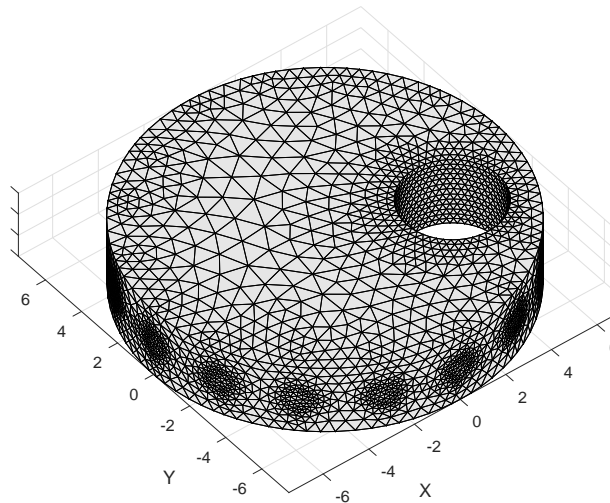


# Monitaajuusimpedanssitomografia raudoitteita sisältävän rakenteen kuvantamisessa

*Niko Hänninen*



*Pro gradu -tutkielma  
18. toukokuuta 2017  
Itä-Suomen yliopisto  
Sovelletun fysiikan laitos*

ITÄ-SUOMEN YLIOPISTO, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta

Sovelletun fysiikan koulutusohjelma, laskennallinen fysiikka

Niko Hänninen: Monitaajuusimpedanssitomografia raudoitteita sisältävän rakenteen kuvantamisessa

Pro Gradu -tutkielma, 51 sivua

Tutkielman ohjaajat: FT Aku Seppänen (pääohjaaja) ja FM Antti Voss

Toukokuu 2017

---

Avainsanat: monitaajuusimpedanssitomografia, raudoite, korroosio, mf-EIT

### Tiivistelmä

Impedanssitomografia (EIT) on sähköinen kuvantamismenetelmä, jossa tavoitteena on estimoida mitattavan kohteen kompleksista admittiivisuuskajakaumaa kohteen pinnalta tehtyjen potentiaalimittausten avulla. Menetelmää voidaan soveltaa esimerkiksi teollisuuden ja lääketieteen kuvantamisessa, ja laboratoriotutkimuksissa sen on havaittu olevan potentiaalinen menetelmä betonin ainetta rikkomattomaan kuvantamiseen. Yleensä impedanssitomografian mittauksissa käytetään yhtä vaihtovirran taajuutta, mutta mittaukset voidaan suorittaa käyttämällä useampaa taajuutta jolloin käytetään termiä monitaajuusimpedanssitomografia (mf-EIT).

Tässä Pro Gradu -tutkielmassa tutustuttiin monitaajuusimpedanssitomografian teoriaan ja sovelluksiin. Tavoitteena oli tutkia menetelmän soveltumista raudoitteita sisältävän rakenteen (kuten betonin) kuvantamiseen, ja erityisesti raudoitteiden korroosion havaitsemista menetelmän avulla. Työssä suoritettiin kokeellinen osio, jossa tutustuttiin EIT:n mittausperiaatteeseen ja laboratoriomittausten avulla määritettiin elektrodien kontaktimpedanssit. Raudoitteiden korroosion havaitsemista mf-EIT:llä tutkittiin numeeristen simulaatioiden avulla MATLAB-ohjelmalla. Kompleksisten admittiivisuuskajakaumien rekonstruktiot laskettiin simuloidusta impedanssitomografiadatasta Bayesilaisten inversiomenetelmien avulla.

Laboratoriomittauksissa elektrodien kontaktimpedanssit määritettiin yksinkertaisten impedanssimittausten avulla vesisäiliössä. Mittauksissa havaittiin mittauslaitteiston sisäisillä impedansseilla olevan merkittävä vaikutus mittaustuloksiin, ja niiden huomioimisella tulosten laatua saatiin merkittävästi parannettua. Määritetyt kontaktimpedanssit vastasivat kvalitatiivisesti muissa tutkimuksissa saatuja tuloksia.

Simulaatioissa rakenteen sisältämän raudoitteen korroosiota simuloitiin mittausasetelmassa jossa kuvannettava kohde sisälsi metallirakenteen. Metallirakenteen ja ympäröivän materiaalin välistä kontaktimpedanssia muuttamalla simuloitiin korroosion muodostumista metallikohteen pinnalle. Mittauksia usealla eri taajuudella simuloitiin muuttamalla sekä mittauselektrodien että metallirakenteen kontaktimpedansseja.

Korroosion muodostuminen metallikappaleen pintaan oli havaittavissa simulaatioista lasketuissa rekonstruktioissa. Korroosio oli havaittavissa admittiivisuuden reaali- ja/tai imaginääriosassa, ja mittauksissa käytetty vaihtovirran taajuus vaikutti korroosion havaitsemiseen rekonstruktioissa. Erityisesti korkeilla taajuuksilla korroosion muodostuminen oli havaittavissa admittiivisuuden imaginääriosassa ja matalilla taajuuksilla admittiivisuuden reaali-osassa. Raudoitteita sisältävän materiaalin kuvantaminen on näiden simulaatioiden perusteella mahdollista impedanssitomografian avulla, ja monitaajuusimpedanssitomografian avulla rakenteesta voidaan saada enemmän tietoa kuin yhdellä taajuudella mitattaessa.

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Impedanssitomografia</b>	<b>3</b>
2.1	Suora ongelma . . . . .	4
2.1.1	Variationaalimuoto ja FEM-approksimaatio . . . . .	7
2.2	Käänteisongelma . . . . .	10
2.3	Monitaajuusimpedanssitomografia . . . . .	12
2.4	Sovellukset . . . . .	13
2.4.1	Prosessitomografia . . . . .	13
2.4.2	Lääketieteen sovellukset . . . . .	14
2.4.3	Ainetta rikkomaton testaus . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Elektrodien kontakti-impedanssien kokeellinen määrittäminen</b>	<b>16</b>
3.1	Mittausasetelma . . . . .	16
3.2	Tulokset . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Simulaatiot</b>	<b>24</b>
4.1	Simulaatiot jatkuvan admittiivisuusjakauman tilanteessa . . . . .	25
4.1.1	Datan simulointi ja rekonstruktion laskenta . . . . .	25
4.1.2	Tulokset ja pohdinta . . . . .	27
4.2	Simulaatiot sisäelektrodihilalla . . . . .	29
4.2.1	Datan simulointi ja rekonstruktion laskenta . . . . .	29
4.2.2	Tulokset ja pohdinta . . . . .	31
4.3	Raudoitteen korroosion havaitseminen monitaajuusimpedanssitomografian avulla . . . . .	33
4.3.1	Datan simulointi ja rekonstruktion laskenta . . . . .	34
4.3.2	Tulokset ja pohdinta . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>41</b>

# 1 Johdanto

Impedanssitomografia (*Electrical Impedance Tomography, EIT*) on sähköinen ainetta rikkomaton kuvantamismenetelmä, jossa estimoidaan mitattavan kohteen admittiivisuusjakaumaa. Impedanssitomografiamittauksissa kohteen pinnalle asetetaan elektrodit, joiden kautta kappaleeseen johdetaan heikkoa vaihtovirtaa ja mitataan siihen syntyvät potentiaalierot [1, 2]. Pinnalta tehdyistä potentiaalimittauksista voidaan estimoida kohteen kompleksista admittiivisuusjakaumaa ja muodostaa kaksi- tai kolmiulotteinen rekonstruktio. Monissa tilanteissa admittiivisuusjakaumasta saadaan tietoa kappaleen sisäisestä rakenteesta. Esimerkiksi keuhkojen sisältämän ilman sähköjohtavuus on huomattavasti ympäröivää kudosta matalampi, jolloin keuhkojen sisältämän ilman määrää voidaan tarkkailla johtavuusjakauman avulla.

Impedanssitomografiaa voidaan soveltaa useilla eri aloilla, esimerkiksi lääketieteellisessä kuvantamisessa ja teollisessa prosessitomografiassa. Lääketieteellisessä kuvantamisessa menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi keuhkojen ja pään kuvantamiseen [3, 4]. Teollisuudessa impedanssitomografia soveltuu hyvin esimerkiksi sekoitusprosessien kuvantamiseen [5–8].

Lääketieteellisen ja teollisen kuvantamisen lisäksi impedanssitomografia on potentiaalinen kuvantamismenetelmä betonin kuvantamiseen. Betoni on tällä hetkellä maailman käytetyin rakennusmateriaali [9]. Betonin raudoitteiden korroosio, halkeamat ja sen sisältämä kosteus vaikuttavat betonirakenteen kestävyyyteen merkittävästi. Näiden havaitseminen pinnalta käsin on usein mahdotonta, joten mittausmenetelmät näiden ominaisuuksien selvittämiseksi ovat tärkeitä. Impedanssitomografialla on aiemmin monitoroitu kosteuden etenemistä [10] sekä paikannettu halkeamia ja raudoitteita [9, 11] sementtipohjaisissa materiaaleissa. Myös betoniraudoitteiden korroosion havaitseminen EIT:llä voisi olla mahdollista, koska korroosion on havaittu vaikuttavan impedanssimittauksiin impedanssispektroskopiassa [12–15].

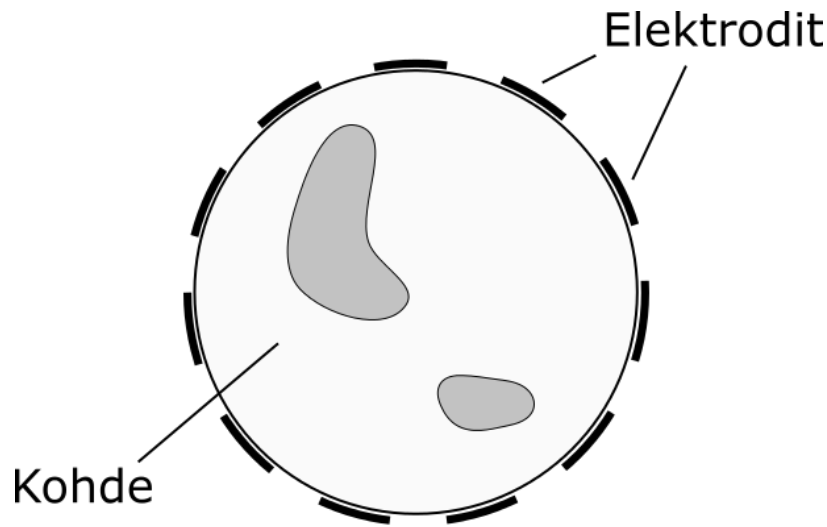
Yleensä impedanssitomografiassa mittaukset suoritetaan käyttämällä yhtä vaihtovirran taajuutta. Mittauksia voidaan tehdä myös usealla eri taajuudella, jolloin menetelmää kutsutaan nimellä monitaajuusimpedanssitomografia (*Multi-Frequency Electrical Impedance Tomography, mf-EIT*). Monien materiaalien admittiivisuus riippuu vaihtovirran taajuudesta, jolloin usealla taajuudella mitattaessa kohteesta saadaan enemmän tietoa kuin yhdellä taajuudella. Impedanssitomografian käänteisongelman

huonokuntoisuutta voidaan myös parantaa käyttämällä useampaa taajuutta, jos kohteen materiaalin ominaisuuksien taajuusriippuvuudesta tiedetään tarpeeksi [16].

Tässä tutkielmassa tutustutaan monitaajuusimpedanssitomografian laskennallisiin menetelmiin. Tavoitteena on erityisesti tutkia monitaajuusimpedanssitomografian soveltuvuutta raudoitteita sisältävän rakenteen (kuten betonirakenteen) kuvantamiseen. Tässä työssä raudoitteiden vaikutusta mf-EIT mittauksiin ja rekonstruktioihin testataan yksinkertaisten laboratorikokeiden ja numeeristen simulaatioiden avulla. Simulaatioissa admittiivisuuskajakaumien rekonstruktio lasketaan Bayesilaisten menetelmien avulla.

Luvussa 2 tutustutaan impedanssitomografian mittausperiaatteeseen, teoriaan ja sovelluksiin. Luvussa 3 esitellään yksinkertainen mittausasetelma kontaktiimpedanssien kokeelliseen määrittämiseen ja laboratorikokeiden tulokset. Luvussa 4 tutkitaan impedanssitomografian soveltuvuutta raudoitteita sisältävän materiaalin kuvantamiseen numeeristen simulaatioiden avulla, ja Luvussa 5 on esitelty tämän tutkielman johtopäätökset.

## 2 Impedanssitomografia



Kuva 1: Esimerkki impedanssitomografian mittausasetelmasta.

Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen EIT:n mittausasetelma. Kappaleen pinnalle asetetaan elektrodit, ja heikkoa vaihtovirtaa syötetään kerrallaan kahden elektrodin avulla kappaleeseen ja mitataan elektrodeille syntyvät potentiaalit. Potentiaalimitauksista voidaan estimoida kappaleen kompleksista admittiivisuuskajaamaa. Usein sovelluksissa admittiivisuuskajaan sijaan estimoidaan pelkästään sen reaaliosaa eli johtavuuskajaamaa. Tätä menetelmää kutsutaan sähköiseksi resistanssitomografiaksi (*ERT*, *Electrical Resistance Tomography*), vaikkakin joissakin yhteyksissä siitä käytetään myös nimitystä impedanssitomografia. Etenkin matalilla taajuuksilla monien materiaalien kapasitiiviset efektit ovat hyvin pieniä, jolloin admittiivisuus- ja johtavuuskajauma ovat hyvin lähellä toisiaan.

Admittiivisuuskajaan lisäksi usein estimoidaan mittauksessa käytettävien elektrodien kontakti-impedansseja. Kontakti-impedanssilla tarkoitetaan elektrodin ja mitattavan kohteen pinnan välistä impedanssia, joka syntyy materiaalien rajapinnan sähköisestä kytkennästä. Kontakti-impedanssin suuruus riippuu elektrodien ja kohteen materiaaleista ja niiden välisestä kytkennästä, ja sen huomioiminen inversio-ongelman laskennassa parantaa rekonstruktion tarkkuutta.

Admittiivisuus- tai johtavuuskajaan estimointi mitatuista potentiaaleista on yleensä epälineaarinen huonosti asetettu käänteisongelma, mikä tarkoittaa sitä, että ongelmalla ei ole välttämättä yksikäsitteistä ratkaisua ja ratkaisu on herkkä pienil-

le mittausedatan muutoksille sekä mallinnusvirheille. Tällaisten ongelmien ratkaisemisessa käytetään usein regularisointia. Käänteisongelman ratkaisemiseksi on myös ratkaistava suora ongelma, missä ongelmana on ratkaista elektrodien jännitteet kun syötetyt virrat ja kappaleen admittiivisuusjakauma tunnetaan. Tällä hetkellä tarkoin käytössä oleva malli on niin sanottu täydellinen elektrodimalli (*Complete Electrode Model*). Suora ongelma koostuu osittaisdifferentiaaliyhtälöstä ja sen reunaehdoista, ja sen ratkaiseminen analyttisesti on mahdollista yksinkertaisissa tapauksissa, mutta yleensä ongelma ratkaistaan numeerisesti. Eräs yleisesti käytetty numeerinen ratkaisumenetelmä on äärellisten elementtien menetelmä (*Finite Element Method, FEM*), missä laskenta-alue diskretisoidaan äärelliseen määrään elementtejä joissa ongelma ratkaistaan.

Virtaa voidaan syöttää kappaleeseen usealla eri tavalla, mikä vaikuttaa siihen miten paljon lineaarisesti riippumattomia mittauksia kappaleesta voidaan mitata [17]. Usein virtaa syötetään kahden elektrodin välillä kerrallaan, ja elektrodien potentiaalit mitataan muiden elektrodiparien välillä. Virta syötetään yleensä joko kahden vastakkaisen tai vierekkäisen elektrodin välillä. Virtaa voidaan syöttää myös useasta elektrodista samanaikaisesti, ja potentiaalit voidaan mitata kaikkien elektrodien välillä suhteessa yhteen referenssielektrodiin.

## 2.1 Suora ongelma

Impedanssitomografian matemaattinen malli pohjautuu Maxwellin yhtälöihin [18]. Maxwellin yhtälöt epähomogeenisessä materiaalissa voidaan kirjoittaa muodossa

$$\nabla \cdot D = \rho_c \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2.4)$$

missä  $E$  on sähkökenttä,  $D$  sähkövuon tiheys,  $B$  magneettivuon tiheys,  $H$  magneettikentän voimakkuus,  $\rho_c$  varaustiheys ja  $J$  sähkövirran tiheys. Jos oletetaan että syötetyt virrat ovat ajan suhteen harmonisia, sähkökentälle ja magneettikentälle voi-

daan kirjoittaa kompleksiset faasoriesitykset

$$E = Ee^{j\omega t} \quad (2.5)$$

$$B = Be^{j\omega(t+\phi)}, \quad (2.6)$$

missä  $\omega$  on sähkövirran taajuus,  $t$  aika,  $\phi$  vaihe-ero ja  $j$  imaginääriyksikkö. Jos väliaine on lineaarista ja isotrooppista, sähkövuon tiheys ja magneettivuon tiheys voidaan kirjoittaa muodossa

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.7)$$

$$B = \mu H, \quad (2.8)$$

missä  $\mu = \mu(x)$  on väliaineen magneettinen permeabiliteetti,  $\epsilon_r = \epsilon_r(x)$  suhteellinen permittiivisyys,  $\epsilon_0$  tyhjiön permittiivisyys ja  $x$  spatiaalinen koordinaatti. Yhtälöiden (2.7) - (2.8) ja (2.5) - (2.6) avulla Maxwellin yhtälöt (2.3) ja (2.4) voidaan kirjoittaa muodossa

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2.9)$$

$$\nabla \times H = J + j\omega\epsilon_0\epsilon_r E. \quad (2.10)$$

Virrantiheys  $J$  voidaan kirjoittaa muodossa  $J = J_s + J_o$ , missä  $J_s$  on kohteen sisällä olevien virranlähteiden muodostama virrantiheys,  $J_o = \sigma E$  ohminen virta ja  $\sigma = \sigma(x)$  sähkönjohtavuus. Tällöin Maxwellin yhtälöt (2.9) - (2.10) kappaleen sisällä voidaan kirjoittaa muodossa

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2.11)$$

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)E + J_s. \quad (2.12)$$

Yleensä kappaleen sisällä ei ole sähkövirran lähteitä, jolloin  $J_s = 0$ .

Sähkökenttä kappaleen sisällä voidaan kirjoittaa muodossa

$$E = -\nabla u + \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2.13)$$

missä  $u = u(x)$  on sähköinen potentiaali ja  $A$  magneettinen vektoripotentiaali. Vaikka impedanssitomografiassa käytetään vaihtovirtaa, usein virran aikariippuvuutta ei oteta huomioon vaan sähkökenttä approksimoidaan vakioksi ajan suhteen jolloin  $\frac{\partial A}{\partial t} \approx 0$ .



Tätä kutsutaan niin sanotuksi kvasistaattiseksi approksimaatioksi, ja se pätee varsin hyvin kun vaihtovirran taajuus on pieni. Tällöin sähkökenttä  $E$  kappaleen sisällä voidaan esittää muodossa

$$E = -\nabla u. \quad (2.14)$$

Ottamalla yhtälöstä (2.12) divergenssi puolittain ja sijoittamalla siihen yhtälö (2.14) ja olettamalla  $J_s = 0$  saadaan kirjoitettua malli kappaleen sisällä

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla u = 0 \quad x \in \Omega, \quad (2.15)$$

missä  $\Omega$  on tarkasteltava alue.

Jos oletetaan alueeseen syötetyt virrat  $I_l$  tunnetuiksi, voidaan reunaehdot kirjoittaa muodossa

$$\int_{e_l} (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r) \frac{\partial u}{\partial n} dS = I_l \quad x \in e_l, l = 1, 2, \dots, L \quad (2.16)$$

$$(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r) \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad x \in \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^L e_l, \quad (2.17)$$

missä  $e_l$  on  $l$ :nen elektrodin pinta,  $I_l$  syötetty virta,  $L$  elektrodien määrä,  $\partial\Omega$  alueen  $\Omega$  reuna ja  $n$  pinnan yksikkönormaali joka suuntautuu ulos pinnasta. Reunaehdoissa toisin sanottuna virta jokaisen elektrodin läpi on tunnettu, ja muualla kuin elektrodeilla virta reunan läpi on nolla. Täydellinen elektrodimalli ottaa huomioon myös elektrodien ja kohteen välisen kontakti-impedanssin. Kontakti-impedanssi syntyy elektrodien ja kohteen välisistä sähkökemiallisista reaktioista joissa syötetty sähkövirta muuttuu kappaleessa ioniseksi virtaukseksi. Koko elektrodin voidaan olettaa olevan tasapotentiaalissa, ja kun otetaan huomioon kontakti-impedanssi voidaan potentiaali elektrodilla kirjoittaa muodossa

$$u + z_l(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r) \frac{\partial u}{\partial n} = U_l \quad x \in e_l, l = 1, 2, \dots, L, \quad (2.18)$$

missä  $U_l$  on potentiaali elektrodilla  $l$  ja  $z_l$  on elektrodin  $l$  kontakti-impedanssi.

Täydellinen elektrodimalli koostuu yhtälöstä (2.15) sekä reunaehdoista (2.16) - (2.18)

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla u = 0 \quad x \in \Omega \quad (2.19)$$

$$u + z_l(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\frac{\partial u}{\partial n} = U_l \quad x \in e_l, l = 1, 2, \dots, L \quad (2.20)$$

$$\int_{e_l} (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\frac{\partial u}{\partial n} dS = I_l \quad x \in e_l, l = 1, 2, \dots, L \quad (2.21)$$

$$(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad x \in \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^L e_l. \quad (2.22)$$

Näiden lisäksi varauksen säilymislain

$$\sum_{l=1}^L I_l = 0 \quad (2.23)$$

on toteuduttava, eli kohteessa ei ole sisäisiä sähkövirran lähteitä. Lisäksi jotta suoran ongelman yksikäsitteinen ratkaisu olisi olemassa, täytyy määrätä sähköisen potentiaalın referenssitaso. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi asettamalla

$$\sum_{l=1}^L U_l = 0, \quad (2.24)$$

jolloin ratkaisu on olemassa ja se on yksikäsitteinen [19].

### 2.1.1 Variationaalimuoto ja FEM-approksimaatio

Suoran ongelman (yhtälöt (2.19) - (2.22)) ratkaisemiseen numeerisesti käytetään usein FEM-menetelmää. FEM-menetelmässä alkuperäinen ongelma kirjoitetaan niin sanotussa variationaalimuodossa ja variationaaliongelman ratkaisemiseksi laskenta-alue jaetaan äärelliseen määrään elementtejä. Ongelman dimensiosta riippuen elementit voivat olla viivoja (1D), monikulmioita (2D) tai monitahokkaita (3D) ja ne koostuvat solmupisteistä ja sivuista. Variationaaliongelman ratkaisua approksimoidaan äärellisellä summalla

$$u(x) \approx \sum_{i=1}^K u_i \phi_i(x), \quad (2.25)$$

missä  $\phi_i(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, K$  ovat kantafunktioita ja  $K$  solmupisteiden lukumäärä. Galerkinin FEM-approksimaatiossa testifunktiot  $v$  valitaan kantafunktioiksi  $\phi_i$ . Kantafunktiot voidaan valita vapaasti diskretoidusta ratkaisuavaruudesta, kunhan ne ovat lineaarisesti riippumattomia. Kantafunktiot  $\phi_i$  valitaan kuitenkin usein niin että ehto

$$\phi_i(x_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & \text{muulloin} \end{cases} \quad (2.26)$$

täyttyy, missä  $x_j$  ovat solmupisteitä. Kantafunktio  $\phi_i$  saa siis arvon 1 solmupisteessä  $i$  ja muissa solmupisteissä arvon 0. Tällä valinnalla parametri  $u_i$  on siis reuna-arvo-ongelman (2.19) - (2.22) ratkaisun approksimaatio solmupisteessä  $i$  kohteen sisällä. Parametrisoidaan lisäksi potentiaaleja elektrodeilla summalla

$$U^h \approx \sum_{j=1}^{L-1} \beta_j n_j \quad (2.27)$$

missä kantafunktiot  $n_j$  voidaan valita esimerkiksi siten että  $n_1 = (1, 1, 0, 0, \dots, 0)^T \in \mathbb{R}$ ,  $n_2 = (1, 0, -1, 0, \dots, 0)^T \in \mathbb{R}$  ja niin edelleen jolloin ehto (2.24) täyttyy. Nyt siis kertoimien  $u_i$  ja  $\beta_i$  avulla voidaan laskea alkuperäisen ongelman potentiaalien suuruksia kappaleen sisällä ja elektrodeilla kaavan (2.27) avulla.

Valitaan testifunktiot  $v$  kuulumaan Sobolevin avaruuteen  $v \in H^1(\Omega)$  ja  $V \in \mathbb{R}^L$ . Nyt täydellinen elektrodimalli (2.19) - (2.22) voidaan kirjoittaa variaationaalimuodossa [2, 19]

$$B((u, U), (v, V)) = \sum_{l=1}^L I_l V_l, \quad \forall (v, V) \in H \quad (2.28)$$

missä  $H = H^1(\Omega) \times \mathbb{R}^L$  ja  $B$  on bilineaarimuoto

$$B((u, U), (v, V)) = \int_{\omega} (\sigma + j\omega\epsilon_o\epsilon_r) \nabla u \cdot \nabla v dx + \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_l} \int_{e_l} (u - U_l)(v - V_l) dS. \quad (2.29)$$

Sijoittamalla approksimaatiot (2.25) ja (2.27) variaationaalimuotoon (2.28) ja valitsemalla  $v = \phi_i$  ja  $V = n_j$  yhtälö voidaan kirjoittaa matriisimuodossa [2]

$$A\theta = I, \quad (2.30)$$

missä  $\theta = (u, \beta)^T$ ,  $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)$  ja  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{L-1})$ . Potentiaalien arvot  $u^h$  ja  $U^h$  saadaan siis ratkaistua

$$\theta = A^{-1}I. \quad (2.31)$$

Matriisi  $A$  on muotoa

$$A = \begin{pmatrix} B & C \\ C^T & D \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

missä

$$B(i, k) = \int_{\Omega} (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r) \nabla\phi_i \cdot \nabla\phi_k dx + \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_l} \int_{e_l} \phi_i \phi_k dS \quad (2.33)$$

$$i, k = 1, 2, \dots, N$$

$$C(i, k) = - \left( \frac{1}{z_l} \int_{e_1} \phi_1 dS - \frac{1}{z_{k+1}} \int_{e_{k+1}} \phi_i dS \right) \quad (2.34)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad k = 1, 2, \dots, L-1$$

$$D(i, k) = \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_l} \int_{e_l} (n_i)_l (n_k)_l dS \quad (2.35)$$

$$= \begin{cases} \frac{|e_1|}{z_1} & i \neq k \\ \frac{|e_1|}{z_1} + \frac{|e_{k+1}|}{z_{k+1}} & i, k = 1, 2, \dots, L-1. \end{cases} \quad (2.36)$$

Myös admittiivisuuskajauma esitetään äärellisulotteisessa kannassa, ja myöhemmin tässä tutkielmassa  $\gamma$  tarkoittaa parametrivektoria joka sisältää admittiivisuuden arvoja hilan solmupisteissä.

Potentiaalit  $U^h$  elektrodeilla ovat nyt muotoa

$$U_1^h = \sum_{l=1}^{L-1} \beta_l \quad (2.37)$$

$$U_2^h = -\beta_1 \quad (2.38)$$

$$U_3^h = -\beta_2 \quad (2.39)$$

$\vdots$

$$U_L^h = -\beta_{L-1}, \quad (2.40)$$

joka voidaan esittää matriisimuodossa

$$U^h = C\beta^T, \quad (2.41)$$

missä

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{pmatrix}. \quad (2.42)$$

## 2.2 Käänteisongelma

Käänteisongelmassa tavoitteena on estimoida kappaleen admittiivisuusjakautuma  $\gamma$  sekä elektrodien kontakti-impedanssit  $z$  mitattujen potentiaalien avulla. Käänteisongelma on epälineaarinen huonosti asetettu käänteisongelma, eli ongelmalla ei ole välttämättä yksikäsitteistä ratkaisua ja pienet muutokset mitatuissa potentiaaleissa aiheuttavat suuria muutoksia ratkaisussa. Rekonstruktio voidaan laskea joko differenssikuvantamisena tai absoluuttisena kuvantamisena [18]. Tässä työssä admittiivisuuden rekonstruktiot lasketaan absoluuttikuvantamisella Bayesilaisten inversio- menetelmien avulla [20].

Havaintomalli on nyt muotoa

$$U = R(\gamma, z, e), \quad (2.43)$$

missä  $U$  sisältää mitatut potentiaalit,  $R$  on havainto-operaattori (Kappaleesta 2.1),  $\gamma$  ja  $z$  estimoitavat parametrit ja  $e$  havaintokohina. Admittiivisuus  $\gamma$  ja kontakti-impedanssi  $z$  ovat kompleksisia suureita, eli ne voidaan esittää muodossa  $\gamma = \gamma_1 + j\gamma_2$  ja  $z = z_1 + jz_2$ . Estimoitavat admittiivisuuden parametrit ovat siis  $\gamma_1 = \sigma$  ja  $\gamma_2 = \omega\epsilon_r\epsilon_0$  edellä esitetyn teorian mukaisesti. Laskennassa vektorit  $\gamma$  ja  $z$  käsitellään reaalina muodossa  $\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2]^T$  ja  $z = [z_1 \ z_2]^T$ , eli missä reaali- ja imaginääriosa on asetettu päällekkäin. Jos havaintokohinan oletetaan olevan additiivista, malli voidaan kirjoittaa muodossa

$$U = R(\gamma, z) + e. \quad (2.44)$$

Bayesilaisessa inversiossa tarkastellaan posterioritiheyttä  $\pi(\gamma, z|U)$  eli estimoitavien parametrien ehdollista todennäköisyystiheyttä ehdolla missä mittaukset  $U$  tunnetaan. Posterioritiheys voidaan kirjoittaa Bayesin kaavan avulla muodossa [20]

$$\pi(\gamma, z|U) = \frac{\pi(U|\gamma, z)\pi(\gamma, z)}{\pi(U)} \propto \pi(U|\gamma, z)\pi(\gamma, z), \quad (2.45)$$

missä  $\pi(U|\gamma, z)$  on likelihood-funktio,  $\pi(\gamma, z)$  prioritiheys ja  $\pi(U)$  normalisointitermi joka ei riipu mittausdatasta  $U$ . Jos oletetaan että kohina  $e$  on normaalijakautunutta ja nollakeskiarvoista, voidaan likelihood-funktio kirjoittaa muodossa

$$\pi(U|\sigma, z) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(U - R(\gamma, z))^T \Gamma_e^{-1} (U - R(\gamma, z))\right) \quad (2.46)$$

missä  $\Gamma_e$  on kohinan kovarianssimatriisi.

Prioritiheys  $\pi(\gamma, z)$  sisältää ennakkotiedon estimoitavista parametreista. Jos admittii-visuusjakauman oletetaan olevan riittävän sileä, voidaan parametrien  $\gamma_1$  ja  $\gamma_2$  prioritiheytenä käyttää esimerkiksi *smoothness prior* -tiheyttä [21]. *Smoothness prior* -tiheys voidaan esittää tässä tilanteessa muodossa

$$\pi(\gamma_i) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(\gamma_i - \eta_{\gamma_i})^T \Gamma_{\gamma_i}^{-1}(\gamma_i - \eta_{\gamma_i})\right) \quad i = 1, 2 \quad (2.47)$$

missä  $\eta_\gamma$  on odotusarvo ja  $\Gamma_\gamma$  kovarianssimatriisi. Kontakti-impedanssien prioritiheytenä käytetään tässä työssä Gaussista prioritiheyttä

$$\pi(z_i) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(z_i - \eta_{z_i})^T \Gamma_{z_i}^{-1}(z_i - \eta_{z_i})\right) \quad i = 1, 2 \quad (2.48)$$

missä kovarianssimatriisi  $\Gamma_{z_i}$  koostuu kahdesta komponentista

$$\Gamma_{z_i} = aI + b\mathbb{1} \quad (2.49)$$

missä  $I$  on yksikkömatriisi ja

$$\mathbb{1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

Kovarianssimatriisiin ensimmäinen termi  $aI$  määrittää kontakti-impedanssien prioritiheyden täysin korreloimattoman osan, ja jälkimmäinen termi  $b\mathbb{1}$  täysin korreloituneen osan.

Merkitään  $\theta = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ z_1 \ -z_2]^T$  vektoria joka sisältää kaikki estimoitavat parametrit ja  $\eta_\theta = [\eta_{\gamma_1} \ \eta_{\gamma_2} \ \eta_{z_1} \ -\eta_{z_2}]^T$  niitä vastaavat odotusarvot. Kontakti-impedanssia mallinetaan kytkentänä jossa on sekä resistiivinen että kapasitiivinen komponentti, jolloin sen imaginääriosa  $z_2$  on negatiivinen. Myöhemmin esiteltävän positiivisuusrajoitteen yksinkertaistamiseksi estimoitavaksi parametriksi valitaan  $-z_2$ , jolloin kaikki estimoitavat parametrit voidaan rajoittaa positiivisiksi. Jos lisäksi oletetaan että  $\gamma_1, \gamma_2, z_1$  ja  $z_2$  ovat keskenään riippumattomia, voidaan  $\Gamma_\theta$  kirjoittaa muodossa

$$\Gamma_\theta = \begin{bmatrix} \Gamma_{\gamma_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{\gamma_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_{z_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Gamma_{-z_2} \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Posterioritiheys on nyt muotoa

$$\pi(\theta|U) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(U - R(\theta))^T \Gamma_e^{-1}(U - R(\theta)) - \frac{1}{2}(\theta - \eta_\theta)^T \Gamma_\theta^{-1}(\theta - \eta_\theta)\right). \quad (2.52)$$

*Maximum a posteriori* -estimaatti (MAP) on posteriorifunktion maksimipiste

$$\theta_{\text{MAP}} = \arg \max_{\theta} \{\pi(\theta|U)\}. \quad (2.53)$$

Jos lisäksi huomioidaan suureiden  $\gamma_1, \gamma_2, z_1$  ja  $z_2$  positiivisuusrajoite, MAP -estimaatti saadaan minimointiongelman

$$\arg \min_{\theta \geq 0} \{(U - R(\theta))^T \Gamma_e^{-1}(U - R(\theta)) + (\theta - \eta_\theta)^T \Gamma_\theta^{-1}(\theta - \eta_\theta)\} \quad (2.54)$$

$$= \arg \min_{\theta \geq 0} \{\|L_e(U - R(\theta))\|^2 + \|L_\theta(\theta - \eta_\theta)\|^2\}, \quad (2.55)$$

ratkaisuna, missä  $L_e^T L_e = \Gamma_e^{-1}$  ja  $L_\theta^T L_\theta = \Gamma_\theta^{-1}$ . Minimointiongelma voidaan ratkaista iteratiivisesti Gauss-Newton-algoritmilla

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \alpha(J_k^T \Gamma_e^{-1} J_k + L_\theta^T L_\theta)^{-1}(J_k^T \Gamma_e^{-1}(U - R(\hat{\theta}_k)) - \Gamma_\theta^{-1}(\hat{\theta}_k - \eta_\theta)), \quad (2.56)$$

missä  $\hat{\theta}_k$  on ratkaisu pisteessä  $k$ ,  $J_k$  operaattoria  $R$  vastaava Jacobin matriisi pisteessä  $\hat{\theta}_k$  ja  $\alpha$  askelparametri. Tässä työssä suunta  $(J_k^T \Gamma_e^{-1} J_k + L_\theta^T L_\theta)^{-1}(J_k^T \Gamma_e^{-1}(U - R(\hat{\theta}_k)) - \Gamma_\theta^{-1}(\hat{\theta}_k - \eta_\theta))$  ratkaistaan ensin, jonka jälkeen askelparametri  $\alpha$  valitaan linjahakualgoritmin avulla ja positiivisuusrajoite toteutetaan *exterior point*-menetelmän avulla. Menetelmä Jacobin matriisin  $J_k$  määrittämiseksi on esitetty viitteessä [22].

## 2.3 Monitaajuusimpedanssitomografia

Yleensä impedanssitomografian mittaukset suoritetaan käyttämällä yhtä vaihtovirran taajuutta väliltä 1-100 kHz [2]. Impedanssitomografiassa voidaan käyttää myös useampaa mittaustaajuutta, jolloin kohteesta saadaan enemmän tietoa ja/tai käänteisongelman huonokuntoisuutta voidaan parantaa [16, 23]. Yleensä materiaalin admittiivisuus riippuu vaihtovirran taajuudesta, joten käänteisongelman huonokuntoisuutta ei voi suoraan parantaa lisäämällä mittauksia eri taajuudella. Jos mitattavan kohteen sähköisten ominaisuuksien ja taajuuden riippuvuudesta tiedetään etukäteen, saadaan käänteisongelman huonokuntoisuutta parannettua suorittamalla mittauksia usealla eri taajuudella. Monitaajuusimpedanssitomografia ei ole vakiintu-

neessa käytössä sovelluksissa, mutta laboratoriokokeissa sen on havaittu olevan potentiaalinen kuvantamismenetelmä erityisesti lääketieteen kuvantamisessa [24–30].

## 2.4 Sovellukset

### 2.4.1 Prosessitomografia

Teollisuudessa on monia prosesseja, joissa on oleellista tietää putkissa, säiliöissä tai sekoittimissa olevan seoksen koostumus [5,31]. Esimerkiksi paperiteollisuudessa paperin valmistuksessa käytettävien kemikaalien tehokas sekoittaminen vähentää raaka-aineiden hukkaa sekä parantaa lopputuotteen laatua [32]. Tyypillisiä tarkkailtavia asioita prosessitomografiassa ovat sekoituksen tila, kaasujen määrän estimointi tai massan virtauksen estimointi [6]. Erityisesti sekoitusprosesseissa lopputuloksen laatu riippuu hyvin vahvasti sekoittamisen onnistumisesta, joten prosessin mallinnus ja tarkkailu on erittäin tärkeää. Kompleksisen admittiivisuuskäyrän sijaan useimmissa prosessitomografian sovelluksissa tarkastellaan pelkästään johtavuuskäyrää, ja tässä luvussa esitellyt prosessitomografian menetelmät perustuvat reaalisen johtavuuskäyrän estimointiin eli resistanssitomografiaan. Impedanssitomografia soveltuu hyvin nesteiden ja kaasujen sekoituksen tarkasteluun, jos sekoitettavien aineiden johtavuudet poikkeavat riittävästi toisistaan jotta ne voidaan havaita admittiivisuuskäyrästä [5]. Esimerkiksi suolaveden ja vesijohtoveden sekoittumisen tilaa voidaan tarkkailla impedanssitomografian avulla [33].

Sekoitusprosessien lisäksi toinen merkittävä teollisuuden kuvantamiskohde on prosessiputkistot [8,34,35]. Mielenkiinnon kohteena on yleensä putkistoissa virtaavan fluidin koostumus, virtausnopeus tai mahdolliset epäpuhtaudet kuten ilmakuplat tai kiinteät materiaalit. Usein putkistoissa virtaavien aineiden admittiivisuudet poikkeavat toisistaan, jolloin niiden kuvantaminen on mahdollista impedanssitomografian avulla. Esimerkiksi multifaasivirtauksessa veden ja ilman jakaumaa on mahdollista kuvantaa impedanssitomografian avulla [35,36].

Impedanssitomografian etuja prosessitomografian sovelluksissa ovat mittalaitteiston edullisuus, yksinkertaisuus, turvallisuus sekä nopea mittaustaajuus. Korkean mittaustaajuuden vuoksi impedanssitomografiaa voidaan käyttää kohteisiin joissa muutokset tapahtuvat nopeasti. Mittauslaitteisto on myös yleensä yksinkertainen ja kestää hyvin



teollisuuden prosessien haastavia olosuhteita, kuten suuria lämpötilavaihteluita [35].

## 2.4.2 Lääketieteen sovellukset

Impedanssitomografia ei ole vakiintuneessa käytössä lääketieteen kuvantamisessa, mutta sitä on tutkittu runsaasti ja sen on havaittu olevan potentiaalinen menetelmä useiden ihmiskehon toimintojen kuvantamiseen. Impedanssitomografiaa käyttäviä kaupallisia lääketieteellisiä sovelluksia on myös olemassa useita. [3]

Biologiset kudokset sisältävät ioneja, joiden seurauksena kudokset johtavat sähköä. Sähkönjohtavuus vaihtelee eri kudosten välillä, ja esimerkiksi lihaskudos johtaa sähköä huomattavasti paremmin kuin luu [3, 37]. Sähkönjohtavuuden lisäksi kudoksissa on kapasitiivisia rakenteita, joten myös kudosten permittiivisyys eroaa myös toisistaan. Koska kehon eri kudosten admittiivisyys vaihtelee runsaasti, voidaan impedanssitomografian avulla kuvantaa kehon eri kohteita. Usein myös lääketieteen sovelluksissa tarkastellaan reaalista johtavuusjakaumaa admittiivisyysjakauman sijaan, jolloin impedanssitomografiaa voidaan käyttää lääketieteessä esimerkiksi vatsalaukun tyhjentymisen ja toiminnan tarkastelussa [38], rintasyövän kuvantamisessa [26, 39], keuhkojen toiminnan tarkastelussa [40, 41] ja pään alueen kuvantamisessa [4, 25, 42]. Myös esimerkiksi veren johtavuus on huomattavasti suurempi kuin monien kudosten, jolloin veren määrän lisääntyminen kudoksissa voidaan havaita kudoksen kasvaneena johtavuutena. Yhdellä vaihtovirran taajuudella tehtyjen mittausten lisäksi monitaajuusimpedanssitomografian on havaittu olevan potentiaalinen menetelmä biologisten kudosten kuvantamiseen laboratorikokeissa [24–26, 43]. Admittiivisyysjakauman on havaittu myös tarjoavan enemmän tietoa kohteesta reaaliseen johtavuusjakaumaan verrattuna, mutta sen estimoiminen luotettavasti on laskennallisesti haastavaa [29, 30].

Lääketieteellisessä kuvantamisessa impedanssitomografialla on useita etuja muihin tomografisiin kuvantamismenetelmiin, kuten magneetti- tai röntgenkuvantamiseen verrattuna [3, 37]. Impedanssitomografia on suhteellisen edullinen menetelmä, mittauksia voidaan tehdä hyvin suurella taajuudella ja nykyisen tiedon mukaan mittaukset eivät ole terveydelle haitallisia. Lisäksi menetelmä soveltuu myös pidempiaikaiseen tarkkailuun, sekä spektrimittausten avulla kudoksia voidaan karakterisoida. Impedanssitomografian suurimpana heikkoutena voidaan pitää matalaa spatiaalista resoluutiota, joka on huomattavasti pienempi kuin magneetti- tai röntgenkuvantamisessa. Myös

kehon epäsäännöllinen ja vaihteleva muoto aiheuttaa merkittäviä haasteita laskennassa.

### 2.4.3 Ainetta rikkomaton testaus

Ainetta rikkomattomalla testauksella tarkoitetaan materiaalien, rakenteiden ja komponenttien ominaisuuksien testaamista ja arvioimista ainetta rikkomatta. Usein tavoitteena on löytää materiaalista rakenteellisia vikoja tai heikkouksia, kuten halkeamia betonirakenteista. Ainetta rikkomattomaan testaukseen on kehitetty useita menetelmiä, kuten ultraääneen, sähkömagneettiseen säteilyyn sekä optisiin ilmiöihin perustuvia menetelmiä. Myös impedanssitomografiaa voidaan käyttää esimerkiksi betonin ainetta rikkomattomassa kuvantamisessa [10, 11, 44, 45].

Betonin sähköisiä ominaisuuksia on tutkittu runsaasti, ja betonin raudoitteiden korrosio, halkeamat ja sen sisältämä kosteus vaikuttavat betonin sähköisiin ominaisuuksiin [11, 46–48]. Korkeilla taajuuksilla betonilla on sekä resistiivisiä että kapasitiivisiä ominaisuuksia, mutta alle 1 kHz taajuudella betoni käyttäytyy pelkästään resistiivisesti joten admittiivisuuden sijaan voidaan tarkastella pelkästään reaalista johtavuutta [9]. Resistanssitomografian avulla on mahdollista määrittää esimerkiksi betonin sisältämien raudoitteiden sijainti [11], halkeamia [44] ja kosteutta [10].

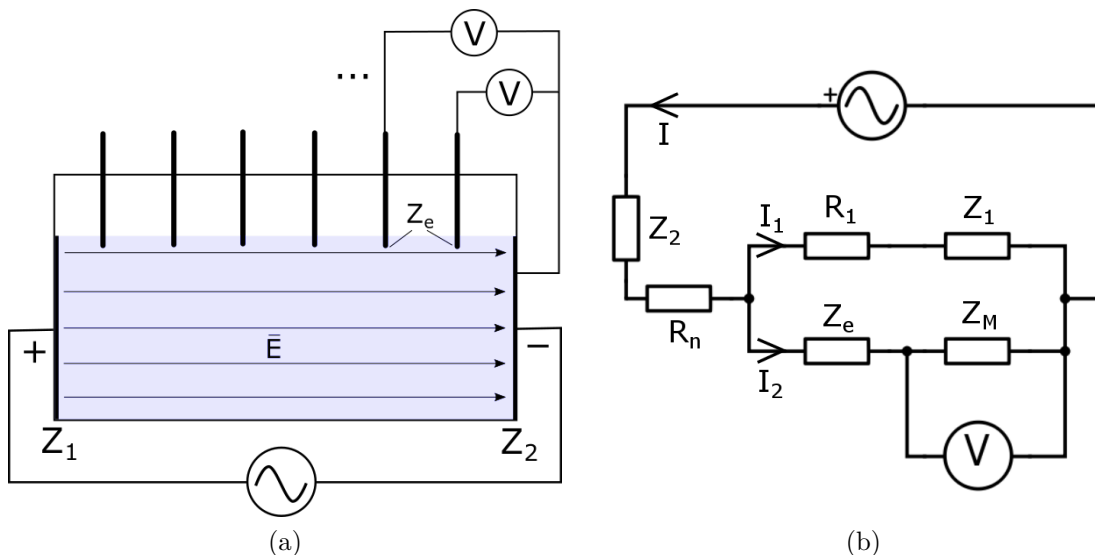
Impedanssispektroskopian avulla on pystytty mittamaan betonin raudoitteiden korrosiota laboriotesteissä [12–15]. Impedanssispektroskopia on sähköisiin mittauksiin perustuva mittausmenetelmä, jossa kohteen pinnalta tehtyjen impedanssimittausten saadaan tietoa kohteen sisäisestä rakenteesta. Koska raudoitteiden korrosio vaikuttaa pinnalta tehtyihin impedanssimittauksiin, korroosion havaitseminen saattaa olla myös mahdollista monitaajuusimpedanssitomografian avulla. Luvussa 4 tutkitaan monitaajuusimpedanssitomografian soveltumista raudoitteita sisältävän rakenteen kuvantamiseen simulaatioiden avulla.

### 3 Elektrodien kontakti-impedanssien kokeellinen määrittäminen

Tässä työn osassa tavoitteena oli määrittää metallisten elektrodien ja veden välisen kontakti-impedanssin suuruus taajuuden funktiona yksinkertaisten laboratoriotestien avulla. Kontakti-impedanssin suuruus riippuu elektrodien ja kohteen materiaalista, sähköisestä kontaktista sekä käytetystä vaihtovirran taajuudesta. Kontakti-impedanssit voivat aiheuttaa merkittävää mallinnusvirhettä EIT:n mittauksiin jos niitä ei oteta mallissa huomioon.

#### 3.1 Mittausasetelma

Mittaukset suoritettiin suorakulmaisessa akryylisessä valmistetussa säiliössä, jonka molemmilla päissä oli koko pädyn peittävä metallinen levy. Säiliö täytettiin vesijohtovedellä, ja päätyjen metallilevyjä käytettiin elektrodina joiden avulla säiliöön syötettiin matalatehoista vaihtovirtaa. Vesitankkiin syntynyttä potentiaalikenttää mitattiin kuuden veteen upotetun metallisen sauvaelektrodin avulla. Asetelmaa vastaava kaaviokuva on esitetty Kuvassa 2a ja sitä vastaava kytkentäkaavio Kuvassa 2b.



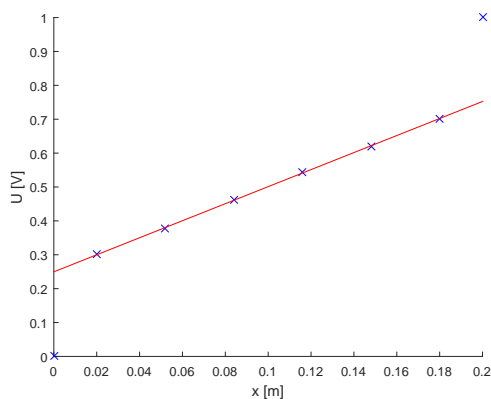
Kuva 2: Kaaviokuva mittausasetelmasta (a) ja asetelman ensimmäistä mittausta vastaava kytkentäkaavio (b).

Kytkentäkaaviossa  $Z_1$  ja  $Z_2$  ovat päätyelektrodien kontakti-impedanssit,  $Z_e$  sau-

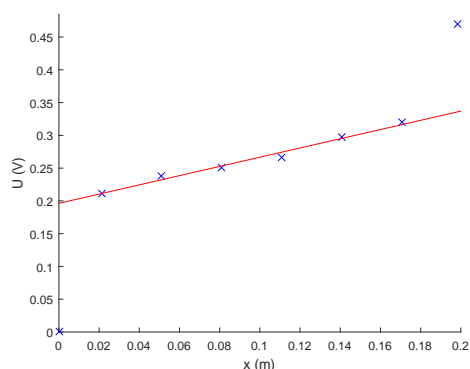
vaelektrodin kontakti-impedanssi,  $Z_M$  mittalaitteen sisäinen impedanssi,  $R_1$  veden aiheuttama resistanssi ensimmäisen päätyelektrodin ja ensimmäisen sauvaelektrodin välillä ja  $R_n$  veden aiheuttama resistanssi ensimmäisen sauvaelektrodin jatoisen päätyelektrodin välillä. Impedanssit  $Z_1, Z_2, Z_e$  ja  $Z_M$  ovat kompleksisia, ja resistanssit  $R_1$  ja  $R_n$  ovat reaalisia.

Mittalaitteena käytettiin Stanford Research Systems:in SR830 DSP Lock-in Amplifier -laitetta. Mittalaitteesta syötettiin tehollisarvoltaan vakiota vaihtojännitettä muuntimeen, joka muutti jännitteen tehollisarvoltaan vakioksi vaihtovirraksi. Muuntimesta virta johdettiin vesisäiliön päätyelektrodeihin, ja syntyneet potentiaalien amplitudit ja vaihe-erot mitattiin samalla mittalaitteella Kuvan 2a mukaisesti. Mittaukset suoritettiin käyttämällä useita vaihtovirran taajuuksia väliltä 1 - 10 000 Hz.

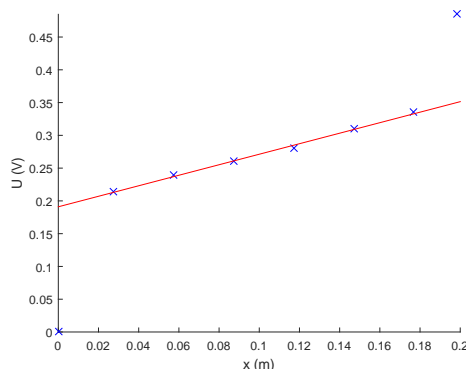
Kontakti-impedansseja määritettiin ensin yksinkertaisen mallin avulla, missä mitattuihin potentiaaleihin vaikuttaa ainoastaan päätyelektrodien kontakti-impedanssit sekä veden aiheuttama reaalinen resistanssi. Yksinkertaisessa mallissa ei siis huomioitu mittalaitteen sisäistä impedanssia  $Z_M$  eikä sauvaelektrodien kontakti-impedansseja  $Z_e$ . Tällöin päätyelektrodien kontakti-impedanssi aiheuttaisi potentiaalieron elektrodin ja veden rajapinnalla, minkä seurauksena potentiaaliero päädyn ja ensimmäisen sauvaelektrodin välillä olisi suurempi kuin pelkkä veden resistanssin aiheuttama potentiaaliero ja mitatut potentiaalit olisivat käyttäytyneet kuten Kuvassa 3a. Tällöin kontakti-impedanssit pystyttäisiin määrittämään ensimmäisen ja viimeisen potentiaalimittauksen erotuksesta sovitettuun suoraan nähden.



(a)



(b)



(c)

Kuva 3: Yksinkertaisen mallin avulla ennustetut mittaukset (a) ja mittauksissa havaitut eräät potentiaalimittaukset (b) ja (c).

Mittauksissa kuitenkin havaittiin että mitatut potentiaalit eivät käyttäydy mallin mukaisesti, vaan sähköisesti positiivisen potentiaalin päätyelektrodin aiheuttama potentiaalin muutos suoraan nähden oli huomattavasti pienempi kuin negatiivisen päätyelektrodin. Kuvassa 3b on esitetty erään potentiaalimittauksen tulokset, ja havaitaan että ensimmäisen päätyelektrodin aiheuttama potentiaalin muutos on huomattavasti suurempi kuin toisen päätyelektrodin. Kun mittausasetelmaa vaihdettiin siten että päätyelektrodien paikkaa vaihdettiin keskenään, potentiaalin muutos on jälleen pienempi ensimmäisellä päätyelektrodilla (Kuvassa 3c). Huomattavasti toisistaan poikkeava potentiaalin muutos päätyelektrodeilla ei johdu siis päätyelektrodien ominaisuuksista. Yksinkertaisen mallin oletuksien lisäksi mittauksiin vaikuttaa merkittävästi myös sauvaelektrodien kontakti-impedanssit sekä mittalaitteen sisäinen impedanssi. Näiden estimoimiseksi johdettiin mittausasetelmaa paremmin vastaava malli, jossa huomioitiin myös mittalaitteen sisäinen impedanssi  $Z_M$  ja sauvaelektrodien kontakti-impedanssit  $Z_e$ .

Sauvaelektrodien ja päätyelektrodien avulla vesisäiliöstä saadaan mitattua seitsemän potentiaalimittausta  $V = [V_1 V_2 \dots V_7]^T$  Kuvan 2a mukaisesti. Kuvassa 2b on esitetty ensimmäisen mittauksen kytkentäkaavio, josta saadaan kirjoitettua yhtälöt

$$I = I_1 + I_2 \quad (3.1)$$

$$V_1 = Z_M I_2 \quad (3.2)$$

$$I_1(R_1 + Z_1) = I_2(Z_e + Z_M), \quad (3.3)$$

missä  $V_1$  on mittalaitteella mitattu jännite ja  $I$ ,  $I_1$  ja  $I_2$  piirissä kulkevat virrat kytkentäkaavion mukaisesti, joista virta  $I$  tunnetaan. Yhtälöistä saadaan ratkaistua potentiaali  $V_1$

$$V_1 = I \frac{(R_1 + Z_1)Z_M}{(R_1 + Z_1 + Z_e + Z_M)}. \quad (3.4)$$

Veden johtavuus mitattiin johtavuusmittarilla, jolloin veden aiheuttama resistanssi  $R_1$  saadaan laskettua kaavalla

$$R = \frac{s}{A\sigma_w} \quad (3.5)$$

missä  $A$  on vesisäiliön poikkipinta-ala,  $s$  etäisyys päätyelektrodista mittaavaan elektrodiin ja  $\sigma_w$  veden johtavuus.

Toisella sauvaelektrodilla mitattaessa kytkentä ja yhtälöt (3.1) - (3.3) ovat muuten samat, mutta veden aiheuttama resistanssi on nyt suurempi. Tällöin siis kaavassa (3.3)  $R_1$  korvautuu resistanssilla  $R_2$  ja vastaavasti voidaan ratkaista potentiaali  $V_2$

$$V_2 = I \frac{(R_2 + Z_1)Z_M}{(R_2 + Z_1 + Z_e + Z_M)}. \quad (3.6)$$

Samoin voidaan ratkaista muut sauvaelektrodeilla mitatut potentiaalit. Viimeisessä mittauksessa potentiaali  $V_7$  mitataan päätyelektrodien välillä, jolloin veden aiheuttaman reaalisen resistanssin  $R_7$  lisäksi yhtälöön (3.3) vaikuttaa päätyelektrodin kontakti-impedanssi  $Z_2$ , jolloin yhtälöksi saadaan

$$I_1(R_7 + Z_2 + Z_1) = I_2(Z_e + Z_M). \quad (3.7)$$

Potentiaali  $V_7$  voidaan ratkaista samoin kuin edellä

$$V_7 = I \frac{(R_7 + Z_2 + Z_1)Z_M}{(R_7 + Z_2 + Z_1 + Z_e + Z_M)}. \quad (3.8)$$

Edellä esitettyjen yhtälöiden avulla potentiaaleille  $V_i$  voidaan muodostaan havaintomallit

$$V_i = H_i(Z_1, Z_2, Z_e, Z_M) + e_i \quad (3.9)$$

missä  $e_i$  on mittauskohina. Havaintomallit voidaan kirjoittaa muodossa

$$V = H(Z_1, Z_2, Z_e, Z_M) + e, \quad (3.10)$$

missä  $H = (H_1 \ H_2 \ \dots \ H_7)^T$  ja  $e = (e_1 \ e_2 \ \dots \ e_7)^T$ . Koska potentiaalit  $V$  ovat kompleksisia, voidaan havaintomalli esittää muodossa

$$V^1 + jV^2 = H^1(Z_1, Z_2, Z_e, Z_M) + jH^2(Z_1, Z_2, Z_e, Z_M) + e. \quad (3.11)$$

Tämä voidaan esittää reaaliarvoisena muodossa

$$\begin{bmatrix} V^1 \\ V^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^1(Z_1, Z_2, Z_e, Z_M) \\ H^2(Z_1, Z_2, Z_e, Z_M) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^1 \\ e^2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

missä  $e = e^1 + je^2$ . Estimoitavat impedanssit voidaan myös esittää muodossa  $Z_i = Z_i^1 + jZ_i^2$ . Olkoon  $\kappa = [Z_1^1 \ Z_2^1 \ Z_e^1 \ Z_M^1 \ Z_1^2 \ Z_2^2 \ Z_e^2 \ Z_M^2]^T$  vektori joka sisältää estimoitavat (reaaliset) parametrit. Näiden merkintöjen avulla havaintomalli (3.12) voidaan kirjoittaa muodossa

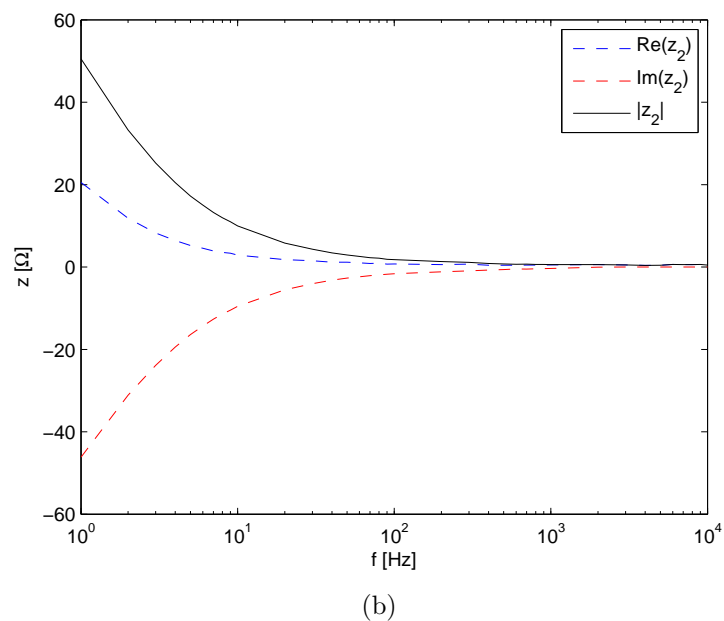
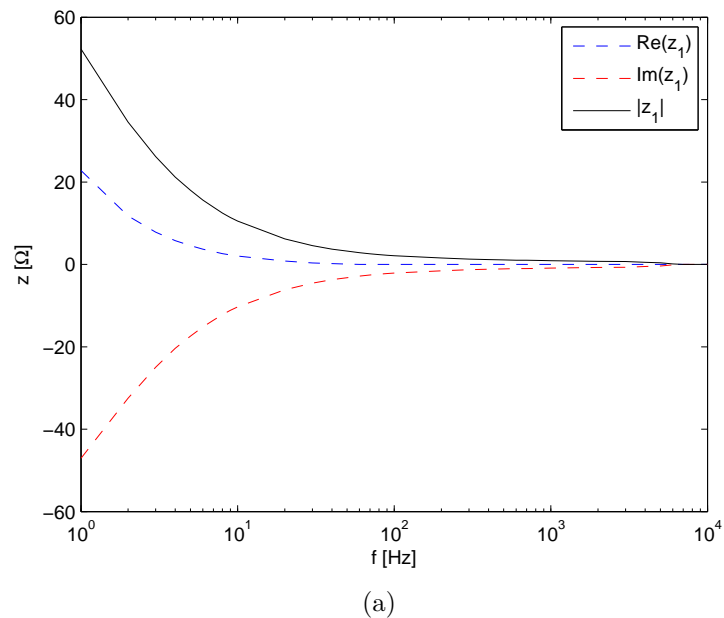
$$\tilde{V} = \tilde{H}(\kappa) + e, \quad (3.13)$$

missä  $\tilde{V} = [V^1{}^T \ V^2{}^T]^T$  ja  $\tilde{H} = [H^1(\kappa)^T \ H^2(\kappa)^T]^T$ . Estimaatit voidaan laskea Gauss-Newton algoritmin avulla

$$\hat{\kappa}_{i+1} = \hat{\kappa}_i + \alpha(J_i^T J_i + \lambda I)^{-1} J_i^T (\tilde{V} - \tilde{H}(\hat{\kappa}_i)), \quad (3.14)$$

missä  $\tilde{V}$  ja  $\tilde{H}$  ovat kuten yhtälössä (3.12),  $J_i$  kuvauksen  $\tilde{H}$  Jacobin matriisi pisteessä  $\kappa_i$ ,  $\alpha$  askelparametri ja  $\lambda$  regularisointiparametri. Parametrit  $\kappa$  estimoitiin jokaisella taajuudella erikseen edellä esitetyllä tavalla.

## 3.2 Tulokset

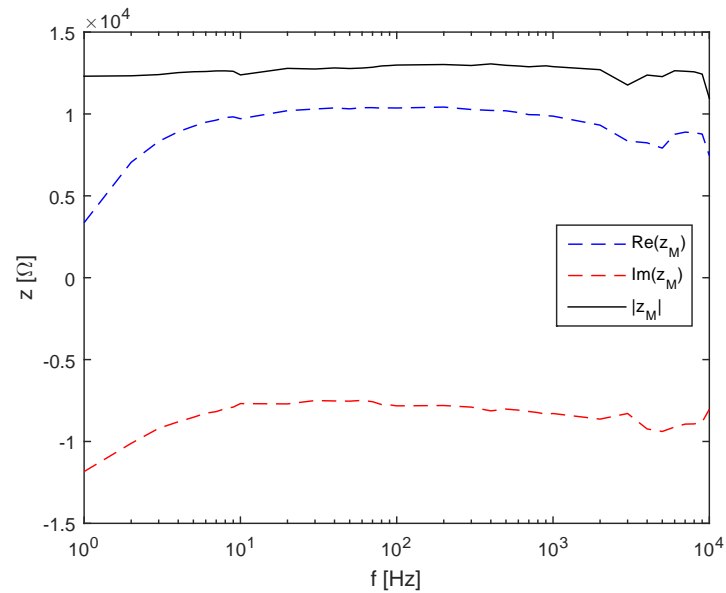


Kuva 4: Päätyelektrodien estimoidut kontakti-impedanssit  $Z_1$  (a) ja  $Z_2$  (b) taajuuden  $f$  funktiona.

Kuvissa 4a ja 4b on esitetty estimoidut päätyelektrodien kontakti-impedanssit  $Z_1$  ja  $Z_2$  taajuuden funktiona. Kontakti-impedanssin reaali- ja imaginääriosan itseisarvo laskee taajuuden kasvaessa, mikä vastaa muiden tutkimuksien tuloksia [49–51]. Päätyelektrodien kontakti-impedanssin estimaatit ovat myös lähellä toisiaan. Korkeil-

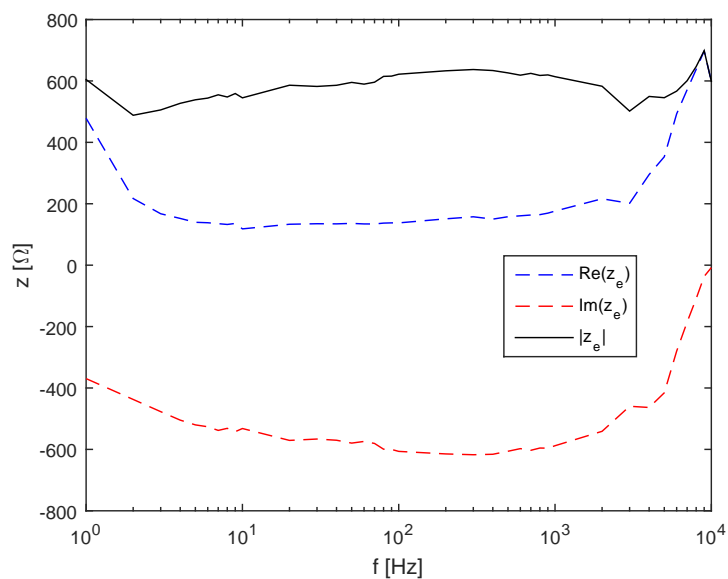


la taajuuksilla (noin 1000 Hz ja yli), kontakti-impedanssien reaali- ja imaginääriosan estimaatit eivät estimoidu enää oikein, vaan osa parametrien etumerkeistä estimoituu väärin. Syynä tähän voi olla mittausdatan pieni amplitudi ja mittauslaitteiston suurempi epätarkkuus korkeilla taajuuksilla. Myös mittausasetelman mallinnusvirheet voivat aiheuttaa merkittävää virhettä estimaatteihin korkeilla taajuuksilla, jos kaikkia kapasitiivisia kytkentöjä ei ole mallinnettu oikein.



Kuva 5: Mittalaitteen estimoitu sisäinen impedanssi  $Z_M$  taajuuden  $f$  funktiona.

Kuvassa 5 on esitetty estimoitu mittalaitteen sisäinen impedanssi  $Z_M$  taajuuden  $f$  funktiona. Valmistajan ilmoittama mittalaitteen sisäinen vastus on  $10 \text{ k}\Omega$ , mikä on lähellä estimoitua impedanssia. Mittalaitteen sisäinen impedanssi on huomattavasti suurempi kuin muut mitatut impedanssit ja siten mittalaitteen läpi kulkeva virta on hyvin pieni. Sisäisen impedanssin estimointi on haasteellista, koska estimaatista laskettu malli sovittuu hyvin mittausdataan kun sisäisen impedanssin estimaatti on riittävän suuri.



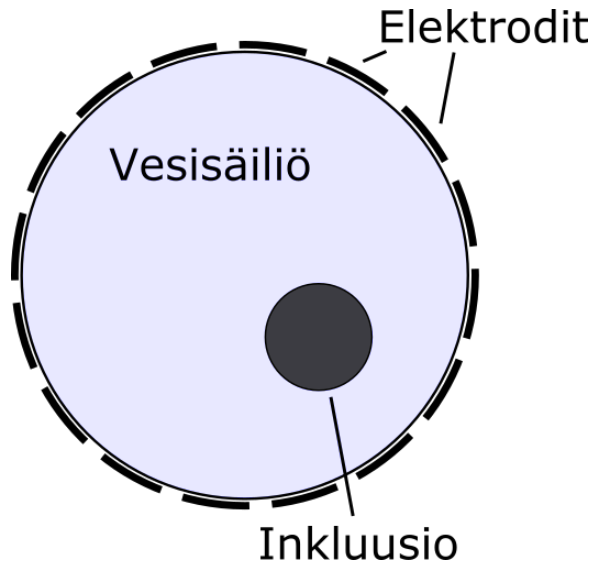
Kuva 6: Sauvaelektrodien estimoitu kontakti-impedanssi  $z_e$  taajuuden  $f$  funktiona.

Kuvassa 6 on esitetty estimoitu sauvaelektrodien kontakti-impedanssi  $Z_e$  taajuuden  $f$  funktiona. Sauvaelektrodien kontakti-impedanssi on huomattavasti päätyelektrodien kontakti-impedanssia suurempi, koska niiden ja veden välinen pinta-ala oli huomattavasti pienempi. Sauvaelektrodien kautta kulkeva virta on hyvin pieni verrattuna päätyelektrodien kautta kulkevaan virtaan. Tämän vuoksi malli ei ole herkkä sauvaelektrodien impedanssin arvoille ja siksi myös sauvaelektrodien impedanssin tarkka estimointi on haasteellista.

Tarkemman mallin avulla estimoidut parametrit käyttäytyvät loogisemmin kuin yksinkertaisemman mallin avulla lasketut parametrit. Vaikka mittalaitteen sisäinen impedanssi on suuri ja sen läpi kulkeva vuotovirta on pieni, se voi aiheuttaa merkittävää mallinnusvirhettä jos vuotovirtaa ei oteta huomioon.

## 4 Simulaatiot

Tässä työn osassa tavoitteena oli tutkia simulaatioiden avulla voidaanko rakenteen sisältämän metallin korroosiota havaita monitaajuusimpedanssitomografian avulla. Mittausasetelmana simulaatioissa oli ympyräsilinterin muotoinen säiliö jonka sisällä oli ympyräsilinterin muotoinen tausta-admittiivisuudesta poikkeava inkluusio. Säiliön ulkopinnalla oli 16 elektrodia joiden avulla simuloidut mittaukset suoritettiin. Poikkileikkaus mittausasetelmasta on esitetty Kuvassa 7.

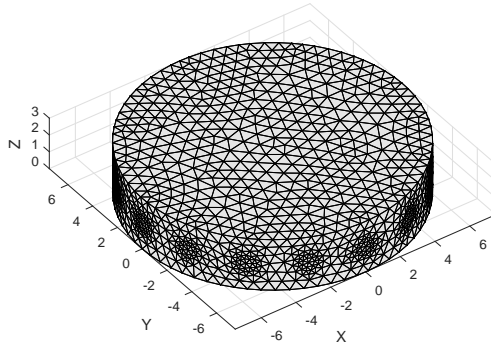


Kuva 7: Poikkileikkaus EIT-simulaatioissa käytetystä mittausasetelmasta.

Potentiaalimittauksia simuloitiin laskemalla elektrodeille muodostuvat potentiaalit Kappaleen 2.1 mukaisesti. Simuloiduista potentiaalimittauksista estimoitiin kohteen sisäistä admittiivisuusjakaumaa ja kontakti-impedansseja Luvussa 2 esitetyllä tavalla. Mittauksien simulointi ja rekonstruktioiden laskenta toteutettiin MATLAB-ohjelmalla. Kaikki simulaatiot ja laskenta on suoritettu kolmiulotteisessa hilassa, ja kuvissa on esitetty kolmiulotteisen rekonstruktion poikkileikkaus. Simuloidusta datasta rekonstruoidut admittiivisuusjakaumat on esitetty reaali- ja imaginäärikomponentteina  $\text{Re}(\gamma) = \sigma$  ja  $\text{Im}(\gamma) = \omega\epsilon_r\epsilon_0$ . Kuvissa reaali-osa on esitetty vasemmalla ja imaginääriosa oikealla.

## 4.1 Simulaatiot jatkuvan admittiivisuusjakauman tilanteessa

Tässä kappaleessa esitettävien simulaatioiden tarkoituksena oli testata laskentamenetelmää tilanteessa, jossa simuloitu admittiivisuusjakauma on jatkuva. Mittauksia simuloitiin laskentahilassa jossa inklusiota mallinnettiin muuttamalla admittiivisuusjakaumaa tietyllä alueella. Laskentahila on esitetty Kuvassa 8.



Kuva 8: Kappaleen 4.1 simulaatioissa käytetty laskentahila.

### 4.1.1 Datan simulointi ja rekonstruktion laskenta

Data simuloitiin Kappaleen 2.1 reuna-arvo-ongelman (kaavat (2.19) - (2.22)) FEM-aproksimaation avulla. Simuloituun dataan lisättiin kohinaa joka koostui kahdesta komponentista. Ensimmäisen kohinan komponentin keskihajonta oli 0.1 % kohinattoman havainnon itseisarvosta, ja toisen kohinan komponentin keskihajonta oli 0.0001 % suurimman mitatun potentiaalin itseisarvosta.

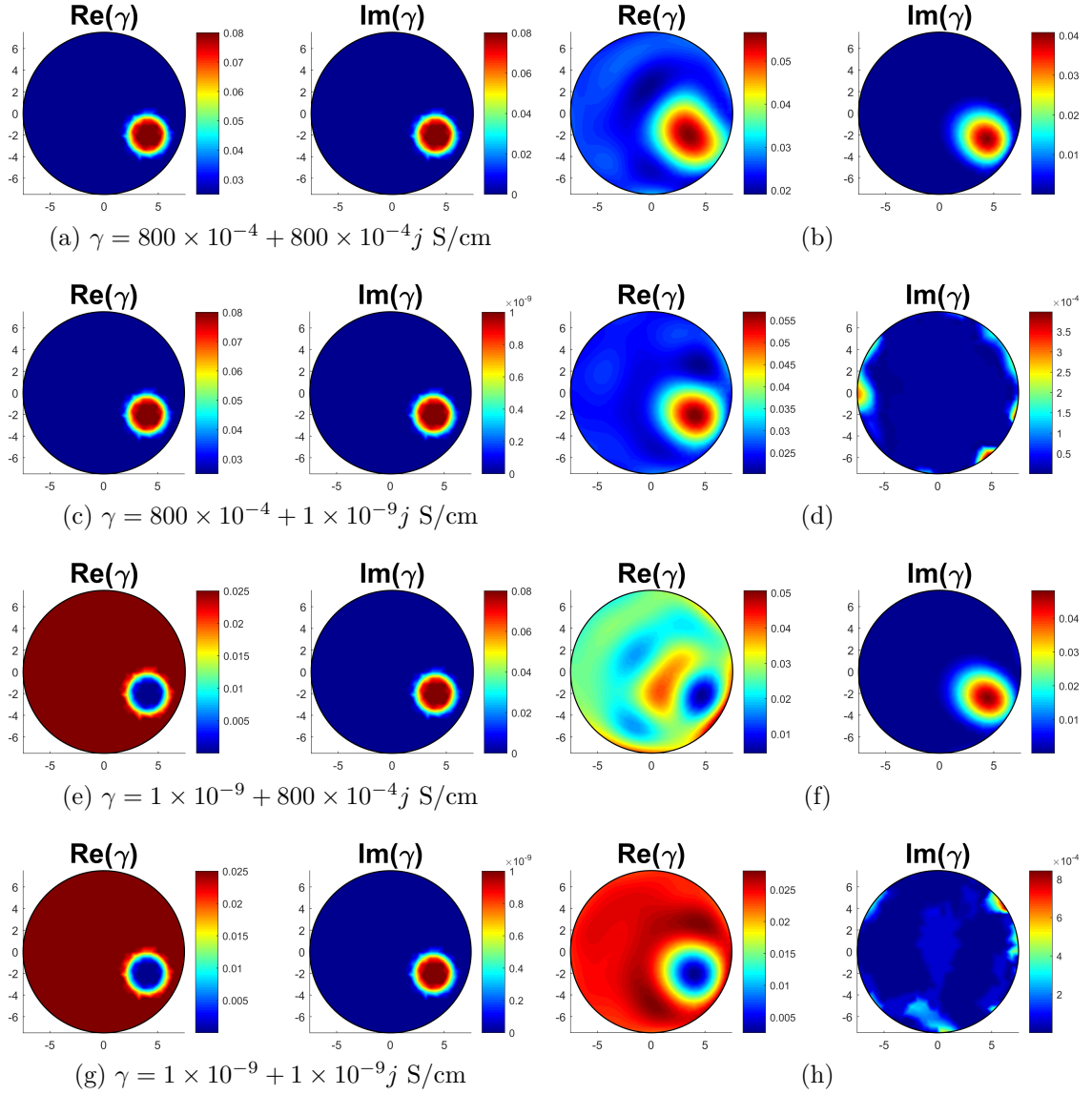
Prioritehtien parametrien valitsemiseksi potentiaalimittausten reaali-osaa sovitettiin estimaatti, joka estimoi kohteelle homogeenisen admittiivisuusjakauman reaali-osaa sekä kontakti-impedanssien reaali-osaa arvon. Estimoidut arvot valittiin admittiivisuuden sekä kontakti-impedanssien reaali-osaa odotusarvoiksi. Admittiivisuuden reaali-osaa  $\gamma_1$  keskihajonta valittiin siten, että kukin  $\gamma_1$ :n alkio saa arvon väliltä  $[0 \ 2\eta_{\gamma_1}]$  todennäköisyydellä 97,7 %. Kontakti-impedanssin reaali-osaa prioritehtien kovarianssimatriisin  $\Gamma_{z_1}$  korreloimattoman komponentin  $aI$  parametri  $a$  valittiin siten että kukin  $z_1$ :n alkion korreloitumaton osa saa arvon väliltä  $[0 \ 2\eta_{z_1}]$  todennäköisyydellä 97,7 %. Myös täysin korreloituneen komponentin parametri  $b$  valittiin siten että kukin

$z_2$ :n alkion korreloitunut osa saa arvon väliltä  $[0 \ 2\eta_{z_1}]$  todennäköisyydellä 97,7 %. Admittiivisuuden imaginääriosan odotusarvo asetettiin nolaksi, ja keskihajonnaksi valittiin admittiivisuuden reaaliosan keskihajonta. Kontakti-impedanssien imaginääriosan odotusarvoksi ja prioritiheyden parametreiksi valittiin kontakti-impedanssin reaaliosan odotusarvo ja prioritiheyden parametrit.

Tämän kappaleen simulaatioiden inversio-ongelman ratkaisussa käytettiin samaa hiilaa kuin datan simuloinnissa. Tämän seurauksena rekonstruktioit voivat olla tarkempia kuin oikeissa mittauksissa, mutta simulaatioiden tarkoituksena oli vain testata laskentamallin toimivuutta.

Laskentamenetelmän testaamiseksi simulaatioita suoritettiin viidellä eri admittiivisuusjakaumalla, joissa inklusion admittiivisuusjakauman komponentit valittiin hyvin pieniksi tai suuriksi. Kaikissa simulaatioissa taustan admittiivisuus asetettiin täysin reaaliseksi, ja taustan johtavuudeksi valittiin  $250 \times 10^{-4}$  S/cm.

#### 4.1.2 Tulokset ja pohdinta



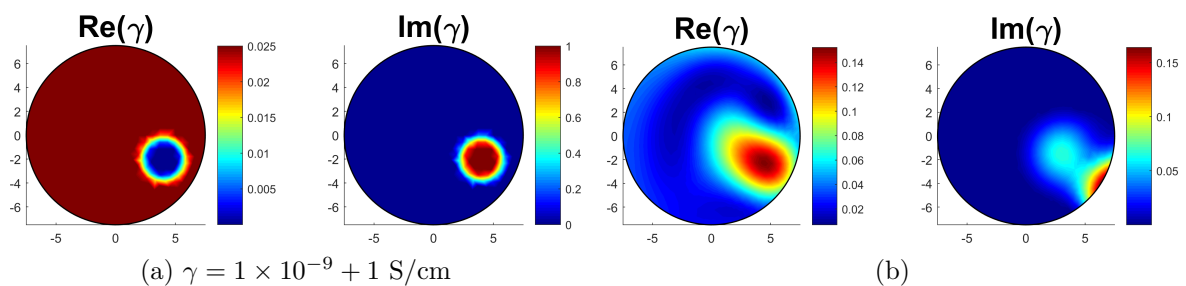
Kuva 9: Jatkuvalla hilalla simuloituja admittiivisuusjakaumia ((a), (c), (e) ja (g)) eri inklusion admittanssin  $\gamma$  arvoilla ja niistä muodostettuja rekonstruktioita ((b), (d), (f) ja (h)). Taustan admittanssi on  $250 \times 10^{-4}$  S/cm ja mitta elektrodien kontakti-impedanssit  $2 - 3 \Omega\text{cm}^2$ .

Kuvassa 9 on esitetty jatkuvalla hilalla simuloituja admittiivisuusjakaumia ja niistä muodostettuja rekonstruktioita. Inklusion admittiivisuusjakaumat on valittu laskentamenetelmän testausta varten komponenteiltaan erittäin suuriksi tai pieniksi. Simulaatioissa joissa inklusion reaaliosa on pieni, näyttäytyy raudoite eristävänä ja toisessa ääripäässä johtavana. Tilanteissa joissa imaginääriosa on pieni, simuloidun datan imaginääriosa määräytyy lähes kokonaan mitta elektrodien kontakti-impedanssin seu-

rauksena, jolloin inklusiota ei näy koska taustan admittiivisuuden imaginääriosa on nolla. Kuvissa näkyvät artifaktat sijoittuvat mittaaselektrodien läheisyyteen, joten ne johtuvat luultavasti kontakti-impedanssien virheellisistä estimaateista. Kuvassa 9f havaitaan että inklusion suuri admittiivisuuden imaginääriosa vaikuttaa reaali-osan estimointiin, ja reaali-osan rekonstruktio ei ole yhtä selkeä. Rekonstruktio on laskettu samassa hilassa missä potentiaalimitaukset on simuloitu eli rekonstruktio voi tämän seurauksena olla tarkempia kuin todellisista mittauksista lasketut rekonstruktio.

Näiden tulosten perusteella laskentamenetelmä toimii järkevästi. Kontakti-impedanssien virheelliset estimaatit aiheuttavat artefakteja rekonstruktioon tilanteissa joissa simuloitu data on hyvin pientä, ja kohinan aiheuttama vaikutus nousee suuremmaksi. Menetelmä saattaa estimoida myös kontakti-impedanssit liian suuriksi, jolloin malliin sovittuakseen admittiivisuusjakauma estimoituu väärin elektrodien läheisyydessä. Vahvistamalla kontakti-impedanssien tai admittiivisuuden prioriteettiä elektrodien läheisyyteen syntyviä artefakteja voitaisiin mahdollisesti vähentää.

Kuvassa 10 on tarkasteltu tilannetta, jossa inklusion admittiivisuusjakauman imaginääriosa on erittäin suuri verrattuna reaali-osaan. Havaitaan että rekonstruktiossa reaali-osa näkyy virheellisesti johtavana, mikä voi johtua siitä että imaginääri-osan arvot ovat merkittävästi suurempia kuin prioritehtien oletamat arvot. Tällöin malli ei voi selittää simuloitua dataa imaginääri-osan arvoilla, ja sen seurauksena reaali-osan estimaatti vääristyy. Inklusio kuitenkin näkyy rekonstruktiossa lähes oikein, mikä voidaan tulkita helposti väärin jos kohteen oikeasta rakenteesta ei ole tarkkaa tietoa.



Kuva 10: Jatkuvalle hilalle simuloitu admittiivisuusjakauma (a) ja siitä muodostettu rekonstruktio (b). Taustan admittiivisuus on  $250 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$  ja mittaaselektrodien kontakti-impedanssit  $2 - 3 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ .

## 4.2 Simulaatiot sisäelektrodihilalla

Tilanteessa jossa kuvannettava rakenne sisältää raudoitteita, kohde ei muodostu jatkuvasta admittiivisuusjakaumasta vaan raudoite muodostaa kohteen sisälle elektrodin. Jotta raudan vaikutus impedanssitomografian mittauksiin voitaisiin huomioida tarkasti, pitäisi raudoite mallintaa täydellisessä elektrodimallissa elektrodina jonka kautta ei syötetä virtaa eikä sen potentiaalia mitata. Raudoitteen mallintaminen vaatii että sen paikka ja muoto tunnetaan, ja että se huomioidaan laskentahilassa elektrodina. Impedanssitomografian mittauksissa raudoitteen paikkaa tai muotoa ei yleensä kuitenkaan tunneta, ja tällöin koko kohdetta mallinnetaan jatkuvana admittiivisuusjakaumana.

Tämän kappaleen simulaatioissa raudoitetta mallinnettiin sisäelektrodina, joka mallintaa raudoitetta jatkuvaa admittiivisuusjakaumaa paremmin. Simulaatioiden tarkoituksena oli tutkia miten jatkuvan admittiivisuusjakauman oletukseen perustuva EIT:n rekonstruktio toimii tilanteessa, jossa kohde sisältää raudoitteen. Erityisesti simulaatioilla testattiin sisäraudan kontakti-impedanssin vaikutusta EIT:n rekonstruktioihin.

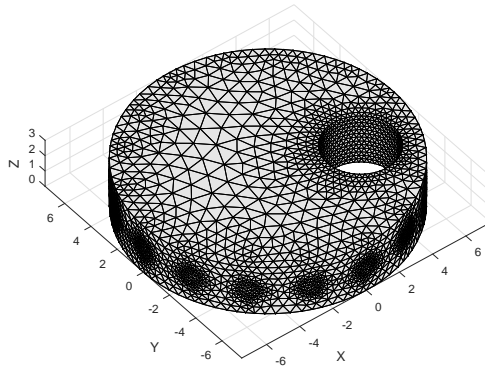
### 4.2.1 Datan simulointi ja rekonstruktion laskenta

Simulaatiot suoritettiin hilassa, jossa laskenta-alueeseen muodostettiin metallikappaleen muotoinen aukko jonka rajapintaan muodostettiin kontakti-impedanssi. Laskennallisesti aukko toimii kuten mittaukseen käytettävät elektrodit, mutta sitä ei käytetä mittaalektrodina mittauksia simuloitaessa eikä sen kautta syötetä virtaa. Raudoitetta mallintava elektrodi on metallia joten koko raudoite on tällöin tasapotentiaalissa. Elektrodilla on permittiivisiä ominaisuuksia ainoastaan rajapinnalla kontakti-impedanssin seurauksena, eli raudoitteen admittiivisuuden imaginääriosa on tällöin mitättömän pieni. Sisäelektrodihila on esitetty Kuvassa 11.

Datan simulointi ja kohinan lisäys suoritettiin samoin kuin Kappaleessa 4.1. Myös rekonstruktiot laskettiin samalla tavalla kuin Kappaleessa 4.1, ja taustan admittiivisuudeksi asetettiin samaksi kuin Kappaleessa 4.1.

Sisäelektrodihilalla muodostettu jakauma ei ole jatkuva, mutta impedanssitomogra-





Kuva 11: Kappaleen 4.2 simulaatioissa käytetty sisäelektrodihila.

fiassa admittiivisuuskajaumaa mallinnetaan jatkuvalla jakaumalla mikä voi aiheuttaa merkittävää mallinnusvirhettä. Sisäelektrodina mallinnetun raudoitteen kontakti-impedanssin muutos vaikuttaa kohteen potentiaalijakaumaan, joten sen pitäisi näkyä myös rekonstruktoidun admittiivisuuskajauksen muutoksena. Ensimmäisessä vaiheessa laskentamenetelmän toimivuutta testattiin muuttamalla raudoitteen kontakti-impedansseja komponentteja erittäin suuriksi ja pieniksi.

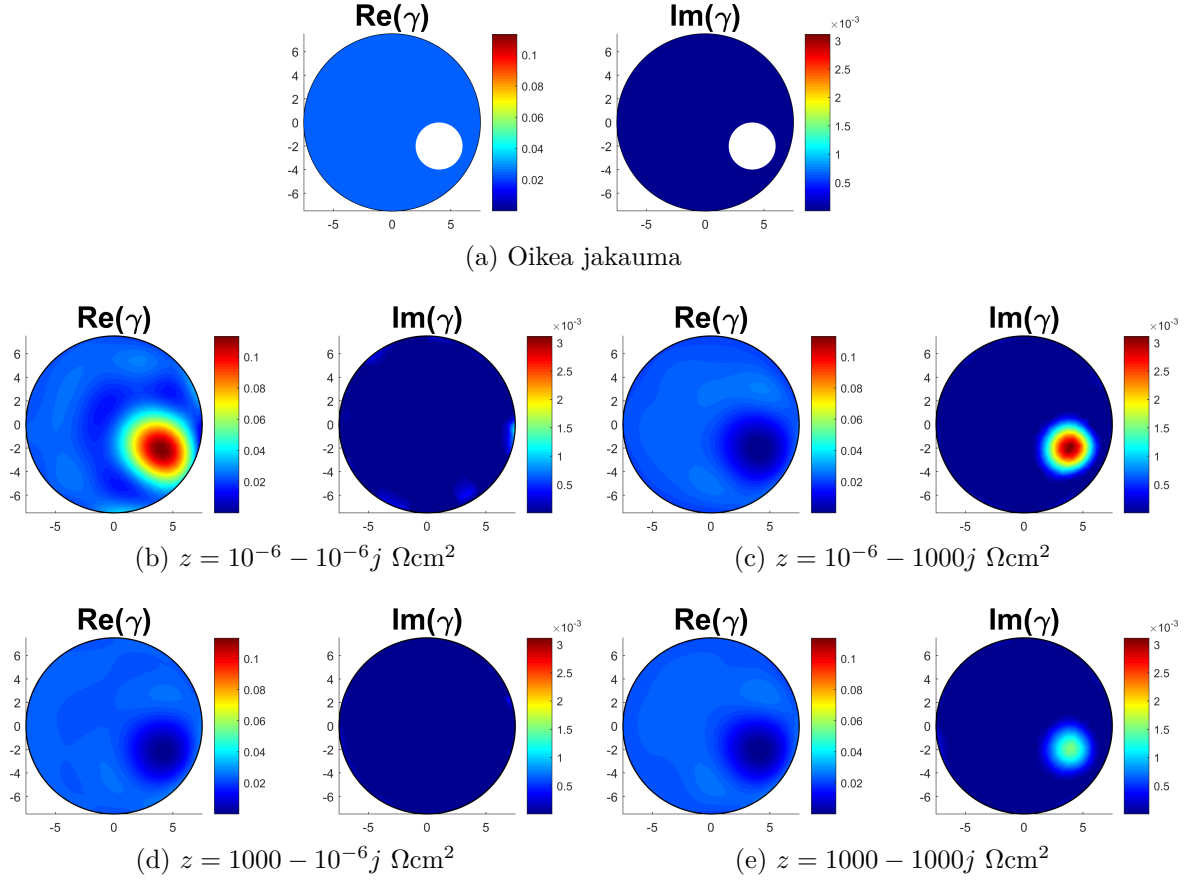
Raudoitteen kontakti-impedanssin vaikutus jatkuvana mallinnettuun admittiivisuuskajaumaan on monimutkainen. Jos impedanssia merkitään  $Z = R + jX$ , missä  $R$  on reaalinen resistanssi ja  $X$  imaginäärinen reaktanssi, on admittanssi  $Y$  tällöin

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{R}{R^2 + X^2} + j\frac{X}{R^2 + X^2}, \quad (4.1)$$

eli kontakti-impedanssin reaalinen ja imaginäärinen komponentti vaikuttavat admittiivisuuden molempiin komponentteihin. Tällöin esimerkiksi kontakti-impedanssin imaginääriosassa tapahtuva muutos voi vaikuttaa merkittävästi myös rekonstruktion admittiivisuuden reaaliosaan, mikä ei välttämättä ole intuitiivisesti selvää ja voi aiheuttaa haasteita laskennassa ja tulosten tulkinnessa.

Kuten Luvussa 3 havaittiin, metallin ja veden välisen kontakti-impedanssin suuruus riippuu käytetystä vaihtovirran taajuudesta. Simulaatioissa eri taajuuksilla mittaamista mallinnettiin muuttamalla sekä mittaaselektrodien ja sisäraudan kontakti-impedanssin arvoja.

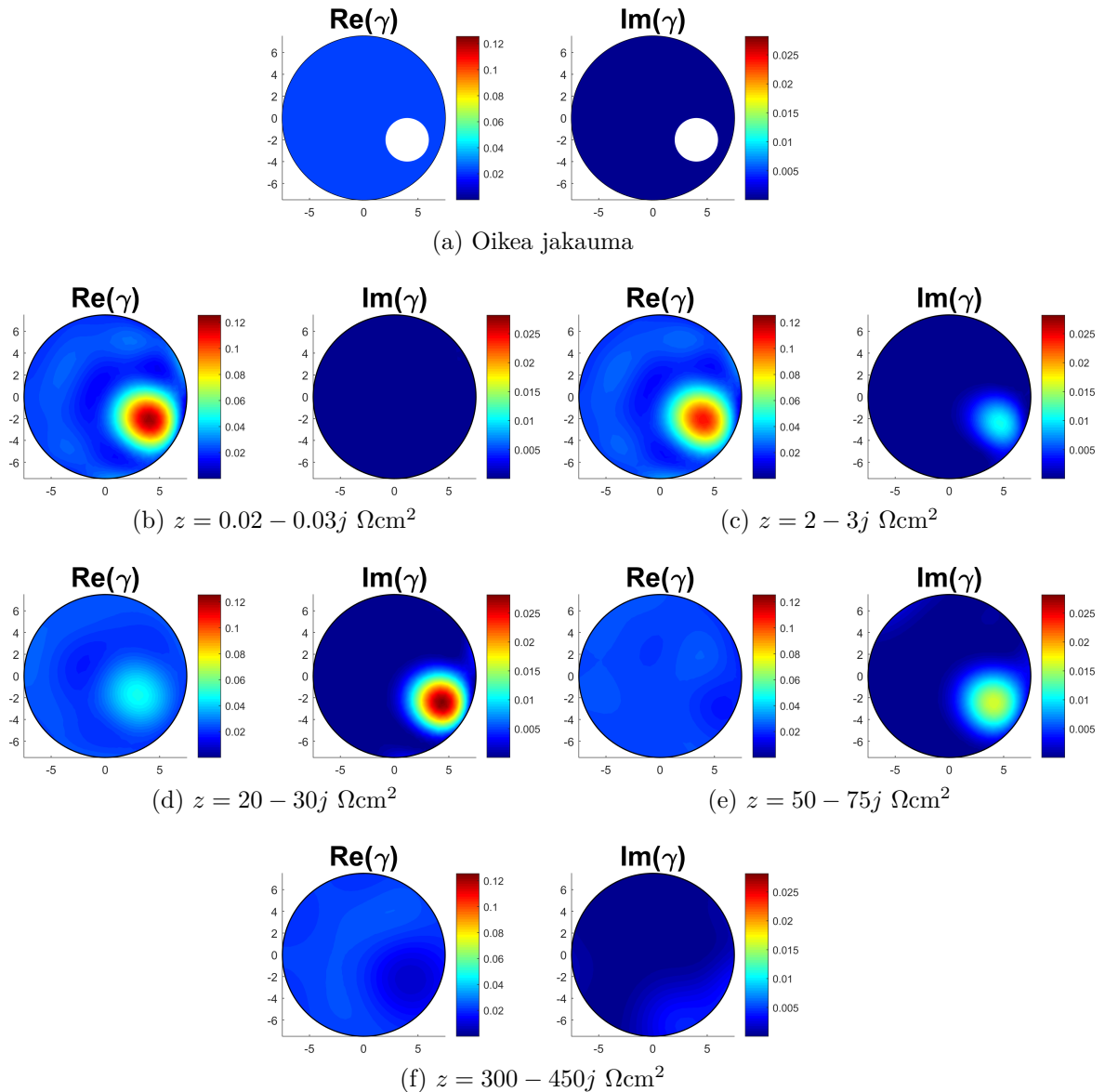
## 4.2.2 Tulokset ja pohdinta



Kuva 12: Aukkohilalla simuloitu oikea jakauma (a) ja rekonstruktioita eri sisäraudan kontakti-impedanssin arvoilla (b)  $z = 10^{-6} - 10^{-6}j \Omega\text{cm}^2$  (c)  $z = 10^{-6} - 1000j \Omega\text{cm}^2$  (d)  $z = 1000 - 10^{-6}j \Omega\text{cm}^2$  (e)  $z = 1000 - 1000j \Omega\text{cm}^2$ . Taustan admittiivisuus on  $250 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$  ja mittaalektrodien kontakti-impedanssit  $2 - 3 \Omega\text{cm}^2$ .

Kuvassa 12 on esitetty rekonstruktioita sisäelektrodihilalla simuloituista mittauksista erittäin suurilla ja pienillä raudoitteen kontakti-impedanssin arvoilla. Pienillä kontakti-impedanssin arvoilla (Kuvassa 12b) raudoite näkyy rekonstruktion reaalisassa johtavana. Raudoitetta simuloivalla elektrodilla on kapasitiivisia ominaisuuksia ainoastaan rajapinnalla kontakti-impedanssin seurauksena, joten pienillä kontakti-impedanssin imaginääriosan arvoilla rekonstruktion imaginääriosassa raudoitetta ei havaita. Jos kontakti-impedanssin reaaliosa on suuri, virta ei pääse kulkemaan raudoitteen kautta ja raudoite näkyy eristävänä rekonstruktioissa. Tilanteessa missä kontakti-impedanssin reaaliosa on pieni ja imaginääriosa suuri raudoite näkyy rekonstruktion reaalisassa eristävänä (Kuva 12c). Tämä johtuu impedanssin ja admittanssin välisestä riippuvuudesta (yhtälö (4.1)), ja tässä tilanteessa kontakti-impedanssin suuri imaginääriosa laskee myös rekonstruktion admittiivisuuden reaaliosan hyvin pieneksi. Vastaavasti tilanteessa jossa kohteen kontakti-impedanssin molemmat kom-

ponentit ovat hyvin suuria (Kuva 12e), näkyy raudoite heikemmin rekonstruktion imaginääriosassa kuin Kuvassa 12c koska suuri kontakti-impedanssin reaali-osa laskee myös admittiivisuuden imaginääriosaa.



Kuva 13: Aukkohilalla simuloitu oikea jakauma (a) ja rekonstruktioita tilanteissa joissa sisäraudan ja mittaelektrodien kontakti-impedanssit ovat keskenään samat. Kontakti-impedanssin arvot ovat (b)  $z = 10^{-6} - 10^{-6}j \Omega\text{cm}^2$  (c)  $z = 10^{-6} - 1000j \Omega\text{cm}^2$  (d)  $z = 1000 - 10^{-6}j \Omega\text{cm}^2$  (e)  $z = 1000 - 1000j \Omega\text{cm}^2$ . Taustan admittiivisuus on  $250 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ .

Kuvassa 13 on tarkasteltu tilannetta, jossa sekä raudoitteen että mittauselektrodien kontakti-impedanssit muuttuvat. Kontakti-impedanssit ovat kaikissa tilanteissa keskenään samat, eli simuloidaan tilannetta jossa raudoitteen ja elektrodien materiaali ovat sähköisiltä ominaisuuksiltaan lähellä toisiaan. Kuten Luvussa 3 havaittiin, kontakti-impedanssin suuruus riippuu käytetystä vaihtovirran taajuudesta, ja näissä

simulaatioissa kontakti-impedanssien muuttamisella simuloidaan mittauksia eri taajuuksilla.

Erittäin matalilla kontakti-impedanssien arvoilla Kuvassa 13b raudoite näkyy vain reaalisesti johtavana samoin kuin testirekonstruktiossa Kuvassa 12b, mikä vastaa tilannetta mitattaessa korkeilla taajuuksilla. Kontakti-impedanssien arvojen kasvaessa raudoite alkaa näkyä myös rekonstruktion imaginääriosassa, reaalipuolen muuttuessa johtavasta eristeeksi, samoin kuin Kuvassa 12. Erittäin suurilla kontakti-impedanssin arvoilla raudoite ei näy enää niin selkeästi rekonstruktioissa. Tämä johtuu luultavasti mittaalektrodien suurista kontakti-impedansseista joiden seurauksena mittauselektrodeilla tapahtuva potentiaalin muutos on huomattavasti suurempi kuin mittauskohteen admittiivisuusjakauman aiheuttava potentiaalin muutos. Näissä simulaatioissa simuloituun dataan lisätty kohina on verrannollinen mittausdatan suurimman ja pienimmän arvon erotukseen, jolloin tässä tilanteessa mittauskohinan suuruus verrattuna admittiivisuusjakaumassa tapahtuvaan potentiaalin muutokseen kasvaa merkittäväksi ja raudoitteen havaitseminen vaikeutuu.

### **4.3 Raudoitteen korroosion havaitseminen monitaajuuksimpedanssitomografian avulla**

Metallin pintaan muodostuva korroosio vaikuttaa metallin sähköisiin ominaisuuksiin, ja erityisesti metallin ja ympäröivän materiaalin kontakti-impedanssiin [12, 15, 52–56, 56]. Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, raudoitteen kontakti-impedanssin muutoksen pitäisi näkyä rekonstruktoidussa admittiivisuusjakaumassa.

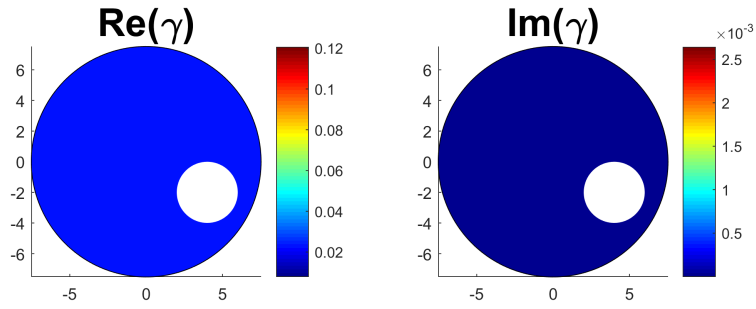
Korroosion muodostuminen on monimutkainen prosessi, jonka tarkka mallintaminen on haastavaa [15]. Esimerkiksi betonin ja teräksen välistä sähköistä kytkentää voidaan mallintaa erilaisilla kapasitiivisia ja resistiivisiä kytkentöjä sisältävillä virtapiireillä, mutta ne eivät ota huomioon kaikkia prosessissa tapahtuvia ilmiöitä [12, 13, 15]. Tarkkaa tietoa siitä miten korroosio vaikuttaa kontakti-impedanssin suuruuteen ei löydetty kirjallisuudesta, mutta impedanssispektroskopiomittauksissa on havaittu erityisesti korroosioprosessin alkuvaiheessa impedanssin amplitudin laskevan koko taajuusalueella [15, 52–55]. Näissä simulaatioissa korroosion muodostumista mallinnettiin laskemalla raudoitteen kontakti-impedanssi puoleen alkuperäisestä, mikä on havaittu esimerkiksi tutkimuksessa [55].

Korroosio vaikuttaa kontakti-impedanssin suuruuteen eri tavoin eri taajuuksilla. Esimerkiksi korkeilla taajuuksilla mitattaessa virta pääsee kulkemaan helpommin kapasitiivisen kytkennän kautta, jolloin korroosion aiheuttama muutos mitatussa impedanssissa on huomattavasti pienempi kuin matalilla taajuuksilla [12]. Mittaustaajuus vaikuttaa siis merkittävästi korroosion havaitsemiseen impedanssimittausten avulla. Näissä simulaatioissa kuitenkin oletettiin korroosion vaikuttavan kontakti-impedanssin molempiin komponentteihin samalla tavalla. Eri mittaustaajuudella mitaamista mallinnettiin simulaatioissa muuttamalla sekä mittauselektrodien ja kohteen kontakti-impedanssien suuruuksia.

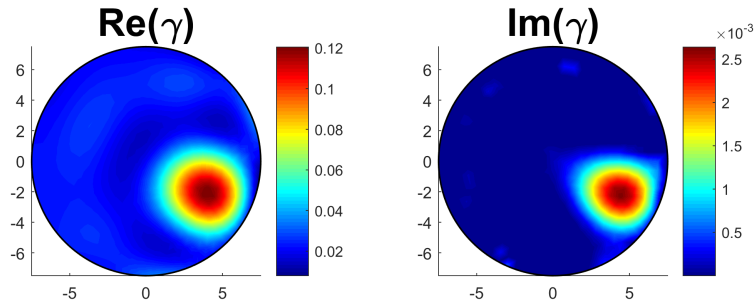
#### **4.3.1 Datan simulointi ja rekonstruktion laskenta**

Datan simulaatiot suoritettiin samassa sisäelektrodihilassa kuin Kappaleen 4.2. simulaatioissa, ja taustan admittiivisuudeksi asetettiin sama kuin Kappaleen 4.1 simulaatioissa. Kohinan lisäys ja rekonstruktioiden laskenta toteutettiin samalla tavalla kuin Kappaleessa 4.1. Simulaatioiden ensimmäisessä kuvassa mallinnetaan tilannetta jossa korroosioprosessi ei ole vielä alkanut, eli kohteen ja mittaelektrodien kontakti-impedanssit ovat samat. Korroosioprosessia mallinnettiin pienentämällä kohteen kontakti-impedanssia ensin 75 % alkuperäisestä ja lopulta 50 % alkuperäisestä.

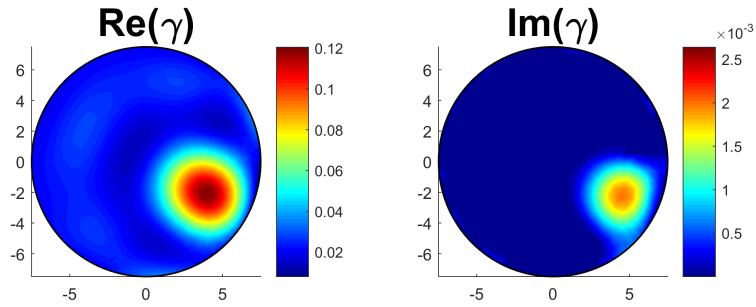
### 4.3.2 Tulokset ja pohdinta



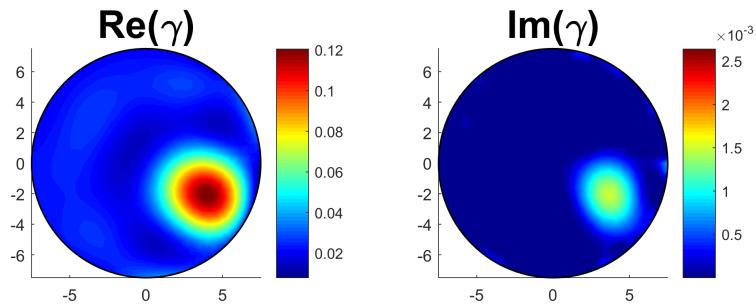
(a) Oikea jakauma mittauselektrodien  $z = 0.4 - 0.6j \Omega\text{cm}^2$



(b)  $z = 0.4 - 0.6j \Omega\text{cm}^2$

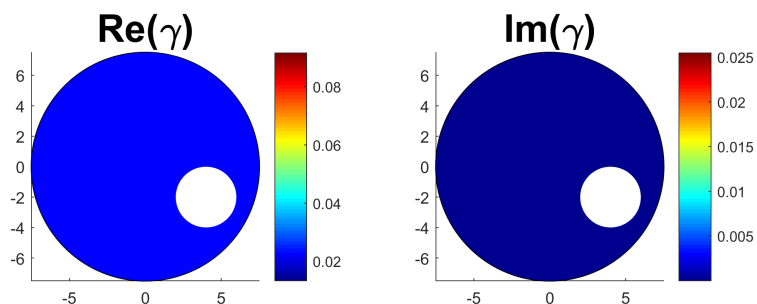


(c)  $z = 0.3 - 0.45j \Omega\text{cm}^2$

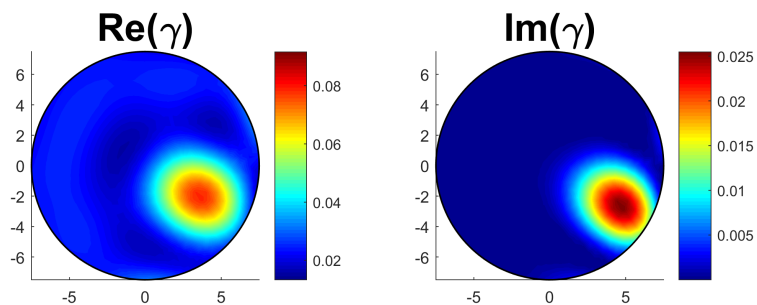


(d)  $z = 0.2 - 0.3j \Omega\text{cm}^2$

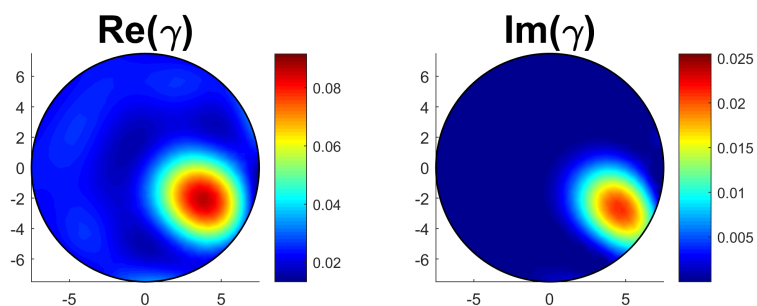
Kuva 14: Aukkohilalla simuloitu oikea jakauma (a) ja rekonstruktioita tilanteissa joissa mallinnetaan sisäraudan korroosiota pienentämällä kohteen kontakti-impedanssia. Sisäraudan kontakti-impedanssin arvot ovat (b)  $z = 0.4 - 0.6j \Omega\text{cm}^2$  (c)  $z = 0.3 - 0.45j \Omega\text{cm}^2$  ja (d)  $z = 0.2 - 0.3j \Omega\text{cm}^2$ . Taustan admittiivisuus on  $250 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$  ja mittauselektrodien kontakti-impedanssit  $0.4 - 0.6j \Omega\text{cm}^2$ .



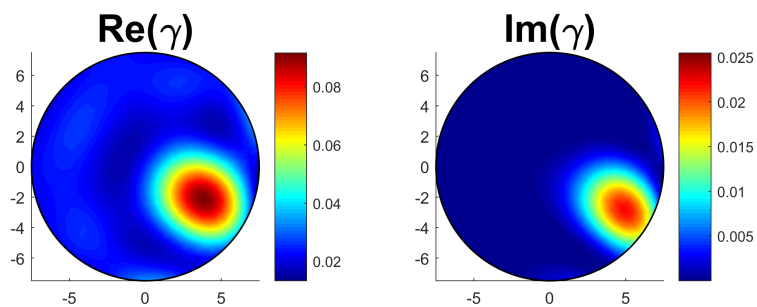
(a) Oikea jakauma mittauselektrodien  $z = 10 - 15j \Omega\text{cm}^2$



(b)  $z = 10 - 15j \Omega\text{cm}^2$

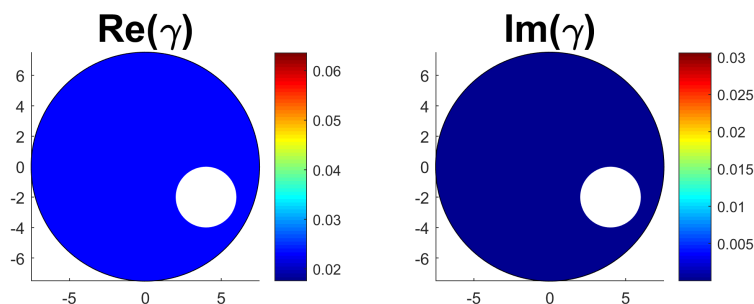


(c)  $z = 7.5 - 11.25j \Omega\text{cm}^2$

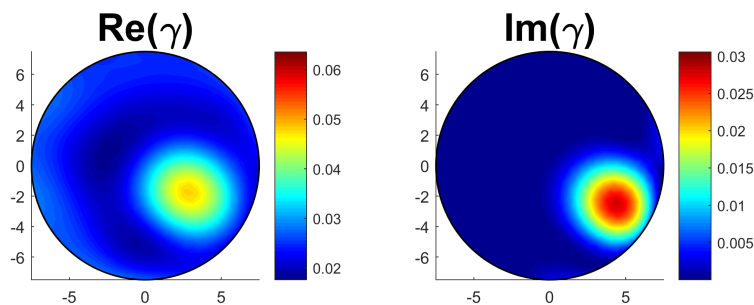


(d)  $z = 5 - 7.5j \Omega\text{cm}^2$

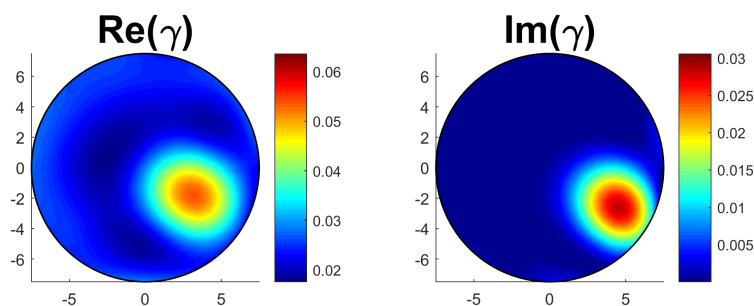
Kuva 15: Aukkohilalla simuloitu oikea jakauma (a) ja rekonstruktioita tilanteissa joissa mallinnetaan sisäraudan korroosiota pienentämällä kohteen kontakti-impedanssia. Sisäraudan kontakti-impedanssin arvot ovat (b)  $z = 10 - 15j \Omega\text{cm}^2$  (c)  $z = 7.5 - 11.25j \Omega\text{cm}^2$  ja (d)  $z = 5 - 7.5j \Omega\text{cm}^2$ . Taustan admittiivisuus on  $250 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$  ja mittauselektrodien kontakti-impedanssit  $10 - 15j \Omega\text{cm}^2$ .



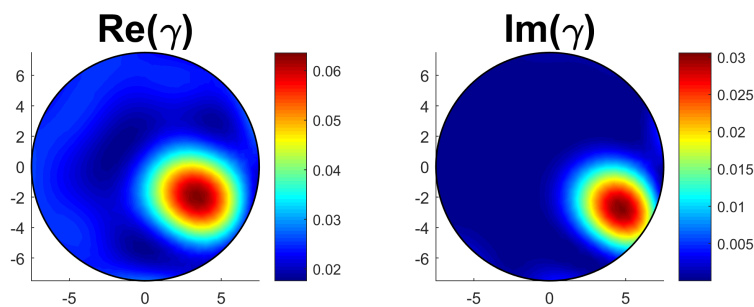
(a) Oikea jakauma, mittauselektrodien  $z = 20 - 30j \Omega\text{cm}^2$



(b)  $z = 20 - 30j \Omega\text{cm}^2$



(c)  $z = 15 - 25j \Omega\text{cm}^2$



(d)  $z = 10 - 20j \Omega\text{cm}^2$

Kuva 16: Aukkohilalla simuloitu oikea jakauma (a) ja rekonstruktioita tilanteissa joissa mallinnetaan sisäraudan korroosiota pienentämällä kohteen kontakti-impedanssia. Sisäraudan kontakti-impedanssin arvot ovat (b)  $z = 20 - 30j \Omega\text{cm}^2$  (c)  $z = 15 - 25j \Omega\text{cm}^2$  ja (d)  $z = 10 - 15j \Omega\text{cm}^2$ . Taustan admittiivisuus on  $250 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$  ja mittauselektrodien kontakti-impedanssit  $20 - 30j \Omega\text{cm}^2$ .



Kuvissa 14 - 16 on esitetty simulaatioita joissa on mallinnettu raudoitteen korroosiota, ja eri kuvissa on simuloitu mittauksia eri taajuuksilla. Kuvassa 14 on simuloitu mittauksia korkealla taajuuksilla, jolloin sekä raudoitteen että mittauselektrodien kontakti-impedanssit ovat matalia. Korroosion muodostuminen havaitaan erityisesti admittiivisuuskäyrän imaginääriosassa. Tämä johtuu todennäköisesti matalasta kontakti-impedanssista; pienillä sisäraudan kontakti-impedanssin arvoilla admittiivisuuden reaaliosa on rekonstruktioissa hyvin suuri raudoitteen alueella, joten muutos pienessä kontakti-impedanssin reaaliosassa ei aiheuta merkittävää muutosta admittiivisuuskäyrän reaaliosaan rekonstruktiossa. Imaginääriosassa muutos on suhteessa huomattavasti suurempi, jolloin muutos näkyy rekonstruktion admittiivisuuskäyrän imaginääriosassa huomattavasti voimakkaampana.

Matalammalla taajuuksilla mitattaessa Kuvassa 15 korroosion muodostuminen on havaittavissa molemmissa admittiivisuuskäyrän komponenteissa. Verrattuna ensimmäiseen korroosiosimulaatioon tällä mittaustaajuuksilla rekonstruktioissa muutos admittiivisuuden reaaliosassa on havaittavissa myös reaaliosassa, mutta muutos imaginääriosassa on huomattavasti pienempi.

Matalimmalla taajuuksilla mitattaessa Kuvassa 16 korroosion muodostuminen on havaittavissa rekonstruktioissa selkeästi vain admittiivisuuden reaaliosassa. Koska kohteen kontakti-impedanssi on suuri, rekonstruktioissa admittiivisuuden reaaliosa on hyvin pieni ja muuttuu suhteessa voimakkaammin kuin edellisissä korroosiosimulaatioissa. Rekonstruktiossa admittiivisuuden imaginääriosassa on puolestaan korkea, jolloin suhteellinen muutos ei ole niin suuri kuin aiemmissa korroosiosimulaatioissa.

Korroosiosimulaatioiden perusteella käytetyllä mittaustaajuuksilla on merkittävä vaikutus korroosion havaitsemiseen. Korkeilla taajuuksilla mitattaessa korroosion muodostuminen on havaittavissa erityisesti admittiivisuuden imaginääriosassa, ja matalilla taajuuksilla mitattaessa erityisesti admittiivisuuden reaaliosassa.

Sisäelektrodihila mallintaa raudoitteita sisältävää rakennetta jatkuvaa hilaa paremmin, sillä raudoitteita sisältävän rakenteen admittiivisuuskäyrä ei ole useinkaan jatkuva. Korroosioprosessi tapahtuu metallin pinnassa eikä juurikaan vaikuta metallikappaleen sisäiseen rakenteeseen. Sisäelektrodihilalla muodostettu jakauma ei ole jatkuva ja kuvaa raudoitetta jatkuvaa admittiivisuuskäyrää paremmin, mutta käytetty EIT:n malli olettaa jakauman olevan jatkuva. Tämä voi aiheuttaa merkittävää mallinnusvirhettä mikä voi aiheuttaa mallinnusvirhettä laskennassa. Sama

ongelma voi esiintyä myös käytännön mittauksissa, esimerkiksi raudotteita sisältävän betonin kuvantamisessa.

Korroosion muodostuminen ja sen vaikutus metallin sähköisiin ominaisuuksiin on monimutkainen ilmiö. Usein korroosio vaikuttaa metallin sähköisiin ominaisuuksiin eri taajuuksilla eri tavalla, ja esimerkiksi korkeilla taajuuksilla korroosio ei vaikuta kontakti-impedanssiin niin voimakkaasti kuin matalilla taajuuksilla [15]. Simulaatioissa oletettiin kontakti-impedanssin muuttuvan tasaisesti ja samalla tavalla molemmissa komponenteissa, mikä ei välttämättä vastaa oikeaa tilannetta.

Simulaatioissa käytetyt kontakti-impedanssin muutokset olivat myös suhteellisen isoja. Tutkimuksissa on havaittu korroosion vaikuttavan merkittävästi kontakti-impedanssin suuruuteen, mutta tarkkaa tietoa muutoksen suuruudesta ei ollut käytettävissä. Simulaatioiden realistisuutta voitaisiin kehittää jos tarkempaa tietoa korroosion vaikutuksesta kontakti-impedanssiin olisi saatavilla. Kvalitatiivisesti korroosion havaitseminen oli kuitenkin mahdollista näiden simulaatioiden perusteella.

Admittiivisuusjakaumalle käytetty *smoothness prior* -prioritiheys olettaa admittiivisuusjakauman olevan sileä. Tämä ei myöskään vastaa todellista tilannetta, missä raudotteen aiheuttama muutos admittiivisuusjakaumassa on hyvin jyrkkä. Käyttämällä tarkempaa prioritiheyttä rekonstruktioiden tarkkuutta saattaisi olla mahdollista parantaa.

Laskennassa käytetyt hilat olivat suhteellisen harvoja. Impedanssitomografia on laskennallisesti raskas ongelma ja simulaatioissa käytettiin harvoja hiloja laskenta-ajan pienentämiseksi. Harvat laskentahilat voivat myös aiheuttaa merkittävää mallinnusvirhettä laskentaan. Tiheämpiä hiloja käyttämällä mallinnusvirheitä voitaisiin pienentää, mutta tällöin laskenta-aika kasvaa myös merkittävästi.

Simulaatioissa käytetty mittausasetelma on myös hyvin yksinkertainen, ja mitattavan kohteen sähköiset ominaisuudet yksinkertaisia. Taustamateriaalina käytetyn veden admittiivisuus oletettiin täysin reaaliseksi, mutta esimerkiksi betonilla on myös taajuudesta riippuvia kapasitiivisia ominaisuuksia. Betoni ei myöskään ole täysin homogeeninen materiaali, ja esimerkiksi pienetkin halkeamat vaikuttavat admittiivisuusjakaumaan merkittävästi. Simulaatioissa käytetty ympyräsylinterin muotoinen kohde on myös muodoltaan yksinkertainen ja laskennallisesti helpompi kuin monet betonirakenteet. Näiden tarkka huomioiminen tekee mallista hyvin monimutkaisen,

ja siten myös esimerkiksi betonin kuvantamisesta haasteellista.

## 5 Johtopäätökset

Tämän tutkielman tavoitteena oli tutustua monitaajuusimpedanssitomografian mitausperiaatteeseen ja laskentamenetelmiin yksinkertaisten laboratoriomittausten ja simulaatioiden avulla. Erityisesti tavoitteena oli tutkia monitaajuusimpedanssitomografian soveltuvuutta raudoitteita sisältävän rakenteen kuvantamiseen simulaatioiden avulla.

Elektrodien kontakti-impedanssit saatiin määritettyä laboratorioskokeiden avulla, ja tulokset vastasivat kvalitatiivisesti muiden tutkimuksien tuloksia. Potentiaalimittauksissa havaittiin mittalaitteen sisäisen impedanssin aiheuttavan merkittävää mallinnusvirhettä jos sitä ei huomioida mallissa. Vaikka sisäinen impedanssi olisi hyvin suuri, voi sillä olla merkittävä vaikutus erityisesti korkeilla taajuuksilla mitattaessa. Huomioimalla mittalaitteen sisäinen impedanssi estimaattien tuloksia saatiin huomattavasti parannettua.

Impedanssitomografiassa admittiivisuusjakaumaa mallinnetaan jatkuvalla jakaumalla, ja rekonstruktiot käyttäytyivät loogisesti vaikka mittauksia simuloitiin epäjatkevasta admittiivisuusjakaumasta sisäelektrodihilan avulla. Tämä voi aiheuttaa mallinnusvirhettä, mutta ainakin näiden simulaatioiden perusteella jatkuvan mallin avulla voidaan kuvantaa myös epäjatkuvia kohteita.

Kohteen kontakti-impedansseja muuttamalla mallinnettu korroosio oli selkeästi havaittavissa rekonstruktioissa. Eri taajuudella mitattaessa kontakti-impedanssin muutos näkyi rekonstruktiossa admittiivisuuden komponenteissa eri tavalla, eli useampaa mittaustaajuutta käyttämällä voidaan saada kohteesta enemmän tietoa kuin yhdellä taajuudella mitattaessa. Mittaustaajuus voi vaikuttaa myös merkittävästi mittausdatan laatuun, ja erityisesti matalilla taajuuksilla mitattaessa liian suuret mittaus-elektrodien kontakti-impedanssit voivat vaikeuttaa kohteen kuvantamista.

Usein impedanssitomografiamittauksissa tarkastellaan vain admittiivisuuden reaali-osaa, mutta simulaatioissa havaittiin että myös admittiivisuusjakauman imaginääriosasta voidaan saada oleellista tietoa kohteesta. Tietyillä taajuuksilla korroosion aiheuttama muutos ei näy rekonstruktiossa juurikaan admittiivisuusjakauman reaali-osassa, jolloin pelkän reaali-osan perusteella kohteesta ei juurikaan saada tietoa. Kompleksisen admittiivisuusjakauman rekonstruktio on kuitenkin laskennallisesti

huomattavasti raskaampaa kuin pelkän reaaliosan estimoiminen.

Korroosion muodostuminen on erittäin monimutkainen ilmiö, ja sen mallintaminen on haastavaa. Tässä tutkielmassa käytetty EIT:n malli ei välttämättä kuvaa raudoitteita ja niissä tapahtuvaa korroosiota tarkasti, joten simulaatioiden tulokset eivät välttämättä vastaa oikeita mittauksia riittävän tarkasti. Raudoitteen kontakti-impedanssin vaikutus jatkuvana mallinnettuun admittiivisuusjakaumaan on myös monimutkainen, ja tietyissä tilanteissa muutokset kontakti-impedanssissa voivat aiheuttaa epäintuitiivisia muutoksia rekonstruoidussa admittiivisuusjakaumassa.

Tässä tutkielmassa tehtyjen simulaatioiden perusteella raudoitteita sisältävän rakenteen kuvantaminen on mahdollista monitaajuusimpedanssitomografian avulla. Simulaatioiden tulokset ovat kuitenkin hyvin kvalitatiivisia, ja tässä tutkielmassa käytetyn laskentamallin soveltuvuutta oikeisiin mittauksiin ei ole mahdollista todeta näiden simulaatioiden perusteella. Monitaajuusimpedanssitomografia vaikuttaa kuitenkin olevan potentiaalinen menetelmä raudoitteiden korroosion kuvantamiseen, ja menetelmän soveltuvuutta raudoitteita sisältävän rakenteen ja raudoitteiden korroosion kuvantamiseen on syytä tutkia enemmän.

## Viitteet

- [1] Vauhkonen, M.: *Electrical impedance tomography and prior information*. Väitöskirja, University of Kuopio, 1997.
- [2] Vauhkonen, P.: *Image reconstruction in Three-Dimensional Electrical Impedance Tomography*. Väitöskirja, University of Kuopio, 2004.
- [3] Brown, B. H.: *Electrical impedance tomography (EIT): a review*. Journal of Medical Engineering & Technology, 27(3):97–108, 2003.
- [4] Aristovich, K. Y., B. C. Packhama, H. Kooa, G. Sato dos Santos, A. McEvoy ja D. S. Holder: *Imaging fast electrical activity in the brain with electrical impedance tomography*. NeuroImage, 124:204–213, 2016.
- [5] Williams, R. A. ja M. S. Beck: *Process tomography: Principles, Techniques and Applications*. Butterworth-Heinemann, 1995.
- [6] Lehtikoinen, A.: *Modeling Uncertainties in Process Tomography and Hydrogeophysics*. Väitöskirja, University of Eastern Finland, 82, 2012.
- [7] Wang, M., A. Dorward, D. Vlaev ja R. Mann: *Measurements of gas-liquid mixing in a stirred vessel using electrical resistance tomography (ERT)*. Chemical Engineering Journal, 77:93–98, 2000.
- [8] Na, W., J. Jia, X. Yu, Y. Faraj, Q. Wang, Y. Meng, M. Wang ja W. Sun: *Imaging of gas-liquid annular flows for underbalanced drilling using electrical resistance tomography*. Flow Measurement and Instrumentation, 46:319 – 326, 2015.
- [9] Karhunen, K.: *Electrical Resistance Tomography Imaging of Concrete*. Väitöskirja, University of Eastern Finland, 122, 2013.
- [10] Hallaji, M., A. Seppänen ja M. Pour-Ghaz: *Electrical Resistance Tomography to Monitor Unsaturated Moisture Flow in Cementitious Materials*. Cement and Concrete Research, 69:10–18, 2014.
- [11] Karhunen, K., A. Seppänen, A. Lehtikoinen, P. J. M. Monteiro ja J. P. Kaipio: *Electrical Resistance Tomography imaging of concrete*. Cement and Concrete Research, 40:137–145, 2010.

- [12] Zhang, J., P. J. M. Monteiro ja H. F. Morrison: *Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of Reinforcing Bar in Concrete - Part 1: Experimental Results*. ACI Materials Journal, 98-M14, 2001.
- [13] Zhang, J., P. J. M. Monteiro ja H. F. Morrison: *Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of Reinforcing Bar in Concrete - Part 2: Forward modeling*. ACI Materials Journal, 99-M24, 2002.
- [14] Zhang, J., P. J. M. Monteiro ja H. F. Morrison: *Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of Reinforcing Bar in Concrete - Part 3: Effect of Geometry and Material Properties*. ACI Materials Journal, 101-M30, 2004.
- [15] Gu, P., S. Elliott, R. Hristova, J. J. Beaudoin, R. Brosseau ja B. Baldock: *A study of Corrosion Inhibitor Performance in Chloride Contaminated Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy*. ACI Materials Journal, 94-M46:385 – 395, 1997.
- [16] Brandstätter, B., H. Scharfetter ja C. Magele: *Multi frequency electrical impedance tomography*. The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 20(3):828 – 847, 2001.
- [17] Heikkinen, L.: *Statistical Estimation Methods for Electrical Process Tomography*. 2005.
- [18] Yppäriälä, H.: *Electrical properties of tissues and complex impedance imaging*. University of Kuopio Department of Applied Physics Report Series, Report 9/01, 2001.
- [19] Somersalo, E., M. Cheney ja D. Isaacson: *Existence and uniqueness for electrode models for electric current computed tomography*. Siam J. Appl. Math, 52:1023–1040, 1992.
- [20] Kaipio, J. ja E. Somersalo: *Statistical and Computational Inverse Problems*. Springer, 1. painos, 2005, ISBN 978-0-387-27132-3.
- [21] Lipponen, A., A. Seppänen ja J. Kaipio: *Electrical impedance tomography imaging with reduced-order model based on proper orthogonal decomposition*. Journal of Electronic Imaging, 22:8 – 23, 2013.
- [22] Vilhunen, T., L. M. Heikkinen, T. Savolainen, P. J. Vauhkonen, R. Lappalainen, J. P. Kaipio ja M. Vauhkonen: *Detection of faults in resistive coatings with an*

- impedance-tomography-related approach*. Measurement Science and Technology, 13:865–872, 2002.
- [23] Ammari, H., L. Giovangigli ja L. H. Nguyen: *Admittivity imaging from multi-frequency micro-electrical impedance tomography*. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 449(2):1601 – 1618, 2014.
- [24] Wi, H., H. Sohal, A. L. McEwan, E. J. Woo ja T. I. Oh: *Multi-Frequency Electrical Impedance Tomography System With Automatic Self-Calibration for Long-Term Monitoring*. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 8:119 – 128, 2014.
- [25] Romsauerova, A., A. McEwan, L. Horesh, R. Yerworth, R. H. Bayford ja D. S. Holder: *Multi-frequency electrical impedance tomography (EIT) of the adult human head: initial findings in brain tumours, arteriovenous malformations and chronic stroke, development of an analysis method and calibration*. Physiological Measurement, 27:147 – 161, 2006.
- [26] Boverman, G., T. Kao, R. Kulkarni, B. Kim, D. Isaacson, G. J. Saulnier ja J. C. Newell: *Robust Linearized Image Reconstruction for Multifrequency EIT of the Breast*. IEEE Transactions on Medical Imaging, 27(3), 2008.
- [27] Malone, E., G. S. Santos, D. Holder ja S. Arridge: *Multifrequency Electrical Impedance Tomography Using Spectral Constraints*. IEEE Transactions on Medical Imaging, 33(2):340 – 350, 2014.
- [28] Malone, E., G. S. Santos, D. Holder ja S. Arridge: *A Reconstruction-Classification Method for Multifrequency Electrical Impedance Tomography*. IEEE Transactions on Medical Imaging, 34(7):1486 – 1497, 2015.
- [29] T. I. Oh and H. Koo and K. H. Lee and S. M. Kim and J. Lee and S. W. Kim and J. K. Seo and E. J. Woo: *Validation of a multi-frequency electrical impedance tomography (mfEIT) system KHU Mark1: impedance spectroscopy and time-difference imaging*. Physiological Measurement, 29:295–307, 2008.
- [30] Kim, S., E. J. Lee, E. J. Woo ja J. K. Seo: *Asymptotic analysis of the membrane structure to sensitivity of frequency-difference electrical impedance tomography*. 2012.
- [31] Mann, R., F. J. Dickin, M. Wang, T. Dyakowski, R. A. Williams, R. B. Edwards, A. E. Forrest ja P. J. Holden: *Application of electrical resistance tomography*



- to interrogate mixing processes at plant scale.* Chemical Engineering Science, 52(13):2087–2097, 1997.
- [32] Kourunen, J.: *Imaging of Mixing in Selected Industrial Processes Using Electrical Resistance Tomography.* 166, 2014.
- [33] J. Kourunen and R. Käyhkö and J. Matula and J. Käyhkö and M. Vauhkonen and L. Heikkinen: *Imaging of mixing of two miscible liquids using electrical impedance tomography and linear impedance sensor.* Flow Measurement and Instrumentation, 19:391–396, 2008.
- [34] Kwon, H., J. Choi ja J. K. Seo: *An electrical impedance monitoring method of water-lubricated oil transportation.* Flow Measurement and Instrumentation, 46:327 – 333, 2015.
- [35] Ma, Y., Z. Zheng, L. Xu, X. Liu ja Y. Wu: *Application of electrical resistance tomography system to monitor gas/liquid two-phase flow in a horizontal pipe.* Flow Measurement and Instrumentation, 12(4):259 – 265, 2001.
- [36] Dong, F., Z.X. Jiang, X.T. Qiao ja L.A. Xu: *Application of electrical resistance tomography to two-phase pipe flow parameters measurement.* Flow Measurement and Instrumentation, 14(4-5):183 – 192, 2003. Multi Phase Flow Measurement.
- [37] R.Harikumar, R.Prabu ja S.Raghavan: *Electrical Impedance Tomography (EIT) and Its Medical Applications: A Review.* International Journal of Soft Computing and Engineering, 3(4), 2013.
- [38] Avill, R., Y. F. Mangnall, N. C. Bird, B. H. Brown, D.C. Barber, A.D. Seagar, A. G. Johnson ja N. W. Read: *Applied potential tomography. A new noninvasive technique for measuring gastric emptying.* Gastroenterology, 92:1019 – 1026, 1987.
- [39] Zou, Y. ja Z. Guo: *A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection.* Medical Engineering and Physics, 25:79–90, 2003.
- [40] Rahman, T., M. M. Hasan, A. Farooq ja M. Z. Uddin: *Extraction of cardiac and respiration signals in electrical impedance tomography based on independent component analysis.* Journal of Electrical Bioimpedance, 4:38–44, 2013.
- [41] Costa, E. L. V., R. G. Lima ja M. B. P. Amato: *Electrical impedance tomography.* Current opinion in Critical Care, 15:18–24, 2009.

- [42] Fernandez-Corazza, M., L. Beltrachini ja N. von Ellenrieder: *Analysis of parametric estimation of head tissue conductivities using Electrical Impedance Tomography*. Biomedical Signal Processing and Control, 8:830 – 837, 2013.
- [43] Goharian, M., M. Soleimani, A. Jegatheesan, K. Chin ja G. R. Moran: *A DSP Based Multi-Frequency 3D electrical Impedance Tomography System*. Annals of Biomedical Engineering, 36(9):1594 – 1603, 2008.
- [44] Karhunen, K., A. Seppänen, A. Lehtikoinen, J. Blunt, J. P. Kaipio ja J. P. Monteiro: *Electrical Resistance Tomography for assessment of cracks in concrete*. ACI Materials Journal, 107:523 – 531, 2010.
- [45] Karhunen, K., A. Seppänen ja J. P. Kaipio: *An adaptive meshing approach for localization of cracks with electrical impedance tomography*. Inverse Problems and Imaging, 8(1):127 – 148, 2013.
- [46] Cabeza, M., M. Keddad, X. R. Novoa, I. Sanchez ja H. Takenouti: *Impedance spectroscopy to characterize the pore structure during the hardening process of Portland cement paste*. Electrochimica Acta, 51:1831 – 1841, 2006.
- [47] Andrade, C., V. M. Blanco, A. Collazo, M. Keddad, X. R. Novoa ja H. Takenouti: *Cement paste hardening process studied by impedance spectroscopy*. Electrochimica Acta, 44:4313 – 4318, 1999.
- [48] Perron, S. ja J. J. Beaudoin: *Freezing of water in portland cement paste - an AC impedance spectroscopy study*. Cement and Concrete Composites, 24:467 – 475, 2002.
- [49] Vilhunen, T., J. P. Kaipio, P. J. Vauhkonen, T. Savolainen ja M. Vauhkonen: *Simultaneous estimation of internal admittivity distribution and electrode contact impedances*. University of Kuopio Department of Applied Physics Report Series, 2002.
- [50] Nguyen, D. T., R. Kosobrodov, M. A. Barry, W. Chik, C. Jin, T. I. Oh, A. Thiagalingam ja A. McEwan: *Electrode-Skin contact impedance: In vivo measurements on an ovine model*. Journal of Physics: Conference Series, 434(1):012023.
- [51] Yang, L., M. Dai, C. Xu, G. Zhang, W. Li, F. Fu, X. Shi ja X. Dong: *The Frequency Spectral Properties of Electrode-Skin Contact Impedance on Human Head and Its Frequency-Dependent Effects on Frequency-Difference EIT in Stroke Detection from 10 Hz to 1 MHz*. PLOS ONE, 12(1):1–21, 2017.

- [52] Frateur, I., C. Deslouis, M. E. Orazem ja B. Tribollet: *Modeling of the cast iron/drinking water system by electrochemical impedance spectroscopy*. *Electrochimica Acta*, 44:4345 – 4356, 1999.
- [53] Song, J., L. Wang, A. Zibart ja C. Koch: *Corrosion Protection of Electrically Conductive Surfaces*. *Metals*, 2:450 – 477, 2012.
- [54] Liu, C., Q. Bi ja A. Matthews: *EIS comparison on corrosion performance of PVD TiN and CrN coated mild steel in 0.5 N NaCl aqueous solution*. *Corrosion Science*, 43:1953 – 1961, 2001.
- [55] Ni, C. S. ja L. Y. Lu: *Electrochemical Impedance and Modelling Studies of the Corrosion of Three Commercial Stainless Steels in Molten Carbonate*. *International Journal of Corrosion*, 2014, 2014.
- [56] Hamdy, A. S., E. El-Shenawy ja T. El-Bitar: *Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of the Corrosion Behaviour of Some Niobium Bearing Stainless Steels in 3.5 % NaCl*. *International Journal of Electrochemical Science*, 1:171 – 180, 2006.