

Daniel Lahtinen

# LEAD FIELD -MATRIISIN HYÖDYNTÄMINEN EEG:N SOVELLUKSISSA ZEFFIRO-OHJELMISTOSSA

# TIIVISTELMÄ

Daniel Lahtinen: Lead field -matriisin hyödyttäminen EEG: sovelluksissa Zeffiro-ohjelmistossa  
Kandidaattitutkielma  
Tampereen yliopisto  
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma  
Tammikuu 2024

---

Tämä tutkielma käsittelee aivokuvantamista, tarkemmin sanottuna EEG:tä ja sen ongelmia aivokuvantamismallinnuksessa, kuten EEG:n inversio-ongelmaa. Tutkielmassa käsitellään aihetta ja perustellaan, miksi kyseisen ongelman ratkaiseminen on olennaista. Tähän liittyy myös mahdolliset ratkaisut ongelmaan, kuten lead field -matriisin laskeminen ja sen hyödyttäminen kyseisessä tehtävässä.

Tutkielmassa myös selvennetään, että kyseinen aivokuvantamiseen liittyvän ongelman ratkaisemiseen liittyvä laskenta on vaikeaa ja raskasta ja siksi sen ratkaisemiseen on kehitelty erilaisia ohjelmistopaketteja. Tässä tutkimuksessa ohjelmistopakettina toimi Zeffiro ja siksi sitä esitelläänkin työssä. Tutkielman aiheena olikin, miten Zeffiroa voidaan käyttää ongelman ratkaisemiseen yhtenä vaihtoehtona.

Tämän seurauksena tutkielman tulos on käyttöopas tähän tiettyyn käyttötarkoitukseen eli lead field -matriisin hyödyttäminen laskennassa, jonka lopputuloksena on tuloksia kuten visualisatioita, jotka mallintavat signaalin lähteen mahdollista sijaintia. Tuloksen tarkoituksena on parantaa kokemattomankin käyttäjän mahdollisuuksia käyttää Zeffiroa tämän ongelman ratkaisemiseen.

Avainsanat: Aivokuvantaminen, EEG, inversio-ongelma, lead field -matriisi, Zeffiro

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto .....	1
2	Tutkimusmenetelmät ja -materiaalit.....	3
3	Tulos.....	8
4	Yhteenveto.....	17
	Lähdeluettelo.....	19

## 1 Johdanto

Tämän tutkielman tarkoitus on esitellä aivotutkimukseen liittyviä aivokuvantamisen menetelmiä ja niihin liittyviä ongelmakohtia, kuten aivojen signaalien paikannuksen mallintamista ja kartoittamista. Tämän kautta pyrin tuomaan esiin, miten erilaiset ohjelmistopakettit pyrkivät vastaamaan aivotutkimusten analyysien ongelmiin. Pohjana siis toimii erilaiset aivotutkimuksen tai aivokuvantamisen menetelmät, niiden ongelmat ja miten erilaiset ohjelmistot liittyvät tähän asiaan. Sitä kautta lähden tutkimaan tarkemmin yhden ohjelmiston yhtä tiettyä käyttötarkoitusta, miten se soveltuu kyseisen ongelman ratkaisuun ja tutkielman tuloksena on lyhytmuotoinen käyttöopas kyseisen ohjelman käyttämiseen juuri tähän käyttötarkoitukseen. Syynä tähän lähestymistapaan on käytännön tarve eli se, että tähän tutkielmaan valittuun ohjelmistoon ei ollut tekohtekellä riittävän kattavaa dokumentaatiota ja ohjeita saatavilla.

Tässä tutkielmassa huomio kohdistuu erityisesti EEG:n sovellukseen. EEG on lyhenne elektroenkefalografiasta. EEG:tä käsitellään luvussa kaksi tarkemmin, mutta olennaista on, että se on aivotutkimusmenetelmä, jota käytetään esimerkiksi neurologisten häiriöiden ja muihin aivojen toiminnan tutkimukseen, kuten kognitiivisiin toimintoihin liittyen. (Ilmoniemi & Sarvas, 2019, 1-3). Tutkielman aiheeseen liittyen on olennaista tässä vaiheessa mainita EEG:n ongelmista, joihin erilaisilla sovelluksilla pystytään vastaamaan. Yksi olennainen maininta on EEG:n inversio-ongelma. EEG:n inversio-ongelma on keskeinen haaste EEG:n käytössä. Se liittyy siihen, kuinka aivojen sisäiset sähköiset lähteet voidaan paikantaa EEG-signaalien perusteella, jotka on mitattu pään pinnalta. Tämä on haastavaa, koska useat eri aivojen sisäiset lähteet voivat tuottaa samanlaisen EEG-signaalin pään pinnalle. Lisäksi sama aivojen sisäinen lähde voi tuottaa erilaisia EEG-signaaleja riippuen esimerkiksi lähteen suunnasta tai pään rakenteellisista ominaisuuksista. (Grech et al., 2008, 2)

EEG:n inversio-ongelmaan ja moneen muuhun aivotutkimuskäyttöön on kehitetty ohjelmistoja, kuten Zeffiro (He, Rezaei & Pursiainen, 2020). Eri ohjelmistoilla on erilaisia

hyötyjä ja haittoja aivokuvantamiseen liittyvien ongelmien ratkaisuun sekä erilaisia menetelmiä ja mahdollisuuksia erilaisiin tehtäviin. Zeffiro esitellään luvussa kaksi tarkemmin, mutta tämän tutkielman tavoitteena oli tehdä lyhyt käyttöopas Zeffiron tiettyyn käyttötapaukseen, jonka kautta tutkimuskysymys muodostui:

- Miten ohjelmistoa (Zeffiroa) käytetään ratkaisemaan EEG:n inversio-ongelmaa lead field -matriisilaskennalla?

Oletuksena siis aiemman kirjallisuuden perusteella, että Zeffiroa voidaan käyttää tähän ongelmaan ja kysymyksenä on, että miten se toteutetaan käytännössä.

Luvussa kaksi esittelen tarkemmin läpikäymääni kirjallisuutta, jotka ovat tiedoltaan olennaisia seuraavien lukujen kannalta ja tekevät järjestyksestä loogisen. Aluksi käsitellään tarkemmin EEG:tä, EEG:n inversio-ongelmaa ja tämä toimii pohjana jatkolle. Sitten myös luodaan pohja lead field -matriisille ja sen käyttötarkoitukselle tämän ongelman käsittelyssä eli esimerkiksi inversiomenetelmille ja mahdollisuuksille ongelman ratkaisemaan. Siihen liittyen käsitellään erilaisia aivokuvantamisohjelmistoja ja miksi tämänlaisia on kehitetty. Seuraavaksi paneudutaan tarkemmin Zeffiroon, joka tutkielmassa tarkasteltu ohjelmistopaketti ja sen perusteisiin ja aiempaan kirjallisuuteen kyseisestä ohjelmistosta.

Tuloksena, eli luvussa kolme esiteltyinä osuutena, syntyi lyhyt käyttöopas Zeffiron käyttämiseen EEG:n inversio-ongelmaan eli signaalin lähteen paikannukseen ja miten se käyttää lead field -matriisilaskentaa tässä prosessissa. Käyttöoppaan avulla voidaan askel askeleelta toteuttaa tämä prosessi ja lopputuloksena on esimerkiksi erilaisia visualisaatioita, joissa näkyy todennäköisyyksiä lähteen sijainnille. Lopussa vielä luvussa neljä on johtopäätökset ja yhteenveto, joissa käsitellään tutkielman olennaisimpia osia liittyen aiempiin tutkimuksiin, tutkimuksen tuloksiin ja esimerkiksi jatkotutkimusmahdollisuuksiin sekä kriittisiä näkemyksiä liittyen tutkielman eri osuuksiin. Lopussa on vielä tutkielman lähdeluettelo.

## 2 Tutkimusmenetelmät ja -materiaalit

Tutkielman yksi tutkimusmenetelmä oli kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsausta käytetään, kun tutkitaan mitä olemassa olevaa tietoa on, miten se kytkeytyy omaan tutkimukseen ja luodaan olennaista taustaa oman tutkimuksen kannalta. Siihen kuuluu esimerkiksi tiedonhankintaprosessi, lähteiden kriittinen lukeminen ja valikointi ja kokonaisuuden muodostaminen oman tutkielman kannalta olennaisella tavalla. (Vilkka, 2023)

Se on tarpeellista, että tutkielmalla on pohjatieto, viittaukset aiempaan tutkimukseen liittyen omaan aiheeseen ja että voidaan perustella, miksi juuri tätä on lähdetty tekemään. Tässä tutkielmassa kirjallisuuskatsauksen olennaisimpia osia olivat aivotutkimusmenetelmät sekä niihin liittyvät ongelmat ja miten erilaiset ohjelmistopakettit pyrkivät vastaamaan niihin. Tähän liittyvänä materiaalina oli myös tutkielman kohteena olevan Zeffiro-ohjelmiston esittely julkaisuihin perustuen.

Kirjallisuutta on etsitty käyttäen päähakusanoina näitä: ”EEG”, ”EEG inverse problem”, ”lead field”, ”Brain Computer Interface” ja ”Zeffiro”. Näiden kautta on tarkasteltu erilaisia mahdollisuuksia ja valittu sieltä sopivimpia lähteitä aiheen kannalta. Tietokantahaut tuottavat tulokset relevanttiusjärjestyksessä, joten tarkasteluun on usein otettu noin ensimmäiset 10-20 artikkelia, joista on valittu avainsanojen ja tiivistelmän perusteella olennaisimmat.

Kirjallisuuskatsaus ei toiminut tässä tutkielmassa ainoana menetelmänä, joten analyysi ei ollut kattavaa. Kirjallisuuden tarkoituksena oli tarjota pohjatiedot siihen, miksi ohjelmistopaketteja käytetään tähän tarkoitukseen ja esitellä aihepiirin taustaa muutenkin, jotta lukijalle tulisi perusymmärrys aiheesta ennen varsinaista tulososuutta eli tutoriaalin tekoa Zeffiron tiettyyn käyttötapaukseen. Seuraavaksi käsitelläänkin taustakirjallisuutta tutkielmaa tehdessä johdonmukaiselta vaikuttaneella järjestyksellä.

Kiinnostus aivokuoren alapuolella eli subkortikaalisen aivotoiminnan havaitsemiseen on kasvanut viime vuosina, koska sillä voidaan saada lisätietoa ja uusia keinoja sairauksien kuten alzheimerin ja parkinsonin taudin tutkimiseen ja hoitoon. Aktivaation havaitseminen ja mallintaminen on haastavaa, koska aivojen syvät rakenteet ovat kaukana noninvasiivisten eli aivoihin kajoamattomien menetelmien sensoreista. Tähän liittyvät seuraavaksi käsitellyt menetelmät ja miksi erilaisia ohjelmistoja käytetään signaalin paikantamiseen. (Rezaei et al., 2021, 1)

Aivotutkimuksessa muutenkin, kuten kognitiivisten toimintojen tutkimuksessa, pyritään havaitsemaan aivojen anatomisia yhteyksiä ja aktivaatioita. Aivokuvantamisessa vaihtoehtoja ovat myös esimerkiksi PET ja FMRI, mutta EEG:n ja MEG:n on todettu olevan erinomaisia, kun tutkitaan ajallista resoluutiota, mikä on tärkeää analysoidessa erilaisia yhteyksiä ja värähtelyä aivoissa. Siksi niitä käytetäänkin kattavasti tähän tarkoitukseen ja niitä käytetään usein, kun pyritään saamaan paikantamiseen hyvää resoluutiota. (He & Pursiainen, 2021, 50-52)

Elektroenkefalografia (EEG) on noninvasiivinen menetelmä aivojen sähköisen toiminnan tallentamiseen (Lazarou et al., 2018, 1). Se mittaa jännitevaihteluita, jotka johtuvat aivojen neuronien aktivoitumisesta (Hong, Khan & Hong, 2018, 1-2). EEG:tä käytetään yleisesti neurologisten häiriöiden, kuten epilepsian ja unihäiriöiden, diagnosointiin ja seurantaan. Sitä käytetään myös tutkimuksessa aivojen toiminnan tutkimiseen liittyen kognitiivisiin toimintoihin, kuten huomioon, muistiin ja kieleen. (Ilmoniemi & Sarvas, 2019, 1-3)

EEG-signaali saadaan sijoittamalla useita elektrodeja kohteen päänahkaan, joihin on kehitelty erilaisia malleja, kuten 10-20-systeemi, joka on yksi tapa kiinnittää elektrodit. Nämä elektrodit havaitsevat pienten sähkövarauksien muutokset, jotka johtuvat aivosolujen toiminnasta. Signaalit vahvistetaan ja tallennetaan. (Greenfield, Carney & Geyer, 2020, 70-78). EEG:tä voidaan käyttää myös yhdistelmänä muihin sensoreihin esimerkiksi liikunnan tutkimuksessa (Nathan & Contreras-Vidal, 2016, 1-2).

Vaikka aivojen syvien osien aktivaation havaitseminen ja mallintaminen on haastavaa, EEG:n on havaittu tunnistavan näitä aktivaatioita ja niitä voidaan myös pyrkiä paikantamaan käyttäen EEG:tä. Paikantamisen tarkkuus on kuitenkin haaste ja siihen tarvitaan erilaisia paikannustekniikoita, kuten lähteen jälleenrakennustekniikoita ja simulaatioita, joihin ohjelmistoja käytetään. Lähteen tarkka paikannus on olennaista jatkotoimenpiteille, kun esimerkiksi pyritään hoitamaan epilepsiaa tai muita sairauksia. (Seeber et al., 2019)

EEG:tä käyttäessä aivokuvantamisen tuloksien tulkinnassa on kuitenkin inversio-ongelma eli käänteinen ongelma, jolla tarkoitetaan sitä, että vaikka sensorien data eli tulokset aktivaatiosta ovat selvillä, alkuarvoja eli lähteitä ei voida tietää tarkasti. Tarkemmin sanottuna aivojen sähköisen aktivaatioiden lähdepaikannuksessa on inversio-ongelma, jolloin tarvitaan erilaisten mahdollisuuksien arviointia erilaisilla lisäoletuksilla. Sensorien määrä ei siis riitä tarkkaan paikannukseen, jonka takia voi olla esimerkiksi tuhansia potentiaalisia lähteitä eri aivojen alueilla. Ongelmaan pyritään vastaamaan erilaisilla inversiomenetelmillä, jotka ovat yleensä rajoittuneita joko paikkatietoon tai ajalliseen tietoon, mutta ei kumpaankin tarkasti samaan aikaan. Tämänkaltaisiin ongelmiin on pyritty vastaamaan aivokuvantamisohjelmistoilla. (Castano-Candamil et al., 2015)

Yksi keino vastata EEG:n inversio-ongelmaan on lead field -matriisin laskeminen ja sen käyttäminen ongelmassa. Tähän liittyvät kaksi metodologiaa ovat äärellisten elementtien menetelmä (FEM) ja rajaelementtimenetelmä (BEM) (Seeger et al., 2005). Näihin palataan myöhemmin Zeffiroa esiteltäessä. Lead field -matriisia käytettäessä inversio-ongelman laskemiseen, tuntematon on neuroaktivaation primaarivirran tiheys  $x$ , mittausvektori on  $y$ , lead field matriisi on  $L$  ja  $n$  on lisätty kohinavektori. Lead field -matriisi voidaan saada esimerkiksi Zeffiron avulla äärellisten elementtien metodilaskennalla. Matemaattinen kaava on siis  $Ln = x + y$ , jossa kerrotaan lead field -matriisi  $n$ :llä eli kohinavektorilla. ”multiplied by vector of unknown entries”. (He & Pursiainen, 2021, 53)

Tämänkaltaisiin laskennallisesti haastaviin ja raskaisiin ongelmanratkaisukeinoihin liittyvät ohjelmistopakettit, joista seuraavaksi esitellään tutkielman aiheena ollut Zeffiro.



Zeffiro interface (ZI) on avoimen lähdekoodin alusta, jonka tarkoitukset ovat elektromagneettisen aivokuvantamisen ja -tutkimuksen puolella ja se toimii Matlab-ympäristössä. Se tarjoaa saavutettavan ja multimodaalisen alustan äärellisten elementtien menetelmään (FEM) perustuviin eteenpäin- ja inversiolaskelmiin. (He, Rezaei & Pursiainen, 2020, 237) Muita vaihtoehtoisia työkaluja ovat esimerkiksi Duneuro ja SimBio, jotka käyttävät C++-ohjelmointikieltä, mutta ovat myös samankaltaisia avoimen lähdekoodin FEM-kirjastoja. Muita Matlab-alustaa hyödyntäviä paketteja ovat esimerkiksi Brains-torm ja Fieldtrip. MNE-Python työkalupakki on yksi vaihtoehto, joka käyttää python-ohjelmointikieltä. (He et al., 2020, 246)

FEM:iä käytetään elektromagneettisten kenttien mallintamiseen rajatussa tilassa, jonka takia sitä käytetään pään kuvantamisessa ja sitä voidaan käyttää elektromagneettisen lähteen etsimiseen aivoissa. Tähän liittyy myös lead field-matriisin rakentaminen, jolla voidaan paikantaa aivoaktivaatiota EEG:ssä ja MEG:ssä- Sen ominaisuuksiin kuuluu myös esimerkiksi kolmiulotteisten kudosten mallintaminen tarkalla ja realistisella tavalla ja pystyy mallintamaan myös monimutkaisia sisäisiä rakenteita, jonka takia se so-  
pii tähän käyttötarkoitukseen. (He et al., 2020, 237) Monet aiemmin mainitut vaihtoehtoiset työkalut käyttävät rajaelementtimenetelmää (BEM). FEM:iä pidetään ainakin kahdella tavalla parempana verrattuna BEM:iin: BEM hidastuu helpommin, jos pintaverkon pinta-ala kasvaa ja FEM taas on käytännössä riippumaton tästä. Toinen etu FEM:issä on, että sähkönsiirtävyysjakauma voi olla anisotrooppinen. (He et al., 2020, 246)

Zeffirosta tekee erilaisen moniin verrattuna se, että FEM:iä on pidetty laskennallisesti raskaana aivomallintamiseen ja se on ollut ongelma ja tämän takia Zeffiro käyttää myös grafiikkasuorittimien kiihdytystä helpottaakseen ongelmaa ja lyhentääkseen prosessointiaikaa erilaisille visualisaatioille ja muille prosesseille, jotka vaativat paljon laskentatehoa, mutta vähemmän muistia. Zeffiroa siksi pystyykin käyttämään myös henkilökohtaisilla tietokoneilla, vaikka se vaatiikin hieman tehokkaampaa laskentatehoa koneelta. Se vaatii kymmeniä gigatavuja keskusmuistia (RAM), moniytimisen prosessorin ja yhden tai enemmän grafiikkasuorittimia. (He et al., 2020, 238-239)

Zeffiro on myös suunniteltu helposti laajennettavaksi ja sallii monenlaisten FEM-pohjaisten mallien lisäämisen (He et al., 2020, 238-239). Zeffirossa onkin ominaisuus, jolla siihen voi liittää lisäosia ja tätä kautta kytkeä uusia toiminnallisuuksia ja yhdistää ne

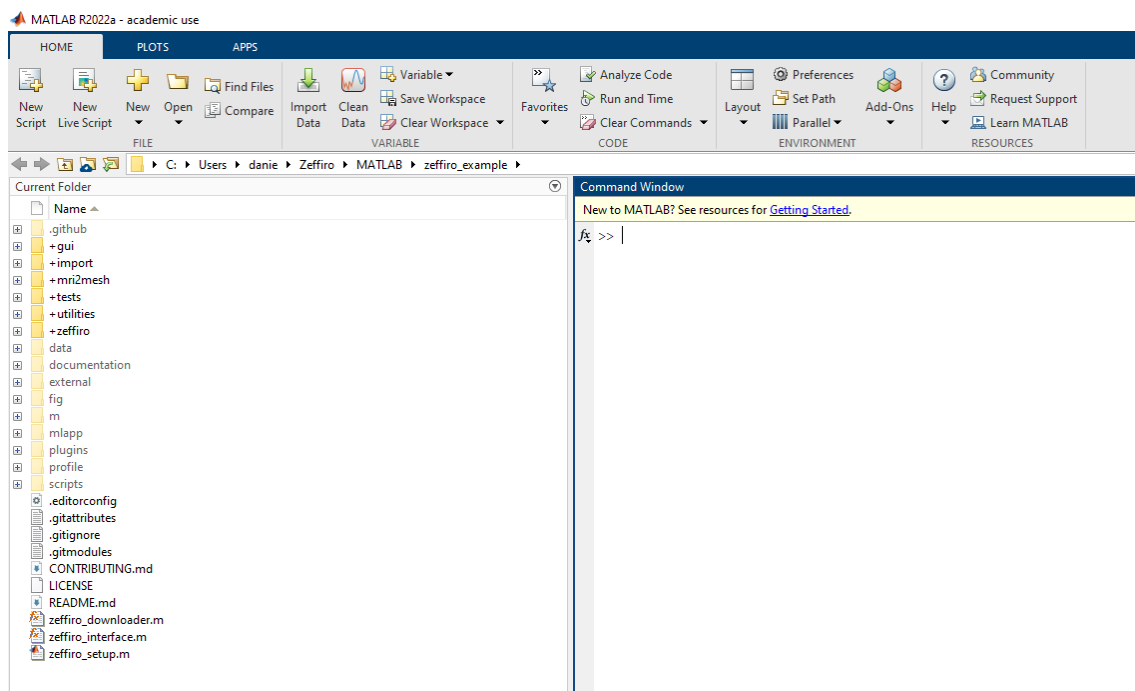
käyttöliittymän valikkoon (He & Pursiainen, 2021, 64). Tällä hetkellä tietokoneita voidaan opettaa tutkimaan ihmisen kognitiivisia järjestelmiä yhdistämällä tekoälyä ja signaalinprosessointia. Tämän takia Zeffiron ominaisuuksia pyritäänkin lisäämään ja parantamaan implementoimalla uusia koneoppimisen ja signaalinprosessoinnin tekniikoita, joiden avulla neurotieteilijät voivat tehdä sillä lisätutkimuksia liittyen neuroverkkojen toimintaan ja kartoittamiseen (He & Pursiainen, 2021, 51). Tässä tutkielmassa ei ole huomioitu mahdollisia muutoksia Zeffiro-pakettiin syksystä 2023 lähtien.

Tässä tutkielmassa tarkoituksena oli luoda tutoriaali, miten käyttää Zeffiroa tiettyyn käyttötarkoitukseen ja seuraavaksi onkin tulososuus, jossa tätä esitellään. Tulososuuksessa siis esitellään prosessia, jolla voidaan käyttää lead field -matriisia laskennassa, jonka lopputuloksena on arvioita signaalin lähteen paikannuksesta pään sisältä ja erilaisia visualisaatioita siihen liittyen. Kyseessä on siis yksi tapa vastata ongelmaan, miten pään pinnalla olevien EEG:n elektrodien avulla saatujen signaalien perusteella arvioidaan lähteen sijaintia pään sisällä. Tämä on olennaista aiemmin selitettyjen syiden takia ja Zeffirolla on mahdollista yrittää vastata kysymykseen. Kyseessä on siis opas Zeffiro-ohjelmiston käyttämiseen askel askeleelta tämän laskennan toteuttamiseen ja erilaisten mallien ja visualisaatioiden tuottamiseen, jotka kuvaavat laskennan tuloksia. Oppaassa on hyvin tiiviissä muodossa tekstiä askeleiden opastukseen ja lisäksi näyttökuvia aina vaiheittain oppaan selkeyttämiseksi.

### 3 Tulos

Tässä osuudessa on siis tarkoitus esittää yksi tapa toteuttaa aiemmin mainittu käyttöta-  
paus ja se ei ole absoluuttisesti oikea tai ainoa tapa toteuttaa tavoite esimerkiksi toimin-  
tojen järjestyksen puolesta. Tarkoituksena on esitellä vain yksi tapa lyhyesti, mutta  
mahdollisimman selkeästi. Tämän käyttöoppaan selkeys riippuu lukijan osaamisesta liit-  
tyen Matlab-ympäristöön ja luettavuutta auttaa esimerkiksi näyttökuvien suurentami-  
nen.

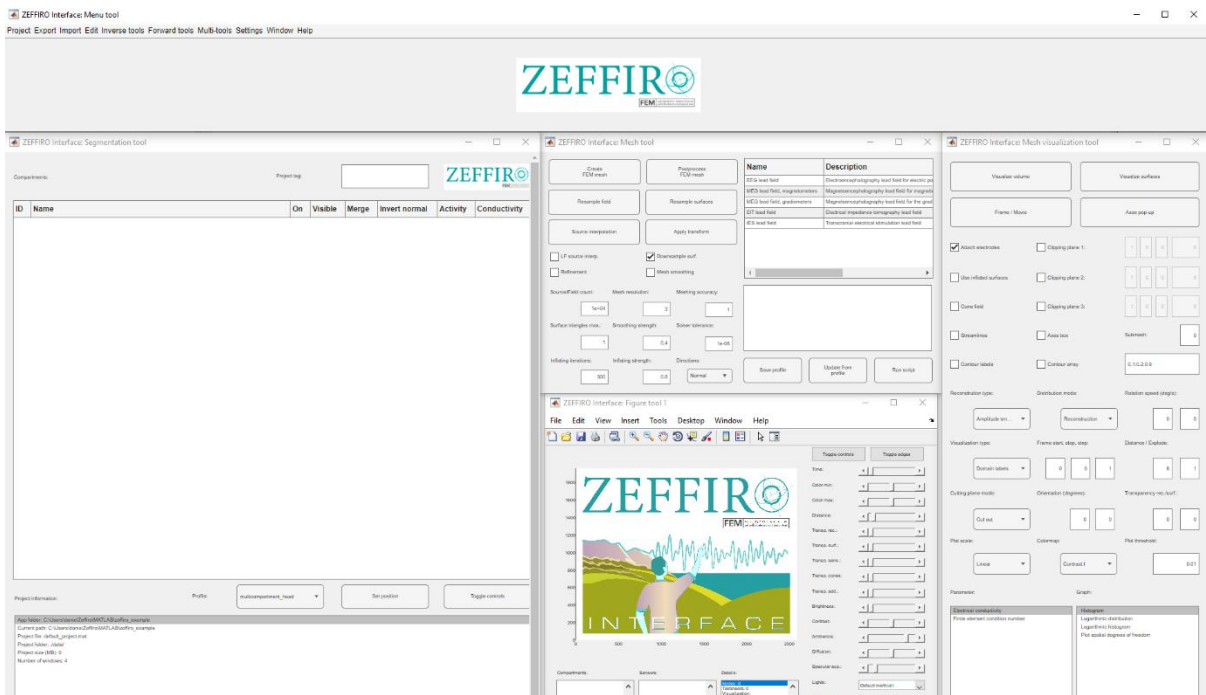
Ensimmäinen askel tämän prosessin toteuttamiseen on Matlab-ohjelmiston käynnistämi-  
nen ja navigoiminen oikeaan käyttäjän asettamaan tiedostokansioon, jossa Zeffiro-pa-  
ketti on asennettuna, jonka jälkeen näkymä näyttää kuva 1:n mukaiselta.



Kuva 1

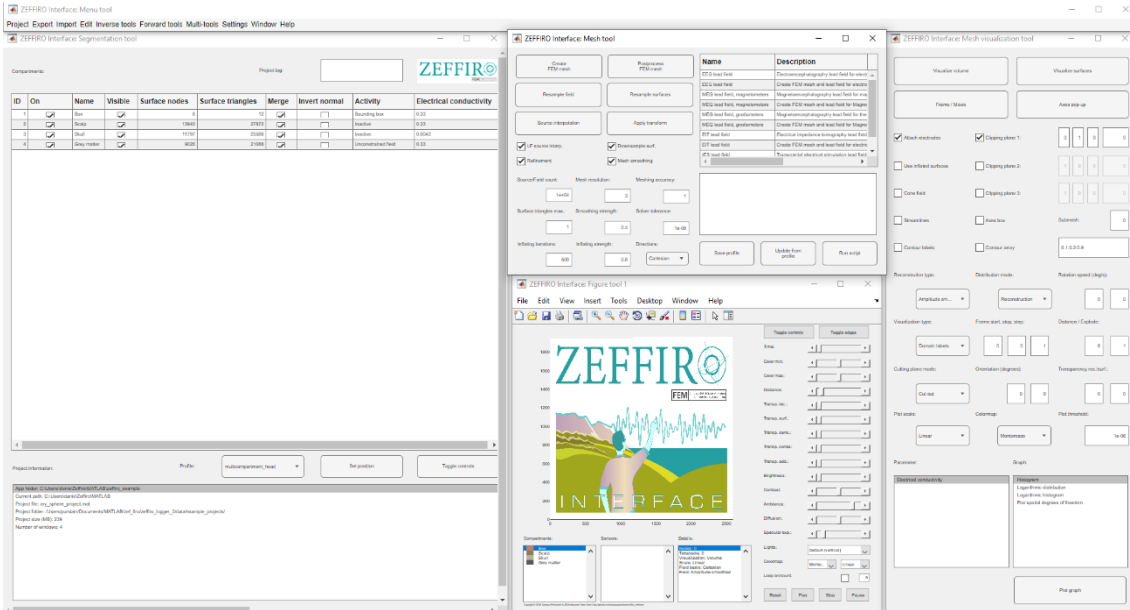
Seuraava askel on löytää zeffiro\_interface-nimellä oletuksena nimetty tiedosto, akti-  
voida se ja painaa näppäimistöltä F9 tai hiiren oikealla painikkeella ja siitä ilmestyvistä

ikkunasta ”Run”-painiketta, joka johtaa kuva 2:n näköiseen näkymään, kunhan käyttöliittymä on ehtinyt latautua. Näkymässä olevat ikkunat ovat nimeltään: ”ZEFFIRO Interface: Menu tool”, ”ZEFFIRO Interface: Segmentation tool”, ”ZEFFIRO Interface: Mesh tool”, ”ZEFFIRO Interface: Figure tool 1” ja ”ZEFFIRO Interface: Mesh visualization tool”.



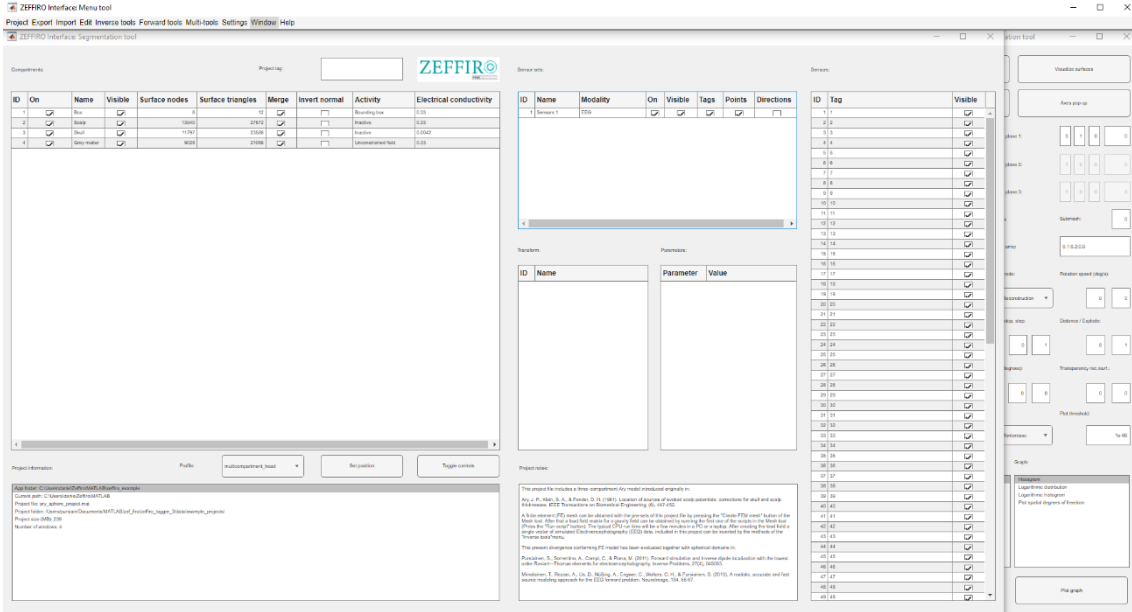
Kuva 2

Seuraava askel olisi avata oletuksena ylimmästä ikkunasta eli ”ZEFFIRO Interface: Menu tool” -ikkunasta jokin projekti tai aloittaa uusi projekti. Tämä tapahtuu kyseisessä ikkunassa painamalla vasemmalla yläkulmassa olevaa ”Project”-painiketta ja valitsemalla ilmestyvästä pudotusvalikosta haluttu tapa edetä, esimerkiksi ”Open project”. Tässä esimerkissä käytettiin esimerkkiprojektia tiedostonimeltään ”ary\_sphere\_project”. Tästä seuraa se, että lähes tyhjä ”ZEFFIRO Interface: Segmentation tool” -ikkuna saa erilaisia vaihtoehtoja ja neljä kenttää näkyy: ”Box”, ”Scalp”, ”Skull” ja ”Grey matter”. ja muihinkin ikkunoihin tulee lisävalintamahdollisuuksia. Näkymä näyttää tässä vaiheessa kuva 3:n mukaiselta.



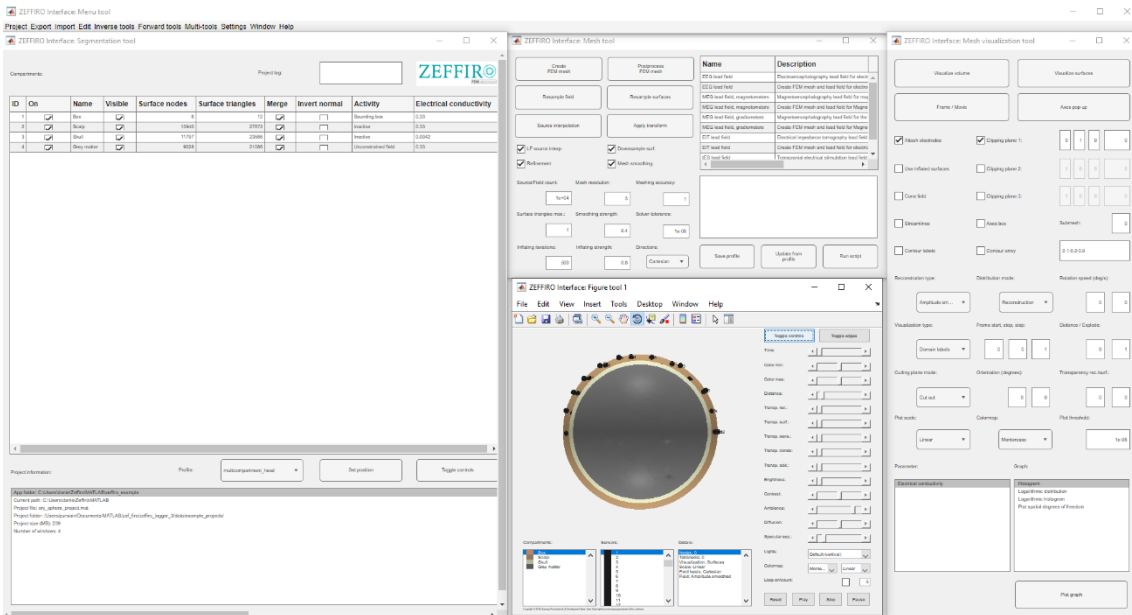
Kuva 3

Tästä näkymästä seuraava askel on painaa ”ZEFFIRO Interface: Segmentation tool” – ikkunasta oikealta alhaalta ”Toggle controls” -painiketta, joka laajentaa mainitun ikkunan leveämmäksi ja paljastaa ”Sensor sets:”-nimisen kohdan ja muita lisänä. ”Sensor sets” -kohdassa näkyy nyt ”Name”-kohdassa ”Sensors 1” ja ”Modality”-kohdassa ”EEG” ja lisäksi on viisi valintapainiketta, joista kolme on jo oletuksena valittu käyttöön ja vielä pitää painaa ”Visible”-kohtaan rasti ruutuun klikkamalla tyhjää laatikkoa ja siitä päästään kuvan 4 mukaiseen näkymään. Tämän kautta pään visualisoinnissa näytetään myös elektrodit.



Kuva 4

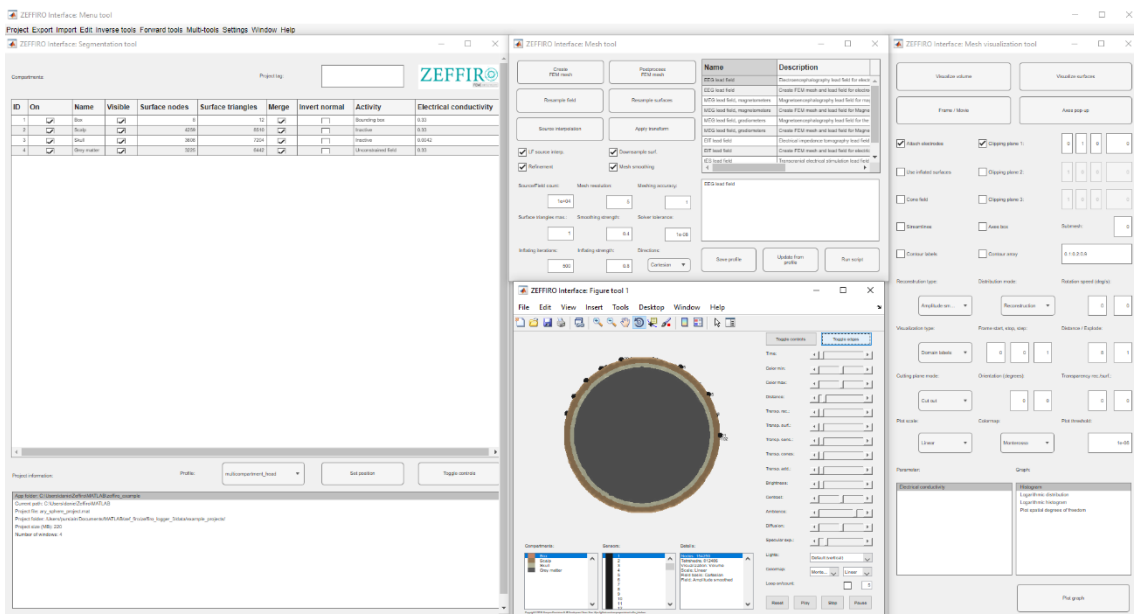
Tämän jälkeen voi painaa uudestaan mainittua ”Toggle controls”-painiketta, että muut valittu ikkuna pienenee takaisin kapeammaksi ja jatkaminen helpottuu. Seuraavaksi voi jo aloittaa visualisoinnin painamalla ”ZEFFIRO Interface: Mesh visualization tool” -ikkunasta oikealta ylhäältä ”Visualize surfaces” -painiketta kahdesti, jotta saadaan jo ensimmäinen visualisaatio eli pintavisualisaatio. Tämä visualisaatio ilmestyy ikkunaan ”ZEFFIRO Interface: Figure tool 1” ja näkymä näyttää kuvan 5 mukaiselta.



Kuva 5

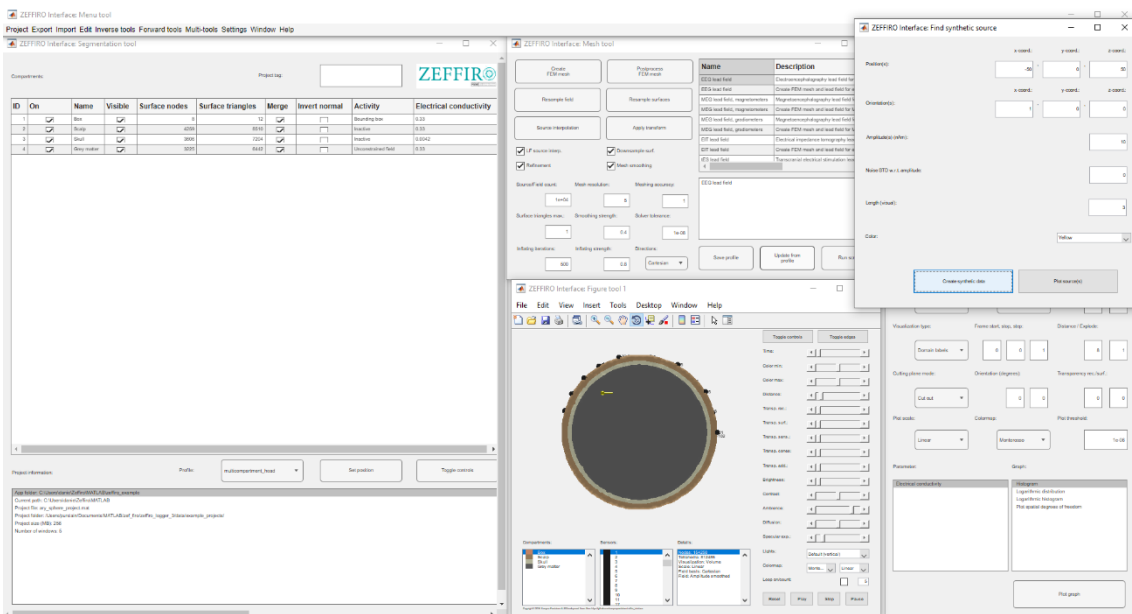
Seuraavaksi voidaan lähteä visualisoimaan elementtiverkkoa. Tähän tarvitaan ikkunaan ”ZEFFIRO Interface: Mesh tool”. Siitä voidaan vaihtaa verkon resoluutiota tai monia muita parametrejä ennen luomista ja tässä esimerkissä ”Mesh resolution” vaihdettiin oletusnumerosta 3 numeroon 5 klikkaamalla kyseistä kohtaa, kirjoittamalla numero vanhan tilanne ja painamalla ”Enter”-näppäintä. Tämän jälkeen voidaan painaa saman ikkunan vasemman yläkulman ”Create FEM mesh” -painiketta. Tämän askeleen latauksessa voi kestää jonkin aikaa, mutta sen valmistuttua voidaan painaa ”ZEFFIRO Interface: Mesh visualization tool” -ikkunasta vasemman yläkulman ”Visualize volume” -painiketta. Nyt verkon pitäisi olla luotu.

Seuraavaksi lähdetään luomaan LEAD FIELDIÄ. Se tehdään ”ZEFFIRO Interface: Mesh tool” -ikkunan kautta myös. Kyseisen ikkunan oikeassa yläkulmassa on näkymä, jossa on taulukko, jossa on kaksi saraketta: ”Name” ja ”Description”. ”Name”-sarakeessa pitäisi olla ylimpänä vaihtoehtona ”EEG lead field”, jonka ”Description”-kohdassa näkyy ”Electroencephalography lead field for electric potential field”. Nimeä ”EEG lead field” klikataan, jolloin se näkyy kuvan 6 mukaisesti taulukon alapuolella aiemmin tyhjänä olleessa laatikossa ja sitten painetaan oikealla alhaalla olevaa ”Run script” -painiketta.



Kuva 6

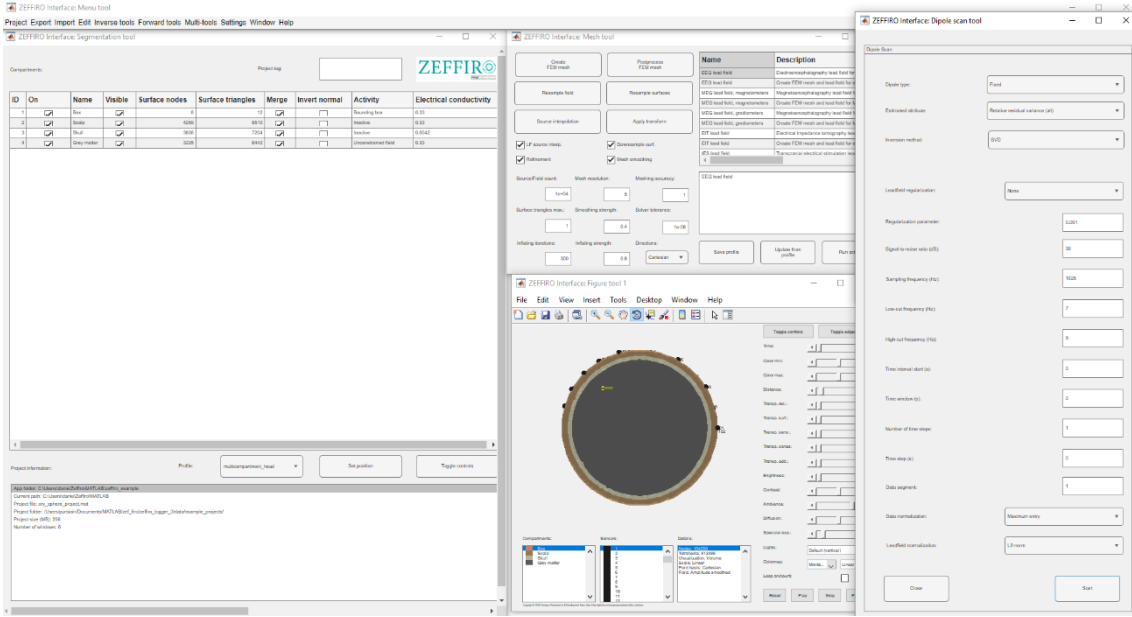
Tämän jälkeen tarvitaan oletuksena näkymässä ylimpänä olevaa ”ZEFFIRO Interface: Menu tool” -ikkunaa. Sieltä klikataan ”Forward tools” ja siitä tulevasta pudotusvalikosta klikataan kohtaa ”Find synthetic source”. Tämä avaa uuden ikkunan nimeltään ”ZEFFIRO Interface: Find synthetic source” ja tästä ikkunasta painetaan alhaalla oikealla olevaa nappia ”Plot source(s)” ja tämän jälkeen ”Create sythetic data”. Nyt tämän toimenpiteen jälkeinen vaihe näkyy kuvassa 7.



Kuva 7

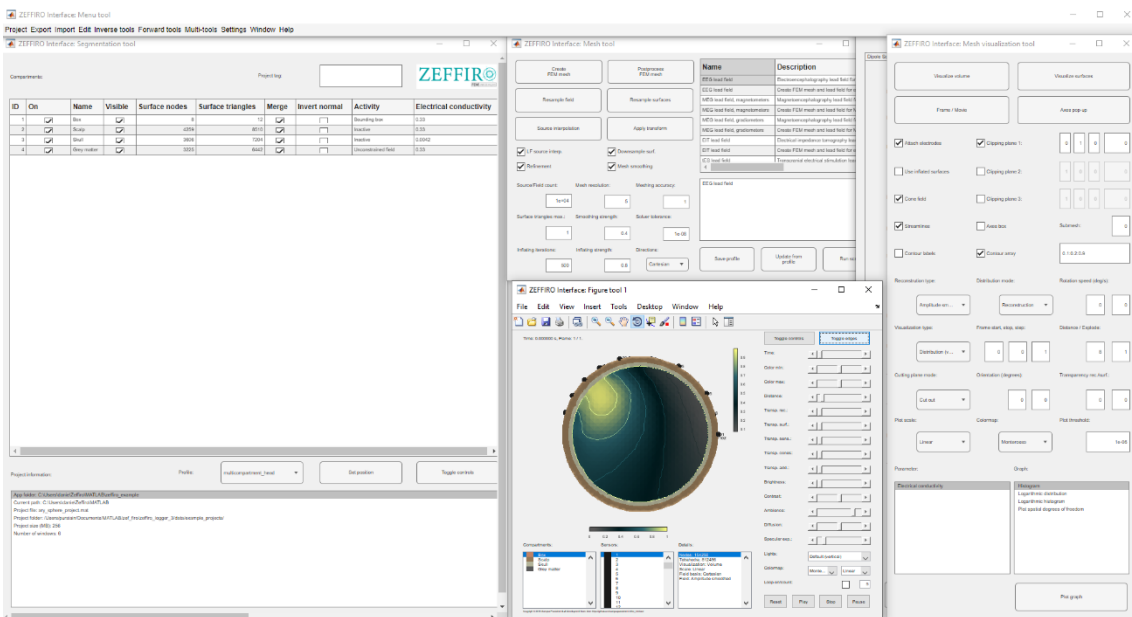
Seuraavaksi palataan jälleen ”ZEFFIRO Interface: Menu tool” -ikkunaan. Sieltä klikataan ”Inverse tools” ja tästä aukeavasta pudotusvalikosta ”Dipole scan”. Tämä jälleen avaa uuden ikkunan, jonka nimi on ”ZEFFIRO Interface: Dipole scan tool”. Kyseisestä ikkunasta painetaan oikeassa alakulmassa olevaa nappia ”Start”. Kuva 8 osoittaa näkymää tämän jälkeen.





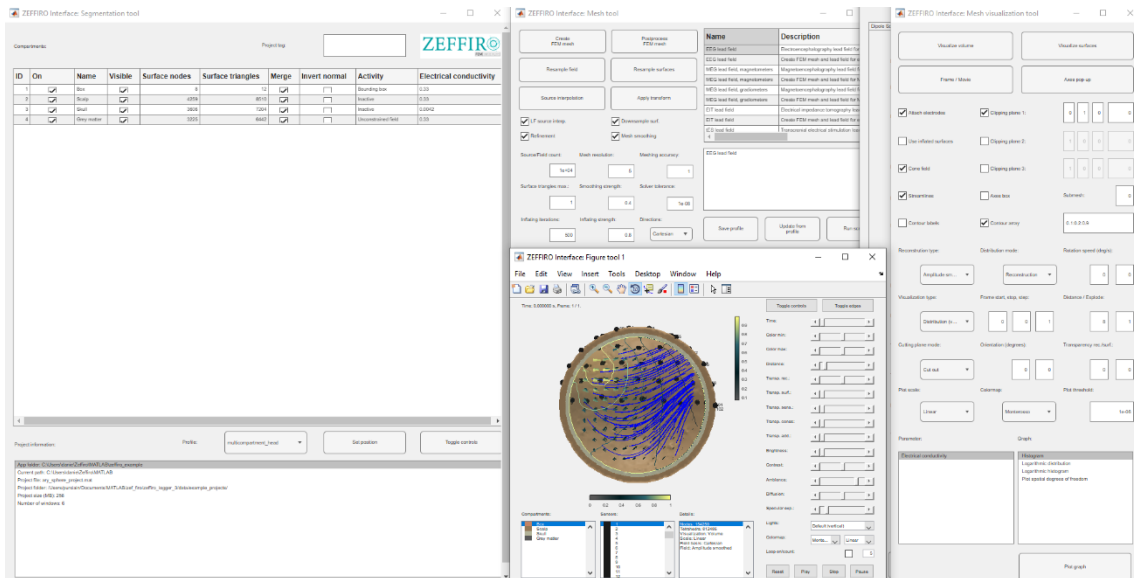
Kuva 8

Seuraavaksi siirrytään takaisin ”ZEFFIRO Interface: Mesh visualization tool” -ikkunaan, joka on oletuksena jäänyt edellisen ikkunan alle piiloon. Kyseisessä ikkunnassa valintanapeista aktiivisena on oletuksena vain ”Attach electrodes” ja ”Clipping plane 1:”, mutta nyt klikataan myös ”Cone field”, ”Contour array” ja ”Streamlines” aktiivisiksi. Lisäksi ”Visualization type” -kohtaa klikkaamalla aukeaa pudotusvalikko, josta voi vaihtaa visualisoinniksi ”Distribution (volume)”. Tämän jälkeen voi klikata vasemmasta yläkulmasta nappia ”Visualize volume”. Tämän jälkeinen näkymä on kuvassa 9.



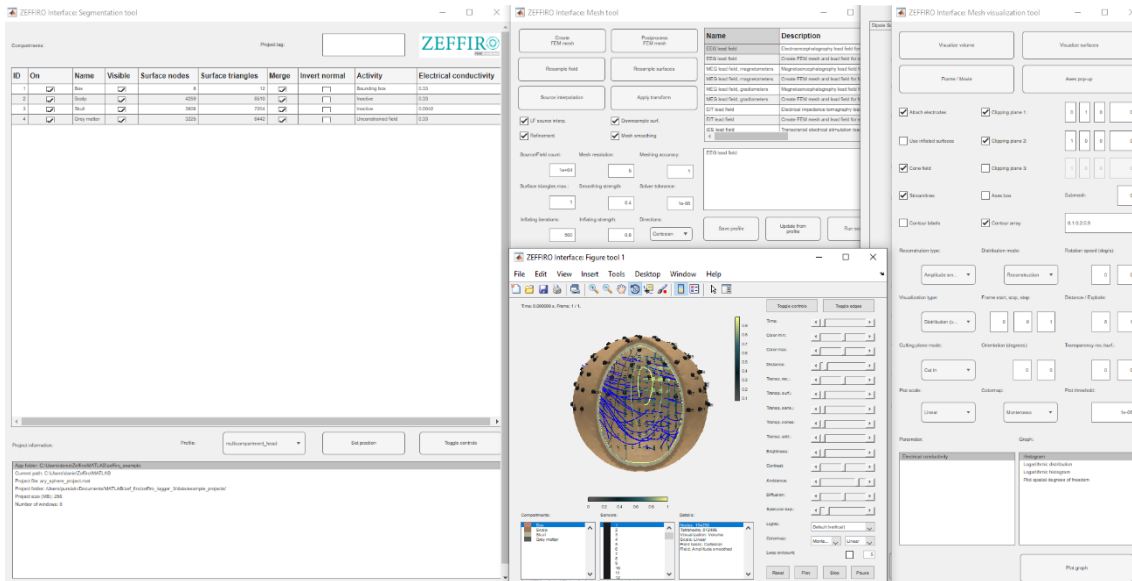
Kuva 9

Visualisaatioon voi myös vaihtaa monenlaisia asetuksia kuten värimaailmaa ”Color-map”-asetuksella tai muuttaa näkymää säätämällä läpinäkyvyyttä eli ”Transp. rec.:” säädintä siirtelemällä. Kuvassa 10 on esimerkki siitä, miltä visualisaatio näyttää, kun kyseinen säädin on puolivälissä.



Kuva 10

Mahdollisuuksia on lukemattomia, mutta vielä yksi esiteltävä vaihtoehto on laittaa ”ZEFFIRO Interface: Mesh visualization tool” -ikkunasta aktiiviseksi myös ”Clipping plane 2:” ja ”Cutting plane mode:” -pudotusvalikosta valitsemalla asetuksen ”Cut in”. Tämän jälkeen päivitetään visualisaatio painamalla jälleen saman ikkunan ”Visualize volume” ja saadaan kuvassa 11 esiteltävä visualisaatio.



Kuva 11

Tämän prosessin seurauksena on saatu aikaiseksi erilaisia visualisaatioita, joita voi muunnella esimerkiksi tiettyjä mainittuja asetuksia säätämällä. Prosessissa on lukematomia erilaisia mahdollisuuksia tehdä asioita eri tavalla, mutta tämä on yksi tapa toimivasti toteuttaa käytötapauksessa esitelty asia. Tarkoituksena olikin tehdä prosessi mahdollisimman yksinkertaisesti sen sijaan, että esiteltäisiin kaikki mahdolliset lisätoiminnot kyseisessä tehtävässä.

Käyttöoppaassa olisi varmasti loputtomasti paranneltavaa, mutta kuvien resolution tulisi riittää mainittuun kuvien suurentamiseen, joka parantaa huomattavasti luettavuutta. Käyttöoppaassa myös pyrittiin jättämään erilaiset ikkunat oletusjärjestykseen, siten kuten ne aukeavat, että prosessista tulisi mahdollisimman aloittelijaystävällinen. Zeffiroon on kuitenkin tutkielman muodostumisen aikaa tullut lisää dokumentaatiota, joten tämän käyttöoppaan tarpeellisuuden aste on voinut muuttua sen tekemisen aikana.

## 4 Yhteenveto

Yhteenvetona tutkielmasta tulee mainita tärkeimmät asiat. Aivotutkimuksissa ja aivokuvantamiseen liittyvissä menetelmissä EEG on olennaisessa osassa (He & Pursiainen, 2021, 50-52). EEG:hen liittyy kuitenkin monenlaisia haasteita, kuten pään pinnalla mitatun signaalin lähdepaikannus pään sisältä (Grech et al., 2008, 2). Lähteen tarkka paikannus on kuitenkin olennaista jatkotoimenpiteille erilaisten sairauksien hoitamiselle (Seeber et al., 2019). Ongelmaa vastauksena voidaan käyttää erilaisia laskennallisesti raskaita menetelmiä ja yksi tapa sisältää lead field -matriisin laskemisen ja sen hyödyntämisen prosessissa. Tämä on yksittäinen käytätapaus, mutta koska menetelmät ovat laskennallisesti raskaita, on kehitetty erilaisia ohjelmistopaketteja tähän käyttötarkoitukseen ja yksi tähän sopiva paketti on tutkielmassa esitelty Zeffiro. (He & Pursiainen, 2021, 53)

Tutkimuskysymys oli:

- Miten ohjelmistoa (Zeffiroa) käytetään ratkaisemaan EEG:n inversio-ongelmaa lead field -matriisilaskennalla?

Kysymykseen vastauksena eli tutkimustuloksena syntyi lyhyt käyttöopas siihen, miten Zeffiroa voidaan käyttää tämän ongelman ratkaisemiseen. Kuten aiemmin mainittiin, myös muita ohjelmistoja olisi erilaisiin aivokuvantamiseen liittyviin tarpeisiin, mutta tässä tutkielmassa tuloksena on se, että Zeffiroa voi hyödyntää tähän käytätapaukseen ja vastauksena on myös, että miten se toteutetaan askel askeleelta. Tulosta on vaikea tiivistää lyhyeksi tekstiksi, mutta omakohtaisena kokemuksena prosessi ei ole loputtoman monimutkainen, vaikka ei olisi tutustunut aiemmin Matlab-ympäristöön. Tuloksen tarkoituksena onkin mahdollistaa, että ohjelmistoa voisi tähän käyttötarkoitukseen käyttää myös täysin ohjelmiston suhteen kokematon käyttäjä.

Tutkielmalla siis vahvistettiin aiempaa tietoa siitä, että erilaisia ohjelmistopaketteja on kehitetty aivokuvantamisen ongelmiin ja niillä voidaan vastata tiettyihin ongelmiin ai-

heen parissa. Tutkielman laajuuden takia kyseessä oli vain yksi yksittäinen käyttöta-  
paus, joka pyrkii vastaamaan yhteen ongelmaan, joten laajemmin ongelmiin vastaami-  
seen tutkielma ei vastaa. Uutena tietona saavutettiin lyhyt käyttöopas, jolla esitellään,  
miten tällä ohjelmistopakettilla toteutetaan kyseinen prosessi ongelman ratkaisemiseksi.

Tutkielma vastasi siis esitetyn tutkimuskysymykseen ja vahvisti tietoa ohjelmistojen  
mahdollisuuksista ratkaista ongelmia liittyen EEG:n sovelluksiin. Se ei kuitenkaan otta-  
nut kantaa siihen, miten Zeffiro toteuttaa ongelmaan vastaamista ja onko vastaus tai lop-  
putulos liittyen laskentaprosesseihin edes oikein tai oikealla tavalla toteutettu, vaan sen  
oletettiin toimivan vertaisarvioitujen lähteiden perusteella.

Kriittisenä näkemyksenä tutkielman tulokseen liittyen voisi sanoa, että käyttöopas on  
kuitenkin vain kirjoittajan näkökannasta toteutettu mahdollisimman selkeällä ja tiiviillä  
tavalla, mutta sitä se ei välttämättä ole erilaisille lukijoille ja tähän vaikuttaa myös luki-  
jan osaamistaso ohjelmistossa. Toteutustapa käyttöoppaalla ei myöskään perustu tieteel-  
liseen tietoon liittyen siihen, miten tämänlaisia käyttöoppaita edes kannattaa toteuttaa  
ymmärrettävyyden, käytettävyyden tai minkään muun seikan suhteen. Sen lopullinen  
käyttöarvo saattaa olla vähäinen, koska tutkielman muodostumisen aikana Zeffiron eri-  
lainen dokumentaatio kasvoi ja erilaiset avut sen käyttämiseen paranivat.

Tähän liittyen jatkotutkimusmahdollisuutena olisikin esimerkiksi se, että miten muilla  
ohjelmistoilla vastataan juuri tämän käyttötapauksen seikkoihin ja miten ne toteuttavat  
vastausta EEG:n ongelmiin. Toinen mahdollisuus olisi yrittää yhdistää tätä käyttöopasta  
kokonaisvaltaiseen oppaaseen Zeffiron käyttämisessä ja sitä kautta selvittää kaikki eri-  
laiset käyttökohteet Zeffiro-paketille. Tämän tutkielman tuloksen käytännön hyödylli-  
syyks yksittäisenä käyttöoppaana on hyvin rajallinen, vaikka vastasikin tutkimuskysy-  
mykseen ja todisti, että Zeffiroa on mahdollista käyttää tämän EEG:n sovelluksen pa-  
rissa.

## Lähdeluettelo

Castaño-Candamil, S., Höhne, J., Martínez-Vargas, J.-D., An, X.-W., Castellanos-Domínguez, G., & Haufe, S. (2015). Solving the EEG inverse problem based on space–time–frequency structured sparsity constraints. *NeuroImage (Orlando, Fla.)*, *118*, 598–612. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.05.052>

Grech, R., Cassar, T., Muscat, J., Camilleri, K. P., Fabri, S. G., Zervakis, M., Xanthopoulos, P., Sakkalis, V., & Vanrumste, B. (2008). Review on solving the inverse problem in EEG source analysis. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *5*(1), 25–25. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-25>

Greenfield, L. J., Geyer, J. D., & Carney, P. R. (2021). *Reading EEGs : a practical approach* (L. J. Greenfield, J. D. Geyer, & P. R. Carney, Eds.; Second edition.). Wolters Kluwer.

He, Q. & Pursiainen, S. (2021). An Extended Application ‘Brain Q’ Processing EEG and MEG Data of Finger Stimulation Extended from ‘Zeffiro’ Based on Machine Learning and Signal Processing. *Cognitive systems research*, *69*, 50–66.

He, Q., Rezaei, A., & Pursiainen, S. (2020). Zeffiro User Interface for Electromagnetic Brain Imaging: a GPU Accelerated FEM Tool for Forward and Inverse Computations in Matlab. *Neuroinformatics (Totowa, N.J.)*, *18*(2), 237–250. <https://doi.org/10.1007/s12021-019-09436-9>

Hong, K.-S., Khan, M. J., & Hong, M. J. (2018). Feature Extraction and Classification Methods for Hybrid fNIRS-EEG Brain-Computer Interfaces. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 246–246. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00246>

Ilmoniemi, R. J., & Sarvas, J. (2019). *Brain signals : physics and mathematics of MEG and EEG*. The MIT Press

Lazarou, I., Nikolopoulos, S., Petrantonakis, P. C., Kompatsiaris, I., & Tsolaki, M. (2018). EEG-Based Brain–Computer Interfaces for Communication and Rehabilitation of People with Motor Impairment: A Novel Approach of the 21st Century. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00014>

Nathan, K., & Contreras-Vidal, J. L. (2016). Negligible motion artifacts in scalp electroencephalography (EEG) during treadmill walking. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*(2016), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00708>

Rezaei, A., Lahtinen, J., Neugebauer, F., Antonakakis, M., Piastra, M. C., Koulouri, A., Wolters, C. H., & Pursiainen, S. (2021). Reconstructing subcortical and cortical somatosensory activity via the RAMUS inverse source analysis technique using median nerve SEP data. *NeuroImage*, 245, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118726>.

Seeber, M., Cantonas, L.M., Hoeveles, M., Sesia, T., Visser-Vandewalle, V. & Michel, C.M. (2019). Subcortical Electrophysiological Activity Is Detectable with High-Density EEG Source Imaging. *Nature communications*, 10(1), 753–753.

Seger, M., Fischer, G., Modre, R., Messnarz, B., Hanser, F. & Tilg, B. (2005). Lead Field Computation for the Electrocardiographic Inverse Problem—finite Elements Versus Boundary Elements. *Computer methods and programs in biomedicine* 77(3), 241–252.

Vilkkä, H. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Helsinki: Art House, 2023. Print.