamma_0 + \gamma}{\mu_0} \frac{\mu}{\mu_0}} = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0 + \gamma}, \quad (14.45)$$

ja näytteen läpi mennyt etenevä signaalin osa voidaan kirjoittaa muotoon

$$\tau = e^{-\gamma d} = e^{-jd \left( \sqrt{\left[ \omega^2 \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 - (2\pi/\lambda_c)^2 \right]} \right)}. \quad (14.46)$$

Ratkaisemalla jompikumpi alla olevista kaavoista edetään kohti lopullisen permittiivisyyden löytymistä.

$$F(\varepsilon_r) = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} - \left[ e^{-2\gamma_0(d_{ilma}-d)} \right] \frac{\tau^2 - \rho^2}{1 - \tau^2 \rho^2}, \text{ tai} \quad (14.47)$$

$$F(\varepsilon_r) = \frac{S_{21} + S_{12}}{2(1 - \tau^2 \rho^2)} - \tau(1 - \rho^2) \left[ e^{-j\gamma_0(d_{ilma}-d)} \right]. \quad (14.48)$$

Edellä olevat vaihtoehdot kaavat ovat itse asiassa permittiivisyyden virheen suuruutta kuvaavia arvoja ja iteraatioita jatketaan, kunnes ne lähestyvät nollaa riittävällä tarkkuudella. Iteraatio perustuu Newtonin menetelmään, ja menetelmän juuren löytäminen perustuu virheen minimoimiseen niin sanotulla Jacobian matriisilla.

Matriisissa määritellään muuttujat

$$F(\varepsilon_{r1}) = f_1(\varepsilon', \varepsilon'') \text{ ja} \quad (14.49)$$

$$F(\varepsilon_{r2}) = f_2(\varepsilon', \varepsilon'') \quad (14.50)$$

sisällytettäväksi varsinaiseen Jacobian-matriisiin, jonka muoto on

$$J = \begin{pmatrix} \frac{f_1(\varepsilon' + h, \varepsilon'') - f_1(\varepsilon' - h, \varepsilon'')}{2h} & \frac{f_1(\varepsilon', \varepsilon'' + h) - f_1(\varepsilon', \varepsilon'' - h)}{2h} \\ \frac{f_2(\varepsilon' + h, \varepsilon'') - f_2(\varepsilon' - h, \varepsilon'')}{2h} & \frac{f_2(\varepsilon', \varepsilon'' + h) - f_2(\varepsilon', \varepsilon'' - h)}{2h} \end{pmatrix}, \quad (14.51)$$

jossa  $h$ :lle annetaan pieni arvo. Funktion läheneminen kohti oikeaa permittivisyyden arvoa toteutetaan ottamalla  $J$ -matriisista käänteismatriisi ja kertomalla se saadulla  $\varepsilon_r$ :n arvolla. Näiden avulla saadaan muutostermi, joka lisätään saatuun  $\varepsilon_r$ :n arvoon seuraavasti

$$\Delta\varepsilon_r = J^{-1} \varepsilon_r, \text{ ja} \quad (14.52)$$

$$\varepsilon_r(\text{uusi}) = \varepsilon_r + \Delta\varepsilon_r. \quad (14.53)$$

Iteraatio jatkuu niin pitkään, kun voidaan todeta  $F(\varepsilon_r)$  arvon olevan lähes nolla. (Rhode & Schwarz, 2012; Baker-Jarvis, Vanzura, & Kissick, 1990; Baker-Jarvis, Geyer, & Domich, 1992; Baker-Jarvis et al., 1998.)

### 14.11.3 Pelkkään heijastukseen perustuva menetelmä

Mittauksiin on kehitetty erilaisia menetelmiä, joita voidaan soveltaa tilanteissa, joissa vain toinen, joko heijastus- tai läpäisykerroin on käytettävissä. Tällainen tilanne ilmenee, jos mittauksissa syystä tai toisesta jo mitattaessa tai analyysissä havaitaan toisen  $S$ -parametrin olevan epäluotettavan. Tässäkin menetelmässä oletetaan että  $\mu_r = 1$ , ja tarkoituksena on löytää suhteelliselle permittiivisyydelle, ( $\varepsilon_r$ :lle), oikea arvo. Koska menetelmä nimensä mukaan perustuu vain heijastukseen, on ratkaisun löytyminen  $S_{11}$ -parametrin määrittämisen tarkkuudesta riippuvainen. Kysymys on iteratiivisesta menetelmästä, jossa  $F_R$  on jälleen erofunktio, jonka arvo pyritään nollaamaan. Nollattavassa funktiossa  $d$  on näytteen paksuus,  $\omega = 2\pi f$ , eli kulmataajuus ja  $c$  on valon nopeus. (Amiet, 2017; Gonçalves et al., 2018.)

$$F_{RO}(\varepsilon_r) \equiv \frac{(\varepsilon_r - 1) \tan(v)}{2\sqrt{\varepsilon_r + j(\varepsilon_r + 1) \tan(v)}} + S_{11} = 0, \quad (14.54)$$

jossa

$$v = d \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r} \quad (14.55)$$



#### 14.11.4 Pelkkään läpäisyyn perustuva menetelmä

Vain läpäisyparametriin  $S_{21}$  perustuva menetelmä on käyttökelpoinen silloin kun heijastusta kuvaava parametria  $S_{11}$  ei voida käyttää. Tässäkin tapauksessa perusoletuksena on tutkittavan materiaalin olevan ei-magneettinen ja  $\mu_r = 1$ . Tämäkin menetelmä on iteratiivinen ja tarkoituksena on asteittain pienentää saadun  $S_{21}$ -arvon ja funktion  $F_{TO}$  eroa. Kun ero nollautuu, on ratkaisu permittiivisyydelle löytynyt. Funktion  $F_{TO}$  kuvaus on seuraava. (Amiet, 2017; Gonçalves et al., 2018.)

$$F_{TO}(\varepsilon_r) \equiv S_{21} \left[ \varepsilon_r \cos(v) + j \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{4}} (1 + \varepsilon_r) \sin(v) \right] - \varepsilon_r = 0, \quad (14.56)$$

jossa

$$v = d \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r} \quad (14.57)$$

### 14.12 Tässä väitöstutkimuksessa sovelletut menetelmät

Tässä työssä kuvatut materiaalien sähköisiä ominaisuuksia valottavat tulokset ovat koosteita yksittäisten mittausten antamista tuloksista. Valtaosa perusmateriaaleista on pyritty mittaamaan kahdella toisistaan riippumattomalla menetelmällä, jotka molemmat kuitenkin pohjautuvat vapaan tilan mittauksiin. Tyypillisesti ensimmäiset, karkeamman tason laboratoriomittaukset on tehty kuvassa 14.8 kuvatulla menetelmällä, jossa antennit on sijoitettu kaukokenttään, ja signaalin kiertäminen näytteen ohi on toteutettu sijoittamalla näyte 300 millimetriä vahvan betoniseinän keskellä olevaan aukkoon. Tässä mittaustavassa signaali tuotetaan signaaligeneraattorilla ja johdetaan lähetyksantenniin ja näytteen toisella puolella oleva vastaanottoantenni on kytketty spektrianalysointiin. Materiaalin vaimennus voidaan päätellä kahden mittauksen erosta, joista ensimmäinen on referenssimittaus ilman mitattavaa näytettä ja toinen tilanteessa, jossa aukkoon on sijoitettu tutkittava näyte. Tällä menetelmällä näytteiden koon on oltava melko suuri, yli 300 x 300 millimetriä, ja näytteiden tulee olla homogeenisiä. Mikäli näyte koostuu useammasta materiaalista, saadaan materiaalikerrosten yhteisvaikutus mitattua, mutta rajapinnoista syntyvät heijastukset heikentävät tulosten tarkkuutta. Kaukokenttään perustuvissa mittauksissa mitattiin tavallisesti materiaalinäytteet käyttäen molempia peruspolarisaatioita. Käytännössä tämä tehtiin kääntämällä antenneita 90 astetta ensimmäisten mittausten jälkeen.

Toinen tässä työssä paljon käytetty mittaussuunnitelma pohjautuu kuvien 14.10 ja 14.11 laitteistoon, jolla on mahdollista mitata tarkasti pienenkokoisten näytteiden S-parametrit. Näytteiden koko on tyypillisesti noin 150 x 150 millimetriä ja paksuus on noin 10–20 millimetriä. Tällä mittaussuunnitelmalla on mahdollista mitata näytteiden ominaisuuksia useammalla taajuusalueella vaihtamalla säteilijän edessä olevia aalloputkia.

Käytännössä mittauksissa on sovellettu luvuissa 13 ja 14 esitettyä teoriaa, jolloin ensimmäisenä on valittu tarkasteltava taajuusalue ja siihen sopivat antennit syöttävät aalloputket. Tämän jälkeen kalibroidaan mittaussuunnitelma ja mitataan S-parametrit halutulla määrällä taajuuspisteitä. Tämä mittaus tehdään yleisesti piirianalysaattorilla, johon on kytketty laitteistoa ohjaava kannettava tietokone, joka myös tallentaa mittaustulokset. Mittausten yhteydessä tietokone laskee esim. NRW-suunnitelmalla tai muulla kappaleessa 14.11 esitetyllä suunnitelmalla näytekappaleen permittiivisyyden. Permittiivisyyden kompleksista lukuarvoa käytetään seuraavaksi heijastus- ja läpäisykertoimien laskentaan kaavojen 13.49–13.52 perusteella. Kun tunnetaan näytekappaleen heijastus- ja läpäisykertoimet sekä näytteen paksuus, on näytteen vaimennus laskettavissa kaavojen 13.59 ja 13.60 avulla.

Yleisesti tämänkaltaisen mittaussuunnitelma on herkkä näytteen paksuudelle ja erityisesti sen vaihtelulle, ja se onkin yksi merkittävimmistä virhelähteistä. Näytteen paksuus aiheuttaa myös haasteita edellä kuvatun NRW-suunnitelman soveltamisessa, sillä sellaisilla taajuuksilla, joilla näytteiden sähköinen paksuus lähenee aallonpituuden puolikasta, pitää ottaa käyttöön muita suunnitelmia. Tyypillisesti se tehdään ottamalla NRW-suunnitelman avulla alkuarvo permittiivisyyden lukuarvolle ja jatkamalla käyttäen kappaleessa 14.11 kuvatuilla iteratiivisilla suunnitelmilla ainakin niillä taajuuksilla, joilla NRW-suunnitelman tarkkuus on heikko.

OSA 4  
TULOKSET



# 15 IKKUNOIDEN RF-LÄPÄISYMITTAUSTEN TULOKSIA

## 15.1 Taustaa

Tässä luvussa on esitetty mittaustuloksia todellisten ikkunoiden yksittäisille lasille ja lasituksille ja verrattu niitä simulaatioiden tuottamiin tuloksiin. Taustana tälle luvulle on tosiasia, jonka mukaan radiosignaalin vaimennukseen rakennuksen ulkokuoressa vaikuttavat sekä talon ulkoseinien että ikkunoiden vaimennukset. Radiosignaalit kulkevat rakennuksen ulkopuolelta sisätiloihin ja päinvastoin ensisijaisesti pienimmän RF-vaimennuksen reittiä.

Ikkunoiden perustyyppinä ja rakenteita on käsitelty luvussa 9, ja tässä luvussa esitellään ikkunoiden eri rakenneosien vaikutusta RF-signaalien kokonaisvaimennukseen. Ensimmäiseksi esitellään todellisissa uudisrakennuskohteissa mitattuja ikkunalasitusten signaalivaimennuksia. Sen jälkeen tutkitaan erikseen eri lasityyppejä ja pinnoitteita. Menetelmät perustuvat mittauksiin, simulaatioihin ja kenttämittauksiin. Luvun viimeisessä kappaleessa tarkastellaan vielä ikkunoiden puuosien vaikutusta koko ikkunarakenteen RF-vaimennukseen.

Ikkunoiden RF-vaimennuksia on viime vuosikymmenen aikana tutkittu paljon ja niiden vaimennuksista on kirjoitettu lukuisia julkaisuja. (Asp et al., 2012; Alias, 2013; Munk, 2005; Priya Rani, Sebastian, & Sebastian, 2008.) Mielenkiintoa ovat selittäneet ikkunoihin tulleet erilaiset pinnoitteet. Ikkunoiden aikaisemmin julkaistuja RF vaimennusten arvoja on lyhyesti luetteloitu jo luvussa 9.8.

Nykyiset energiatehokkuusvaatimukset täyttävissä ikkunoissa on käytännössä aina vähintään yksi selektiivikalvo. Selektiivikalvon tarkoitus on estää lämpösäteilyn eteneminen ikkunan lasipintojen läpi. Estäessään lämpösäteilyn aallonpituuksien etenemistä ikkunapintojen läpi, selektiivikalvo vaimentaa myös radiosignaaleita ei-toivotulla tavalla. Ratkaisuksi tähän haasteeseen on kehitetty erityinen menetelmä, jolla selektiivikalvon johtavaa pintaa käsittelemällä luodaan sähköinen rakenne, joka päästää läpi vain halutut taajuusalueet. Tavoitteena on muokata pintaa niin, että pinnoitetun ikkunalasien RF-vaimennus saadaan mahdollisimman pieneksi, mutta johtavasta pinnoitteesta poistetaan mahdollisimman vähän johtavaa materiaalia. Silloin lasin U-

arvo pysyy lähellä käsittelemättömän, yhtenäisen pinnan vastaavaa arvoa, joten lasin energiatehokkuus ei heikenny merkittävästi.

Selektiivikalvojen aiheuttaman suuren vaimennuksen pienentämiseksi on tehty monenlaisia kokeiluja, ja käyttökelpoisimmaksi vaihtoehdoksi on osoittautunut taajuusselektiivinen FSS (Frequency Selective Surface) -tekniikka. FSS-rakenteiden periaate on tunnettu pitkään (Bozzi, 2005; Itoh, 2005; Munk, 2005), mutta vasta viime aikoina niitä on yhdistetty laajemmin ikkunoiden selektiivipintoihin. (Kiani, G. I. et al., 2011; Philippakis et al., 2004; Widenberg & Rodriguez, 2002.)

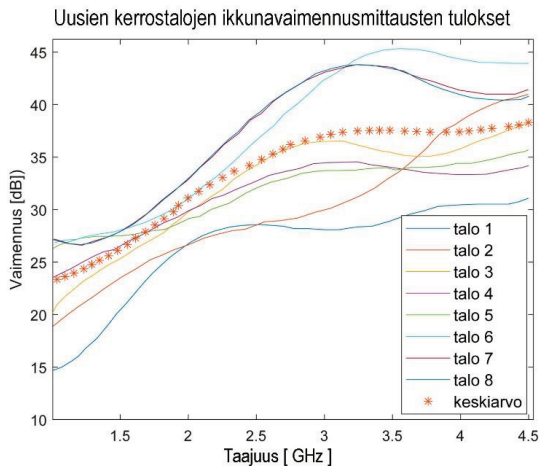
Tältäkin alueelta löytyy useita julkaisuja, mutta käytännössä kaikissa niissä taajuusselektiivisiä rakenteita on tutkittu vain laboratorioissa tai simulaattoreiden avulla. (Mitra et al., 1988; Munk, 2005; Sung et al., 2006.) Tutkimusta on tehty epäilemättä paljon laajemmin, mutta yritykset eivät luonnollisesti halua julkaista kaikkia omaan liiketoimintaansa liittyvien tutkimusten tuloksia. FSS-rakenteet suunnitellaan yleensä kapeakaistaisiksi, ja peruskuvion mitoitus määrää taajuusalueen, jolla rakenne toimii.

FSS-kuvion lisääminen lasin pintaan on edellä mainittujen julkaisujen perusteella ilmeinen ja tehokas tapa pienentää selektiivikalvolla varustetun ikkunalasin RF-vaimennusta. Tässä luvussa keskitytään sekä laboratoriomittauksilla että kenttätestauksella tutkimaan yksinkertaisen FSS-kuvion tehokkuutta RF-signaalien tehotason parantamisessa. Tässä väitöstutkimuksessa kuvattu menetelmä eroaa aikaisemmin kirjoitetuista julkaisuista sikäli, että muissa julkaisuissa FSS-pinnan vaikutusta ei ole arvioitu kenttäkokeilla. Tämän luvun kappaleessa 15.4 on kuvattu hanke, jossa selvitettiin laboratoriomittausten ja simulaatioiden lisäksi FSS-pinnan sijoittamista normaalin ikkunan paikalle ja sen aiheuttamaa muutosta kaupallisen operaattorin matkapuhelinsignaalin tehotasoon rakennuksen sisällä.

Tässä mittaustuloksia esittelevässä luvussa selvitetään ensin tavallisten pinnoittamattomien float-lasien sähköiset parametrit ja niistä johdetut vaimennukset eri taajuusalueilla. Tämän jälkeen siirretään huomio normaaleissa asuinkerrostaloissa oleviin tyypillisiin ikkunarakenteisiin. Radiosignaalien vaimennuksen tutkiminen aloitetaan ikkunoiden perusratkaisusta, jossa on ulkopuitteessa tavallinen float-lasi ja sisäpuitteessa yhdessä lasissa selektiivikalvo. (Hemmilä & Saarni, 1999; Ojanen et al., 2017.) Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan FSS-kuviolla varustettua yleisempää rakennetta, jota on mahdollista soveltaa ikkunan ohella muihinkin johtavia pintoja sisältäviin rakenteisiin.

## 15.2 Tavallisten ikkunoiden RF-vaimennukset

Ikkunoiden RF-vaimennuksien tarkempi tutkiminen alkoi, kun noin 10 vuotta sitten havaittiin uusien talojen kuuluvuusongelmien nopea yleistyminen. Silloin tehtiin uusissa asuinkerrostaloissa alustavia mittauksia, joiden tuloksista on seuraavassa esitetty koostekuva 15.1. (Asp et al., 2012.) On huomattava, että kaikki seuraavan kuvan kohteet olivat asuinkerrostalojen ensimmäisten kerrosten asuinhuoneiden mittaustuloksia, joissa mittalaitteisiin kytketyt antennit olivat noin 1,5 metrin etäisyydellä ikkunoista. Tämä luonnollisesti aiheuttaa hieman virhettä, sillä pienemmissä ikkunoissa saattavat ikkunoiden alumiiniset puitteiden etupinnat tulla antennien valaisemalle alueelle. Toisaalta tilanne edustaa kuitenkin realistista tilannetta sikäli, että lähetysantennin syöttämä teho valaisee lähes koko ikkunapinnan samoin kuin tukiasemankin lähettämä signaali näkyy koko seinäpinnalla.



**Kuva 15.1** Satunnaisesti valittujen asuinkerrostalojen ikkunoiden kokonaisvaimennukset.

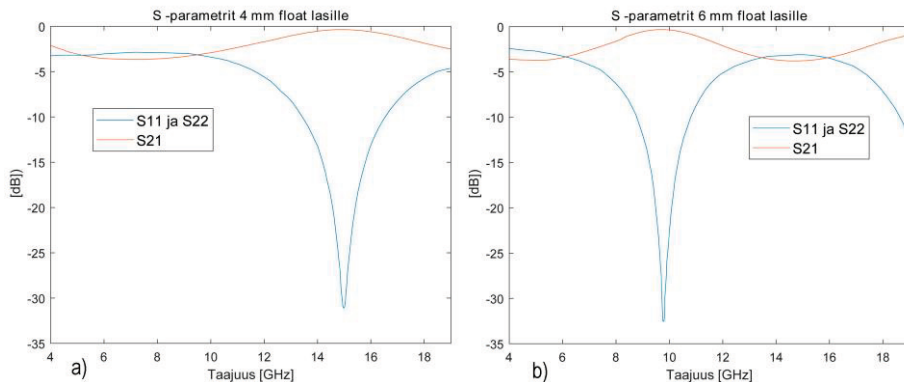
Kaikki kuvassa 15.1 esiintyvät ikkunat ovat MSE-tyyppisiä, joissa ulkopuitteessa on yksi float-lasi ja sisäpuitteessa eristyslaselementti. Tämän saman perusrakenteen lasityyppisiä käytetään pohjana seuraavissa kappaleissa tutkittaessa ikkunarakenteessa yleisesti käytettyjen lasien ominaisuuksia ja RF-vaimennuksia.

Ikkunoiden vaimennuksia arvioitaessa on syytä aina huomioida mittaustapa, sillä ikkuna-aukon RF-signaalien kokonaisvaimennukseen vaikuttaa ikkunalasien ohella myös karmiratkaisut ja lasitusten yksittäisten lasipintojen tyyppi ja määrä. Hyvin karkeasti voidaan todeta, että jokainen tavallinen float-lasi aiheuttaa noin 2 dB:n

vaimennuksen ja jokainen selektiivipinnoitettu lasi tuo taajuudesta riippuvan noin 25 dB:n lisävaimennuksen.

### 15.2.1 Tavallisen float-lasin permittiivisyys ja vaimennus

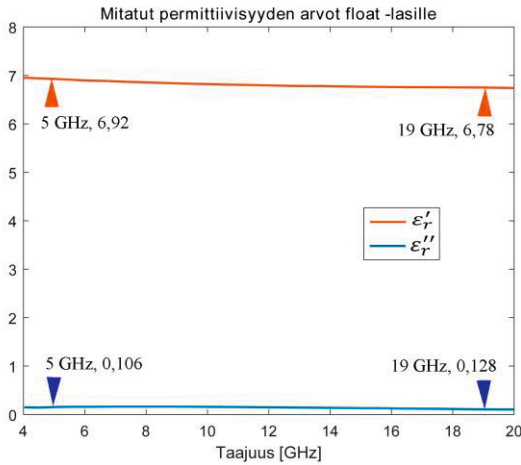
Esimerkkilaseiksi, jotka edustavat ulommaisen puitteen float-laseja, valittiin 4 millimetrin ja 6 millimetrin paksuiset tavalliset lasit, joille mitattiin kappaleessa 14.12 kuvattulla menetelmällä piirianalysointorin avulla S-parametrit ja niiden avulla laskettiin lasien permittiivisyydet. Seuraavassa kuvassa 15.2 on esitetty molempien lasipaksuuksien S-parametrit, joista huomio kiinnittyy ensimmäiseksi  $S_{11}$  ja  $S_{22}$  osalta paikallisten minimikohtien erilaiseen sijaintiin taajuusakselilla. Minimikohtien ero selittyy lasin paksuuksien erolla, jolloin lasin pinnoista heijastuvat komponentit summautuvat eri vaiheisina suoraan lasin läpi edenneeseen signaaliin.



**Kuva 15.2** S-parametrit 4 mm (a) ja 6 mm (b) laselle.

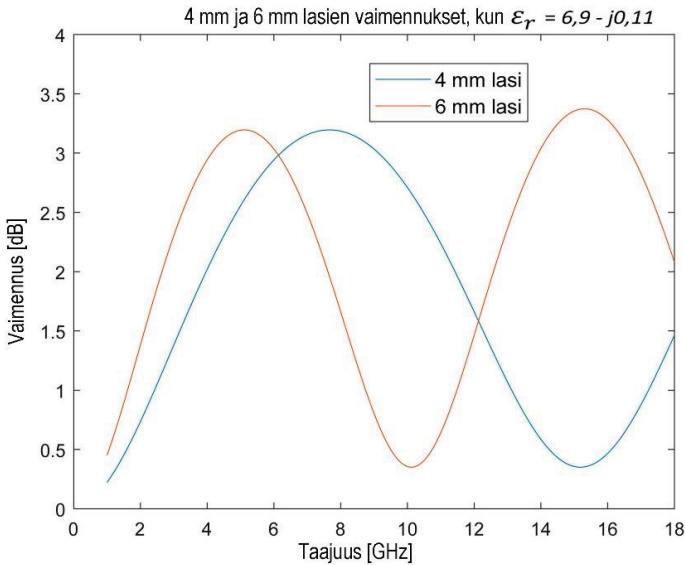
Lasinäytteille, joiden mittauksista saatiin kuvassa 15.2 esitetyt S-parametrit, voidaan laskea float-laseille permittiivisyyden arvot, jotka muuttuvat hyvin vähän taajuuden funktiona. Laseille on eri lähteissä ilmoitettu hieman toisistaan poikkeavia permittiivisyyden lukuarvoja, joita on käsitelty luvussa 9. Kuvan 15.2 esittämistä tuloksista saadaan laskennallisesti kuvassa 15.3 kuvatut permittiivisyyden arvot, jotka tukevat aikaisemmin julkaistuja lukuarvoja. (Kiani, G. et al., 2007; Philippakis et al., 2004; Sohail et al., 2011.)





**Kuva 15.3** Mitattujen float-lasien permittiivisyys taajuuden funktiona.

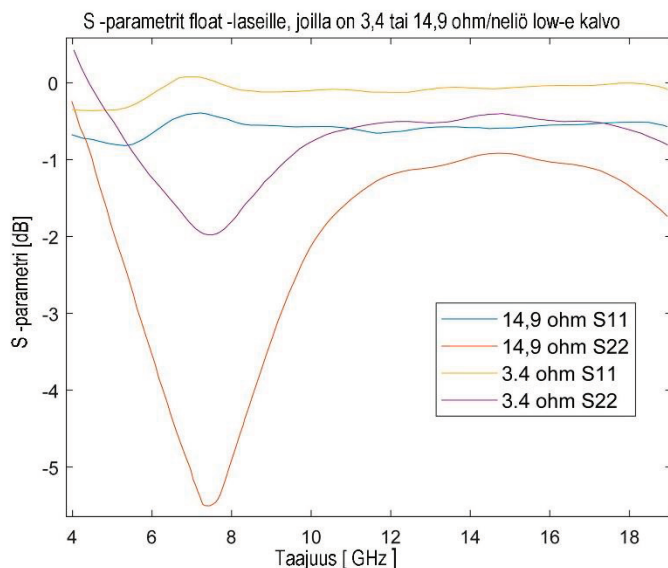
Seuraavassa kuvassa 15.4 on esitetty kuvassa 15.3 kuvattujen permittiivisyyden arvojen avulla kappaleessa 14.12 selitetyllä menetelmällä lasketut vaimennukset 4 millimetrin ja 6 millimetrin float-laseille. Kuvasta näkyy hyvin lasin etu- ja takapinnoista syntyneiden heijastusten vaikutus, joka saa sinimuotoisen vaimennuskäyrän vaihtelevaan taajuuden funktiona. Keskeinen tulos kuvassa on kuitenkin tavallisen pinnoittamattoman float-lasin vaimennus, joka mittaustulosten perusteella on keskimäärin noin 2 dB:n suuruusluokkaa.



**Kuva 15.4** 4 millimetrin ja 6 millimetrin lasien vaimennukset eri taajuuksilla.

## 15.2.2 Selektiivikalvojen vaikutus

Kuvassa 15.5 esitetään mittaustulokset kahdesta ikkunalasityypistä, joista ensimmäisessä on pohjana on 4 millimetrin float-lasi, johon on lisätty off-line menetelmällä tuotettu 3,5 ohm/neliö selektiivikalvo. Toisessa lasityypissä on ulkolasiin sisällytetty on-line menetelmällä jo lasin valmistusvaiheessa 14,9 ohm/neliö -pintavastuksella oleva huurtumista estävä kalvo. Kuva esittää piirianalysointorin avulla määritettyjä lasien S-parametrejä.

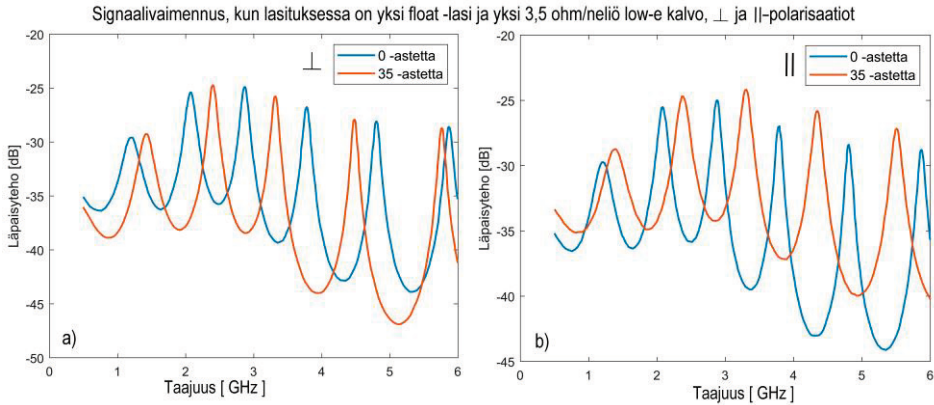


**Kuva 15.5** 4 millimetrin lasi, jolla on selektiivi- tai huurtumaton kalvo.

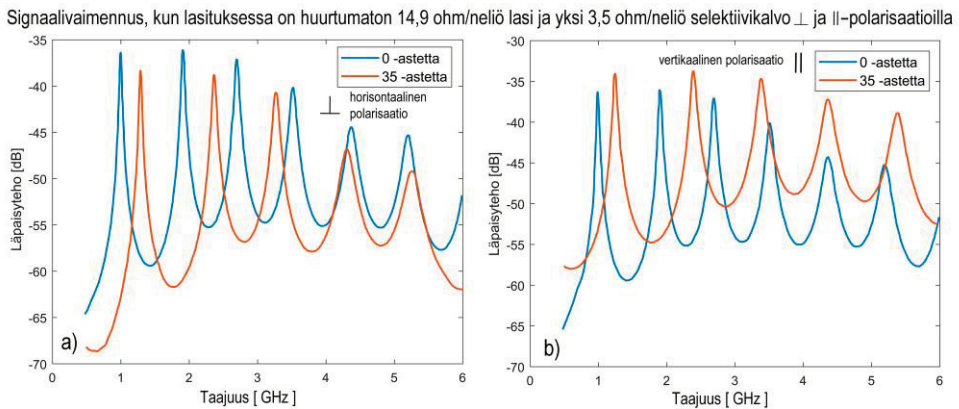
Seuraavaksi tarkastellaan ikkunoiden RF-vaimennuksia sellaisilla rakenteilla, joita on asennettu suurimpaan osaan tavallisia asuinkerrostaloja. Ensimmäisessä ikkunassa on tämänhetkiset U-arvovaatimukset täyttävä normaali rakenne, jonka puitteessa on normaaliin tapaan MSE-ikkunan elementit, eli 6 millimetrin float-lasi ikkunan ulkopuitteessa ja sisimmäisessä puitteessa on johtavuudeltaan 3.5 ohm/neliö oleva low-e-kalvo. Sitä verrataan tilanteeseen, jossa lasitus on muuten samanlainen, mutta ulkopuitteen lasi on huurtumaton, eli siinä on 14,9 ohm/neliö pinnoite.

Seuraavissa kuvissa esitetään Microwave Studio:lla saadut simulaatiotulokset ensin pelkän float-lasin ja yhden selektiivikalvon omaavalle lasitukselle (kuva 15.6 a ja b) ja seuraavaksi selektiivilasin ja huurtumattoman lasin yhdistelmälle (kuvat 15.7 a ja b). Kuvissa esitetään signaalivaimennukset lasituksille sekä horisontaaliselle ( $\perp$ ) että vertikaaliselle ( $\parallel$ ) polarisaatioille ja erikseen eri suunnista tuleville signaaleille.

Suunniksi tässä kuvassa on valittu suoraan lasia kohti tulevat signaalit sekä 35-asteen kulmassa saapuvat signaalit.



**Kuva 15.6** Yksi 6 mm float-lasi (a), ja eristyslasipaketissa normaali low-e-kalvo (b).



**Kuva 15.7** Yksi 6 mm huurtumaton lasi (a), ja eristyslasipaketissa normaali low-e-kalvo (b).

Verrattaessa tilannetta, jossa ikkuna on tavanomainen yhdellä selektiivikalvolla varustettu MSE-ikkuna tilanteeseen, jossa tavallisen selektiivikalvon lisäksi on ulommaisessa puitteessa huurtumaton lasi, havaitaan ikkunan kokonaisvaimennuksen kasvavan lähes 20 dB:ä uuden kalvon lisäämisen yhteydessä. Tulosten tulokinnassa tulee muistaa, että huurtumisen estämiseen tarkoitettu kalvo oli tässä esimerkissä vähemmän johtava kuin tavanomainen low-e-selektiivikalvo, joten jos ikkunan lasitukseen olisi lisätty huurtumista estävän kalvon sijaan toinen tavallinen low-e-kalvo, olisi vaikutus RF-vaimennukseen ollut vielä suurempi. Edellä esitetyt ikkunatyypit edustavat

ainakin 2010-luvulla eniten myytyjä ikkunavaihtoehtoja. Kahdella energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävällä hyvin johtavalla low-e-kalvolla varustettuja ikkunoita on kaupallisesti saatavilla, mutta niiden osuus markkinoilla ei ainakaan toistaiseksi ole ohittanut tavallista yhteen float-lasiin ja yhteen selektiivikalvoon perustuvaa tuotetta.

## 15.3 FSS-prototyypin valmistus ja simulointi

Eri rakennusmateriaalien matkapuhelintaajuuksien vaimennusta Tampereen yliopistossa on tutkinut intensiivisesti kaksi allekirjoittaneen johtamaa tutkimusryhmää, joista ikkunoiden lasipintojen RF-vaimennusten pienentämiseen keskittyi vuonna 2015 diplomityöntekijä Anil Baniya. Silloin päädyttiin valmistamaan testausta varten taajuusselektiivinen rakenne johtavasta materiaalista ja sen alle sijoitettavasta substraatista. Tällä testirakenteella oli mahdollista tehdä myös kokeita todellisissa rakennusympäristöissä. Tässä hankkeessa allekirjoittaneen osuus oli tutkimuksen suunnittelu, testauslaitteiston ja paikan järjestäminen sekä kuvion valinta ja mitoitus yhteistyössä Baniya:n kanssa. Simulaatioista vastasi tässä tutkimushankkeessa Anil Baniya.

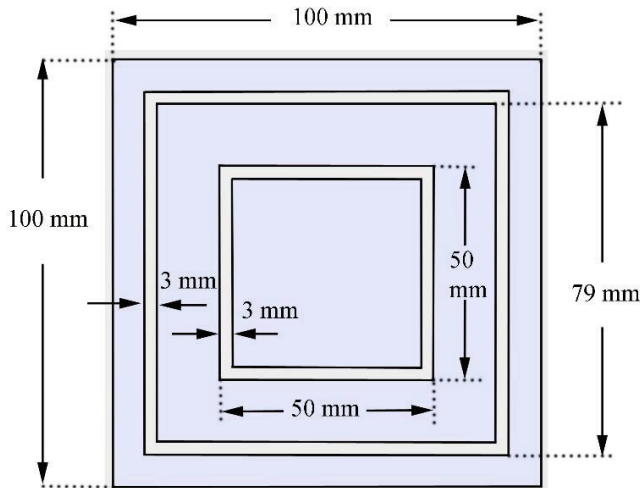
Koska seuraavassa esiteltävässä tutkimushankkeessa ei ollut käytettävissä johtavien pintojen tarkkaan hiomiseen tarvittavia laitteita, päädyttiin järjestämään koe polymeetyylimetakrylaatin pintaan liimattavan alumiinifolion avulla. Käytetyn polymeetyylimetakrylaatin yleisimmän käytetty nimitys on akryylimuovi, joksi sitä jatkossa kutsutaan tässäkin työssä. 3 millimetrin paksuista akryylimuovia käytettiin substraattina, ja se oli välttämätön alumiinisten elementtien rakenteelliseen tukemiseen. Substraattina olisi voitu käyttää myös lasia, mutta muovi valittiin kenttätestien vaatimaa kuljetusta ajatellen sekä pienemmän painonsa että pienemmän rikkoutumisvaaran vuoksi. Substraatin vaikutusta tarkistettiin simulaatioilla, joissa verrattiin FSS-kuvion toimintaa lasin ja muovin pinnalla. Näissä simulaatioissa todettiin, että merkittävää eroa ei substraattia vaihtamalla syntynyt, vaikka laskennassa huomioitiin permittiivisyyksien erot. Substraattien paksuudet pysyivät kaikissa simulaatioissa muutama millimetrin suuruusluokassa.

### 15.3.1 FSS-rakenteen alustava mitoitus

Varsinaiseksi taajuusselektiivisen alueen perussolun muodoksi valittiin neliö kuvion helpon valmistettavuuden vuoksi. Koska tarkoituksena oli suorittaa koekappaleella

myös kenttätestejä, tehtiin yksikkösolun mitoitus tavallisesti käytettävien matkapuhelinverkkojen taajuuksien 900, 1800 ja 2100 MHz perusteella. Näiden vaatimusten pohjalta kuvioksi valittiin sisäkkäisten neliöiden malli, josta saadaan kaistanpäästösuotimen tapaan toimiva pinta poistamalla johtavaa pinnoitetta keskimmäisen neliön ja sitä ympäröivien kehien ympäriltä.

Kuvion mitoitusta voi hyvin karkealla tasolla arvioida säännöllä, jonka mukaan kehän pituus vastaa suuruusluokassaan yhtä aallonpituutta. Luonnollisesti kehän pituus sen sisä- ja ulkomittojen perusteella on erilainen, mutta tällä säännöllä voikin lähinnä arvioida yksikkösoluista muodostuvan matriisin kokonaispinta-alaa. Varsinainen kuvion mitoitus tehtiin FSS:n suunnitteluun soveltuvan simulaattorin avulla, joka tässä tutkimuksessa oli Microwave Studio@ 2012. Uloimman poistettavan alueen kehän pituus määritettiin laskentaohjelmalla noin 328 millimetriksi, joka vastaa rakenteelle 900 MHz:n resonanssitaajuutta. Sisimmäinen kehä ympäröi keskelle jäävää johtavaa aluetta ja sen leveys on ulomman tapaan 3 millimetriä ja keskimääräinen pituus noin 141 millimetriä. Tällä kahden johtavan alueen rakenteella saadaan aikaan kaksihuippuinen kaistanpäästösuodatin, joka virittyy 900 MHz lisäksi 1900 MHz:lle. Suurempi viritystaajuus valittiin kahden käytössä olevan matkapuhelintekniikan käyttämien taajuuksien väliin, joten kenttäkokeissa voitiin tutkia yhdellä kuviolla 900 MHz:n lisäksi sekä 1800 MHz:ä että 3G:n käyttämiä 2100 MHz:n taajuusalueita.

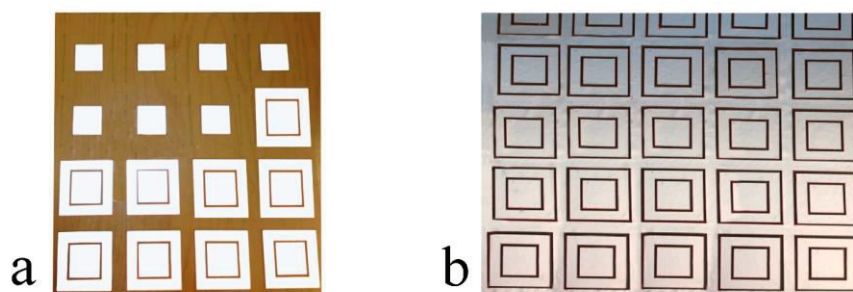


**Kuva 15.8** Testauksissa käytettyjen yksikkösolujen mitoitus. (Asp & Baniya, 2015)

Kuvassa 15.8 on esitetty FSS-kuvion yksikkösolun sisäkkäiset solut, joilla tavoiteltiin 900 ja 1900 MHz:n resonanssitaajuuksia.

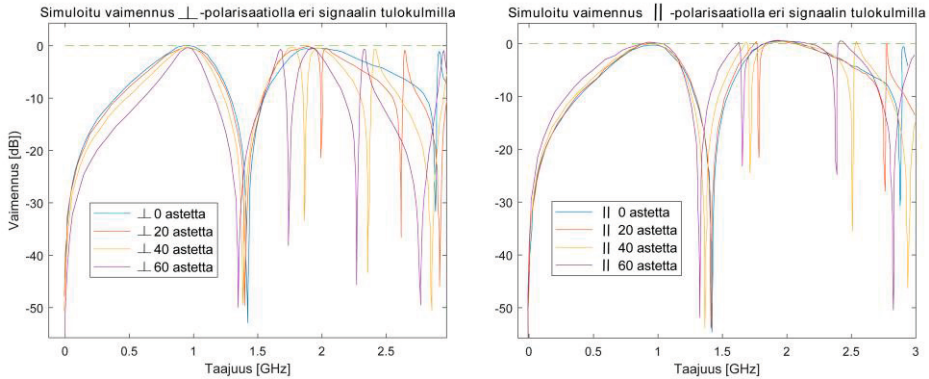
### 15.3.2 FSS-rakenteen valmistaminen

Sekä laboratorio- että kenttätesteissä käytetyn kappaleen valmistamiseen oli käytävissä 0,11 millimetrin vahvuista alumiinilaminaattia, josta leikattiin yksittäisiä elementtejä liimattavaksi akryylimuovin pintaan. Liimana käytettiin pullosta suihkutettavaa kontaktiliimaa. Liimakerros pyrittiin muodostamaan niin ohueksi kuin mahdollista, jotta sillä ei olisi vaikutusta lopputuloksen sähköiseen käyttäytymiseen. Koekappale muodostettiin 5 x 7 yksikkösolun matriisiksi. Seuraavissa kuvissa 15.9 a ja b kuvataan prototyypin valmistuksen etenemistä.



**Kuva 15.9** FSS-kuvion prototyypin valmistuksen eteneminen. (Asp & Baniya, 2015)

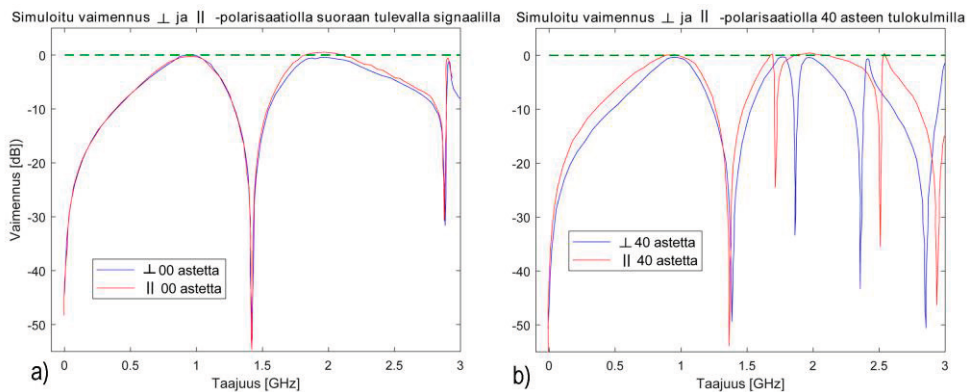
Tutkittaessa Microwave Studio simulaatioilla edellä mitoitettun FSS-kuvion käyttäytymistä, saatiin kuvissa 15.10 ja 15.11 esitettäviä tuloksia. Ensimmäisissä simulaatioissa on huomattava, että siinä substraatin vaikutusta ei huomioitu, ja johtavana pinnana käytettiin hyvin ohutta kiillotettua alumiinia, jonka paksuudeksi määriteltiin 0 millimetriä. Näillä oletuksilla voitiin kuitenkin arvioida karkealla tasolla itse kuvion ja sen mitoituksen käyttäytymistä suhteessa yhtenäiseen, koko substraatin peittävään alumiinipintaan.



**Kuva 15.10** Vaimennukset eri signaalin tulokulmilla horisontaalisella (a) ja vertikaalisella (b) polarisaatioilla. (Asp & Baniya, 2015)

Kuvista 15.10 a ja b havaitaan, että simulaatioiden perusteella matalien taajuuksien kattamiseen suunniteltu kuvion osa toimii horisontaaliselle ( $\perp$ ) ja vertikaaliselle ( $\parallel$ ) tilanteille lähes samalla tavoin, mutta 1.9 GHz:n taajuudella olevaa toista taajuushuippua parantamaan tarkoitettu kuvion osa toimii eri polarisaatioilla hieman eri tavoin eri signaalien tulokulmilla.

Tämän ilmiön tarkemman tutkimisen mahdollistamiseksi on seuraavassa kuvissa 15.11 a ja b koottu vain suoraan edennyt signaali kummallakin polarisaatioilla ja vastaava signaali, joka etenee kohti FSS-rakennetta 40 asteen kulmassa.



**Kuva 15.11** Vaimennukset eri signaalin nollan ja 40 asteen tulokulmilla horisontaalisella (a) ja vertikaalisella (b) polarisaatioilla. (Asp & Baniya, 2015)

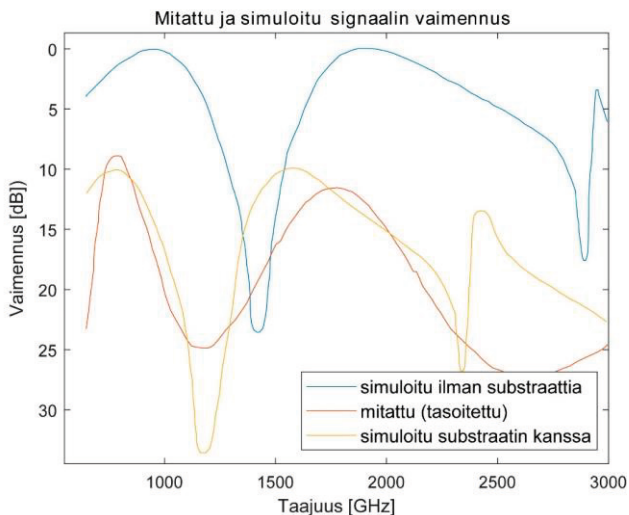
Kuvissa näkyvät terävät huiput ja siirtymät riippuvat FSS-rakenteen koosta. Määrittämällä rakenteen koko äärettömäksi, terävien piikkien määrä vähenee, mutta rakenteen realistisuus samalla katoaa.

### 15.3.3 FSS-rakenteen tarkempi simulaatio

Kuvion alustava arviointi tehtiin edellä ilman substraatin vaikutusta, ja johtavan pinnon johtavuus ja paksuus perustuivat vain suuruusluokkaperusteiseen alkuarviointiin. Tämän jälkeen valitun kuvion toimintaa tutkittiin realistisemmilla parametreillä, jotka valittiin seuraavasti.

Tarkempaan simulointiin käytettiin alumiinipinnoitteelle permeabiliteetin arvoa 1, alumiinin sähkön johtavuudelle arvoa  $3,56 \times 10^7$  S/m, lämmönjohtavuudelle arvoa 237 W/(m·K), materiaalin tiheydelle arvoa 2700 kg/m<sup>3</sup> ja paksuudelle arvoa 0,1 millimetriä. Substraattina käytetylle polymetyylimetakrylaatille permeabilitetti oli edelleen 1, ja permittiivisyydelle valittiin arvo  $2,5 + j0$ , joka perustui julkaisuissa ja käsikirjoissa esitettyihin arvioihin. (Engineering ToolBox, 2003b; Švorčík, Podgrabinski, Náhlík, Rybka, & Hnatowicz, 2005.)

Seuraavassa kuvassa 15.12 on verrattu karkeilla lähtöarvoilla sekä tarkemmilla ainevahvuuksilla ja sähköisillä parametreillä tehtyjen simulaatioiden tuloksia. Simulointien lisäksi FSS-rakenne on mitattu laboratoriossa, jolloin simulointitulosten ja mittausten luotettavuutta on mahdollista arvioida vertaamalla niitä toisiinsa. Sekä simuloinnit että mittaukset on tehty TE-polarisaatiolla niin, että signaali tulee kohtisuoraan lasipintaa kohti. Mittausten antamat tulokset on suodatettu esimerkinomaisesti 9:n asteen polynomifunktiolla heijastusten vaikutuksen poistamiseksi. Mittauksissa saatu vaimennus on FSS-rakenteen ja pelkän aukon välinen signaalitason ero.



**Kuva 15.12** Kuvion mittausten ja simulointien vertailu. (Asp & Baniya, 2015)



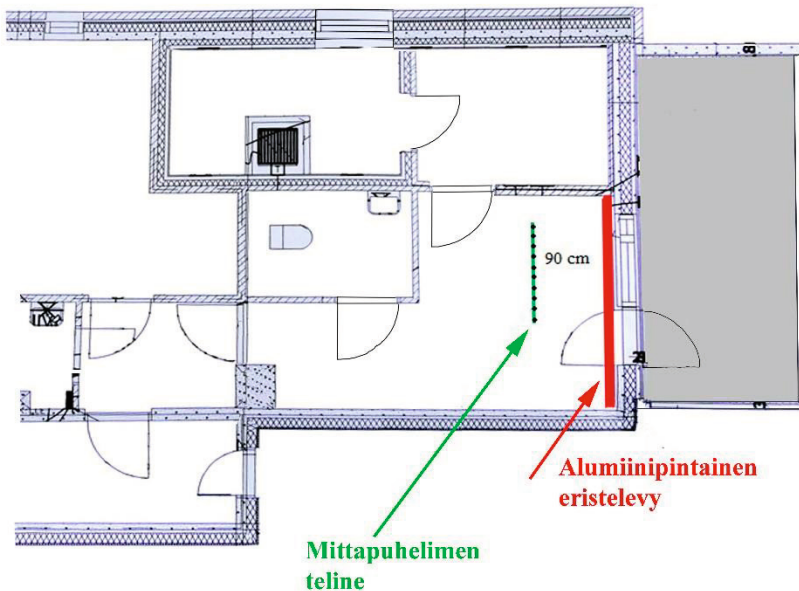
Kuvasta nähdään signaalin tehotason muuttuminen, kun substraatin vaikutus otetaan mukaan ja käytetään simuloinnissa realistista johtavan aineen ainevahvuutta ja johtavuutta. Mielenkiintoisempaa kuitenkin on, että substraatin vaikutuksesta kuviorakenteen resonanssitaajuus muuttuu, ja tässä tapauksessa muutos näyttää tapahtuvan kohti matalampia taajuuksia. Teoreettisesti resonanssitaajuuden muutos alaspäin määräytyy substraatin permittiivisyyden perusteella, termin  $\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}$  termin mukaan. Jos lasille permittiivisyyden oletetaan olevan  $\epsilon_r = 6,9$ , silloin resonanssitaajuus putoaisi laskennallisesti noin puoleen alkuperäisestä. (Munk, 2000.)

## 15.4 FSS-rakenteen kenttämittaukset

Niin kuin edellä todettiin, FSS-rakenteen koekappale valmistettiin kuljetusta kestäväksi ja mitoitettiin kattamaan useampia taajuusalueita erityisesti kenttämittausten tarpeita ajatellen. Kenttämittausten tavoitteena oli todentaa tavallisen ikkunan paikalle asennetun FSS-kuvion toiminta todellisessa rakennuksen ulkoseinän ympäristössä. Käytännön ongelmaksi muodostui sellaisen asuinkerrostalon löytäminen, jossa seinien vaimennukset ovat niin suuret, että signaalin voidaan olettaa kulkevan ainakin pääosin mitattavan ikkunan kautta. Tämä asetti myös vaatimuksen sille, että mitattavan järjestelmän tukiaseman tuli olla tutkittavan ikkuna-aukon suunnassa.

Tutkittava kohde löytyi Lahdesta, ja mittauksissa käytetty ikkuna-aukko sijoittui talon ylimmässä kerroksessa oleviin saunaosaston pukeutumistiloihin. Talon rakenteiden suuri vaimennus oli havaittu jo aikaisemmin, ja sen vuoksi kaikkien kolmen operaattorin verkoille oli jo aikaisemmin talon sisälle asennettu toistinlaitteistot, jotka palvelivat talon 2. kerroksen rappukäytävään asennettuja antennejä. Vaikka testien paikaksi valitut saunatilat sijoittuivat talon 7. kerrokseen, haluttiin mittauksia mahdollisesti häiritsevät talon sisällä olevat signaalilähteet vaimentaa kytkemällä toistimet talon isännöitsijän luvalla pois käytöstä mitausten ajaksi. Toimenpiteen tarpeellisuus voidaan kyseenalaistaa, sillä ennen ikkunan käsittelyä ja toistimien poiskytkemistä em. saunan pukeutumistiloissa mitattu signaalitaso oli hyvin heikko.

Kenttämittauksissa käytetyn tilan pohjapiirros on esitetty alla olevassa kuvassa 15.13.



**Kuva 15.13** Kenttämittauspaikan pohjapiirros. (Asp & Baniya, 2015, muokattu)

Kenttämittaukset tehtiin käytännössä peittämällä koko ikkunaseinä polyuretaanista valmistetulla kaupallisella eristelevyllä, jonka molemmilla puolilla oli alumiinilaminaatti. Eristelevyn paksuus oli 30 millimetriä. Mittausten ajaksi parvekkeen ovi ja sen vieressä ollut ikkuna avattiin, ja ikkunan kohdalle eristelevyyn tehtiin FSS-koekappaleen suuruinen aukko, johon sijoitettiin vuorollaan sekä puhdas alumiinilaminaatti että FSS-koekappale. Polyuretaanilevyyn tehty aukko sijoitettiin mahdollisimman keskelle avatun ikkunan valoaukkoa, jotta ikkunan muiden rakenteiden, kuten puitteiden ja karmien aiheuttamat mahdolliset heijastukset ja sironnat jäisivät mahdollisimman pieniksi. Eristelevyä ei väliseinän vuoksi ollut mahdollista ulottaa kattamaan koko ulkoseinän aluetta, mutta koska pesutilaa vastaan oleva väliseinä oli betonia, eikä pesuhuoneen puolella ollut ikkunoita, oletettiin että signaali ei läpäise pesuhuoneen ulkoseinää niin paljon, että se muuttaisi oleellisesti mittaustuloksia.

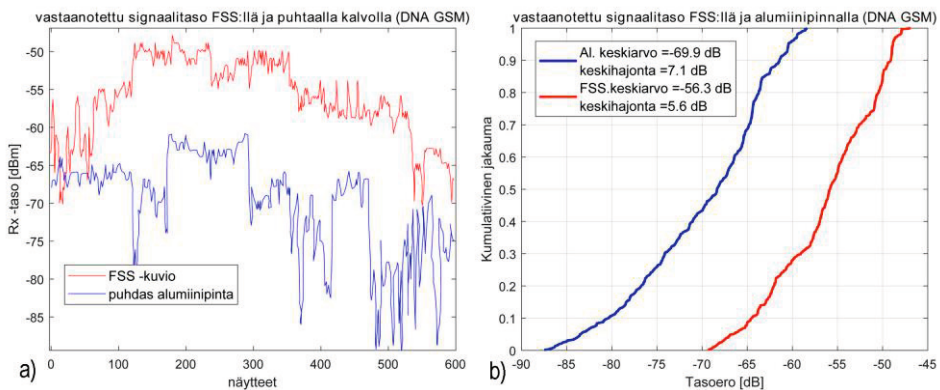
Varsinaisen mittausdatan talletus tapahtui Nokian C5-3 -matkapuhelimella, johon oli asennettu NEMO-handyy -ohjelmisto. Signaalien tasot perustuivat GSM-verkon broadcast-kanavan RX level-tehotasoon ja 3G -verkoilla P-CPICH:n RSCP-signaalin tehotasoon.

Eristelevyyn tehdyn aukon kohdalle, 900 millimetrin etäisyydelle levyn pinnasta, asetettiin teline, johon mittapuhelin sijoitettiin mittausten aikana. Telineessä on 10 kappaletta eri etäisyyksillä toisistaan olevaa merkittyä sijaintipaikkaa mittauksissa käytetylle puhelimelle, jolloin eri mittauksissa käytettiin samoja puhelimen paikkoja.

Mittauspuhelinta pidettiin noin 30 sekuntia kussakin paikassa, jonka jälkeen se siirrettiin seuraavaan merkittyyyn paikkaan. Tavoitteena oli varmistaa, että järjestelmä päivittää riittävästi signaalin tehotason tietoja kustakin mittauspaikasta. Mittaukset tehtiin kaikille kolmelle operaattorille (Elisa, TeliaSonera ja DNA) peräkkäin ja tulokset talletettiin myöhempää analyysiä varten.

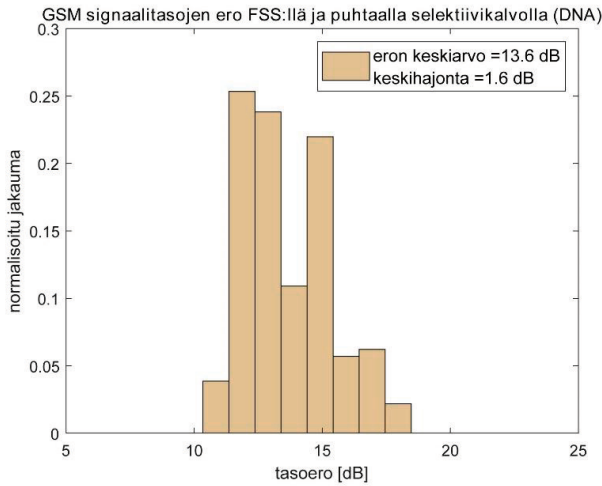
#### 15.4.1 FSS-mittautulokset DNA-GSM

Mittautulosten esittely alkaa DNA-operaattorin 900 MHz alueella toimivan GSM-verkon signaalitasojen esittelyllä, jotka kuvataan signaalitasoja kuvaavilla näytevektorien arvoilla kuvassa 15.14 (a) ja CDF-esityksellä kuvassa b.



**Kuva 15.14** Mittausdatat DNA:n GSM-verkolla.

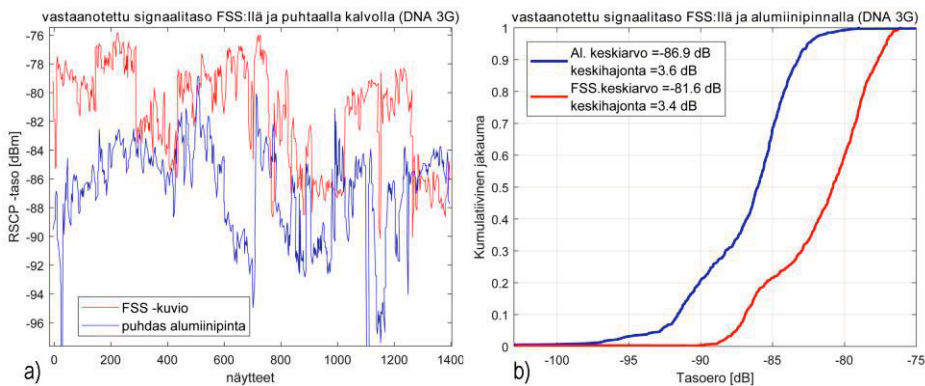
Kuvista 15.14 a ja b nähdään DNA:n GSM-verkolla saadut Rx-tason tulokset FSS-kuviolla ja silloin kun aukkoa peitti puhdas alumiinilaminaatti. Näissä tuloksissa on keskitytty karkeasti valmistetun FSS-rakenteen vaikutukseen signaalitason parantajana silloin, kun signaali on poikkeuksellisen heikko joko ikkunan low-e-kalvon tai eristelevyn alumiinipinnan vuoksi. Kuvassa 15.15 esitetään signaalitasojen erot histogrammina.



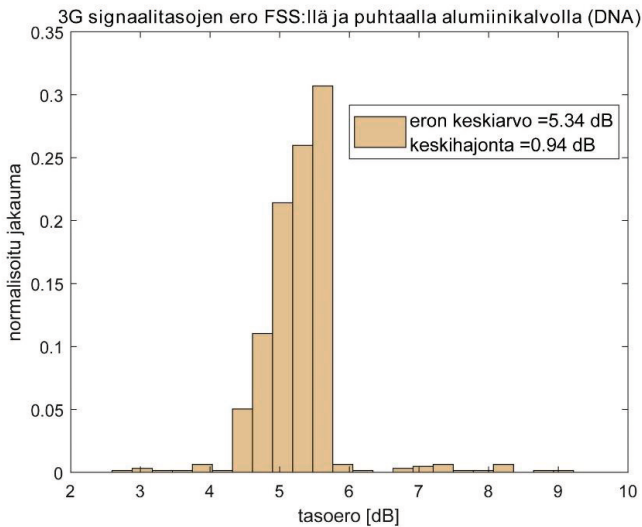
**Kuva 15.15** FSS-rakenteen ja puhtaan alumiinipinnan välinen keskimääräinen signaalin tasoero huoneessa, 90 cm etäisyydellä materiaalista.

## 15.4.2 FSS -mittaustulokset DNA-3G

Seuraavissa kuvissa 15.16 ja 15.17 on esitetty vastaavat mittaukset kuin edellä, mutta tulokset ovat 3G-verkon RSCP-arvojen mittaustuloksia 2100 MHz:n taajuudella. Tulostuksista huomataan, että FSS-rakenteen ja puhtaan alumiinilaminaattikalvon erot ovat pienempiä kuin GSM-verkon käyttämällä 900 MHz taajuuksilla.



**Kuva 15.16** Mittausdatat DNA:n 3G-verkolla.



**Kuva 15.17** FSS-rakenteen ja puhtaan alumiinipinnan välinen keskimääräinen 3G-signaalin tasoero huoneessa, 90 cm etäisyydellä materiaalista.

Tarkasteltaessa GSM-verkon ja 3G-verkon signaalitasojen eroja tavallisen alumiinipinnan ja FSS-rakenteen välillä, havaitaan GSM-verkoilla erojen olevan noin 13 dB:n luokkaa, kun vastaava ero oli 3G:llä vain hieman yli 5 dB:ä. Tämä saattaa selittyä signaalien erilaisilla reiteillä tai FSS-rakenteen suunnittelun painottumisesta erityisesti 900 MHz:n alueelle. Kuitenkin näin suuri ero järjestelmien välillä oli yllätys tuloksia analysoitaessa.

## 15.5 Ikkunoiden puitteiden ja karmien vaikutus

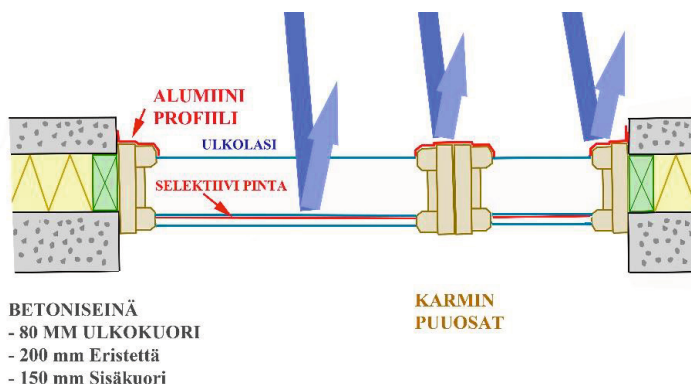
Niin kuin tiedetään, on ikkunoiden puitteiden ja karmien osuus etenkin pienissä ikkunoissa huomattava, kun verrataan niiden yhteenlaskettua etupinta-alaa verrattuna varsinaisen valoaukon pinta-alaan.

Koko ikkunan RF-vaimennusta arvioitaessa mittaukset tavallisesti perustuvat järjestelyyn, jossa tutkittava signaali lähetetään ikkuna-aukon toiselta puolelta kohtisuoraan ikkunapintaa vastaan ja se vastaanotetaan ikkunarakenteen toiselle puolelle sijoitetulla antennilla. Mittausjärjestelyssä on lukuisia sitä puoltavia seikkoja, esimerkiksi mittausten yhdenmukaisuus ja saatavien tulosten vertailtavuus, mutta silloin jää huomiotta käytännön tilanne, jossa signaalien tulosuunta on epämääräinen ja ikkunan kohdalle lankeava signaaliteho noudattaa tuntematonta jakaumaa niin horisontaalisessa kuin vertikaalisessakin suunnassa.

Tämänkin väitöstutkimuksen aikaisemmin esitetyissä mittaustuloksissa luvussa 9 on todettu, että signaalin suunnalla ei ole erityisen merkittävää vaikutusta ikkunarakenteen läpäisevään signaalitehoon silloin, kun kulma poikkeaa suoraan ikkunaan kohtisuorasti tulevasta alle 30 astetta ja arvio kohdistetaan vain lasipintojen tarkasteluun. Kun tarkastelu ulotetaan koskemaan myös puitteiden- ja karmien osia, tilanne muuttuu merkittävästi.

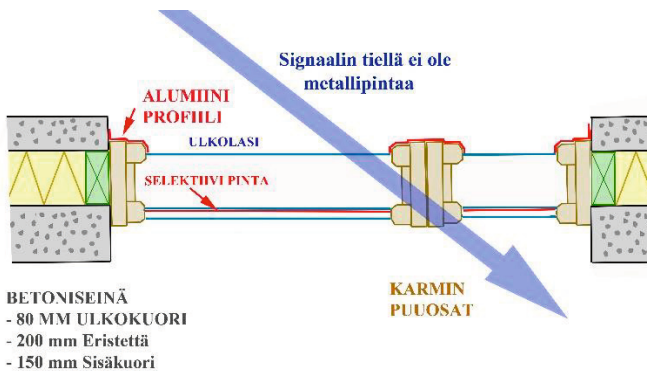
Ikkunan puuosien aiheuttamien signaalivaimennusten tarkastelu on näkökulma, jota aikaisemmissa ikkunoita koskevissa julkaisuissa ei ole otettu huomioon. Tilanne on ymmärrettävä, sillä sekä puuosien mitoitus että muotoilu ovat ikkunatyypikohtaisia, eikä laajasti yleistettäviä tuloksia ole niin ollen mahdollista tarjota. Ikkunoiden puitteilla ja karmeilla on kuitenkin merkittävä vaikutus koko ikkunan alueella tapahtuvaan signaalin vaimennukseen silloin, kun signaali ei etene tasoaaltona suoraan kohti ikkunan lasipintaa. Tällöin osa signaalista, sen tulokulmasta riippuen, voi edetä ikkunan puuosien läpi ilman, että se kohtaa reitillään yhtenäisiä metallipintoja. Seuraavassa on esitetty tämän tilanteen vaikutusta signaalin etenemiseen yksinkertaisilla simuloinneilla käyttäen esimerkinomaisesti WLAN-verkon taajuuksia 2,4 ja 5 GHz.

Kuvassa 15.18 on esitetty tavallinen mittauksissa käytetty tilanne, jossa mitataan uuden asuintalon ikkunarakenteen vaimennusta suoraan ikkunaan kohti suunnatulla signaalilla. Tavallisesti ikkunan pielien, puitteiden ja karmien ulkopuolisena kerroksena on alumiiniprofiili, joka kiertää karmia ja peittää lähes aukottomasti ikkunan puuosat. Näin suoraan edennyt signaali heijastuu joko alumiiniprofilista tai ikkunan sisäpuoliseen puitteeseen sijoitetun eristyslasiipaketin selektiivipinnasta, ja ikkunan puitteiden puuosien läpi kulkee ainoastaan ikkunan lasipintojen reunoista taittunut signaalin osa.



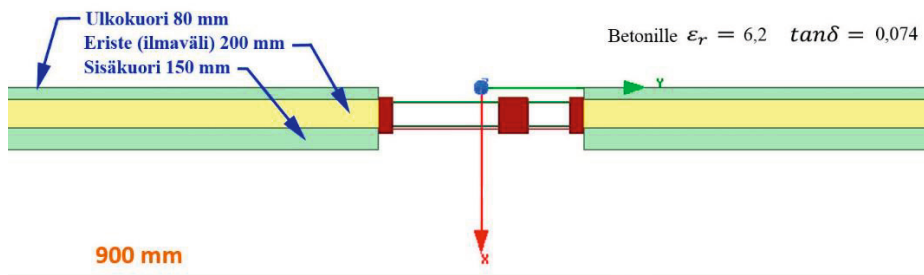
**Kuva 15.18** Tilanne, jossa kohtisuoraan ikkunaan vastaan tuleva signaali kohtaa nykyaikaisen, alumiiniprofiililla varustetun ikkunan. (Kuva: Asp)

Tilanne kuitenkin muuttuu, jos signaalin oletetaan tulevan noin 20–50 asteen kulmassa ikkunapintaan nähden. Silloin erityisesti kaksiosaisten ikkunoiden, joissa vierekkäisten lasipintojen välissä on puukarmi, kohdalla syntyy tilanne, jossa osa tulevasta signaalista ohittaa metallipinnat. Ilmiö syntyy, kun osa signaalia kulkee suoraan läpi ensimmäisestä lasipinnasta, joka on yleensä ilman mitään metallipinnoitetta oleva tavallinen float-lasi. Sen jälkeen signaali läpäisee puitteen ja karmin puuosat, joiden vaimennus on hyvin pieni. Signaali ikään kuin pääsee kiertämään keskimmäisen puitetta ja karmia suojaavan alumiiniprofiilin taakse. Tämän jälkeen signaali ohittaa edetessään puitteen ja karmin puuosien kautta myös eristyslasipaketin lasipinnassa olevan selektiivikalvon. Tätä tilannetta kuvaa seuraava kuva 15.19.



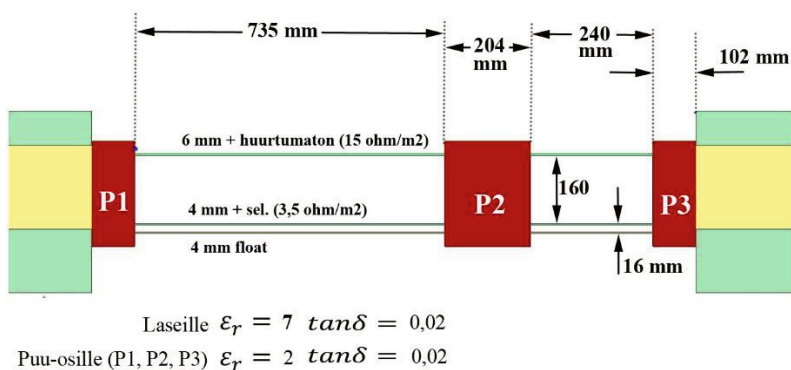
**Kuva 15.19** Tilanne, jossa signaali kohtaa alumiiniprofiililla varustetun ikkunan vinossa kulmassa ja ohittaa rakenteen metallipinnat kulkemalla puuosien kautta. (Kuva: Asp)

Koska ikkunan alumiiniprofiilien vaikutusta on rakenteiden monimutkaisuuden ja eri valmistajien profiilien erojen vuoksi mittaamalla hyvin vaikea tarkastella, turvauduttiin kehysrakenteiden tutkimisessa simulointeihin. Simuloinneissa käytettyjen parametrien arvot on esitetty kuvissa 15.20 ja 15.21. Kuvan 15.20 alareunassa on esitetty vertailutasona toimiva kuvitteellinen 90 senttimetrin etäisyydellä ikkunasta oleva viiva. Viivan tarkoitus on arvioida signaalinvoimakkuuden muuttumista asuinhuoneessa käyttäjän näkökulmasta, asukkaan ollessa huoneen ikkunaseinälle sijoitettujen kalusteiden läheisyydessä.



**Kuva 15.20** Simulointien lähtötiedot seinärakenteen osalta. (Kuva: Asp)

Simuloinneissa käytettiin standardirakenteista sandwich-elementtiä, jolle betonin osalta permittiivisyudeksi asetettiin 6,2. Simuloinneissa ikkunalle ja puuosille P1, P2 ja P3 käytetyt parametrit on esitetty tarkemmin seuraavassa kuvassa 15.21.



**Kuva 15.21** Simulointien lähtötiedot ikkunan osalta. (Kuva: Asp)

Simuloinneissa pyrittiin käyttämään realistisia arvoja ikkunoille ja sen vuoksi kuvassa 15.21 esitetyt ikkunoiden lasien ja puuosien kokoja kuvaavat arvot on mitattu eräästä 2018 valmistuneesta kerrostalokohteesta.

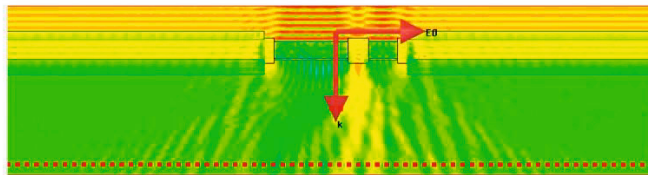
### 15.5.1 Puuosien simulointien tulokset

Seuraavassa esitetään simulointien tulokset koskien karmi- ja puiteosien ulkopinnalle asennettujen alumiiniprofilien vaikutusta. Simulaatiot on suunniteltu ja määritely allekirjoittaneen toimesta ja käytännössä varsinaisen simuloinnin teki Matti Somersalo VTT:n hankkimalla ja Ansysin toimittamalla HFSS-simulaattorilla. Huomattavaa seuraavien simulointien tarkastelussa on ulomman lasin pinnalla oleva

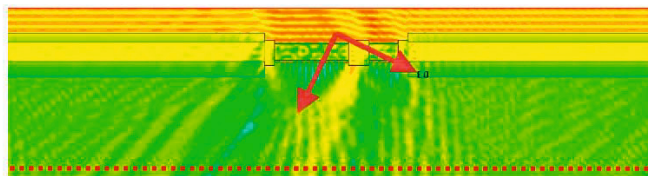


huurtumattomuutta edistävä pinnoite, jonka johtavuus kuitenkin on oleellisesti värinaisen eristyslasipaketin sisällä olevaa low-e-kalvon johtavuutta pienempi (kuvassa 15.21 esitetyt arvot).

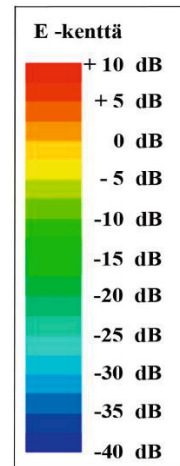
Horizontaalinen polarisaatio, 2,4 GHz:n taajuus  
ikkunapuitteiden edessä ei metallia



a) signaali tulee suoraan ikkunaa kohti

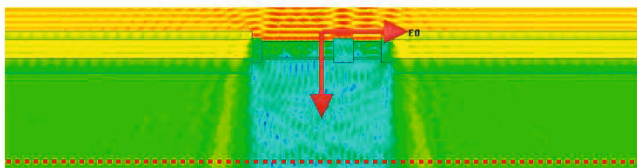


b) signaali tulee 30 -asteen kulmassa

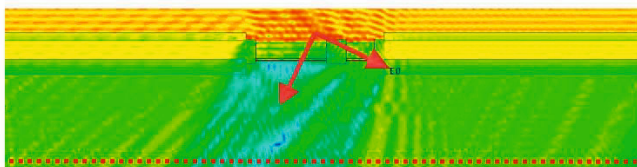


**Kuva 15.22** Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofiilia.

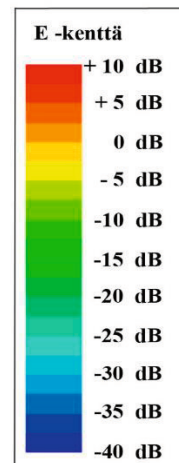
Horizontaalinen polarisaatio, 2,4 GHz taajuus  
ikkunapuitteiden edessä alumiiniprofiili



a) signaali tulee suoraan ikkunaa kohti



b) signaali tulee 30 -asteen kulmassa

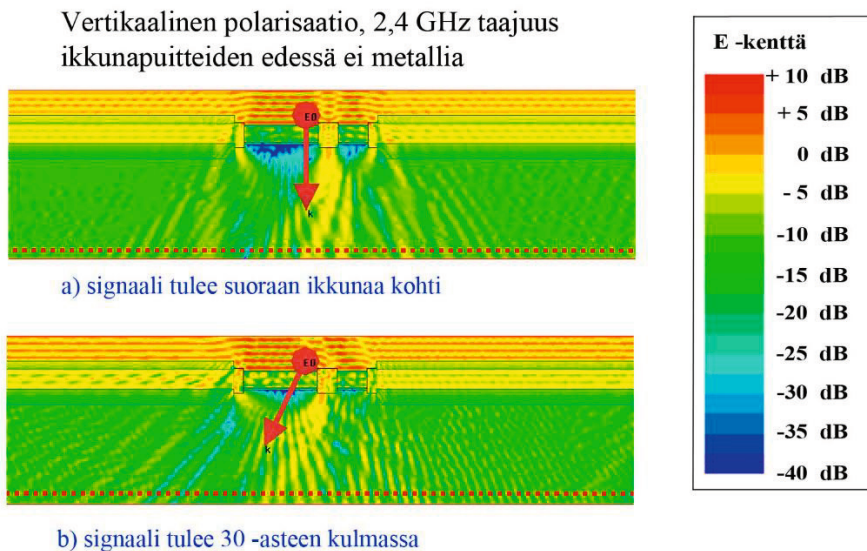


**Kuva 15.23** Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden puuosien edessä on alumiiniprofiili.

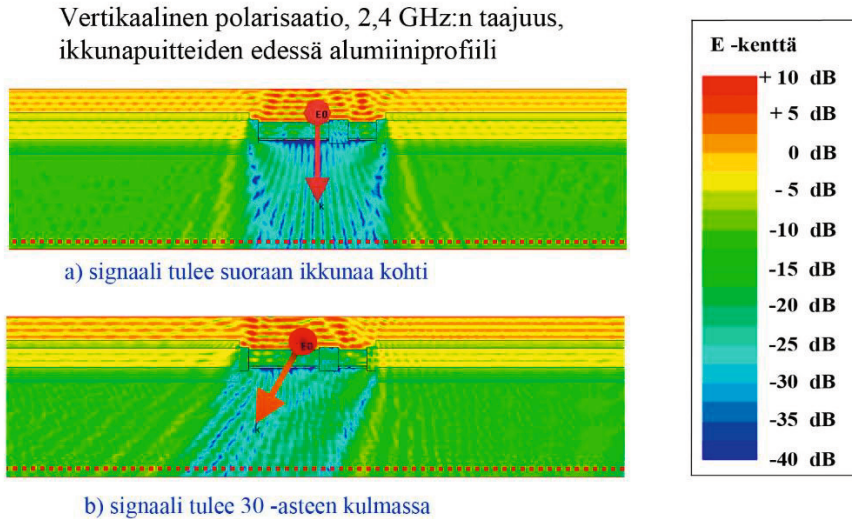
Kuvia vertaamalla on helppo nähdä, että E-kentän etenemiselle ikkunan keskellä olevien puuosien mitat ovat riittävät (kuva 15.22), joten silloin kun alumiiniprofiilia ikkunoiden puuosien edessä ei ole, signaalitaso on hyvä koko ikkunan alueella. Erittäin hyvän kentän alueet ovat kapeita alueita suoraan ikkunoiden välissä olevien puuosien takana. Alumiiniprofiili näyttää muodostavan yhdessä selektiivikalvojen kanssa ikkunan alueelle hyvin heikon paikallisen kentän alueen silloin, kun signaali tulee pääosin suoraan ikkunaa kohti (kuva 15.23). Kuvan mukaan 30 asteen kulmassa tulevan signaalin tapauksessa voimakkaamman signaalitason alue jää kapeiksi raidoiksi, jotka leviävät myös ikkunan ympäristöön.

### 15.5.1.1 Vertikaalinen polarisaatio

Seuraavassa on esitetty vastaavat kuvat kuin edellä, mutta polarisaatio on vertikaalinen.



**Kuva 15.24** Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofiilia, vertikaalinen polarisaatio.



**Kuva 15.25** Sisällä vallitseva signaalin tehotaso, kun ikkunoiden puuosien edessä on alumiiniprofiili, vertikaalinen polarisaatio.

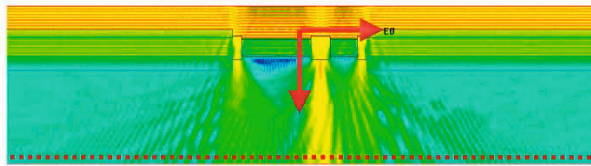
Kuvia 15.23 ja 15.25 tarkasteltaessa näkyy selvästi vertikaalisen polarisaation ero horisontaaliseen polarisaatioon tapauksessa, jossa puosia peittää alumiiniprofiili. Vertikaalisen polarisaation yhteydessä suoraan ikkunaa kohti tuleva signaali muodostaa hyvin säännöllisen ja tarkkarajaisen heikon signaalin alueen ikkunan taakse. 30 asteen kulmassa saapuva signaali sen sijaan muodostaa paljon kapeamman hyvin heikon signaalin alueen kummallakin polarisaatiolla verrattaessa tilannetta suoraan ikkunaa kohti tulleeseen tasoaaltoon. Kuvista näkyy myös 30 asteen kulmassa saapuneen signaalin voimistavan kenttää ikkunan molemmilla puolilla verrattuna suoraan edenneen signaalin tasoon.

#### 15.5.1.2 Horisontaalinen polarisaatio, 5GHz:n taajuus

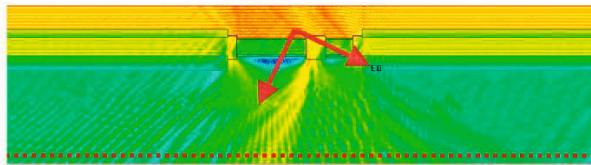
Seuraavissa kuvissa esitetään Horisontaalisen polarisaation käyttäytymistä 5 GHz:n taajuusalueella. Näissä kuvissa karmien ja puitteiden puosia suojaavan alumiiniprofiilin vaikutus on paljon selvempi kuin alemmalla taajuudella, joka johtuu erityisesti rakenteiden ja aallonpituuksien edullisemmasta suhteesta.

Ensimmäiseksi tarkastellaan tilannetta 5GHz:n taajuuksilla ja horisontaalisella polarisaatiolla ikkunatyypillä, jossa puosien edessä ei ole metalleja. Edelleen matalampien taajuuksien tapaan, signaalin vahvin alue muodostuu ikkunoiden välissä olevan puosan taakse. Sitä esittää seuraava kuva 15.26.

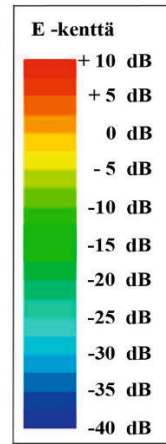
Horizontaalinen polarisaatio, 5 GHz:n taajuus,  
ikkunapuitteiden edessä ei metallia



a) signaali tulee suoraan ikkunaa kohti



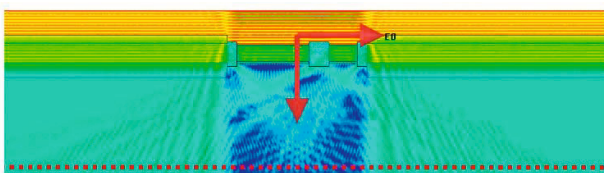
b) signaali tulee 30 -asteen kulmassa



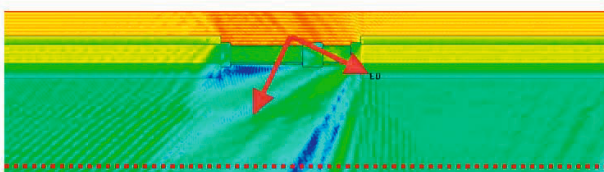
**Kuva 15.26** Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofiilia. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on horisontaalisesti polarisoitu.

Seuraavaksi esitetään tilanne, jossa ikkunoiden lasiosia kiertävien puuosien etupintaa peittää alumiiniprofiili. Sitä esittää seuraava kuva 15.27.

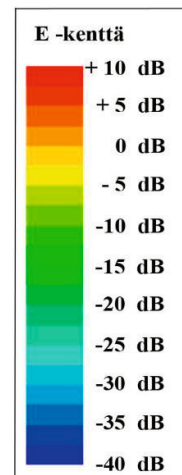
Horizontaalinen polarisaatio, 5 GHz:n taajuus,  
ikkunapuitteiden edessä alumiiniprofiili



a) signaali tulee suoraan ikkunaa kohti

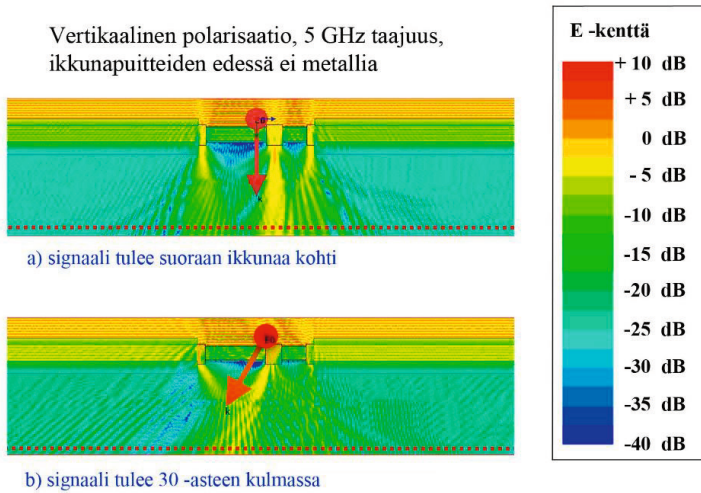


b) signaali tulee 30 -asteen kulmassa

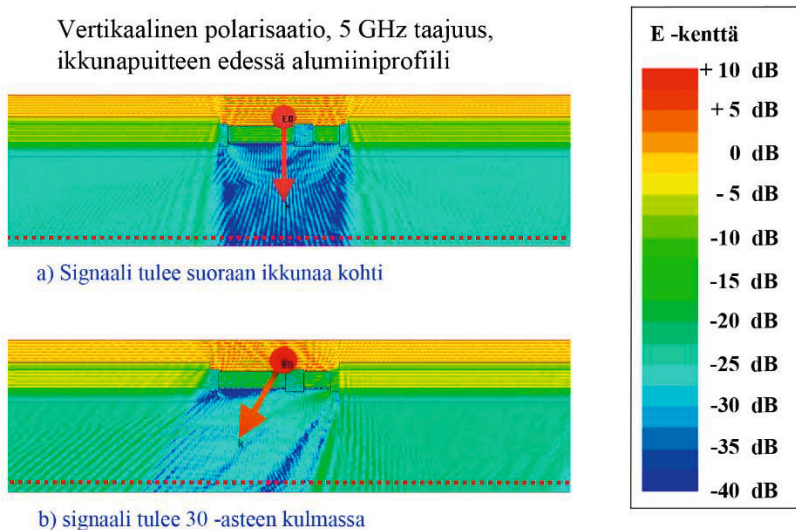


**Kuva 15.27** Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä on alumiiniprofiili. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on horisontaalisesti polarisoitu.

Vastaavat kuvat 5GHz:n taajuuksille, mutta vertikaaliselle polarisaatiolle on esitetty kuvissa 15.28 ja 15.29.



**Kuva 15.28** Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä ei ole alumiiniprofiilia. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on vertikaalisesti polarisoitu.



**Kuva 15.29** Sisällä vallitseva 5 GHz:n signaalin tehotaso, kun ikkunoiden edessä on alumiiniprofiili. Ikkunaa vastaan tuleva signaali on vertikaalisesti polarisoitu.

Kuvien tarkastelussa huomio kiinnittyy siihen, että taajuuden kasvaessa 5 GHz:iin ikkunoiden puuosien fysikaaliset mitat ylittävät aallonpituuksien mitat molemmilla polarisaatioilla, ja puuosat ilman alumiiniprofiileja muodostavatkin pienellä vaimennuksella olevan reitin matkapuhelinverkkojen signaaleille.

Signaalin saapuessa suoraan ikkunapintaa kohti signaalitaso 5GHz:n taajuuksilla on selvästi heikoin silloin kun ikkunan puuosien edessä on metallipinta. Tätä korostaa osin ikkunaa ympäröivän seinäelementin suurempi vaimennus korkeammilla taajuuksilla, joten seinän läpi edennyt signaali ei vahvista ikkunan läheisyydessä olevaa kentänvoimakkuutta. Toinen syy on myös ikkunoiden eri osien suuremmilla taajuuksilla olevat suuremmat materiaalivaimennukset.

Huomionarvoista on ikkunan kohdalla olevien tehotasojen lisäksi se, että ikkunan puuosien läpi kulkenut vahvempi signaali nostaa signaalitasoja myös ikkunan läheisyydessä olevien seinien kohdalla. Tämä näkyy erityisesti 5GHz:n taajuuksilla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että koko ikkunarakenteen RF-vaimennusta arvioidessa on otettava lasipintojen vaimennuksien ohella huomioon myös puiterakenteet sekä signaalien suunta ja aallonpituus.

Kappaleen 12 perusteella seuraavaksi käyttöön otettavien matkaviestiteknologioiden voidaan olettaa käyttävän aikaisempaa korkeampia taajuuksia, joten aallonpituudet ovat lyhempiä. Näille lyhemmille aallonpituuksille on nykyisilläkin ikkunatyypeillä olemassa viistosti ikkunapintaan nähden eteneville signaaleille pienemmän vaimennuksen reittejä. Toisaalta seuraavat käyttöön tulevat matkapuhelinteknologiat ilmeisesti perustuvat pienempiin solukokoihin, jolloin signaalien tulosuunnan jakauma muuttuu merkittävästi nykyisiin tukiasemasignaaleihin verrattuna.

# 16 LÄMMÖNERISTEIDEN RF- VAIMENNUSMITTAUSTEN TULOKSET

Luvussa 5 esitettyjen erilaisten asuinkerrostaloissa käytettyjen ulkoseinäratkaisujen keskimmäisenä osana on poikkeuksetta lämmöneristekerros. Koska eriste muodostaa aina osan ulkoseinän rakenteesta, on otettava huomioon myös sen mahdollinen vaikutus myös radiosignaalien kokonaisvaimennukseen.

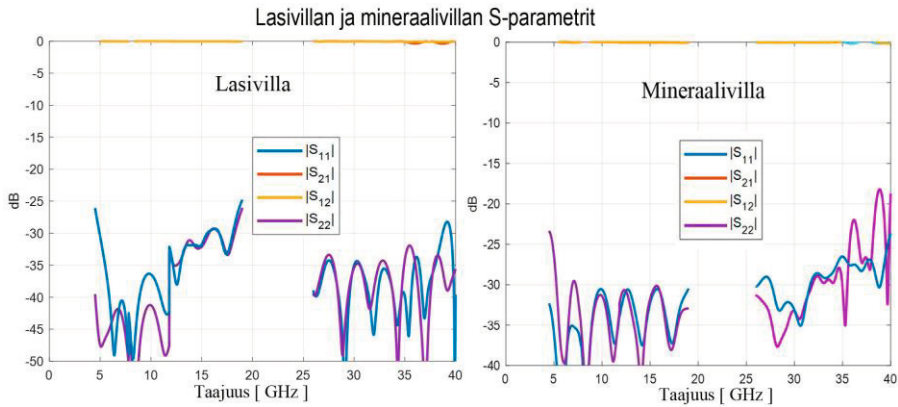
Lämmöneristeiden vaimennusominaisuuksia tutkittiin laboratoriomittauksilla eri lämmöneristetyypeistä otettujen näytepalojen avulla. Tutkimus perustui muiden materiaalien tapaan aineen permittiivisyyden määrittämiseen, sillä on perusteltua olettaa lämmöneristeinä käytettäville materiaaleille suhteellisen permeabiliteetin olevan hyvin lähellä ykköstä, eli  $\mu_r \approx 1$ .

Mittaukset tehtiin myös lämmöneristeille luvussa 14 esitetyllä vapaan tilan menetelmällä, jossa antennin säteily keskitettiin näytteeseen fokusoivien peiliheijastajien avulla. Jo ennen mittausten aloittamista lämmöneristeiden RF-vaimennuksen yleisen tason arvioitiin olevan korkeintaan muutaman desibelin suuruusluokkaa. Tämä arvio perustui aikaisemmin eri projekteissa tehdyistä mittauksista saatuihin tuloksiin, joissa tutkittiin erilaisten seinien kokonaisvaimennuksia erilaisilla materiaalivalinnoilla.

Villapohjaisten lämmöneristeiden mittauksissa ei testattu erikseen eristemateriaalin mahdollisen kastumisen vaikutuksia, sillä eristemateriaalin kosteutta ei kyetty pitämään vakiona mittausten vaatimaa aikaa. EPS-eristeen osalta RF-vaimennusta tutkittiin myös kastelemalla näyttemateriaali, mutta tuloksia on pidettävä lähinnä viitteellisinä. Tämä johtuu siitä, että tuloksissa merkittävää eroa alkaa näkyä vasta kun näytekappale oli täysin märkä.

## 16.1 Villapohjaiset lämmöneristemateriaalit

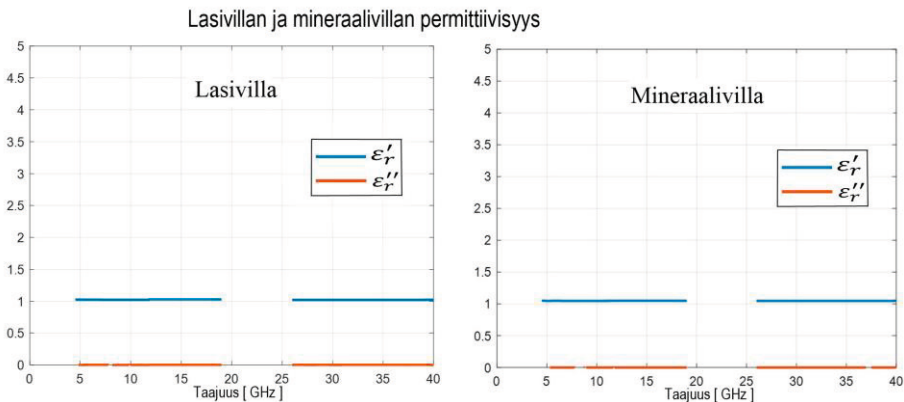
Alla olevassa kuvassa 16.1 a ja b on esitetty mittaustulokset, jotka on saatu mittaamalla kuivan lasi- ja mineraalivillan S-parametrit kappaleessa 14.12 kuvatuilla menetelmillä.



**Kuva 16.1** Lasivillan (a) ja mineraalivillan (b) S-parametrit eri taajuusalueilla.

Edellä esitetyistä S-parametreista on laskettu permittiivisyyden arvot molemmille villatyypeille, ja laskennan tulokset esitellään seuraavassa kuvassa 16.2.

Kuvassa 16.2 a ja b esitettävistä tuloksista nähdään, että permittiivisyyden arvot ovat hyvin lähellä ykköstä, eli villapohjaisten kuivien eristeiden osuus betonielementtien RF-läpäisyvaimennusta koskevissa tarkasteluissa voidaan korvata eristekerroksen paksuisella ilmapälillä.



**Kuva 16.2** Lasivillan (a) ja mineraalivillan (b) permittiivisyydet eri taajuusalueilla.

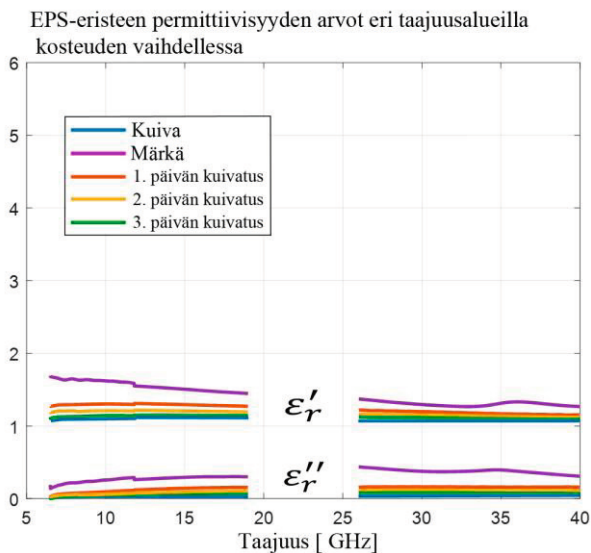
Villapohjaisille materiaaleille käytössä olleilla mittausten menetelmillä ei ollut mahdollista mitata luotettavasti kosteiden materiaalien ominaisuuksia. Tämä johtui siitä, että lämmöneristeet kuivuivat huoneilmassa nopeasti ja täysin märistä villanäytteistä vesi valui mittauksen aikana pois. Näiden seikkojen vuoksi mittausten virhe kasvoi niin suureksi, että tuloksia ei voitu enää pitää luotettavina. Sen sijaan muovipohjaisista eristeistä saatiin näytteet kastelemalla seuraavassa kappaleessa 16.2 esitettävät tulokset.



## 16.2 EPS-tyyppiset lämmöneristemateriaalit

EPS-lämmöneristeen mittaus suoritettiin upottamalla 50 mm paksu eristenäyte vuorokauden ajaksi veteen, jolloin se saatiin kasteltua riittävästi. Näytteen kastumisen kokonaismäärän arvioiminen jäi luonnollisesti epätarkaksi, mutta mittausten suunnittelun yhteydessä päädyttiin olettamukseen, että käytännössä seinien sisällä käytettävät EPS-lämmöneristeet eivät milloinkaan kastu enempää kuin mitä vuorokauden veteen upottaminen vastaa. Näin saatiin siis luotettavana pidettävä ”worst-case”-tapaus EPS-lämmöneristeen kosteudelle.

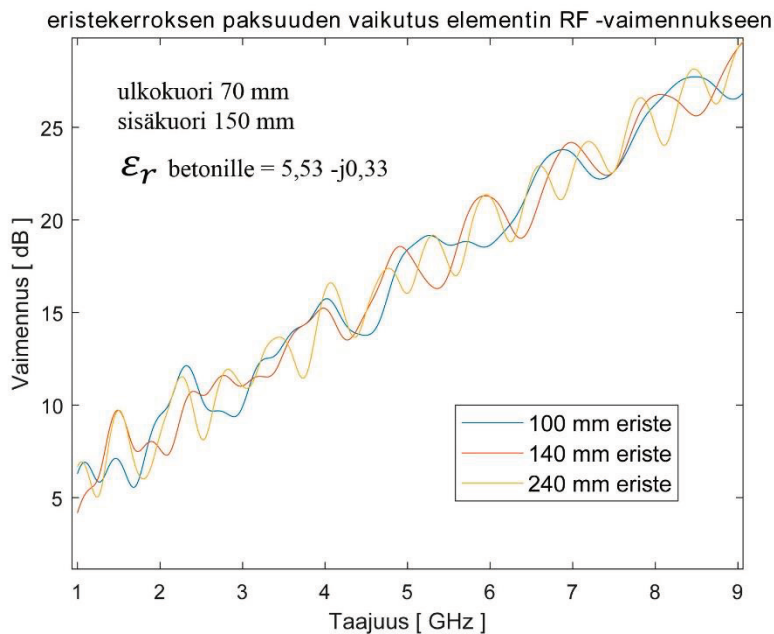
Seuraavassa kuvassa 16.3 on esitetty permittiivisyyden kuvaajat tilanteille, jossa EPS-näyte on vuorokauden veteen upottamisen jälkeen mitattu välittömästi vettä valuvana ja sen jälkeen kuivattamalla näytettä 3 päivän ajan normaalissa huoneilmassa. Kuvassa olevat kuvaajat esittävät heijastusparametreista kappaleen 14.12 mukaisesti laskettuja permittiivisyyden arvoja.



**Kuva 16.3** EPS-eristeen permittiivisyyden arvot eri taajuusalueilla kosteuden vaihdellessa.

Kuvassa 16.3 esitettävien tuloskäyrien perusteella on tulkittavissa, että villapohjaiset eristeet, eivätkä myöskään muovipohjaiset lämmöneristeet vaikuta ulkoseinien vämmennuksiin omien ominaisuuksiensa kautta. Permittiivisyyden suhteellinen arvo eroaa ykkösestä merkittävästi vasta lämmöneristeen ollessa täysin märkä, ja niin kuin edellä todettiin, se ei vastaa seinän lämmöneristeiden käytännön tilannetta.

Vaikka eristekerroksen paksuus ei vaikuta vaimennuksena sandwich-tyyppisen seinäelementin kokonaisvaimennukseen, näkyy se kuitenkin elementin RF-vaimennuskäyrän aaltoilussa. Seuraavassa kuvassa 16.4 on arvioitu laskemalla kappaleissa 13.6.1–13.6.3 esitetyillä kaavoilla eristekerroksen paksuuden vaikutusta tyypillisellä peruselementin mitoituksella. Tässä tarkastelussa elementillä on kaksi betonikuorta, 150 millimetrin sisäkuori ja 70 millimetrin ulkokuori, ja betonin  $\epsilon_r$  on kummallekin betonikuorelle sama, eli 5,53 - j0,33. Eristemateriaalina on tässä esimerkissä käytetty villaa, jonka  $\epsilon_r$  on 1,05 - j0.



**Kuva 16.4** Kuivan villapohjaisen eristeen paksuuden vaikutus sandwich-elementin kokonaisvaimennukseen.

Kuvan 16.4 kuvaajien perusteella on tulkittavissa, että eristekerroksen paksuus ei ainakaan havaittavasti vaikuta sandwich -tyyppisen seinärakenteen keskimääräisen kokonaisvaimennuksen tasoon. Kuvaajien aaltoilun saavat aikaan luvussa 14 kuvatut erilaisten rajapintojen aiheuttamat heijastukset. Heijastukset syntyvät sandwich-elementin tapauksessa ulkokuoren ja sisäkuoren ja ilmaa vastaavien rajapintojen välillä. Eristekerroksen paksuuden muuttuessa rajapintojen etäisyys muuttuu ja silloin heijastuksista syntyneiden signaalikomponenttien vaihe muuttuu. Eri vaiheisten osakomponenttien yhdistyessä vaikutus näkyy erilaisena aaltoiluna vaimennuskäyrässä. Aaltoilu näkyy tässä simulaatiossa selvästi, sillä laskennassa käytetty betonin

permittiivisyyden arvo vastaa kuivan betonin arvoa. Kuivalla betonilla heijastuneet komponentit vaimenevat rakenteessa normaalitilannetta hieman vähemmän.

### 16.3 Johtopäätöksiä lämmöneristeiden vaimennuksista

Mittaustulosten perusteella kuivan tai lähes kuivan eristeen vaikutus seinäelementin kokonaisvaimennukseen on pieni. Tällöinkin vaikutus näkyy lähinnä eristetilan paksuuden vaikutuksena heijastuksiin. Tämän vuoksi eristemateriaalin omaa vaimennusta ei tavanomaisissa tilanteissa tarvitse ottaa kokonaisvaimennusta arvioitaessa ottaa huomioon.

Tilanne voi muuttua, jos kysymyksessä on tavallista lasivillaeristettä paljon tiheämpi kivi- tai mineraalivillatyypinen eriste, joka kastuu lähes täysin ja kuivuu hitaasti. Normaleissa käyttöolosuhteissa eristeen ei kuitenkaan ainakaan asuinkerrostaloissa olevissa asuintilojen ulkoseinissä oleteta olevan märkää. Eriste voi kuitenkin kastua, jos ulkoseinien pinnoite on pahoin vaurioitunut. Nämä vauriot ovat tavallisesti paikallisia ja sijoittuvat elementtien saumojen kohdalle. Näin ollen ainakin elementtien keskellä olevien alueiden voidaan olettaa olevan kuivia normaaleissa olosuhteissa.

# 17 BETONIN MITTAUSTULOKSET

Niin kuin edellä olevissa luvuissa on todettu, muodostuu rakennusten ulkokuori katopintoja lukuun ottamatta ulkoseinistä ja ikkunoista. Matkaviestinverkkojen vaimennusta arvioitaessa on erityisesti kiinnitettävä huomio siihen ulkokuoren osaan, josta signaalin ajatellaan pienimmällä vaimennuksella etenevän rakennusten ulkopuolta ja sisäpuolta erottavan rakenteen läpi. Edellä ikkunoita käsittelevissä luvuissa 9 ja 15 todettiin, että nykyiset vaatimukset täyttävien ikkunoiden vaimennukset ovat noin 25 dB:n suuruusluokkaa, joten huomio kohdistuukin ulkoseiniin ja niiden rakenteisiin. Luvussa 5 on esitelty erilaisia viimeisten vuosikymmenten tavallisimpia ulkoseinärakenteita ja sen perusteella voidaan todeta betonin olevan viime vuosikymmenien ajan ehdottomasti yleisin asuinkerrostalojen ulkoseinien perusmateriaali. Betonin osuus ulkoseinissä jakautuu tavallisesti kahteen sandwich-elementin kuoreen, joiden välissä on eristemateriaali. Koska luvuissa 6 ja 16 esiteltyjen tavallisimpien eristeiden RF-vaimennus on hyvin pieni, on arvioitava itse betonin vaimennusta erilaisilla taajuuksilla, kosteuksilla ja paksuuksilla.

Perusteltua on myös tarkastella mahdollisia eroja uusien betonien ja vanhoissa, yli 20 vuotta sitten rakennettujen talojen seinissä olevien betonien välillä. Tämä uusien ja vanhempien betonien välinen vertailu on tarpeen, sillä vaikka uusien ja vanhempien asuinkerrostalojen RF-vaimennuksen ero selittyikin uusien ikkunoiden suuremmalla vaimennuksella, on tarpeen arvioida mitä tapahtuu vanhemmissa taloissa, joihin tehdään ikkunaremontti.

## 17.1 Tutkimuksen lähtökohta ja tavoite

Tässä luvussa tarkastellaan betonin RF-vaimennusta näytekappaleiden avulla, sillä luvussa 11 esitetyn betonin rakennetta koskevan teorian perusteella on aihetta olettaa betonin laadun ja lisäaineistuksen ohella myös betonin kosteudella olevan vaikutusta betonin kokonaisvaimennukseen.

Betonien tutkiminen aloitettiin hankkimalla materiaaleja mahdollisimman erilaisiksi valmistettaviin betoninäytteisiin, mutta kuitenkin niin, että tutkittavien betonien tuli olla yleisesti käytettyjä ja kaupallisista tuotteista valmistettuja betonilaatuja.

Tavoitteena siis oli tutkia todellisissa rakennuksissa todennäköisesti olevien betonilaatujen mahdollisia eroja.

Koska käytettävissä ollut materiaalien permittiivisyyden tutkimiseen tarkoitettu mittausjärjestelmä oli kiinteä, ja erityisesti pienehköjen näytteiden mittaamiseen optimoitu, tuli mittauksissa käytetyt näytteet valmistaa alusta alkaen itse. Samalla voitiin vaihdella vesi-sementtisuhdetta ilman ulkopuolisia rajoituksia.

## 17.2 Näytekappaleiden valmistaminen

Mittausjärjestelmän vaatimusten vuoksi päädyttiin valmistamaan muotteja, joiden mitat olivat 150 x 150 x 400 millimetriä. Muottien lukumäärän pitämiseksi kohtuullisena päätettiin tutkia lähinnä eri lisäaineiden ja erilaisten vesi-sementtisuhteiden vaikutusta betonin permittiivisyyteen. Vaikka mittauksen suunnitteluvaiheessa ei ollut käytettävissä luotettavia arvioita eri sementtilaatujen RF-vaimennusten mahdollisista eroista, kaikkia mahdollisia betonityyppien variaatioita ja saatavilla olevia sementtilaatuja ei sisällytetty mittaussuunnitelmaan. Tutkimukseen valittiin ne variaatiot, joiden perusteella ajateltiin olevan mahdollista arvioida betonien vaimennuskäyttäytymisen yleisiä linjoja. Tämän vuoksi tutkimuskysymystä mahdollisista betonien signaalivaimennusten eroista lähestyttiin ääritapauksien kautta, valitsemalla esimerkiksi käytännön betoneissa olevan vesi-sementtisuhteen suurin ja pienin mahdollinen suhdeluku. Näiden lisäksi tutkimuksen aikana tarjoutui mahdollisuus saada muuhun tutkimuskäyttöön tulleesta betoniauton lastista näyte yhteen muottiin, joten ainakin sen voi olettaa edustavan yhtä rakennuksissa yleisesti käytössä olevaa sementti- ja betonilaatua.

Muotit täytettiin kaikissa tapauksissa käsityökaluilla sekoittamalla sementin, veden ja soran muodostamalla massalla, ja muottiin valamisen jälkeen muotit peitettiin suojamuovilla. Kovettuvaa betonia kasteltiin muottiin valamisen jälkeen muutaman päivän ajan. Tämän jälkeen muotit olivat koskemattomana yli kuukauden ajan, jolloin varmistettiin, että yleisesti hyväksytty 28 vuorokauden hydratoitumisaika oli ylittynyt. Sen jälkeen muotit purettiin ja tuloksena oli sarja betonisia suorakulmaisia särmiöitä, joiden pituus oli 400 millimetriä.



**Kuva 17.1** Muoteista saadut betoninäytteet ja niiden katkaisu mittauksia varten. (Kuvat: Asp)

Mittausjärjestelmän vaatimusten mukaan näytteiden paksuuden tuli olla välillä 10–30 millimetriä, joten särmiöistä leikattiin timanttisahalla noin 15 millimetriä paksuja viipaleita. Viipalemaisista näytteistä oli samasta betonista valmistettava useita, sillä etenkin betoniautosta saadussa massassa oli satunnaisesti karkeampaa kiviainesta, ja mittausjärjestelmän kohdistaman signaalin ei haluttu osuvan vain pelkän kiven alueelle. Särmiöt ja niiden leikkauksessa käytetty timanttisaha on esitetty kuvassa 17.1.

Suurimpana haasteena mitattavien näytteiden työstämisessä on niiden pinnan saaminen kauttaaltaan yhtä paksuksi ja täysin tasaiseksi. Käytännön vaikeutena oli alkuperäisen muotista saadun särmiön pitäminen sahauksen aikana kohtisuorassa leikkaavaan terään nähden. Vaikka leikkauksen aikana timanttisahan terän jäähdytykseen käytettiin juoksevaa vettä, kuumenivat näyte ja timanttisahan terä voimakkaasti ja betonikappale pyrki liikkumaan suhteessa terään. Näytteen tulisi leikkauksen jälkeen olla mittauksia varten tasapaksu koko näytteen alueella, sillä pinnan epätasaisuus aiheuttaa merkittävän vaihevirheen erityisesti heijastuskerrointa mitattaessa.

### 17.2.1 Näytteiden kuivaus

Mittaussuunnitelmaa kirjoitettaessa tutkimusryhmällä ei ollut kattavaa tietoa betonin kuivumiseen liittyvästä teoriasta, joten mittauksia suunniteltaessa päätettiin valmistaa jokaisesta suorakulmaisesta särmiöstä kahdet samanlaiset, viipalemaiset, kappaleet. Näistä kappaleista toiset päätettiin kuivattaa koko kuivausajan tavallisessa huoneilmassa ja toisen ryhmän betoninäytteet kuivata huoneilmakuivauksen lisäksi muutama päivän ajan 105-asteisessa uunissa. Suunnitelman tavoitteena oli varmistaa

jälkimmäisen ryhmän näytteiden täydellinen kuivuminen, ilman että huoneilman sisältämä kosteustaso pysäyttää kuivumisen huoneilman kosteuden tasolle.



**Kuva 17.2** Betoninäytteiden uunikuivaus. (Kuva: Asp)

Ennen uuniin laittamista kummankin ryhmän näytteitä kuivattiin tavallisessa huoneilmassa viikon ajan. Sen jälkeen osa näytteistä kuivattiin uunissa kaksi vuorokautta ja tämän jälkeen kummankin ryhmän näytteitä kuivattiin huoneilmassa vielä 2,5 kuukautta ennen varsinaisia mittauksia. Kahden kuukauden kuivaamisen uskottiin kuivaavan näytteet käytännössä täysin huoneilman kosteutta vastaavaksi, sillä noin 15 millimetrin paksuiset näytteet kuivuivat molemmilta sivuiltaan melko nopeasti. Uunikuivaus tehtiin, sillä mittaussuunnitelmaa tehtäessä ei oltu täysin vakuuttuneita huoneilman ja siinä olevan kosteuspitoisuuden kyvystä kuivata betoninäytettä niin paljon, että betonin sisällä olevista erilaisista huokosista poistuu kaikki vesi. Eriytyiseksi kysymykseksi nousi tavallisen huoneilman mahdollisuus kuivata betonia yhtä tehokkaasti kuin pitkään jatkuva hellejakso keskikesällä, jolloin tuuli tehostaa aurinгон lämmittämän pinnan kuivamista.

### 17.2.2 Näytteiden erot

Erilaisten vesi-sementtisuhteiden lisäksi mitatut näytteet erosivat toisistaan sementtilaatujaan perusteella. Tulosten perusteella arvioituna betonin valmistuksessa käytetty sementtilaatu vaikuttaa jonkin verran lopullisen betonin vaimennukseen, mutta paljon suurempi vaikutus näyttäisi olevan sementtiin sekoitetuilla lisäaineilla. Tavallista perussementtiä edusti merkinnällä SB100-varustettu säckitavarana myytävä

sementti, ja voimakkaasti lisääineistettu laatu oli SB45. (Weber Saint-Gobain, 2017.) Mittauksissa näytteenä ollut lisääineistettu sementtilaatu ei ole kerrostalorakentamisessa yleisesti käytetty, sillä sen sisältämien lisääineiden keskeisimpänä tavoitteena on saavuttaa korkeampi pakkasenkestävyys ja parempi kestävyys suolarasitusta aiheuttavissa olosuhteissa. Lisääineita sisältävän sementtityypin valinnan syynä oli halu tutkia yleisesti lisääineiden vaikutusta betonin RF-läpäisyyn, ottamatta kantaa yksittäisen valmistajan tuotteisiin. Tämän vuoksi yhden tämäntyyppisen tuotteen ottaminen mukaan oli perusteltua.

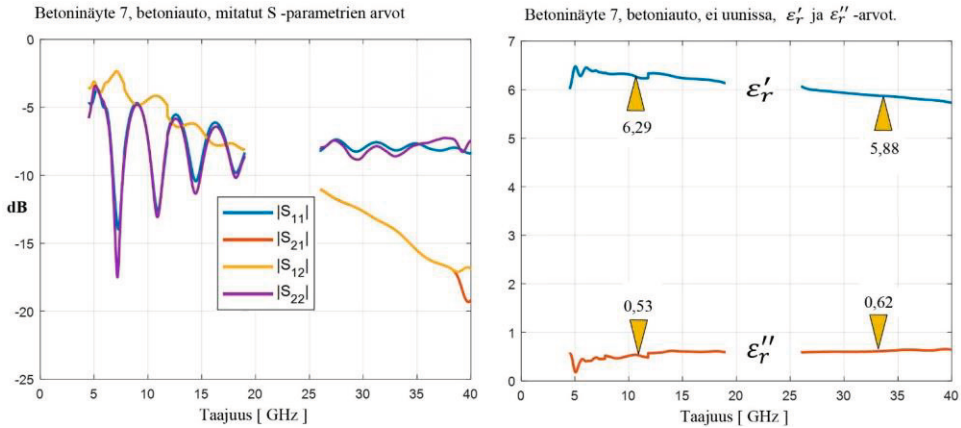
Edellisten lisäksi tutkimukseen otettiin ennen mainittu näyte betoniauton kuormasta ja erilliset näytteet kahdesta vanhemmasta betonirakenteesta. Näiden tarkemmat tiedot esitetään taulukon 17.1 yhteydessä.

### 17.3 Mittaustulokset eri betonilaaduille

Betoninäytteiden permittiivisyyden määrittämiseksi tehdyt mittaukset toteutettiin luvussa 14 esitetyllä fokusoivilla antennilla toteutetulla S-parametrien mittausmenetelmällä, jossa kullekin näytteelle mitattiin parametrit kahdella eri taajuusalueella. Taajuusalueiden vaihtaminen edellyttää fokusoivien antennien syöttämiseen käytettävien aaltoputkien vaihtamista, joten ensimmäiseksi mitattiin muutamalla koekappaleella parametrien yleinen käyttäytyminen neljällä eri taajuusalueella. Koska permittiivisyyden muuttuminen taajuuden funktiona näytti satunnaisesti valituilla koekappaleilla olevan melko suoraviivaista, pääteltiin kahden eri taajuusalueen mittausten antavan riittävän kuvan betoninäytteiden permittiivisyyden käyttäytymisestä kaikilla nykyisillä ja lähitulevaisuudessa käyttöön otettavilla matkapuhelinverkkojen taajuuksilla.

Seuraavassa kuvassa 17.3 on esitetty esimerkinomaisesti betoniautosta otetusta näytteestä (näyte nro 7 taulukossa 17.1) mitatut S-parametrit (kuva 17.3a) ja niistä lasketut permittiivisyyden arvot näytteiden ollessa täysin kuivia, mutta ilman uunikuivatusta. Niin kuin kuvasta 17.3b havaitaan, kuivan betonin permittiivisyyden arvo muuttuu jonkin verran taajuuden funktiona, ja siksi kummastakin mitatusta taajuusalueesta on otettu keskiarvo. Kuvassa keskiarvo on merkitty nuolen kohdalle numeroarvona. Alkuperäisten S-parametrien voimakas vaihtelu, etenkin heijastuskerrotoimen osalta, johtuu kappaleen paksuudesta ja sen määräämien rajapintojen aiheuttamista heijastuksista.





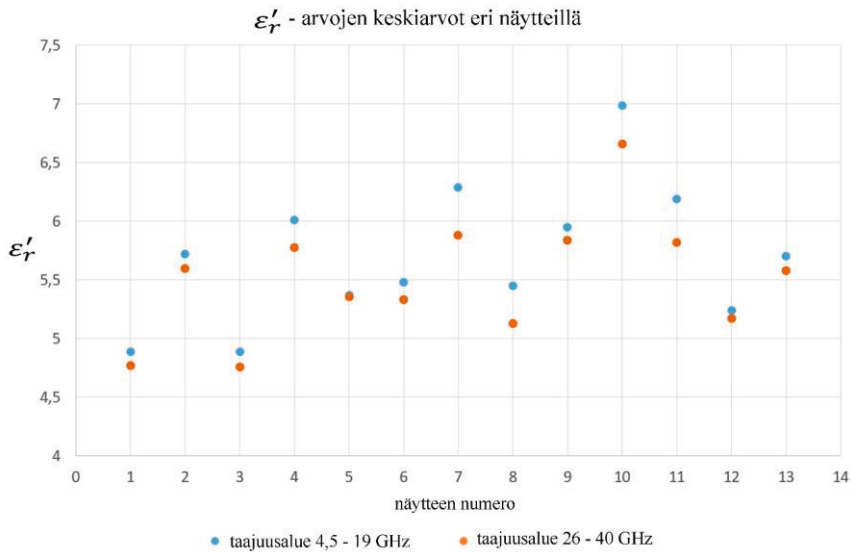
**Kuva 17.3** Esimerkkikuva S-parametrimittausten tuloksista (a) ja lasketuista permittiivisyyden arvoista (b).

Mitatut näytteet ja niiden ominaisuudet on kootusti esitelty taulukossa 17.1, jossa on muutamia tilan puutteen vuoksi lyhennettyjä mainintoja. Taulukossa ”auto”-merkintä viittaa kaupallisen toimijan betoniautosta otettuun valmisbetoniin, ”vanha”-maininta kuvaa näytettä, joka on sahattu yli 20 vuotta sitten valmistetusta betonielementistä. ”1/2 vuotta” viittaa näytteeseen, joka on noin puoli vuotta aikaisemmin valmistettu kuin muut näytteet. ”W/C” kuvaa vesi-sementtisuhdetta. Taulukossa olevat permittiivisyyden arvot ovat edellisen kuvan 17.3b tapaan kuvaajista valittuja keskiarvoja. Sarakkeet  $\epsilon_r$ -1.alue ja  $\epsilon_r$ -2.alue viittaavat mitattuihin taajuusalueisiin, joista alempi (1. alue) oli 4,5–19 GHz ja ylempi 26–40 GHz.

**Taulukko 17.1** Näytteiden permittiivisyyden arvot.

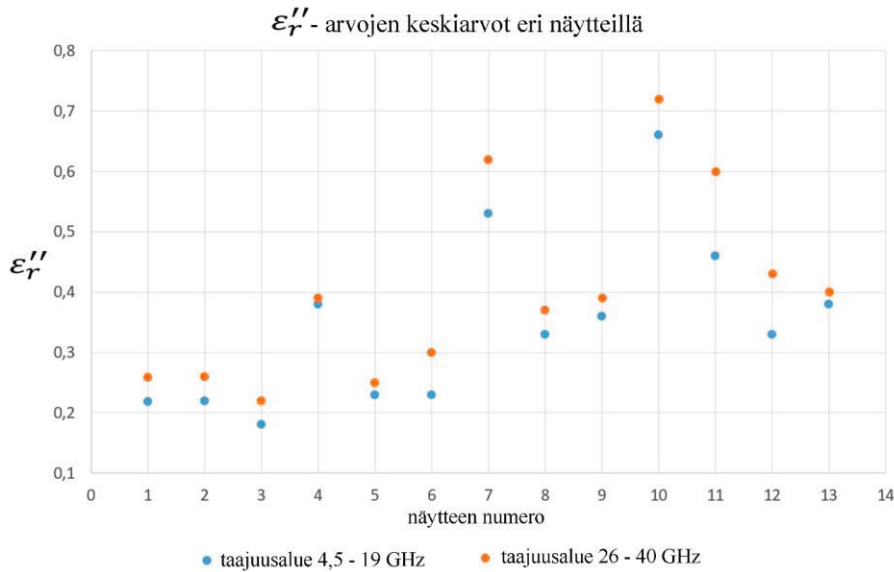
Nro	Materiaali	Kuvaus	Tyyppi	Paksuus	Uuni	Keskiarvo					
						Er'	Er'	Er''	Er''	tan δ	tan δ
						1. alue	2. alue	1. alue	2. alue	1. alue	2. alue
1	betoni	W/C=0,7	S100B	13,68		4,89	4,77	0,22	0,26	0,045	0,056
2	betoni	W/C=0,7	SB45B	10,47		5,72	5,6	0,22	0,26	0,038	0,046
3	betoni	W/C=1,0		15,60		4,89	4,76	0,18	0,22	0,037	0,046
4	betoni	W/C=0,4		14,73		6,01	5,78	0,38	0,39	0,063	0,067
5	betoni	vanha		16,73		5,37	5,36	0,23	0,25	0,043	0,047
6	betoni	betoniauto		13,23		5,48	5,33	0,23	0,3	0,042	0,056
7	betoni	betoniauto		16,83	ei uunissa	6,29	5,88	0,53	0,62	0,084	0,105
8	betoni	W/C=1,0		14,83	ei uunissa	5,45	5,13	0,33	0,37	0,061	0,072
9	betoni	vanha		14,26	ei uunissa	5,95	5,84	0,36	0,39	0,061	0,067
10	betoni	W/C=0,7	SB45	14,37	ei uunissa	6,99	6,66	0,66	0,72	0,094	0,108
11	betoni	W/C=0,4		15,98	ei uunissa	6,19	5,82	0,46	0,6	0,074	0,103
12	betoni	W/C=0,7	S100	13,21	ei uunissa	5,24	5,17	0,33	0,43	0,063	0,083
13	betoni	½ vuotta		15,34		5,7	5,58	0,38	0,4	0,067	0,072
14	siporex			13,91	ei uunissa	2,15	2,06	0,13	0,12	0,060	0,058
15	tiili			16,58	ei uunissa	4,22	4,15	0,03	0,04	0,007	0,010
16	puu			21,51		2,21	2,06	0,24	0,18	0,109	0,087

Seuraaviin kuviin 17.4 ja 17.5 on kerätty mittaustuloksista erikseen suhteellisen permittiivisyyden reaali- ja imaginääriosat eri betonilaatujen välisen vertailun helpottamiseksi.



**Kuva 17.4** Mitattujen betoninäytteiden  $\epsilon_r'$ -arvot.

Kuvan 17.4 perusteella voidaan todeta  $\epsilon_r'$ -arvojen käyttäytyvän taajuusalueiden suhteen eri näytteillä melko yhtenäisesti, ja korkeammalla taajuusalueella permittiivisyyden reaali-osan numeroarvon olevan yleensä karkeasti noin 10 % pienempi kuin matalammalla taajuusalueella. Poikkeuksena tästä ovat näytteet 5, 9, 12 ja 13, joilla taajuusalueiden ero on muita näytteitä pienempi. Näistä näytteet 5, 9 ja 13 edustavat vanhempia betoneita ja näyte 12 kuvaa ”tavallista perusbetonia” (SB100, ei uunissa, W/C = 0,7).

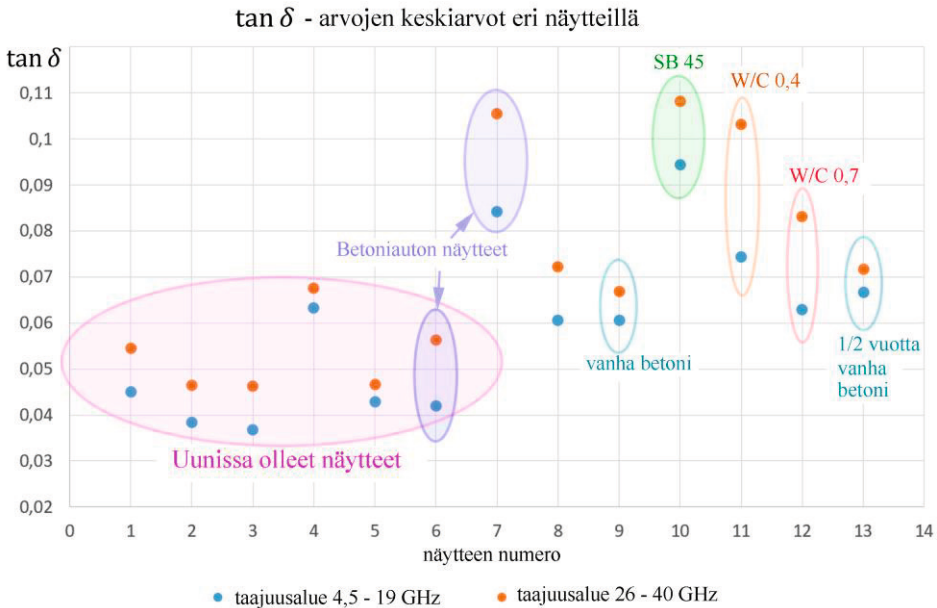


**Kuva 17.5** Mitattujen betoninäytteiden  $\varepsilon_r''$ -arvot.

Betoninäytteiden  $\varepsilon_r''$ -arvoja tarkasteltaessa kuvassa 17.5 huomio kiinnittyy kuvan vasemmalla puolella olevaan ryhmään, johon kuuluvat näytteet 1–6. Näiden osalta permittiivisyyden imaginääriosan arvot ovat näytettä 4 lukuun ottamatta varsin matalia, joka antaa aiheen olettaa näiden materiaalien signaalivaimennuksen nousevan maltillisesti taajuuden kasvaessa. Yhteistä näille näytteille on uunissa tapahtunut kuivattaminen. Näytteiden 7–13  $\varepsilon_r''$ -arvot ovat huomattavasti edellistä ryhmän vastaavia arvoja korkeammat, ja erityisesti näytteiden välisen hajonnan voidaan todeta olevan suurta. Ryhmästä erottuvat poikkeuksellisen korkeilla lukuarvoilla näytteet 7 ja erityisesti näyte 10. Näistä näytteistä numero 7 edustaa betoniautosta saatua näytettä, jota ei kuivatettu uunissa sekä voimakkaasti lisäaineistettuun sementtiin pohjautuva näyte 10. Koska näillä edellä mainituilla kahdella näytteellä oli myös  $\varepsilon_r'$ -arvojen osalta korkeammat arvot kuin muilla näytteillä, voidaan tässä vaiheessa ennustaa näytteistä laskettujen matkapuhelinverkkojen signaalivaimennusten eroavan näillä näytteillä muiden betonilaatujen vastaavista vaimennuksista.

Niin kuin edellä on kappaleessa 13 todettu, saadaan  $\tan \delta$ :n arvot suoraan  $\varepsilon_r$ :n imaginääri- ja reaali-osien suhteesta. Se on kirjallisuudessa yleisesti käytetty suure materiaalien ominaisuuksia kuvattaessa, ja siksi  $\tan \delta$ :n arvot esitetään taulukon lisäksi omana kuvanaan numerolla 17.6. Kuvassa 17.6 eri näytteet on ryhmitelty erilaisin väritetyin ympyröin ominaisuuksiensa mukaan, niin että esim. uunissa olleet näytteet erottuvat selvästi omana ryhmänään. Samoin betoniautosta saadut näytteet yhdessä

lisäaineistetun SB45-sementtipohjaisen betonin arvot eroavat muista melko selvästi. Kuvassa on myös merkitty muutamia muita yksittäisiä näytteitä, joista silmiinpistävimmit ovat uunittamattomien ryhmässä erilaisten vesi-sementtisuhteiden koepalat 11 ja 12, sekä näytteet 9 ja 13, jotka molemmat edustavat vanhempia näytteitä. Vanhempien näytteiden kohdalla eri taajuusalueilla mitatut  $\epsilon_r$ :n arvot näyttävät olevan lähellä toisiaan, joten niiden osalta  $\tan \delta$ :n tulokset näyttävät olevan lähes taajuudesta riippumattomia.

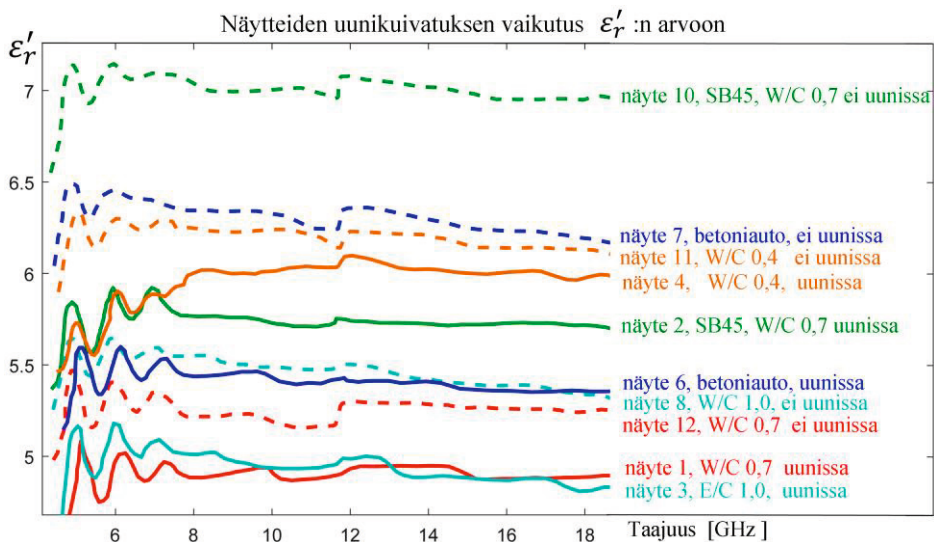


**Kuva 17.6** Tangentti  $\delta$ :n arvot eri näytteillä.

Kuvasta 17.6 havaitaan myös matalan vesi-sementtisuhteen omaavan näytteen numero 11  $\tan \delta$ :n olevan eri taajuusalueilla paljon etäämpänä toisistaan kuin muilla näytteillä, joten sen taajuusriippuvuus on melko suuri. Yleisesti voidaan todeta uunissa tapahtuneen kuivattamisen yhdenmukaistavan näytteiden  $\tan \delta$ :n arvoja. Sen sijaan vain huoneilmassa tapahtuva kuivaus jättää näytteiden välille melko suuria vaihteluita ja arvojen hajonnan suureksi. Tämä aiheuttaa erilaisten betonien RF-vaihtelujen suuret vaihtelut, kun signaalien etenemistä materiaaleissa tarkastellaan etenkin suuremmilla taajuuksilla.

Seuraavassa kuvassa 17.7 tarkastellaan  $\epsilon_r$ :n arvon muuttumista eri taajuuksilla ja toisaalta saman arvon uunikuivauksen ja tavallisen huoneilmakuivattamisen eroja eri näytteillä. Kuvasta 17.7 on helposti luettavissa esimerkiksi samalla värillä esitettyjen

näytteiden 2 ja 10 suuri keskinäinen ero, joka ilmeisesti liittyy vahvasti lisäaineistetun sementin ominaisuuksiin. Kummatkin näytteet on valmistettu vesi-sementtisuhteella 0,7 ja sementtinä on käytetty lisäaineistettua sementtiä, jota on saatavilla kauppanimellä SB 45. Lisäaineilla tavoiteltu pakkasenkestävyys nähtävästi perustuu tässä tuotteessa suojahuokosten suurempaan määrään ja/tai kokoon ja niiden vaikutukseen betonissa. Hieman yllättävää on erityisesti se, että lisäaineistettu sementti käyttäytyy muihin näytteisiin verrattuna eri tavoin erityisesti silloin, kun se ei ole ollut uunikuivatuksessa. Uunissa tapahtuva huokosten kuivaus palauttaa sen permittiivisyyden samaan suuruusluokkaan muiden näytteiden kanssa.



**Kuva 17.7** Uunikuivatuksen vaikutus permittiivisyyden arvoon.

Uunissa tapahtuva kuivaus näyttää pudottavan  $\epsilon_r'$ :n arvoa kaikilla näytteillä, mutta arvon pienenemisen määrä näyttää tulosten valossa vaihtelevan melko paljon. Kuvaan 17.7 mukaan otettujen näytteiden osalta suurin muutos on edellä mainitulla lisäaineistettuun sementtiin perustuvilla betoninäytteillä, mutta lähes yhtä suuri muutos on betoniautosta otetulla betoninäytteellä. Sen permittiivisyyden pieneneminen on uunikuivatuksen aiheuttamana noin 15 %, kun se muilla näytteillä on 4,5–19 GHz:n taajuusalueella noin 10 % suuruusluokkaa.

## 17.4 Erilaisten betonisten sisäkuorien RF-vaimennukset

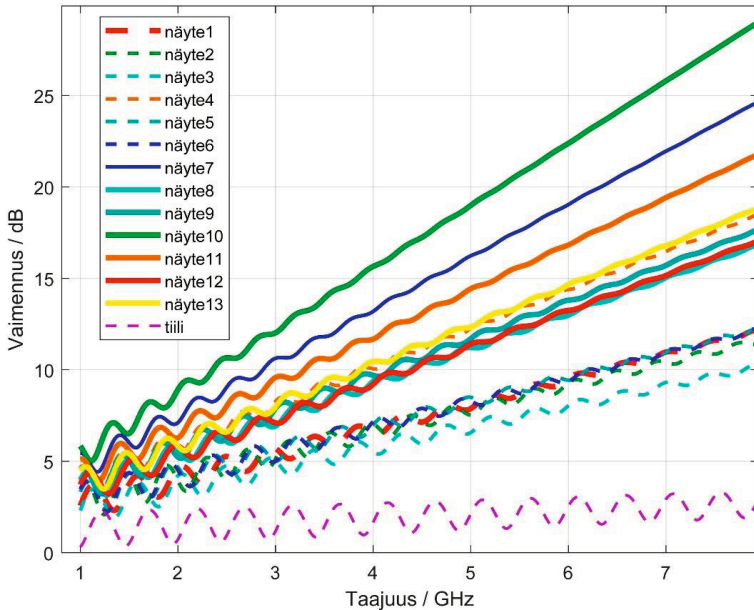
Edellä on esitetty erilaatuisten kuivien betonien permittiivisyyden arvojen vaihtelua. Tämän jälkeen onkin perusteltua kysyä, miten tulokset näkyvät todellisen seinän vaimennuksissa.

Tässä kappaleessa keskitytään arvioimaan tavanomaisten ulkoseinien RF-vaimennuksia, mutta tässä vaiheessa seinän oletetaan olevan kuivan. Tämä oletamus ei pidä paikkaansa käytännön seinärakenteelle, ja siksi tässä kappaleessa rajoitutaankin vain eri betonilaaduilla tehtyjen sandwich-elementtien sisäkuoren vaimennukseen. Sisäkuoren voidaan tavanomaisissa olosuhteissa olettaa olevan koko ajan kuivan. Tämän lisäksi seuraavassa kappaleessa 17.5 tutkitaan erikseen tilannetta, jossa sandwich-elementin sisäkuori on edelleen kuiva mutta ulkokuoren kosteus vaihtelee. Todellisen seinärakenteen vaimennus onkin näiden molempien kuorien vaimennuksien summa.

Seuraavassa esitettävä kuva 17.8 esittää vaimennusarvoja, jotka on laskettu edellä esiteltyjen näytteiden permittiivisyyksien perusteella 150 millimetriä paksulle elementin sisäkuorirakenteelle. Kuvassa esitetyt vaimennusarvot kuvautuvat suoraan tavallisen asuinkerrostalon tyyppillisen sandwich-elementin sisimmäisen betonikuoren vaimennuksiin. Tämä ei siis ole koko seinän vaimennuksesta kertova kuva, vaan ainoastaan sen seinärakenteen osan, joka lähimpänä huoneilmaa olevana todennäköisesti säilyy kutakuinkin vakio-olosuhteisena ympäri vuoden. Tässä oletetut vakio-olosuhteet ovat tyyppillisen asuinhuoneen lämpötila ja kosteus.

Tietysti tulee muistaa, että 150 millimetrin paksuus ei ole mihinkään standardiin perustuva kaikkialla käytettävä sisäkuoren paksuus, vaan kuoren materiaalivahvuus voi vaihdella rakennuksen tyyppin, kerrosmäärän ja rakennuksen massojen tuennan mukaan. Tulee huomioida, että erityisesti 1960–1980-luvuilla valmistuneissa elementtitaloissa päätyelementit ja sivuseinien elementit olivat paksuudeltaan erilaisia. Kuitenkin 150 millimetrin paksuuteen perustuva tarkastelu on perusteltavissa, sillä se on yleisin yksittäinen sisäkuoren paksuus viimeisinä vuosikymmeninä. Toisaalta on todettava, että varsinkin suurissa kaupungeissa rakentaminen on 2000-luvulla ollut aikaisempaa tiiviimpää, ja se näkyy myös korkeampina taloina. Asuinkerrostalojen kerroslukujen kasvaminen puolestaan aiheuttaa erityisesti alimpiin kerroksiin painetta rakenteiden muuttamiseen paksummiksi, sillä yläpuolisten kerrosten tuenta vaatii massiivisempia ratkaisuja. Tämän vuoksi kenttämittauksissa on havaittu useita kohteita, joissa ulkoseinien sisäkuoret olivat 200 millimetriä paksuja.

Eri näytteiden  $\epsilon_r$ :n perusteella laskettuja vaimennuksia kuivalle sisäkuorelle



**Kuva 17.8** Eri betonilaatujen vaimennus elementin sisäkuoressa.

Kuvaan 17.8 on koottu mitatut betoninäytteet sekä vertailun vuoksi tiilinäyte. Tiilen osalta tulos edustaa vain vertailuarvoa, sillä elementin sisäkuorta ei käytännössä tehdä 150 millimetriä paksuna tiilirakenteena. Tiilen permittiivisyys kuitenkin eroaa merkittävästi betonin vastaavasta, ja siksi sen vaimennuskäyrä kulkee kuvan alaosassa erillisenä aaltoilevana katkoviivana. Tiilen vaimennuskäyrä onkin otettu mukaan vain osoittamaan tiilen matalaa vaimennusta betoniin verrattuna. Tiilen vaimennuskäyrän aaltoilu johtuu siitä, että näytteen eri pinnoilta heijastuvat signaalikomponentit summautuvat suoraan menevään komponenttiin. Vaihtelu näkyy paremmin tiilessä kuin muissa materiaaleissa, koska tiilen pienet materiaalihäviöt eivät merkittävästi heikennä heijastuneita komponentteja. Tiili on myös kiinnostava siksi, että osassa kerrostaloelementtejä rakenteen ulkokuoren uloin osa on ainakin osittain tehty tiilipinnoitteella. Tällöin se pienentää ulkokuoren betoniosan paksuutta.

Kuvassa 17.8 voidaan laskettujen vaimennuskäyrien joukosta erottaa tiilen lisäksi myös muut katkoviivalla esitetyt näytteet 1–6 omaksi ryhmäkseen, jolla on huomattavasti pienempi RF-vaimennus suuremmilla taajuuksilla verrattuna muiden näytteiden käyriin. Yhteistä näille näytteille on se, että ne kuuluvat uunissa kahden päivän ajan olleeseen näytejoukkoon. Tämä on huomionarvoista siksi, että tässä kuvassa kaikki näytteet olivat kuivaneet kuukausien ajan tavallisessa huoneilmassa. Koska



näytteiden paksuus oli 15 millimetrin suuruusluokkaa, kaikkien näytteiden voidaan olettaa olleen kuivia mittaushetkellä. Ainakin näiden tulosten valossa uunissa tapahtuva kuivaus muutti betoninäytteiden rakennetta, sillä vaikka uunissa kuivatuksen jälkeen näytteitä säilytettiin pitkään tavallisessa huoneilmassa, niiden ominaisuudet jäivät erilaisiksi kuin uunittamattomien vertailunäytteiden. Alkuperäisessä mittaussuunnitelmassa erojen oletettiin palautuvan, sillä uunikuivien näytekappaleiden oletettiin imevän huoneilmassa olevaa kosteutta niin pitkään että ympäristön ja näytteen oma kosteuspitoisuus asettuvat samalle tasolle.

Useista näytteissä on kuvassa vastinpari, jotka on merkitty samalla värisävyllä. Vastinparit ovat muuten samanlaisia, mutta toinen, katkoviivalla piirretty, on ollut uunissa. Näin on mahdollista arvioida uunikuivauksen vaikutusta suoraan kuvasta vertaamalla samalla värillä piirrettyjä eri näytteiden käyriä.

Edellisten lisäksi huomioitava yksityiskohta kuvassa esitetyissä tulokäyrissä on betoninäytteen numero 7 käyttäytyminen. Se edustaa suoraan betoniautosta otettua näytettä kaupallisesta betonista, ja siksi sen voidaan ainakin olettaa edustavan elementtirakentamisessa käytettävää betonilaatua. Näyte 7 ei ollut uunikuivauksessa olleessa ryhmässä ja siksi se edustaa ns. tavallisissa olosuhteissa kuivunutta betonilaatua. Vastaava laatu uunikuivauksessa oli katkoviivalla esitetty näyte 6, ja kuvan perusteella uunikuivaus johtaa näiden näytteiden osalta jo 5G-verkon 3,8 GHz:n taajuuksilla noin 6,5 dB:n vaimennuseroon. Tarkasteltaessa näytteen 7 kuvaajaa, voidaankin todeta tavallisen betonisen seinäelementin sisäkuoren vaimennuksen olevan 1 GHz:n taajuuksilla noin 4,5 dB:ä, 2 GHz:n taajuuksilla noin 6,5 dB:ä ja nyt käyttöön tulevilla 5G:n alemmilla taajuuksilla noin 13 dB:ä. Nämä arvot siis sisältävät oletuksen, että betoni on nuorta, mutta kuivaa.

## 17.5 Betonin kosteuden vaikutus

Tutkimuksessa oli alun perin tarkoitus selvittää eri betonilaatujen signaalivaimennusten mahdollisia eroja ja toisaalta tutkia samoilla näytteillä kosteuden vaikutusta matkapuhelinverkkojen käyttämien signaalien etenemiseen betonirakenteissa.

Kuivaamisen tarkoitus oli mittaussuunnitelmassa saattaa näytteet niin kuiviksi kuin mahdollista, jossa tilassa näytteiden S-parametrit mitataan. Tämä kuivaus palveli sekä eri betonilaatujen erojen selvittämistä, että myös kosteuden vaikutuksen tarkastelua. Kosteuden selvittämisessä ensin näytteiden tuli olla täysin kuivia, jotta kuivien näytteiden täydellisellä kastelemisella saadaan selville koko vaihteluvälin suuruus.

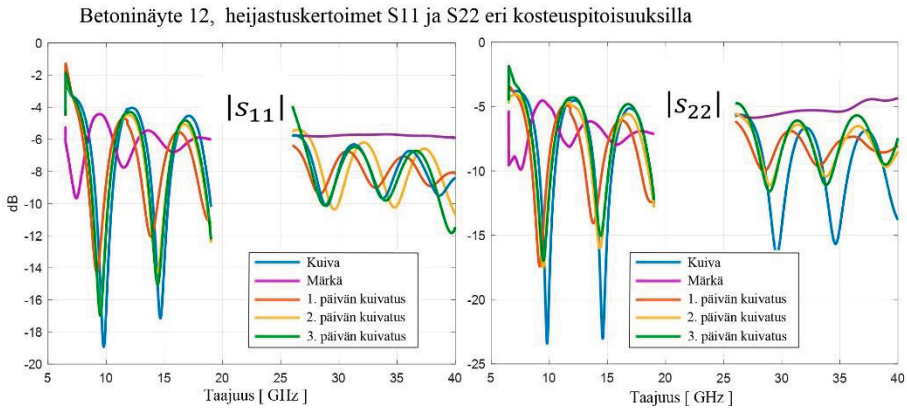
Täysin kuivien näytteiden mittausten jälkeen näytteet punnittiin ja asetettiin vesiastian kahden vuorokauden ajaksi. Veteen upottamisen jälkeen näytteet kuivattiin pintakuivaksi mahdollisimman nopeasti, jonka jälkeen mitattiin S-parametrit märälle kappaleelle ja kappaleet punnittiin. Näin saatiin raja-arvot (täysin kuiva ja täysin märkä) kullekin betonilaadulle, joiden välillä betonin kosteus todellisessa rakennuksessa pysyy käytännössä koko ajan, vuodenaikasta riippumatta.

Täysin kasteltujen näytteiden mittaustuloksissa oli merkittävänä virhelähteenä näytteen kosteuden muutos itse mittausten aikana. Betoninäytteen pintaa jo silmä-määräisesti arvioitaessa sen väri vaihtui täysin märän tummasta huomattavasti vaaleammaksi jo muutaman minuutin kuluessa näytteen nostamisesta vedestä, jolloin ainakin näytteen pinnan kosteus muuttui mittausprosessin edetessä. Itse mittaus kesti kymmeniä minuutteja, sillä kullekin näytteelle mittaukset tehtiin kahdella eri taajuus-alueella. Taajuusalueiden rajoittaminen kahteen perustui juuri näytteiden kosteuden muuttumiseen mittausten kuluessa, sillä jokainen taajuusalue vaati aikaa vevän antenneja syöttämään aaltoputken vaihtamisen.

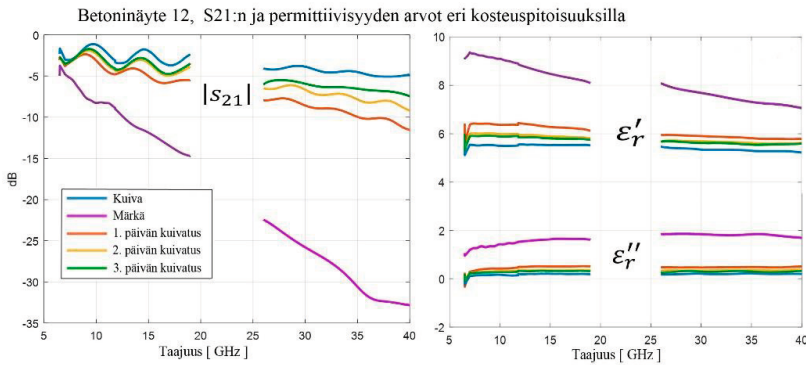
Betoninäytteiden kastelun jälkeen näytteet asetettiin tavalliseen huoneilmaan, ja kosteuden sekä S-parametrien muutosta seurattiin 2, 3, 4 ja 7 päivän ajan. Näytekap-paleiden kosteuden muutosten nopeudesta ei voi vetää johtopäätöksiä todellisen ulkoseinärakenteen kuivumiseen, sillä näytteet olivat paljon normaaleja seinärakenteita ohuempia, ja kuivuminen tapahtui huoneilmaan levymäisen kappaleen kaikilta pin-noilta. Sen sijaan permissiivisyyden suhteesta betonin kosteuteen saatiin seuraavassa esitettäviä tuloksia.

Seuraavissa neljässä kuvassa 17.9–17.12 esitetään esimerkinomaisesti mittauksista saadut kuvaajat kolmelle erilaiselle näytteelle. Kuvissa on esitetty mittaustulokset S-parametreille ja niistä lasketuille  $\varepsilon_r$ -arvoille eri taajuuksilla.

Esimerkinnäytteiden eroina olivat lähinnä erilaiset vesi-sementtisuhteet, joka näytteellä 12 on 0,7, näytteellä 8 suhde on 1,0 ja näytteellä 11 suhteen arvo on pienin mahdollinen eli 0,4.



**Kuva 17.9** Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista.

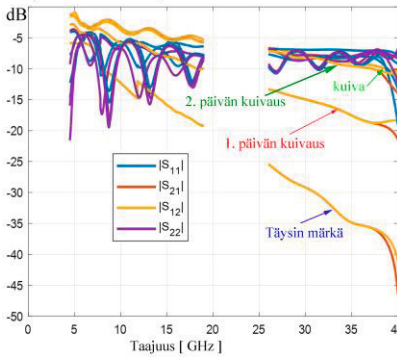


**Kuva 17.10** Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista ja niistä lasketuista permittiivisyyden arvoista.

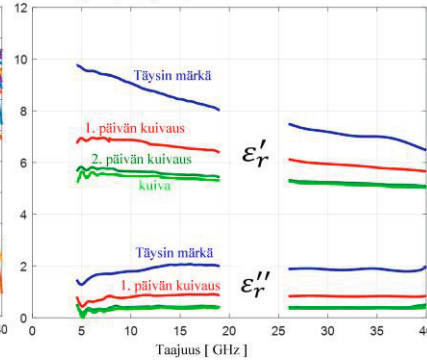
Niin kuin kuvista 17.9–17.12 nähdään, sekä S-parametrit että permittiivisyyden arvot muuttuvat taajuuden mukaan kaikilla näytteillä voimakkaasti betonin ollessa märkä, mutta materiaalin kuivuessa taajuusriippuvuus vähenee.

Selvemmin tämä ilmiö on nähtävissä esimerkkinä käytettävästä näytteestä numero 12, (kuvat 17.9 ja 17.10) joka perustuu tavallisena säckitavarana myytävään sementtiin (merkinnällä S100), ja jossa vesi-sementtisuhde on 0,7. Tarkasteltaessa näytteen permittiivisyyden käyttäytymistä esittävän kuvan 17.10 oikeanpuoleista kuvaa, voidaan todeta  $\epsilon_r'$ :n ja  $\epsilon_r''$ :n kuvaajien olevan lähes vaakasuoria kuivalle näytteelle, joten kuivana sen taajuusriippuvuus on hyvin pieni.

Näyte 8, mitatut S-parametrit eri kosteuden arvoilla

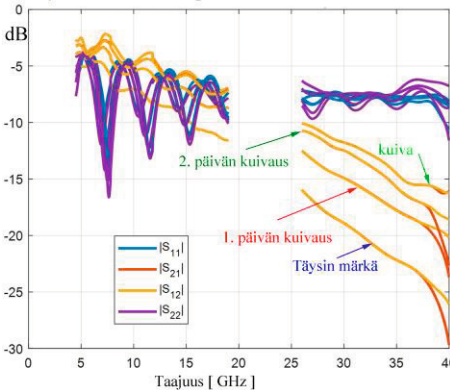


Näyte 8,  $\epsilon_r'$  ja  $\epsilon_r''$ -arvot eri kosteuksilla

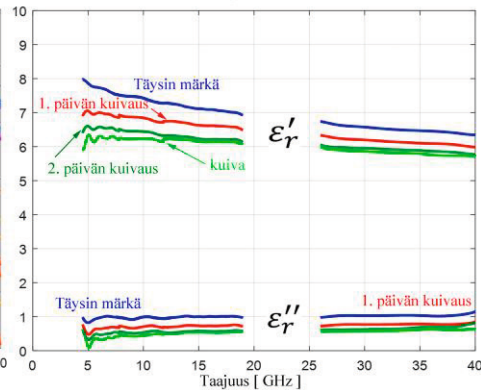


**Kuva 17.11** Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista ja niistä lasketuista permittiivisyyden arvoista. Esimerkkinä tässä näyte numero 8.

Näyte 11, mitatut S-parametrit eri kosteuden arvoilla



Näyte 11,  $\epsilon_r'$  ja  $\epsilon_r''$ -arvot eri kosteuksilla

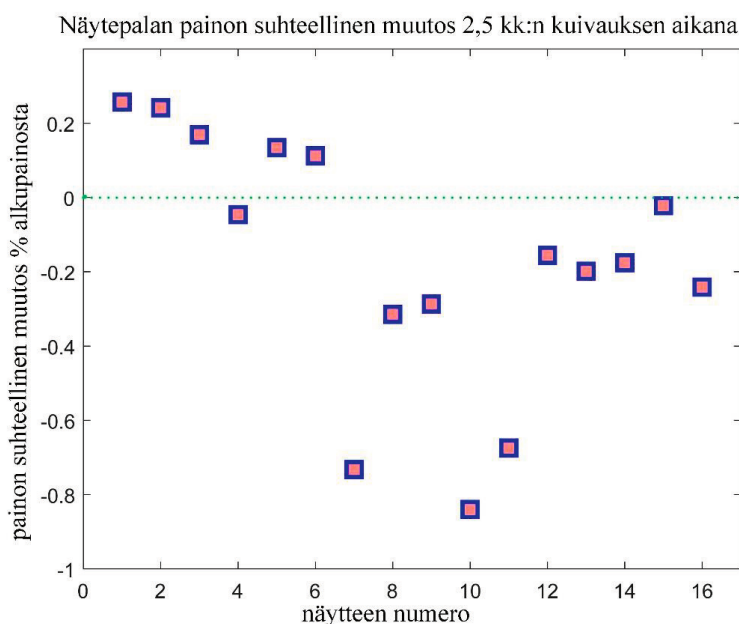


**Kuva 17.12** Esimerkkikuva tyypillisistä betoninäytteiden mittaustuloksista ja niistä lasketuista permittiivisyyden arvoista. Esimerkkinä tässä näyte numero 11.

Betonin kosteuden vaikutusta tutkittaessa jatkossa rajoitetaan vain taajuusalueeseen 4,5–19 GHz, sillä kuvien 17.10–17.12 perusteella alemman taajuusalueen tulosten avulla voidaan tarvittaessa arvioida eri betonilaatujen käyttäytymistä myös suuremmilla taajuuksilla. Kuvissa esitetyt kuvaajat jatkuvat lähes vakiona pysyvällä kulmakertoimella yli kummankin taajuusalueen, joten voidaan perustellusti olettaa, että mitattujen taajuusalueiden välissäkin olevalla kaistalla ei tapahdu merkittäviä muutoksia.

## 17.5.1 Betoninäytteiden painojen muutokset kosteuden mukaan

Betoninäytteiden painon muuttumista seurattiin kuivauksen aikana punnitsemalla näytteet, kun oli kulunut 38 vuorokautta betonin valmistamisesta ja seuraavan kerran kun kappaleita oli sen jälkeen kuivattu 2,5 kuukautta. Kuivauksen alussa osa näytteistä laitettiin erityiskuivaukseen 105-asteiseen uuniin kahden vuorokauden ajaksi. Uunissa kuivatetut näytteet 1–6 ovat kuvassa 17.13 omana ryhmänään nollaviivan yläpuolella (poislukien näyte 4). Kuva kertoo näytteiden painon ja kosteuden kehityksestä kuivauksen aikana. Nollaviivan yläpuolella olevilla näytteillä huoneilmassa tapahtuneen kuivauksen aikana näytteiden paino nousi, joka selittyy sisätiloissa olevan kosteuden imeytymisellä täysin kuivaan kappaleeseen.



**Kuva 17.13** Kappaleiden painon suhteellinen muutos kuivauksen aikana.

Muut näytteet, joilla suhteellinen painon muutos oli kuivauksen aikana negatiivinen, menettivät painoaan kuivauksen aikana.

Eniten pelkän huonetilassa tapahtuneen kuivauksen aikana painoaan menettivät näytteet 7, 10 ja 11, joten tulosten valossa näyttäisi siltä, että matalahko vesi-sementtisuhte olisi yhteydessä muutaman kuukauden aikana betonin valmistuksen jälkeen tapahtuvaan tehokkaampaan kuivumiseen.

## 17.5.2 Betoninäytteiden painojen muutokset kuivumisen aikana

Tässä kappaleessa tarkastellaan kuukausia kestäneen kuivatuksen ja sen jälkeisen täydellisen kastelun jälkeen tapahtunutta näytteiden kuivumista.

Betonin kuivuminen on itsessään enemmän rakennusfysiikan alaan kuuluvaa tutkimusta, mutta koska aikaisemmista alustavista mittauksista tiedetään kostean materiaalin pääsääntöisesti vaimentavan kuivaa materiaalia enemmän, on perusteltua käsitellä aihetta lyhyesti.

Tässä yhteydessä kuivumisprosessin tutkiminen kiinnostaa lähinnä suuremman vaimennuksen ajallisen keston näkökulmasta.

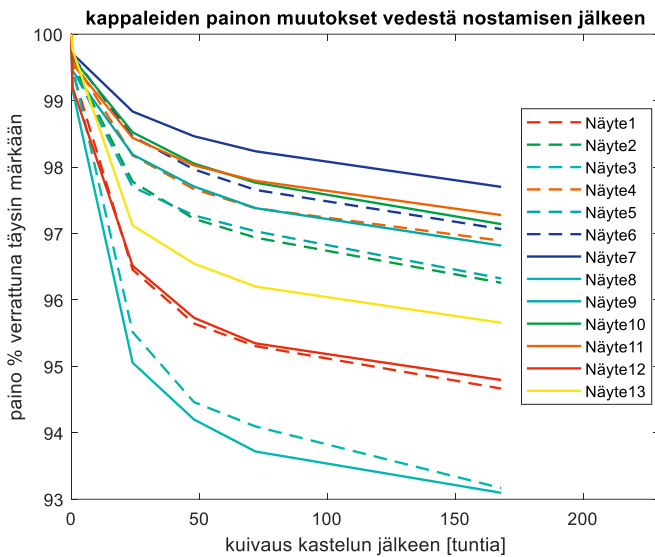
Taulukossa 17.2 esitetään taulukkomuodossa mitattujen betoninäytteiden painojen muutokset kuivaamisen ja sitä seuranneen kastelun yhteydessä. Tässä taulukossa ovat myös tämän kosteutta käsittelevän kappaleen eri näytenumeroita vastaavat kuvaukset, joita ovat betoninäytteen valmistuksessa käytetty vesi-sementtisuhde ja betonin valmistuksessa käytetty sementtityyppi. Taulukossa esiintyvä kuivapaino on paino ennen betoninäytteen kastelemista. ”Uuni”-merkintä viittaa siihen, että 2,5 kk kestäneen kuivatusjakson alussa kyseinen näyte on ollut 105-asteisessa uunissa kahden vuorokauden ajan. Taulukossa on betoninäytteiden lisäksi muutamia muita ulkoseinissä käytettyjä materiaaleja, kuten siporex, puu ja tiili. Nämä ovat tarjoamassa laajemman kokonaiskuvan ulkoseinämateriaalien yleisestä käyttäytymisestä.

**Taulukko 17.2** Näytteiden painojen muutokset kosteuden muuttuessa.

nro	materiaali	huom	näyte tuote	näytteen paksuus mm	uuni	kuiva	täysin märkä	1 tunnin kuivaus	24 tunnin kuivaus	48 tunnin kuivaus	72 tunnin kuivaus	168 tunnin kuivaus
						paino (g)	paino (g)	paino (g)	paino (g)	paino (g)	paino (g)	paino (g)
1	betoni	W/C=0,7	S100B	13,678	uuni	631,52	670,95	667,2	647,17	641,73	639,45	635,16
2	betoni	W/C=0,7	SB45B	10,469	uuni	501,81	529,41	527,11	517,65	514,71	513,22	509,60
3	betoni	W/C=1,0		15,604	uuni	699,38	757,95	754,16	723,96	715,97	713,21	706,17
4	betoni	W/C=0,4		14,728	uuni	736,56	768,46	765,55	754,44	750,53	748,33	744,57
5	betoni	vanha		16,73	uuni	573,97	601,70	598,66	587,87	586,28	583,85	579,58
6	betoni	betoniauto		13,228	uuni	641,02	669,45	667,24	659,14	655,82	653,76	649,81
7	betoni	betoniauto		16,833		837,32	867,51	864,97	857,41	854,18	852,22	847,57
8	betoni	W/C=1,0		14,832		674,87	727,08	721,00	691,14	684,91	681,41	676,89
9	betoni	W/C		14,263		500,76	521,03	518,15	511,59	509,08	507,39	504,45
10	betoni	W/C=0,7	SB45	14,366		705,92	737,77	735,12	726,87	723,40	721,28	716,68
11	betoni	W/C=0,4		15,983		798,18	827,60	823,92	814,68	811,25	809,33	805,07
12	betoni	W/C=0,7	S100	13,214		609,55	645,31	640,15	622,82	617,76	615,28	611,72
13	betoni	½ vuotta		15,342		341,83	359,63	358,80	349,28	347,21	345,97	344,01
14	siporex			13,911		244,47	400,92	395,04	288,30	246,11	241,56	241,08
15	tiili			16,587		457,1	507,85	503,24	460,57	457,15	457,11	457,08
16	puu			21,509	uuni	256,29	415,30	410,18	337,30	306,60	291,43	265,10

Taulukossa 17.2 ”täysin märkä” -sarake kertoo näytteen painon, kun se on juuri nostettu vedestä ja kuivattu pinnaltaan kevyesti pyyhkimällä. Sen jälkeen kappaleen annettiin kuivua tunnin ajan, jonka jälkeen punnitus toistettiin. Tässä vaiheessa näytteiden pinta oli jo kuivunut ja pintojen väri oli muuttunut vaaleammaksi. Sen jälkeen punnitukset tehtiin vuorokauden välein. Viimeinen punnitus tehtiin 7 vuorokauden kuluttua kastelun lopettamisesta, sillä siinä vaiheessa näytteiden painot olivat jo pudonneet riittävän lähelle kuivien näytteiden painoja.

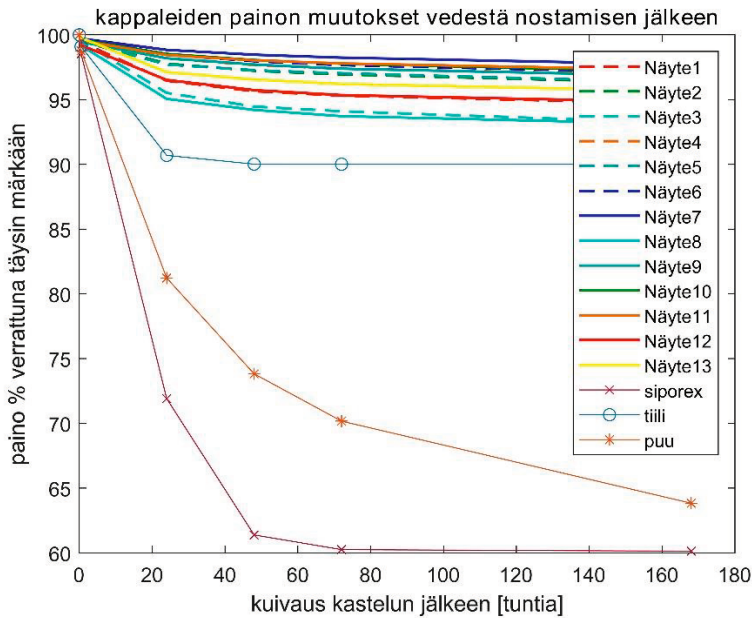
Seuraavissa kuvissa 17.4 ja 17.5 tutkitaan näytteiden painon muutosta täydellisen kastelun jälkeen. 100 %:n arvo vastaa tilannetta, jossa näyte on punnittu välittömästi vedestä nostamisen jälkeen, jolloin näytteet olivat täysin märkiä. Muut pisteet kuvaavat miten paljon massaa (kosteutta) on jäljellä yhden, kahden, kolmen ja seitsemän päivän huoneilmassa tapahtuvan kuivumisen jälkeen. Kuivumisen aikana näytteet oli asetettu telineeseen, jossa eri näytteiden pinnat eivät olleet vastakkain, eli näytteet kuivuivat molemmilta sivuiltaan.



**Kuva 17.14** Betoninäytteiden painon suhteellinen muutos kuivauksen aikana.

Seuraavassa kuvassa 17.15 on esitetty vertailun vuoksi kastelun jälkeinen kuivuminen betoninäytteiden ohella myös puulle, siporexille ja tiilelle. Tässä esitetty erillinen kuva selittyy erityisesti siporexin ja puun suurella suhteellisella painonmuutoksella, joka muuttaa y-akselin epäkäytännöllisen suureksi betoninäytteiden erojen tarkastelun näkökulmasta.





**Kuva 17.15** Ulkoseinämateriaalien näytteiden painon suhteellinen muutos kuivauksen aikana.

Kuvan 17.15 perusteella voidaan todeta tiilen ja siporexin suhteellisesti kuivuvan selvästi betonia nopeammin, mutta puuhun varastoituva verrattain suuri vesimäärä poistuu ensimmäisen seitsemän päivän aikana vain osittain. Puun osalta luonnollisesti asiaan vaikuttaa ratkaisevasti puulaji, ja sen pintakäsittelyn laatu ja kunto.

### 17.5.3 Betoninäytteiden permittiivisyys niiden kastuessa

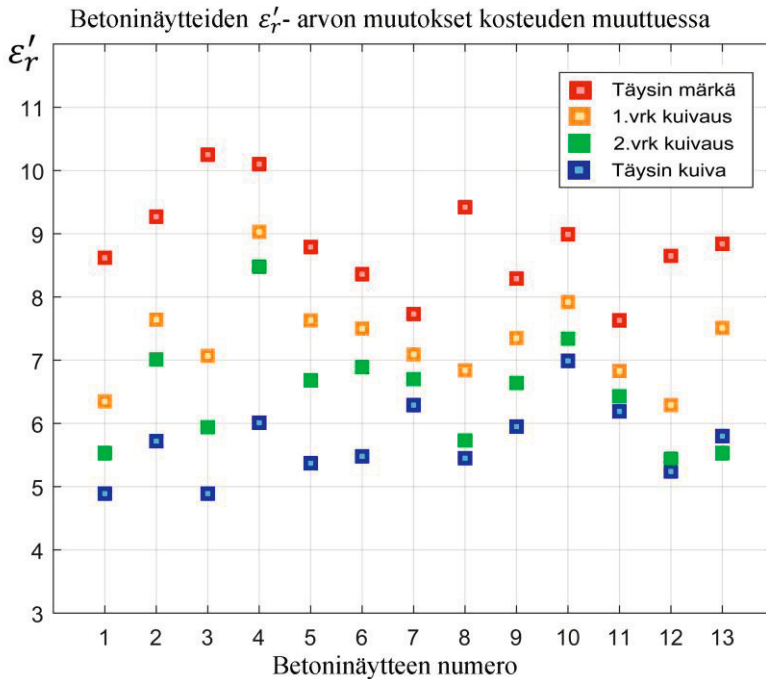
Seuraavaan taulukkoon 17.3 on koottu näytteiden  $\epsilon_r'$  ja  $\epsilon_r''$ -arvot kuiville, täysin märille ja 1- ja 2- päivää kuivatuille näytteille. Näin kuin edellä olevista kuvista voidaan havaita, permittiivisyyden arvo muuttuu taajuuden mukaan sitä enemmän, mitä suurempi on näytteen kosteus. Tämän vuoksi myös tässä taulukossa esitetyt arvot ovat keskiarvoja.

**Taulukko 17.3** Materiaalinäytteiden permittiivisyyden muutos kosteuden muuttuessa.

nro	materiaali	kuiva keskiarvo		märkä keskiarvo		päivä 1. keskiarvo		päivä 2. keskiarvo	
		Er'	Er''	Er'	Er''	Er'	Er''	Er'	Er''
1	betoni	4,89	0,22	8,62	1,73	6,35	0,67	5,53	0,37
2	betoni	5,72	0,22	9,27	1,52	7,64	0,87	7,01	0,64
3	betoni	4,89	0,18	10,25	2,63	7,07	0,94	5,94	0,53
4	betoni	6,01	0,38	10,1	1,31	9,03	0,82	8,48	0,61
5	betoni	5,37	0,23	8,79	1,94	7,63	1,02	6,68	0,61
6	betoni	5,48	0,23	8,36	1,52	7,5	0,96	6,89	0,66
7	betoni	6,29	0,53	7,73	1,27	7,09	0,89	6,7	0,7
8	betoni	5,45	0,33	9,42	1,61	6,84	0,68	5,73	0,36
9	betoni	5,95	0,36	8,29	1,27	7,35	0,83	6,64	0,56
10	betoni	6,99	0,66	8,99	1,46	7,92	0,99	7,34	0,77
11	betoni	6,19	0,46	7,63	1,06	6,83	0,69	6,43	0,53
12	betoni	5,24	0,33	8,65	1,75	6,29	0,7	5,44	0,4
13	betoni	5,7	0,35	8,84	2,03	7,51	1,19	5,53	0,68
14	siporex	2,15	0,13	16,05	6,75	4,86	1,19	2,14	0,11
15	tiili	4,22	0,03	11,01	2,66	4,73	0,17	4,21	0,02
16	puu	2,21	0,24	4	3,53	3,3	1,89	3,11	1,17

Taulukkoa 17.3 luettaessa voi käyttää apuna taulukkoa 17.1, jossa on kuvasarakkeilla esitetty eri numeroilla viitattujen betoninäytteiden laatu, paksuus, tyyppi ja esimerkiksi W/C-arvot.

Seuraavassa kuvassa 17.16 on esitetty  $\epsilon_r$ -arvojen vaihtelu näytteiden kosteuden muuttuessa. Kuvan perusteella voidaan todeta permittiivisyyden reaaliosan muuttuvan suhteellisesti enemmän näytteillä 1–4, joita yhdistää uunikuivaus. Tämän perusteella voidaan olettaa uunikuivauksen muuttavan näytekappaleiden rakennetta.

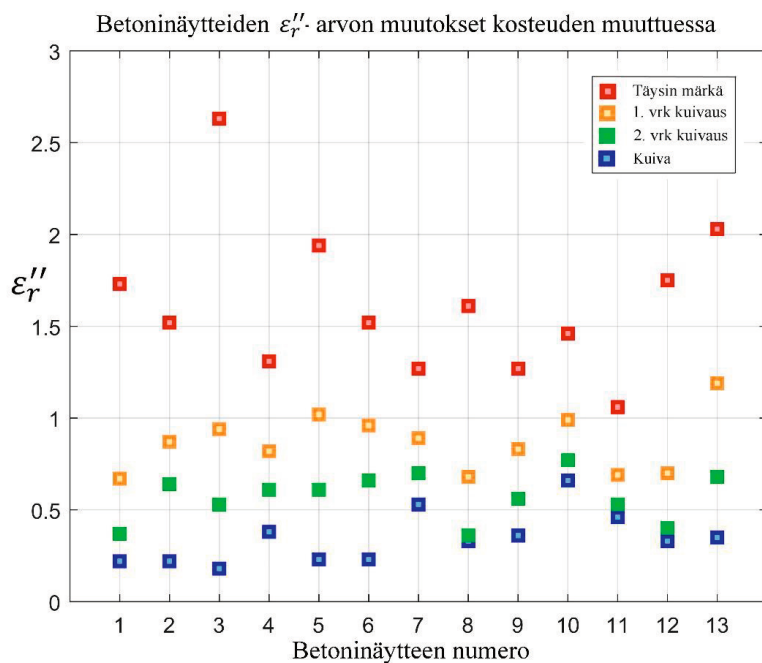


**Kuva 17.16** Betoninäytteiden  $\varepsilon_r'$ -arvojen muuttuminen kosteuden mukaan.

Kuvan 17.16 mukaan uunikuivauksen aiheuttaman suuren hajonnan vastapainoksi kuvasta on erotettavissa näytteet 7, 10 ja 11, joille  $\varepsilon_r'$ -arvojen vaihtelu on hyvin pieni. Kiinnostavaa on erityisesti betoniautosta otetun näytteen 7 sijoittuminen uunittamattomana tähän ryhmään.

Seuraavassa kuvassa 17.17 on esitetty  $\varepsilon_r''$ -arvojen vaihtelu näytteiden kosteuden vaihdellessa. Näiden tulosten valossa permittiivisyyden imaginääriosan muutos on suhteellisesti jopa permittiivisyyden reaali-osan muutosta suurempi, ja uunissa ollut ykkösen vesi-sementtisuhteella tehty näyte 3 käyttäytyy tässä suhteessa muista poikkeavalla tavalla, kuivan ja märän näytteen eron ollessa sillä näytteellä poikkeuksellisen suuri.

Tämän parametrin valossa uunikuivattujen näytteiden ryhmä ei enää poikkea muista yhtä selvästi kuin  $\varepsilon_r'$ -arvojen perusteella, eikä hajonnoissakaan ole näytteen 3 lisäksi suuria ryhmäkohtaisia eroja. Suurimpia  $\varepsilon_r''$ -arvoja näyttävät saavan kastuessaan vanhempia näytteitä edustavat näytteet 5 ja 13, joista näyte 5 on ollut uunikuivatuksessa. Pienimmät hajonnat kuuluvat näytteille 4, 7, 10 ja 11, jotka edustavat vesi-sementtisuhteiltaan matalampien suhteiden ryhmää.



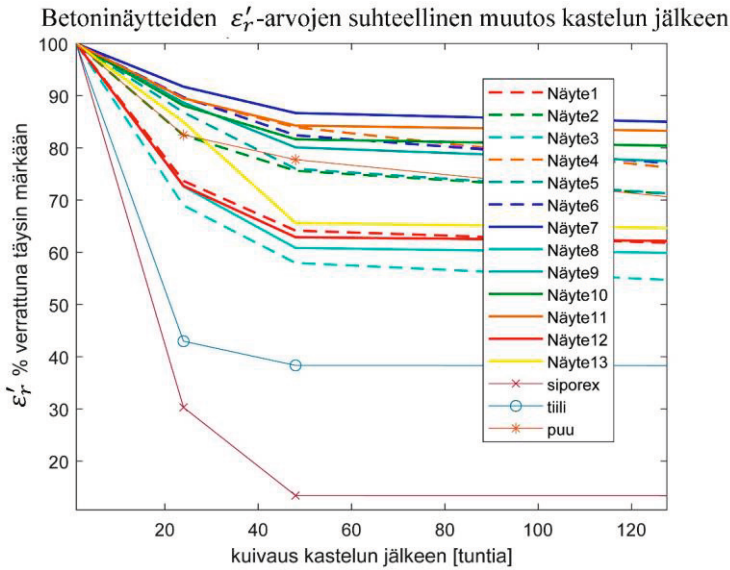
**Kuva 17.17** Betoninäytteiden  $\varepsilon_r''$ -arvojen muuttuminen kosteuden mukaan.

Edellä esitettyjen taulukon 17.2 ja kuvien 17.16 ja 17.17 valossa voidaan todeta betonien sähköisten parametrien muuttuvan huomattavasti betonirakenteen kosteuden muuttuessa. Seuraava luonnollinen kysymys koskee muutosten ajallista kestoa; miten pitkään betonisen ulkoseinän ulkokuoren voi ajatella olevan niin kostean, että se vaikuttaa oleellisesti seinän RF-vaimennukseen?

Tämän selvittämiseksi on piirretty betonin painon muutosta vastaavat kuvat koskien betoninäytteiden permittiivisyyden muutosta ajan funktiona näytteiden täydellisen kastelun jälkeen.

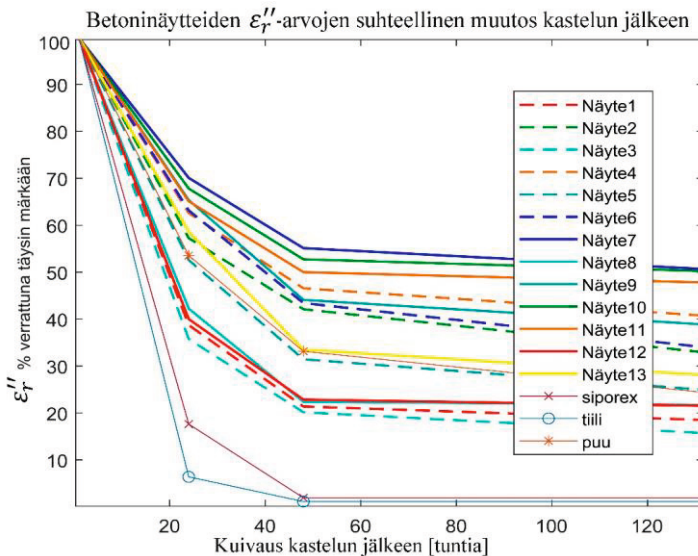
#### 17.5.4 Betoninäytteiden permittiivisyys niiden kuivussa

Seuraavissa kuvissa 17.18 ja 17.19 esitetään materiaalinäytteiden  $\varepsilon_r'$ - ja  $\varepsilon_r''$ -arvojen suhteellinen muutos, kun näytteet kuivuvat täydellisen kastelun jälkeen 5 vuorokauden ajan. Kuvassa 17.18 100 %:n arvoa vastaa täysin kastellun näytteen  $\varepsilon_r'$ -arvo, ja kuivamisen aikana tutkitaan  $\varepsilon_r'$ -arvon suhteellista muuttumista verrattuna tähän 100 %:n arvoon. Samanlainen tarkastelu tehdään kuvassa 17.19  $\varepsilon_r''$ -arvoille.



**Kuva 17.18** Betoninäytteiden  $\varepsilon_r'$ -arvojen muuttuminen näytteiden kuivaessa.

Kuvan 17.18 perusteella tiili ja siporex erottuvat joukosta muita nopeamman kuivumisen perusteella, jolloin  $\varepsilon_r'$ -arvot putoavat ensimmäisen 48 tunnin aikana huomattavan paljon, eli lähes lopulliseen arvoonsa.



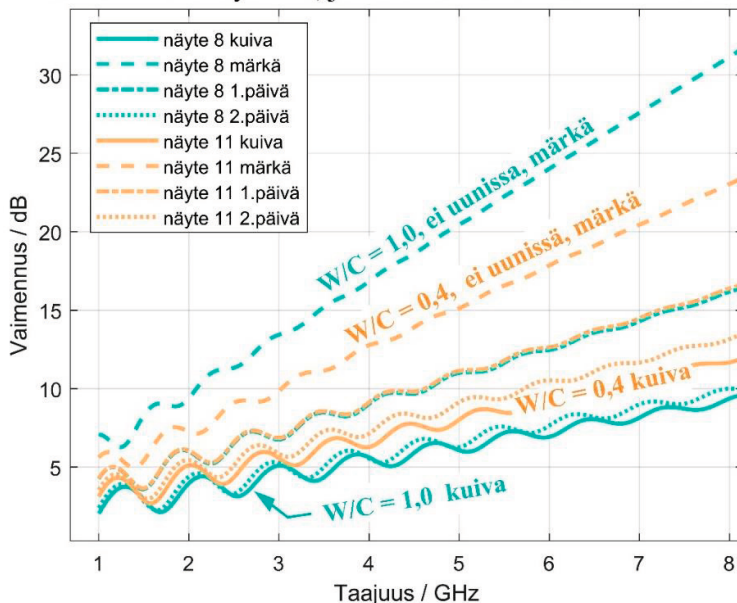
**Kuva 17.19** Betoninäytteiden  $\varepsilon_r''$ -arvojen muuttuminen näytteiden kuivaessa.

Kuvassa 17.19 tiilellä ja siporexillä on samantapainen, joskin hieman maltillisempi käyttäytyminen  $\epsilon_r$ -arvojen suhteen, mutta niiden keskinäinen järjestys on vaihtunut verrattuna kuvassa 17.18 esitettyihin  $\epsilon_r$ -arvoihin.

## 17.6 Sandwich-elementin ulkokuoren vaimennus

Seuraavassa on tarkasteltu betonielementin ulkokuoren RF-vaimennuksen käyttäytymistä kahden vesi-sementtisuhteen ääripään ja erilaisten kosteuksien avulla. Kuvassa 17.20 esiintyvä betonin vesi-sementtisuhteen lukuarvo 0,4 edustaa pienintä mahdollista käytännön tilannetta, jossa sementin, soran ja veden muodostama seos on hyvin jäykkää ja vaikeasti muokattavaa. Tällä vesi-sementtisuhteella betonista tulee tiivistä ja lujaa. Toinen ääripää on vesi-sementtisuhte 1,0, joka tuottaa hyvin juoksevaa betonimassaa. Tätä massaa on helppo valaa monimutkaisiinkin muotteihin ja se täyttää muotissa olevat kolot ja kulmat hyvin. Juoksevuus merkitsee helpon työstettävyyden ohella huokoisempaa betonia, johon jää hydratoitumisen edetessäkin runsaasti kapillaarihuokosia.

Vaimennukset näytteillä, joilla on erilainen vesi-sementtisuhte



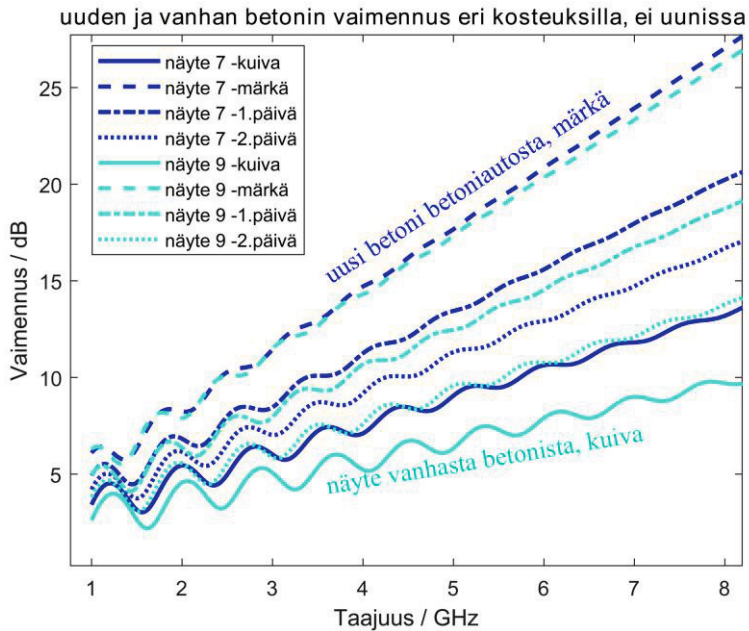
**Kuva 17.20** Vesi-sementtisuhteen vaikutus RF-vaimennukseen.

Kuvassa 17.20 on lähtökohtaisesti ajateltu sandwich-betonielementin ulkokuorta, jonka kosteus voi vaihdella rakennuksen ulkopuolella vallitsevien olosuhteiden mukaan. Kuvan taustalla on oletus 75 mm paksuisesta ulkokuoresta, jonka RF-vaimennusta tarkastellaan eri taajuuksilla. Kuvaan on piirretty vain taajuusalue 1–8 GHz mutta koska permittiivisyyden tiedetään olevan lähes vakion, voidaan kuvaajia jatkaa suuremmille taajuuksille pitämällä kulmakerroin vakiona.

Kuvassa 17.20 on neljä käyrää kummallekin kahdesta eri näytteestä eli kummallekin betonin vesi-sementtisuhteen ääripäälle. Yhtenäinen viiva kuvaa kuivan näytteen vaimennusta, katkoviiva täysin märän, ja pisteviivat yhden ja kahden päivän kuivatuksen jälkeistä tilannetta. Kumpikaan kuvassa esitetyistä näytteistä ei ollut uuni-kuivauksessa, joten niiden kuivuminen vastasi kuivan kesän normaalia kuivumista.

Kuvassa on esitetty vain tavallisen lisäaineistamattoman betonin käyttäytyminen, jolla hyvin kosteiden betoninäytteiden vaimennus nousee huomattavasti verrattuna kuivempaan betoniin. Tämä tulos on odotusten mukainen, mutta hieman yllättävää on se, että tarkasteltaessa vesi-sementtisuhteella 1,0 valmistettua näytettä, havaitaan sen vaimennuksen vaihtelevan kosteuden muuttuessa enemmän kuin pienemmän vesi-sementtisuhteen näytteellä. Tuloksena on tilanne, jossa kaikkein pienin vaimennus saavutetaan täysin kuivalla vesi-sementtisuhteen 1,0-näytteellä ja kaikkein suurin vaimennus on samalla näytteellä sen ollessa märkä. Näiden arvojen väliin jäävät kaikki pienemmällä vesi-sementtisuhteella valmistetun näytteen vaimennusarvot.

Seuraavassa kuvassa 17.21 verrataan uutta betoniantosta otettua betoninäytettä vanhaan näytteeseen, joka on sahattu yli 30 vuotta vanhasta seinäelementistä. Kuvan tulokseen tulee suhtautua varauksella, sillä luonnollisestikaan vanhan seinäelementin betonin laadusta ei enää ole käytettävissä luotettavia tietoja.

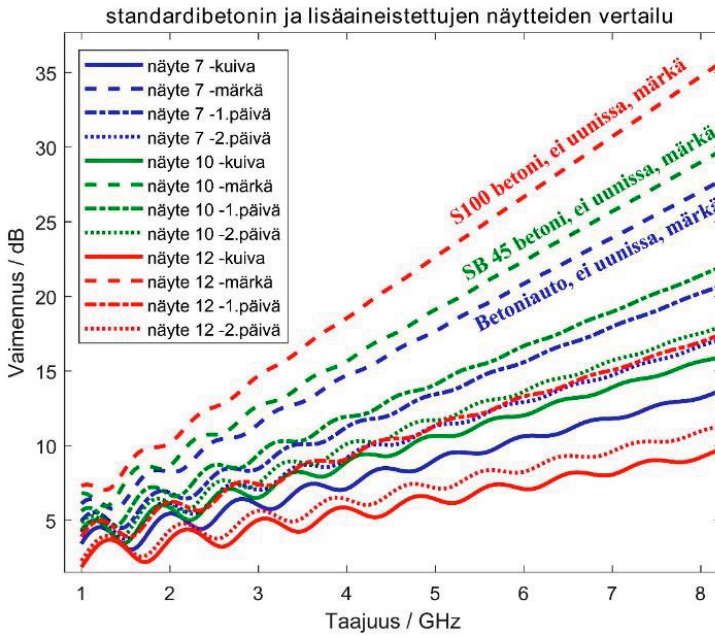


**Kuva 17.21** Uuden ja vanhan betonin vertailua 75 mm kuossa.

Kuvan mukaan hieman yllättäen molempien näytteiden vaimennus on hyvin samanlainen näytteiden ollessa täysin märkiä. Sen sijaan kuivilla näytteillä vaimennuksissa on suuruusluokaltaan noin 2 dB:n ero, tilanteessa, jossa em. betonityyppejä käytetään 75 millimetriä paksussa elementin ulkokuoressa.

Kuvassa 17.22 tutkitaan lisäaineistetusta sementistä valmistetun betonin ja perus-sementin S100 käyttäytymistä kosteuden muuttuessa. Lähtökohtana on tässäkin sandwich-elementin 75 millimetriä paksu ulkokuori, jonka kosteus vaihtelee sateen ja ilmastokosteuden vaikutuksesta. Vertailtaviksi näytteiksi on valittu näytteet 7 (joka edustaa betoniautosta otettua kaupallista betonia), näyte numero 10, (joka on 0,7 vesi-sementtisuhteella SB45-sementistä tehty näyte) ja näyte 12, joka on tehty 0,7:n vesi-sementtisuhteella perussementistä (S100).





**Kuva 17.22** Lisäaineistetun sementin vaikutus RF-vaimennuksiin.

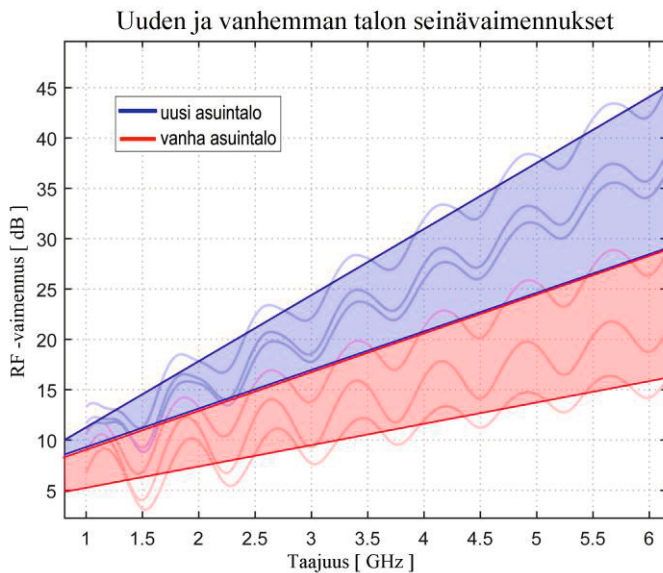
Kuva 17.22 vahvistaa kuvan 17.6 tulkinnaa, jonka mukaan näytteen numero 10  $\epsilon_r'$ -arvo on kuivana muiden näytteiden vastaavaa korkeampi. Tämä aiheuttaa suuremman perusvaimennuksen matalilla taajuuksilla. Tähän kuvaan valituilla betonityypeillä suurin  $\epsilon_r'$ -arvo on märkään S100-betoniin perustuvalla näytteellä numero 12, joka puolestaan johtaa suurempaan taajuusriippuvuuteen. Kuvan perusteella tehtävän tulkinnaa mukaan uunittamattomien S100- ja SB45-pohjaisten betonien vaimennukset nousevat voimakkaasti taajuuden kasvaessa. Kuva myös vahvistaa jo aikaisemmin mittaussuunnitelmassa mainitun oletuksen kosteiden betoninäytteiden suurimmista vaimennuksista kuiviin näytteisiin verrattuna. Huomionarvoista on, että mikään kuvassa 17.22 esitetyistä näytteistä ei ollut mukana uunissa kuivatettujen ryhmässä.

## 17.7 Yksinkertaistettu uuden ja vanhemman talon vertailu

Koko betonia koskevan tutkimuksen motivaationa on ollut tässä kirjassa todellisten seinärakenteiden RF-vaimennuksen muuttuminen viimeisten vuosikymmenien aikana. Edellä on esitetty, että seinärakenteissa käytetty betoni on saattanut olla laadultaan ja koostumukseltaan vaihtelevaa ja toisaalta kosteuden vaikutus erilaisiin

betoneihin on erilaista. Tästä syystä edellä on käsitelty erikseen sandwich-elementin sisäkuorta, jonka voidaan olettaa olevan kosteudeltaan lähes vakio, ja toisaalta ulko-kuorta, joka on alttiina sään vaikutuksille. Tässä kappaleessa yhdistetään edellä kuvattujen betonikuorien vaimennukset ja arvioidaan uusien ja vanhempien betonilattujen kokonaisvaimennusten eroja.

Seuraavassa kuvassa 17.23 arvioidaan kokonaisen sandwich-elementin vaimennusta todellisessa tilanteessa, jossa sisäkuori on lähes kuiva, 150 millimetriä paksu yhtenäinen betoninen seinälaatta, kuorien välissä on 200 millimetriä kuivaa mineraalivillaa lämmöneristeenä ja ulkokuorena on 75 millimetriä paksu seinälaatta. Kuvassa on oletettu, että ulkokuori ei ole kuiva, mutta ei ole myöskään täysin märkä. Tilanne muistuttaa loppukesän tai syksyn tilannetta, jossa seinä on sateen jälkeen pitkään kostea korkealla tasolla pysyvän ilmankosteuden vuoksi.



**Kuva 17.23** Uusien ja vanhempien asuinkerrostalojen seinien vaimennukset.

Vertailuna on sama tilanne vanhemmassa, tyypillisessä 1970-luvun talossa. Kysymyksessä on tyypillinen kirjahyllyrunkoinen lamellitalo, jossa päädyissä on 150 millimetriä paksut sisäkuoret, mutta jossa sivuseinät ovat sisäkuoreltaan vain 80 millimetriä paksuja. Tässä tapauksessa sivuseinien koko seinärakenteen paksuus koostuu 80 millimetrin sisäkuoresta, 120 millimetrin villaeristeestä ja 75 millimetrin ulkokuoresta, jonka kosteus vaihtelee.

Rakenteita ei tässä kuvassa verrattu yhtä paksuina, koska käytännön taloissa signaalit kuitenkin tulevat vanhemmissakin taloissa pääasiallisesti pienemmän vaimen-

nuksen kautta, eli rakennusten sivuseinien läpi. Uusissa taloissa ei ole säännönmu-  
kaista eroa eri ilmansuuntiin olevilla seinillä.

Kuvassa on varjostettu alue osoittamassa vaihteluväliä, jonka saa aikaan ulkokuo-  
ren kosteuden vaihtelu. Varjostetun alueen yläreuna vastaa tilannetta, jossa sisäkuori  
on kuiva ja huonelämpötilassa, mutta ulkokuori on sateen vaikutuksesta märkä. Var-  
jostetun alueen alareuna puolestaan edustaa kuumen kesän hellejaksoa, jossa sekä  
ulkokuori- että sisäkuori ovat molemmat kuivia.

Kuvan 17.23 taustalla näkyvät himmeät aaltoilevat käyrät ovat varjostettujen alu-  
eiden peruskäyrät, ja ne on laskettu soveltaen taulukon 17.3 esittämiä permittiivisyy-  
den arvoja, sekä mittauksista saatuja täysin märän ja täysin kuivan betonin raja-arvoja.  
Uuden betonin vaihteluväli perustuu betoninäytteisiin numero 7, 11 ja 13 ja vanhem-  
man vastaavasti näytteen numero 9 tuloksiin.

Uusien ja vanhempien asuinkerrostalojen vaimennuksia vertailtaessa on todet-  
tava, että vanhemmissa kerrostaloissa on usein tuloilmaa varten erityisesti keittiöissä  
rakennuksen ulkokuoren läpäisevät reiät. Niiden halkaisijat vaihtelevat ja ne voivat  
olla jopa 80 millimetrin suuruusluokkaa. Nämä aukot ovat kuitenkin yksittäisiä ja  
vaikka ne nostavat signaalitasoa paikallisesti, ei niillä ole koko asunnon kannalta  
oleellista vaikutusta.

## 17.8 Johtopäätökset betonin vaimennuksen arvioinnista

Tässä kappaleessa on esitelty tulokset mittaushankkeesta, jossa tutkittiin kaupallisesti  
saatavissa olevien eri betonilaatujen ja kosteuden muutosten vaikutusta betoniele-  
mentin RF-vaimennukseen.

Taustalla mittausten järjestelyissä oli pyrkimys todellisten seinärakenteiden vai-  
mennusten arviointiin. Tämän vuoksi tuloskuivissa keskityttiin tavallisimpiin materi-  
aaleihin ja pyrittiin löytämään kuvaukset sellaisille materiaaleille ja ympäristöille, joita  
on paljon olemassa kaupunkien asuinkerrostaloissa.

Edellä esitetyt tulokset antavat vahvistuksen olettamukselle, jonka mukaan uusien  
asuinkerrostalojen suuremmat ulkokuoren vaimennukset eivät johdu pelkästään ik-  
kunoihin tulleista selektiivipinnoitteista, vaan myös ulkoseinien vaimennukset ovat  
kasvaneet. Seinävaimennusten nousu selittyy osin nykyisten betonirakenteiden ja pe-  
rusmateriaalien tiukemmilla laatuvaatimuksilla, mutta myös rakenteiden paksuuden  
kasvamisella. Myös itse betonin ikä näyttää selittävän vaimennusten eroja.

Erytisen suuri vaikutus RF-vaimennukseen on betonin kosteudella, jota edellä  
tutkittiin kuivaamalla betoni täysin kuivaksi ja kastelemalla näytekappale sen jälkeen

täysin. Näin saatiin raja-arvot, joiden välillä todellisen betonielementin voidaan todeta olevan koko ajan. Käytännön tilanteessa ulkoseinän betonirakenne ei ilmeisesti kuivanakaan ole niin kuiva, kuin näytekappaleet olivat kuukausia kestäneen kuivaimisen jälkeen. Samoin todellinen rakenne ei käytännössä kastu molemmilta puolilta niin, että tilanne vastaisi betonipalan upottamista veteen.

Mittaustulokset kuitenkin vahvistavat betonin imevän vettä niin paljon, että sen RF-vaimennus muuttuu oleellisesti. Kysymykseksi jää vaimennuksen muutoksen ajallinen kesto, eli miten paljon betoni käytännössä syksyn jatkuvien viistosateiden aikana kastuu ja miten pitkään se pysyy märkänä. Tähän kysymykseen ei voida antaa täsmällistä vastausta, sillä vastaus riippuu useista tässä kirjassa mainituista ulkoisista tekijöistä, jotka eivät ole tämän tutkimuksen aihepiiriä. Näitä ovat ilmastonmuutos ja sen mukanaan tuomat leudommat ja sateisemmat talvet, sateen ja erityisesti viistosateen määrä, tuulien suunnat ja voimakkuudet jne. Oma osuutensa on luonnollisesti betonielementin ulkokuoren ilmansuunnalla ja pinnoitteella. Pinnoitteen kunto on oleellinen, sillä halkeillut pinnoite päästää sadeveden ulkokuoren betonipinnoitteeseen, mutta estää kosteutta poistumasta rakenteesta.

Kosteuden osalta betonin laatu näyttää osin selittävän RF-vaimennuksen muutoksen määrää rakenteen kastuessa. Erityisesti betonin valmistusvaiheessa käytetty vesi-sementtisuhde kertoo myöhemmästä veden imeytymisestä betoniin ja siten se selittää myös vaimennuksen muutoksen suuruutta. Sen vuoksi tulosten tulkinnan yhteydessä onkin syytä ottaa huomioon luvussa 11 kuvattu betonin sisäinen rakenne ja kapillaarihuokosten syntyminen hydrataatiossa.

Betonin hydrataatio selittää myös tutkimustuloksia analysoitaessa paljon pohdintaa aiheuttaneen uunikuivauksen vaikutuksen kappaleiden kosteuskäyttäytymiseen. Mitä ilmeisimmin uunissa tapahtunut kuivaus pysäytti hydrataation etenemisen, jolloin hydrataation vaatima vesi poistui näytteestä eikä prosessi jatkunut enää uunikuivauksen jälkeen.

Vertailu muihin betonin RF-vaimennusta käsitteleviin julkaisuihin on haasteellista, sillä lähteissä ei tyypillisesti mainita betonin laatua, käytettyä vesi-sementtisuhdetta, betonin ikää eikä betonin kosteutta. Suuruusluokka on kuitenkin karkeasti sama, sillä mm. ITU-R ilmoittaa julkaisussaan P2040-2 betonin suhteelliseksi permittiivisyydeksi arvoa 5,24, joka vastaa karkeasti tämän tutkimuksen kuivan betonin (W/C=1.0) arvoa 5,45. (ITU-R P.2040, 2021). Hyvin samanlaista suhteellisen permittiivisyyden arvoa, eli 5,21, ehdottaa myös Rudd kirjoittamassaan Ofcomin raportissa ”Building Materials and Propagation” (Rudd, 2014). Samassa suuruusluokassa pysytään edelleen Dalken, Hollowayn ja kumppaneiden julkaisussa ”Effects of Reinforced Concrete Structures on RF Communication” (Dalke, 2000), jossa  $\epsilon_r$ lle

käytetään arvoa 6. Tätä huomattavasti korkeampaan permittiivisyyden arvoon 9,2 on päätenyt N. Iya tutkimusryhmineen julkaisussa ”Ultrawideband through-the-wall propagation” (Iya, 2011). Tämä lukema vastaa tässä kirjassa esiteltyjen hyvin kosteiden tai märkien betoninäytteiden RF-vaimennusta. Suurin permittiivisyyden arvo löytyi Gibsonin kirjoittamasta raportista (Gibson, 1999), jossa on mitattu tarkemmin määrittelemätöntä yksittäistä talon sisällä olevaa noin 30 senttimetrin paksuista betoniseinää, ja saatu tulokseksi suhteelliselle permittiivisyydelle lukuarvo 10. Tällä suhteellisen permittiivisyyden arvolla kirjoittajat ovat todenneet mitatun seinän vaimennuksen olevan 2 GHz:n taajuudella noin 10 dB:ä.

Loppupäätelmänä voidaan todeta, että eri julkaisuissa esitettyjen suhteellisen permittiivisyyden arvojen perusteella on haasteellista suoraan arvioida tietyn seinän RF-vaimennusta. Seinän vaimennukseen vaikuttaa luonnollisesti suoraan seinän paksuus, mutta vaimennus on eri seinänpaksuuksille saatavissa laskennallisesti kappaleissa 13.6 ja 14.11 esitettyjen kaavojen avulla. Sen sijaan betonien valmistuksessa käytettyjen seossuhteiden ja lisäaineiden vaikutusta on vaikea arvioida. Myös betonin kosteudella on ratkaiseva merkitys seinien signaalivaimennukseen. Näistä syistä johtuen myös eri julkaisuissa esitettyjen permittiivisyyksien erilaiset arvot ovat ymmärrettäviä.

# 18 RAPPAUSVERKON TULOKSET

Luvussa 7 on esitelty rappauksen yleinen rakenne ja pinnoitusmenetelmän jakautuminen ohut- ja paksurappaukseen. Paksurappaus sisältää tavallisesti kuuma-sinkitystä tai galvanoidusta 1 millimetrin paksuisesta rautalangasta kootun verkon, jonka silmäkoko on noin 19 millimetriä. Silmäkoko ja langan paksuus voivat jonkin verran vaihdella, sillä verkkoa käytettäessä rappauksen tukemiseen tuotteiden mittatarkkuuden mahdolliset pienet vaihtelut eivät vaikuta metalliverkkojen rakennusfysikaaliseen toimintaan.

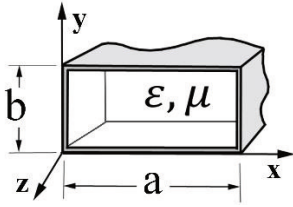
Rappausverkko kuitenkin vaikuttaa radiosignaalien etenemiseen oleellisesti, ja sen vuoksi sekä verkon että rappauksessa käytetyn laastin signaalivaimennusta tutkitaan seuraavassa sekä teoreettisesti että käytännön mittausten avulla.

Seuraavassa ei käsitellä betonielementin kuorien sisällä olevaan betoniraudoituksen vaimennusta, sillä betoniraudoituksen silmäkoko on huomattavasti rappausverkon silmäkokoa suurempi, noin 100 millimetrin suuruusluokkaa, joten se ei oleellisesti vaikuta matkapuhelinverkkojen käyttämien taajuuksien vaimennukseen. Betoniraudoituksen merkityksettömän pieni vaikutus betonirakenteen signaalivaimennukseen on todettu muun muassa jo 1997 julkaistussa NIST:n raportissa (Stone, 1997).

## 18.1 Aaltoputkiin perustuva verkkomaisen rakenteen analyysi

Rappausverkon aiheuttaman radiotaajuisien signaalien vaimennuksen teoreettiseen tarkasteluun on olemassa erilaisia lähestymistapoja, ja yksinkertaisinta on aloittaa verkon vaikutuksen arviointi kuvaamalla rappausverkkoa sarjana aaltoputkia. Tässä mallissa aaltoputket muodostavat matriisimaisen kuvion, ja Floquet'n periaatetta soveltaen voidaan koko rappausverkon tarkastelu supistaa yhden rappausverkon silmän muodostaman yksikkösolun arviointiin. (Dewani ym., 2018; Itoh, 2005.) Aaltoputken käyttäytymiseen perustuva arvio on hyvin karkeassa arvioinnissa käyttökelpoinen, sillä sähkömagneettisen  $TE_{10}$ -perusaaltomuodon etenemistä kuvaavaan matemaattiseen käsittelyyn vaaditaan vain muutama hyvin yksinkertainen

kaava. Pelkistetyimmillään aaltoputken laskenta perustuu vain aaltoputken fyysisiin mittoihin ja signaalin etenemisnopeuteen seuraavasti:



**Kuva 18.1** Aaltoputken fyysiset mitat.

Aaltoputkessa etenevälle signaalille voidaan laskea etenemisvakio seuraavasti (Cheng, 1993; Pozar, 2012):

$$\gamma = j\beta = j\sqrt{k^2 - k_c^2} = j\sqrt{\omega^2\mu\varepsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (18.1)$$

jossa  $k_c$  on katkوتاajuuden aaltoluku ja  $k^2$  määritellään seuraavasti

$$k^2 = (\omega\sqrt{\mu\varepsilon})^2 = \omega^2\mu\varepsilon, \text{ ja} \quad (18.2)$$

$$k_c = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (18.3)$$

Etenemisvakion vaihekerroin  $\beta$  määritellään (Pozar, 2012)

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (18.4)$$

jossa  $m, n$  ovat kokonaislukuja  $0, 1, 2, \dots$  ja  $a$  ja  $b$  kuvaavat aaltoputken fyysisiä mittoja kuvan 18.1 mukaisesti. Kokonaisluvut  $m$  ja  $n$  määrittelevät aaltoputkessa etenevän aaltomuodon, ja niihin viitataan merkinnällä  $TE_{mn}$ . Merkinnässä  $m$ :lle ja  $n$ :lle mahdolliset arvot alkavat nolasta ja jatkuvat mielivaltaisina kokonaislukuina, mutta molemmat eivät voi olla yhtä aikaa nollia. (Pozar, 2012.)

Jokaisella etenemismuodolla on omat katkوتاajuutensa, jotka saadaan laskettua sijoittamalla  $m$ :lle ja  $n$ :lle erilaisia arvoja. Katkوتاajuudet kullekin muodolle saadaan kaavasta (Pozar, 2012):

$$f_{c_{m,n}} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (18.5)$$

Kun rajoitetaan tarkastelu alimpaan mahdolliseen etenemismuotoon, eli TE<sub>10</sub> –muotoon, jossa  $m=1$  ja  $n=0$ , saadaan kaavaa yksinkertaistettua seuraavasti:

$$f_{c_{TE_{10}}} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (18.6)$$

Tämä etenemismuoto on yleensä hallitseva ja tarkastelut useimmiten kohdistuvat siihen. Sen vuoksi sitä kutsutaankin dominant-muodoksi. Tavallisimmin aaltoputken sisällä oleva täyteaine on ilmaa, jolloin sekä  $\epsilon_r$ - että  $\mu_r$ -arvot ovat molemmat ykkösiä, ja kaava yksinkertaistuu edelleen muotoon

$$f_{c_{TE_{10}}} = \frac{c}{2a}. \quad (18.7)$$

Yleisesti kuitenkin rakennusmateriaalien tapauksissa nyt tarkasteltavat verkkomaiset tai putkimaiset rakenteet ovat jonkin materiaalin, esim muurauslaati- tai betonikerroksen sisällä. Rappauksessa käytettävien verkkojen tarkoituksena on varsinaisen materiaalin tukeminen, ja silloin on otettava huomioon verkon silmää täyttävän materiaalin oma permittiivisyys. Täyteaineen vaikutus perustuu aaltoputken tapauksessa putken sisällä olevien kenttien etenemisen muuttumiseen, sillä esimerkiksi signaalin nopeus muuttuu materiaalin sähkömagneettisten ominaisuuksien muuttuessa.

Täyteaine ei rakennusmateriaalienkaan tapauksessa tavallisesti ole magneettista tai edes hyvin johtavaa, joten lähtökohtaisesti voidaan olettaa että  $\mu_r = 1$ . Permittiivisyyden ollessa muuta kuin ilmaa, voidaan tasomaisen signaalin nopeus ( $v$ ) laskea kaavasta (Pozar, 2012):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (18.8)$$

Rajataajuuden kaavassakin on otettava huomioon täyteaineen ja muuttuneen nopeuden vaikutus korvaamalla signaalin nopeutta tyhjiössä kuvaava termi ( $c$ ) muuttuneella nopeudella ( $v$ ).

$$f_{c_{m,n}} = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (18.9)$$



Permittiivisyyden muutos aiheuttaa rajataajuuden muutoksen TE<sub>10</sub>-muodolle, jolloin tavallisesti kaavassa käytettävä valon nopeus korvautuu täyteaineen nopeuskertoimella, eli (Räisänen & Lehto, 1996):

$$f_{cTE10} = \frac{v}{2a}, \quad (18.10)$$

jolloin muulla kuin ilmalla täytetylle aaltoputkelle vaihekertoimeksi ja aaltoimpedanssiksi saadaan

$$\beta = \frac{\omega}{v} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \text{ ja} \quad (18.11)$$

$$Z_{TE} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (18.12)$$

Impedanssin arvo on merkittävä, sillä laskettaessa koko rakenteen läpi kulkevaa signaalia, on otettava huomioon eri rajapintojen heijastukset. Impedanssin perusteella on mahdollista ainakin karkeasti arvioida miten verkko näkyy täyttemateriaalin sisällä olevana rajapintana. Esimerkiksi rappauksen keskellä oleva aaltoputken perustuva malli kuvaa verkon heijastuskertoimen rappauksen sisällä perusmoodissa 1,0 etenevälle aallolle seuraavasti:

$$\rho = \frac{\frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} - \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}}{\frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} + \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}}, \quad (18.13)$$

joten esimerkiksi rappauksen sisällä olevan verkon tarkastelu tulee jakaa kahteen erilliseen osaan; verkon etupinnassa tapahtuvaan heijastukseen ja verkon läpi etenevään signaaliin. Verkon läpi mennyttä signaalin osaa käsitellään etenemiskertoimella

$$\gamma = \sqrt{\left(\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon\right)}, \quad (18.14)$$

joka kertoo, miten paljon signaali vaimenee kulkiessaan aallonpituusyksikön matkan verkon muodostamassa aaltoputkessa. Luonnollisesti tällä aaltoputken teoriaan

perustuvalla tarkastelulla verkon läpäisseen signaalin osan vaimennus on pieni, sillä verkon paksuus tai pituus on hyvin pieni verrattuna matkapuhelinverkossa käytettäviin aallonpituuksiin.

Verkon vaimennuksen kuvaaminen vierekkäisiin aaltoputkiin perustuvalla mallilla on ongelmallista, sillä koska verkkomainen rakenne on paksuudeltaan hyvin pieni, eivät kentät muodostu sivuseininä pidettävien metallilankojen väliin samalla tavoin kuin normaaleissa aaltoputkissa tapahtuu. Tämä virhelähde on niin suuri, että aaltoputkimalli soveltuukin vain katkottaajuuksien ja verkkomaisen rakenteen yleisen käyttäytymisen karkeaan arviointiin.

Tavoiteltaessa tarkempaa analyysiä rappauksessa käytetyn verkon RF-vaimennukselle, on tukeuduttava erityisesti verkkojen kuvaamiseen kehitettyihin teorioihin. Näiden teorioiden käsittelyssä käytetty laskenta ei enää ole monimutkaisuutensa vuoksi verrattavissa aaltoputkiin perustuvaan yksinkertaiseen kuvaukseen, joten kummallekin tavalle on omat perustelunsa.

## 18.2 Verkkomaisen rakenteen admittansseihin perustuva analyysi

Verkkomaisen rakenteen sähköisestä käyttäytymisestä on tehty jonkin verran tutkimusta, ja niiden yleisin näkökulma on ollut jonkin eristemateriaalin päälle asennetun verkkomaisen tason tai elektroniikan suojaukseen tarkoitetun verkon ominaisuuksien teoreettinen tarkastelu. (Chao-Chun Chen, 1973; Kohin, Wein, Traylor, Chase, & Chapman, 1993; Qiu et al., 2018.) Verkkomaisen tason käyttö on lisääntynyt erityisesti lasin päälle tehtävien ohuiden kalvojen yhteydessä, sillä hyvällä suunnittelulla ja tarkalla valmistustekniikalla on mahdollista tehdä esim. ikkunapinnoille erilaisia suotimia. Yhteistä näille on kuitenkin se, että kalvojen ja verkkojen paksuus on hyvin pieni.

Seuraavassa tarkastellaan kolmea eri lähteissä esiteltyä teoreettista tarkastelua, joiden taustalla on sähköiseen siirtolinjateoriaan perustuva tarkastelutapa. Niissä kuvataan verkkomaista rakennetta siirtojohtomallin avulla, jossa verkko muodostaa siirtojohtolle rinnakkain kytketyn admittanssin. Siirtojohtomallista saadaan etenemiskertoimelle arvo (Lee, S., Zarrillo, & Law, 1982):

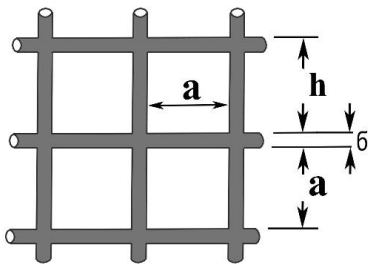
$$T = \frac{1}{1+Y_{ind}}, \quad (18.15)$$

jossa  $Y_{ind}$  :lla korostetaan verkon induktiivista luonnetta. Koska tässäkin oletetaan energian säilyvän, eli alkuperäisen signaalin jakautuvan vain heijastuvaan ja etenevään signaalin osaan, voidaan merkitä oletuksena

$$|T|^2 + |R|^2 = 1. \quad (18.16)$$

Floquet'n periaatteen mukaan samanlaisina toistuvia rakenteita voidaan tarkastella yhteen perusrakenteeseen tai solualkioon perustuen, jonka lisäksi laskennassa otetaan huomioon eri solujen väliset etäisyydet ja solujen johtavien elementtien kenttien kautta tapahtuva vaikutus toisiinsa. Näiden vaikutusten huomioiminen johtaa hyvin suureen joukkoon lineaarisia funktioita, joilla kuvataan jokaisen yksittäisen johdinalkion vaikutusta kokonaiskenttien muodostumiseen. Käytännössä kuitenkin riittää laskentatarkkuus, jossa otetaan mukaan riittävä määrä eniten vaikuttavia tekijöitä ja suoritetaan laskenta numeerisesti likiarvokaavoja käyttäen.

Verkon vaimennuksen laskennassa on kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteen fyysisten mittojen yksilöintiin kaavoissa, sillä eri lähteissä käytetään erilaisia merkintöjä. Tässä tutkimuksessa verkon mittoja käsitellään alla olevan kuvan 18.2 mukaisesti. Siinä  $a$  edustaa verkon silmäkokoa niin, että lukuarvo vastaa kahden langan välistä etäisyyttä. Mitta  $h$  edustaa toistuvan rakenteen kokoa, joka sisältää  $a$ :n lisäksi toisen sivun langan paksuuden  $\delta$ .



**Kuva 18.2** Laskennassa esiintyvät verkon mitat.

Seuraavassa metalliverkon ominaisuuksia lähestytään siirtolinja-analogian kautta korvaamalla suuret lineaaristen yhtälöiden määrät numeerisella likiarvokaavalla. Silloin saadaan admittanssille seuraava kaava (Lee, S. et al., 1982):

$$Y_{ind} \approx (-j) \left( \beta - \frac{1}{\beta} \right) \frac{\left[ \left( \frac{h}{a} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2 \right]}{\ln \csc \left( \frac{\pi \delta}{2h} \right)}, \quad (18.17)$$

jossa apumuuttujina ovat seuraavat:

$$\csc(x) = \frac{1}{\sin(x)}, \text{ ja} \quad (18.18)$$

$$\beta = \left(1 - 0.41 \frac{((h-a)/2)}{h}\right) / \left(\frac{h}{\lambda}\right). \quad (18.19)$$

Hyvin samanlaista käsittelyä on käytetty myös Ulrichin aikaisemmin julkaisemassa kuvauksessa, jossa kaava on yksinkertaisempi, mutta lopputulos lähes yhtä tarkka kuin edellä esitettyssä Leen, Zarrillon ja Lawn julkaisussa (Ulrich, 1967):

$$Y_{ind} \approx (-j) \left(\beta - \frac{1}{\beta}\right) \frac{1}{\ln \csc\left(\frac{\pi \delta}{2h}\right)}, \quad (18.20)$$

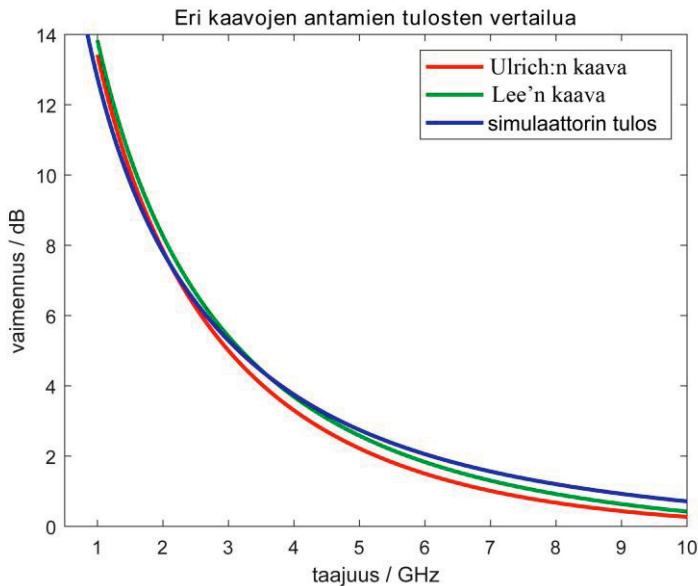
$$\text{missä } \beta = \left(1 - 0.27 \frac{((h-a)/2)}{h}\right) / \left(\frac{h}{\lambda}\right).$$

Omalla tahollaan verkon vaimennusta on tutkinut Chen, joka esittää admittanssille hieman monimutkaisempaa likiarvokaavaa (18.21) (Chao-Chun Chen, 1973):

$$Y_{ind} \approx (-j) 2 \sqrt{\left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 - 1} \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi a}{h}\right)}{1 - \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \right]^2 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 - 1}} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{h}\right)}{\left(\frac{\pi a}{h}\right)} \right]^2$$

$$+ \left[ \sqrt{2 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 - 1} - \frac{1}{\sqrt{2 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 - 1}} \right] \cdot \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi a}{h}\right)}{1 - \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \right]^2 \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{h}\right)}{\left(\frac{\pi a}{h}\right)} \right]^2. \quad (18.21)$$

Eri kaavojen antamia laskennallisia vaimennustuloksia 19 millimetrin silmäkoolla olevalle verkolle on verrattu seuraavassa kuvassa 18.3. Kuvaajat on saatu sijoittamalla matlab-ohjelmistoon verkon fyysiset mitat ja taajuudet ja vertaamalla niistä saatavia käyriä simulaattorista saatavaan kuvaajaan. Kuvan perusteella voidaan todeta, että käyrät kulkevat varsin samalla tavoin, ja Ansys:n HFSS-simulaattorilla (Ansys, 2021) saadut tulokset tukevat kaavojen paikkansapitävyyttä.



**Kuva 18.3** Eri kaavojen antamien tulosten vertailu verkon vaimennukselle.

Kuvasta 18.3 nähdään paitsi eri laskentamallien antamat tulokset rappausverkon vaimennukselle, myös kokonaiskuva verkkomaisen rakenteen käyttäytymisestä eri taajuuksilla. Huomio kiinnittyy erityisesti siihen tosiasiaan, että rappausverkko näyttää vaimentavan erityisesti matalia taajuuksia, ja että vaimennus vielä 2 GHz:n taajuuksilla on merkittävä, noin 8 dB:n suuruusluokkaa. Edellä esitettyjen kaavojen käytössä tulee huomioida aallonpituus, joka muuttuu verkkomaisen rakenteen sisältäessä johtimien ympärillä ilman sijaan rappauslaastia.

### 18.3 Ulkoseinärappauksen kokonaisvaimennus

Seuraavassa esitettävät tulokset jakaantuvat rappauslaastin aiheuttamaan vaimennukseen ja erikseen rappausverkon vaikutukseen matkaviestinverkkojen käyttämillä taajuuksilla. Tämän jälkeen kummankin osan vaimennukset yhdistetään ja arvioidaan verkon sisältävän rappauskerroksen kokonaisvaimennusta erilaisissa kosteusolosuhteissa. Lopuksi arvioidaan kuinka paljon ulkoseinäremontti vaikuttaa eri taajuuksilla toimivien verkkoteknologioiden toimintaan. Tämä tehdään vertaamalla ulkoseinien laskettuja RF-vaimennuksia ennen remonttia olleella seinärakenteella ja ulkoseinäremontin yhteydessä rapatulla seinällä.

### 18.3.1 Rappauslaastien kosteuden arvionti

Ulkoseinän rappauksessa käytetään kahta kappaleessa 7 tarkemmin kuvattua perusmenetelmää, ohutrappaus ja paksurappaus. Tämän väitöstutkimuksen kannalta ehdottomasti kiinnostavampi on paksurappaus, sillä siihen sisällytetään ainakin ulkoseinäremonttien yhteydessä lähes poikkeuksetta metallinen rappausverkko. Tämän vuoksi tutkittaviksi rappauslaasteiksi valittiin kaksi eri valmistajan paksurappaukseen tarkoitettua laastia ja yksi ohutrappauksen laasti.

Rappauslaastien tutkimusta varten valmistettujen näytteiden paksuus vaihteli välillä 19–31 millimetriä. Laastin valmistuksen jälkeen laastinäytteet kuivattiin 6 kuukautta ennen mittauksia laastinäytteiden täydellisen kuivumisen varmistamiseksi. Kappaleiden leveydet ja korkeudet olivat 150 x 150 millimetriä.

Näytekappaleiden kuukausien kuivatuksen jälkeen tehdyissä ensimmäisissä mittauksissa mitattiin näytteiden painot ja S-parametrit kappaleessa 14.12 kuvatulla fokusoiviin antenneihin perustuvalla menetelmällä. Näin saatiin vertailuarvoina käytettävät, täysin kuivia laasteja kuvaavat arvot. Sen jälkeen näytteet kasteltiin upottamalla ne veteen. Vedestä nostamisen jälkeen näytekappaleet punnittiin uudelleen ja toistettiin S-parametrien mittaukset. Täysin märkien kappaleiden mittausten jälkeen näytteiden annettiin kuivua 24 tuntia kuivassa huoneilmassa ja toistettiin vielä kerran punnitukset ja mittaukset. Näihin 24 tunnin kuivauksen jälkeen saatuihin tuloksiin viitataan seuraavissa taulukoissa ja kuvissa merkinnällä ”kosteaa”.

Punnituksilla pyrittiin luonnollisesti arvioimaan todellisessa seinässä olevan laastikerroksen kosteuden vaihtelua, mutta tähän arvioon liittyy epävarmuustekijöitä. Keskipitkinä pitkinä hellejaksona rappaus todennäköisesti kuivuu täysin, mutta on epäselvää voiko koko rappaus kastua täydellisesti edes syksyn pitkien sadejaksojen aikana. Tähän luonnollisesti vaikuttaa todellisen rapatun seinän ilmansuunta, viistosateen määrä, rappauksen mahdollinen pinnoite, talon kerrosten lukumäärä ja räystäiden pituus.

Edellä kuvatulla mittausmenetelmällä on kuitenkin oikeutuksena, sillä mittaamalla näytteiden parametrejä ensin täysin kuivana ja sitten veteen upottamisen jälkeen, saadaan vaihteluvälin ääripäät. Näiden mittausten voidaan todeta käytännön rappauskerroksen ominaisuuksien sijoittuvan tälle välille. Todennäköisesti seuraavissa taulukoissa 81.1 ja 18.2 esitettävät 24-tunnin kuivausta vastaavat ”kosteat” arvot kuvaavat parhaiten normaaliolosuhteissa olevien laastikerrosten vaimennuksia.

Seuraavassa taulukossa 18.1 on esitetty näytekappaleiden havaitut painojen muutokset täydellisen kastelun ja sen jälkeen tapahtuneen kuivaamisen yhteydessä.

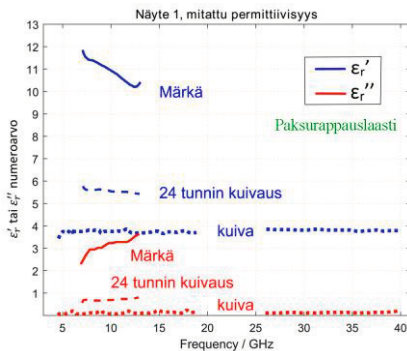
Näytteet on valittu niin, että näytteet 1 ja 3 edustavat paksurappauksen kaupallisia rappauslaasteja ja näyte 2 edustaa ohutrappauksessa käytettävää laastityyppiä.

<b>Taulukko 18.1</b> Rappausmateriaalien painon muutokset materiaalin kastuessa.						
materiaali	kuiva	märkä	kosteaa	kuiva-märkä	kuiva-kosteaa	paksuus
	paino (g)	paino(g)	paino (g)	ero-Δ%	ero-Δ%	mm
näyte 1	1041	1157	1074	11,14 %	3,17 %	26
näyte 2	1284	1476	1384	14,95 %	7,79 %	31
näyte 3	614	707	631	15,15 %	2,77 %	19

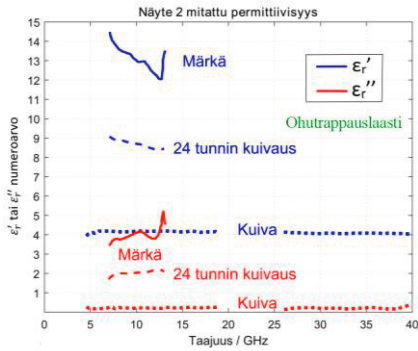
Taulukossa 18.1 esitettyjen kuiva-märkä-erojen perusteella on helposti nähtävissä, että rappauslaastit imevät paljon vettä verrattuna esim. betoniin, jonka painon nousu täydellisessä kastelussa on noin 8 % luokkaa silloinkin, kun vesi-sementtiuhde on 1. (Luku 17). Rappauslaastin paino sen sijaan näyttää nousevan noin 15 %.

### 18.3.2 Rappauslaastien permittiivisyys

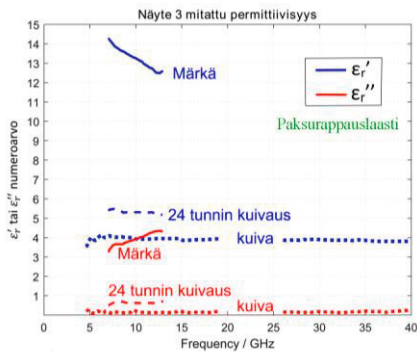
Laastinäytteille mitattiin kappaleessa 14.12 kuvatulla fokuoiviin antenneihin ja piiri-analysaattoriin perustuvalla menetelmällä S-parametrit, joiden tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa 18.4–18.6.



**Kuva 18.4** Näytteen 1 permittiivisyyden arvot.



**Kuva 18.5** Näytteen 2 permittiivisyyden arvot.



**Kuva 18.6** Näytteen 3 permittiivisyyden arvot.

Mitatuista S-parametreista lasketut  $\epsilon_r$ -arvot on esitetty kootusti seuraavassa taulukossa 18.2, jossa numeroarvot edustavat vain matalamman taajuusalueen, eli 4,5 GHz–19 GHz:n keskiarvoja. Kahdella taajuusalueella, 4,5 GHz–19 GHz ja 26–40 GHz, on mitattu ainoastaan kuivien laastien parametreit, sillä hyvin huokoisen ja melko ohuen näytteen mittausten aikana tapahtuva kuivuminen aiheuttaa merkittävää virhettä kosteilla näytteillä. Tämä virhelähde koskee erityisesti korkeammilla taajuuksilla tehtäviä mittauksia. Yhdellä taajuusalueella tehty mittaus kesti ajallisesti noin 15 minuuttia, jonka aikana märkä kappale ehti valuttaa pois ainakin pintakosteutta. Tästä virhelähteestä johtuen, täysin märän kappaleen mittaustuloksiin tulee suhtautua varauksella, ja jatkossa esitettävissä simulaatioissa keskitytään lähinnä kuiviin ja kosteisiin näytteisiin.

Permittiivisyyden arvojen tulkinnassa on muistettava, että kosteus on aiheutettu kastelemalla näytteet pitkällisen kuivaamisen jälkeen, eli kosteus ei ole varsinaisen

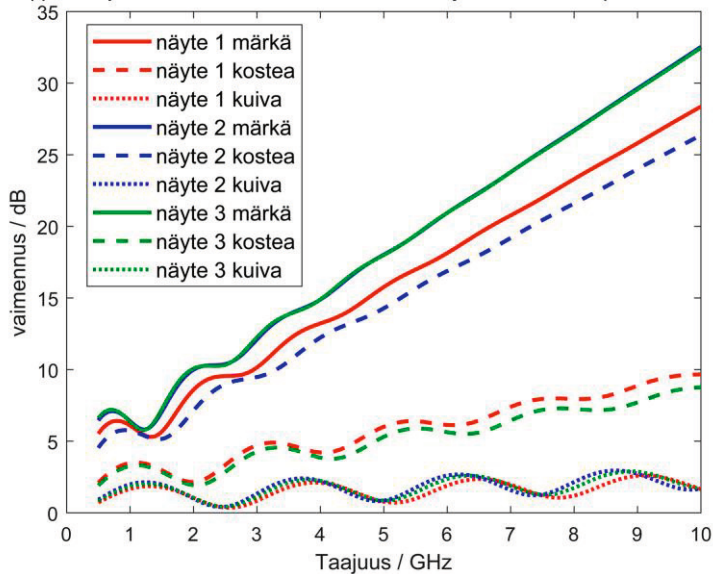


rappauksen työvaiheen kosteutta. Seuraavassa taulukossa 18.2 on esitetty myös rappaustaalainäytteiden  $\epsilon_r$ -arvoista lasketut  $\tan \delta$ -arvot.

näyte	$\epsilon_r'$ märkä	$\epsilon_r''$ märkä	$\tan \delta$ märkä	$\epsilon_r'$ kosteaa	$\epsilon_r''$ kosteaa	$\tan \delta$ kosteaa	$\epsilon_r'$ kuiva	$\epsilon_r''$ kuiva	$\tan \delta$ kuiva
näyte 1	10,9	3,1	0,3	5,54	0,7	0,1	3,7	0,08	0,02
näyte 2	13,1	3,9	0,3	8,6	2,6	0,2	4,1	0,1	0,03
näyte 3	13,3	3,9	0,3	5,3	0,6	0,1	3,9	0,1	0,03

Kuvassa 18.7 on esitetty rappaustaalain RF-vaimennukset kosteyden vaihdellessa. Tässä kuvassa vertailun helpottamiseksi kaikki näytteet on skaalattu 30 millimetrin paksuisiksi.

Rappausnäytteiden vaimennus kuivana, kosteana ja märkänä, kun paksuus 30 mm



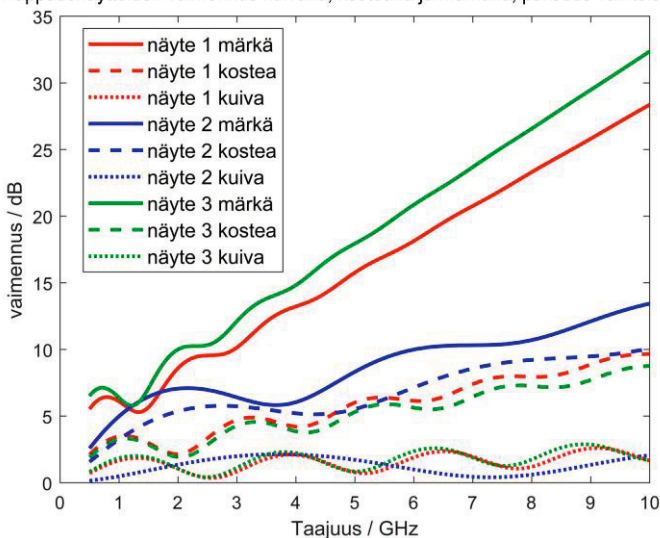
**Kuva 18.7** Laastinäytteiden vaimennukset, kun näytteiden paksuudet olivat 30 mm.

Kuvassa 18.7 esitetyt rappauserosten RF-vaimennuksia kuvaavat käyrät kulkevat odotetusti, joten märkien laastinäytteiden vaimennukset kasvavat nopeasti taajuuden funktiona. Kuivilla näytteillä vaimennus on noin 2 dB:ä koko mitatulla 4,5–19 GHz:n taajuusalueella. Tässä suhteessa ohutarappauksen ja paksurappauksen ominaisuudet eivät oleellisesti eroa toisistaan. Kuvassa märkien näytteiden 2 ja 3 käyrät kulkevat lähes päällekkäin, joka on nähtävissä myös taulukon 18.2 arvoista. Yllättävä havainto

oli, että ohutrappauksen laastin kuivuminen näyttäisi olevan paljon hitaampaa kuin paksussa rappauksessa käytettävän. Tämä on ehkä selitettävissä rappausmateriaalin oman huokosrakenteen erolla. Vaimennuskäyrien käyttäytymistä tukevat myös näytteiden painojen muutokset, jotka vahvistavat käsitystä ohutrappauksen veden hitaammasta poistumisesta.

Koska käytännössä ohutrappaus on materiaalipaksuudeltaan vain noin kolmasosa paksurappauksen kokonaispaksuudesta, on se otettava huomioon myös seinärakenteen todellista vaimennusta arvioitaessa. Tämän vuoksi seuraavassa kuvassa on esitetty vaimennukset eri rappausstyypeille niiden todellisissa rakennuskohteissa käytettävillä tyypillisillä paksuuksilla. Kuvissa esitetyissä tuloksissa ainepaksuuksina on ohutrappauksessa käytetty 10 millimetriä (näyte 2) ja paksurappauksessa 30 millimetriä (näytteet 1 ja 3).

Rappausnäytteiden vaimennus kuivana, kosteana ja märkänä, paksuus vaihtelee



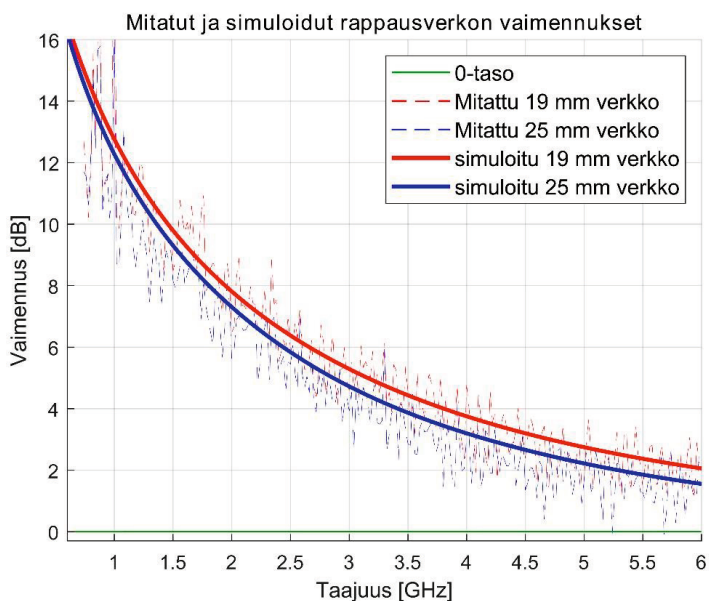
**Kuva 18.8** Laastinäytteiden vaimennukset, kun laastikerrosten paksuudet olivat paksurappauksella 30 mm ja ohutrappauksella 10 mm.

Kuvasta 18.8 havaitaan, että ohutrappauksen vaimennus ei eroa kovinkaan paljon sen ollessa täysin märkä tai hieman kuivanut. Sen sijaan paksurappauksella märkä rappauspinta vaimentaa merkittävästi enemmän RF-signaaleita kuin vuorokauden ajan kuivanut materiaalikerros.

Tilanne muuttuu oleellisesti kun paksurappauksen kokonaisvaimennukseen otetaan mukaan rappausverkon vaimennus.

### 18.3.3 Rappausverkon vaimennus

Seuraavassa kuvassa 18.9 on esitetty 19 ja 25 millimetrin silmäkoolla olevien rappausverkkojen vaimennus laboratoriomittausten ja HFSS:llä tehtyjen simuloitien tuloksena. Esimerkkeinä käytettyjen verkkojen silmien muoto on neliömäinen ja raudan johtavuudelle on käytetty arvoa  $1,0 \times 10^7$  (S/m). (Engineering Toolbox, 2003.) Verkon langan paksuus on 1 millimetriä.

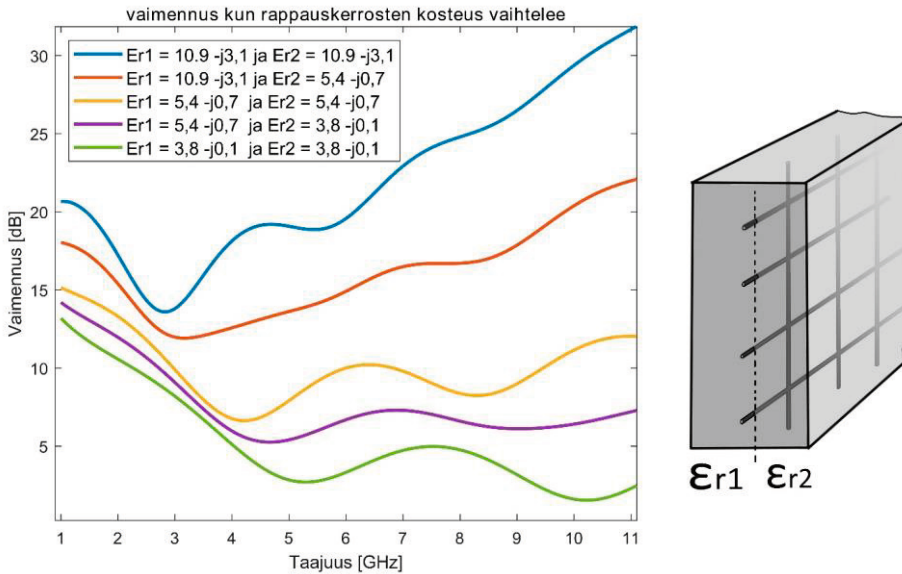


**Kuva 18.9** Eri silmäkoolla olevien rappausverkkojen simuloitit ja mitatut vaimennukset. (Asp, Hujanen, Huhtinen, Pikkuvirta, & Valkama, 2020 muokattu)

Kuvan 18.9 perusteella nähdään, että simuloinnit ja mittaustulokset vastaavat hyvin toisiaan. Rappausverkon vaimennus näyttää käyttäytyvän teorian viitoittamalla tavalla, jolle on luonteenomaista suuri vaimennus erityisesti matkaviestinverkkojen matalammilla taajuuksilla. Seuraavassa tarkastelussa yhdistetään edellä esitetyt rappauksen ja rappausverkon vaimennukset kuvaamaan koko rappauskerroksen vaimennuksia.

### 18.3.4 Rappauslaasti ja verkko yhdessä

Käytännössä rappauskerrokset tehdään useammassa työvaiheessa ja näin syntyneiden kerrosten laatu ja myös ominaisuudet voivat olla erilaiset. Arvioitaessa rappausverkon ja laastikerrosten yhteisvaimennusta RF-signaaleille, on seuraavassa kuvassa rappauskerros jaettu kahteen osaan. Oletuksena on, että päällekkäisillä rappauskerroksilla voi olla erilainen kosteustaso, ja kerrosten välissä on 19 millimetrin rappausverkko. Seuraavassa kuvassa 18.10 esitetään laastikerrosten ja verkon yhteisvaimennus, kun rappauslaastin kosteus vaihtelee märän ja kuivan välillä. Kummallekin kerrokselle on määritelty omat kosteuden mukaan määräytyvät  $\epsilon_r$ -arvonsa.

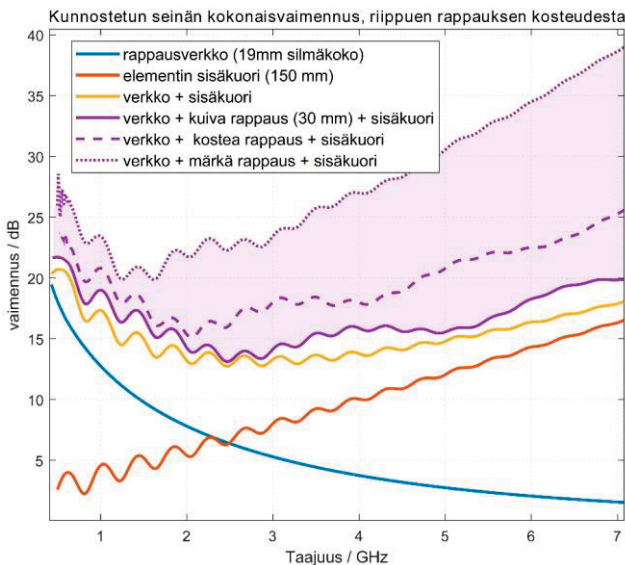


**Kuva 18.10** Rappauskerroksen vaimennus, kun rappauksen eri osien kosteus vaihtelee.

Kuvasta 18.10 nähdään selvästi, että nykyisillä matkapuhelinverkkojen taajuuksilla rappausverkko määrää karkeasti arvioiden rappauskerroksen aiheuttaman signaalien kokonaisvaimennuksen tason. Rappauslaastin vaikutus tulee näkyviin vasta 5G-verkkojen ensimmäisen vaiheen taajuuksilla. Kuvassa näkyvä kuvaajien aaltoilu on seurausta rappauksen erilaisista rajapintojen heijastuksista, ja niiden arvot riippuvat materiaalien kosteudesta.

Edellisessä kuvassa 18.10 tarkasteltiin pelkän rappauksen vaimennuksen muuttamista rappauskerrosten kosteuden vaihdellessa. Käytännön tilanteita arvioitaessa on kuitenkin yleensä kiinnostavaa tietää, millaiseksi koko seinän vaimennus muodostuu

ulkoseinän peruskorjauksen jälkeen. Seuraava kuva pyrkii valaisemaan koko seinän vaimennuksen hajontaa silloin, kun seinän ulkopinnalla olevan rappauskerroksen kosteus vaihtelee. Tässä esimerkissä seinä pohjautuu 150 millimetrin kuivaan sisäkuoreen, jonka oletetaan olevan vanha ja kauttaaltaan kuiva. Luvussa 17 esiteltyjen mittaustulosten valossa sisäkuoren betonin permittiivisyyden arvoksi on oletettu 5,9–j0,3, joka vastaa tyypillisen vanhan kuivan betonin arvoa taulukossa 17.1. Sen vaimennus on esitetty kuvassa 18.11 punaisella viivalla. Kun sisäkuoren vaimennukseen summataan (sinisellä kuvattu) rappausverkon aiheuttama vaimennus, saadaan niiden yhteisvaimennukseksi keltaisella esitetty kuvaaja. Rappausverkko on tässä oletettu 19 mm silmäkoolla ja 1 mm langanpaksuudella olevaksi ns. tavalliseksi rappausverkoksi. Violetti alue kattaa edellä mainitut vaimennukset niin, että niiden lisäksi tutkitaan eri kosteuspitoisuuksilla olevien rappauskerrosten aiheuttamaa vaimennusta. Violetti alue siis käsittelee pelkän rappauslaastin aiheuttamaa osaa rakenteen kokonaisvaimennuksesta. Violetin alueen alin yhtenäinen rajaviiva kuvaa vaimennustasoa rappauksen ollessa kauttaaltaan täysin kuiva. Ylin pisteiviivalla merkitty rajaviiva edustaa seinän kokonaisvaimennusta, kun rappauskerros on täysin märkä. Violetilla värjätyyn alueen keskellä kulkee ”kostean” rappauksen kuvaaja, jossa laastin permittiivisyys on 5,54–j0,07. Tämä arvo on kostean rappauksen permittiivisyyden arvo taulukossa 18.2.

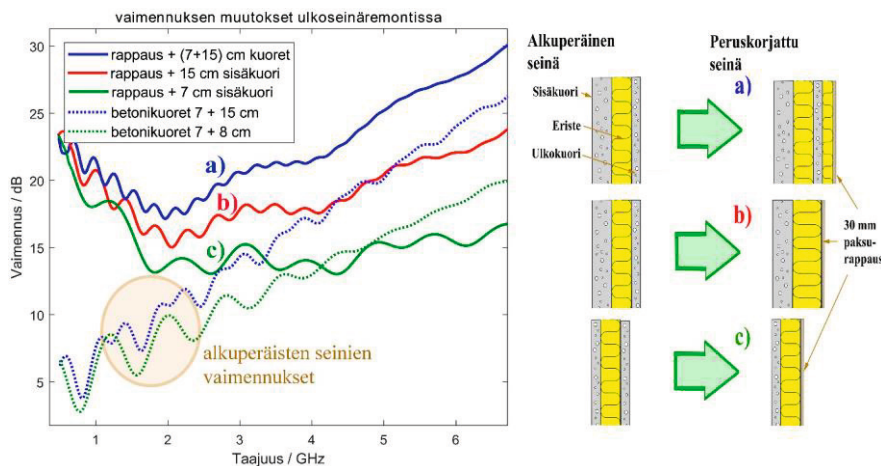


**Kuva 18.11** Koko ulkoseinän vaimennus kun rappauksen kosteus vaihtelee.

Kuvan 18.11 perusteella voidaan todeta, että tässä esimerkkitapauksessakin esimerkiksi 2 GHz:n taajuudella rappauksen kosteuden muuttuminen laajentaa seinän vaimennuksen välille 14–22 dB, ja taajuuden kasvaessa raja-arvojen väli suurenee entisestään. Toisaalta kuvaa tarkasteltaessa voidaan kuivan rappauksen tapauksessa todeta pienimmän vaimennuksen sijoittuvan noin 2,6 GHz:n taajuuksien tuntumaan, kun rappauksen kastuttua pienin vaimennus siirtyy noin 1,3 GHz:n taajuudelle.

## 18.4 RF-vaimennuksen muutoksen arviointi peruskorjauksen yhteydessä

Käytännössä kiinnostavin kysymys on se, mitä tapahtuu vanhan kerrostalon ulkoseinän kokonaisvaimennukselle, jos rakennukseen tehdään ulkoseinäremontti. Ulkoseinän peruskorjaus voidaan tehdä eri menetelmillä ja erilaisille seinille, joten seuraavassa kuvassa esitetään ulkoseinän kokonaisvaimennus ennen erilaisia ulkoseinäremontteja ja niiden jälkeen.



**Kuva 18.12** Koko ulkoseinän vaimennuksen muutos erilaisilla ulkoseinäremonteilla. (Seinäkuvat: Kouhia, Nieminen, & Pulakka, 2010, muokattu)

Kuvassa 18.12 on esitetty alkuperäisten seinien vaimennukset pisteiviivoilla, joissa sisäkuorien oletetaan olevan a- ja b-tapauksissa 150 millimetrin paksuista kuivaa betonia. Kuvassa punaisella merkittyä b-tapauksen alkuperäistä pisteiviivaa ei ole näkyvässä, koska se on sama kuin a-tapauksen sininen pisteiviiva. C-kuvaajan avulla kuvatussa tapauksessa seinän oletetaan olevan vanhan lamellitalon sivuseinää, jonka sisäkuoren paksuus on vain 80 millimetriä. Kuvan 18.12 a-kohdassa seinäremontti

tehdään säilyttäen koko alkuperäinen seinärakenne lisälämmöneristyskerroksen ja uuden rappauspinnan alla, jolloin uudenkin ulkoseinärakenteen betonikerroksen osalta kokonaispaksuus on 220 millimetriä. Tämän lisäksi em. betonivaimennusten päälle summautuu vielä uuden lisälämmöneristekerroksen, rappauslaastin ja rappausverkon vaimennus.

Kuvan 18.12 b-kohdassa vanhasta ulkokuoresta poistetaan ulommainen betoni-kuori ja lämmöneristeet. Sen jälkeen lämmöneristekerros asennetaan uudella materiaalilla ja eristeen päälle tehdään paksurappaus. Nyt vanhan kuorirakenteen kokonaispaksuus pienenee betonin osalta 220 millimetristä 150 millimetriin, mutta vaimennusta tuo lisää rappauslaasti ja verkko. Mikäli uusittu lämmöneristekerros on villa-pohjaista materiaalia, sen vaikutusta rakenteen RF-signaalien kokonaisvaimennukseen ei tarvitse ottaa huomioon.

Kuvan 18.12 c-kohdassa alkuperäinen seinä on betonin osalta yhteensä 150 millimetriä paksu, koostuen vanhasta 80 millimetrin sisäkuoresta ja 70 millimetrin ulkokuoresta. Remontin aikana ulkokuori poistetaan ja lämmöneriste vaihdetaan tai sen paksuutta lisätään. Sen jälkeen ulkopinta rapataan.

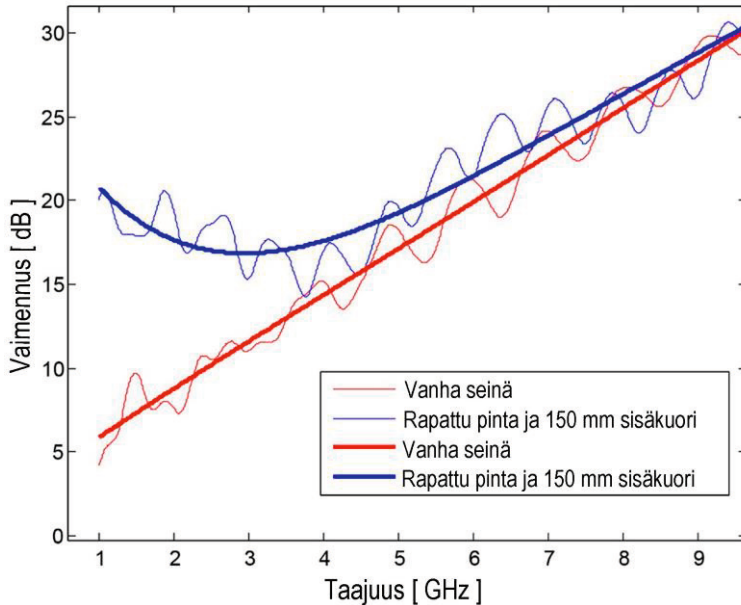
## 18.5 Yksinkertaistettu käytännön arviointi peruskorjauksen yhteydessä

Yksinkertaistettu esimerkkikuva käytännön tilanteesta on esitetty seuraavassa kuvassa 18.13. Siinä esitetään karkealla, mutta toivottavasti helposti hahmotettavalla tavalla, ulkoseinäremontin yhteydessä mahdollisesti tapahtuvaa seinien RF-vaimennuksen muutosta, jos uutena pintaratkaisuna käytetään paksurappausta. On muistettava, että pienillä taajuuksilla tapahtuva RF-vaimennuksen nousu tapahtuu vain paksurappauksen yhteydessä, jossa rappausta tuetaan metallisella rappausverkolla. Ohutrappauksen yhteydessä seinän kokonaisvaimennus saattaa hieman laskea, mutta se riippuu vanhan, säilytettävän seinän rakenteesta. Ongelmia on odotettavissa erityisesti sellaisissa peruskorjauskohteissa, joissa talon ympärillä oleva signaalitaso on vaatimaton, ja joissa ulkoseinäremontin yhteydessä vaihdetaan ikkunat.

Kuvassa 18.13 betonin osalta lähteenä on käytetty omista mittauksista kirjoitettua julkaisua eri betonilaatujen permittiivisyydestä, ja nyt vertailukohdaksi on valittu kuiva ja vanha betonin sisäkuori, jolle  $\epsilon_r$ -arvo on 5,9–j0,36. Sisäkuoren paksuus on mitoitettu 150 millimetriksi. Vanhan sisäkuoren voidaan olettaa olevan koko ajan kuiva, sääoloista ja ulkokuoren kosteudesta riippumatta. Ulkokuoren oletetaan olevan hieman kostea, jolloin sen paksuus on 70 millimetriä ja  $\epsilon_r$ -arvo 6,4 –j 0,44. Näillä

arvoilla laskettua alkuperäisen seinän vaimennusta esittävät kuvassa 18.13 punaiset käyrät, joissa ohuempi viiva kuvaa matemaattisesti laskettua, heijastukset sisältävää, vaimennuskäyrää ja paksumpi punainen vastaa 5-asteen polynomifunktiolla tasoitettua kuvaajaa.

Vanhan ja uuden seinän karkea vertailu peruskorjauksen yhteydessä



**Kuva 18.13** Yksinkertaistettu arvio ulkoseinän vaimennuksen muutoksen tasosta ulkoseinäremontissa.

Kuvassa 18.13 sininen käyrä vastaa ulkoseinien RF-vaimennusta ulkoseinäremontin jälkeen, jolloin alkuperäinen sisäkuori on jätetty paikalleen, mutta alkuperäinen ulko-kuori on poistettu ja korvattu paksulla rappauspinnalla. Tässä tapauksessa rappaus edustaa puolikuivaa 3 senttimetriä paksua paksurappausta. Puolikuivan rappauksen  $\epsilon_r$ -arvo on tässä esimerkissä  $5.54-j0.7$ , ja rappausverkon silmäkoko on 19 millimetriä.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta seinien RF-vaimennuksen nousevan ulkoseinäremontin yhteydessä huomattavasti, mikäli uudeksi pinnoitteeksi valitaan rappausverkolla tuettu paksurappaus. Tämä koskee erityisesti alle 4 GHz:n taajuuksia.



# 19 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän väitöstutkimuksen tutkimuskysymys muotoiltiin kirjan ensimmäisessä luvussa ja sen sanamuodoksi valikoitui seuraava: ”Mitkä seikat vaikuttavat eri ikäisten elementtipohjaisten asuinkerrostalojen ulkokuoren RF-signaalivaimennukseen matkaviestinverkkojen käyttämällä taajuuksilla.”

Tässä viimeisessä luvussa esitellään tutkimuksen aikana löydetty tulokset ja asuinkerrostalojen ulkokuoren RF-vaimennusten vaihtelua selittäviä syitä. Tutkimuskysymystä sivuten pohditaan myös lyhyesti mahdollisuuksia vaikuttaa mahdollisiin matkaviestinjärjestelmien kuuluvuusongelmiin materiaalivalintojen, erilaisten järjestelmien ja kaavoituksenkin avulla.

## 19.1 Datansiirron tarve ja matkaviestinverkkojen taajuudet

Matkaviestimillä siirrettävän datan määrä näyttää jatkavan kasvuaan tulevaisuudessa, joten tarve uusille entistä nopeammille verkkoteknologioille on ilmeinen. Kriittiseksi tekijäksi näyttää kehittyvän käytettävissä olevien taajuuskaistojen rajallisuus, sillä uudet, entistä nopeammat yhteydet vaativat entistä enemmän tilaa taajuuskaistoilta. Tämä johtaa uusien, entistä korkeampien, taajuuksien käyttöönottoon. Tässä väitöstutkimuksessa esiteltyjen mittaustulosten perusteella lähes kaikkien rakennusmateriaalien vaimennus kuitenkin kasvaa taajuuksien kasvaessa. Tuloksena näyttää olevan tilanne, jossa nykyisin käytössä olevat matkaviestinverkkojen taajuudet läpäisevät vielä ulkoseinien rakenteet hyväksyttävissä olevilla vaimennuksilla, mutta taajuuskaistoilla ei ole enää vapaita alueita uusille verkkoteknologioille. Käyttämättömät taajuusalueet sijoittuvat kymmenien gigahertsien alueille, joilla erilaisten materiaalien vaimennukset ovat merkittävästi korkeampia kuin nykyisin käytössä olevilla taajuuksilla.

## 19.2 Tässä väitöstutkimuksessa esitetyt tulokset

Tässä kappaleessa valotetaan väitöstutkimuksen keskeisiä tuloksia. Tulokset perustuvat lähinnä mittauksiin, ja osin myös simulaatioihin. Seuraavassa on tarkoitus koota

yhteen tärkeimmät tulokset yleisellä tasolla, puuttumatta enää eri aihealueiden yksityiskohtiin.

### 19.2.1 Ikkunoiden vaimennus

Ikkunoiden osalta tässä kirjassa esitetyt tulokset vahvistavat jo aikaisemmin eri julkaisuissa esitetyn päätelmän siitä, että jokainen ikkunoiden laseissa oleva selektiivipinta aiheuttaa noin 20 dB:n vaimennuksen matkapuhelinverkkojen nykyisin käyttämällä taajuuksilla. Jos pintoja on ikkunan lasituksessa useampia, vaimennus luonnollisesti nousee jokaisen uuden selektiivipinnan myötä. Eri tarkoitukseen tehdyt selektiivipinnat ovat kuitenkin myös vaimennukseltaan erilaisia. Tämä näkyy selvimmin vertailtaessa tavallisen eristyslasipaketin sisään asennettavan selektiivipinnan ja ikkunan ulommaiseen lasiin sijoitettavan huurtumista estävän pinnoitteen RF-vaimennusta keskenään. Yleisesti voidaan todeta huurtumattoman lasin lisäävän ikkunan kokonaisvaimennusta vähemmän kuin lisäämällä yksi uusi selektiivipinnoitekerros johonkin ikkunan lasipintaan.

Off-line menetelmällä muodostettuun ikkunan selektiivipintaan on tämänkin väitöstutkimuksen perusteella mahdollista tehdä toimiva taajuusselektiivinen FSS-kuviointi, joka toimii sekä teoriassa että myös käytännön kenttäkokeen perusteella. Tulee kuitenkin huomioida, että ikkunaan toteutettu FSS-rakenne tarjoaa paremman signaalitason vain siihen huoneeseen, johon kyseinen ikkuna on asennettu. FSS-rakenteen aikaansaama parannus RF-signaalien tasoon riippuu lisäksi ikkunan koosta ja tukiaseman suunnasta ikkunan sijaintiin nähden.

Ikkunoiden kokonaisvaimennusta arvioitaessa on erityisesti korkeammilla taajuuksilla otettava huomioon signaalin suunta, sillä vinosti ikkunan pinnan normaaliin nähden etenevät signaalit voivat edetä ikkunan puuosien kautta paljon pienemmällä vaimennuksella kuin suoraan selektiivikalvolla varustettua lasipintaa vastaan saapuvat matkaviestinjärjestelmien signaalit.

### 19.2.2 Betonin osuus ulkoseinissä

Tässä kirjassa esitetyt tulokset vahvistavat betonin RF-vaimennuksen riippuvan oleellisesti betonipinnan kosteudesta ja betonin valmistuksessa käytetyistä lisäaineista. Kerrostalorakentamisessa käytetään yleisesti sandwich-elementtejä, joissa betonisen ulkokuoren ja betonisen sisäkuoren välissä on eristekerros. Sandwich-elementin sisäkuori on tavallisesti noin 150 mm paksu, eikä sen kosteus muutu

oleellisesti rakennusajan jälkeen. Elementin ulkokuori sen sijaan on yleensä noin 70 mm paksu, ja se on alttiina ulkoilman kosteudelle ja sateelle, erityisesti jos betonikuoren uloin pinta on vettä läpäisevää tai esimerkiksi maalipinta on vaurioitunut. Kosteus etenee betonissa erilaisilla mekanismeilla ja merkittävin yksittäinen tekijä betonielementin ulkokuoren kastumisessa ja kuivumisessa on sateen ohella betonin valmistuksessa käytetyn veden ja sementin suhde. Betonia valmistettaessa käytetty runsas vesimäärä jättää syntyneeseen betoniin huokosrakenteen, joka sallii kosteuden siirtymisen betonin sisällä ja mahdollistaa suuret signaalivaimennuksen vaihtelut esimerkiksi eri vuodenaikoina. Tästä johtuen betoniin perustuville rakenteille annettava signaalivaimennuksen arvo on aina epätarkka ja riippuu tekijöistä, joita on mahdotonta havaita yksittäistä seinäelementtiä tarkastelemalla. Näitä tekijöitä ovat betonin lisäaineiden ja kosteuden lisäksi vesi/sementtisuhde. Muita huomioon otettavia seikkoja ovat signaalin suunnan jakauma, signaalin polarisaatio ja tarkasteltavan signaalin taajuus.

Betonin vaimennusmittauksista saatujen tulosten perusteella näyttää siltä, että betonin vaimennus nousee voimakkaasti taajuuden kasvaessa. Tämä pätee kaikille mitatuille betoninäytteille, mutta erityisen vahva taajuusriippuvuus on lisäaineistetulla betonilla ja standardibetonilla.

Verrattaessa vanhempien asuinkerrostalojen ulkoseinien signaalivaimennusta uudempien rakennusten ulkoseinien vaimennuksiin, on todettava, että ilman yksityiskohtaisia rakenteessa käytetyn betonin laadun ja lisäaineiden kuvausta on haastavaa tehdä yleistettäviä tulkintoja betonien mahdollisista eroista. Mittaustulosten valossa kuitenkin voidaan todeta, että kuivana ollessaan vanhempien talojen ulkoseinien betonikuoret vaimentavat vähemmän radiosignaaleja kuin uudempien talojen vastaavat betonirakenteet. Lisäksi vanhemmissa taloissa ulkoseinärakenteiden kokonaispaksuudet ovat pienempiä kuin uudemmissa asuinkerrostaloissa. Yhdessä nämä selittävät vanhempien kerrostalojen pienemmän keskimääräisen ulkoseinävaimennuksen.

### 19.2.3 Betonin kosteuden vaikutus

Asuinkerrostalojen seinissä oleva betonista valmistettu sandwich-elementin ulkokuori on altis kosteuden vaihtelulle ja sen radiosignaalien vaimennus onkin läheisessä kytköksessä materiaalikerroksen kosteuspitoisuuteen. Betonin kastuessa sen RF-vaimennus nousee huomattavasti ja täysin kastuneen 75 millimetriä paksun elementin ulkokuoren vaimennus onkin korkeampi kaikilla taajuuksilla kuin 150 millimetriä paksun kuivan sisäkuoren.

Tämä väitöstutkimus tukee myös aikaisemmin julkaistussa raportissa (Asp et al., 2014) esitettyjä tuloksia, joiden mukaan uusien ja vanhempien asuinkerrostalojen ulkokuorien vaimennuksessa on noin 13 dB:n ero. Tämä ero oli julkaisun mukaan samaa suuruusluokkaa sekä 900 MHz että 2100 MHz:n taajuuksilla. Eron tulkittiin aikaisemmin perustuvan uudemmissa taloissa oleviin selektiivikalvoilla varustettuihin ikkunoihin, mutta tämän tutkimuksen perusteella myös ulkoseinien vaimennus on muuttunut. Tosin suuren osan seinävaimennuksen kasvusta selittää uudempien asuinkerrostalojen paksummat ulkoseinärakenteet.

## 19.2.4 Rappaus ja rappausverkko

Matkaviestinjärjestelmien toiminnan kannalta mielenkiintoinen ja yllättäväkin havainto on rappauksen vaikutus signaalivaimennukseen. Rappauksen aikana käytettyä menetelmää ei jälkeenpäin pikaisella ulkopuolisella tarkastelulla yleensä voi varmuudella todeta ohut- tai paksurappaukseksi. Radiotaajuuksien vaimennuksen kannalta näillä rappausmenetelmillä on kuitenkin perustavanlaatuisen ero, jonka aiheuttaa paksurappauksessa käytettävä metallinen rappausverkko. Rappausverkon silmäkoon perustuen rappausverkosta muodostuu ylipäästösuoletin, joka läpäisee matkaviestinjärjestelmien käyttämät korkeammat taajuudet pienellä vaimennuksella mutta vaimentaa huomattavasti matalampia taajuuksia. Käytännössä tämä aiheuttaa uudenlaisen tilanteen, sillä yleisesti matalia taajuuksia pidetään matkapuhelinjärjestelmissä käyttökelpoisina juuri niiden materiaaleissa tapahtuvan pienemmän vaimennuksen vuoksi. Rappausverkko siis kääntää yleisen RF-vaimennuksen taajuusriippuvuuden rappauskerroksen osalta päinvastaiseksi.

Rappausverkon vaimennus on syytä nostaa keskusteluun vanhempien asuinkerrostalojen ulkoseinäremontteja suunniteltaessa, sillä rappauksen itsensä ja rappausverkon aiheuttama yhteisvaikutus voi aiheuttaa rakennuksen sisätiloissa merkittävän signaalitason heikkenemisen. Erityisesti asiaa on syytä harkita kohteissa, joissa rakennuksen ulkopuolella on heikko kenttä ja taloyhtiössä on ikkunat uusittu.

## 19.3 Mahdollisia ratkaisuja matkaviestiverkkojen kuuluvuusongelmiin

Tätä kirjaa kirjoitettaessa matkapuhelinverkkojen signaalia parantavat ratkaisut yhden asuinkerrostalon näkökulmasta jakautuvat kahteen ryhmään. Näistä ensimmä-

mäisen muodostavat ns. passiiviset järjestelmät, jotka perustuvat joko radiosignaaleja paremmin läpäiseviin rakennusmateriaaleihin tai passiivisten antennien käyttöön. Toisen ryhmän muodostavat aktiiviset järjestelmät, jotka aidosti nostavat talojen sisäosien kokonaissignaalitasoa, mutta jotka ovat luvanvaraisia.

### 19.3.1 Passiiviset järjestelmät

Passiivisia järjestelmiä on jo markkinoillakin erilaisia, ja niiden tuotekehittely etenee jatkuvasti. Passiiviset järjestelmät voidaan jakaa antenniratkaisuihin ja rakennusmateriaalien valintaan perustuviin ratkaisuihin.

Antenneihin perustuvat passiiviset ratkaisut ovat yksinkertaisimmillaan puhelimeen tai reitittimeen suoraan kytkettäviä, ulkoseinään tai katolle kiinnitettäviä suuntaavia antennejä. Näillä ratkaisuilla voidaan luonnollisesti ohittaa seinävaimennus ja saada myös hyödynnettyä antennin keilan muodosta saatava antennivahvistus. Rajoituksena on puhelimen osalta yhteen paikkaan sitoutuminen. Kahteen antenniin, ulos sijoitettavaan suuntaavaan ulkoantennin ja siihen kaapelilla liitettävään passiiviseen sisääntenniin liittyviä ratkaisuja käytetään vaihtelevasti parantamaan signaalitasoja tiloissa, joissa on hyvä ulkokenttä, mutta poikkeuksellisen suuren vaimennuksen aiheuttavat ulkoseinät. Näitä tiloja ovat esim. väestönsuojat.

#### 19.3.1.1 Rakennusmateriaaleihin perustuvat ratkaisut

Rakennusmateriaalien signaalivaimennukseen liittyvät ratkaisut ovat ongelmallisia pitkän elinkaarensa vuoksi. Koska asuinkerrostalot yleensä suunnitellaan kestäväksi vähintään 50 vuotta, ja matkaviestinverkkojen sukupolvet vaihtuvat noin kymmenen vuoden välein, on haasteellista ennakoita millä taajuuksilla olevien signaalien eteneminen on toivottavaa esimerkiksi kahdenkymmenen vuoden kuluttua. Mikäli kehitys johtaa verkkojen pieniin esimerkiksi huoneistokohtaisiin soluihin, ei signaalien vuotaminen toisiin asuntoihin tai ulkotiloihin ole ehkä tulevaisuudessa lainkaan suotavaa.

Tällä hetkellä on kuitenkin oleellista varmistaa, että nykyisin olemassa olevat verkot toimivat mahdollisimman hyvin asuinrakennusten sisätiloissa.

### 19.3.1.2 Ikkunat

Ikkunoiden osalta kotimainen tuotekehitys on jo onnistunut pienentämään lasituk-sien RF-vaimennuksia merkittävästi verrattuna tavalliseen selektiivi-ikkunaan. Vai-mennuksen pienentäminen perustuu ikkunoiden selektiivikalvon muokkaamiseen niin, että pinnoitteeseen muodostuu FSS-rakenne. Tämän tekniikan mahdollisuus pienentää signaalivaimennusta on osoitettu tässä kirjassa luvussa 15 kuvattujen simu-laatioiden sekä laboratorio- ja kenttämittausten avulla.

### 19.3.1.3 Polyuretaaniset lämmöneristeet

Toinen rakennusmateriaaleihin liittyvä Suomessa kehitetty ratkaisu on polyuretaani-levyissä käytettävän alumiinilaminaattipäälysteen huomioiminen radiosignaalien ete-nemistä arvioitaessa. Tunnettu tosiasia on yhtenäisten metalli- tai metallioksidipinto-jen suuri radiosignaalien vaimennus matkaviestimien taajuuksilla.

Eristevalmistajista Kingspan Oy käynnisti vuonna 2015 yhteistyössä Tampereen yliopiston tietoliikennetekniikan tutkijaryhmän kanssa tutkimushankkeen, jonka tu-loksena yritys julkaisi lähinnä pientalojen signaalinvaimennusta käsittelevän ohjeen polyuretaanilevyjä käytettäessä. Suunnitteluohjeessa esitetyllä asennustavalla matka-viestinjärjestelmien signaalitason voimakas pieneneminen voidaan estää, vaikka eriste-inä käytettäisiin alumiinilaminaattipintaisia polyuretaanilevyjä. (Kingspan, 2016.) Periaate on ohjeessa yksinkertainen. Siinä pientalon jokaiseen ilmansuuntaan avau-tuvaan seinään asennetaan ainakin yksi lämmöneristelevy, jossa ei ole alumiinipin-noitetta. Menetelmän vaikutusta arvioitiin useissa rakennusvaiheessa olleissa pienta-loissa tehdyissä mittauksissa, ja mittausten perusteella yhden kokonaisen läm-möneristelevyn vaihtaminen seinää kohti riitti matkapuhelinverkkojen signaalien ko-konaisvaimennuksen pitämiseksi eristeiden osalta alle 4 dB:n tasolla.

## 19.3.2 Passiivisten järjestelmien rajoitukset

Passiivisten järjestelmien ongelmana on niiden toiminta heikossa kentässä. Käytän-nössä tämä tarkoittaa sitä, että passiivisilla järjestelmillä ei kyetä parantamaan alkupe-räistä taloa ympäröivää matkapuhelinverkon kenttää, niillä voidaan ainoastaan pie-nentää rakennusmateriaalikohtaista vaimennusta. Rakennusmateriaalit luetaan tässä mielessä passiivisiin järjestelmiin kuuluviksi.

Rakennusmateriaalien tuotekehitys perustuu tavallisesti RF-vaimennuksienkin osalta simulointeihin ja laboratoriotesteihin. Niillä saadaankin perustietoa materiaalin käyttäytymisestä sähkömagneettisten kenttien kanssa. Rakennusmateriaalien signaalivaimennus on kuitenkin syytä varmistaa erikseen kenttätesteillä, jotka ovat työläitä ja kalliita järjestää, mutta joiden perusteella voidaan arvioida materiaalin tai rakenteen todellinen toimivuus loppukäyttäjän näkökulmasta.

Muita passiivisia ratkaisuja ei tässä väitöstutkimuksessa käsitellä, sillä niiden osalta tehdyissä mahdollisissa kenttämittauksista ei tämän kirjan kirjoittaja ole ollut toistaiseksi mukana.

### 19.3.3 Aktiiviset järjestelmät

Aktiivisilla järjestelmillä on tarkoitus vahvistaa heikkoa signaalia, mutta aktiivisten järjestelmien käyttö on luvanvaraista ja rajoittuu matkaviestinjärjestelmien osalta operaattoreiden asentamiin tai asennuttamiin järjestelmiin. Tästä poikkeuksena ovat järjestelmät, joissa itse matkapuhelinverkon signaalia ei vahvisteta, vaan luodaan huoneistoon esim. WLAN tekniikalla huoneistokohtainen langaton verkko. Tämä ei kuitenkaan ratkaise puheluihin liittyviä ongelmia.

Aktiivisista järjestelmistä tavallisimpia ovat ns. talojen sisäiset verkot, joita kutsutaan yleisesti distributed antenna systems (DAS) -järjestelmiksi. Näissä järjestelmissä asuinkerrostalon sisään rakennetaan yleensä jo talon rakennusvaiheessa matkaviestinverkko, jossa on yleensä kullekin kerrostaosalle oma antenninsa tarjoamassa riittävän signaalitason yhteisen käytävätilan ympärillä oleviin asuntoihin. Järjestelmä liitetään operaattorin tarjoamalla kalustuksella tavalliseen matkapuhelinverkkoon. (Viestintävirasto, 2015.) Taloihin asennettavat sisäiset verkot ovat tehokas tapa matkapuhelinsignaalien riittävän signaalitason takaamiseksi, mutta niiden kustannustehokas hyödyntäminen edellyttää verkkojen tai ainakin verkkoa varten tehtävien kaapelointi- ja tilavarausten tekemisen jo rakennusvaiheessa. Toinen rajoitus liittyy taloverkkojen kokoon. Vaikka pieneen kerrostaloyhtiöön olisi tehty valmis sisäverkko, eivät operaattorit välttämättä koe taloudellisesti järkeväksi liittää sisäverkkoa heidän omiin järjestelmiinsä.

## 19.4 Kokonaisia taloja ja asuinalueita koskevat ratkaisut

Matkapuhelinjärjestelmien kuuluvuuteen voidaan vaikuttaa rakennusten uudistustannossa erityisesti kaavoittajien, rakentajien ja operaattoreiden yhteistyöllä. Suurempia kokonaisuuksia tarkasteltaessa tulisi jo uusia asuinalueita suunniteltaessa ottaa huomioon myös matkaviestinverkkojen toiminta. Käytännössä tämä tarkoittaa tukiasemien paikkojen hahmottelemista asuinalueen tarpeiden mukaan, erityisesti huomioiden uuden alueen rakentumisen aikataulu. Yleensä kehittyvän asuinalueen suunnitelmissa tukiasemille on helposti osoitettavissa kustannustehokkaat ja radiotekniikan näkökulmasta tarkoituksenmukaiset sijainnit, mutta toisinaan se rakennus, joihin alueen lopullisesti valmistuessa tukiasemat kannattaa sijoittaa, valmistuu viimeisten joukossa. Tällaisissa tilanteissa tulee uudelle asuinalueelle varata ja varustaa tilat vaihtoehtoiselle verkkosijoittelulle, joka palvelee ensimmäisenä rakennettujen talojen asukkaita.

Toinen ongelma, joka nousee esiin nykyisten kaupunkien keskustojen täydennysrakentamisen yhteydessä, on matkapuhelinverkkojen suunnittelun näkökulmasta uusien talojen rakentaminen vanhojen talojen keskelle. Aluetta palvelevien matkapuhelinverkkojen alkuperäinen verkkosuunnittelu on tehty ympäröivien talojen keskimääräisten signaalitasojen ja vaimennuksien perusteella, ja uuden, enemmän RF-signaaleja vaimentavan talon sijoittaminen vanhojen talojen katveeseen saattaa aiheuttaa odottamattomia ongelmia.

Tässä väitöstutkimuksessa ei tarkastella lähemmin matkaviestinverkkojen suhdetta ympäröivään rakennuskantaan rakennussuunnittelun ja operaattoreiden näkökulmasta sillä aihe on hyvin laaja ja tarjoaa aiheen sarjaan muita väitöstutkimuksia. Tätä aihepiiriä on lähestytty esimerkiksi vuonna 2017 kirjoitetussa RT-kortissa (RT 80-11252, 2017), jossa käsitellään muun muassa sisäverkkojen kaapelointiin varautumista, tilavarauksia ja korostetaan erityisesti yhteistyötä eri toimijoiden välillä.

## 19.5 Milloin signaalitaso on riittävä?

Matkaviestinverkkojen toimintaa arvioitaessa päädytään tavallisesti keskusteluun siitä, ovatko mahdollisten kuuluvuusongelmien syinä uusien rakennusten ulkokuorten kasvaneet vaimennukset vai operaattoreiden liian kaukana olevat tai harvaan sijoitetut tukiasemat. Toisinaan on pohdittu määritelmää hyväksyttävän signaalitason raja-arvolle, joka pitää kerrostaloasunnossa ylittyä. Tämän raja-arvon pohjalta veloitettaisiin rakentajia ja operaattoreita ratkaisemaan mahdolliset ongelmat niin, että



asunnossa asuva loppukäyttäjä saa matkapuhelinverkon palvelut riittävän laadukaina.

Riittävän laadukas palvelutaso on matkaviestinverkkojen signaalitason näkökulmasta kuitenkin hyvin vaikea määriteltävä. Matkapuhelinverkon signaalitason vähimmäistason arvioinnissa epäselvyyttä aiheuttaa muun muassa viranomaisten kirjaus, jonka mukaan matkaviestinverkko on toimittava vähintään 1 Mbit/s nopeudella minkä tahansa 4 tunnin mittausjakson aikana moitteettomasti yhdessä pisteessä asunnossa. (Traficom, 2019b.) Vaatimus on ongelmallinen, sillä kerrostaloasunnoissa on vaikea kuvitella tilannetta, jossa matkapuhelinta voi käyttää ainoastaan asunnon yhdessä paikassa, esimerkiksi vaatehuoneen nurkassa. Silloinkin verkko toimii määräysten mukaan riittävän hyvin, mutta käytännön asumisen kannalta tilanne on kestävä. Toinen kirjauksen ongelma liittyy luonnollisesti turvallisuuteen. Jos yksin asuva ihminen sairauskohtauksen saatuaan yrittää soittaa hätänumeroon, sen tulisi onnistua joka puolella asuntoa.

## 19.6 Tulevaisuuden näkymiä

Yhä korkeampia taajuuksia käyttävien matkaviestintekniikoiden ja kasvavien materiaalivaimennusten yhteisvaikutus näyttää johtavan siihen, että talojen sisäosissa olevien matkaviestinjärjestelmien toiminta ei tulevaisuudessa enää perustukaan talon ulkopuolelle sijoitettuihin tukiasemiin. Ulos sijoitettujen tukiasemien korvaajiksi todennäköisesti nousevat sisälle huoneistoihin sijoitettavat pienet asuntokohtaiset tukiasemat.

Tämän kirjan tulosten valossa edellytykset tälle kehitykselle ovat olemassa, mutta vertailtaessa huoneistoissa vallitsevia signaalitasoja pitkiin porraskäytäviin perustuvissa asuinkerrostaloissa erilaisten huoneistojen keskinäinen järjestys muuttuu. Asuntokohtaisten pienten tukiasemien avulla on helppo tarjota pienille asunnoille koko asunnon kattava peitto maltillisella säteilyteholla, kun taas talon päätyihin sijoituvissa suuremmissa asunnoissa tilanne ei ole yhtä yksinkertainen. Erityisen haasteelliseksi tilanne muodostuu päätyasunnoissa silloin, kun asunnon sisällä on kantavia betonieisiä. Tavallisesti paksut betoniseinät sijoittuvat asuntojen välisiksi seiniksi, jolloin saavutetaan riittävä palo- ja ääneneristys. Jos kuitenkin asuntojen sisällä on kantavia tai muusta syystä massiivisia betonieisiä, joudutaan asuntokohtaisen tukiaseman tehoa nostamaan riittävän kentänvoimakkuuden saamiseksi koko asunnon alueelle. Tämä säteilytehon nostaminen aiheuttaa samalla signaalin vuotamisen käytävätiloihin ja naapuriasuntoihin.

Käytävätilat asuinkerrostalossa ovat matkaviestinjärjestelmien kuuluvuuden kannalta haasteellisia nykyisilläkin järjestelmillä, eikä tulevaisuudessakaan tilanne ilmeisesti muutu. Nykyisin käytävätilojen heikko signaalitaso liittyy talojen sivuille sijoituneiden asuntojen ja käytävän väliseen paksuun betoniseinään, jonka vaimennus vastaa tämä kirjan luvussa 17 esiteltyä kuivaan betoniin perustuvan sandwich-elementin sisäkuoren vaimennusta. Tämä johtaa siihen, että vaikka asunnoissa signaalitaso yleisesti olisi riittävä, se putoaa merkittävästi käytävätiloihin tultaessa.

Käytävien matala signaalitaso ei normaaliolosuhteissa ole ongelma, sillä tavallisesti käytävätiloissa ei oleskella. Siten matkaviestimien yhteyksien heikko laatu aiheuttaa käyttäjille vain lyhytaikaisen haitan. Huolestuttavaa sen sijaan on se, että paloja pelastustoimen viestijärjestelmien tukeutuessa entistä enemmän kaupallisiin verkkoihin, myös pelastusviranomaisten matkaviestimien toiminta käytävien alueella on epävarmaa. Tämä johtaa siihen, että suuri osa palolaitoksen sisäisestä viestinnästä vaikeutuu merkittävästi. Esimerkiksi kelpaa kerrostalon tulipalo, jossa käytävillä liikkuvilla sammuttajilla tulee olla toimiva yhteys toisiinsa ja toimintaa johtaviin henkilöihin.

## 19.7 Loppuyhteenveto

Matkaviestinverkkojen signaalitasoista ja mahdollisista kuuluvuusongelmista on keskusteltu vilkkaasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Lähtökohtana näissä arvioinneissa on tavallisesti ollut matkapuhelinverkkojen heikon signaalinvoimakkuuden aiheuttamat ongelmat puheluiden laadussa ja puheyhteyden luomisen vaikeudessa. Yleensä keskustelut ovat ajautuneet siihen, että etsitään syytä asuinkerrostalojen liian heikkoon signaalitasoon, ja yleensä perätään vastuuta operaattoreilta ja rakennusyh-tiöiltä.

Mielestäni liian vähälle huomiolle on kuitenkin jäänyt itse loppukäyttäjä ja matkaviestimien käyttökulttuurin muutos. Yhteiskunta on digitalisoitumassa kiihtyvällä vauhdilla ja matkaviestinverkkojen ja muunkin langattoman tiedonsiirron vaatimukset ovat muuttumassa. Tästä esimerkkinä ovat esineiden internetin nähtävissä oleva yleistyminen lähitulevaisuudessa. Nyt tulisikin esittää sellaisia kysymyksiä kuin: Missä osissa rakennusta ja huoneistoa matkaviestimien on toimittava? Mikä on riittävä langattoman tiedonsiirtonopeus nyt ja lähitulevaisuudessa? Mitä ovat taajuusalueet, joita rakenteiden tulisi läpäistä hyvin ja mille taajuuksille halutaan suurempi vaimennus? Näitä kysymyksiä tulisi harkita sen tosiasian valossa, että nyt piirustuspyödyllä olevat

rakennukset ovat todennäköisesti paikallaan samoine materiaaleineen vielä 50 vuoden kuluttua.

# REFERENCES

- Abbas, Z., Pollard, R. D., & Kelsall, R. W. (2001). Complex permittivity measurements at ka-band using rectangular dielectric waveguide. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 50* (5), sivut 1334-1342. ISSN: 0018-9456, Viitattu 3.12.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/19.963207>
- Agilent Technologies. (2005). *Basics of measuring the dielectric properties of Materials*. Application note. Viitattu 29.3.2021, Saatavissa: [http://academy.cba.mit.edu/classes/input\\_devices/meas.pdf](http://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf)
- Akay, M. F., Kharkovsky, S. N., & Hasar, U. C. (2001). An automated amplitudes-only measurement system for permittivity determination using free-space method. IMTC 2001. *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics, Vol 1*, sivut 503-506, ISSN: 1091-5281, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/IMTC.2001.928870
- Albrecht, W. (2000). Cell-gas composition – an important factor in the evaluation of long-term thermal conductivity in closed-cell foamed plastics. *Cellular Polymers, Vol 19*, sivut 319-331. ISSN: 0262-4893, Viitattu 22.2.2021, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/291734192\\_Cell-gas\\_composition\\_-\\_An\\_important\\_factor\\_in\\_the\\_evaluation\\_of\\_long-term\\_thermal\\_conductivity\\_in\\_closed-cell\\_foamed\\_plastics](https://www.researchgate.net/publication/291734192_Cell-gas_composition_-_An_important_factor_in_the_evaluation_of_long-term_thermal_conductivity_in_closed-cell_foamed_plastics)
- Alias, R. (2013). Structural and dielectric properties of glass – ceramic substrate with varied sintering temperatures *Sintering Applications*, 89-118. Viitattu 19.4.2021, DOI: 10.5772/54037
- Al-Zuhairi, A. (2017). *TR5/2017 (rev. 01) concrete mix design and trial mixes execution*. Consulting Engineering Bureau Laboratories (CEBL), Viitattu 20.11.2020, doi:<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28291.20002>
- Amiet, A. (2003). *Free space permittivity and permeability measurements at microwave frequencies*, väitöskirja, filosofia, Monash University, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/329131029\\_Free\\_Space\\_Permittivity\\_and\\_Permeability\\_Measurements\\_at\\_Microwave\\_Frequencies](https://www.researchgate.net/publication/329131029_Free_Space_Permittivity_and_Permeability_Measurements_at_Microwave_Frequencies)
- Amiet, A. (2017). *Free space permittivity and permeability measurements at microwave frequencies*, Monash University, Viitattu 22.2.2021, DOI:<https://doi.org/10.4225/03/59CB31713AE5B>
- Andreev, D. (2017). *Overview of ITU-T activities on 5G/IMT-2020*. Geneva, Switzerland. Viitattu 25.11.2020, Saatavissa: [https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2017/06\\_Saint\\_Petersburg/Presentations/ITU%20Workshop%2019.06%20-%20Denis%20Andreev%20202.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2017/06_Saint_Petersburg/Presentations/ITU%20Workshop%2019.06%20-%20Denis%20Andreev%20202.pdf)
- Ansys. (2021). *HFSS simulator*. Viitattu 21.5.2021, Saatavissa: <https://www.ansys.com/academic/terms-and-conditions>

- ASHRAE. (2013). *ASHRAE handbook – fundamentals* (SI edition). Viitattu 20.8.2020, Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEC1/ashrae-handbook-fundamentals/ashrae-handbook-fundamentals>
- Asp, A., Baniya, A., Yunas, S., Niemelä, J., & Valkama, M. (2015). Applicability of frequency selective surfaces to enhance mobile network coverage in future energy-efficient built environments. Paperi esitetty: – *Proceedings of European Wireless 2015; 21th European Wireless Conference*, sivut 1-8. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7147662>
- Asp, A., Hentilä, T., Valkama, M., Pikkuvirta, J., Hujanen, A., & Huhtinen, I. (2019a). Impact of concrete moisture on radio propagation: Fundamentals and measurements of concrete samples. Paperi esitetty: – *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, sivut 542–547. DOI: 10.1109/ISWCS.2019.8877182
- Asp, A., Hentilä, T., Valkama, M., Pikkuvirta, J., Hujanen, A., & Huhtinen, I. (2019b). Impact of different concrete types on radio propagation: Fundamentals and practical RF measurements. Paperi esitetty: – *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, sivut 1–8. DOI: 10.23919/SpliTech.2019.8783022
- Asp, A., Hujanen, A., Huhtinen, I., Pikkuvirta, J., & Valkama, M. (2020). Effect of plastering mesh on radio signals: Modelling and practical measurements. Paperi esitetty: – *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, sivut 68–73. DOI: 10.1109/EuCNC48522.2020.9200927
- Asp, A., Sydorov, Y., Keskkikastari, M., & Niemelä, J. (2013). *Rakennusten sisätiloissa esiintyvien matkapuhelinten kuuluvuusongelmien ratkaisuvaihtoehtojen kartoitus*. Helsinki: Rakennusteollisuus. Viitattu 22.4.2021,
- Asp, A., Sydorov, Y., Valkama, M., & Niemelä, J. (2012). Radio signal propagation and attenuation measurements for modern residential buildings. Paperi esitetty: – *2012 IEEE Globecom Workshops*, sivut 580–584. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477638
- Asp, A., Yunas, S. F., Kilpeläinen, V., Niemelä, J., & Valkama, M. (2016). Passive intermodulation and network planning challenges in future indoor networks and energy efficient buildings. Paperi esitetty: *European Wireless Conference* &nbsp; sivut 400-406. Saatavissa: <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/passive-intermodulation-and-network-planning-challenges-in-future>
- Asp, A., Sydorov, Y., Keskkikastari, M., Valkama, M., & Niemelä, J. (2014). Impact of modern construction materials on radio signal propagation: Practical measurements and network planning aspects. Paperi esitetty: – *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, sivut 1–7. DOI: 10.1109/VTCSpring.2014.7022939
- Autere, A. (2018). *Betonin ohutietutkimuksen ja vetolujuuskoeistuksen tulosten vertailukelpoisuus betonin kuntotutkimuksissa*, Pro Gradu, Oulun Yliopisto, kaivannaisalan tiedekunta, geologia, Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/Record/nbnfioulu-201805151786>
- Baker-Jarvis, J., Geyer, R. G., & Domich, P. D. (1992). A nonlinear least-squares solution with causality constraints applied to transmission line permittivity and permeability determination. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol 41 (5), sivut 646–652. ISSN: 0018-9456, Viitattu 2.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/19.177336>

- Baker-Jarvis, J., Geyer, R. G., Grosvenor, J. H., Janezic, M. D., Jones, C. A., Riddle, B., Krupka, J. (1998). Dielectric characterization of low-loss materials a comparison of techniques. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol 5 (4), sivut 571–577. ISSN: 1070-9878, Viitattu 2.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/94.708274>
- Baker-Jarvis, J., Vanzura, E. J., & Kissick, W. A. (1990). Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol 38 (8), sivut 1096–1103. ISSN: 0018-9480, Viitattu 2.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/22.57336>
- Bansal, N. P. & Doremus, R. H. (1986). *Handbook of glass properties*. Elsevier Science & Technology. San Diego. ISBN: 0120781409, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21785-5>
- Barlow, H. & Cullen, A. (1950). *Micro-wave measurements*. Constable. London. ISBN: 2291731
- Barret, P. & Ménétrier, D. (1980). Filter dissolution of C3S as a function of the lime concentration in a limited amount of lime water. *Cement and Concrete Research*, Vol 10 (4), sivut 521–534. ISSN: 0008-8846, Viitattu 2.11.2020, DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90096-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90096-4)
- Barret, P., Ménétrier, D., & Bertrandie, D. (1983). Mechanism of C3S dissolution and problem of the congruency in the very initial period and later on. *Cement and Concrete Research*, Vol 13 (5), sivut 728–738. ISSN: 0008-8846, Viitattu 2.11.2020, DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90064-9)
- Barron, A. (2020). *Portland cement in the energy industry*. UK BOOK PUB, 2020. UK. ISBN: 1838008535
- Berning, P. H. (1983). Principles of design of architectural coatings. *Applied Optics*, Vol 22 (24), sivut 4127–4141. ISSN: 0003-6935, Viitattu 16.3.2021, DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.22.004127>
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Redaelli, E. (2013). *Transport processes in concrete*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. Viitattu 5.11.2020 doi:<https://doi.org/10.1002/9783527651696.ch2>
- Betoniteollisuus ry. (2009). *Elementtirakentamisen historia*. Viitattu 15.8.2020, Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>
- Betoniteollisuus ry. (2013). *Elementtisuunnittelu ulkoseinät*. Viitattu 22.3.2021, Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24017/ULKOSEIN%C3%84T.pdf>
- Betoniteollisuus ry. (2014). *Suunnitteluohje. ohutkuorinen polymeerikuitubetoninen sandwich-elementti*. Viitattu 22.3.2021, Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24102/Suunnitteluohje-%20KSW-%20elementti.pdf>
- Betoniteollisuus ry. (2019). *Betonin valmistus*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>
- Bilby, E. (2017). *Taking on Europe's concrete tower block energy challenge*. European Commission, Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: <https://horizon-magazine.eu/article/taking-europe-s-concrete-tower-block-energy-challenge.html>

- Birks, J. B. (1948). The measurement of the permeability of low-conductivity ferromagnetic materials at centimetre wavelengths. *Proceedings (Physical Society (Great Britain): 1926)*, Vol 60 (3), sivut 282–292. ISSN: 0959-5309, Viitattu 15.10.2020, DOI: <https://doi.org/10.1088/0959-5309/60/3/307>
- Björkholtz, D. (2010). *Lämpö ja kosteus -rakennusfysiikka*. Rakennustieto Oy. Helsinki. ISBN: 9789516824324
- Blocken, B. & Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 92 (13), sivut 1079–1130. ISSN: 0167-6105, Viitattu 22.3.2021, DOI: 10.1016/j.jweia.2004.06.003
- Bois, K. J., Handjojo, L. F., Benally, A. D., Mubarak, K., & Zoughi, R. (1999). Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol 48 (6), sivut 1141–1148. ISSN: 0018-9456, Viitattu 2.2.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/19.816128>
- Bomberg, M. (1974). *Moisture flow through porous building materials*. Lund institute of technology. Sweden, Lund.
- Boström, S., Uotila, U., Linne, S., Hilliaho, K., & Lahdensivu, J. (2012). *Erilaisten korjaustoimien vaikutuksia lähiekerrostalojen todelliseen energiankulutukseen*. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, Tampere. Viitattu 16.3.2021, Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/erilaisten-korjaustoimien-vaikutuksia-lahioekerrostalojen-todelliseen-energiankulutukseen\(d76bb51c-417f-40c2-b6e5-37bf184e9920\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/erilaisten-korjaustoimien-vaikutuksia-lahioekerrostalojen-todelliseen-energiankulutukseen(d76bb51c-417f-40c2-b6e5-37bf184e9920).html)
- Boyd, J. & Scheffler, M. (1999). *Water problems in building exterior walls: Evaluation, prevention, and repair*. ASTM International, 1999. ISBN: 978-0803126077
- Bozzi, M. (2005). *Periodic structures*. American Cancer Society. ISBN: 9780471654506
- BP statistical. (2019). *BP statistical review of world energy*. Viitattu 2.11.2020, Saatavissa: <https://refworks.proquest.com/library/read/doc:5f9ac6e3e4b06a3d0a7a6f0a/>
- BS EN 12620:2002, 2008. *Aggregates for use in concrete. European standards*. Viitattu 25.2.2021, Saatavissa: <https://www.en-standard.eu/bs-en-12620-2002-a1-2008-aggregates-for-concrete/>
- BS EN 410:2011, 2011. *Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing. European standards*. Viitattu 16.11.2020, Saatavissa: <https://www.en-standard.eu/bs-en-410-2011-glass-in-building-determination-of-luminous-and-solar-characteristics-of-glazing/>
- Buffi, A., Nepa, P., & Manara, G. (2012). Design criteria for near-field-focused planar arrays. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, Vol 54 (1), sivut 40–50. ISSN: 1045-9243, Viitattu 20.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/MAP.2012.6202511>
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., ... Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, Vol 41 (12), sivut 1208–1223. ISSN: 0008-8846, Viitattu 20.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>

- Burdette, E. C., Cain, F. L., & Seals, J. (1980). In vivo probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol 28 (4), sivut 414–427. ISSN: 0018-9480, Viitattu 22.5.2020, DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130087
- BY-koulutus. (2012). *Betonitekniikan oppikirja 2004* (7th ed.) By / Suomen betoniyhdistys 201. Helsinki. ISBN: 978-952-67169-6-1
- CableFree. (2020). 5G NR *frequency bands*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/5g-nr/5g-nr-frequency-bands/>
- Capps, C. (2001). *Near field or far field*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://people.eecs.ku.edu/~callen58/501/Capps2001EDNpp95.pdf>
- Carugi, M. (2018). *Key features and requirements of 5G/IMT-2020 networks*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/ArabStates/Documents/events/2018/RDF/Workshop%20Presentations/Session1/5G-%20IMT2020-presentation-Marco-Carugi-final-reduced.pdf>
- Caspers, F. (2012). *RF engineering basic concepts: S-parameters*. DOI: arXiv preprint arXiv:1201.2346
- Cataldo, A., De Benedetto, E., & Cannazza, G. (2011). *Broadband reflectometry for enhanced diagnostics and monitoring applications* (1st ed.) Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. ISBN: 3-642-20233-0, DOI: 10.1007/978-3-642-20233-9
- ERC/DEC/(95)03, 1995. *The introduction of DCS 1800*. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/3fb031f7-252d/DEC9503E.PDF>
- Chalapat, K., Sarvala, K., Li, J., & Paroanu, G. S. (2009). Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol 57 (9), sivut 2257–2267. ISSN: 0018-9480, Viitattu 12.4.2021, DOI: 10.1109/TMTT.2009.2027160
- Chao-Chun Chen. (1973). Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol 21 (1), sivut 1–6. ISSN: 0018-9480, Viitattu 8.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.1973.1127906>
- Cheng, D. K. (1993). *Fundamentals of engineering electromagnetics*. Addison-Wesley. Reading (MA). ISBN: 0-201-56611-7
- Collier, R. & Skinner, A. (2007). *Microwave measurements* (3rd ed.) The Institution of Engineering and Technology. Stevenage. ISBN: 9780863417351
- Cooley, J. W. & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, Vol 19 (90), sivu 297. ISSN: 0025-5718, Viitattu 8.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-1965-0178586-1>
- Costa, F., Borgese, M., Degiorgi, M., & Monorchio, A. (2017). Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices. *Electronics (Basel)*, Vol 6 (4), sivut 95. ISSN: 2079-9292, Viitattu 8.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics6040095>



- Cuinas, I. & Sanchez, M. G. (2000). Building material characterization from complex transmissivity measurements at 5.8 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol 48 (8), sivut 1269–1271. ISSN: 0018-926X, Viitattu 1.4.2021, DOI: 10.1109/8.884501
- Damidot, D. & Nonat, A. (1994). C3S hydration in diluted and stirred suspensions: (I) study of the two kinetic steps. *Advances in Cement Research*, Vol 6 (21), sivut 27-35. ISSN: 0951-7197, Viitattu 22.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1680/adcr.1994.6.21.27>
- De Jong, B. H. (2010). Glass. *VCH Publishers.*, Vol A12, sivut 365–432, Viitattu 16.3.2021, DOI: [https://doi.org/10.1002/14356007.a12\\_365.pub3](https://doi.org/10.1002/14356007.a12_365.pub3)
- Dewani ym. (2018). Window RF shielding film using printed FSS. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol 66 (2), sivut 790–796. ISSN: 1558-2221, Viitattu 8.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2780893>
- Dodd, N. (2018). *The European Housing Problem*. Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: <http://www.fao.org/3/x5356e/x5356e02.htm>
- Dominek, A. & Park, A. (1989). *Constitutive parameter measurements of lossy materials*. ElectroScience Laboratory. Ohio. ISBN: 1722126787
- Donovan, J. (2017). *2G sunset brings faster speeds, newer technologies*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: [https://about.att.com/innovationblog/2g\\_sunset](https://about.att.com/innovationblog/2g_sunset)
- ERC/DEC(94)01, 1994. *GSM digital pan-European communications system*. ECC. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/0cdfa09e-a782/DEC9401E.PDF>
- ERC/DEC(97)02, 1997. *The extended frequency bands for GSM Digital Pan-European Communications System*. ECC. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/cba61d6a-61b2/DEC9702E.PDF>
- ERC/DEC/ (00)01, 2000. *Extending ERC/DEC/ (97)07 on the frequency bands for the introduction of (UMTS)*. ECC, Electronic Communications Committee. Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/document/679>
- ECC/DEC/ (05)05, 2005. *Spectrum for (MFCN) operating within the band 2500–2690 MHz*. ECC, Electronic Communications Committee. Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/217614c9-9edd/ECCDec0505.pdf>
- ECC/DEC/ (15)01, 2015. *Harmonised technical conditions for mobile/fixed communications networks (MFCN) in the band 694–790 MHz*. ECC, Electronic Communications Committee. Viitattu 27.11.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/837045c3-e8c4/EC-CDEC1501.PDF>
- ECC DEC (06)01, 2019a. *The harmonised utilisation of the bands 1920–1980 MHz and 2110–2170 MHz*. Electronic Communications Committee. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/23ad06a7-bcbd/ECCDEC0601.PDF>
- ECC/REC/(19)01, 2019b. *ECC Recommendation of 8 March 2019 on technical toolkit to support the introduction of 5G*. Electronic Communications Committee. Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/document/9071>
- ECC. (2020). *Spectrum for wireless broadband – 5G*. Saatavissa: <https://www.cept.org/ecc/topics/spectrum-for-wireless-broadband-5g>
- ECC Newsletter. (2018). *Europe prepares to shape the radiocommunications of the future at WRC-19*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <http://apps.cept.org/eccnews/december-2018/index.html>

- ECC/DEC/ (11)06, 2018. *Restrictive technical conditions for operating in the band 3400–3800 MHz*. Electronic Communications Committee. Viitattu 18.2.2021, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/document/433>
- ECC/DEC/ (18)06, 2018. *Harmonised technical conditions for Mobile/Fixed Communications Networks (MFCN) in the band 24.25–27.5 GHz*. ECC, Electronic Communications Committee. Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: [https://docdb.cept.org/download/5e74d0b8-fbab/ECC%20Decision%20\(18\)06.pdf](https://docdb.cept.org/download/5e74d0b8-fbab/ECC%20Decision%20(18)06.pdf)
- Economidou, M. (2011). *Europe's buildings under the microscope*. Building Performance institute Europe, Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: [https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR\\_EU\\_B\\_under\\_microscope\\_study.pdf](https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf)
- Electronicsnotes. (2015). *Dual carrier HSPA: DC-HSPA, DC-HSDPA*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3g-hspa/dual-carrier-dc-hspa-hsdpa-hsupa.php>
- Elementisuunnittelu.fi. (2010). *Seinien mittasuositus*. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://www.elementisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/seinat/seinien-mittasuositus>
- Elisa Oyj. (2020). *Elisa panostaa entistä vahvemmin 4G- ja 5G-verkkoihin – 3G-verkko on asiakkaiden käytössä vuoden 2023 loppuun saakka*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://elisa.fi/yhtiötieto/uutishuone/tiedotteet/elisa-panostaa-entist%C3%A4-vahvemmin-4g-ja-5g-verkkoihin-%E2%80%93-3g-verkko-on-asiakkaiden-k%C3%A4yt%C3%B6ss%C3%A4-vuoden-2023-loppuun-saakka/19564630746650?>
- Elprocus. (2020). *ZigBee wireless technology architecture and applications*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.elprocus.com/what-is-zigbee-technology-architecture-and-its-applications/>
- Engineering Toolbox. (2003). *Electrical conductivity of elements and other materials*. Viitattu 28.5.2021, Saatavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/conductors-d\\_1381.html](https://www.engineeringtoolbox.com/conductors-d_1381.html)
- Engineering ToolBox. (2003a). *Emissivity coefficients materials*. Viitattu 16.11.2020, Saatavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
- Engineering ToolBox. (2003b). *Thermal conductivity of common metals, metallic elements and alloys*. Viitattu 27.11.2020, Saatavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html)
- ERC/DEC/ (97)07, 1997. *ERC Decision of 30 June 1997 on the frequency bands for the introduction of the Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*. ERC. Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: <https://docdb.cept.org/download/1c6bf5ca-7070/DEC9707E.PDF>
- Ericsson. (2020). *Ever-present intelligent communication*. Viitattu 22.2.2021, Saatavissa: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>
- EU komissio. (2006). *Energiatohokkuuden toimintasuunnitelma (2007–2012)*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=LEGISSUM:l27064>
- EU komissio. (2016). *Komissiolta ehdotus langattomien internetyhteyksien teostamiseksi korkealaatuisilla radiotaajuuksilla*. Viitattu 25.11.2020, Saatavissa: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/IP\\_16\\_207](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/IP_16_207)

- EU komissio. (2019). *Citizen support for climate action*. Viitattu 2.11.2020, Saatavissa: [https://ec.europa.eu/clima/citizens/support\\_en](https://ec.europa.eu/clima/citizens/support_en)
- EU KOMISSION TÄYTÄNTÖÖNPANOPÄÄTÖS 2018/637, 2018. *Taajuusalueiden 900 MHz ja 1 800 MHz käytön yhdenmukaistamisesta IoT:n käyttöön*. EU komissio. Viitattu 11.8.2020, Saatavissa: [https://eur-lex.europa.eu/eli/dec\\_impl/2018/637/oj?locale=fi](https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2018/637/oj?locale=fi)
- EU parlamentti. (2019). *EU and the Paris agreement: Towards climate neutrality*. Viitattu 20.8.2020, Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20191115STO66603/eu-and-the-paris-agreement-towards-climate-neutrality>
- EU parlamentti. (2020). *What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050*. Viitattu 29.8.2020, Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050>
- Euroopan ympäristökeskus. (2013). *Ilma jota hengitämme*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/fi/ymparisto-signaalit/signaalit-2013/artikkelit/ilma-jota-hengitamme>
- Eurostat. (2020). *Housing statistics. Statistics Explained*, Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/1158.pdf>
- Fabbri, M. (2017). *Clean energy package: Why buildings matter. Building Performance institute Europe*, Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: [https://renovate-europe.eu/wp-content/uploads/2017/03/Buildings-101\\_BPIE.pptx](https://renovate-europe.eu/wp-content/uploads/2017/03/Buildings-101_BPIE.pptx)
- Feng, P., Miao, C., Bullard, J. W., & Riman, R. (2016). Factors influencing the stability of AFm and AFt in the Ca–Al–S–O–H system at 25°C. *Journal of the American Ceramic Society; J Am Ceram Soc, Vol 99* (3), sivut 1031–1041. ISSN: 0002-7820, Viitattu 22.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.13971>
- FINLEX 1246/2014, 2020. *Muutosteksti 201/2020. Finlex*. Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2020/20200201>
- FINLEX 1010/2017, 2017. *Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta*. Helsinki. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 10.3.2021, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>
- Finnsementti Oy. (2011). *Suomalainen sementti*. Saatavissa: [http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS\\_Suomalainen\\_sementti\\_kirjanen\\_071112.pdf](http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf)
- Fleury, J., Lanini, M., Pose, C., Burnier, L., Salvadè, A., Zimmermann, E., ... Schüler, A. (2020). Wide band-pass FSS with reduced periodicity for energy efficient windows at higher frequencies. *Applied Physics.A, Materials Science & Processing, Vol 126* (6) ISSN: 0947-8396, Viitattu 8.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03547-w>
- Forsberg, C. H. (2020). *Heat transfer principles and applications*. Academic Press. ISBN: 978-0-12-802296-2, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02744-X>
- Fricks, T. J. (2007). *Concrete for durable floors*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/concrete-for-durable-floors\\_o](https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/concrete-for-durable-floors_o)

- Friedsam, G. L. & Biebl, E. M. (1997). A broadband free-space dielectric properties measurement system at millimeter wavelengths. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol 46 (2), sivut 515–518. ISSN: 0018-9456, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/19.571899
- Garrault-Gauffinet, S. & Nonat, A. (1999). Experimental investigation of calcium silicate hydrate (C-S-H) nucleation. *Journal of Crystal Growth*, Vol 200 (3), sivut 565-574. ISSN: 0022-0248, Viitattu 8.11.2020, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(99)00051-2)
- Gartner, E. M. & Jennings, H. M. (1987). Thermodynamics of calcium silicate hydrates and their solutions. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol 70 (10), sivut 743–749. ISSN: 0002-7820, Viitattu 13.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb04874.x>
- Geller, H., Harrington, P., Rosenfeld, A. H., Tanishima, S., & Unander, F. (2006). Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*, Vol 34 (5), sivut 556–573. ISSN: 0301-4215, Viitattu 1.4.2021, DOI: 10.1016/j.enpol.2005.11.010
- Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., & Varadan, V. K. (1990). Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol 39 (2), sivut 387–394. ISSN: 0018-9456, Viitattu 5.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.87592610.1109/19.52520>
- Gibson T. B., Jenn D. C. (1999). Prediction and measurement of wall insertion loss in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 1, sivut. 55-57, Jan. 1999, Viitattu 9.9.2023, Saatavissa: doi: 10.1109/8.752988.
- Gilkey, H. J. (1961). Water-cement ratio versus strength-another look. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol 58 (2), sivut 1851–78. ISSN: 0002-8061, Viitattu 25.2.2021, DOI: 10.14359/8063
- Glancy, B. K. A. (1987). *Automated microwave dielectric constant measurement system*. Viitattu 25.11.2020, Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a184182.pdf>
- Gonçalves, F., Pinto, A., Mesquita, R., Silva, E., & Brancaccio, A. (2018). Free-space materials characterization by reflection and transmission measurements using frequency-by-frequency and multi-frequency algorithms. *Electronics (Basel)*, Vol 7 (10), sivu 260. ISSN: 2079-9292, Viitattu 2.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7100260>
- Greenspec. (2020). *Cement: Materials and manufacturing process*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://www.greenspec.co.uk/building-design/cement-materials-and-manufacturing-process/>
- Gregson, S. F., McCormick, J., & Parini, C. (2007). *Principles of planar near-field antenna measurements* Institution of Engineering and Technology. London, U.K. ISBN: 1-62870-459-4
- Gröhn, A. (2014). *Eristerappauksen laadunvalvonta*, Insinöörityö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Helsinki, Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/10024/75218/1/Opinnaytetyo\\_Arto\\_Grohn.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/10024/75218/1/Opinnaytetyo_Arto_Grohn.pdf)
- GSMA. (2017). *Introducing radio spectrum*. Viitattu 16.4.2021, Saatavissa: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2017/04/Introducing-Radio-Spectrum.pdf>

- GSMA. (2019). *Extended coverage – GSM – internet of things (EC-GSM-IoT)*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.gsma.com/iot/extended-coverage-gsm-internet-of-things-ec-gsm-iot/>
- Gustafsson, M., Karlsson, A., Rebelo, A., & Widenberg, B. (2006). Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 54* (6), sivut 1897–1900. ISSN: 0018-926X, Viitattu 4.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.875926>
- Haavisto, R. (2015). *Muurattavan julkisivun kosteudenhallinnan keittäminen*, Insinööriyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, Rakennustuotanto, Tampere, Viitattu 20.11.2020, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/89815/Haavisto\\_Riku.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/89815/Haavisto_Riku.pdf)
- Hagentoft, C. (2001). *Introduction to building physics*. Studentlitteratur. Lund. ISBN: 91-44-01896-7, DOI: <https://doi.org/10.1002/bapi.200101660>
- Halberd Bastion. (2020). *eMTC (LTE cat-M1)*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/emtc-lte-cat-m1>
- Haltian. (2019). *Frequency bands for ten most popular IoT protocols*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://haltian.com/resource/frequency-bands-for-ten-most-popular-iot-protocols/>
- Haukijärvi, M. (2005). *JUKO-Ohjeistokansio Julkisivukorjausbankeeseen Läpiviemiseksi Korjaustapakuvaukset Ikkunarakenteet -yleiskuvaukset*, Päivitetty 9/2005 sivu 18. Julkisivuyhdistys, Viitattu 10.8.2023, Saatavissa: <https://julkisivuyhdistys.fi/wp-content/uploads/2019/01/L1-Ikkunat-Korjaustavat.pdf>
- Hämeenlinnan kaupunki ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy. (2013). *Vanhaa säästävät umpikorttelit*. Hämeenlinnan kaupunki, Hämeenlinna. Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: [https://www.hameenlinna.fi/wp-content/uploads/2019/03/3\\_Vaihtoehto\\_3.pdf](https://www.hameenlinna.fi/wp-content/uploads/2019/03/3_Vaihtoehto_3.pdf)
- Hänninen, J. (2014). *Kolmikerrosrappauksen tehtäväsunnittelu ja lisätöiden hallinta*, Insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Helsinki, Viitattu 20.5.2021, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201402122230>
- Hannula, P. S. M. (2007). *Rakennukset kertovat – perustietoa asukkaille*. Helsingin Kaupunginosayhdistysten Liitto ry, Helsinki. Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: [https://www.hel.fi/static/rakvv/julkaisut/Rakennukset\\_kertovat.pdf](https://www.hel.fi/static/rakvv/julkaisut/Rakennukset_kertovat.pdf)
- Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. *Proceedings of the IEEE, Vol 66* (1), sivut 51–83. ISSN: 0018-9219, Viitattu 22.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/proc.1978.10837>
- Hearn, N., Hooton, R., & Mills, R. (1994). *Pore structure and permeability. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, sivut 240–262. Viitattu 25.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1520/STP36424S>
- Heikkinen, J. (2013). *Teollisuuden sivutuotteiden käyttö betonissa sementin korvaajana*, Insinööriyö, Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Oulu, Viitattu 19.11.2020, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61723/Heikkinen\\_Johannes.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61723/Heikkinen_Johannes.pdf?sequence=1)

- Heinänen, M. (2014). *Kaupungin keitaat*. Tengbom ja Tampereen kaupunki, Tampere. Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: <https://tengbom.fi/project/tampereen-keskustakorttelit/>
- Heljo, J. & Vihola, J. (2012). *Energiansäästömahdollisuudet rakennuskannan korjaustoiminnassa*. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. ISBN: 978-952-15-2760-9
- Hemmilä, K. H. I. (2006). *Ikkunoiden energialuokituksen pilotointi*. VTT, Espoo. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2356.pdf>
- Hemmilä, K. & Heimonen, I. (2005). *Suomalaisten ikkunoiden kestävyys*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo. Viitattu 19.3.2021, Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2005/T2285.pdf>
- Hemmilä, K. & Saarni, R. (1999). *Tulevaisuuden ikkunoiden kehityspäätteet ja valinta*. VTT. Espoo. ISBN: 951-38-5431-0
- Hemmilä, K. & Saarni, R. (2002). *Ikkunaremontti*. Rakennustieto Oy. Helsinki. ISBN: 9789516826540
- Henriques, F. M. A. (1992). Quantification of wind-driven rain – an experimental approach: A general review on driven rain and details of an experiment in Portugal to supplement existing research results in Norway, the UK and elsewhere. *Building Research and Information: The International Journal of Research, Development and Demonstration, Vol 20* (5), sivut 295–297. ISSN: 0961-3218, Viitattu 20.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1080/09613219208727227>
- Hiebel, M. (2007). *Fundamentals of vector network analysis*. Rohde & Schwarz GmbH. München. ISBN: 978-3-939837-06-0
- Hirsimäki, M. (2013). *Kerrostalo-yhtiön julkisivukorjaus ja ulkoseinien lisäeristäminen*, Insinööritoimisto, Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Oulu, Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201301291832>
- Hock, K. M. (2006). Corrections to “error correction for diffraction and multiple scattering in free-space microwave measurement of materials”. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 54* (4), sivu 1631. ISSN: 0018-9480, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/TMTT.2006.871948
- Hoikkala, S. *Muovien rakentamisessa – EPS-eristeet*. Viitattu 11.11.2020, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK00s705.pdf>
- Holma, H. & Toskala, A. (2007). *HSDPA/HSUPA for UMTS: High speed radio access for mobile communications* (1st ed.). Wiley. New York. ISBN: 9780470018842
- Hong, S. H. (2010). *Chap\_7\_2\_Plane\_EM\_Waves\_in\_Lossy\_Media*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: <https://ocw.snu.ac.kr/sites/default/files/NOTE/6367.pdf>
- Honkanen, H. (2010). *Pientalon ikkunoiden vaihto matalaenergiainkkuiksi linkkaarikkustannuksia ajatellen*, Insinööritoimisto, Mikkelin ammattikorkeakoulu, Ympäristötekniikan koulutusohjelma, Mikkeli, Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15991/2010A1356.pdf>
- Honkanen, J. (2016). *Suomen 4g-verkot odottavat puhetta – gsm-verkko puksuttaa pitkään*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.tivi.fi/uutiset/suomen-4g-verkot-odottavat-puhetta-gsm-verkko-puksuttaa-pitkaan/c33ad425-a891-339b-b550-5e04d9ae6202>

- Hum, V. (2018). *ECE422 radio and microwave wireless systems*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://www.waves.utoronto.ca/prof/svhum/ece422/notes/07a-nearfar.pdf>
- Ida, N. (2015). *Engineering electromagnetics* (3rd ed.) Springer International Publishing. New York. ISBN: 3-319-07806-2, DOI: 10.1007/978-3-319-07806-9
- Ilonen, P. (2010). *Kerrostalojen perusrakenteet ja talotekniikka 1880-luvulta nykypäivään*. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: [https://www.kulttuuriymparistomme.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Artikkelit/Rakennusperinnon\\_hoito/Viisaita\\_korjausperiaatteita/Kerrostalojen\\_perusrakenteet\\_ja\\_talotekn\(37828\)](https://www.kulttuuriymparistomme.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Artikkelit/Rakennusperinnon_hoito/Viisaita_korjausperiaatteita/Kerrostalojen_perusrakenteet_ja_talotekn(37828))
- IoT Factory. (2020). *Private LoRaWAN network*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://iotfactory.eu/products/private-lorawan-network/>
- Irassar, E. F. (2009). Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler — A review. *Cement and Concrete Research, Vol 39* (3), sivut 241–254. ISSN: 0008-8846, Viitattu 22.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.007>
- Iso-Mustajärvi, P. (2013). *RAK-32200 betoniteknikka*. luentomoniste Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- Itoh, T. (2005). *Periodic structures for microwave engineering*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [http://www.ebrahimforati.com/Floquet\\_Itoh.pdf](http://www.ebrahimforati.com/Floquet_Itoh.pdf)
- ITU-R P.2040-2 Recommendation. (2021). *Effects of Building Materials and Structures on Radiowave Propagation above about 100 MHz*. P Series, sivu 23, Viitattu 18.8.2023, Saatavissa: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-2-202109-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-2-202109-I!!PDF-E.pdf)
- Iya N., Muqaibe A., Johar U., & Landolsi M. A., (2011). Ultra-wideband characterization of obstructed propagation, *2011, 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Istanbul, Turkey, 2011, sivut. 624-629, Viitattu 9.9.2023, Saatavissa: doi: 10.1109/IWCMC.2011.5982618
- Jackson, D. R. (2015). *Spring 2015 notes 32 ECE 6345*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://slideplayer.com/slide/11445577/>
- Jämsä, J. (2014). *Rakenteellinen paloturvallisuus rakennussuunnittelussa*. Pelastusopisto, Kuopio. Viitattu 2.11.2020, Saatavissa: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/koulutus--ja-esitysaineistot/2015/041115\\_rakenteellinen-paloturvallisuus-suunnittelussa.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/koulutus--ja-esitysaineistot/2015/041115_rakenteellinen-paloturvallisuus-suunnittelussa.pdf)
- Janezic, M. D. & Williams, D. F. (1997). Permittivity characterization from transmission-line measurement. *Mmsym, Vol 3* (1), sivut 1343–1346. ISSN: 0149-645X, Viitattu 20.5.2020, DOI: 10.1109/MWSYM.1997.596577
- Jang, B. (2010). *Global system for mobile communications*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: [http://www.cs.nccu.edu.tw/~jang/teaching/MobileSystem\\_files/Global%20System%20for%20Mobile%20Communications.pdf](http://www.cs.nccu.edu.tw/~jang/teaching/MobileSystem_files/Global%20System%20for%20Mobile%20Communications.pdf)
- Jelle, B. P., Kalnæs, S. E., & Gao, T. (2015). Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives. *Energy and Buildings, Vol 96*, sivut 329-356. ISSN: 0378-7788, Viitattu 21.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.024>

- Jennings, H. M., Bullard, J. W., Thomas, J. J., Andrade, J. E., Chen, J. J., & Scherer, G. W. (2008). Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste. *Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 6* (1), sivut 5–29. ISSN: 1346-8014, Viitattu 21.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.6.5>
- Jennings, H. M. & Pratt, P. L. (1979). An experimental argument for the existence of a protective membrane surrounding portland cement during the induction period. *Cement and Concrete Research, Vol 9* (4), sivut 501–506. ISSN: 0008-8846, Viitattu 21.2.2021, DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(79\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(79)90048-6)
- Johansson, K. (2020). *Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet*. Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/nuoren-ja-kovettuneen-betonin-ominaisuudet-2020.pdf>
- Johnson, G. (2013). *Concrete construction for EHS and MCS*. emsri, Viitattu 21.9.2021, Saatavissa: <http://www.emsri.org/concrete.pdf>
- Johnson, R. C., Ecker, H. A., & Hollis, J. S. (1973). Determination of far-field antenna patterns from near-field measurements. *Proceedings of the IEEE, Vol 61* (12), sivut 1668–1694. ISSN: 0018-9219, Viitattu 21.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1973.9358>
- Johnson, R. P. (2007). The eurocode system and the codes for steel and composite structures. *Rem: Revista Escola De Minas, Vol 60* (2), sivut 251–260. ISSN: 0370-4467, Viitattu 21.2.2021, DOI: 10.1590/S0370-44672007000200007
- Jokinen, J. (2016). *Nykyaikaisten rakenteiden lämmöneristyskyky*. Viitattu 22.3.2021, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK160301.pdf>
- Kaikkonen, I. (2017). *Ikkunoiden energiatalous*, Insinööritö, Kajaanin ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikka, Kajaani, Viitattu 20.5.2021, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/123952/Kaikkonen\\_Ilpo.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/123952/Kaikkonen_Ilpo.pdf)
- Kanko, T. (1979). *Ikkunoiden lahovauriot ja niiden välttäminen*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo. Viitattu 18.3.2021, Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/ikkunoiden-lahovauriot-ja-niiden-v%C3%A4litt%C3%A4minen>
- Kärkkäinen, H. (2020). *Elisa tekee tilaa uusille verkoille ajamalla 3G:N alas*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.is.fi/digitoday/mobiili/art-2000006436210.html>
- Karvinen, S. (2015). *Ulkoseinien sisäkuorielementtitekniikka*. Viitattu 22.4.2021, Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0503\\_s62-64.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0503_s62-64.pdf)
- Kauppila, A. (2014). *Matalaenergiakerrostalon ulkoseinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta*, Insinööritö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Helsinki, Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73391/Matalaen.pdf?sequence=1>
- Kauppinen, J. (2018). *Ympäristöministeriön kuulumiset ja viimeisimmät tapahtumat*. Viitattu 27.1.2021, Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2019/01/320ed99a-x253995.pdf>
- Kiani, G. I., Olsson, L. G., Karlsson, A., Esselle, K. P., & Nilsson, M. (2011). Cross-dipole bandpass frequency selective surface for energy-saving glass used in buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 59* (2), sivut 520–525. ISSN: 0018-926X, Viitattu 21.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2096382>



- Kiani, G., Karlsson, A., Olsson, L., & Esselle, K. (2007). Glass characterization for designing frequency selective surfaces to improve transmission through energy saving glass windows. *APMC*, sivut 1-4. ISSN: 2165-4727, Viitattu 18.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554974>
- Kim, S. & Baker-Jarvis, J. (2014). An approximate approach to determining the permittivity and permeability near  $\lambda/2$  resonances in transmission/reflection measurements. *Progress in Electromagnetics Research. Research B, Vol 58*, sivut 95–109. ISSN: 1937-6472, Viitattu 19.4.2021, DOI: 10.2528/PIERB13121308
- Kingspan. (2016). *Kännykkäkuuluvuuden varmistava ratkaisu*. Viitattu 19.4.2021, Saatavissa: [https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Opas\\_matkapuhelinverkkojen\\_sisatilakuuluvuudesta\\_2015\\_11.pdf](https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Opas_matkapuhelinverkkojen_sisatilakuuluvuudesta_2015_11.pdf)
- Kintner, C. E. (2017). *Free-space measurements of dielectrics and three-dimensional periodic metamaterials*, Väitöskirja, University of Arkansas, Fayetteville, Science in Electrical Engineering, Viitattu 7.4.2021, Saatavissa: <http://scholarworks.uark.edu/etd/2557>
- Kiukkonen, H. (2011). *Betonisandwich-seinien lisäeristyksen ja niiden kosteustekninen toiminta 1960–70-lukujen kerrostaloissa*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23726/Kiukkonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- kivitaloinfo. (2003). *Laastityypit*. Viitattu 11.11.2020, Saatavissa: <https://kivitaloinfo.fi/laastit/laastityypit/>
- Klunder, C. & Haseborg, J. L. (2010) Effects of high-power and transient disturbances on wireless communication systems operating inside the 2.4 GHz ISM band. Paperi esitetty: – *2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, sivut 359–363. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMC.2010.5711301>
- Knaack, A. & Kurama, Y. C. (2013). Design of concrete mixtures with recycled concrete aggregates. *ACI Materials Journal, Vol 110 (5)* ISSN: 0889-325X, Viitattu 26.2.2021, DOI: 10.14359/51685899
- Kohin, M., Wein, S. J., Traylor, J. D., Chase, R. C., & Chapman, J. E. (1993). Analysis and design of transparent conductive coatings and filters. *Optical Engineering, Vol 32 (5)*, sivut 911–925. ISSN: 0091-3286, Viitattu 2.9.2021, DOI: 10.1117/12.130266
- Kohonen, R. & Ojanen, T. (1983). *Rakennusmateriaalien vesihöyryn- ja kosteuden johtavuuden määrittäminen menetelmä*. VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki. Viitattu 3.12.2020, Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/rakennusmateriaalien-vesih%C3%B6yryn-ja-kosteudenjohtavuuden-m%C3%A4%C3%A4ritys>
- Kokko, E., Ojanen, T., & Salonvaara, M. (1997). *Undet vaipparakenteet: Energian säästö ja kosteustekniikka*. VTT Technical Research Centre of Finland. Espoo. ISBN: 9789513851682
- Köliö, A., Niemelä, P., & Lahdensivu, J. (2016). Evaluation of a carbonation model for existing concrete facades and balconies by consecutive field measurements. *Cement & Concrete Composites, Vol 65*, sivut 29–40. ISSN: 0958-9465, Viitattu 21.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.013>
- Köliö, A. (2016). *Propagation of carbonation induced reinforcement corrosion in existing concrete facades exposed to the finnish climate*, Väitöskirja, Tampere University of Technology, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Tampere, Viitattu 13.3.2021, Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/rlvlbc/alma992549505305973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/rlvlbc/alma992549505305973)

- Kopakkala, J. (2012). *4G mobiiliverkot*, Insinööriyö, Hämeen ammattikorkeakoulu, Tietoliikenteeniikka, Riihimäki, Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/38078628.pdf>
- Kosmatka, S. & Wilson, M. (2016). *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association 2011. Illinois USA. ISBN: 0893122777
- Kosomaa, S., Mattila, J. & Tepponen, P. (2015). *Mitä betoni on?* Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502\\_38-43.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_38-43.pdf)
- Kouhia, I., Nieminen, J., & Pulakka, S. (2010). *Rakennuksen ulkovaipan energiakorjaukset*. VTT, Espoo. Viitattu 18.2.2021, Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/VTT-R-04017-10.pdf>
- Krus, M. & Kiebl, K. (1998). Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials. *Materials and Structures, Vol 31* (8), sivut 522-529. ISSN: 1871-6873, Viitattu 21.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02481533>
- Kudder, R. & Erdly, J. L. (1998). *Water leakage through building facades*. ASTM International, 1998. Orlando. ISBN: 0803120427
- Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Fraunhofer Institute of Building Physics, Fraunhofer. Viitattu 23.3.2021, Saatavissa: <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%201995%20-%20Simultaneous%20Heat%20and%20Moisture%20Transport.pdf>
- Kuukka, A. (2020). *LoRaWAN-tekniologia, digita*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.digita.fi/etusivu/palvelut-yrityksille/iot/lorawan-tekniologia/>
- Lacy, R. E. (1965). *Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings*. Building Research Station. Symposium on Moisture in Buildings, Helsinki. ISBN: B00474W972
- Lahdensivu, J. (2012). *Durability properties and actual deorientation of finnish concrete fasades and balconies*, Väitöskirja, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan yksikkö, Tampere, Viitattu 21.2.2021, Saatavissa: <https://tutcris.tut.fi/portal/files/2041944/lahdensivu.pdf>
- Lahdensivu, J. (2005). *BY 46 rappauskirja 2005*. Suomen Rakennusmedia. Helsinki. ISBN: 952-5075-71-0
- Lahdensivu, J., Annala, P., & Pikkuvirta, J. (2016a). *BY 57 eriste- ja levyrappaus 2016*. BY-Koulutus Oy. Helsinki. ISBN: 978-952-68068-8-4
- Lahdensivu, J., Annala, P., & Pikkuvirta, J. (2016b). *Eriste- ja levyrappaus 2016*. BY-Koulutus Oy. Helsinki. ISBN: 978-952-68068-8-4
- Laine, K. (2010). *Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Tampere, Viitattu 21.2.2021, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201505131277>
- Laine-Lassila, S. (2018). *Langattomat sukupolvet 1G, 2G, 3G, 4G, 5G...* Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/langattomat-sukupolvet-1g-2g-3g-4g-5g/>
- Lammi, T. (2011). *Rakenteiden lisäeristämisen säästövaikutukset*, Insinööriyö, Vaasan ammattikorkeakoulu, Vaasa, Viitattu 24.2.2021, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/31152/Ont\\_tuukkal.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/31152/Ont_tuukkal.pdf)

- Lampinen, J. (2014). *Passiivitalo Pohjois-Suomeen?*, Insinöörityö, Savonia ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Kuopio, Viitattu 11.2.2021, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/71684/Lampinen\\_Jouni.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/71684/Lampinen_Jouni.pdf?sequence=1)
- Lampinen, M. & Kotiaho, V. (2015). *ENY-C2001 termodynamiikka ja lämmönsiirto*. Luentomoniste, Aalto Yliopisto. Espoo.
- Lappalainen, M. (2010). *Energia- ja ekologiakäsikirja: Suunnittelu ja rakentaminen*. Rakennustieto 2010. Helsinki. ISBN: 978-951-682-945-9
- Le Saoût, G., Lothenbach, B., Hori, A., Higuchi, T., & Winnefeld, F. (2013). Hydration of portland cement with additions of calcium sulfoaluminates. *Cement and Concrete Research, Vol 43*, sivut 81–94. ISSN: 0008-8846, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.011>
- Lechtenböhmer, S. & Schüring, A. (2011). The potential for large-scale savings from insulating residential buildings in the EU. *Energy Efficiency, Vol 4 (2)*, sivut 257-270. Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-010-9090-6>
- Lee, C. C., Chen, S. H., & Jaing, C. C. (1996). Optical monitoring of silver-based transparent heat mirrors. *Applied Optics (2004); Appl Opt, Vol 35 (28)*, sivut 5698–5703. ISSN: 1559-128X, Viitattu 2.6.2021, DOI: 10.1364/AO.35.005698
- Lee, I., Hong, I., Seo, Y., Chun, H., Park, Y., & Cho, C. (2014). Design of reconfigurable frequency selective surface using patch array and grid structure. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol 25 (1)*, sivut 92-98. ISSN: 1226-3133, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.1.92>
- Lee, S., Zarrillo, G., & Law, C. (1982). Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 30 (5)*, sivut 904–909. ISSN: 0018-926X, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.1982.1142923>
- Leftheriotis, G. & Yianoulis, P. (2013). *Glazings and coatings*. Elsevier Inc. Viitattu 24.1.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00022-4>
- Lehtinen, T. (2016). *Matkapuhelinverkkojen kuuluvuusongelmista rakennuksissa*. Viitattu 16.4.2021, Saatavissa: <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2016-AK-85977.pdf>
- Lehtonen, J. (2016). *Valumuurien ja korjauslaastien pakkaustenkestävyyden kehittäminen*, Insinöörityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Tampere, Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24330/Lehtonen.pdf>
- VALIOKUNNAN LAUSUNTO LiVL 21/2017 VP, 2017. HE 85/2017 vp. Liikenne- ja viestintävaliokunta. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: [https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Lausunto/Sivut/LiVL\\_21+2017.aspx](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Lausunto/Sivut/LiVL_21+2017.aspx)
- Lindberg, R. (2004). *Rakennusosien rakennusfysikaalinen toiminta*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK040302.pdf>

- Linne, S. (2009). *Ulkoivaipan lämpöalouteen vaikuttavat korjaustoimenpiteet käytännössä*. Julkisivuyhdistys ry:n syyskokous, Diana auditorio, Helsinki. Viitattu 23.2.2021, Saatavissa: <https://docplayer.fi/11855452-Ulkoivaipan-lampotalouteen-vaikuttavat-korjaustoimenpiteet-kaytannossa.html>
- Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of portland cements. *Cement and Concrete Research*, Vol 38 (6), sivut 848–860. ISSN: 0008-8846, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>
- Lu, K. & Brazil, T. J. (1993). A systematic error analysis of HP 8510 time-domain gating techniques with experimental verification. *Mmsym*, Vol 3 (1), sivut 1259–1262. ISSN: 0149-645X, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1993.277102>
- Lu, S. (2019). *IoT-yhteydet 5G-aikakaudella*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://etn.fi/index.php/13-news/9459-iot-yhteydet-5g-aikakaudella>
- LVM. (2019). Lakiluonnos sähköisen viestinnän palveluista lausunnoille. Viitattu 25.11.2020, Saatavissa: <https://www.lvm.fi/-/lakiluonnos-sahkoisen-viestinnan-palveluista-lausunnoille-1022822>
- Lylykangas, K., Andersson, A., Kiuru, J., Nieminen, J., & Päätaalo, J. (2015). *Rakenteellinen energiatehokkuus*, opas. Rakennusteollisuus. Helsinki.
- Lyons, A. R. (2007). *Materials for architects and builders* (3rd ed.) Butterworth-Heinemann. Oxford. ISBN: 1-136-37897-9
- Mäkitalo, M. (2012). *Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Tampere, Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tti-201205161133>
- Makul, N., Rattanadecho, P., & Agrawal, D. K. (2014). Applications of microwave energy in cement and concrete – A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol 37, sivut 715–733. ISSN: 1364-0321, Viitattu 22.3.2021, DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.054
- Manz, H. (2008). On minimizing heat transport in architectural glazing. *Renewable Energy*, Vol 33 (1), sivut 119-128. ISSN: 0960-1481, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.007>
- MAO:236/13, 2013. *Sopimaton menettely elinkeinotoiminnassa vertaileva markkinointi*. Markkinaoikeus. Viitattu 20.10.2021, Saatavissa: <https://www.markkinaoikeus.fi/fi/index/maatokset/markkinaoikeudellisetasiat/1377513940109.html>
- Marques da Silva, M. & Monteiro, F. (2014). *MIMO processing for 4G and beyond: Fundamentals and evolution*. CRC Press, 2016. ISBN: 9781138033979
- Matinaho, R. (2017). *Ikäihmisten internetin ja mobiililaitteiden käyttö palvelutaloyhteisöissä*, Insinööriyö, Oulun ammattikorkeakoulu, Tietojenkäsittelyn tutkinto-ohjelma, Oulu, Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139055/Matinaho\\_Risto.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139055/Matinaho_Risto.pdf?sequence=1)
- Mazar, H. (2014). *International, regional and national regulation of SRDs*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/workshops/RWP1B-SRD-UWB-14/Presentations/International,%20regional%20and%20national%20regulation%20of%20SRDs.pdf>

- Meijer, F., Itard, L., & Sunikka-Blank, M. (2009). Comparing European residential building stocks: Performance, renovation and policy opportunities. *Building Research & Information*, Vol 37 (5-6), sivut 533-551. ISSN: 0961-3218, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1080/09613210903189376>
- Mencarelli, D., Djafari-Rouhani, B., Pennec, Y., & Pitanti, A. (2018). *Numerical emulation of thru-reflection-line calibration for the de-embedding of surface acoustic wave devices*. Scientific Reports, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1038/s41598-018-27511-0
- Méquignon, M., Haddou, H., & Bonneaud, F. (2012). From lifespan of building walls to environmental indicators. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol 45 (6), sivut 1511–1516. ISSN: 1474-6670, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00127>
- Mittra, R., Chan, C. H., & Cwik, T. (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. *Proceedings of the IEEE*, Vol 76 (12), sivut 1593–1615. ISSN: 0018-9219, Viitattu 22.3.2021, DOI: 10.1109/5.16352
- Motiva. (2020). *Suuntaa-antavia ohjearvoja*. Viitattu 22.3.2021, Saatavissa: [https://www.energiatieteidenkeskus.fi/perustietoa/hyva\\_tietaa/suuntaa-antavia\\_ohjearvoja](https://www.energiatieteidenkeskus.fi/perustietoa/hyva_tietaa/suuntaa-antavia_ohjearvoja)
- MTV uutiset. (1997). *City-puhelimet yleistyessä*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/city-puhelimet-yleistymassa/5435606#gs.mb3i0s>
- Munk, B. (2000). *Frequency selective surfaces theory and design*. John Wiley. New York. ISBN: 1-280-25292-8
- Munk, B. (2005). *Finite antenna arrays and FSS*. IEEE Press. Piscataway, New Jersey. ISBN: 1-280-55651-X, DOI: <https://doi.org/10.1002/0471457531>
- Nakamura, T. /. (2009). *LTE-advanced (3GPP release 10 and beyond) - RF aspects - 3GPP*, Beijing, China. Viitattu 27.11.2020, Saatavissa: [https://www.3gpp.org/ftp/workshop/2009-12-17\\_ITU-R\\_IMT-Adv\\_eval/docs/pdf/REV-090006.pdf](https://www.3gpp.org/ftp/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090006.pdf)
- Narang, N. & Kasera, S. (2006). *2G mobile networks: GSM and HSCSD*. McGraw Hill Education. New Delhi.
- NCDOT. (2019). *Concrete mix design technician study guide*. North Carolina Division of Highways Materials and Tests Unit, USA. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://connect.ncdot.gov/resources/Materials/MaterialsResources/Concrete%20Mix%20Design%20Manual%20June%202016%20REVISED.pdf>
- Nelson, S. O. (1999). Dielectric properties measurement techniques and applications. *Transactions of the ASAE*, Vol 42 (2), sivut 523–529. ISSN: 2151-0059, Viitattu 20.5.2020, DOI: 10.13031/2013.13385
- Neuvonen, P. (2006). *Kerrostalot 1880–2000: Arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen*. Rakennustieto. Helsinki. ISBN: 9789516827943
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.) Pearson. Harlow, England, ISBN: 0-273-78633-4
- Nicolson, A. M. & Ross, G. F. (1970). Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol 19 (4), sivut 377–382. ISSN: 1557-9662, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.1970.4313932>

- Niskanen, A. (2016). *Murros, arkkitehtisukupolvet ja uusi estetiikka*. Aalto Yliopisto, Viitattu 12.11.2020, Saatavissa: <https://research.aalto.fi/fi/publications/murros-arkkitehtisukupolvet-ja-uusi-estetiikka>
- Nuttall, A. (1981). Some windows with very good sidelobe behavior. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol 29* (1), sivut 84–91. ISSN: 0096-3518, Viitattu 20.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/tassp.1981.1163506>
- Nykyri, P. (2020). *BY 211 betonirakenteiden suunnittelun oppikirja: Osa 1* (4th ed.) BY-Koulutus. ISBN: 9789527314081
- Ojanen, T. & Salonvaara, M. (2002). *Kuivumiskykyiset ja sateenpitävärakenteet*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2002/T2168.pdf>
- Ojanen, T., Seppä, I., & Koukkari, H. (2014). *Kehityspolut tulevaisuuden rakennusvaihtojen lämmön- ja energiaratkaisuille*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo. Viitattu 22.4.2021, Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T169.pdf>
- Ojanen, T., Nykänen, E., & Hemmilä, K. (2017). *Rakenteellinen energiatehokkuus korjausrakentamisessa, opas*. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki.
- Orbit/FR. (2010). *Antenna measurement theory*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [https://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/ORFR-Theory.pdf](https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf)
- Orfanidis, S. J. (2016a). *Multilayer structures*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch06.pdf>
- Orfanidis, S. J. (2016b). *Reflection and transmission*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch05.pdf>
- Orlob, C., Reinecke, T., Denicke, E., Geck, B., & Rolfes, I. (2013). Compact unfocused antenna setup for X-band free-space dielectric measurements based on line-network-network calibration method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 62* (7), sivut 1982-1989. ISSN: 0018-9456, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/TIM.2013.2246905
- Ouyang, Y. & Fallah, M. H. (2010). A performance analysis for UMTS packet switched network based on multivariate KPIs. *WTS* (2), sivut 1–10. ISSN: 1934-5070, Viitattu 12.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/WTS.2010.5479629>
- Palviainen, T. (2009). *Maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinta sisäpuolisilla korjausmenetelmillä*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustuotanto, Tampere, Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24713/Palviainen.pdf?sequence=4>
- Pentti, M. & Hyypöläinen, T. (1999). *Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu* Tampereen teknillinen korkeakoulu. ISBN: 9789521501739
- Pentti, M., Lahdensivu, J., Vaarala, M., & Pakkala, T. (2020). *Bes 2010 - osa c, 3. lämpö- ja kosteustekniikka suunnitteluohjeistuksen uusinta – lyhennetty versio*. TTY/Rakennustekniikan laitos, Tampere. Viitattu 22.3.2021, Saatavissa: [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23554/TRT\\_1864\\_2010\\_Lyhennetty\\_raportti\\_BES2010.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23554/TRT_1864_2010_Lyhennetty_raportti_BES2010.pdf)

- Philippakis, M., Martel, C., Kemp, D., Allan, M., Appleton, S., Damerell, W., ... Parker, E. (2004). *Application of FSS structures to selectively control the propagation of signals into and out of buildings*. ERA Technology, Leatherhead, Surrey, U.K. Viitattu 16.3.2021, Saatavissa: [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0020/36155/exec\\_summary.pdf](https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0020/36155/exec_summary.pdf)
- Pietarila, P. (2001). *Kalkkivappauksen korjaus*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.museo- virasto.fi/uploads/Meista/Julkaisut/korjauskortti-22.pdf>
- Pitkäranta, M. (2016). *Rakennuksen kusteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus* Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Helsinki. ISBN: 978-952-11-4626-8
- Pohjanmaan pelastuslaitos. (2018). *Palo-osastointi*. Viitattu 24.2.2021, Saatavissa: <https://www.pohjanmaanpelastuslaitos.fi/palvelut/rakenteellinen-paloturvallisuus/palo-osastointi>
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave engineering* (4th ed.) Wiley Sons Inc. Hoboken, NJ. ISBN: 978-0-470-63155-3
- Priya Rani, B. R., Sebastian, M. T., & Sebastian, M. T. (2008). The effect of glass addition on the dielectric properties of barium strontium titanate. *Journal of Materials Science. Materials in Electronics, Vol 19* (1), sivut 39–44. ISSN: 0957-4522, Viitattu 19.4.2021, DOI: 10.1007/s10854-007-9224-6
- PTT. (2018). *Asuntomarkkinaennuste 2018 erikoisteema: Asuntorakentamisen alueellinen tasapaino*. Viitattu 24.1.2021, Saatavissa: <https://www.ptt.fi/ennusteet/kansantalous-ja-asuntomarkkinat/asuntomarkkinat-2018-erityisteema-rakentamisen-alueellinen-tasapaino.html>
- Pulkkanen, A. (2010). *Lisensivapaan ISM-taajuusalueen häiriöiden ja signaalien vaimenemisen mittaaminen*, Insinööriyö, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Tietotekniikka, Jyväskylä, Viitattu 3.12.2020, Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12875/Opin- naytetyo.pdf?sequence=1>
- Qiu, L., Li, L., Pan, Z., Zhu, B., Sun, X., & Yan, W. (2018). New metallic mesh designing with high electromagnetic shielding. *MATEC Web of Conferences, Vol 189*, sivut 1003. ISSN: 2261-236X, Viitattu 21.9.2021, DOI: 10.1051/mateconf/201818901003
- Rafnet. (2004). *Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille, lämpö*. Rafnet, Helsinki. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrajatko/lampoo- sio27092004.pdf>
- Räisänen, A. & Lehto, A. (2003). *Radiotekniikan perusteet* Otatieto. Helsinki. ISBN: 951-672-337-3
- Räisänen, A. & Lehto, A. (1996). *Radiotekniikka* (6th ed.) Otatieto. Helsinki. ISBN: 951-672-224-5
- Rakennusfysiikan tutkimusryhmä, T. (2018). *Rakennusfysikaaliset testivuodet*. Tampereen yliopisto, Tampere. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/kos- teusanalysointimenetelma/rakennusfysikaaliset-testivuodet/>
- Rakennustieto. (2013). *Puurakentamisen merkittävä puute poistuu: Alalle vibdoin yhtenäinen avoin stan- dardi*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/lehdet/ry/index/uu- tiset/66q94uanb.html>
- Raksystems. (2017). *Suomalaiset talot 1970–1980-luvulla*. Viitattu 1.2.2021, Saatavissa: <https://www.raksystems.fi/ajankohtaista/suomalaiset-talot-1970-1980-luvulla/>

- Rao, S. & Riahi, K. (2006). The role of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in climate change mitigation: Long-term scenarios for the 21st century. *The Energy Journal*, *Vol SI2006* (1), sivut 177–200. ISSN: 0195-6574, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.2307/23297081>
- Rodriguez, H, Nguyen, C., Jorgensen, N. T., Sorensen T. B., & Mogensen P. (2015). Radio Propagation into Modern Buildings: Attenuation Measurements in the Range from 800 MHz to 18 GHz. In  *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2014 IEEE 80<sup>th</sup>, Vancouver, Canada 2014.
- Rohde & Schwarz. (2012). *Measurement of dielectric material properties*. Viitattu 30.8.2020, Saatavissa: [https://www.rohde-schwarz.com/in/applications/measurement-of-dielectric-material-properties-application-note\\_56280-15697.html](https://www.rohde-schwarz.com/in/applications/measurement-of-dielectric-material-properties-application-note_56280-15697.html)
- Rohde & Schwarz. (2016). *WCDMA / HSPA / HSPA+ technology*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: [https://www.rohde-schwarz.com/lt/technologies/cellular/wcdma-hspa/wcdma-hspa-hspaplus-technology/wcdma-hspa-hspaplus\\_55946.html](https://www.rohde-schwarz.com/lt/technologies/cellular/wcdma-hspa/wcdma-hspa-hspaplus-technology/wcdma-hspa-hspaplus_55946.html)
- Rolfes, I. & Schiek, B. (2005). Calibration methods for microwave free space measurements. *Advances in Radio Science*, *Vol 2* (11), sivut 19–25. ISSN: 1684-9973, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.5194/ars-2-19-2004
- Rothwell, E. J., Frasch, J. L., Ellison, S. M., Chahal, P., & Ouedraogo, R. O. (2016). Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials. *Electromagnetic Waves (Cambridge, Mass.)*, *Vol 157*, sivut 31–47. ISSN: 1559-8985, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.2528/PIER16071706>
- RT 80-11252, 2017. *Matkaviestinteknologia rakennuksissa*. Helsinki. SKN/1/maaliskuu 2017/Rakennustieto Oy. Viitattu 16.4.2021, Saatavissa: <https://kortitot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2080-11252>
- RT 103241, 2020. *Puu- ja puualumiini-ikkuna: Ominaisuudet ja laatuvaatimukset, asennus, huolto ja kunnossapito*. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- Rudd, R., Craig, K., Ganley, M., & Hartless, R. (2014). *Building materials and propagation*. OFCOM, Final Report, 2604/BMEM/R/3/2.0, Viitattu 20.8.2021, Saatavissa: [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0016/84022/building\\_materials\\_and\\_propagation.pdf](https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0016/84022/building_materials_and_propagation.pdf)
- Rzepecka, M. A. & Stuchly, S. S. (1975). A lumped capacitance method for the measurement of the permittivity and conductivity in the frequency and time domain-A further analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *Vol 24* (1), sivut 27–32. ISSN: 0018-9456, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.1975.4314364>
- Sagnard, F. & Zein, G. E. (2005). In situ characterization of building materials for propagation modeling: Frequency and time responses. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *Vol 53* (10), sivut 3166–3173. ISSN: 0018-926X, Viitattu 1.4.2021, DOI: 10.1109/TAP.2005.856333
- Sandberg, K. (1970). *Kiviainespiintojen maalauskäsitteelyt*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK010310.pdf>



- Sauleau, R., Fernandes, C. A., & Costa, J. R. (2005) Review of lens antenna design and technologies for mm-wave shaped-beam applications. Paperi esitetty: *11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, sivut 1–5. DOI: 10.1109/ANTEM.2005.7852157
- Sauleau, R., Coquet, P., Thouroude, D., Daniel, J. P., & Matsui, T. (2003). Radiation characteristics and performances of millimeter wave horn-fed gaussian beam antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 51* (3), sivut 378-387. ISSN: 0018-926X, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/TAP.2003.809821
- Saunders, S. & Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems* (2nd ed.) Wiley. Chichester. ISBN: 0470848790
- Sekki, P. (2019). *Betonirakenteisten sisäkuorielementtien kuivuminen – seurantamittaukset*. Viitattu 11.11.2021, Saatavissa: [https://research.tuni.fi/uploads/2019/02/1028ccf6-combi\\_tk\\_3\\_9-lammoneristetyypin-vaikutus-mittaukset.pdf](https://research.tuni.fi/uploads/2019/02/1028ccf6-combi_tk_3_9-lammoneristetyypin-vaikutus-mittaukset.pdf)
- Seppänen, V. (2020). *Eristeiden kustuskäyttäytyminen osana bengittävää rakennetta*, Karelia ammattikorkeakoulu, Joensuu, Viitattu 24.2.2021, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/268148/Ville\\_Sepp%C3%A4nen\\_opinn%C3%A4ytety%C3%B6\\_2020\\_01\\_22.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/268148/Ville_Sepp%C3%A4nen_opinn%C3%A4ytety%C3%B6_2020_01_22.pdf)
- SFS-EN ISO 6946:2017, 2017. *Lämmön vastus*. SFFS julkaisut. Viitattu 27.1.2021, Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/6/527185.html.stx>
- Shankar, V. & Hagentoft, C. E. (2000). A numerical study of effect of natural convection on thermal properties of horizontal oriented porous insulation. *Journal of Building Physics, Vol 24* (2), sivut 155–167. ISSN: 1744-2591, Viitattu 22.3.2021, DOI: 10.1106/BLW6-JKJA-VNN4-MH62
- Shankpal, P., Arur, V., Kadambi, G., & Shuttleworth, J. (2014). A generalized approach for computation of near field radiation pattern of an antenna. *International Journal of Antennas and Propagation, Vol 2014*, sivut 1–18. ISSN: 1687-5869, Viitattu 15.10.2020, DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/958148>
- Sheen, J., Mao, W., & Liu, W. (2009). *Study on the measurements techniques of microwave dielectric properties*. National Formosa University, Huwei, Yunlin 632, Taiwan. Viitattu 20.2.2021, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Weihsing-Liu/publication/239752835\\_Study\\_on\\_the\\_Measurements\\_Techniques\\_of\\_Microwave\\_Dielectric\\_Properties/links/0c96053ae01de38d20000000/Study-on-the-Measurements-Techniques-of-Microwave-Dielectric-Properties.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Weihsing-Liu/publication/239752835_Study_on_the_Measurements_Techniques_of_Microwave_Dielectric_Properties/links/0c96053ae01de38d20000000/Study-on-the-Measurements-Techniques-of-Microwave-Dielectric-Properties.pdf)
- Shelby, J. E. (2015). *Glass processing course*. Viitattu 10.3.2021, Saatavissa: [https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture04\\_Shelby\\_ColoredGlass.pdf](https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture04_Shelby_ColoredGlass.pdf)
- Shen & Kong. (2011). *Reflection & transmission of EM waves*. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-007-electromagnetic-energy-from-motors-to-lasers-spring-2011/lecture-notes/MIT6\\_007S11\\_lec29.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-007-electromagnetic-energy-from-motors-to-lasers-spring-2011/lecture-notes/MIT6_007S11_lec29.pdf)
- Shi, Y., Zhi-Yi Li, Li, K., Li, L., & Chang-Hong Liang. (2017). A retrieval method of effective electromagnetic parameters for inhomogeneous metamaterials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 65* (4), sivut 1160–1178. ISSN: 0018-9480, Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/TMTT.2016.2638424

- Sihvonen, M. (2010). *Notkistavien lisäaineiden käyttö betonissa*, Insinööriyö, Savonia ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Kuopio, Viitattu 19.11.2020, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/24987/Sihvonen\\_Maiju.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/24987/Sihvonen_Maiju.pdf?sequence=1)
- Siikanen, U. (2008). *Rakennusten lämpö- ja kosteusfysikaalisia näkökohtia*. Viitattu 11.12.2020, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120401.pdf>
- Siikanen, U. (2001). *Rakennusaineoppi* (6th ed.) Rakennustieto. Helsinki. ISBN: 951-682-611-3
- Silveirinha, M. G. M. V. & Fernandes, C. A. (2001). *Cylindrical non-homogeneous anisotropic lenses using artificial media* IEEE. Viitattu 29.3.2021, DOI: 10.1109/APS.2001.960031
- Singh, S. B., Munjal, P., & Thammishetti, N. (2015). Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering, Vol 4*, sivut 94-100. ISSN: 2352-7102, Viitattu 6.4.2021, DOI: 10.1016/j.job.2015.09.003
- Sinha, R. S., Wei, Y., & Hwang, S. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express, Vol 3* (1), sivut 14–21. ISSN: 2405-9595, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- Sjöberg, D. (2016). *Propagation in lossy media, complex waves*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: <https://www.eit.lth.se/fileadmin/eit/courses/eten05/ht2016/lectures/lecture4.pdf>
- Smith, S. W. (1999). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing* (Second edition ed.) California Technical Publishing. San Diego, CA 92150-2407. ISBN: 0-9660176-7-6
- Sohail, S., Kiani, G. I., & Esselle, K. (2011). *Enhancing RF/microwave efficient transmission through energy saving glass windows using frequency selective surface*. APS, sivut 2262–2263. ISSN: 1522-3965, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2011.5996967>
- Sorri, L. (2006). *1950–1980-lukujen asuinkeuhkkojen soveltuvuus senioriasumiseen*. Oulun yliopisto – Arkkitehtuurin osasto, Oulu. Viitattu 3.2.2021, Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514281616.pdf>
- Stein, H. N., & Stevels, J. M. (1964). Influence of silica on the hydration of 3 CaO, SiO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Chemistry (London), Vol 14* (8), sivut 338–346. ISSN: 0021-8871, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.5010140805>
- Stone, W. C (1997). NIST Construction Automation Program Report No. 3 Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials *NISTIR-6055*, Sivut 42-48 ja 173. Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6055>
- Straube, J. (2010). *BSD-148: Simplified prediction of driving rain on buildings: ASHRAE 160P and WUFI 4.0*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-148-wufi-simplified-driving-rain-prediction>
- Straube, J., & Burnett, E. F. P. (2000). *Simplified prediction of driving rain on buildings*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/286206679\\_Simplified\\_prediction\\_of\\_driving\\_rain\\_on\\_buildings\\_international\\_building\\_physics\\_conference](https://www.researchgate.net/publication/286206679_Simplified_prediction_of_driving_rain_on_buildings_international_building_physics_conference)
- Sundqvist, M. (2019). *1970-luvun betonielementtikerrostalon aikajana luvun betonielementtikerrostalon aikajana*, Diplomityö, Oulun Yliopisto, Arkkitehtuuri, Oulu, Viitattu 12.1.2020, Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201903011272.pdf>

- Sung, G. H., Sowerby, K. W., Neve, M. J., & Williamson, A. G. (2006). A frequency-selective wall for interference reduction in wireless indoor environments. *IEEE Antennas & Propagation Magazine, Vol 48* (5), sivut 29–37. ISSN: 1045-9243, Viitattu 22.3.2021, DOI: 10.1109/MAP.2006.277152
- SUOMEN RakMK C3, 2008. *Rakennuksen lämmöneristys*. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 9.3.2021, Saatavissa: [http://www.finlex.fi/data/normit/29517-C3\\_2007.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/29517-C3_2007.pdf)
- SUOMEN RakMK C4, 2002. *Lämmöneristys OHJEET 2003*. Helsinki. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 16.11.2020, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>
- SUOMEN RakMK D5, 2018. *Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystebontarpeen laskenta*. Helsinki. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 16.11.2020, Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B4332AA81-75E1-4CA0-B208-B0ACB60A267F%7D/133692>
- SUOMEN RakMK E1, 2002. *Rakennusten paloturvallisuus*. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 22.3.2021, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/data/normit/10530-37-3762-4.pdf>
- SUOMEN RakMK F2, 2001. *Rakennuksen käyttöturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2001*. Helsinki. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/data/normit/6376-F2.pdf>
- SUOMEN RakMK G1, 2004. *Asuntosuunnittelu MÄÄRÄYKSET JA OHJEET 2005*. Helsinki. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 16.11.2020, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/data/normit/28204-G1su2005.pdf>
- Švorčík, V., Podgrabinski, T., Nählik, J., Rybka, V., & Hnатовicz, V. (2005). Dielectric properties of doped polymethylmethacrylate. *Materials Letters, Vol 59* (2), sivut 341–344. ISSN: 0167-577X, Viitattu 24.1.2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.10.015>
- Taajuustalkoot, L. (2017). *Uusien 700 MHz:n 4G-tukiasemien käyttöönotto alkaa*. Viitattu 25.11.2020, Saatavissa: <https://taajuustalkoot.fi/ajankohtaista/>
- Taalas, P. (2021). *Ilmastonmuutos ilmatieteilijän silmin* Tammi. Helsinki. ISBN: 978-952-04-1802-1
- Taipalus, H. (2016). *Sementin vaikutus lujushajontaan*, Insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka, Helsinki, Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/118603/Taipalus\\_Heikki.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/118603/Taipalus_Heikki.pdf?sequence=1)
- Tampereen kaupunki. (2018). *Amurin alueen yleissuunnitelma luonnos 7.6.2018*. Viitattu 27.1.2021, Saatavissa: [https://www.tampere.fi/tiedostot/a/GYbNsgDaH/Amuri\\_loppuraportti\\_luonnos\\_20180706.pdf](https://www.tampere.fi/tiedostot/a/GYbNsgDaH/Amuri_loppuraportti_luonnos_20180706.pdf)
- TASAUSLASKENTAOPAS 2018, 2017. *Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen*. Helsinki. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Viitattu 16.11.2020, Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BB1EC8754-0BC6-413B-B158-886FA7770FCF%7D/136449>
- Tefficient. (2016). *Unlimited pushes data usage to new heights*. tefficient, 2016 Mobile data 1H 2016, Saatavissa: <http://media.tefficient.com/2016/12/tefficient-industry-analysis-5-2016-mobile-data-usage-and-pricing-1H-2016-1.pdf>

- Tekniikka&Talous. (2015). *Yllätysveto: 3g poistuu käytöstä, 2g saa jäädä*. Viitattu 12.1.2021, Saatavissa: <https://www.tivi.fi/uutiset/yllatysveto-3g-poistuu-kaytosta-2g-saa-jaada/8e253b75-e31c-3abf-9843-35596f71cfe0>
- Tereshchenko, O. V., Buesink, F. J. K., & Leferink, F. B. J. (2011). *An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials* IEEE. Viitattu 22.3.2021, DOI: 10.1109/URSI-GASS.2011.6050287
- Teriö, O., & Sorri, J. (2013). *Energiatohokkaan rakentamisen parhaat käytännöt perusteet*. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://docplayer.fi/2457670-Energiatohokkaan-rakentamisen-parhaat-kaytannot-perusteet.html>
- TESI. (2019). *Wirepas kerää 14,4 miljoonaa euroa – tavoitteena johtava asema massive IoT -markkinassa*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.tesi.fi/tiedote/wirepas-keraa-14-4-miljoonaa-euroa-tavoitteena-johtava-asema-massive-iot-markkinassa/>
- Tiili-info. (2002). *Julkisivumuurauksen suunnitteluohje*. Viitattu 8.11.2020, Saatavissa: <https://www.tiili-info.fi/wp-content/uploads/2013/11/Julkisivumuurauksen-suunnitteluohje.pdf>
- Tikkanen, J. (2016). *Seosaineet, betonilaborantti ja -mylläri pätevyityskurssi*. Viitattu 19.11.2020, Saatavissa: <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/7.1.2020-seosaineet.pdf>
- Tilastokeskus. (2019a). *Liitetaulukko 13. Matkapuhelimen käyttö ja internetin käyttö televisiolla 2019, %-osuus väestöstä*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi\\_2019\\_2019-11-07\\_tau\\_013\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi_2019_2019-11-07_tau_013_fi.html)
- Tilastokeskus. (2019b). *Liitetaulukko 8. Kotitalouden käytössä olevia 3G/4G-liittymiä matkapuhelimeen 2019, %-osuus talouksista*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi\\_2019\\_2019-11-07\\_tau\\_008\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi_2019_2019-11-07_tau_008_fi.html)
- Tilastokeskus. (2019c). *Puolet suomalaisista ostanut verkkokaupasta viimeisen kolmen kuukauden aikana*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi\\_2019\\_2019-11-07\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi_2019_2019-11-07_tie_001_fi.html)
- Tilastokeskus. (2020a). *Internetin käyttö medioiden seuraamiseen ja viestintään lisääntynyt*. Viitattu 21.3.2021, Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi\\_2020\\_2020-11-10\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi_2020_2020-11-10_tie_001_fi.html)
- Tilastokeskus. (2020b). *Liitetaulukko 12. Internetin käyttö eri laitteilla 2020, %-osuus väestöstä*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi\\_2020\\_2020-11-10\\_tau\\_012\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi_2020_2020-11-10_tau_012_fi.html)
- Tilastokeskus. (2020c). *Liitetaulukko 17. Internetin käyttötarkoitusten yleisyys 2020, %-osuus väestöstä*. Viitattu 21.4.2021, Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi\\_2020\\_2020-11-10\\_tau\\_017\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi_2020_2020-11-10_tau_017_fi.html)
- Tilastokeskus. (2020d). *Yksinasuminen yleistynyt etenkin nuorten ja iäkkäiden ikäryhmissä 2019*. Saatavissa: [https://tilastokeskus.fi/til/asas/2019/asas\\_2019\\_2020-05-20\\_tie\\_001\\_fi.html](https://tilastokeskus.fi/til/asas/2019/asas_2019_2020-05-20_tie_001_fi.html)
- Tilastokeskus. (2021a). *Liitetaulukko 26. Internetin käyttö viranomaisten tai julkisten palveluiden tarjoajien kanssa asiointissa 2020, %-osuus väestöstä*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi\\_2020\\_2020-11-10\\_tau\\_026\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2020/sutivi_2020_2020-11-10_tau_026_fi.html)

- Tilastokeskus. (2021b). *Väestörakenne 31.12.2020*. Viitattu 15.4.2021, Saatavissa: [https://www.tilastokeskus.fi/tup/suoluk/suoluk\\_vaesto.html](https://www.tilastokeskus.fi/tup/suoluk/suoluk_vaesto.html)
- TKK Tietoverkkolaboratorio. (2007). *Matkapuhelinten sukupolvet*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s99/hyto/47/1sp.shtml>
- Traficom. (2018). *Liikenne- ja viestintävirasto Traficom aloittaa 1.1.2019*. Viitattu 25.11.2020, Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/liikenne-ja-viestintavirasto-traficom-aloittaa-112019>
- Traficom. (2019a). *Maailman radioviestintäkonferenssi WRC-19 loppuraportti*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Maailman%20radioviestint%C3%A4konferenssi%20WRC-19%20loppuraportti.pdf>
- Traficom. (2019b). *Oikeutesi viestinnän peruspalveluihin*. Viitattu 1.9.2021, Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/laajakaista-ja-puhelin/oikeutesi-viestinnan-peruspalveluihin>
- Traficom. (2020a). *Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>
- Traficom. (2020b). *Matkaviestinverkon liittymät*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/matkaviestinverkon-liittymat>
- Traficom. (2021). *Matkaviestinverkossa siirretty tieto*. Viitattu 12.4.2021, Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/matkaviestinverkossa-siirretty-tieto>
- Tuominen, E. (2016). *Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytysko-keella*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Tampere, Viitattu 11.12.2020, Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/23934>
- Uihlein A, E. P. (2010). *Policy options towards an energy efficient residential building stock in the EU-27., Vol 42 (6)*, sivut 791–798. ISSN: 0378-7788, Viitattu 11.11.2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.016>
- Ulrich, R. (1967). Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure. *Infrared Physics, Vol 7 (1)*, sivut 37–55. ISSN: 0020-0891, Viitattu 24.1.2021, DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0891\(67\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0020-0891(67)90028-0)
- Vainio, T. (2008). *Kobti yksilöllisempää – asuntotuotannon laatumuutokset 1990–2000*. VTT, Helsinki. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: [https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisu/muut/2008/VTT\\_asuntotuotannon\\_laatumuutokset.pdf](https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisu/muut/2008/VTT_asuntotuotannon_laatumuutokset.pdf)
- Valtioneuvosto. (2016). *700 MHz-taajuusalueen huutokaupasta lausuntopyynnöt*. Viitattu 1.12.2020, Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/700-mhz-taajuusalueen-huutokaupasta-lausuntopyynnot>
- Valtioneuvoston julkaisu. (2020). *Liite 3 Toimenpiteet eduskunnan lausumien ja kannanottojen johdosta*. Valtioneuvosto, Helsinki. Viitattu 16.4.2021, Saatavissa: <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Liiteasiakirja/Documents/EDK-2020-AK-303223.pdf>
- LVM/852/07/2018, 2018. *Verkkotoimiluvat teletoimintaan taajuusalueella 3410–3800 megahertsiä*. Valtioneuvosto. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/delegate/file/47310>

- Varadan, V. V., Ro, R., & Varadan, V. K. (1994). Measurement of the electromagnetic properties of chiral composite materials in the 8–40 GHz range. *Radio Science, Vol 29* (1), sivut 9–22. ISSN: 0048-6604, Viitattu 24.2.2021, DOI: <https://doi.org/10.1029/93RS00551>
- Venkatarama Reddy, B. V., & Gupta, A. (2008). Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil–cement block masonry. *Construction & Building Materials, Vol 22* (8), sivut 1614–1623. ISSN: 0950-0618, Viitattu 6.4.2021, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2007.06.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.014)
- Vepsäläinen, J. (1972). Asuntokysymys ja suunnittelu. *Arkkitehti, Vol 2*, sivu 27. ISSN: 0783-3660, Viitattu 24.2.2021, Saatavissa: <https://www.finna.fi/Record/arto.013287317>
- Viestintävirasto. (2015). *Opas matkapuhelinverkkojen sisätilakuuluvuudesta*. Viitattu 22.4.2021, Saatavissa: [https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Opas\\_matkapuhelinverkkojen\\_sisatilakuuluvuudesta\\_2015\\_11.pdf](https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Opas_matkapuhelinverkkojen_sisatilakuuluvuudesta_2015_11.pdf)
- Viirola H, R. P. (2000). *Portlandementin hydrataatio*. VTT, Espoo. Viitattu 18.11.2020, Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2000/T2041.pdf>
- Vikberg, H., Lylykangas, K., & De Luca, F. (2019). *Päivänvalo-olosuhteiden arviointi- ja ohjausmenetelmät*. Ympäristöministeriö, Tallinna. Viitattu 18.3.2021, Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B9C1BB3E7-4C48-48CA-812A-7EA9A716248B%7D/156355>
- Vinha, J. (2011). *RTEK-3511 luentomoniste* TTY/Rakennustekniikan laitos. Tampere.
- Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., ... Suonketo, J. (2013). *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kustanteen osassa toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, Tampere. Viitattu 20.11.2020, Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal.fi/publications/ilmastonmuutoksen-ja-lammoneristyksen-lisayksen-vaikutukset-vaipparakenteiden-kosteusteknisessa-toiminnassa-ja-rakennusten-energian-kulutuksessa\(9092ab78-5ecf-4dc1-a53f-8eb20ad62d3c\).html](https://tutcris.tut.fi/portal.fi/publications/ilmastonmuutoksen-ja-lammoneristyksen-lisayksen-vaikutukset-vaipparakenteiden-kosteusteknisessa-toiminnassa-ja-rakennusten-energian-kulutuksessa(9092ab78-5ecf-4dc1-a53f-8eb20ad62d3c).html)
- Viz, V. (2010). *Wireless communication* Laxmi Publications. New Delhi.
- Wallen, H. (2016). *ELEC-C4140 kenttäteoria* Aalto Yliopisto. Espoo.
- Weber Saint-Gobain. (2017). *Webervetonit SB 45 silkobetonit C35/45-8*. Viitattu 4.6.2021, Saatavissa: <https://www.fi.weber/betonit/betonin-korjauslaastit/webervetonit-sb-45-silkobetonit-c3545-8>
- Weber, T. (2015). *CEPT/ECC-ETSI co-operation process and relation to standardisation activities*. Viitattu 2.12.2020, Saatavissa: [https://docbox.etsi.org/Workshop/2015/201511\\_red-workshop/s01\\_setting\\_the\\_scene/cept\\_ecc\\_etsi\\_cooperation\\_proc\\_weber\\_eco.pdf](https://docbox.etsi.org/Workshop/2015/201511_red-workshop/s01_setting_the_scene/cept_ecc_etsi_cooperation_proc_weber_eco.pdf)
- Widenberg, B., & Rodriguez, J. V. (2002). *Design of energy saving windows with high transmission at 900 MHz and 1800 MHz*. Technical Report LUTEDX, Vol TEAT-7110, sivut 1–14, Viitattu 25.2.2021, Saatavissa: [https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/design-of-energy-saving-windows-with-high-transmission-at-900-mhz-and-1800-mhz\(702c9b5d-9daf-4f77-b4fc-da015a0fafab\)/export.html](https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/design-of-energy-saving-windows-with-high-transmission-at-900-mhz-and-1800-mhz(702c9b5d-9daf-4f77-b4fc-da015a0fafab)/export.html)
- Wilson, K., Biglieri, E., & Wilson, S. G. (2016). *Transmission techniques for digital communications*. Academic Press. Santa Clara. ISBN: 9780123982810

- Wilson, M. A., Carter, M. A., & Hoff, W. D. (1999). British standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. *Materials and Structures*, *Vol 32* (222), sivut 571–578. ISSN: 1359-5997, Viitattu 20.5.2021, Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02480491>
- Winslow, D., & Liu, D. (1990). The pore structure of paste in concrete. *Cement and Concrete Research*, *Vol 20* (2), sivut 227–235. ISSN: 0008-8846, Viitattu 25.2.2021, DOI: 10.1016/0008-8846(90)90075-9
- WRC-19. (2019). *World radiocommunication conference 2019*. ITU-R, Viitattu 7.12.2020, Saatavissa: <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Pages/default.aspx>
- Yaghjian, A. (1986). An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *Vol 34* (1), sivut 30–45. ISSN: 0018-926X, Viitattu 22.5.2021, DOI: 10.1109/TAP.1986.1143727
- Yahalom, A., Pinhasi, Y., Shifman, E., & Petnev, S. (2010). *Transmission through single and multiple layers in the 3-10 GHz band and the implications for communications of frequency varying material dielectric constants*. Proceedings of the 14th WSEAS International Conference on Communications, Viitattu 29.3.2021, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/262401785\\_Transmission\\_through\\_single\\_and\\_multiple\\_layers\\_in\\_the\\_3-10\\_GHz\\_band\\_and\\_the\\_implications\\_for\\_communications\\_of\\_frequency\\_varying\\_material\\_dielectric\\_constants](https://www.researchgate.net/publication/262401785_Transmission_through_single_and_multiple_layers_in_the_3-10_GHz_band_and_the_implications_for_communications_of_frequency_varying_material_dielectric_constants)
- Yalley, P. P. (2018). Effect of sand fines and water/cement ratio on concrete properties. *Civil Engineering Research Journal (Newbury Park)*, *Vol 4* (3), sivut 11–21. ISSN: 2575-8950, Viitattu 22.5.2021, DOI: 10.19080/CERJ.2018.04.555636
- Yang, W. (2015). *The issues and discussion of modern concrete science* (1st ed.) Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. ISBN: 3-662-44567-0, DOI: 10.1007/978-3-662-44567-9
- Ympäristöministeriö. (2017a). *Älyteknologiaratkaisut ikääntyneiden kotona asumisen tukena*. Ympäristöministeriö, Helsinki. Viitattu 31.5.2021, Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79348>
- Ympäristöministeriö. (2017b). *Maankäytön, asumisen ja liikenteen sopimukset*. Viitattu 3.2.2021, Saatavissa: <https://ym.fi/maankayton-asumisen-ja-liikenteen-sopimukset>
- Ympäristöministeriö. (2018). *Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnitteluarvoja*. Ympäristöministeriö, Helsinki. Viitattu 13.11.2020, Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BA6558C5F-9B2E-40E5-B261-605118163F03%7D/141252>
- Zurita-Sánchez, J.,R., Halevi, P., & Cervantes-González, J.,C. (2009). Reflection and transmission of a wave incident on a slab with a time-periodic dielectric function  $\epsilon(t)$ . *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, *Vol 79* (5) ISSN: 1050-2947, Viitattu 10.5.2021, DOI: 10.1103/PhysRevA.79.053821
- Ängskog, P., Bäckström, M., Vallhagen, B. (2015). Measurement of Radio Signal Propagation through Window Panes and Energy Saving Windows. In *Proceedings of Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015 IEEE International Symposium on* (Sivut. 74-79). Viitattu 10.5.2021, <http://dx.doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256135>







