

# Seismisten tapahtumien paikantaminen seismisillä asemaverkoilla ja signaalien poimiminen seismisestä datasta

Ilkka Ahola

01/2020

Fysiikan koulutusohjelma

## Tiivistelmä

Seismisten verkkojen tärkeimpiä tehtäviä ovat yleisen seismisyyden tai tietyn alueen seismisyyden valvonta, riskialueiden monitorointi ja hälyttäminen ja seismologisen tutkimusaineiston kerääminen. Perustavoite seismisillä verkoilla on maanjäristysten paikantaminen ja niiden voimakkuuksien määrittäminen. Perinteisten seismisten verkkojen ja virtuaalisten seismisten verkkojen lisäksi monipisteasemien kehittäminen ja niiden käyttömahdollisuuksien laajentaminen ovat viime vuosikymmeninä olleet laajan tutkimustyön kohteena. Esimerkiksi suhteellisilla paikannusmenetelmillä on saatu kohtalaisen tarkasti mallinnettua tektonisia erityispiirteitä monilla alueilla, kuten subduktiovyöhykkeillä. Suomessa seismisyys on lähinnä alueellista ja paikallista ja pääasiassa ihmisen toiminnasta aiheutuvaa seismisyyttä, jota voidaan havainnoida useimmiten vain seismometreillä, ja ihmisen aisteilla havaittavat maanjäristykset ovat todella harvinaisia ja magnitudiltaan suhteellisen pieniä. Siksi Suomen alueelta saatavat seismiset signaalit sisältävät pääasiassa korkeita taajuuksia (1Hz-30Hz). Suomen kansallinen seisminen asemaverkko havainnoi jatkuvasti Suomessa tapahtuvia maanjäristyksiä ja räjäytystöistä aiheutuvia seismisiä signaaleja, ja lisää havaitut tapahtumat automaattisesti luotuihin bulleeteihin, jotka ovat vapaasti kaikkien saatavilla. Näitä voi helposti hyödyntää tutkimuksissa, jotka koskevat seismisiä tapahtumia Suomessa. Koska yhä enemmän tarvitaan automatisoitua seismisten signaalien havainnointia ja seismisten tapahtumien paikantamista, on datakeskuksia sekä datan keräämistä ja käsittelyä koskevaa kehitystyötä tehty paljon viime aikoina. Seismologiseen datankäsittelyyn tarkoitettuja ohjelmistoja on paljon saatavilla, ja niistä esimerkiksi ottamani Python-ympäristöön kehitetty ObsPy sisältää paljon hyödyllisiä ja helppokäyttöisiä perustyökaluja aloitteleville ja myös kokeneille seismologeille. Tähän työhön tein hieman signaalien poimintaa seismisestä datasta ja seismisten tapahtumien paikantamista käyttäen joitakin metodeja ObsPy-kirjastosta.

# Alkusanat

Kiitän ohjaajaani prof. Elena Kozlovskayaa ja tutkintoni tarkastajaa Kari Moisiota (Oulun yliopisto) tämän kandidaatintutkielman tekemisen avuksi annetuista neuvoista ja ohjauksesta.

## Sisällys

2.	Seismiset asemaverkot.....	1
2.1.	Seismiset monipisteasemat.....	1
2.2.	Seismisten tapahtumien paikantaminen käyttäen yhtä seismistä asemaa.....	2
2.3.	Seismisten tapahtumien paikantaminen seismisten verkkojen avulla.....	3
2.4.	Menetelmä seismisen tapahtuman syvyyden määrittämiseen monipisteasematekniikoiden avulla..	4
2.5.	Paikantamisjärjestelmä seismisessä OBF-asemaverkossa.....	4
2.5.1.	Seismisten tapahtumien havainnointi- ja paikantamisjärjestelmä.....	5
3.	Seismisten tapahtumien sijainnin automatisoitu paikantaminen.....	6
3.1.	Automatisoitu faasien poiminta.....	6
3.1.1.	Baerin ja Kradolferin P-poimija.....	7
3.1.2.	P-aaltojen poimiminen käyttäen korkeamman asteen tilastollisia menetelmiä.....	7
3.1.3.	AR-AIC-poimija.....	7
3.1.4.	Paikallisille seismisille verkoille suunniteltu kurtoosiin perustuva faasinpoimija.....	7
3.2.	Automatisoidusta S-aallon saapumisajan määrittämisestä.....	8
3.3.	Paikalliset ja alueelliset seismiset lähteet.....	9
4.	ObsPy.....	9
4.1.	Laitekorjaus.....	10
4.2.	ObsPyn vakiotyökalut faasien poimimiseen.....	10
4.3.	Seismogrammin lataaminen ja analysointi.....	11
4.4.	Faasien poimiminen eli aaltojen saapumisaikojen määrittäminen seismogrammeista.....	13
4.5.	ObsPyn hyödyntäminen seismisten tapahtumien paikantamisessa.....	15
4.5.1.	Esimerkitapauksia paikantamisesta yksinkertaisella algoritmilla.....	16
4.5.2.	Seismisten tapahtumien paikantaminen Pyhäsalmen alueelta.....	19
5.	Liitteet.....	23
5.1.	Yksinkertainen paikannusalgoritmi seismisten tapahtumien paikantamiseen.....	23
6.	Yhteenveto.....	28
7.	Lähteet.....	29

# 1. Johdanto

Tarve kehittää ja ottaa käyttöön tekniikoita ja menetelmiä maanjäristysten luotettavaan ja nopeaan paikantamiseen kasvaa jatkuvasti. Myös seismisten asemaverkkojen rakenteiden ja toiminnan kehittäminen ovat oleellisia tutkimusalueita, erityisesti seismisesti aktiivisten alueiden asumisturvallisuuden kannalta. Tässä tutkielmassa tarkoitukseni on luoda yleiskuvaa seismisten asemaverkkojen hyödyntämisestä seismisten tapahtumien paikantamisessa sekä esitellä Python-pohjaista ObsPy-kirjastoa (Beyreuther *et al.* 2010), joka sisältää monenlaisia työkaluja seismiseen datankäsittelyyn, ja jota voi hyödyntää seismologisessa valvonnassa, tutkimuksessa ja opiskelussa perusohjelmistona. Lisäksi kuvailen lyhyesti joitakin suhteellisen uusia seismisten tapahtumien paikantamiseen ja signaalien poimintaan liittyviä menetelmiä esimerkkinä tutkimusalueella viime vuosina tapahtuneesta kehityksestä.

## 2. Seismiset asemaverkot

Seisminen verkko on paikallinen, alueellinen tai maailmanlaajuinen kokoelma seismisiä asemia, joilla on yhteinen datakeskus ja referenssiaika. Jokaisella asemalla on yksi tai useampi seismometri, joka mittaa maassa tapahtuvia värähtelyjä eli seismisten aaltojen aiheuttamaa maan edestakaista heilahtelua. Virtuaalinen seisminen asemaverkko tarkoittaa tutkimusta tai seismistä seurantaa varten koottua tietoliikenneyhteyksien kautta toimivaa asemaverkkoa, johon on otettu mukaan asemia useammasta kuin yhdestä varsinaisesta asemaverkosta.

Seismisten verkkojen tärkeimpiin tehtäviin kuuluvat maanjäristyksien sijaintien ja voimakkuuksien määrittäminen, tietyn alueen seismisyyden tai yleisen seismisyyden valvonta, tutkimusdatan kerääminen Maan sisäosista, ja hälytysten tekeminen. Perustavoite seismisillä verkoilla on maanjäristysten tarkka paikantaminen.

Riskialueilla monitorointi ja hälytykset tarvitsevat monesti eri alueille sijoitettuja asemaverkkoja, joissa on useita seismometrejä. Voimakasta värähtelyä mittaavien asemaverkkojen suunnittelussa on merkittäviä eroja, mutta sekä seismometrejä että kiihtyvyyssantureita käytetään yksittäisessä järjestelmässä. Tavallista on, että seismisen toiminnan seurantaan tarvitsevan maan hallitus rahoittaa asemaverkkojen rakentamisen.

Seismologiassa seismogrammit ovat tutkittavaa dataa, ja niiden sisältämä informaatio voi olla hyvinkin runsasta. Nykyään kerätään jatkuvasti uutta ja yhä tarkempaa digitaalista seismistä dataa, ja kun ajan kuluessa yhä useampia seismisiä asemia ja verkkoja perustetaan lähes joka puolelle maapalloa, käsittelemätöntä ja moniin tieteellisiin tutkimuksiin sopivaa seismogrammiaineistoa on jatkuvasti saatavilla. Datankäsittelytekniikoiden kehittäminen ja yhdistely ovat tärkeitä tutkimusalueita. Esimerkiksi Maan sisäosien ja kuoren rakenteen tutkimus ja seisminen tomografia sekä maanjäristyksesäkkeiden tarkan sijainnin ja lähdemekaniikan laskeminen ovat alueita, joissa on paljon hyötyä erilaisista kehittyneistä tavoista hyödyntää seismistä dataa. (Havskov, Ottemöller *et al.* 2012)

### 2.1. Seismiset monipisteasemat

Seisminen monipisteasema on joukko seismometrejä tai seismisiä asemia aseteltuna riittävän lähelle toisiaan siten, että seismisen aaltokentän ominaisuudet tietyssä referenssipisteessä ryhmän sisällä tai sen lähellä voidaan laskea eri asemilla tallennetuista saapuvista aaltosignaaleista niitä summaamalla. Monipisteasemalla on yhteinen referenssiaika ja yhtenäinen laitteisto. Myös yksittäisiä asemia yhdestä tai useammasta eri asemaverkosta voidaan käyttää monipisteasemana virtuaalisesti samalla tavoin kuin tavallisissa virtuaalisissa verkoissa.

Monipisteasema eroaa seismisestä asemaverkosta pääasiassa data-analyysitekniikoissa. Monipisteasemat ovat käytännöllisiä, kun tarvitaan korkeaa signaalikoherenssia ja tarkkaa suhteellista ajoitusta eri seismisten aaltojen välillä. Heikkojen signaalien havaitseminen on niillä paljon helpompaa kuin yksittäisillä asemilla tai tavallisilla asemaverkoilla. Monipisteasemilla voidaan määrittää lähestyvien aaltorintamien etenemissuunta sekä hitaus (sekuntia/kilometri), jonka avulla voidaan laskea myös seismisen tapahtuman episentrietäisyys eli järistyskeskuksen projektio Maan pinnalla. Seismiset tapahtumat voidaan paikantaa käyttämällä aseman ja lähteen välistä

etäisyyttä ja atsimuuttia eli horisontaalitasossa asteina mitattua suuntaa episentritä asemalle tai toisin päin.

Automatisoidussa rutiinotoiminnassa monipisteasemilla ei ole käytännöllistä yrittää automaattista ensisaapujasignaalien poimintaa perinteisellä menetelmällä, koska heikkoja signaaleja tulee satoja päivittäin. Automaattinen prosessi viivyyttää ja summaa saapuvia signaaleja tiettyjen määrättyjen parametrien mukaan, jotta voidaan suorittaa tarkempia analyysejä. Asemien tallentamien aaltomuotojen välisen koherenssin täytyy olla hyvä, jotta signaali-kohinasuhde olisi riittävän suuri. Monipisteaseman geometria sekä seismometrien määrä ja tyyppi määräytyvät tieteellisen käyttötarkoituksen mukaan. Mitä suurempi on etäisyys  $a$  kahden kauimpana toisistaan olevan seismometrin välillä, sitä pienempiä ovat aaltoluvut, joita voidaan mitata ryhmällä. Yläraja pisimmälle havaittavalle aallonpituudelle on samaa luokkaa kuin etäisyys  $a$ .

Seismisiä monipisteasemia käytettiin alun perin mikroseismissien tutkimuksissa ja kokeellisten ydinräjäytysten seurannassa niitä valvovan komission toimesta. Monipisteasemia alettiin käyttää 1980-luvulta lähtien myös tulivuorten monitorointiin ja monimutkaisten seismisten aaltokenttien analysointiin vulkaanisilla alueilla ja nykyään moneen muuhunkin tehtävään, kuten tarkkaan järjestysten mallintamiseen ja Maan kuoren pintakerrosten rakenteiden ja ominaisuuksien tutkimiseen. (Schweitzer *et al.* 2012)

## 2.2. Seismisten tapahtumien paikantaminen käyttäen yhtä seismistä asemaa

Suunta eli atsimuutti seismiseltä asemalta episentriä kohti voidaan määrittää ensiksi saapuvan P-aallon radiaalikomponentista, joka saadaan kahden horisontaaliseismometrin komponenteista laskemalla arkustangentti niiden amplitudien suhteesta  $A_E / A_N$ . Aseman havaitseman ensimmäisen liikkeen napaisuus määrittelee sen, miten suunta episentrielle lasketaan horisontaalikomponenteista. Jos ensimmäinen liike tapahtuu vertikaalikomponentissa alaspäin, horisontaalinen radiaalikomponentti suuntautuu kohti episentriä. Jos ensimmäinen liike vertikaalikomponentissa on ylöspäin, suunta kohti episentriä on radiaalikomponentti  $+ 180^\circ$ . Seismisen tapahtuman lähdemekaniikka määrittää asemaa kohti etenevän aallon ensimmäisen liikkeen suunnan eli sen onko liike kompressionaalinen vai dilatationaalinen. (Havskov, Bormann *et al.* 2012)

Kun käytetään vain yhden aseman seismisiä tallenteita paikantamiseen, täytyy seismogrammia tulkittaessa määrittää ainakin ensimmäisten P- ja S-aaltojen saapumisajat. P-aalto (pitkittäinen perusaalto) on ensisaapuja episentrietäisyyteen ( $D$ )  $100^\circ$  asti. Teleseismiselle tapahtumalle ( $D > 20^\circ$ ) P:llä on suurin amplitudi vertikaalisessa komponentissa. S on ensimmäinen saapuva poikittaisaalto  $83^\circ$ :een saakka, ja sen suurimmat amplitudit ovat horisontaalisissa komponenteissa. Suuremmilla etäisyyksillä SKS on ensimmäinen saapuva poikittainen aalto. Merkintä K faasin tunnisteessa tarkoittaa, että aalto on edennyt Maan ulkoytimen kautta.

Episentrietäisyys  $D$  määritetään käyttäen matka-aika-erotusta  $t(S - P)$  valmiiden matka-aika-aulukkojen mukaan tai sovittamalla tallenteesta tunnistetut faasit yleisiin matka-aika-käyriin. Järjestysprosessin alkupisteen eli hyposentrin syvyys vaikuttaa matka-aikaeroihin eri saapuvien aaltojen välillä. Ensin on tärkeää tunnistaa, onko järjestys tapahtunut syvällä vai lähellä maanpintaa. Ensimmäistä karkeaa arviota varten täytyy verrata keskenään perusaaltojen ja pinta-aaltojen amplitudeja. Jos pinta-aaltojen amplitudit ovat selkeästi erottuvia ja selvästi suurempia kuin aikaisemmin saapuneiden perusaaltojen amplitudit, seismisen tapahtuman voidaan olettaa olleen

suhteellisen lähellä maanpintaa. Jos pitkäaaltoisten pinta-aaltojen amplitudit ovat paljon pienempiä kuin perusaaltojen amplitudit tai niitä ei voi tunnistaa ollenkaan, tapahtuman syvyys on suurempi kuin 70 kilometriä. Pintajärityksessä aaltomuodot ovat tavallisesti monimutkaisia ja syvässä järityksessä impulsiivisia.

Jos pinta-aallot ovat suhteellisen heikkoja tai niitä ei havaita, pitää etsiä syvyysfaaseja, eli aaltoja, jotka ovat ensin edenneet hyposentrista ylöspäin ja sitten heijastuneet Maan pinnasta. Perusaallon ja sen syvyysfaasin välinen saapumisaikaero on erittäin herkkä lähdesyvyydelle. Syvyysfaasien (pP, sP, ...) tunnistaminen on vaikeaa pintajärityksille, koska ne seuraavat muutaman sekunnin sisällä ensimmäistä P- tai S-aaltoa. Silloin episentrietäisyyden arviointiin voidaan käyttää matka-aika-käyriä tai -taulukkoja pintakeskuksille, joille seismisen tapahtuman syvyyden  $h$  voidaan olettaa olevan 0 km, tai normaalisyvyyksille keskuksille ( $h = 33$  km). Jos  $D$  on paljon suurempi kuin  $h$ , virhe arvioidussa etäisyydessä on tavallisesti mitätön.

Atsimuutin määrittäminen paikallisille tapahtumille on vähemmän luotettavaa, kun käytetään lyhytjaksoisia tallenteita. Maankuoren paikalliset heterogeenisyydet vaikuttavat niihin paljon enemmän kuin teleseismisiin pitkäjaksoisiin tai laajan taajuuskaistan tallenteisiin. Tällöin havaittu aallon saapumissuunta voi poiketa yli  $20^\circ$  todellisesta suunnasta. (Bormann & Wendt. 2012b)

### 2.3. Seismisten tapahtumien paikantaminen seismisten verkkojen avulla

Hyposentrin eli järityspesäkkeen sijainnin määrittämiseen tarvitaan vähintään neljä asemaa, kun käytetään ainoastaan ensisaapujasignaalien saapumisaikoja, tai vähintään neljä saapumisaikahavaintoa yhteensä vähintään kolmelta eri asemalta. Kun käytössä on eri faasien saapumisaikoja, voidaan niistä laskea yksittäisiä matka-aikaeroja faasien välille. Silloin sijainnin laskemiseen riittävät kolmen aseman rekisteröinnit, koska matka-aikaeroista voidaan laskea hyposentrin etäisyys kuhunkin asemaan. Saapumisaikarekisteröintejä olisi hyvä saada mahdollisimman laajasti järityksen keskuksen ympäriltä eri etäisyyksillä olevilta asemilta. Eri faasien oikea tunnistaminen ja niiden saapumisaikojen huolellinen määrittäminen ovat oleellisia hyposentrin paikantamisessa. Monipisteasemamenetelmien käyttö paikantamisessa vaatii sen, että etäisyys lähteen ja asemaryhmän välillä on paljon suurempi kuin asemaryhmän rako, joka on suurin etäisyys ryhmän kahden eri aseman välillä.

Seismisten asemaverkkoja voidaan kalibroida parempien hyposentrietäisyyksien laskemiseksi hyödyntämällä sijainniltaan tarkasti tunnettuja seismisiä tapahtumia, joita ovat esimerkiksi räjäytykset sekä luotettavan tarkasti paikannetut maanjäritykset. Asemaryhmien avulla suoritettujen paikantamisten luotettavuutta voidaan lisätä merkittävästi tutkimalla etäisyyden ja atsimuutin mukaan vaihtelevan signaalin hitauden aiheuttamia systemaattisia paikannusvirheitä. Havaitut systemaattiset virheet voidaan ottaa huomioon paikannuslaskuissa.

Laskettu saapumisaika  $t_i^c$  saadaan yhtälöstä

$$t_i^c = T(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) + t_0 \quad (1)$$

$T$  on matka-aika aseman sijainnin ja hyposentrin funktiona. Kun havaintoja on  $n$  kappaletta, myös yhtälöitä on  $n$  kappaletta. Silloin yhtälöt (1) ratkaistaan siten että havaitun ja lasketun matka-ajan erotus eli residuaali  $r_i$  minimoidaan jokaisella asemalla. Koska  $T$  on epälineaarinen, hyposentriparametreja ei voi ratkaista lineaarisesti. Joitakin sopivia menetelmiä ratkaisun

löytämiseen ovat ruudukkohaku ja iteraatiomenetelmät. (Bormann *et al.* 2012, Havskov, Bormann *et al.* 2012)

#### 2.4. Menetelmä seismisen tapahtuman syvyyden määrittämiseen monipisteasematekniikoiden avulla

Seismisen tapahtuman syvyyden määrittämisen tarkkuus paranee merkittävästi, kun käytetään syvyysfaaseja (esim. pP ja sS), koska aikaero pP-P on erittäin herkkä lähdesyvyydelle. Syvyysfaasien systemaattinen poimiminen teleseismisistä tai alueellisista saapuvista signaaleista on ongelmallista huonon signaali-kohinasuhteen vuoksi. Koska monipisteasematekniikat sopivat hyvin automattiseen syvyysfaasien poimimiseen, otan tässä mukaan esimerkkinä tähän ongelmaan kehitetyistä ratkaisuista yhden menetelmän (Florez & Prieto. 2017) hyposentrin syvyyden määrittämiseksi monipisteasemien avulla.

Maankuoren ja vaipan nopeusrakenteet ovat hyvin samankaltaisia lähellä toisiaan tapahtuneiden maanjäristysten synnyttämien seismisten aaltojen kulkureittien välillä. Suhteellisella paikannuksella saadaan siten melko hyviä arvioita järistyksesäkkeiden sijainneista syvyysuunnassa. Monipisteasematekniikat hyödyntävät signaalien summaamisesta saatavaa kohinan vaimennusta signaalien tunnistamisessa ja poimimisessa. Esimerkkimenetelmän kehittäjät käyttävät lähekkäin olevien asemien ryhmiä monipisteasemina, joissa saapuvaa aaltorintamaa voidaan käsitellä tasoaaltona, sekä nopeusspektrianalyysiä (Schweitzer *et al.* 2012) P-aallon ja sen syvyysfaasin välisen saapumisaikaeron tarkkaan mittaamiseen.

Monipisteasemien eri aliryhmillä saadut yksittäiset arviot aikaeroista kullekin maanjäristysparille yhdistetään käyttämällä kaksoisdifferentiaalialgoritmia. Kaksoisdifferentiaalipaikannusalgoritmi (A Double-Difference Earthquake Location Algorithm) (Waldhauser & Ellsworth. 2000) on menetelmä, jolla voi määrittää korkealla tarkkuudella hyposentrien sijainnit pitkien etäisyyksien päähän. Paikannusmenetelmä hyödyntää absoluuttisia matka-aikamäärytyksiä ja ristikorrelaatiolla saatuja P- ja S-aaltojen matka-aikeroja. Havaittujen ja teoreettisten matka-aikerojen väliset residuaalit (kaksoisdifferentiaalit) minimoidaan maanjäristyspareille jokaisella asemalla linkittäen samalla yhteen kaikki havaitut tapahtuma-asemaparit.

Tällä menetelmällä saadaan melko hyvin kartoitettua seismisyyttä alueilla, joissa se ilmenee tiiviisti ryppäytyneenä. Suhteellisten paikantamismenetelmien soveltaminen näissä tapauksissa vähentää merkittävästi paikantamisen virheitä. Menetelmällä saadut suhteellisten syvyyksien virheet ovat tyypillisesti alle 2 kilometriä.

#### 2.5. Paikantamisjärjestelmä seismisessä OBF-asemaverkossa

Esimerkkinä Suomessa toimivasta asemaverkosta otan tähän OBF-asemaverkon. OBF-verkoksi (Kortström *et al.* 2016) kutsuttu seismisten asemien verkko on Helsingin yliopiston Seismologisen instituutin rakentama paikallinen seiminen verkko, jonka tehtävänä on Pohjois-Pohjanmaalle suunnitellun ydinvoimala-alueen seisminen valvonta. Verkon rakentaminen aloitettiin vuonna 2012, ja vuonna 2013 päättyneen ensimmäisen rakentamisvaiheen jälkeen tehdyistä kokeiluista pääteltiin verkon kykenevän saavuttamaan tavoitteensa seismisessä valvonnassa.



OBF-verkko lähettää jatkuvaa reaaliaikaista aaltomuotoista dataa Seismologisen instituutin datapalvelimelle. Sieltä data siirretään rutiinianalyysi- ja arkistointijärjestelmien käsiteltäväksi. Mikromaanjärjestyksiä automaattisesti havaitseva ohjelmisto erottelee seismiset tapahtumat jatkuvista tallenteista tarkempaa analyysiä varten. Rutiiniohjelmalla on pääpiirteittäin kolme vaihetta, joista ensimmäinen on seismisten signaalien havainnointi. Toisessa vaiheessa havaitut seismiset faasit tunnistetaan ja luokitellaan, ja kolmannessa vaiheessa määritetään seismisten tapahtumien sijainnit, lähdesyvyudet ja magnitudit.

### 2.5.1. Seismisten tapahtumien havainnointi- ja paikantamisjärjestelmä

OBF-verkon automaattinen havainnointiprosessi on jaettu kahteen rinnakkaiseen prosessiin, jotka ovat alueellisen verkon tekemä havainnointi ja OBF-verkon tekemä havainnointi. Alueellisen verkon havainnointia varten kaksi asemaa OBF-verkosta sisällytetään kansalliseen seismiseen verkkoon, joka tunnistaa magnitudiltaan tietyn kynnyksarvon ylittävät seismiset tapahtumat ydinvoimala-alueen lähistöltä. Kynnyksarvo on nykyään noin  $M_L$  0,9. Kansallisen verkon kynnyksarvomagnitudia pienemmän magnitudin seismisiä tapahtumia ydinvoimala-alueelta etsitään OBF-verkon omalla havainnointijärjestelmällä, joka hyödyntää OBF-asemien lisäksi Suomen ja Ruotsin kansallisten verkkojen lähimpiä asemia.

Kummatkin järjestelmät käyttävät Seismologisen instituutin automaattista tapahtumankäsittelyohjelmistoa, mutta eri prosessointiparametreilla. Asemaverkon datankäsittely käyttää kolmikomponenttiasemien tuottamaa dataa, ja verkko koostuu pelkästään kolmikomponenttiasemista. Yksittäisellä asemalla havainnointi tehdään yksinkertaisella STA/LTA-havaitsijalla (3.1), ja sekä yksittäisillä asemilla tehtävä paikantaminen, että datan asemaverkkokäsittelyn suorittama paikantaminen tehdään HYPOSAT-paikannusohjelmalla (Schweitzer. 2001).

Yhden aseman datankäsittelyprosessi tuottaa tapahtuma-alkioita datan asemaverkkokäsittelyä varten. Jokaista yksittäisen aseman havaintoa pidetään mahdollisena P-faasin signaalina, ja jokaisen havainnon jälkeen tietyn aikaikkunan sisällä saatavaa havaintoa pidetään mahdollisena samaan tapahtumaan kuuluvana S-faasina. Tapahtuma-alkio muodostetaan siten, että lasketaan tapahtumasijainnit kaikille mahdollisille P-S-pareille huomioiden kolmikomponenttidatasta saatavat signaalien tulosuunnat eli atsimuutit. Tällä menetelmällä voidaan pitää matalia kynnyksarvoja hyväksyttävillä signaalihavainnoille, eli myös hyvin heikot signaalit voidaan ottaa mukaan paikantamisprosessiin.

Seuraavaksi jokaiselle tapahtuma-alkiolle lasketaan teoreettiset P- ja S- aaltojen saapumisajat jokaisella asemalla, ja havaittujen signaalien tyyppi määritellään sen mukaan, miten niiden saapumisajat sopivat teoreettisiin saapumisaikoihin annetuissa aikaikkunoissa. Tapahtuma-alkio otetaan mukaan seuraavaan käsittelyvaiheeseen, jos alkioon liitettyjen faasihavaintojen määrä ylittää tietyn kynnyksarvon. Samalle tapahtumalle voi syntyä enemmän kuin yksi ratkaisu, joten laskettujen tapahtumien oletetaan kuuluvan samaan todelliseen tapahtumaan, jos niiden sijainnit ja tapahtumaajat ovat riittävän lähellä toisiaan tiettyjen rajojen sisällä. Vakain ratkaisu otetaan mukaan seuraavaan vaiheeseen, jossa tapahtuma-alkioon liitetään faasihavainnot tiukemmilla ehdoilla.

Automaattisiin ratkaisuihin sisältyvät kunkin tapahtuman lähdeaika ja -syvyys, episentrin leveys- ja pituusastearvot, magnitudi ja signaalien matka-ajat jokaiselle asemalle sekä tilastolliset virheet

arvioituille parametreille. Tapahtuman syvyys asetetaan kaikissa tapauksissa nolaksi paikantamisprosessin aikana, koska sillä saadaan vakautettua muiden lähdeparametrien arviointia. Maanjärityksiksi tunnistetuille seismisille tapahtumille tehdään lopuksi syvyysarviointi.

### 3. Seismisten tapahtumien sijainnin automatisoitu paikantaminen

Nykyisin digitaalisia seismisiä tallenteita tulkitaan yhä vähemmän manuaalisesti. Yksi pääsyy tähän on voimakkaasti kasvanut seismisten asemien ja verkkojen määrä ja niiden käyttömahdollisuuksien monipuolistuminen kaikkialla maailmassa, minkä vuoksi kerättyä dataa syntyy niin paljon, että sen tehokkaaseen hyödyntämiseen tarvitaan tietokoneiden suorittamaa nopeaa ja automaattista tulkintaa ja analyysiä. Toinen syy manuaalisen tulkitsemisen vähenemiseen ja samalla tietokoneiden suorittamien automaattisten algoritmien käytön kasvuun on pyrkimys pitää seismologisen datan analysointiin tarvittava henkilöstömäärä mahdollisimman pienenä palkkakustannusten vuoksi.

Tarve kehittää ja saada käyttöön ensivaroitussjärjestelmiä maanjärityksiä, tsunameja ja tulivuorenpurkauksia varten kasvaa, ja jo toiminnassa olevia tai kokeellisia järjestelmiä ovat esimerkiksi Tyynenmeren tsunamivaroitusjärjestelmä PTWC (The Pacific Tsunami Warning Center) (US Dept of Commerce / NOAA / NWS. 2009) ja Intian valtameren saksalaisindonesialainen tsunamivaroitusjärjestelmä GITEWS (The German-Indonesian Tsunami Early Warning System for the Indian Ocean) (Lauterjung *et al.* 2014). Samantapaisia järjestelmiä on useita eri puolilla maapalloa. Ensivaroitussjärjestelmien tarpeet datan keräämisen ja analysoinnin suhteen ovat selkeästi erilaiset verrattuna muun seismologisen tutkimustyön tarpeisiin, joissa kerätyn tiedon kattavuus ja tarkkuus ovat ensisijaista. (Bormann *et al.* 2012)

#### 3.1. Automatisoitu faasien poiminta

Yleisin käytössä oleva menetelmä ensimmäiseksi saapuvien P-aaltojen poimimiseen on soveltaa ensin STA/LTA-liipaisimia seismisten verkkojen tallenteisiin ja sen jälkeen jotakin tarkempaa faasinpoiminta-algoritmia havainnot sisältäville aikaikkunoille. STA tarkoittaa lyhyen ajan eli aikaikkunan keskiarvoa (Short Term Average), ja LTA tarkoittaa pitkän ajan keskiarvoa (Long Term Average). STA/LTA-suhde lasketaan liikkuville aikaikkunoille, ja sitä sovelletaan joko raakatalenteisiin tai laskettuihin käyräfunktioihin, joita sanotaan karakteristisiksi funktioiksi (Allen-poimija) (Allen. 1978). Karakteristinen funktio CF saadaan yhdellä tai useammalla epälineaarilla muunnoksella seismogrammista, ja sen on tarkoitus kasvaa nopeasti seismisen aallon saapumisen ajankohdassa. Allen-poimijassa verhoikäyräfunktioon  $E(t)$  sovellettua STA/LTA-käynnistintä käytetään faasien havaitsemiseen. Funktio  $E(t)$  on herkkä amplitudin ja taajuuden nopeille muutoksille.

STA/LTA-menetelmässä seisminen tapahtuma kirjataan, jos vähintään neljällä asemalla saadaan havaintoajan perusteella toisiinsa liittyvät havainnot seismisten aaltojen etenemismallien mukaisista P-aalloista, joiden amplitudit ylittävät asetetun kynnsarvon. Olettaen, että kaikki tehdyt havainnot liittyvät ensimmäiseen P-aaltoon, voidaan laskea hyposentrin koordinaattien ja lähdeajan neljä tuntematonta muuttujaa (Kaava 1).

Seismisen verkon kaikille jatkuville datasyötteille sovelletaan yksinkertaista STA/LTA-liipaisinta, jotta saadaan ensimmäiset saapumisaika-arviot P-aalloille. Seismisten signaalien havaittajat pyritään säätämään sellaisiksi, että vääriä havaintoja tulisi mahdollisimman vähän, mutta kuitenkin riittävän herkiksi pienille signaaleille. Näiden syiden takia vääriä havaintoja tulee jonkin verran, eikä kaikkia saapuvia faaseja havaita. Useimmat ohjelmat käyttävät vain P- ja S-aaltoja määrittävinä faaseina. (Küperkoch *et al.* 2012)

### 3.1.1. Baerin ja Kradolferin P-poimija

Baerin ja Kradolferin P-poimija (Baer & Kradolfer. 1987) käyttää dynaamista kynnsarvoa kohinaan hautautuneiden signaalien havaitsemiseen sekä karakteristista funktiota, joka on saatu muokkaamalla Allen-poimijan funktioita. Baerin ja Kradolferin poimijassa karakteristinen funktio CF on aikasarja, johon poimijaa sovelletaan, ja funktio on herkkä amplitudin, taajuuden ja vaiheen muutoksille. Poimintalippu asetetaan, jos  $CF_i$  ylittää kynnsarvon  $\gamma \approx 10$ . Jotta vältetään kohinan aiheuttamien hetkellisten nousujen havaitsemista, signaali hyväksytään havainnoksi vain, jos CF ei putoa kynnsarvon alapuolelle hallitsevaa jaksonaikaa pitemmäksi ajaksi. Poiminta-algoritmi on hyvin nopea, varma ja käyttäjäystävällinen, sillä se tarvitsee vain neljä syöteparametria. Algoritmista puuttuu automaattinen poimintojen laadun arviointi, ja sillä on tapana antaa hieman myöhäisiä poimintoja verrattuna manuaalisiin poimintoihin. (Küperkoch *et al.* 2012)

### 3.1.2. P-aaltojen poimiminen käyttäen korkeamman asteen tilastollisia menetelmiä

Kun maanjäristyssignaali saapuu seismiselle asemalle, seismogrammin tilastolliset ominaisuudet, kuten varianssi, vinous ja kurtoosi sekä jakauman tiheysfunktio, muuttuvat äkisti. Tästä johtuen tilastollisten ominaisuuksien mittaamista liikkuvassa aikaikkunassa voidaan käyttää karakteristisen funktion määrittämiseen sekä aaltojen saapumisaikojen arvioimiseen. (Küperkoch *et al.* 2012)

### 3.1.3. AR-AIC-poimija

Autoregressiiviset (AR) menetelmät sisältävät AR-mallien laskemisen kahdelle stationariselle segmentille, joista toisessa on vain seismistä kohinaa ja toisessa enimmäkseen signaalia. AIC (Akaiken informaatiokriteeria) ilmaisee mallin sovituksen epäluotettavuutta, ja sitä käytetään saapujasignaalin tarkkaan poimimiseen. AR-AIC-poimija (Akazawa. 2004, Sleeman & Van Eck. 1999) voi havaita P- ja S-aaltoja, ja siinä on hyvin kehittynyt poiminta-algoritmi, joka on laskennallisesti melko hidas verrattuna Baer-poimijaan. (Küperkoch *et al.* 2012)

### 3.1.4. Paikallisille seismisille verkoille suunniteltu kurtoosiin perustuva faasinpoimija

Otan suhteellisen uusista faasinpoiminta-algoritmeista esimerkiksi vuonna 2014 julkaistun automatisoidun algoritmin (Baillard *et al.* 2014) P- ja S-aaltojen tunnistamiseen ja poimimiseen. Se käyttää tilastolliseen kurtoosiin perustuvaa karakteristista funktiota ja ominaisarvohajotelmia

kolmikomponenttiseen seismiseen dataan. Kurtoosi on tilastollinen arvo, joka kuvaa annetun jakauman muotoa. Kurtoosi on 3 normaalijakaumalle, ja yleensä kasvaa ei-normaalijakaumalle. Saapuvat seismiset aallot synnyttävät hetkellisesti ei-normaalijakautuneen aaltokentän, joka nostaa kurtoosia nopeasti, ja tätä voidaan käyttää saapumisaikojen tarkkaan poimintaan.

Automaattisen poimintaohjelman ensimmäinen vaihe on analyysi-ikkunan pienentäminen käyttämällä klusterointianalyysiä kaikkien seismisten asemien tallenteisiin. Sen jälkeen algoritmi tutkii ovatko havaitut signaalit todennäköisiä P- ja S-aaltoja, ja poimii saapujasignaaleja käyttäen kyseisessä julkaisussa esitettyä karakteristista funktiota CF, jossa signaali on muunnettu nollakeskiarvoiseksi prosessiksi.

Ensiksi tehdään sarja muunnoksia karakteristiselle funktiolle, jotta saataisiin eristettyä ensimmäiseksi saapuva signaali sekä tunnistettua vahvimmat saapuvat signaalit. Muunnokset ovat kurtoosin  $F_1$  laskeminen suodatetulle Z-seismogrammille, kaikkien negatiivisten gradienttien poistaminen funktiosta  $F_1$  ( $F_2$ ), lineaarisen trendin poistaminen ( $F_3$ ) ja viimeinen muunnos ( $F_4$ ), jossa karakteristisen funktion arvoja pienennetään seuraavan maksimin amplitudin verran ja loput positiiviset arvot asetetaan nolleks.  $F_4$ :n minimien poimiminen antaa hyvän arvion saapumisajoista, mutta tarkkuuden kasvattamiseksi lisätään kaksi välivaihetta, jotka ovat  $F_3$ :n keskiarvoistaminen usean aikaikkunan ja taajuuskaistan yli sekä pehmentävien funktioiden soveltaminen  $F_3$ :een usealla eri pitkästä lyhyeen skaalatulla aikaikkunalla ja näistä  $F_4$ :n laskeminen. Jälkimmäisessä välivaiheessa lähestytään lopullista poimittavaa aika-arvoa lähtien eniten pehmentetystä  $F_4$ -muunnoksesta vähiten pehmentettyyn  $F_4$ -muunnokseen valiten aina lähin poiminta kustakin muunnoksesta mahdolliseksi lopulliseksi arvoksi saapumisajalle.

Saapuvien aaltojen polarisaatio riippuu aallon tyypistä ja suuntautumisesta. Polarisaatioanalyysillä erotellaan P-aallot S-aalloista ja hylätään pinta-aaltojen ja kohinan aiheuttamat poiminnat. Sen jälkeen algoritmi asettaa signaali-kohinasuhteeseen perustuvat laatuindeksit poimituille P- ja S-aalloille. Nämä indeksit määrittelevät poimintojen painoarvot hyposentrien laskemiseen käytettävässä inversioproessissa. Kun faasit ovat poimittu ja tunnistettu, algoritmi soveltaa vielä saapumisaikojen jakaumaan perustuvaa hylkäysmetodia.

### 3.2. Automatisoidusta S-aallon saapumisajan määrittämisestä

S-aaltojen saapumisaikojen arvioiminen on tärkeää luotettavassa maanjäristysten paikantamisessa ja hyposentrien syvyyksien määrittämisessä, mutta se on haastavaa sekä manuaalisessa että automaattisessa paikantamisessa. S-aalloista ensimmäiseksi saapuva aalto peittyä usein edeltävän P-aallon koodan alle. P-aallon koodan tilastolliset ominaisuudet ovat hyvin vaihtuvia, ja usein ne eivät ole normaalijakautuneet, joten S-aaltojen saapumisaikoja ei tavallisesti voi havaita korkeamman asteen tilastomenetelmiä käyttävillä algoritmeilla. Pitkittäisesti polarisoituneiden P-aaltojen energia keskittyy tavallisesti vertikaaliseen komponenttiin, mutta myöhemmin saapuvien poikittaissuuntaisesti polarisoituneiden S-aaltojen energia jakautuu tavallisesti kaikkiin kolmeen komponenttiin.

S-faasin saapumisajan automaattinen määrittäminen luotettavasti tarvitsee kaikki komponentit tai ainakin kummankin horisontaalisen komponentin. S-faasi poimitaan aikaikkunasta, joka määritetään aiemmin poimitun P-faasin perusteella tai esipaikannuksen perusteella. P-faasin poiminta-algoritmeja voi käyttää myös S-faasin poimimiseen poikittaissuuntaisista komponenteista.

Esimerkiksi AR-AIC-poimijalla voi poimia myöhempiä faaseja horisontaalisista komponenteista. (Küperkoch *et al.* 2012)

### 3.3. Paikalliset ja alueelliset seismiset lähteet

Etäisyysalueella  $0^\circ < D < 20^\circ$  seismogrammeista erottuu selkeimmin eri reittejä kuoren ja ylävaipan läpi kulkeneet P- ja S-aallot. Näille faaseille käytetään erikoissymboleja. Esimerkiksi Pg ja Sg etenevät suoraan lähteestä seismiselle asemalle kuoren ylä- tai keskiosien kautta, ja PmP ja SmS ovat superkriittisesti alakuoren ja ylävaipan rajapinnalta heijastuneita aaltoja. Pinnanläheisille lähteille Rg-pinta-aallot havaitaan Sg-aaltojen jälkeen. Rg on lyhytjaksoinen Rayleigh-aalto, jonka jaksonaika on noin 2 sekuntia ja joka etenee yläkuoressa. Rg on tallenteissa yleensä hyvin kehittynyt 300 kilometriin asti pinnanläheisille lähteille, kuten louhosräjähdyksille ja kaivostoiminnan aiheuttamille seismisille tapahtumille. Siten sen avulla voi hyvin erottaa kyseiset tapahtumat paikallisista tektonisista maanjäristyksistä. Tyypilliset Pg- ja Sg-aaltojen etenemisnopeudet manneralueilla ovat 5,5-6,2 km/s ja 3,2-3,7 km/s. Pg ja Sg ovat suoria aaltoja vain noin kahden tai kolmen asteen etäisyydelle. Suuremmilla etäisyyksillä ne voivat ilmetä aaltoryhminä, jotka ovat useiden eri heijastusten superpositioita koko kuoren sisällä.

Paikallinen kuoren rakenne vaikuttaa voimakkaasti paikallisten ja alueellisten seismisten lähteiden seismogrammeihin. Kuoren rakenne vaihtelee alueittain, ja jopa paikallisten asemien välillä. Tämä voi aiheuttaa seismogrammeihin muita odottamattomia signaaleja, joista jotkin voivat olla muuntuneita aaltoja, syvyysfaaseja tai moninkertaisia heijastuksia. Yleensä näitä yksityiskohtia ei käsitellä rutiinianalyyseissä, mutta paikantamistarkkuutta voidaan merkittävästi parantaa käyttämällä paikallisia matka-aikakäyriä ja kuorimalleja. (Bormann *et al.* 2012)

## 4. ObsPy

Tiedeyhteisöissä Python on yksi suosituimmista ohjelmointikielistä, ja sen standardikirjastot ovat helppokäyttöisiä ja laajoja. Python tarjoaa myös mahdollisuuden olio-ohjelmointiin monimutkaisempia ohjelmia varten. ObsPy (Beyreuther *et al.* 2010, Megies *et al.* 2011) laajentaa Pythonia tarjoamalla keinoja seismologisen datan käsittelyyn. ObsPy on suunniteltu hakemaan ja käsittelemään seismologista aaltomuotoista dataa ja metadataa.

ObsPylla voi ottaa yhteyden tärkeimpiin datakeskuksiin, joita ovat IRIS ja ORFEUS/GEOFON, ja se myös yhdistää useita erilaisia dataformaatteja ja datapalvelimia. ObsPy tukee tavallisimpien datakeskuksissa ja observatorioissa käytettävien dataformaattien lukemista ja tallentamista, sekä standardeja metadataformaatteja Dataless SEED, Full SEED ja XML-SEED. Käyttäjän ei tarvitse huolehtia tiedostoformaateista, koska niitä käsittelevät ObsPyn lukuisat moduulit. ObsPy laajentaa Pythonin yleisiä vahvuuksia datakeskuksia, observatorioita ja seismologeja varten.

ObsPy tarjoaa kirjaston signaalinkäsittelyrutiineja, joita tarvitaan usein seismologiassa. Näitä ovat esimerkiksi suodatus, laitesimulointi, liipaisimet (eng. trigger), signaalien pinoaminen ja taajuus-aaltolukuanalyysi (fk-analyysi). Lisäksi suositut ja laajasti käytössä olevat Python-paketit NumPy ja SciPy antavat käyttöön yleisiä signaalinkäsittelytyökaluja, kuten nopean Fourier-muunnoksen. Myös

kolmansien osapuolien saatavilla olevien koodikirjastojen valtava määrä on hyödyksi seismologeille, koska monet näistä koodikirjastoista liittyvät signaalinkäsittelyyn. ObsPy tarjoaa datan visualisointiin lukuisia keinoja kuten aaltomuotojen kuvaajat, spektrogrammit ja lähdemekanismien kuvaajat. Lisäksi Pythonin Matplotlib-moduulin avulla voi luoda laadukkaita kuvaajia.

ObsPyn mukana tulee komentoriviohjelmat Dataless SEED-tiedostojen muuntamiseksi XML-SEED-tiedostoiksi ja takaisin sekä Dataless-SEED-tiedostojen muuntamiseen RESP-tiedostoiksi. XML-SEED on ehdotus XML-merkintästandardiksi Dataless SEED-formaatille. XML-SEED-formaatti on ihmiselle ymmärrettävä muoto seismisen aseman rekisteröintilaitteiston parametrien ja muiden tietojen tallentamiseen, ja sitä on helppo käyttää datakeskusten sisäisiin tarpeisiin. XML-SEED-muotoon voi tekstieditorilla suoraan lisätä kommentteja ja lisäinformaatiota kunkin aseman paikallisista ongelmista ja toiminnasta. Paikallisesti tallennetut laajennetut XML-SEED-tiedostot voidaan milloin tahansa muuttaa takaisin standardiin Dataless SEED-formaattiin, ja lisätyt ylimääräiset tietuekentät vain jätetään pois muunnoksesta.

StationXML on melko uusi ja suosiota saanut tallennusmuoto tiedoille seismisen havaintolaitteiston ominaisuuksista ja sen havaintodataan aiheuttamista vasteista. StationXML on suunniteltu seismologisen SEED-dataformaatin seuraajaksi, ja XML-muotoisena sillä on binääriseen SEED-formaattiin verrattuna monia etuja, kuten työkalutuki, datan jakamisen helppous sekä ihmiselle luettava muoto. (Krischer *et al.* 2015)

#### 4.1. Laitekorjaus

Seismometrien ja prosessiketjun aiheuttamien vaikutusten poistamiseksi datasta lasketaan seismometrilaitteiston siirtofunktio (Wielandt. 2012). Seismogrammeille lasketaan sitten dekonvoluutio tällä funktiolla, ja näin saadaan seismogrammit, joista on poistettu laitteiden aiheuttamat vaikutukset. Tätä korjausta sanotaan laitekorjaukseksi.

ObsPyn (ObsPy Development Team. 2008) Stream-tyypin objektiin tallennetaan seismogrammit aikasarjadatana ja tarvittavat metatiedot. Stream jakautuu Trace-tyypin objekteihin, joista kukin sisältää yhden kanavan aaltomuotoisen datan ja siihen liittyvän metadatan. Stream-objektin `remove_response()`-funktio poistaa laitteiston taajuusvasteen. Funktiolle annetaan syöteparametrina Inventory-tyypin objekti, johon on ladattu laitevasteen tiedot sisältävä StationXML-tiedosto.

Seuraavaksi esitän esimerkin ObsPyn työkalujen käyttämisestä havaitun seismisen tapahtuman analysointiin. Käsiteltävä tapahtuma on havaittu usealla eri asemalla, ja käytän Suomessa sijaitsevien seismisten asemien tallenteita.

#### 4.2. ObsPyn vakiotyökalut faasien poimimiseen

Käytettävissä olevat menetelmät faasien poimimiseen seismogrammista löytyvät `obs.py.signal.trigger`-moduulista, ja niihin kuuluvat esimerkiksi erilaiset STA/LTA-liipaisimet, Baer-poimija ja AR-AIC-poimija.

Baerin ja Kradolferin P-aalto-poimija (Baer & Kradolfer. 1987) on nopea ja varma menetelmä. Algoritmi ottaa syöteparametrina aikasarjadatan, ja antaa tuloksen näytteinä, eli aikasarjan alusta lukien sen näytteen numeron minkä kohdalle saapuva P-aalto on määritetty.

AR-AIC + STA/LTA -algoritmi poimii saapumisaikoja käyttäen AR-AIC-metodia (Akazawa. 2004), ja siinä havaintointervalleja rajataan STA/LTA-suhteiden eli signaalikohinasuhteiden ja STA-LTA-erojen avulla. Algoritmi vaatii suhteellisen vähän säätämistä ja paikkakohtaisia asetuksia, ja on siten sopiva laajoihin datakokoelmiin (Küperkoch *et al.* 2012).

### 4.3. Seismogrammin lataaminen ja analysointi

ObsPyn työkaluja voidaan käyttää seismogrammi- ja metadata-aineistojen lataamiseen datakeskuksista ottamalla käyttöön jonkin tätä toimintoa varten luodun paketin Client-objekti. ObsPy sisältää useita erilaisia tällaisia paketteja, ja seuraavassa kirjoittamassani esimerkikoodissa käytän FDSN-verkkopalvelua ja GFZ-datakeskusta seismogrammien lataamiseen. Lataamisen teen `get_waveforms()`-funktioilla. Käytettävän seismisen verkon tunnus on HE (Suomen kansallinen seisminen verkko), ja aseman tunnus on VAF (Ylistaro, Suomi). Parametri "HH\*" määrittelee ladattavat signaalikanavat, jotka tässä tapauksessa ovat kaikki kolme korkean taajuuden kanavaa.

```
from obspy.clients.fdsn import Client
from obspy import UTCDateTime
client = Client("GFZ")
t = UTCDateTime("2017-12-07T22:32:00")
st_vaf = client.get_waveforms("HE", "VAF", "*", "HH*", t, t
                             + 60 * 3)
```

Tässä esimerkissä käytän kuitenkin ensimmäiseksi valmiiksi ladattua Mini-SEED-muotoista datatiedostoa. Esimerkkidata on VAF-asemalta (Ylistaro) Limingassa joulukuussa vuonna 2017 (2017-12-07T22:32:16.600000Z UTC) tapahtuneesta maanjäristyksestä. Seuraavan koodin ensimmäisen rivin `read()`-funktio avaa "Liminka.mseed"-nimisen tiedoston, joka on valmiiksi ladattu tietokoneelle EIDA-palvelusta (<http://orfeus-eu.org/webdc3/>). Lukufunktio kopioi tiedoston sisältämän aikasarjadatan Stream-tyypin objektiin "st". Tässä tapauksessa ei tarvita erikseen laitevasteen poistamista, koska taajuussuodatus suodattaa myös laitevasteen pois. Suodatan seismogrammit kaistanpäästösuodattimella, jotta halutut taajuudet saadaan näkyville kuvaajaan. Lisäksi funktiolla `trim()` leikkaan seismogrammien alusta ja lopusta osan aikasarjadatasta pois, jotta jokainen kanava alkaa ja päättyy samassa ajassa faasinpoiminta-algoritmia varten. Sitten tarkastelen vertikaalikanavan (Z) ominaisuuksia piirtämällä sen kuvaajaan `plot()`-funktioilla, sekä luomalla siitä spektrogrammin `spectrogram()`-funktioilla. Kuvassa 1 ovat esimerkikoodin piirtämät seismogrammit, ja kuvassa 2 on spektrogrammi.

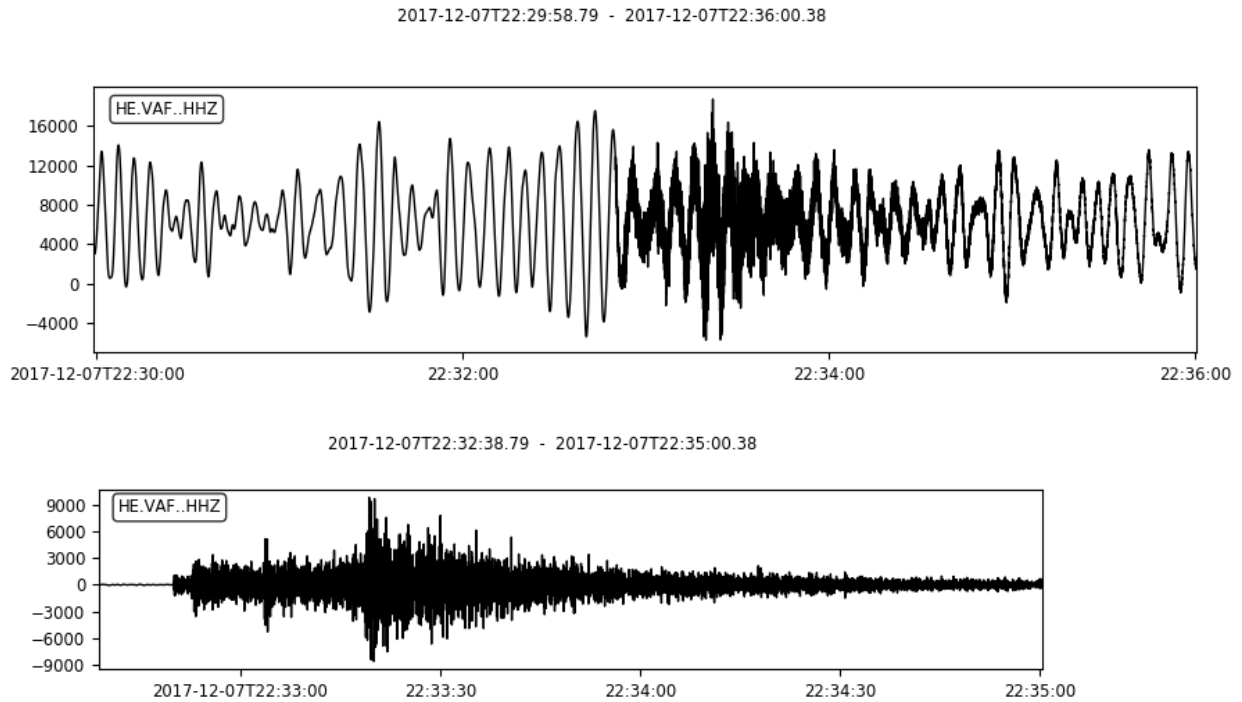
```
from obspy import read, read_inventory
st = obspy.read("Liminka.mseed")
st[2].plot()
```



```

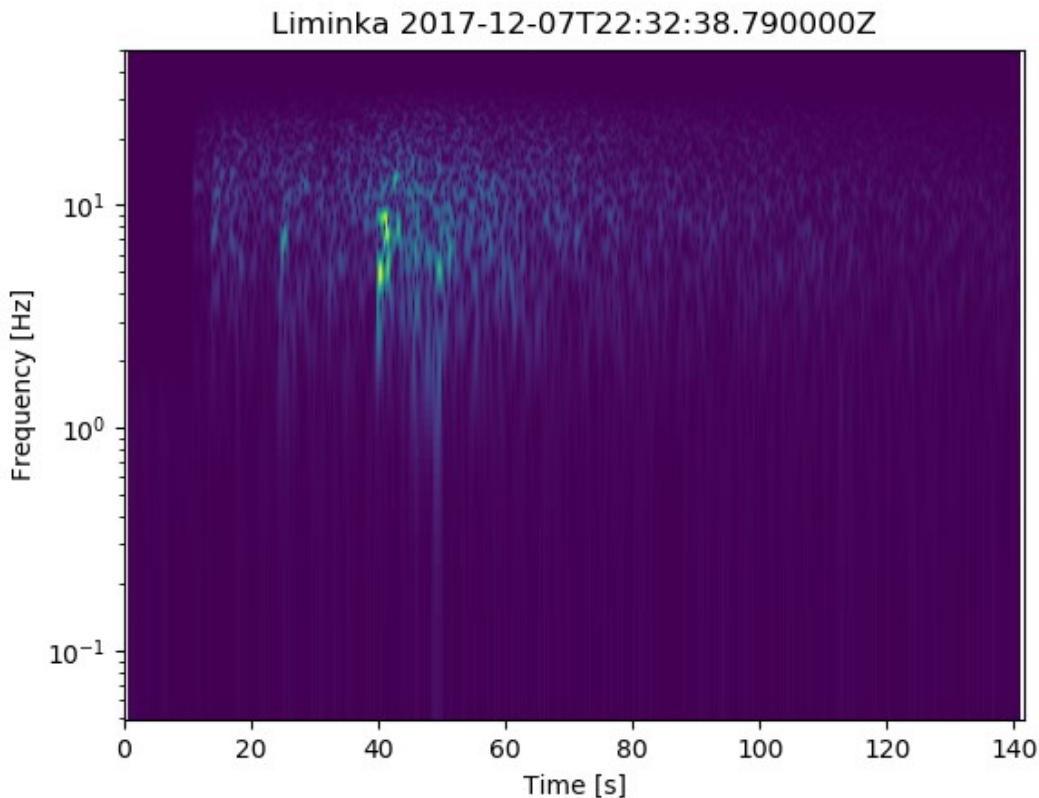
st.filter('bandpass', freqmin=1.0, freqmax=25.0, corners=2,
         zerophase=True)
st.trim(st[2].stats.starttime + 160, st[2].stats.endtime -
        60)
st[2].plot()
st[2].spectrogram(log=True, title='Liminka ' +
                  str(st[2].stats.starttime))

```



*Kuva 1. Yllä käsittelemätön vertikaalikanavan (Z) seismogrammi ja alla suodatettu (1Hz-25Hz) vertikaalikanavan seismogrammi Limingassa joulukuussa 2017 tapahtuneesta maanjäristyksestä.*





*Kuva 2. Spektrogrammi kuvaa taajuusalueelle 1Hz-25Hz suodatetun seismogrammin taajuussisältöä. Tässä on esitetty vertikaalikanavan taajuudet Limingassa joulukuussa 2017 tapahtuneesta maanjäristyksestä.*

Seismogrammista ja spektrogrammista näkee, että kyseessä on pieni paikallinen maanjäristys, tunnusomaisina piirteinä lyhyt signaalin kesto (tässä 1-2 min) ja suhteellisen korkea taajuussisältö. Seismogrammeista nähdään P- ja S-aaltojen saapumisaikaero, joka on noin puoli minuuttia, ja siitä voidaan päätellä maanjäristyksen olevan muutaman sadan kilometrin säteellä asemasta.

#### 4.4. Faasien poimiminen eli aaltojen saapumisaikojen määrittäminen seismogrammeista

Tässä esimerkissä käytän AR-AIC-poimijaa P- ja S-aaltojen tunnistamiseen. Teen poiminnat kolmen eri seismisen aseman tallenteista, joissa on rekisteröitynä esimerkiksi otettu joulukuussa 2017 Limingassa tapahtunut maanjäristys. Käytän lisäksi `get_waveforms()`-funktiota kolmen muun Suomessa sijaitsevan aseman tallenteiden lataamiseen suoraan datakeskuksista tämän kappaleen alussa esitellyllä tavalla. Nämä asemat ovat OUL (Oulu), RNF (Rovaniemi) ja JOF (Ilomantsi). Seuraavat koodirivit ovat esimerkki seismogrammien lataamisesta JOF-asemalta ja niiden suodattamisesta sekä faasien poimimisesta.

```
from obspy.signal.trigger import ar_pick
print("P- ja S-aaltojen saapumisajat:")
```

```

t = UTCDateTime('2017-12-07T22:32:00')
z2 = client.get_waveforms("HE", "JOF", "*", "HHZ", t, t + 60
* 3)
n2 = client.get_waveforms("HE", "JOF", "*", "HHN", t, t + 60
* 3)
e2 = client.get_waveforms("HE", "JOF", "*", "HHE", t, t + 60
* 3)
z2.trim(t + 10, t + 150)
n2.trim(t + 10, t + 150)
e2.trim(t + 10, t + 150)
z2.filter('bandpass', freqmin=2.0, freqmax=10.0, corners=2,
zerophase=True)
n2.filter('bandpass', freqmin=2.0, freqmax=10.0, corners=2,
zerophase=True)
e2.filter('bandpass', freqmin=2.0, freqmax=10.0, corners=2,
zerophase=True)
z = z2[0].slice(z2[0].stats.starttime + 5,
z2[0].stats.endtime - 5)
n = n2[0].slice(n2[0].stats.starttime + 5,
n2[0].stats.endtime - 5)
e = e2[0].slice(e2[0].stats.starttime + 5,
e2[0].stats.endtime - 5)
df = z.stats.sampling_rate
p_pick, s_pick = ar_pick(z.data, n.data, e.data, df, 2.0,
10.0, 8.0, 0.4, 8.0, 1.0, 2, 8, 0.6, 2.4)
print("P ja S, Ilomantsi: ", t + p_pick + 15, t + s_pick +
15)

z.plot()

```

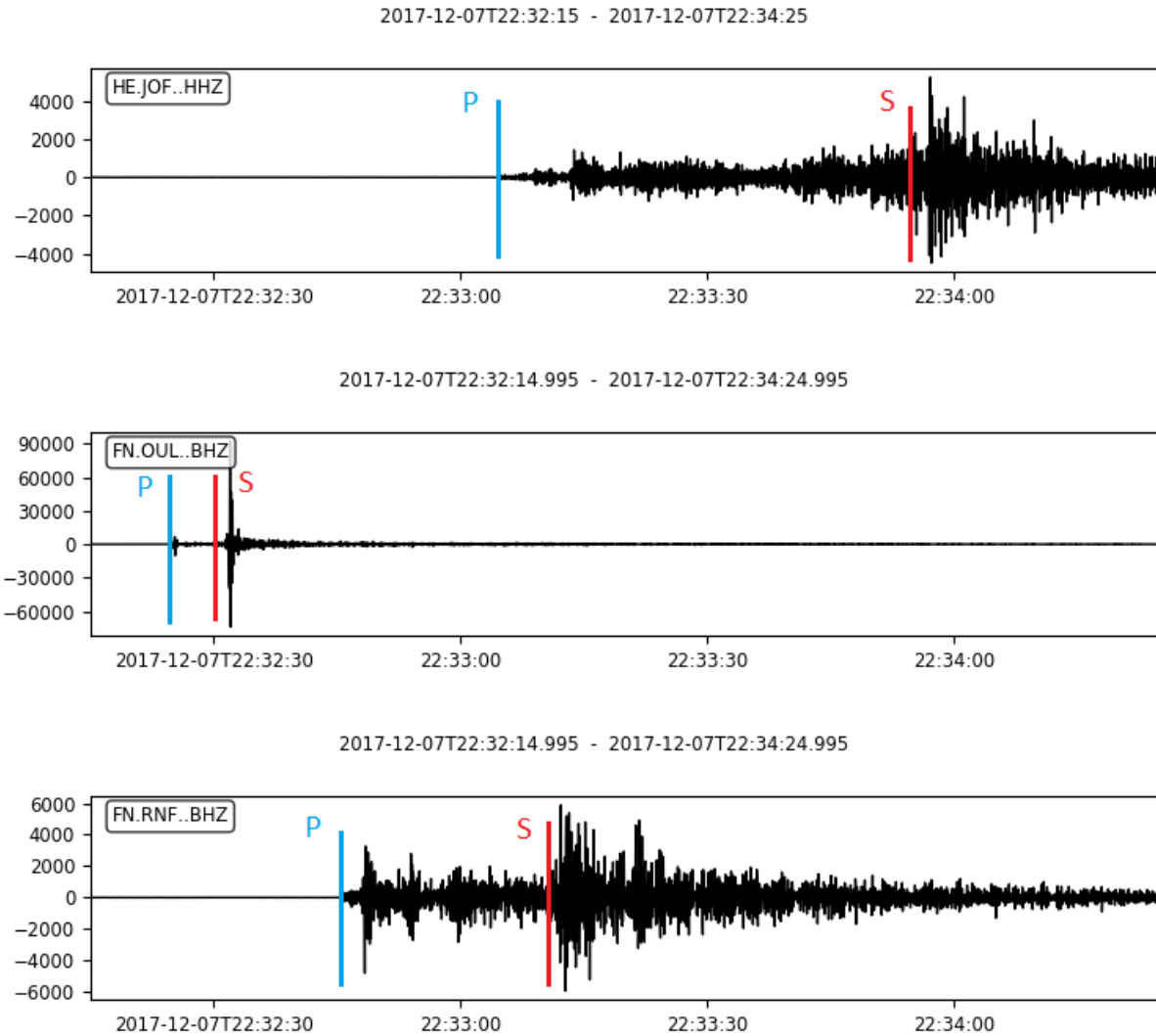
OUL- ja RNF-asemilta ei ollut saatavilla korkean taajuuden HH-tallenteita, joten latasin niiden sijaan laajan taajuuskaistan BH-tallenteet. Kuvassa 3 näkyvät saadut P- ja S-faasien saapumisajat, ja kuvassa 4 on seismogrammien lisäksi merkitty poiminnat kaikille kolmelle eri asemalle.

```

P ja S, Ilomantsi: 2017-12-07T22:33:04.500000Z 2017-12-07T22:33:54.550003Z
P ja S, Oulu: 2017-12-07T22:32:24.650000Z 2017-12-07T22:32:30.200000Z
P ja S, Rovaniemi: 2017-12-07T22:32:45.549999Z 2017-12-07T22:33:10.650002Z

```

*Kuva 3. Limingassa joulukuussa 2017 tapahtuneen maanjäristyksen synnyttämien P- ja S-aaltojen saapumisajat kolmella eri seismisellä asemalla.*



Kuva 4. Limingassa joulukuussa 2017 tapahtuneen maanjäristyksen synnyttämien P- ja S-aaltojen saapumisajat merkittynä kolmen eri aseman vertikaalikanavan seismogrammeihin. Ylin seismogrammi on suodatettu taajuusalueelle 2Hz-10Hz, ja kaksi alempaa seismogrammia taajuusalueelle 2Hz-9Hz.

#### 4.5. ObsPyn hyödyntäminen seismisten tapahtumien paikantamisessa

Kehittelin tähän esimerkiksi paikantamisesta yksinkertaisen Python-ohjelman (Liite 5.1.), joka käyttää ObsPyn työkaluja seismogrammien lataamiseen ja suodatukseen, sekä episentrien sijaintien laskemiseen. Sijainnit ilmoitetaan leveys- ja pituusasteina WGS-84-koordinaattijärjestelmässä. Algoritmissa ei ole saapuvien johtoaaltojen ja suorien aaltojen erottelua, joten siitä voi aiheutua virheitä saapumisaikaeroihin. Karkea arvio hyposentrietäisyydelle (Bormann & Wendt. 2012a) saadaan seuraavalla kaavalla:

$$d = (Sg - Pg) \times 8 \quad (2)$$

Episentrietäisyys, jolla johtoaalto Pn saapuu ennen suoraa Pg-aaltoa, on pinnanläheisille lähteille karkeasti arvioiden viisi kertaa syvyys (Bormann & Wendt. 2012a), jossa Moho-rajapinta sijaitsee alueella (Kaava 3).

$$x_{co} \approx 5 \times z_m \quad (3)$$

Kaavan 3 mukaan Suomessa Pn-faasien voi yleisesti olettaa saapuvan ensimmäisinä episentrietäisyyksillä, jotka ovat noin 250 kilometriä tai enemmän.

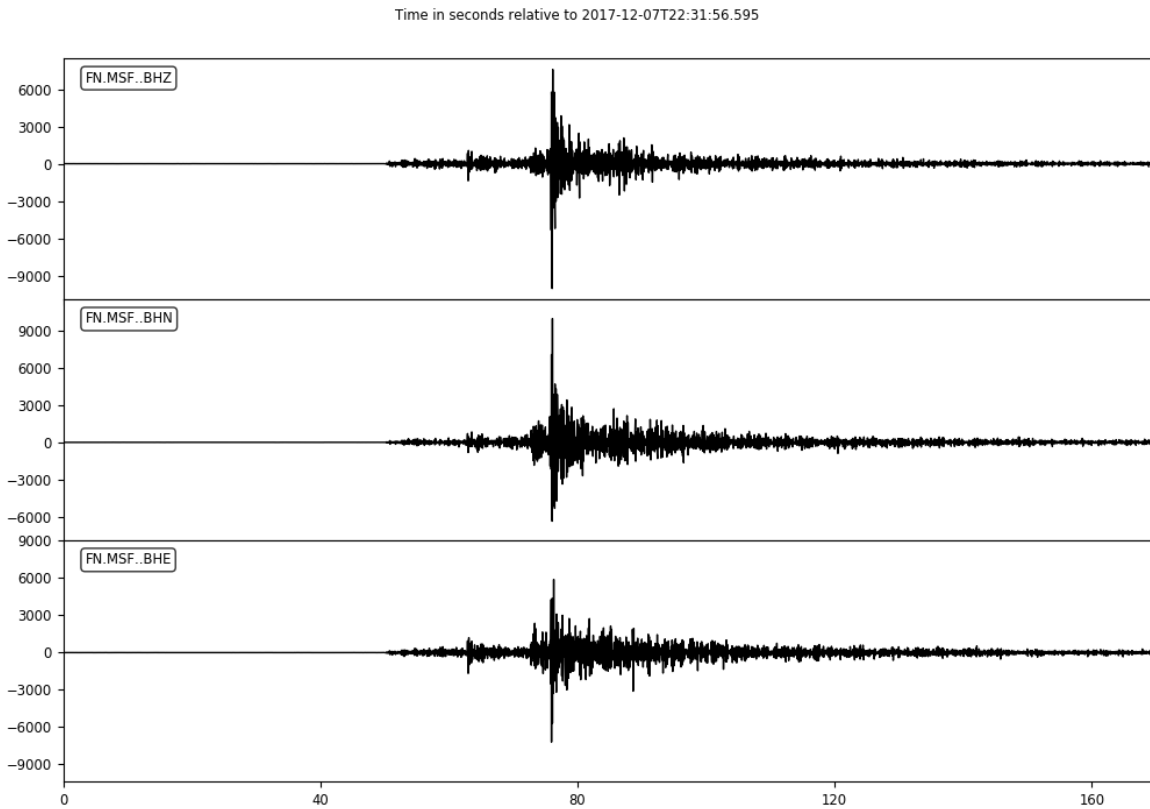
#### 4.5.1. Esimerkkitapauksia paikantamisesta yksinkertaisella algoritmilla

Otan tähän esimerkkinä algoritmilla tehdyn paikantamisen, jossa lasketaan arvio Limingassa joulukuussa 2017 tapahtuneen maanjäristyksen episentrin sijainnille. Ohjelma ilmoittaa tulokset P- ja S-aaltojen saapumisajoille sekunteina alkaen ajankohdasta 20 sekuntia ennen tapahtuman ilmoitettua alkamisajankohtaa. Saapumisajat ja laskettu arvio episentrin sijainnista näkyvät kuvassa 5. Seismogrammit kahdelta eri asemalta on esitetty kuvissa 6 ja 7. Seismogrammit alkavat ajankohdasta 20 sekuntia ennen seismisen tapahtuman ilmoitettua ajankohtaa (2017-12-07T22:32:16.600000Z UTC).

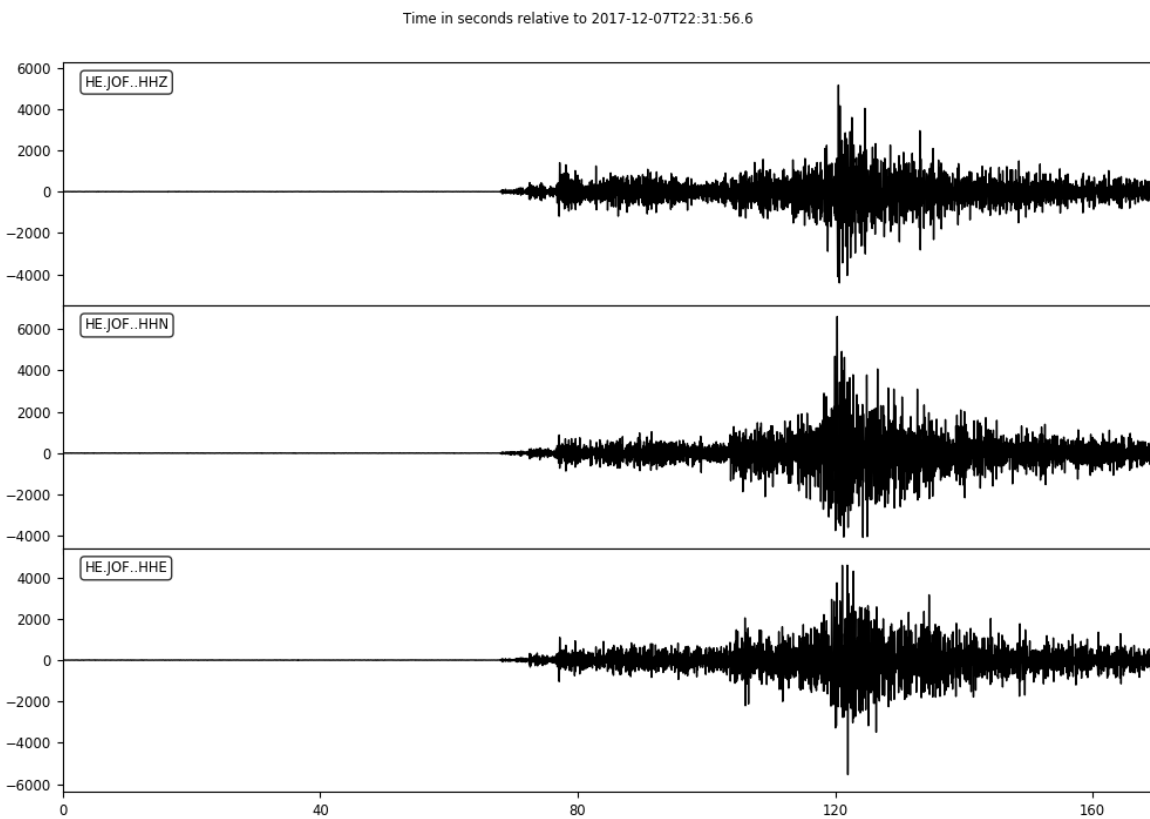
```
UTC time, bulletin: 2017-12-07T22:32:16.600000Z 3.3LHEL
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 41.72 km
OUL , P 28.05 s, S 34.15 s, 48.8 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 234.72 km
VAF , P 53.09 s, S 81.11 s, 224.16 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 358.43 km
JOF , P 67.91 s, S 118.18 s, 402.16 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 212.01 km
MSF , P 50.4 s, S 73.95 s, 188.4 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 457.51 km
RAF , P 81.86 s, S 143.79 s, 495.44 km
```

```
Location of event 2017-12-07T22:32:16.600000Z
From bulletin: Lat 64.78 Lon 25.37 3.3LHEL
Calculated: Lat 64.99 Lon 25.14
```

Kuva 5. Esimerkkialgoritmilla (Liite 5.1.) lasketut P- ja S-aaltojen suhteelliset saapumisajankohdat viidelle eri asemalle ja karkea arvio episentrin sijainnin koordinaateista. Algoritmi käyttää episentrietäisyyksien laskemiseen P- ja S-aaltojen saapumisaikaeroja. Saapumisajat ovat suhteessa ajankohtaan 20 sekuntia ennen ilmoitettua tapahtuma-ajankohtaa (2017-12-07T22:32:16.600000Z UTC).



Kuva 6. Algoritmin (Liite 5.1.) piirtämät MSF-aseman (Maaselkä) taajuusalueelle 2Hz-9,5Hz suodatetut seismogrammit esimerkkitapahtumasta.



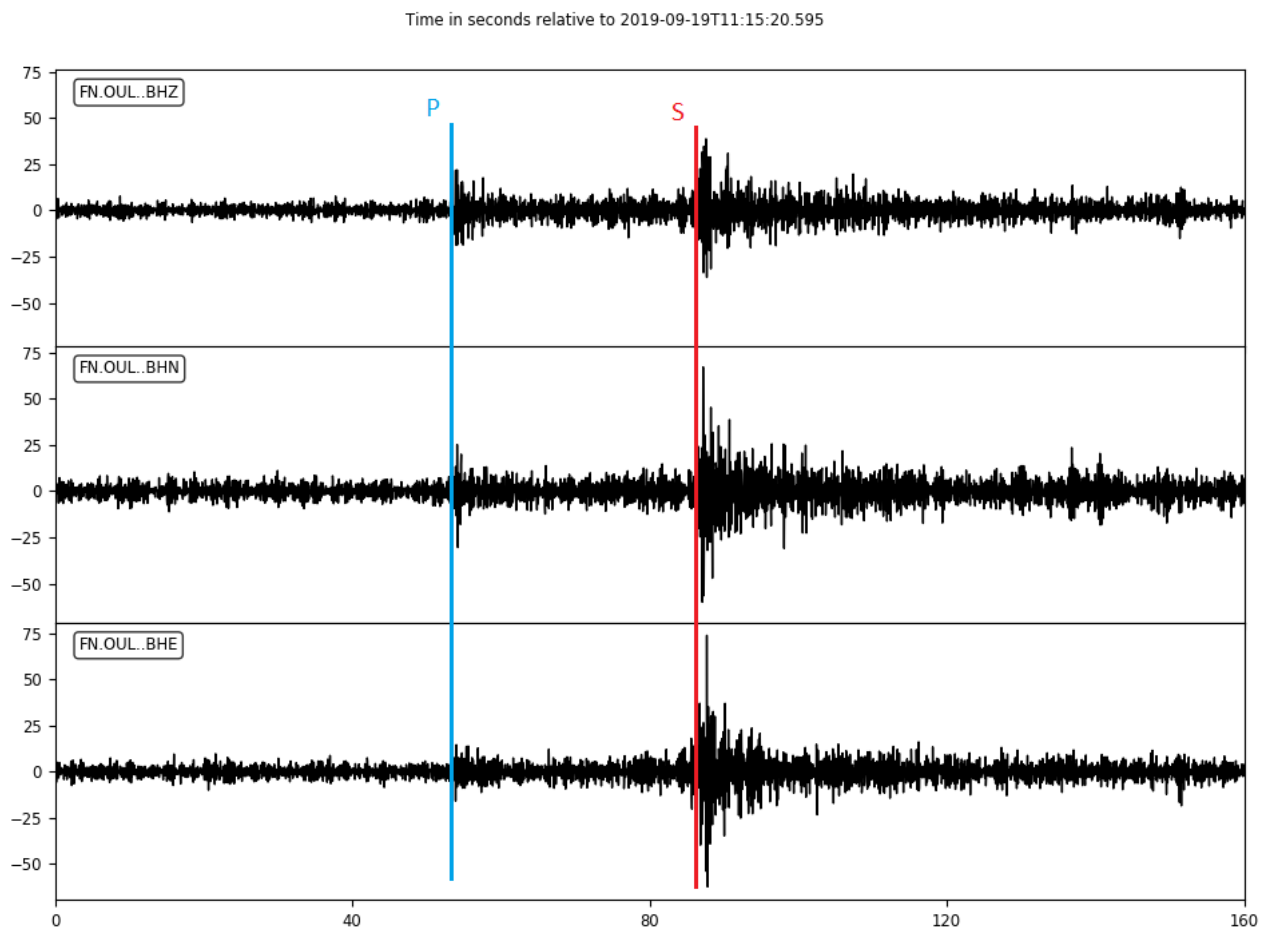
Kuva 7. Algoritmin (Liite 5.1.) piirtämät JOF-aseman (Ilomantsi) taajuusalueelle 2Hz-9,5Hz suodatetut seismogrammit esimerkkitapahtumasta.

```

UTC time, bulletin: 2019-09-19T11:15:30.600000Z 1.6LHEL
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 277.24 km
OUL , P 53.45 s, S 86.3 s, 262.8 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 139.27 km
KAF , P 33.13 s, S 45.39 s, 98.08 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 145.11 km
JOF , P 33.64 s, S 49.43 s, 126.32 km
Epicentral distance calculated from bulletin coordinates: 340.54 km
MSF , P 62.35 s, S 98.3 s, 287.6 km
Location of event 2019-09-19T11:15:30.600000Z
From bulletin: Lat 62.87 Lon 28.46 1.6LHEL
Calculated: Lat 62.94 Lon 28.28

```

Kuva 8. Esimerkkialgoritmilla (Liite 5.1.) lasketut P- ja S-aaltojen suhteelliset saapumisajankohdat neljälle eri asemalle ja karkea arvio episentrin sijainnin koordinaateista. Saapumisajat ovat suhteessa ajankohtaan 10 sekuntia ennen ilmoitettua tapahtuma-ajankohtaa (2019-09-19T11:15:30.600000Z UTC).



Kuva 9. P- ja S-faasiin saapumisajat merkittynä OUL-aseman (Oulu) seismogrammiin. Saapumisajat ovat suhteessa ajankohtaan 10 sekuntia ennen ilmoitettua tapahtuma-ajankohtaa (2019-09-19T11:15:30.600000Z UTC), ja ovat P-aallolle 53,45 sekuntia ja S-aallolle 86,3 sekuntia. Seismogrammin data on suodatettu taajuuskaistalle 3Hz- 9,5Hz.

Seuraavaksi tarkasteltava Suomessa sijainnut seisminen tapahtuma on Helsingin yliopiston Seismologian instituutin tarkistama, ja sen paikallinen ilmoitettu magnitudi on 1,6. Tässä tapauksessa asetin algoritmin suodattamaan kaikki ladatut seismogrammit taajuusalueelle 3Hz-9,5Hz. Kuvassa 8 näkyvät paikannusalgoritmin laskemat faasien saapumisajat neljälle eri asemalle, ja lisäksi algoritmin laskemat koordinaatit tapahtumalle. Kuvassa 9 on OUL-aseman seismogrammi, johon on merkitty faasien saapumisajat.

#### 4.5.2. Seismisten tapahtumien paikantaminen Pyhäsalmen alueelta

Pyhäsalmen kaivosalueelta on paljon seismisiä havaintoja kaivoksen toiminta-ajalta. Tässä esimerkissä käytän esimerkiohjelmaa (Liite 5.1.) lähellä Pyhäsalmen kaivosaluetta esiintyneiden seismisten tapahtumien paikantamiseen. Ohjelma käyttää valmiita havaintotietoja määrittämään ajankohdat, joiden perusteella seismogrammit ladataan datakeskuksesta. Mukaan otetut vuoden 2017 touko-, kesä- ja elokuun tarkistettut automaattiset havainnot löytyvät Helsingin yliopiston Seismologian instituutin internet-sivustolta (Helsingin yliopisto. 2020).

OUL- ja MSF-asemien seismogrammit on suodatettu taajuuskaistalla 5Hz-9,8Hz, ja muille asemille on käytetty taajuuskaistaa 4Hz-15Hz. Monelta seismogrammilta tulee väärä arvio saapumisajoista, koska tarkasteltavien seismisten tapahtumien magnitudit ovat niin pieniä, että saapuvien aaltojen signaalit helposti peittyvät kohinan alle.

Seuraava lista vertailee kehittäessäni ohjelman seismisille tapahtumille laskemia koordinaatteja Seismologian instituutin valmiista bulletiineista saatuihin koordinaatteihin. Poiminta-algoritmin parametrit voisivat todennäköisesti olla paremmin asetettu, vaikka analysoidavien tapahtumien magnitudit ovatkin niin pieniä, että edes suurin piirteiden virheettömien poimintojen tekeminen on joka tapauksessa haastavaa tämänlaiselle yksinkertaiselle karkeita arvioita antavalle paikannusmenetelmälle. Ohjelma käyttää episentriäisyyksien laskemiseen kaavaa 2.

Location of event 2017-05-02T18:56:00.200000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.02 1.4LHEL

Calculated: Lat 66.05 Lon 22.95

Location of event 2017-05-05T18:54:16.500000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.09 1.1LHEL

Calculated: Lat 62.83 Lon 26.61

Location of event 2017-05-10T18:59:03.200000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.06 1.3LHEL

Calculated: Lat 63.75 Lon 26.18

Location of event 2017-05-15T19:04:23.700000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.07 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.53 Lon 25.19

Location of event 2017-05-16T18:56:51.400000Z

From bulletin: Lat 63.66 Lon 26.06 0.9LHEL

Calculated: Lat 64.52 Lon 25.85

Location of event 2017-05-17T18:56:12.600000Z

From bulletin: Lat 63.63 Lon 26.06 0.9LHEL

Calculated: Lat 63.16 Lon 26.29

Location of event 2017-05-19T18:43:56.700000Z

From bulletin: Lat 63.68 Lon 26.11 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.72 Lon 26.24

Location of event 2017-05-23T18:43:31.100000Z

From bulletin: Lat 63.67 Lon 26.12 1.3LHEL

Calculated: Lat 63.2 Lon 26.54

Location of event 2017-05-25T18:53:49.100000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.06 1.3LHEL

Calculated: Lat 62.84 Lon 25.01

Location of event 2017-05-25T18:55:42.700000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.03 1.3LHEL

Calculated: Lat 63.61 Lon 27.2

Location of event 2017-05-29T18:55:40.400000Z

From bulletin: Lat 63.66 Lon 26.05 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.44 Lon 25.74

Location of event 2017-05-31T18:56:27.000000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.09 1.5LHEL

Calculated: Lat 63.85 Lon 25.65

Location of event 2017-06-02T12:07:04.700000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.14 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.82 Lon 28.49

Location of event 2017-06-02T19:03:11.900000Z

From bulletin: Lat 63.62 Lon 26.11 1.3LHEL



Calculated: Lat 63.23 Lon 26.16

Location of event 2017-06-07T18:58:28.300000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.1 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.46 Lon 25.89

Location of event 2017-06-08T08:05:34.700000Z

From bulletin: Lat 63.67 Lon 26.48 1.0LHEL

Calculated: Lat 63.4 Lon 24.22

Location of event 2017-06-09T18:46:10.000000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.04 1.2LHEL

Calculated: Lat 64.3 Lon 25.66

Location of event 2017-06-15T18:53:35.100000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.09 1.2LHEL

Calculated: Lat 63.39 Lon 25.42

Location of event 2017-06-19T18:59:11.300000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.07 1.2LHEL

Calculated: Lat 64.76 Lon 23.33

Location of event 2017-06-28T18:46:45.700000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.07 1.2LHEL

Calculated: Lat 63.48 Lon 26.68

Location of event 2017-06-29T14:17:50.200000Z

From bulletin: Lat 63.45 Lon 26.38 1.2LHEL

Calculated: Lat 64.18 Lon 27.13

Location of event 2017-06-29T18:52:44.300000Z

From bulletin: Lat 63.68 Lon 26.06 1.0LHEL

Calculated: Lat 63.15 Lon 25.15

Location of event 2017-06-30T12:00:50.500000Z

From bulletin: Lat 63.66 Lon 26.16 1.0LHEL

Calculated: Lat 62.91 Lon 24.64

Location of event 2017-06-30T18:43:45.000000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.06 1.3LHEL

Calculated: Lat 64.38 Lon 25.21

Location of event 2017-08-01T18:58:41.200000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.09 1.4LHEL

Calculated: Lat 63.28 Lon 24.71

Location of event 2017-08-02T19:00:51.100000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.07 1.2LHEL

Calculated: Lat 63.52 Lon 26.13

Location of event 2017-08-03T18:55:52.600000Z

From bulletin: Lat 63.67 Lon 26.02 1.2LHEL

Calculated: Lat 61.89 Lon 26.52

Location of event 2017-08-04T18:50:22.000000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.09 1.4LHEL

Calculated: Lat 63.79 Lon 25.8

Location of event 2017-08-06T10:49:13.800000Z

From bulletin: Lat 63.69 Lon 25.98 1.3LHEL

Calculated: Lat 63.77 Lon 25.87

Location of event 2017-08-09T18:50:52.800000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.09 1.2LHEL

Calculated: Lat 64.02 Lon 25.98

Location of event 2017-08-10T18:44:23.100000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.11 1.4LHEL

Calculated: Lat 63.42 Lon 25.25

Location of event 2017-08-11T18:41:07.200000Z

From bulletin: Lat 63.64 Lon 26.1 1.2LHEL

Calculated: Lat 63.5 Lon 25.63

Location of event 2017-08-14T18:56:21.000000Z

From bulletin: Lat 63.66 Lon 26.06 1.3LHEL

Calculated: Lat 63.74 Lon 26.35

Location of event 2017-08-18T08:26:48.400000Z

From bulletin: Lat 63.66 Lon 25.22 1.3LHEL

Calculated: Lat 63.49 Lon 23.31

Location of event 2017-08-18T11:56:18.500000Z

From bulletin: Lat 63.63 Lon 26.08 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.41 Lon 25.51

Location of event 2017-08-21T18:54:12.800000Z

From bulletin: Lat 63.65 Lon 26.07 1.4LHEL

Calculated: Lat 63.78 Lon 25.89

Location of event 2017-08-22T07:39:42.300000Z

From bulletin: Lat 63.37 Lon 25.66 1.1LHEL

Calculated: Lat 62.82 Lon 27.33

Location of event 2017-08-22T18:36:58.000000Z

From bulletin: Lat 63.63 Lon 26.07 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.42 Lon 26.23

Location of event 2017-08-23T19:00:57.400000Z

From bulletin: Lat 63.63 Lon 26.06 1.4LHEL

Calculated: Lat 63.74 Lon 25.93

Location of event 2017-08-30T19:01:52.600000Z

From bulletin: Lat 63.63 Lon 26.09 1.1LHEL

Calculated: Lat 63.2 Lon 25.68

Bad picks: 41

## 5. Liitteet

Seuraava ohjelmakoodi on kirjoittamani esimerkkiohjelma, jolla saadaan karkeat arviot episentrien sijainneista kolmen tai useamman aseman tallenteista. Ohjelma käyttää ObsPyn AR-AIC+STA/LTA-algoritmia faasien poimimiseen. Ohjelman testauksessa käytin Python-versiota 3.7 ja ObsPy-versiota 1.1.1.

### 5.1. Yksinkertainen paikannusalgorithmi seismisten tapahtumien paikantamiseen

```
*****Faasien poiminta*****
```

```
import numpy as np
```

```

import obspy.signal
from obspy.signal.trigger import ar_pick
from obspy.geodetics.base import gps2dist_azimuth, kilometers2degrees, locations2degrees
from obspy.clients.fdsn import Client
from obspy import UTCDateTime

client = Client("GFZ")
settings = np.loadtxt("settings.txt", comments="#", delimiter=",", unpack=False)
print(settings)
a = 0.8165
b = 0.5774
points = [[1, 0], [a, b], [b, a], [0, 1], [-b, a], [-a, b], [-1, 0], [-a, -b], [-b, -a], [0, -1], [b, -a], [a, -b]]
c_means = []
stations = []
false_picks = 0
stations.append(["FN", "OUL", "BH*", 5.0, 9.8, 2, 0, 1, 65.0853, 25.8964, 0])
stations.append(["HE", "VAF", "HH*", 4.0, 16.0, 0, 2, 1, 63.0471, 22.6683, 1])
stations.append(["HE", "KAF", "HH*", 4.0, 16.0, 0, 2, 1, 62.1115, 26.3061, 2])
stations.append(["HE", "JOF", "HH*", 4.0, 16.0, 0, 2, 1, 62.9187, 31.3092, 3])
stations.append(["FN", "MSF", "BH*", 5.0, 9.8, 2, 0, 1, 65.9113, 29.0402, 4])
f = open("detections.txt", "r")

for line in f:
    tc = line.split()
    if len(tc) < 6 or float(tc[4]) < settings[2] or float(tc[4]) > settings[3] or float(tc[5]) < settings[0] or
float(tc[5]) > settings[1]:
        continue
    t = UTCDateTime(tc[0] + "-" + tc[1] + "-" + tc[2] + "-" + tc[3])
    print("UTC time, bulletin:", t, tc[6])
    lat1 = float(tc[4])
    lon1 = float(tc[5])

```

```

epd = []

for i in stations:
    st = client.get_waveforms(i[0], i[1], "*", i[2], t - 24, t + 60 * 4)
    st.filter("bandpass", freqmin = i[3], freqmax = i[4], corners = 2, zerophase = True)
    st.trim(t - 20, t + 200)
    df = st[i[5]].stats.sampling_rate
    z = st[i[5]].data
    n = st[i[6]].data
    e = st[i[7]].data
    p_pick, s_pick = ar_pick(z, n, e, df, i[3], i[4], 10.0, 0.4, 8.0, 1.2, 4, 8, 0.5, 1.3)
    #Karkea arvio hyposentrietäisyydelle saadaan kaavalla
    d = (s_pick - p_pick) * 8.5 #km
    #Aseman ja ilmoitetun episentrin sijainnin välinen etäisyys
    dist, az1, az2 = gps2dist_azimuth(i[8], i[9], lat1, lon1)
    d_b = round(dist/1000, 2)
    if abs(d - d_b) / d_b > 0.25:
        false_picks += 1
    print("Epicentral distance calculated from bulletin coordinates:", d_b, "km")
    print(i[1], ", P", round(p_pick, 2), "s, S", round(s_pick, 2), "s, ", round(d, 2),
"km")
    #st.plot(type = 'relative')
    epd.append([i[1], d, i[8], i[9], i[10]])

#Paikantaminen
iterating = False
k = 1
iterations = [1, 2, 3, 4, 5]
c_trials = []
for i in epd:
    c_trials.append([i[2], i[3]])

```

for l in iterations:

for j in epd:

res1 = 180

res2 = 180

p\_lat1 = 0

p\_lat2 = 0

p\_lon1 = 0

p\_lon2 = 0

res1\_votes = 0

res2\_votes = 0

for i in points:

p\_lat = c\_trials[j[4]][0] + i[0] \* kilometers2degrees(j[1]) \* k

p\_lon = c\_trials[j[4]][1] + i[1] \* kilometers2degrees(j[1]) / np.cos(c\_trials[j[4]][0] / 360 \* 2 \* np.pi) \* k

for j2 in epd:

if j[4] == j2[4]:

continue

res\_j\_j2 = abs(locations2degrees(p\_lat, p\_lon, j2[2], j2[3]) - kilometers2degrees(j2[1]))

if res\_j\_j2 < res2 and res\_j\_j2 < res1:

res2 = res1

p\_lat2 = p\_lat1

p\_lon2 = p\_lon1

res1 = res\_j\_j2

p\_lat1 = p\_lat

p\_lon1 = p\_lon

else:

if res\_j\_j2 < res2 and res\_j\_j2 >= res1:

res2 = res\_j\_j2

p\_lat2 = p\_lat

p\_lon2 = p\_lon

break

```

for i in epd:
    if i[4] == 0 or i[4] == j[4] or (i[4] == 1 and j[4] == 0):
        continue

    if abs(locations2degrees(p_lat1, p_lon1, i[2], i[3]) - kilometers2degrees(i[1])) <=
abs(locations2degrees(p_lat2, p_lon2, i[2], i[3]) - kilometers2degrees(i[1])):
        res1_votes += 1
    else:
        res2_votes += 1
    if res1_votes >= res2_votes:
        c_trials[j[4]][0] = p_lat1
        c_trials[j[4]][1] = p_lon1
    else:
        c_trials[j[4]][0] = p_lat2
        c_trials[j[4]][1] = p_lon2

lat_mean = 0
lon_mean = 0
for i in c_trials:
    lat_mean += i[0]
    lon_mean += i[1]
lat_mean = lat_mean / len(c_trials)
lon_mean = lon_mean / len(c_trials)

if iterating == False:
    iterating = True
    k = k / 6
else:
    k = k / 2

c_means.append([lat_mean, lon_mean, t, lat1, lon1, tc[6]])

```

```

for i in c_means:
    print("Location of event", i[2])
    print("From bulletin: Lat", round(i[3], 2), "Lon", round(i[4], 2), i[5])
    print("Calculated: Lat", round(i[0], 2), "Lon", round(i[1], 2))
print("Bad picks:", false_picks)
f.close()

#*****settings.txt*****
#Leveys- ja pituusastearvot, joilla rajataan sijainnin perusteella tutkittavat seismiset tapahtumat
25.0,27.0,63.3,64.0

#*****detections.txt*****
#Esimerkkinä muutama rivi valmiista bulletiinista kopioituja tapahtumatietoja
2017 05 01 00:43:56.8 67.863 20.081 1.1LHEL
2017 05 01 01:43:50.3 67.758 20.133 0.8LHEL
2017 05 01 02:39:47.0 67.638 33.888 1.6LHEL
2017 05 01 02:43:00.4 67.625 33.811 1.7LHEL
2017 05 01 03:41:37.3 69.354 30.844 1.0LHEL
2017 05 01 03:42:44.8 67.583 33.932 1.4LHEL
2017 05 01 04:33:16.9 69.341 30.615 1.0LHEL
2017 05 01 06:54:31.9 67.836 20.280 1.0LHEL
2017 05 01 10:06:06.1 67.617 33.834 1.3LHEL

```

## 6. Yhteenveto

Seismogrammien ja seismisen datan sisältämän informaation hyödyntäminen on tutkimusala, jossa on viime vuosikymmeninä ja myös viime vuosina tapahtunut kehitystä laajalti. Kun kehitetään yhä tarkempia menetelmiä ja algoritmeja seismisten aaltojen syntymisen ja liikkeiden määrittämiseen ja laskemiseen, lisääntyvät myös mahdolliset sovelluskohteet ja käyttöarvo sekä uusille että jo kauan käytössä olleille datankäsittelytekniikoille.

ObsPy on hyvä esimerkki yhtenä monista suosiota saaneista eri ohjelmistoista, jotka ovat nykyään käytössä seismologisessa tutkimuksessa ja observatoriotoiminnassa. Vaikka tässä tutkielmassa käytin vain pientä osaa ObsPy-kirjastojen seismologeille Python-ohjelmointiin tarjoamia välineitä, ObsPy-



projekti on selkeä ja monipuolinen kokonaisuus, joka sopii seismologisen datankäsittelyn perustarpeisiin moneen eri tilanteeseen. Yksinkertaiset sovellukset on helppo tehdä, ja monimutkaiset tai tieteellisiä matemaattisia kirjastoja hyödyntävät laajat sovellukset on myös mahdollista kirjoittaa hyödyntäen ObsPyn työkaluja oleellisena osana ohjelmaa. On olemassa paljon muitakin ohjelmistoja seismologisen datan käsittelyyn, mutta ObsPy on Python-kieltä käyttämään tottuneelle hyvä vaihtoehto, ja mahdollisesti tulevaisuudessa vielä vahvemmin ObsPyn laajentuessa ja kehittyessä.

## 7. Lähteet

- Akazawa T. (2004) A Technique for Automatic Detection of Onset Time of P-and S-Phases in Strong Motion Records. Proc. of the 13th World Conf. on Earthquake Engineering.
- Allen RV. (1978) Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bulletin of the Seismological Society of America 68(5): 1521-1532.
- Baer M & Kradolfer U. (1987) An automatic phase picker for local and teleseismic events. Bulletin of the Seismological Society of America 77(4): 1437-1445.
- Baillard C, Crawford WC, Ballu V, Hibert C & Mangeney A. (2014) An Automatic Kurtosis-Based P- and S-Phase Picker Designed for Local Seismic Networks. Bulletin of the Seismological Society of America 104(1): 394-409.
- Beyreuther M, Barsch R, Krischer L, Megies T, Behr Y & Wassermann J. (2010) ObsPy: A Python toolbox for seismology. Seismol Res Lett 81(3): 530-533.
- Bormann Peter, Klinge Klaus & Wendt Siegfried. (2012) Chapter 11: Data Analysis and Seismogram Interpretation. In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksa: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-126.
- Bormann Peter & Wendt Siegfried. (2012a) EX 11.1: Estimating the Epicenters of Local and Regional Seismic Sources, using the Circle and Chord Method. In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksa: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-14.
- Bormann Peter & Wendt Siegfried. (2012b) EX 11.2: Earthquake Location at Teleseismic Distances from 3-Component Records. In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksa: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-18.
- Florez MA & Prieto GA. (2017) Precise relative earthquake depth determination using array processing techniques. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 122(6): 4559-4571.
- Havskov J, Bormann P & Schweitzer J. (2012) Information Sheet 11.1: Seismic Source Location . In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksa: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-36.

- Havskov J, Ottemöller L, Trnkoczy A & Bormann P. (2012) Chapter 8: Seismic Networks. In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2). Saksä: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-65.
- Helsingin yliopisto. (2020) SEISMOLOGIAN INSTITUUTTI - Seismiset raportit. 2020.
- Kortström J, Tiira T & Kaisko O. (2016) Automatic data processing and analysis system for monitoring region around a planned nuclear power plant. *Advances in Geosciences* 41: 73-81.
- Krischer L, Megies T, Barsch R, Beyreuther M, Lecocq T, Caudron C & Wassermann J. (2015) ObsPy: A bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Computational Science & Discovery* 8(1): 014003.
- Küperkoch L, Meier T & Diehl T. (2012) Chapter 16: Automated Event and Phase Identification . In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksä: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-52.
- Lauterjung J, Rudloff A, Münch U & Acksel DJ. (2014) The Earthquake and Tsunami Early Warning System for the Indian Ocean (GITEWS). In: Anonymous Early Warning for Geological Disasters. : Springer: 165-178.
- Megies T, Beyreuther M, Barsch R, Krischer L & Wassermann J. (2011) ObsPy–What can it do for data centers and observatories? *Annals of Geophysics* 54(1): 47-58.
- ObsPy Development Team. (2008) (<https://docs.obspy.org/>). 2020.
- Schweitzer J. (2001) HYPOSAT–An enhanced routine to locate seismic events. *Pure Appl Geophys* 158(1-2): 277-289.
- Schweitzer J, Fyen J, Mykkeltveit S, Gibbons SJ, Myrto P, Kühn D & Kværna T. (2012) Chapter 9: Seismic Arrays. In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksä: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1-80.
- Sleeman R & Van Eck T. (1999) Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Phys Earth Planet Inter* 113(1-4): 265-275.
- US Dept of Commerce / NOAA / NWS. (2009) Pacific Tsunami Warning Center. 2020.
- Waldhauser F & Ellsworth WL. (2000) A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90(6): 1353-1368.
- Wielandt Erhard. (2012) Chapter 5: Seismic Sensors and their Calibration. In: Bormann Peter (ed) New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Saksä: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 4-12.