



KANDIDAATINTYÖ

**Rakennusmateriaalien vaimennusmittaukset
28 GHz:n taajuudella**

Justus Kleine

Ohjaaja: Joonas Kokkonen

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Kleine J. (2019) Rakennusmateriaalien vaimennusmittaukset 28 GHz:n taajuudella. Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 29 s

TIIVISTELMÄ

Tämä kandidaatintyö on toteutettu yhteistyössä Nokia Oyj:n kanssa. Tähän työhön liittyvät mittaukset suoritettiin joulukuun 2018 – helmikuun 2019 välisenä aikana Nokia Oyj:n OTAVA-laboratoriossa, joka sijaitsee Oulun Ruskossa. Mittauksissa käytettiin seinämateriaaleja, joista mallinnettiin hypoteettisia seiniä.

Tässä työssä keskitytään 28 GHz:n signaalin läpäisyominaisuuksiin eri rakennusmateriaaleissa. Mittauksista saatujen tuloksien avulla saatiin määritettyä eri materiaaleille 1/cm vaimennus, jonka avulla mallinnettiin kahden erilaisen sisäseinän ja yhden ulkoseinän kokonaisvaimennusta. 1/cm vaimennukset vaihtelivat 0.3 – 22.7 dB välillä. Työssä perehdytään myös sähkömagneettisen säteilyn, polarisaation ja vapaan tilan vaimennuksen teoriaan sekä antennin ominaisuuksiin. Lopuksi käsitellään yksittäisten mittausten pohjalta tehtyjä varmistusmittauksia sekä esitellään jatkotutkimusmahdollisuuksia.

Avainsanat: 5G, sähkömagneettinen säteily, vaimennus, vaimennusmittaukset

Kleine J. (2019) Attenuation measurements of construction materials at 28 GHz frequency. Degree Program in Electrical Engineering, University of Oulu, Oulu, Finland. Bachelor's Thesis, 29 p.

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis is made in co-operation with Nokia. The measurements that were included in the thesis took place between December 2018 and February 2019 in Nokia's OTAVA-laboratory, which is located in Rusko, Oulu, Finland. With the measurements it was possible to model hypothetical completed walls.

This thesis focuses on the penetrating loss of the different kinds of wall materials at 28 GHz frequency. With the measurement results, the 1/cm attenuation were defined to different kinds of materials. With the attenuations it was possible to model the total attenuation of two different inner walls and one external wall. The 1/cm attenuation values varied between 0.3 and 22.7 dB. In this thesis, the electromagnetic radiation, polarisation, free space path loss, as well as the antenna properties will be introduced. In the end of this thesis, the verification measurements that were done based on the separate measurements, will be discussed and the possibilities of the further studies will be discussed.

Key words: 5G, attenuation, attenuation measurements, electromagnetic radiation

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS.....	4
ALKULAUSE	5
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET	6
1. JOHDANTO	7
2. TEORIA.....	8
2.1. Sähkömagneettinen säteily	8
2.2. Polarisatio	9
2.3. Antenni	10
2.4. Vapaan tilan vaimennus.....	11
3. MITTAUKSET	12
3.1. Vapaan tilan vaimennuksen mittaukset	13
3.2. Yksittäisten materiaalien vaimennusmittaukset.....	14
4. SEINIEN MALLINNUS MITTAUSTULOKSILLA.....	18
4.1. Sisäseinät	18
4.2. Ulkoseinä	20
4.3. Mittaustulosten vertailu	21
5. MATERIAALISUMMIEN VARMISTUSMITTAUKSET	23
6. YHTEENVETO.....	26
7. LÄHTEET	27

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty Oulun yliopiston tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnassa osana tekniikan kandidaatin tutkintoa.

Haluan kiittää erittäin mielenkiintoisen ja ajankohtaisen kandidaatintyönaiheen tarjoamisesta Juha Hannulaa (Nokia Oyj). Haluan myös kiittää Nokia Oyj:tä yhteistyöstä ja työhön liittyvien mittausten mahdollistamisesta. Lisäksi haluan kiittää 7ELEMENT OÜ:tä seinämateriaalien tietojen ja kuvien toimittamisesta.

Iso kiitos myös kandidaatintyöni ohjaajalle Joonas Kokkoniemelle monipuolisesta ja kärsivällisestä ohjauksesta työn edetessä. Lisäksi haluan kiittää vaimoani Satua, joka on ollut tukena opintojeni aikana.

Oulussa, marraskuussa 2019

Justus Kleine

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

4G	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkko
5G	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkko
dB	Desibeli
FSPL	Free-space path loss, vapaan tilan vaimennus
GHz	Gigahertsi
IoT	Internet of Things, esineiden internet
LOS	Line-Of-Sight, suora näköyhteys
θ	Suuntakulma
τ	Kallistuserroin

1. JOHDANTO

Viidennen sukupolven matkapuhelinverkosta käytetään lyhennettä 5G. Se toimii sekä samoilla että paljon korkeammilla taajuuksilla kuin aikaisemman sukupolven matkapuhelinverkko, 4G. Tämä mahdollistaa muun muassa erittäin korkean mobiilidatanopeuden, esineiden internetin (IoT) sekä pienemmän viiveen [1]. 5G:n ominaisuuksia tullaan hyödyntämään niin teollisuuden automatisoimisessa, itseajavissa autoissa, robotiikassa, terveydenhuollossa, virtuaalitodellisuudessa kuin myös erilaisissa simulaatioissa [2]. Jotta 5G pystyisi toteuttamaan kaiken aikaisemmin mainitun, siirrytään siinä millimetrialloille, jotka tuovat mukanaan uudenlaisia haasteita, kuten nopeamman signaalin vaimentumisen, johon tämä työ keskittyy.

Rakennusten ulkoseinät vaikuttavat huomattavasti signaalin vaimentumiseen, joka taas riippuu seinässä käytetyistä rakennusmateriaaleista. Aikaisemmin tehdyissä mittauksissa on havaittu suuria eroja signaalien vaimentumisissa erilaisten ulkoseinämaterialien välillä eikä yleispätevää mallia ole olemassa. [3, 4]

Tämä kandidaatintyö on tehty yhteistyössä Nokia Oyj:n kanssa, ja sen tarkoituksena on tutkia eri rakennusmateriaalien vaimennusta 28 GHz:n signaalille, jotta saataisiin parempi kuva 5G:n käyttäytymisestä. Sen lisäksi erillisille rakennusmateriaaleille määritetään 1/cm vaimennus. Hypoteesina on, että yksittäisten materiaalien vaimennusten avulla pystyttäisiin määrittämään kokonaisvaimennus erilaisille seinille summaamalla vaimennukset yhteen.

Tämä työ koostuu teoriaosiesta, mittaosiosista sekä mallinnusosiesta. Teoriaosiossa keskitytään sähkömagneettiseen säteilyyn, polarisaatioon, antennin ominaisuuksiin sekä vapaan tilan vaimennukseen. Mittausosiossa käsitellään vapaan tilan vaimennuksen mittauksia ja yksittäisten materiaalien vaimennusmittauksia, kun taas mallinnusosiossa keskitytään tutkimaan mittaustuloksien perusteella muodostettuja hypoteettisia seiniä ja niiden läpäisyominaisuuksia. Lopuksi esitellään myös varmistusmittaukset, joiden tarkoituksena on osoittaa mallinnojen paikkansapitävyys, sekä jatkotutkimusmahdollisuuksia.

2. TEORIA

Tämä kappale käsittelee kandidaatintyön kannalta tärkeimpiä teorioita. Tässä kappaleessa keskitytään sähkömagneettiseen säteilyyn, polarisaatioon, antennien ominaisuuksiin sekä vapaan tilan vaimennukseen.

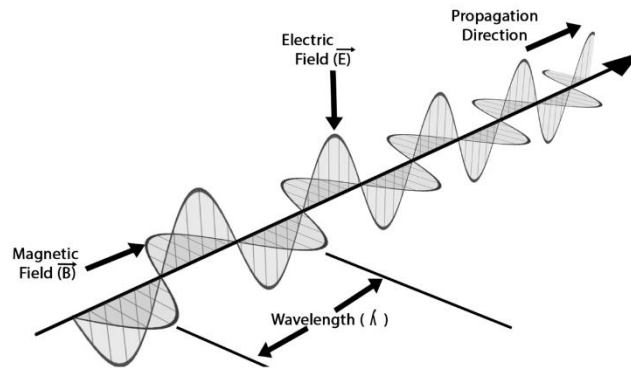
2.1. Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettinen spektri koostuu laajasta alueesta sähkömagneettisia aaltoja. Toisin kuin esimerkiksi ääni- tai vesiaallot, sähkömagneettiset aallot eivät tarvitse väliainetta edetäkseen. Sähkömagneettiset aallot ovat saaneet nimensä siitä, että niillä on sekä sähkö- että magneettikenttä. [5]

1860-luvulla James Clerk Maxwell otti tehtäväkseen kirjoittaa kaikki sähkön ja magnetismin tunnetut lait. Tämän harjoituksen aikana Maxwell huomasi matemaattisen epäjohdonmukaisuuden Amperén laissa. Korjatakseen tämän epäkohdan, Maxwell teki lisäyksen Amperén lakiin. Hän esitti lisäyksessään, että sähkökentän muutoksen seurauksena syntyy magneettikenttä. [6]

Kuten Faradayn laista tiedämme, magneettikentän muutos aiheuttaa sähkökentän muutoksen. Sähkökentän muutos taas aiheuttaa magneettikentän muutoksen. Tämä muuttuva kenttä etenee lähteestään aaltona. Aallot etenevät ikuisesti tai siihen asti, että sen energia on absorboitunut väliaineeseen tai johonkin materiaaliin. [6]

Tämän avulla Maxwell ennusti radioaaltojen olemassaolon. Vuonna 1886 Heinrich Rudolf Herz todistikin Maxwellin ennustuksen radioaaltojen olemassaolosta oikeaksi rakentamalla ensimmäisen radiojärjestelmän, joka koostui sekä lähettimestä että vastaanottimesta. [6]



Kuva 1. E kuvaa sähkökenttävektoreita ja B magneettikenttävektoreita [12].

2.2. Polarisaatio

Sähkömagneettiset kentät ovat vektorisuureita, mikä tarkoittaa sitä, että niillä on jokin tietty suunta avaruudessa. Sähkömagneettisen säteilyn kentät värähtelevät säteilyn etenemissuuntaan nähden kohtisuorassa tasossa. Kentän polarisaatio kuvaa siis sitä, miten sähkökenttävektorien suunta käyttäytyy kyseisessä tasossa. [7]

Sähkökentän voidaan ajatella koostuvan kahdesta pallokoordinaatti komponentista E_1 ja E_2 . Se voidaan kuvata matemaattisesti kaavalla

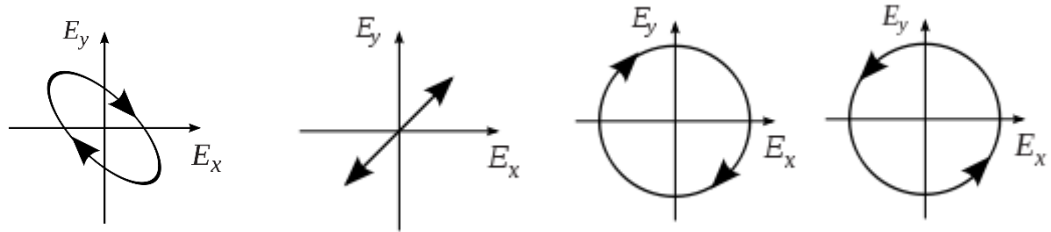
$$\vec{E} = (E_1 \vec{u}_x + E_2 \vec{u}_y) e^{-jkz}, \quad (1)$$

jossa \vec{u}_x ja \vec{u}_y ovat x - ja y -akselin suuntaiset yksikkövektorit. Yleisessä tapauksessa tämä kuvastaa elliptisesti polarisoitunutta aaltoa. Polarisaatioellipsiä kuvataan akselin suhteella E_{max}/E_{min} , kallistuskulmalla τ sekä kiertosuunnalla. [7]

Elliptisen polarisaation erikoistapauksia ovat lineaarinen polarisaatio ja ympyräpolarisaatio. Jos E_1 on erisuuri kuin nolla ja E_2 on yhtä suuri kuin nolla, kyseessä on x -suuntaan lineaarisesti polarisoitunut aalto. Jos taas E_1 ja E_2 ovat erisuuria kuin nolla, mutta reaalisia, kyseessä on lineaarisesti polarisoitunut aalto, jonka polarisaation taso on kulmassa [7]

$$\tau = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right). \quad (2)$$

Mikäli sähkökenttävektori pyörii, ja sen amplitudi pysyy vakiona, on kyseessä ympyräpolarisoitunut aalto. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkökenttävektori muodostaa ympyrän ajan funktiona. Sekä elliptiset polarisaatiot että ympyräpolarisaatiot voidaan jakaa sähkökentän pyörimissuunnan mukaisesti oikean- tai vasenkätisiksi.

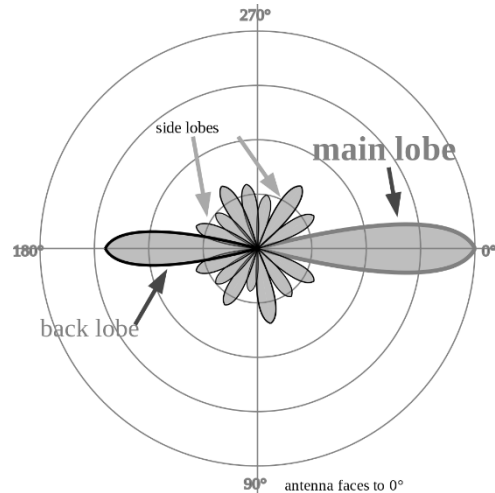


Kuva 2. Elliptinen polarisaatio, lineaarinen polarisaatio, oikeakätinen ympyräpolarisaatio ja vasenkätinen ympyräpolarisaatio [13].

2.3. Antenni

Antenni on muuntaja, jolla voidaan sekä lähettää että vastaanottaa sähkömagneettisia aaltoja. Antennit ovat resiprookkisia laitteita, mikä tarkoittaa sitä, että antennilla on samat ominaisuudet niin lähetyksessä kuin myös vastaanotossa. Lähettävä antenni muuntaa sähkövirtaa sähkömagneettiseksi aalloksi, kun taas vastaanottava antenni toimii päinvastoin, eli se muuntaa sähkömagneettiset aallot sähkövirroiksi. [8].

Isotrooppinen säteily tarkoittaa säteilyä samalla tavalla kaikkiin suuntiin. Antenni ei säteile isotrooppisesti. Sama pätee vastaanotossa resiprookkisyyden vuoksi. Monet antennit säteilevät voimakkaasti vain johonkin tiettyyn suuntaan, mistä seuraa, että antennin säteilemä teho riippuu suuntakulmasta θ . Antennin suuntakuviossa on selkeä pääkeila ja sen lisäksi sivukeiloja [7].



Kuva 3. Erään antennin suuntakuvio [14].

2.4. Vapaan tilan vaimennus

Vapaan tilan vaimennus (FSPL, Free-space path loss) on häviö signaalin vahvistuksessa, mitä esiintyy, kun sähkömagneettinen aalto etenee lähettimen ja vastaanottimen välillä ilman esteitä. Tämänlaista radiokanavaa kutsutaan nimellä suoran näköyhteyden kanava (LOS, Line-Of-Sight). [9] Sähkömagneettinen aalto hajaantuu suuremmalle alueelle sen edetessä eteenpäin. Tästä syystä signaali vaimenee mitä kauempana lähetin on vastaanottimesta. [10]

Vapaan tilan vaimennus voidaan esittää desibeleillä kaavalla

$$FSPL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_t - G_r, \quad (3)$$

jossa d on etäisyys lähettimestä, f signaalin taajuus, c valonnopeus, G_t lähettimen antennivahvistus ja G_r vastaanottimen antennivahvistus.

3. MITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin yhteistyössä Nokia Oyj:n kanssa OTAVA-laboratoriossa, Oulun Ruskossa. Mittaukset suoritettiin joulukuu 2018 – helmikuu 2019 välisenä aikana. Mittauslaitteiden kanssa samassa tilassa oli myös muita lähetäviä antennoja, minkä vuoksi tuloksien luotettavuus varmistettiin toistamalla niitä useampaan kertaan eri päivinä. Näin minimoitiin myös häiriötekijät.

Mittausten tarkoituksena oli ottaa selvää erilaisten seinämateriaalien vaimennusominaisuuksista 28GHz:n taajuudella. Seinämateriaaleista muodostettiin erilaisia hypoteettisia seiniä ja niille laskettiin kokonaisvaimennus mittausten perusteella.

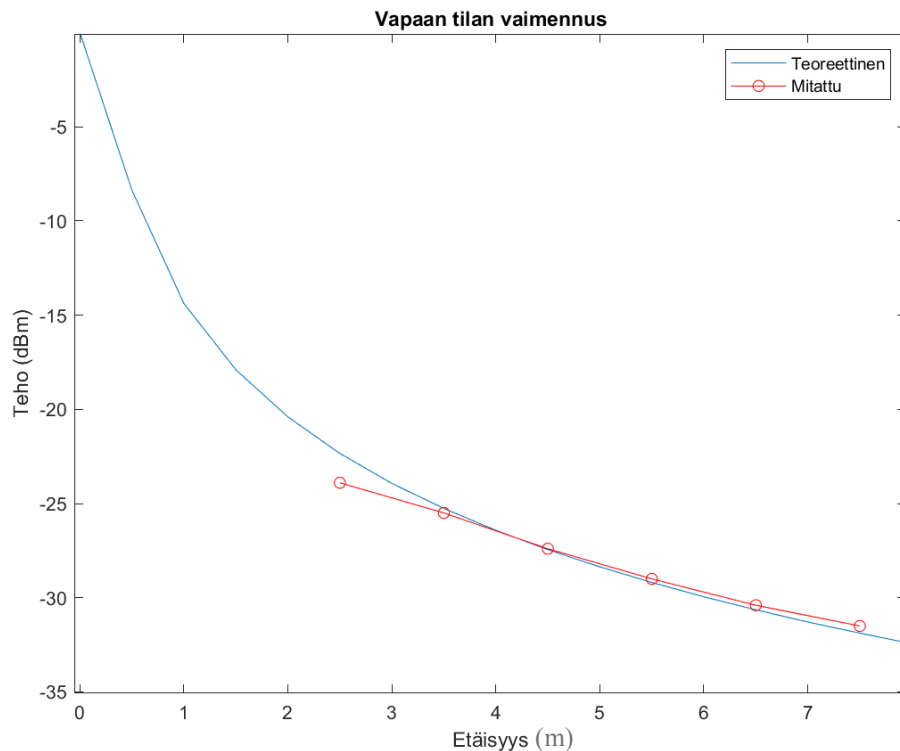
Mittauksissa käytettiin AirScale 28GHz Radio Unit (AUEA) Band 30 lähetysantennia sekä seitsemää Rohde&Scwarz R&S®NRPM-A90 vastaanottoantennia (kuva 4). Kuusi näistä vastaanottoantenneista oli kiinnitetty symmetrisesti kahteen liikuteltavaan vaimennusseiniin. Näiden kuuden vastaanottoantennien avulla pystyttiin kohdentamaan pääkeilaa ja varmistamaan, ettei mistään tule ei-haluttuja heijastuksia. Yksi vastaanottoantenneista oli vapaasti liikuteltava, ja se sijoitettiin mitattavan materiaalin taakse.



Kuva 4. Mittausjärjestely.

3.1. Vapaan tilan vaimennuksen mittaukset

Kaavan 3 mukaisesti vapaan tilan vaimennus on riippuvainen etäisyydestä, taajuudesta sekä lähetys- ja vastaanottoantennin vahvistuksien summasta. Vapaan tilan vaimennuksen mittaamiseen käytettiin irrallista vastaanottoantennia sekä lähetysantennia, joiden yhteisvahvistus oli 47 dB. Ne asetettiin toisiinsa nähden kohtisuoraan. Vastaanottoantennin tehokkuma kirjattiin ylös kuudelta eri etäisyydeltä, joiden perusteella piirrettiin kuvaaja 1.



Kuvaaja 1. Teoreettinen ja mitattu vapaan tilan vaimennus.

Vertailun vuoksi kuvaajaan 1 on laskettu myös teoreettinen vapaan tilan vaimennus. Mitatut tulokset vastaavat hyvin teoreettisesti laskettua vapaan tilan vaimennusta yhtä mittauspistettä lukuun ottamatta ($x = 2.5\text{m}$).

3.2. Yksittäisten materiaalien vaimennusmittaukset

Yksittäisten materiaalien vaimennusmittaukset toteutettiin samalla tavalla kuin vapaan tilan vaimennuksen mittaukset (osa 3.1.). Ensiksi mitattiin vapaan tilan vaimennus halutulla etäisyydellä, minkä jälkeen materiaali lisättiin vastaanottoantennin eteen kuvan 5 mukaisesti. Materiaalin vaimennuksesta vähennettiin vapaan tilan vaimennus, ja näin saatiin laskettua vaimennukset eri materiaaleille. Vaimennukset näkyvät taulukossa 1.

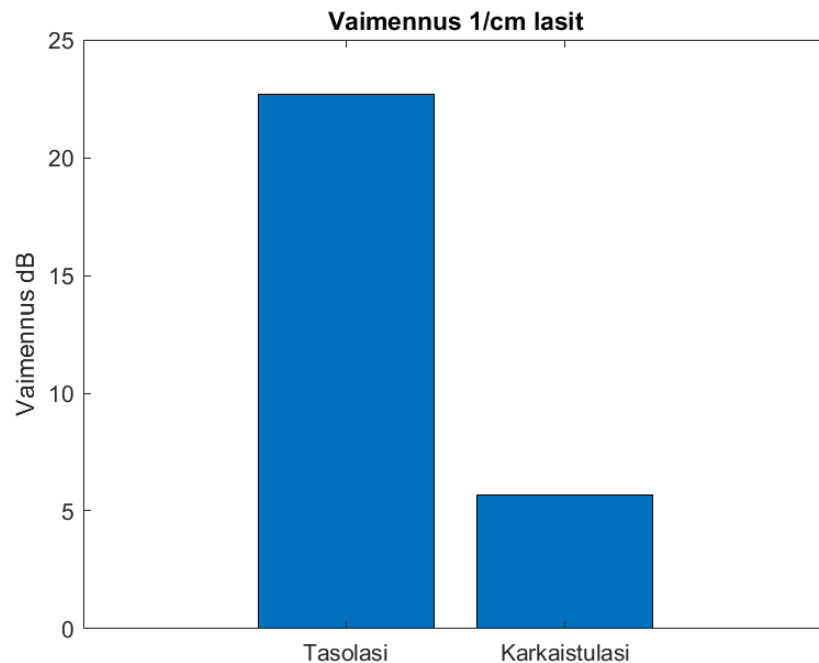


Kuva 5. Mitattava materiaali on sijoitettu vastaanottimen eteen.

Materiaali	Vaimennus dB	Paksuus mm	Vaimennus 1/cm dB
MDF	1.73	9.20	1.88
Kipsilevy	0.95	15.00	0.63
Lastulevy	2.46	12.00	2.05
Laminoitu MDF	3.40	16.20	2.10
Kuusilevy	5.30	18.00	2.94
Polykarbonaatti	0.10	3.00	0.33
Kovalevy	1.00	3.00	3.33
Tasolasi	22.70	10.00	22.70
Karkaisttu lasi	1.70	3.00	5.67
Puuvilla	6.70	300.00	0.22
Kivivilla	2.30	100.00	0.23

Taulukko 1. Keskiarvoistetut materiaalien summat.

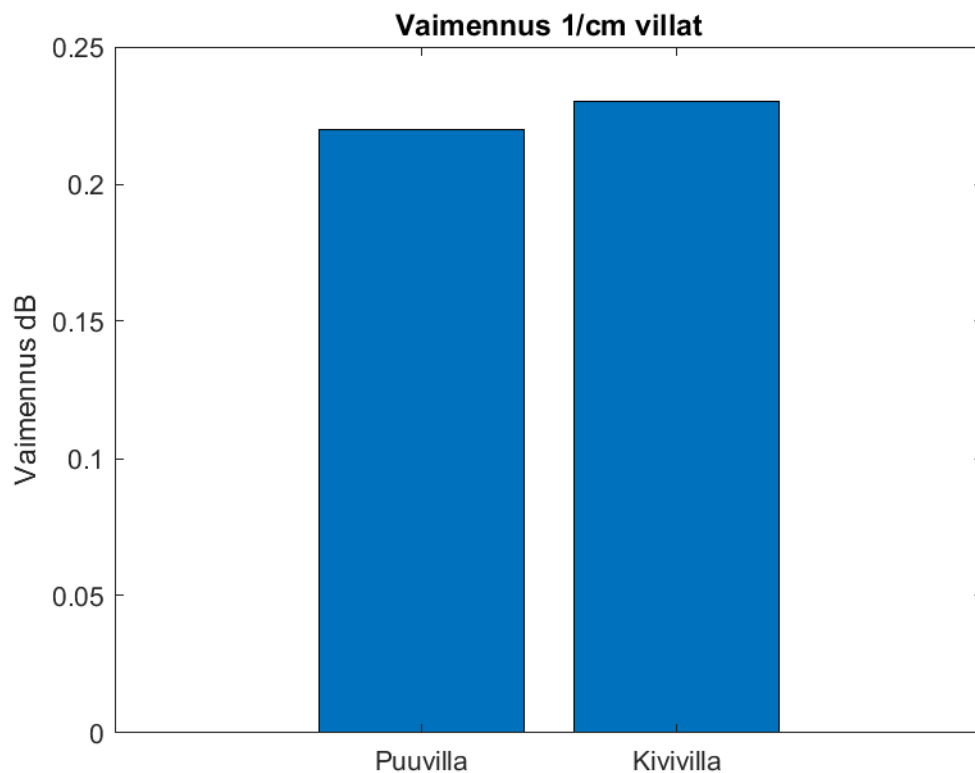
Mittaustulokset on jaettu kolmeen eri kuvaajaan (kuvaajat 2, 3 ja 4), jotta eri materiaalien vaimennusten vertailu olisi helpompaa. Kuvaajassa 2 näkyy kahden eri lasin vaimennus yhden senttimetrin matkalla.



Kuvaaja 2. Tasolasin ja karkeistetun lasin 1/cm vaimennus.

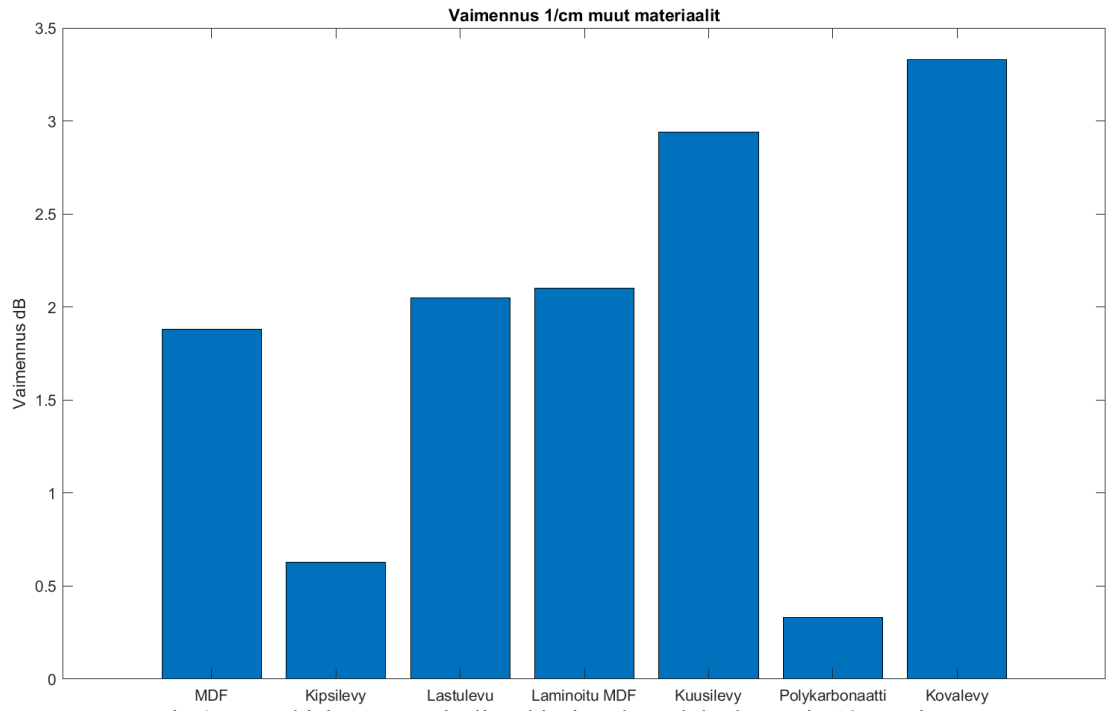
Kuten kuvaajasta 2 huomataan, erilaisilla lasin valmistusmenetelmillä on vaikutusta myös lasin vaimennukseen. Tasolasi vaimentaa noin 99 % signaalista yhden senttimetrin matkalla, kun taas karkaistu lasi vaimentaa noin 73 % signaalin tehosta kyseisellä matkalla. Tästä huomataan, että lasimateriaalit vaimentavat signaaleja tehokkaasti.

Kuvaajassa 3 on eritelty kaksi eri villamateriaalia: puu- ja kivivilla. Suuria eroja puu- ja kivivillan vaimennuksissa ei ole. Molemmat villat vaimentavat noin 5 % signaalin tehosta yhden senttimetrin matkalla.



Kuvaaja 3. Puu- ja kivivillan 1/cm vaimennus.

Kuvaaja 4 sisältää puupohjaiset materiaalit, kipsin sekä polykarbonaatin. Kuvaajasta 4 huomataan, että puupohjaiset materiaalit vaimentavat enemmän kuin kipsi tai polykarbonaatti. Esimerkiksi sekä kuusilevy että kovalevy vaimentavat signaalin noin puoleen alkuperäisestä tehostaan yhden senttimetrin matkalla, kun taas kipsilevy vaimentaa noin 14 % ja polykarbonaatti ainoastaan noin 7 % samalla matkalla.



Kuvaaja 4. Puupohjaisten materiaalien, kipsin sekä polykarbonaatin 1/cm vaimennus.

4. SEINIEN MALLINNUS MITTAUSTULOKSILLA

Tässä kappaleessa keskitytään kolmen eri seinän kokonaisvaimennuksiin, jotka on saatu laskemalla ensin jokaisen yksittäisen materiaalin vaimennus halutulla paksuudella aikaisemmin mainittujen mittaustuloksien avulla (kappale 3), minkä jälkeen nämä vaimennukset on summattu yhteen. Kokonaisvaimennus on laskettu kolmelle erilaiselle seinälle, joita ovat kevyt sisäseinä, kantava sisäseinä sekä talon ulkoseinä. Seinien rakennetta on yksinkertaistettu niin, ettei tukipaaluja ja koolauksia ole huomioitu laskuissa. Seinämateriaalien tiedot ja kuvat on toimittanut 7ELEMENT OÜ.

Lisäksi tässä kappaleessa vertaillaan laskettujen seinien kokonaisvaimennuksia aikaisemmin tehdyn tutkimuksen *BEL measurements for two office buildings in the frequency range 800 MHz-28 GHz from Nokia* 28 GHz:n taajuudella saatuihin tuloksiin [11].

4.1. Sisäseinät

Sisäseiniä, joille on laskettu kokonaisvaimennus, ovat kevyt sisäseinä ja kantava sisäseinä. Sekä kevyt sisäseinä että kantava sisäseinä mallintavat kuvan 6 mukaista sisäseinää.



Kuva 6. Sisäseinä [15].

Kevyt sisäseinä koostuu kipsilevyistä, lastulevyistä sekä kivivillasta taulukon 2 mukaisesti. Kantava sisäseinä koostuu samoista materiaaleista kuin kevyt sisäseinä.

Erona kevyeen sisäseinään on kivivillan paksuus, joka on kantavassa sisäseinässä kaksinkertainen kevyeen sisäseinään verrattuna (taulukko 3).

Materiaali	Paksuus mm	Vaimennus dB
Kipsilevy	12.50	0.79
Lastulevy	10.00	2.05
Kivivilla	75.00	1.73
Lastulevy	10.00	2.05
Kipsilevy	12.50	0.79
Summa	120.00	7.41

Taulukko 2. Kevyt sisäseinä.

Materiaali	Paksuus mm	Vaimennus dB
Kipsilevy	12.50	0.79
Lastulevy	10.00	2.05
Kivivilla	150.00	3.45
Lastulevy	10.00	2.05
Kipsilevy	12.50	0.79
Summa	195.00	9.13

Taulukko 3. Kantava sisäseinä.

Kevyt sisäseinä vaimentaa noin 82 % alkuperäisen signaalin tehosta. Kantavan sisäseinän kokonaisvaimennus on 9.13 dB, mikä tarkoittaa sitä, että sen läpi pääsee noin 12 % tulevasta signaalista. Kun kevyen ja kantavan sisäseinän kokonaisvaimennusta verrataan keskenään, huomataan kantavan sisäseinän vaimentavan alkuperäisen signaalin tehoa enemmän kuin kevyt sisäseinä.

4.2. Ulkoseinä

Ulkoseinä koostuu kipsilevyistä, lastulevyistä, kivivillasta ja kuusilevystä. Suurin ero sisäseiniin on kivivillan paksuus. Ulkoseinässä kivivillan paksuus on 400 mm (taulukko 4), joka on yli viisi kertaa enemmän kuin kevyessä sisäseinässä. Ulkoseinän kokonaisvaimennus on 20.27 dB. Tämä tarkoittaa sitä, että ulkoseinä vaimentaa noin 99 % tulevasta signaalista. Vaimennus on laskettu kuvan 7 mukaiselle ulkoseinälle.

Materiaali	Paksuus mm	Vaimennus dB
Kipsilevy	12.50	0.79
Lastulevy	10.00	2.05
Kivivilla	400.00	9.20
Lastulevy	10.00	2.05
Kuusilevy	21.00	6.18
Summa	453.50	20.27

Taulukko 4. Ulkoseinä.



Kuva 7. Ulkoseinä [15].

4.3. Mittaustulosten vertailu

Laskettuja mallinuksia vertaillaan tutkimuksen *BEL measurements for two office buildings in the frequency range 800 MHz-28 GHz from Nokia* 28 GHz:n taajuudella saatuihin tuloksiin [11]. Kyseisessä tutkimuksessa mitattiin signaalin vaimennusta perinteisen toimistorakennuksen ja modernin toimistorakennuksen läpi.

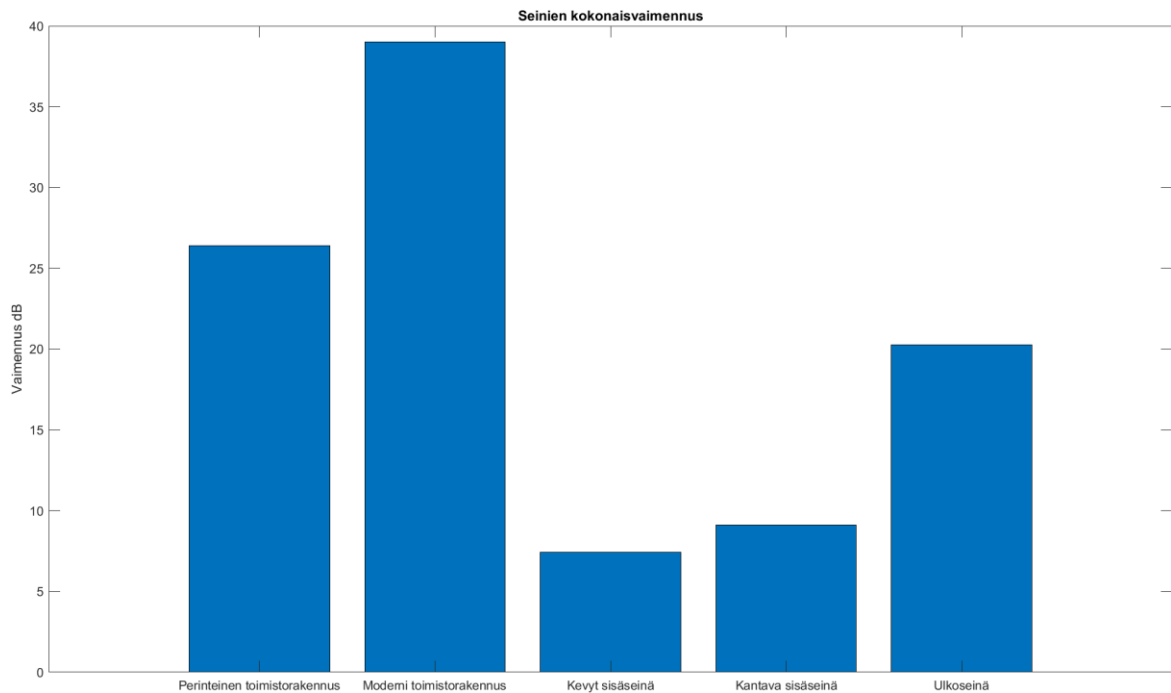
Perinteisen toimistorakennuksen seinä koostuu 10 cm paksuisesta tiiliskivi- ja betoniyhdistelmästä. Tässä seinässä on myös yksikerroksisia ikkunoita, joissa on puiset karmit. Modernin toimistorakennuksen seinä koostuu 45 cm paksuisesta tiiliskivi- ja betoniyhdistelmästä sekä muista eristyskerroksista, joita ei ole määritelty tarkemmin. Modernissa seinässä on kaksikerroksiset ikkunat metallillisilla karmeilla.

Taulukkoon 5 on koostettu vertailtavan tutkimuksen mittauksessa saadut vaimennukset 28 GHz:n taajuudella sekä tässä työssä mallinnettujen seinien vaimennukset. Taulukon 5 pohjalta luotiin kuvaaja 5.

Kuten taulukosta 5 ja kuvaajasta 5 huomataan, sisäseinät vaimentavat huomattavasti vähemmän kuin ulkoseinät, mikä johtuu tässä vertailussa joko seinien paksuudesta tai seinämateriaalien tiheydestä. Tässä työssä mallinnettu ulkoseinä on paksumpi kuin mallinnetut sisäseinät, minkä vuoksi se myös vaimentaa enemmän kuin sisäseinät. Vertailtavassa tutkimuksessa on käytetty tiheistä rakennusmateriaaleista, eli betonista ja tiilestä, valmistettuja seiniä. Rakennusmateriaalien tiheys aiheuttaa sen, että seinät vaimentavat signaalia enemmän.

Seinä	Vaimennus dB
Perinteinen toimistorakennus	26.4
Moderni toimistorakennus	39.0
Kevyt sisäseinä	7.41
Kantava sisäseinä	9.13
Ulkoseinä	20.27

Taulukko 5. Mittaustulosten vertailu.



Kuvaaja 5. Seinien kokonaisvaimennukset.

Seinien lisäksi myös ikkunoilla on suuri vaimennus, mikä huomataan tämän kandidaatintyön mittaustuloksista. Vertailtavassa tutkimuksessa ei kuitenkaan ole mainittu ikkunoiden tarkempia ominaisuuksia, joiden avulla pystyttäisiin määrittämään vaimennusominaisuuksia. Tämän vuoksi ikkunoiden vaikutusta vaimennukseen ei pystytä vertailemaan.

Vaikka vertailtavassa tutkimuksessa ja tässä työssä on käytetty eri rakennusmateriaaleista koostuvia seiniä, huomataan ulkoseinien vaimentavan tulevaa signaalia voimakkaasti. Tämä johtuu siitä, että käytetyt rakennusmateriaalit ovat joko tiheitä materiaaleja, kuten betoni ja tiili, tai seinät koostuvat monesta eri rakennusmateriaalista, minkä vuoksi seinät ovat paksuja.

5. MATERIAALISUMMIEN VARMISTUSMITTAUKSET

Yksittäisten materiaalien summien lisäksi mitattiin myös erilaisten materiaalien kokonaissummia, jotta pystyttäisiin varmistamaan seinäkokonaisuuksien kokonaisvaimennuslaskujen paikkansapitävyys. Tässä kappaleessa keskitytään varmistusmittauksiin ja niistä saatuihin tuloksiin.

Mittaukset tehtiin ensin jokaiselle materiaalille, minkä jälkeen ne laitettiin peräkkäin kiinni toisiinsa. Taulukko 6 kuvaa kyseisessä mittauksessa mitattujen yksittäisten materiaalien vaimennusta. Taulukkoon 7 on puolestaan koottu erilaisten laskettujen ja mitattujen materiaalien summista tehtyjä kokonaisuuksia. Taulukoissa 6 ja 7 käytetään taulukon 6 lyhenteitä.

Materiaali	Lyhenteet	Yhteispaksuus mm	Vaimennus dB
Kipsilevy	A	15	0.7
MDF	B	9.2	1.4
Lastulevy	C	12	1.8
Kivivilla	D	100	2.3
Ilma	E	100	0.5

Taulukko 6. Yksittäisten materiaalien mitattu vaimennus.

Kuten taulukosta 6 huomataan, eroavat sen vaimennuksen arvot taulukon 1 arvoista. Tämä johtuu siitä, että taulukossa 6 on käytetty varmistusmittauksissa saatuja arvoja, kun taas taulukko 1 koostuu useamman mittauskerran tuloksien keskiarvoista. Koska varmistusmittaukset tehtiin yhdellä mittauskerralla, on taulukossa 6 käytetty niitä arvoja, sillä näin saatiin mahdollisimman tarkat arvot eri materiaalien summille.

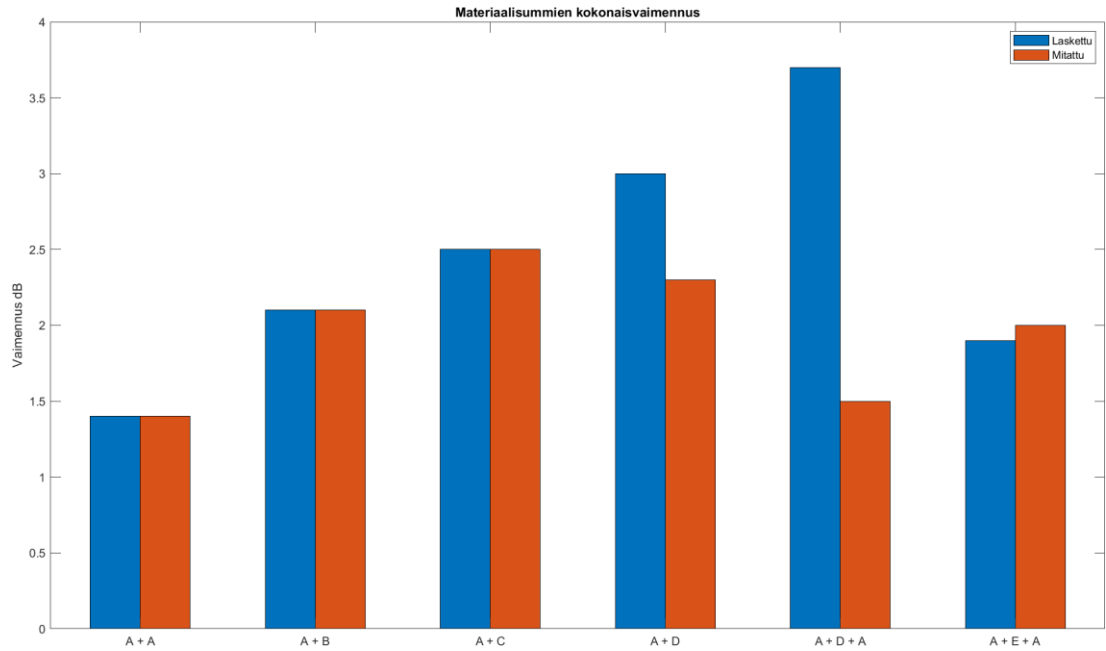
Taulukkoon 7 on koottu lasketut ja mitatut kokonaisvaimennukset. Sen perusteella on luotu kuvaaja 6, jossa lasketut arvot on merkitty sinisellä ja mitatut arvot oranssilla. Taulukosta 7 ja kuvaajasta 6 huomataan, että kivivillan vaimennus eroaa oletetusta.

Materiaali	Yhteispaksuus mm	Laskettu kokonaisvaimennus dB	Mitattu kokonaisvaimennus dB
A + A	30	1.4	1.4
A + B	24.2	2.1	2.1
A + C	27	2.5	2.5
A + D	115	3.0	2.3
A + D + A	130	3.7	1.5
A + E + A	130	1.9	2.0

Taulukko 7. Eri materiaalisummien lasketut ja mitatut kokonaisvaimennukset.

Materiaaliyhdistelmät, jotka eivät sisältäneet kivivillaa, saivat oletetun kokonaisvaimennuksen lukuun ottamatta A + E + A -yhdistelmää, jossa vaimennusta on 0.1 dB enemmän kuin sen lasketussa kokonaisvaimennuksessa. Ne materiaaliyhdistelmät, jotka sisälsivät kivivillaa, saivat huomattavasti heikomman kokonaisvaimennuksen kuin oli laskettu. Taulukon 7 mukaan kivivillan vaimennus on 2.3 dB, mutta varmennusmittauksissa saatu tulos olikin eri (kuvaaja 6). Taulukossa 7 nähtävä kipsilevyn ja kivivillan yhdistelmäkokonaisuus sai saman kokonaisvaimennuksen kuin pelkkä kivivilla (taulukko 6).

Yhdistelmässä A + D + A kivivilla sijoitettiin kahden kipsilevyn väliin. Kokonaisvaimennukseksi saatiin 1.5 dB, joka on vain 0.1 dB suurempi kuin pelkän kahden kipsilevyn vaimennus. Mittaus toistettiin, mutta tällä kertaa kivivilla poistettiin kipsilevyjen välistä, ja huomattiin, että vaimennus kasvoi 2.0 dB:iin. Tästä huomattiin, että kivivillalla on odottamattomia ominaisuuksia.



Kuvaaja 6. Eri materiaalisummien lasketut ja mitatut kokonaisvaimennukset.

Kivivillan varmistusmittausten odottamattomat tulokset voisivat esimerkiksi johtua siitä, että kun signaali menee kivivillan läpi, se heijastuu edestakaisin muodostaen kapeamman, mutta vahvemman pääkeilan. Toinen vaihtoehto olisi, että kivivilla kääntäisi polarisaatioita, sillä mittauksissa lähetettiin pysty- ja vaakapolarisaatiossa tulevaa signaalia. Todellista syytä kivivillan käyttäytymiselle ei saatu tämän työn puitteissa selville, minkä vuoksi jatkotutkimukselle olisi tarvetta.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin erilaisten rakennusmateriaalien läpäisyominaisuuksia 28 GHz:n taajuudella. Päätaavoitteena oli laskea jokaiselle materiaalille 1/cm vaimennus ja mallintaa niiden avulla kolme erilaista seinää: kevyt sisäseinä, kantava sisäseinä ja ulkoseinä. Seinien kokonaisvaimennus määriteltiin yksittäisten materiaalien 1/cm vaimennusten avulla.

Mittaukset tehtiin käyttämällä yhtä lähetinantennia ja seitsemää vastaanottoantennia. Yhden vastaanottoantennin tarkoituksena oli mitata signaalin tehoa, kun taas lopuilla kuudella pystyttiin tarkentamaan pääkeilan sijaintia ja varmistamaan, ettei mistään tule ei-haluttuja heijastuksia. Yksittäisten mittausten lisäksi tehtiin myös varmistusmittauksia, joiden avulla pyrittiin varmistamaan, että aikaisempien mittaustuloksien perusteella tehdyt seinäkokonaisuuksien vaimennuslaskelmat pitävät paikkansa.

Koska kyseessä on kandidaatintyö, mittauksia ei pystytty toteuttamaan halutussa mittakaavassa. Myöskään kivivillan ominaisuuksia ei pystytty tutkimaan lisää, vaikka seinien mallinnusmittauksissa ja materiaalisummien varmistusmittauksissa havaittiin olevan ristiriitaa kivivillan käyttäytymisen suhteen. Työtä voisi jatkaa esimerkiksi diplomityön muodossa, jolloin myös mittaustarkkuutta voisi parantaa muun muassa käyttämällä lasermittaa mittanauhan sijasta, ja tällä tavalla ehkäistä mittausrvirheiden tapahtumista. Tällöin voisi tehdä myös useampia mittauksia ja varmistusmittauksia sekä tutkia syvemmin kivivillan ominaisuuksia.

7. LÄHTEET

NOKIA Oyj, URL: https://www.nokia.com/fi_fi/

- [1] Arjmandi M.K. (2016) 5G Overview—Key Technologies. Teoksessa:
Hu, F. (2016) Opportunities in 5G Networks: A Research and Development
Perspective. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [2] Simsek, M., Aijaz A., Dohler M., Sachs J. & Fettweis G. (2016) 5G-Enabled
Tactile Internet. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN
COMMUNICATIONS*, VOL. 34, NO, 3, URL:
[https://www.researchgate.net/profile/Adnan_Aijaz/publication/294108489_5G-
Enabled_Tactile_Internet/links/572a56f908aef5d48d30cc16/5G-Enabled-
Tactile-Internet.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Adnan_Aijaz/publication/294108489_5G-Enabled_Tactile_Internet/links/572a56f908aef5d48d30cc16/5G-Enabled-Tactile-Internet.pdf)
- [3] Matinmikko M. & Latva-aho M. (2017) 5G tuo verkkoihin mikro-operaattorit.
Uusiteknologia 2/2017, URL:
<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe2017112955135.pdf>
- [4] (2017) Compilation of measurement data relating to building entry loss. *Report
ITU-R P. 2345-2*. Electronic Publication, Geneva. URL:
https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.2346-2-2017-PDF-E.pdf
- [5] Koch, A. (luettu 11.8.2019) Electromagnetic Waves: Definetion, Sources &
Properties. URL:
[https://study.com/academy/lesson/electromagnetic-spectrum-and-waves-
definition-categories.html](https://study.com/academy/lesson/electromagnetic-spectrum-and-waves-definition-categories.html)
- [6] Schmitt, R. (2002) Electromagnetics explained: A handbook for wireless/RF,
EMC, and high-speed electronics. Amsterdam; Boston: Newnes, 84-86 s.

- [7] Räisänen, A & Lehto, A (2011) Radiotekniikan Perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy. 27-28 s., 29-30 s., 151-154 s.
- [8] Sevgi L. (2017) A practical guide to EMC engineering: Levent sevgi. Boston: Artech House. 103 s.
- [9] Bhuaria, I, Pourush, R ja Godara, D.R (2018) Free Space Path Loss Statistics of 35 GHz Wave Prevailing in Desert Region of India. Teoksessa: Mody University International Journal of Computing and Engineering Research Vol. 2 Issue.
College of Engineering and Technology, Mody University of Science and Technology
Lakshmangarh, Sikar, Rajasthan, INDIA
- [10] Nigam, N. (Luettu 12.9.2019) Free Space Loss. URL:
http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Free_Space_Loss.pdf
- [11] (2017) Compilation of measurement data relating to building entry loss. *Report ITU-R P. 2345-2*. Electronic Publication, Geneva. 184-186 s. URL:
https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.2346-2-2017-PDF-E.pdf

Kuvat

- [12] Sähkömagneettinen aalto (Katsottu 6.10.2019) URL:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_waves.png
- [13] Polarisaatio (Katsottu 6.10.2019) URL:

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Polarisation_state_-_Right-circular_polarization.svg

[14] Antennin suuntakuviokuva (Katsottu 6.10.2019) URL:

https://en.wikipedia.org/wiki/Main_lobe

[15] 7ELEMENT, työssä käytetyt kuvat (6 & 7) yrityksen luvalla, URL:

<http://www.7element.ee/home-fi/>