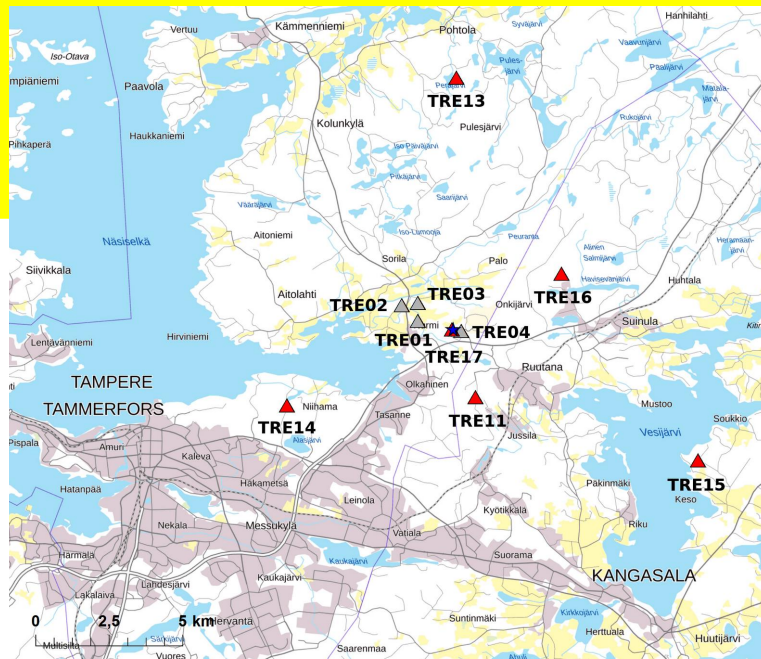


TUIJA LUHTA, KATI OINONEN, JARI KORTSTRÖM,
TOMMI VUORINEN, PIRITA SEIPÄJÄRVI, MINTTU
PEKKALA, TONI VEIKKOLAINEN, PASI LINDBLOM JA
TIMO TIIRA

TAMMEROIMAN GEOTERMISEN VOIMALAN SEISMISEN MONITOROINTI 2021



Kansi: Tarastenjärven voimalan seisminen valvontaverkko.

Cover: Tarastenjärvi power plant seismic monitoring network

Seismologian instituutin raportti T-105

Päätoimittaja Timo Tiira

Julkaisija Seismologian instituutti
PL 68 (Pietari Kalmin katu 5)
00014 Helsingin yliopisto

Puh. +358 2941 51600

www.seismo.helsinki.fi

ISSN 0781-9579

ISBN 978-952-10-9606-8

<http://hdl.handle.net/10138/341388>

Helsinki 2022

Seismologian instituutti
Helsingin yliopisto
Raportti T-105

TAMMERVOIMAN GEOTERMISEN VOIMALAN SEISMINEN MONITOROINTI 2021

TUIJA LUHTA, KATI OINONEN, JARI KORTSTRÖM, TOMMI
VUORINEN, PIRITA SEIPÄJÄRVI, MINTTU PEKKALA, TONI
VEIKKOLAINEN, PASI LINDBLOM JA TIMO TIIRA

Seismologian instituutti
Geotieteiden ja maantieteen osasto
Helsingin yliopisto
Helsinki, Suomi

Tiivistelmä

Tampereen Tarastenjärvellä, Tammervoiman hyötyvoimalaitoksen pihalla aloitettiin kesällä 2021 syvän geotermisen lämpökaivon poraukset. Rakenteilla oleva kaivo on pilottiprojekti, jossa Tampereen Sähkölaitoksen ja Tammervoiman lisäksi on mukana 15:stä energia-alan suomalaisesta kaupunkiyhtiöstä koostuva Kaupunkilämpö-konsortio. Hankkeen operaattorina ja päätoteuttajana toimii Thermo Rock Oy. Ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena on saavuttaa kolmen kilometrin poraussyvyys.

Seismologian instituutti asensi projektin seismistä valvontaa varten yhden reaaliaikaisesti dataa lähettävän laajakaistaseismometrin sekä kuuden geofonin asemaverkon. Reaaliaikainen seisminen valvonta toteutettiin osana Seismologian intituutin tekemää kansallista seismistä monitorointia. Mahdollisten havaittujen maanjäristysten varalta oli sovittu nopeasta viestinnästä sekä projektin toteuttajille että projektia valvoville viranomaisille. Tarastenjärven lähialueen tapauksia analysoitiin tarkemmin jälkikäteen. Jälkianalyyssissä käytettiin reaaliaikaisen aineiston lisäksi kuudelta geofoniasemalta valvontajakson lopuksi noudettua aineistoa.

Kahdenkymmenen kilometrin säteellä Tarastenjärven voimalaitoksesta havaittiin ja paikannettiin 90 seismistä tapausta vuoden 2021 ajalta. Kaikki olivat räjäytyksiä louhoksilta tai rakennustyömailta. Tapauksista 50 havaittiin ja analysoitiin osana kansallista seismistä valvontaa. Näiden tapausten magnitudit olivat 0,1:n ja 1,3:n välillä mediaanin ollessa 0,7. Tarastenjärven valvontajakson 18.5.-31.11.2021 aikana päivittäisanalyyssissä havaittiin 40 pientä tapausta, jotka pystyttiin luokittelemaan räjäytyksiksi ja paikannettiin myöhemmin geofoniasemilta saadun lisäaineiston avulla. Näiden tapausten magnitudit olivat -0,7:n ja 1,3:n välillä mediaanin ollessa 0,1. Geofonidatalle jälkikäteen ajettulla automaattisella detektorilla ei löydetty enempää tapauksia aivan Tarastenjärven voimalaitoksen läheisyydestä.

Abstract

In summer 2021 Tampereen Sähkölaitos and Tammervoma started drilling a deep geothermal well as a pilot project on the Tarastenjärvi power plant premises in Tampere. In addition to local companies the Kaupunkilämpö consortium of 15 urban energy companies from Finland is involved in the project. Main operator is Thermo Rock Oy. In the first phase of the project, the goal is to reach three kilometers depth.

For seismic monitoring of the project Institute of Seismology University of Helsinki installed a network consisting of one real-time broad-band seismic station and six geophone stations. Real-time seismic monitoring of Tarastenjärvi area was incorporated into the institute's national seismic monitoring. A procedure for fast communication to the operators and authorities monitoring the project was established in case of observed earthquakes.

Within 20 kilometers from the Tarastenjärvi power plant 90 seismic events were detected and localized from the year 2021 seismic data. All were explosions from quarries or construction sites. Fifty events were detected and analysed as a part of national seismic monitoring. Magnitudes of those events were between 0.1 and 1.3 with a median of 0.7. During the project's monitoring period from May 18th to November 31st forty additional small events were detected and later analysed with data from the geophone network. Magnitudes of these events were between -0.7 and 1.3 with a median of 0.1. An automatic detector applied to geophone data revealed even more small events but no earthquakes, and none of the events were in the immediate proximity of the Tarastenjärvi power plant.

Sisältö

1. Johdanto.....	1
2. Asemaverkon suunnittelu.....	2
3. Laajakaista-asetat.....	3
4. Geofoniasemat.....	9
5. Seismiset havainnot Tarastenjärven läheisyydessä.....	11
Lähteet.....	15

1. Johdanto

Keväällä 2021 Tampereen Sähkölaitos ja Helsingin yliopiston Seismologian instituutti sopivat Tammervoiman Tarastenjärven hyötyvoimalaitoksen yhteyteen rakennettavan geolämpövoimalan porauksen aikaisesta seismisestä valvonnasta. Sopimus koski ensimmäistä vaihetta, jossa porattaisiin korkeintaan kolmen kilometrin syvyyteen.

Geotermisen lämpökaivon poraamisen aikana kallioperään pumpataan vettä. Tämä saattaa muuttaa jännitystilaa kallioperässä. Jännitystilan muutokset sekä lämpökaivosta mahdollisesti kallion rakoihin karkaava vesi voivat aiheuttaa indusoituja, eli ihmisen aiheuttamia, maanjäristyksiä. Mahdollista seismisen riskin kohoamista valvotaan seuraamalla seismisyyden muutoksia alueella (Uski ym. 2018).

Tampereen Sähkölaitoksen ja Seismologian instituutin välinen sopimus Tammervoiman geotermisen voimalan seismisestä monitoroinnista allekirjoitettiin huhtikuussa 2021. Sopimuksen voimassaoloaika jatkettiin myöhemmiin kattamaan koko porausaika eli marraskuun 2021 loppuun. Sopimukseen kuului Suomen kansallista asemaverkkoa täydentävän paikallisen verkon suunnittelu ja toteutus, seismisyyden reaaliaikainen seuranta, jälkikäteen tehtävä tarkempi seismisten tapausten etsintä ja analyysi sekä valvonnan raportointi. Merkittävistä seismisistä tapauksista Tarastenjärven läheisyydessä ($M > 1,5$) ilmoitettaisiin välittömästi etukäteen sovituille tahoille (Tampereen Sähkölaitos, Tammervoima, Tampereen ja Kangasalan kunnat).

Tammervoiman Tarastenjärven lämpökaivo on pilottiprojekti, jossa Tampereen Sähkölaitoksen ja Tammervoiman lisäksi on mukana viidestätoista energia-alan suomalaisesta kaupunkiyhtiöstä koostuva Kaupunkilämpö-konsortio. Tampereen hankkeen operaattorina ja päätoteuttajana toimii Thermo Rock Oy. Geotermisen lämmön kaukolämpökäytön lisäksi projektissa testataan HanJin D&B yhtiön kehittämän vesivasarateknologian soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Lämpökaivo toteutetaan yhden reiän tekniikalla. Reikä betonoidaan 600 metrin syvyyteen. Tavoitteena on ensimmäisessä vaiheessa kolmen kilometrin syvyys, jonka jälkeen arvioidaan jatketaanko noin seitsemään kilometriin asti (Sähkölaitos, 2021).

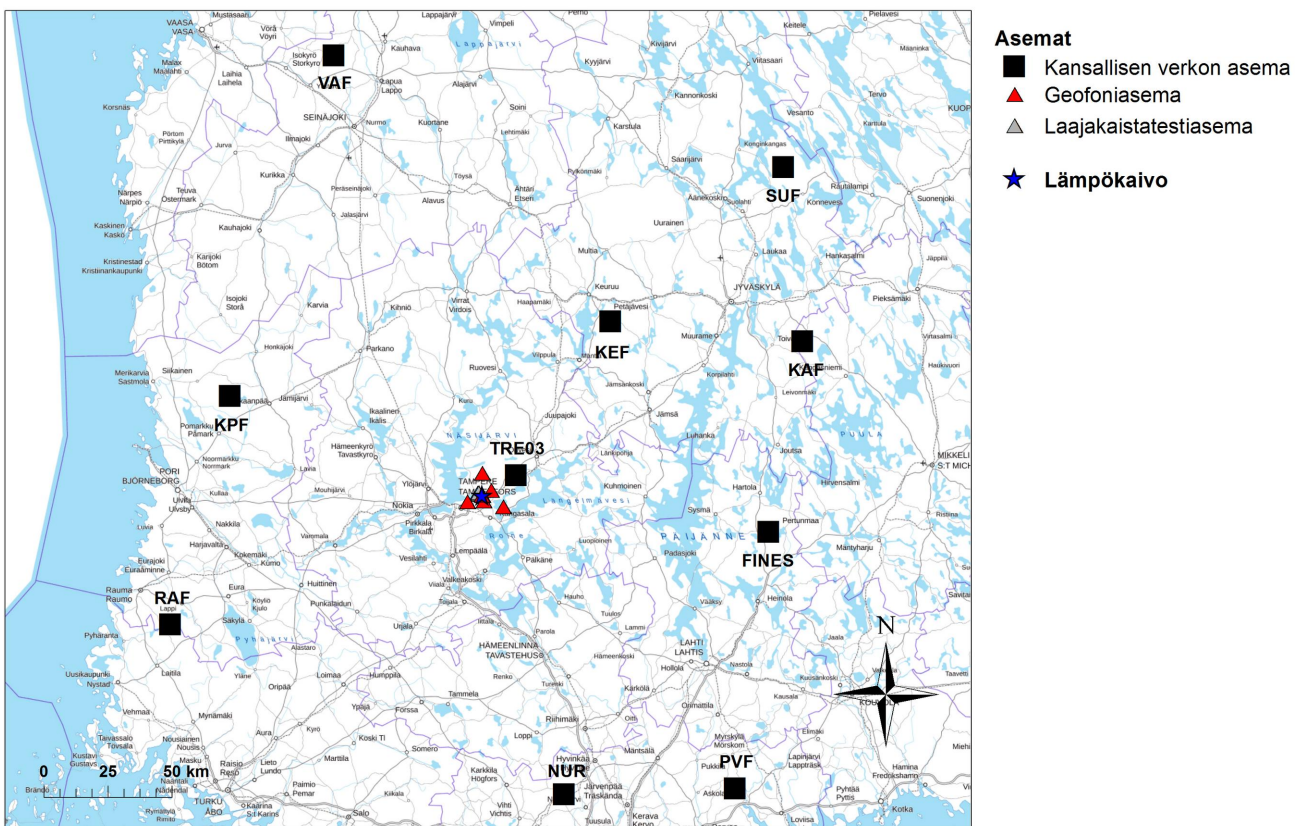
Seismiset asemat asennettiin maastoon 27.-29.4. Taustaseismisyyttä voitiin mitata tästä alkaen tarkemmin kuin pelkällä kansallisella verkolla. Tarasteenjärven lähialueen tarkempi seuranta aloitettiin 18.5. Reaaliaikainen valvontajärjestelmä oli valmis 8.6. Poraus aloitettiin 15.6. Poraus keskeytettiin talven ajaksi lauantai-aiamuna 27.11. 2110 metrin poraussyvytydessä (Kaupunkilämpö 2021). Valvontaa jatkettiin 1.12. asti. Tammervoimalta saatujen tietojen mukaan kallio on ollut lähes koko porauksen ajan kovaa, eheää mustaa graniittia. Kaksi ruhjetta on jouduttu betonoimaan ja suojaputkittamaan ensimmäisen 50 metrin matkalla. Porausvettä ei ole jouduttu lisäämään, joten sitä ei ole karannut poranreiän ympäristöön (Pekkinen, 2021).

Tässä raportissa kuvataan seisminen valvontaverkko, kerätyn aineiston avulla tehdyn valvonnan suorituskyky, Tarastenjärven alueen taustaseismisyys sekä mittausjaksolla havaitut seismiset tapaukset.

2. Asemaverkon suunnittelu

Asemaverkon suunnittelussa huomioitiin sekä mittausgeometria, että mittauslaitteiden vaatimat ympäristöolosuhteet.

Seismiset tapaukset paikantuvat tarkimmin silloin, kun ne sattuvat havaintoverkon sisällä. Tästä syystä asemaverkko suunniteltiin ympäröimään Tarastenjärven voimalaitoksen alue mahdollisimman tasaisesti. Reaaliaikaisesti dataa lähettävä asema haluttiin mahdollisimman lähelle voimalaitosta, jotta siinä näkyisivät myös pienet tapaukset. Tapausten analysoinnissa tulisivat olemaan väli aikaisten asemien lisäksi apuna myös Seismologian instituutin kansallisen verkon asemat, joista Tampereelta lähimmät sijaitsivat Keuruulla, Kankaanpäässä, Laitilassa, Sysmässä ja Nurmijärvellä (kuva 1). Keväällä 2021 asennettiin uusi asema TRE03 Orivedelle.



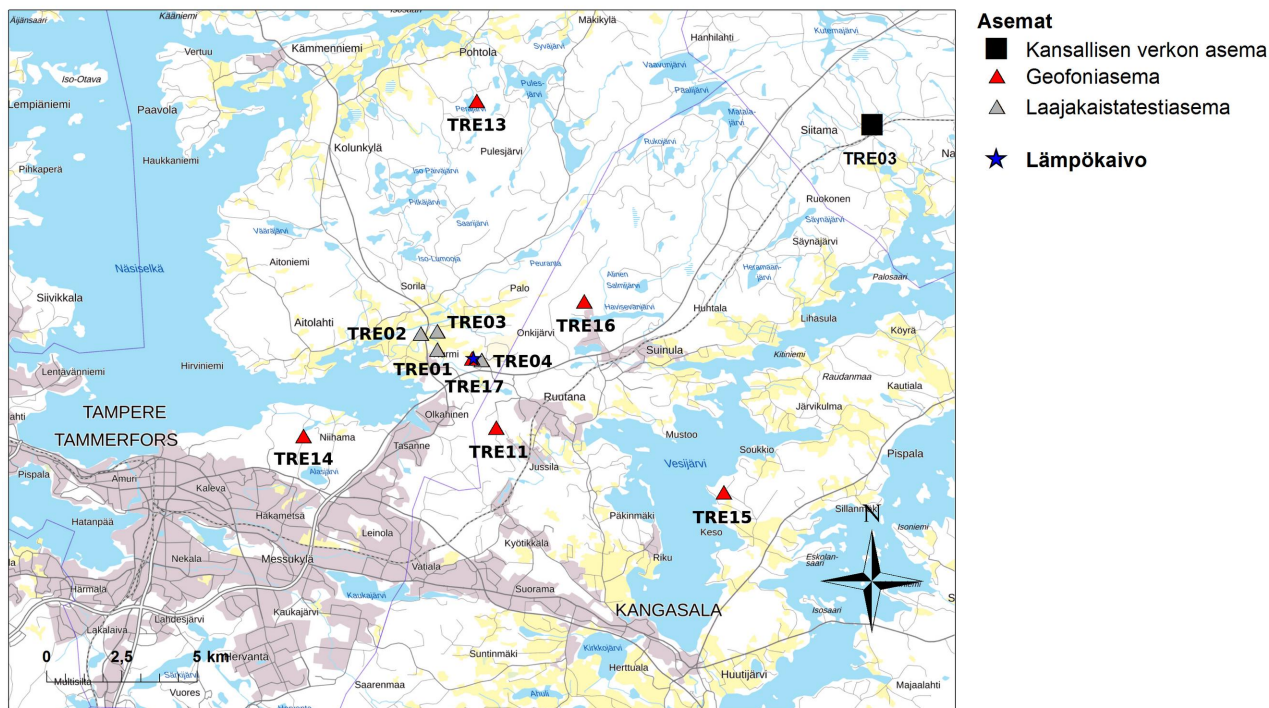
Kuva 1: Tampereelle Tarastenjärven alueen valvontaa varten asennetut seismiset asemat sekä lähimmät kansallisen verkon asemat. Tulevan lämpökaivon paikka merkitty sinisellä tähdellä.

Figure 1: Seismic stations installed to Tampere for Tarastenjärvi area seismic monitoring (red triangles: geophone stations, grey triangles: broadband station test sites) and stations of the Finnish National Seismic Network closest to Tampere (black squares). The Tarastenjärvi geothermal well is marked with a blue star.

Seismometri tulee asentaa ensisijaisesti kalliolle. Geofonit asennetaan mieluiten kivennäismaahan. Muita ympäristövaatimuksia ovat reaaliaikaisella laajakaista-asemalla mahdollisuus sähköliitännään, 4G-tiedonsiirtoon sekä GPS-yhteys. Asemien olisi hyvä sijaita mahdollisimman etäällä häiriölähteistä

kuten sähkölinjoista, isoimmista teistä, hakkuutyömaista tai suurista koneista. Kaupunkialueelta häiriöttömän asemapaikan löytäminen on haastavaa.

Karttatietojen ja satelliittikuvien perusteella etsittiin paikat kuudelle geofoniasemalle sekä reaaliaikaiselle laajakaista-asemalle neljä mahdollista paikkaa (kuva 2). Geofoneille valitut paikat osoittautuivat kelpoiksi ja asemat voitiin asentaa suunnitellusti huhtikuun lopulla. Samalla reissulla asennettiin laitteisto testimittaukseen kaikkiin neljään mahdolliseen laajakaista-aseman paikkaan.



Kuva 2: Tampereelle Tarastenjärven alueen valvontaa varten asennetut seismiset asemat sekä kansallisen verkon asema TRE03. Tulevan lämpökaivon paikka merkitty sinisellä tähdellä.

Figure 2: Seismic stations installed to Tampere for Tarastenjärvi area seismic monitoring (red triangles: geophone stations, grey triangles: broad band station test sites). The Tarastenjärvi geothermal well is marked with a blue star.

3. Laajakaista-asemat

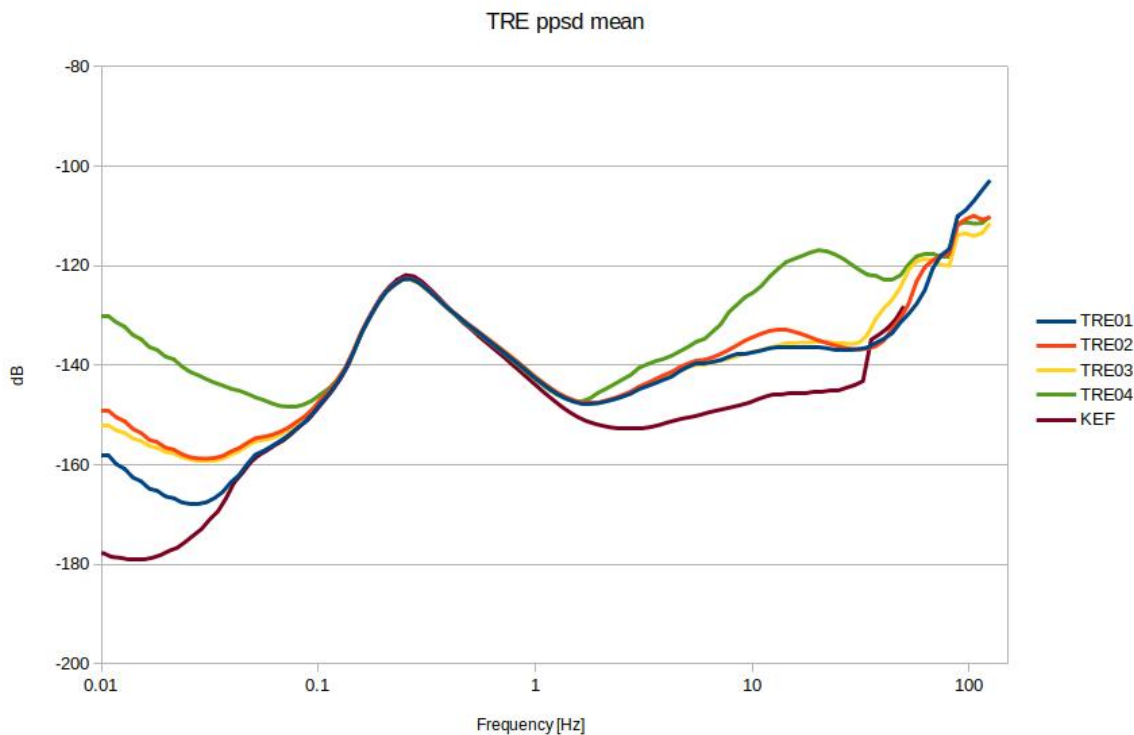
Kartta- ja maastotiedustelujen perusteella lupaavalta näyttävissä paikoissa tehtiin testimittaukset 29.4. - 9.5.2021. Testimittausten asemapaikkojen koordinaatit ovat taulukossa 1.

Kullekin mittauspaikalle laskettiin taustakohinaspektrit testiajalta. Kohinaspektrin avulla selvitetään aseman ympäristöstä peräisin oleva taustakohina. Ihmisen aiheuttamien häiriölähteiden lisäksi taustakohinaa voi aiheuttaa esimerkiksi rikkonainen kallioperä tai lähistöllä virtaava vuolas joki. Kuvassa 3 näkyvät testipaikoille lasketut signaalin tehospektrit pystysuuntaiselle Z-komponentille 30.4. - 5.5.2021. Tehospektrin keskiarvo kuvaa asemalla havaittua kohinatasoa. Asemien datan laatua arvioitaessa yli yhden hertzin taajuuksien mahdollisimman vähäinen kohinataso on tärkeää, koska pienten paikallisten tapausten signaali on selkein korkeilla taajuuksilla.

Taulukko 1: Testimittausten asemapaikat.

Table 1: Locations of the test measurement sites.

TRE01	61,543	23,946
TRE02	61,548	23,935
TRE03	61,549	23,946
TRE04	61,541	23,974



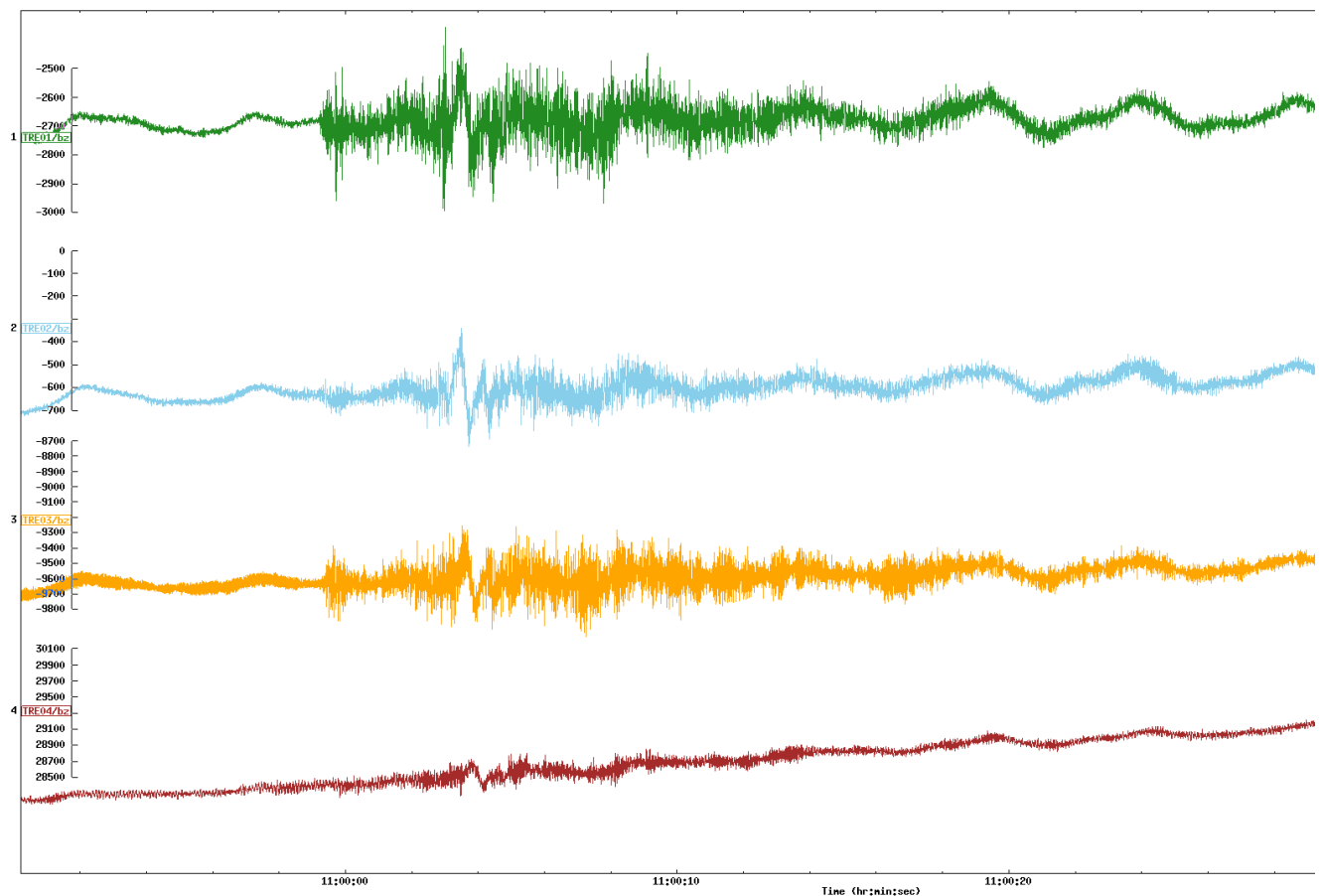
Kuva 3: Tampereen laajakaista-aseman testipaikkojen 30.4.-5.5.2021 rekisteröinneistä lasketut tehospektrin keskiarvot. Käyrät kuvaavat asemilla mitattavaa taustakohinan signaalitasoa eri mittausperiodeilla (McNamara ja Buland, 2004). Mukana vertailukohtaksi Suomen kansallisen seismisen verkon Keuruun aseman (KEF) tehospektrin keskiarvo.

Figure 3: The mean power spectral densities calculated for the test measurement sites of the Tampere broad-band station recorded 30.4.-5.5.2021. The graphs describe ambient noise level at each station (McNamara & Buland, 2004). As a reference the mean power spectral density of the Finnish National Seismic network station KEF (in Keuruu) included.

Paikka TRE01 osoittautui parhaaksi. TRE04 olisi ollut ulkoisilta puitteiltaan erinomainen paikka, selvällä kalliopaljastumalla ja sähkö saatavissa suoraan voimalaitokselta, mutta valitettavasti sen

rekisteröinneissä näkyi useita säännöllisiä häiriöitä, jotka liittyivät voimalaitoksen toimintaan. TRE04 olisi ollut vain parin sadan metrin päässä lämpökaivosta. Muut mahdolliset asemapaikat olivat kauempana. TRE01:stä voimalaitokselle matkaa on 1,3 kilometriä. Lähes seismisen tapauksen päällä olevalla asemalla voidaan määrittää tapauksen syvyys tarkasti. Koska lähimpänä lämpökaivon paikkaa oleva paikka ei soveltunut laajakaista-asemalle, asennettiin yksi geofoniasemista aivan porauspaikan tuntumaan.

Kohinapektrien lisäksi asemilta mitatun aineiston laatua tarkasteltiin myös vertaamalla lähiseudun louhosräjäytysten signaalia eri asemilla. Kuvassa 4 on esimerkki louhosräjäytyksestä noin 25 kilometriä Tarastenjärveltä lounaaseen. Myös tarkasteltujen tapausten perusteella aseman TRE01 paikka osoittautui parhaaksi.



Kuva 4: Louhosräjäytys noin 25 kilometriä Tarastenjärveltä lounaaseen. Suodattamaton z-komponentin signaali Tampereen testiasemilla.

Figure 4: Quarry explosion approximately 25 kilometers south-west from Tarastenjärvi. Unfiltered registration of z-komponent on Tampere test stations.

Testivaiheessa asemat toimivat akkuvirralla TRE04:ää lukuunottamatta, jolle saatiin virta voimalaitokselta. Alun perin kesän ajaksi suunniteltu pysyvämpi asennus laajakaista-aseman paikaksi valikoituneelle TRE01:lle virtaistettiin kahdella 90-100W aurinkopaneelilla ja kolmella 95Ah akulla.

Aseman anturi oli Nanometricsin Trillium 120PA ja digitoija saman valmistajan Taurus. Digitoija vikaantui 20.8.2021 ja saatiin vaihdettua Nanometrics Centauriin 8.9.2021. Samalla vaihdettiin aurinkosähköstä verkkovirtaan, koska oli selvinnyt, että mittauksia jatketaan marraskuun loppuun asti. Sähköt saatiin asemapaikan naapurissa olevasta talosta. Kuvassa 4 näkyy aseman TRE01 laitteisto suojissaan, anturi ennen suojausta sekä aurinkopaneelit.

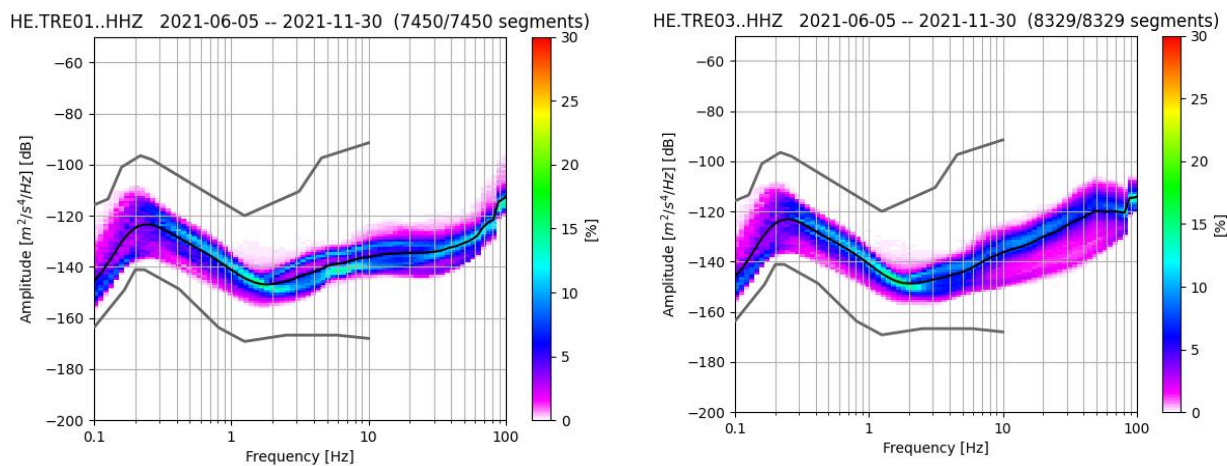


Kuva 4: Aseman TRE01 laitteisto maastossa.

Figure 4: Equipment on the station TRE01

Seismologian instituutti aloitti samaan aikaan Tarastenjärven valvontaprojektin kanssa testimittauksen Orivedellä, maanmittalaitoksen FinnRef-verkon asemalla olevalla painovoimapilarilla. Paikka näkyy kuvassa kaksi. Oriveden asema nimettiin TRE03:ksi. Koska paikka on vain 15 kilometriä Tarastenjärveltä koilliseen, toimi se valvonnan ajan Tampereen verkkoa täydentävänä asemana. Tämä osoittautui tarpeelliseksi TRE01:n digitoijan vikaannuttua elokuussa.

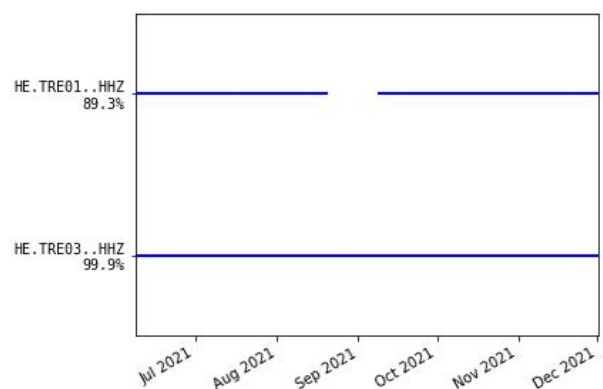
Asemien TRE01 ja TRE03 kohinatasot valvonnan ajalta näkyvät kuvassa 5. Kummankin rekisteröinnit ovat hyvälaatuisia. Näytteenottotaajuus on 250 Hz. TRE03:n kohinatasossa korkeammilla taajuuksilla on enemmän hajontaa kuin TRE01:llä ja taso kokonaisuudessaan on korkeampi. Tämä johtuu lähistöllä kulkevasta rautatiestä.



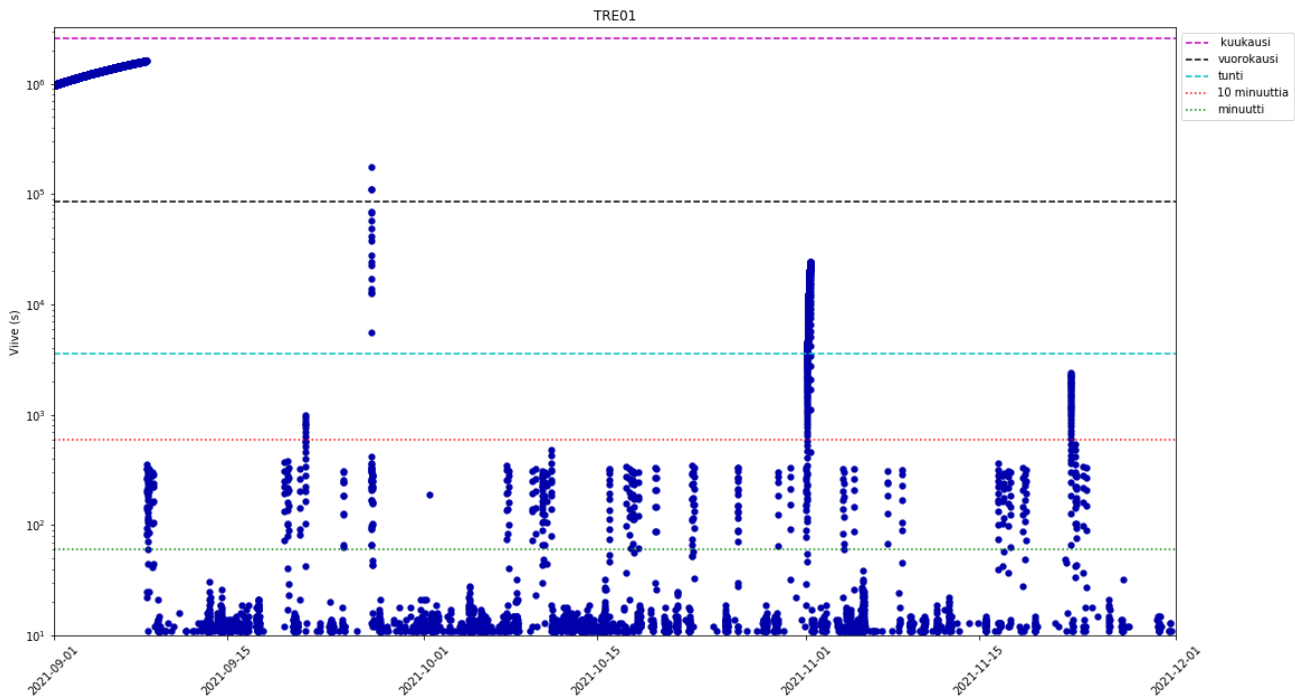
Kuva 5: Tampereen laajakaista-asemien rekisteröinneistä lasketut tehospektrin keskiarvot. Käyrät kuvaavat asemilla mitattavaa taustakohinan signaalitasoa eri mittausperiodeilla (McNamara ja Buland, 2004).

Figure 5: The mean power spectral densities calculated for the Tampere broad-band stations. The graphs describe ambient noise level at each station (McNamara & Buland, 2004).

Kuvassa 6 näkyy datan saatavuus asemilta TRE01 ja TRE03 valvontajakson aikana. Kuvissa 7 ja 8 on tiedonsiirron viive kyseisiltä asemilta. Viive kertoo, miten nopeasti aseman rekisteröinnit ovat tallentuneet Seismologian Instituutin palvelimelle Kumpulassa. Data on automaattisen detektiojärjestelmän käytettävissä vasta, kun se on saatu palvelimelle. Aloitimme viiveiden jatkuvan mittaamisen syyskuussa 2021. Aiemmin seuraisimme vain pitempiä datakatkoja ja datan kattavuutta, mutta valvonnan reaaliaikaisuuden vaatimusten kasvaessa, haluttiin tietää, kuinka nopeasti asemilla kerätty aineisto on detektorin käytössä.



Kuva 6: Datan saatavuus Tampereen asemilta .
Figure 6: Data availability from the Tampere stations.



Kuva 7: Viive aseman TRE01 datan tallentumisessa Seismologian instituutin palvelimelle verrattuna reaaliaikaan.

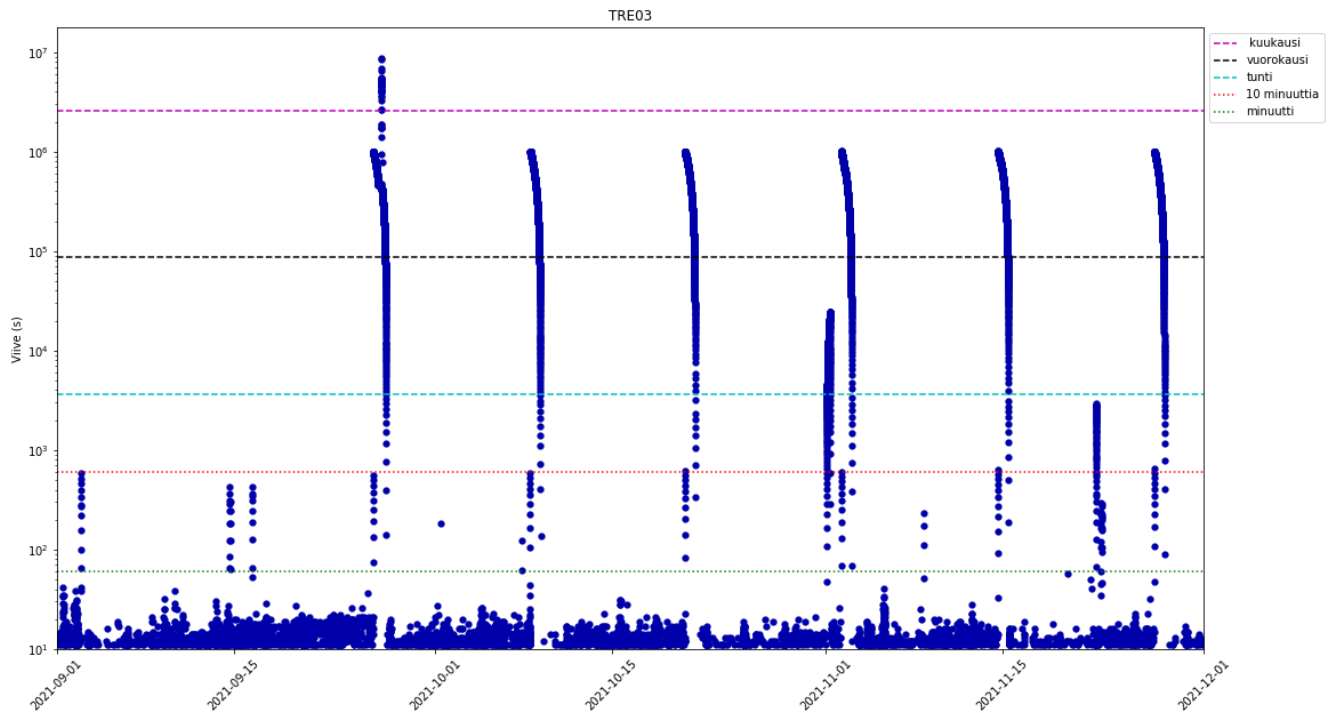
Figure 7: Delay between real-time and time when data from the station TRE01 is saved to a server at the Institute of Seismology.

Aseman TRE01 viiveissä (kuva 7) näkyy heti seurantajakson alussa laitteiston vikaantumisesta johtunut datakatko. Sen jälkeen aineisto on saatu käyttöön pääasiassa alle minuutin viiveellä reaaliajasta. Muutamia kertoja viikossa tiedonsiirto on hidastunut, mutta silloinkin data on saatu perille alle kymmenessä minuutissa. Tämänsuuruinen viive ei vielä vaikuta automaattidetektioon. Detektorit käsittelee dataa useassa eri vaiheessa. Ensimmäinen automaattidetektio seismisestä tapauksesta valmistuu yleensä noin puoli tuntia tapauksen jälkeen. Kaikkiaan aseman TRE01 datan viive on 8.9. korjatun laitevian jälkeen ollut 99 % ajasta alle 15 sekuntia.

Asemalta TRE03 data on saatu pääosin hyvin pienin viivein (kuva 8) palvelimelle. Säännölliset, kaarevat viiveet eivät ole ongelmia datanyhteyksissä, vaan Taurus-digitoijan ominaisuus. Se tarkistaa säännöllisin väliajoin, onko kaikki data tallentunut palvelimelle. Tällöin se palaa ajassa sisäiseen muistiinsa talletetun datan alkuun, reaaliaikaisilla asemilla muutaman päivän taakse, ja tarkistaa palvelimelta, onko kaikki varmasti talletettu myös sinne. Koko prosessiin menee vajaa vuorokausi, eikä asemalta sinä aikana saada reaaliaikaista dataa. Data kuitenkin tallettuu jatkuvasti digitoijan muistikortille ja tarkistusprosessin lopuksi palvelimelle. Yleensä tarkistusprosessi ei vaikuta merkittävästi automaattiseen detektioon, koska vain yksi asema kerrallaan on poissa reaaliajasta. Tampereen detektioiden osalta TRE01 ja TRE03 ovat täydentäneet toisiaan. Jompikumpi on ollut saatavilla reaaliajassa.

Varsinaiset merkittävämät dataviiveet näkyvät 26.9. ja 1.11. Ensimmäinen johtui palvelinhuoneessamme olleesta sähköongelmasta, joka saatiin korjattua parissa tunnissa.

Marraskuun alun katko puolestaan johtui maanlaajuisesta ongelmasta verkko-operaattorin palveluissa. Vika alkoi aamuyöstä klo 1:23 ja saatiin korjattua klo 8:30.



Kuva 7: Viive aseman TRE03 datan tallentumisessa Seismologian instituutin palvelimelle verrattuna reaaliaikaan.

Figure 7: Delay between real-time and time when data from the station TRE03 is saved to a server at the Institute of Seismology.

4. Geofoniasemat

Kuusi geofoniasemaa asennettiin maastoon kuvan 2 kartan mukaisiin paikkoihin ja asemien koordinaatit ovat taulukossa 2.

Taulukko 2: Tampereen geofoniasemien paikat

Table 3: Locations of Tampere network geophone stations.

Asema	Leveysaste (°N)	Pituusaste (°E)
TRE11	61,52109	23,98488
TRE13	61,61807	23,96333
TRE14	61,51585	23,86522
TRE15	61,50485	24,12860
TRE16	61,55981	24,03620
TRE17	61,54139	23,96792

Asemakonfiguraation tavoitteena oli mahdollistaa lämpökaivon läheisyydessä tapahtuvien seismisten tapausten mahdollisimman tarkka paikannus. Atsimuuttiaukko eli suurin tapauksen havainneiden asemien välinen aste-ero pyrittiin minimoimaan. Yksi asema asennettiin aivan lämpökaivotyömaan viereen, jotta sillä voitaisiin määrittää mahdollisen seismisen tapauksen syvyys tarkasti.

Asemien laitteet olivat SmartSolo IGU-16 3C kolmekomponenttisia geofoneja, joissa sama laite sisältää anturin, digitoijan ja GPS-vastaanottimen. Laitteen sisäinen akku mahdollistaa vain reilun viikon mittauksen, joten käytimme virtalähteenä 9 V 150 Ah paimenparistoja. Kuva 8 näyttää aseman TRE15 laitteiston asennettuna maastoon. Patterilaatikkoon ja itse geofoniin on kiinnitetty lappu, jossa kerrotaan perustiedot mittauksista ja yhteyshenkilön tiedot. Tampereen mittauksen aikana kaikki laitteet saivat olla maastossa rauhassa. Mittauksista tuli yksi kysely lähitalojen asukkailta.

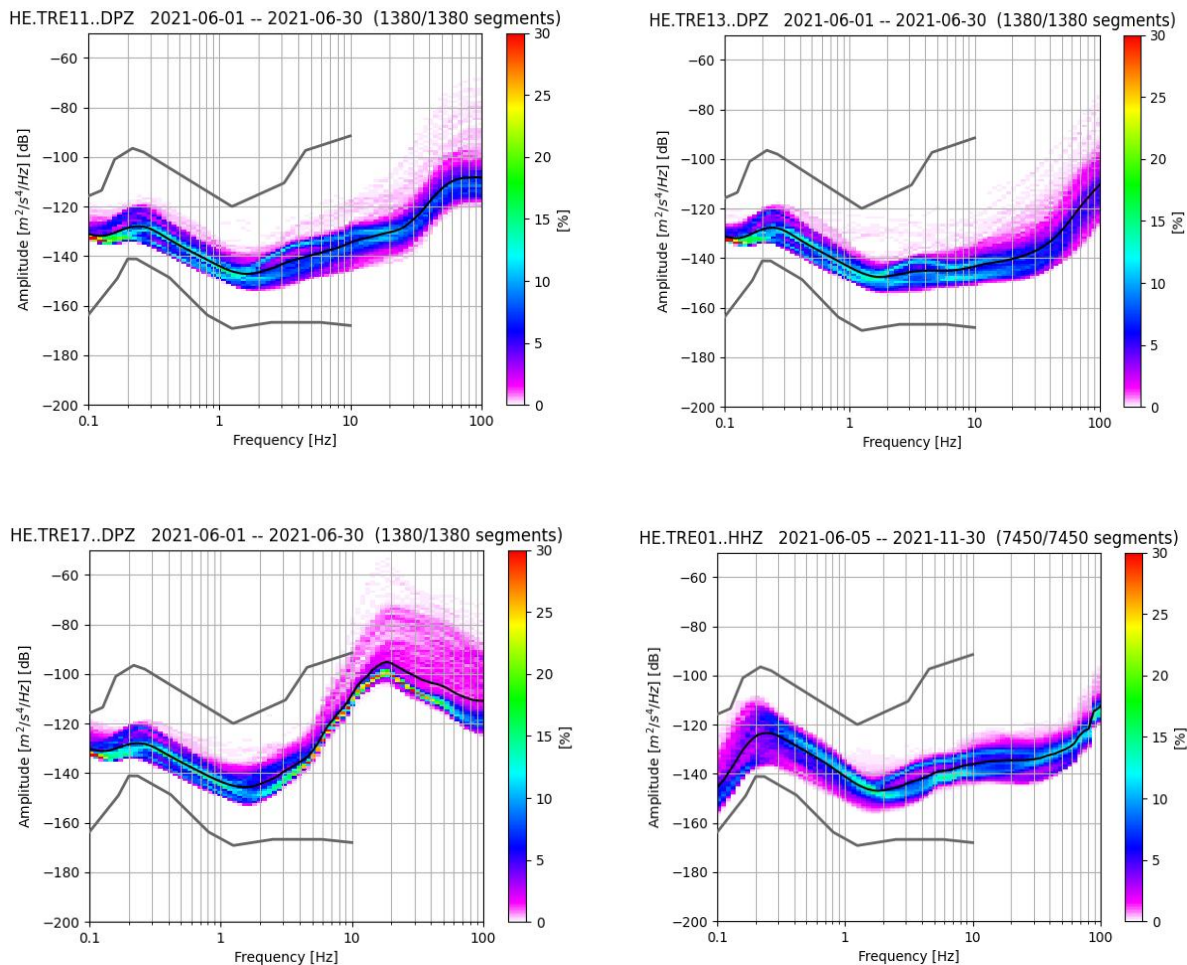
Geofoneilla kerättiin dataa 500 Hz:n näytteenotto-taajuudella. Laitteet keräävät rekisteröinnit muistikortilleen ja data saadaan käyttöön vasta, kun laitteet haetaan pois maastosta. Geofonit vaihdettiin kerran mittausjakson aikana. Mikäli reaaliaikaisten asemien datan perusteella olisi havaittu maanjäristys Tarastenjärven lähistöltä, geofoniasemat olisi käyty vaihtamassa, jotta kerätty aineisto olisi saatu käyttöön analyysiä varten. Mittausjaksolla ei kuitenkaan havaittu maanjäristystä valvottavalta alueelta.

Kaikki geofonit saatiin asennettua tiiviiseen kivennäismaahan. Voimalaitoksen vieressä olevaa asemaa TRE17 lukuunottamatta paikat olivat rauhallisia, metsäisiä maastoja, useamman kilometrin päässä pääteistä. Asemilta kerätty data on laadultaan hyvää lukuunottamatta asemaa TRE17. Kolmen aseman keskikohina-arvot näkyvät kuvassa 9. Vertailun vuoksi mukana on myös laajakaista-aseman TRE01 kohinataso. Irtomaassa olevalla geofonilla kohinataso on korkeampi kuin kallionasennuksessa olevalla laajakaistaseismometrillä. Geofoni ei myöskään ole suojassa esimerkiksi sadepisaroilta. Tampereen geofoniasemien aineisto on kuitenkin riittävän hyvää jopa selvästi alle magnitudin 0 räjäytysten havitsemiseen ja paikantamiseen.



Kuva 8: Geofoniasema TRE15.

Figure 8: Geophone station TRE15.



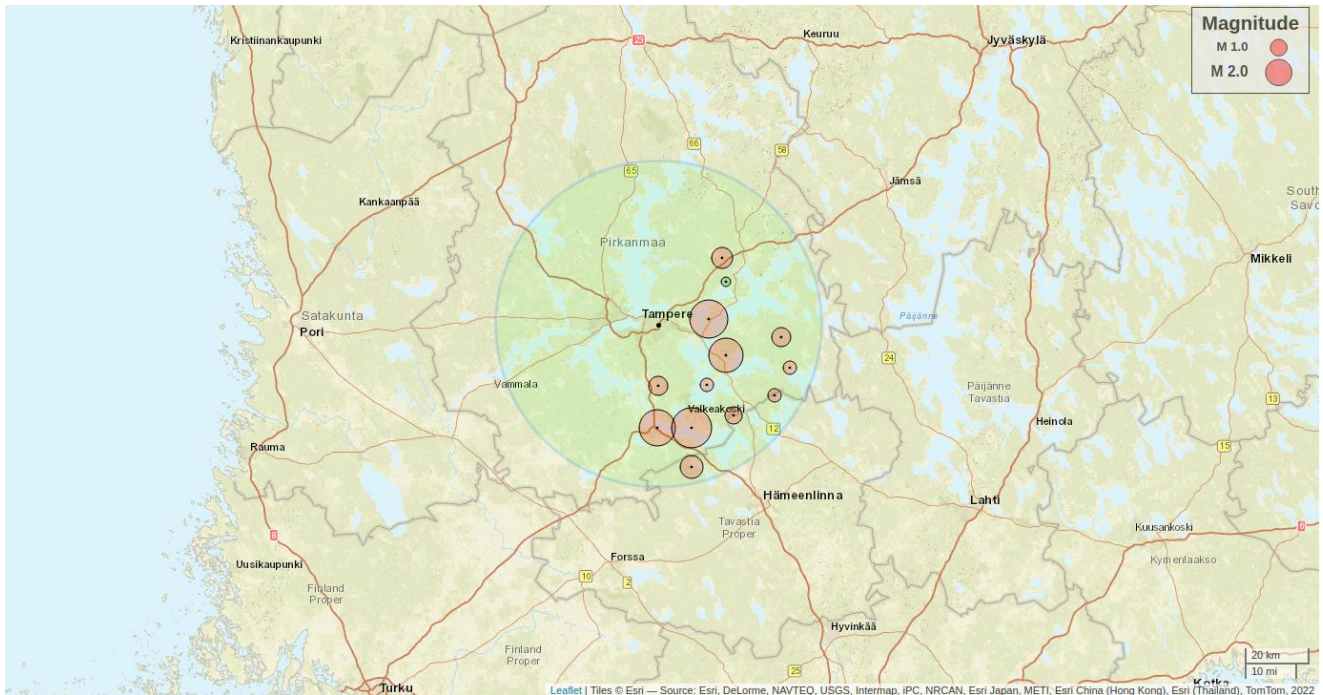
Kuva 9: Tampereen geofoniasemien TRE11, TRE13 ja TRE17 rekisteröinneistä lasketut tehospektrin keskiarvot. Vertailun vuoksi mukana asema TRE01. Käyrät kuvaavat asemilla mitattavaa taustakohinan signaalitasoa eri mittausperiodeilla (McNamara ja Buland, 2004).

Figure 9: The mean power spectral densities calculated for the Tampere geophone stations TRE11, TRE13 and TRE17. Station TRE01 is included for comparison. The graphs describe ambient noise level at each station (McNamara & Buland, 2004).

5. Seismiset havainnot Tarastenjärven läheisyydessä

Koko Suomi on seismisesti matalan riskin aluetta. Tampere ei ole lähellä Suomen seismisesti aktiivisimpia alueita, jotka sijaitsevat Tornionjokilaaksossa, Kuusamossa ja Viipurin rapakivialueella (Korja ja Kosonen, 2015). Seismologian instituutin tietokannoista löytyy kaikkiaan 13 järistystä, jotka ovat tapahtuneet alle 50 kilometrin päässä Tampereen keskustasta (kuva 10). Näistä yhdeksän on tapahtunut laiteaikana eli ne on havaittu seismometreillä. Neljä tapausta ovat historiallisia järistyksiä, jotka on voitu löytää ja paikallistaa ihmisten kirjaamista havainnoista. Niistä vanhin on vuodelta 1767. Historiallisten tapausten magnitudit määritellään havaittujen vaikutusten perusteella ja vertailu instrumentaalitapauksiin on haastavaa.

2000-luvulla havaittujen tapausten magnitudit ovat 0,6:n ja 1,4:n välillä eli louhintaräjähdyksien kokoluokkaa. Tarastenjärven voimalaa lähimmät mitatut järitykset ovat tapahtuneet Orivedellä 11.8.1976 ja 29.5.2015, 14 ja 18 kilometrin päässä voimalan paikasta. Varhaisemmalle ei ole pystytty määrittämään magnitudia silloisella, varsin harvalla seismisellä verkolla. Uudemman järityksen magnitudi oli 1,4.



Kuva 10: Maanjäritykset 50 kilometrin säteellä Tampereelta. Suurimmat ovat historiallisia tapauksia vuosilta 1767–1852. Näiden makroseismiset magnitudit ovat 2,9–3,2. Lähde: <https://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search>

Figure 10: Earthquakes within 50 kilometers from the Tampere city center. The biggest ones are historical earthquakes that occurred between 1767 and 1852. Their macroseismic magnitudes are 2.9–3.2. Source: <https://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search>

Tampereen valvontaverkon tavoitteena oli havaita ja paikantaa automaattisesti pienetkin seismiset tapaukset Tarastenjärven hyötyvoimalan lähistöltä. Alueen seismisyyttä seurattiin valvontajaksolla reaaliaikaisesti osana kansallista Suomen ja lähialueiden päivittäistä valvontaa (Veikkolainen ym. 2021, Kortström ym. 2018). Liittämällä asemat TRE01 ja TRE03 päivittäisanalyysin prosesseihin, parannettiin seismisten tapausten havaitsemismahdollisuutta Tampereen alueella. Osana kansallista valvontaa mahdollisista voimakkaista maanjärityksistä ($M \geq 1,6$) olisi saatu tietoa päivystävältä seismologilta lähes reaaliajassa ja pienemmistä järityksistä seuraavana arkipäivänä päivän analyysiltä. Automaattisten havaintojen lisäksi pieniä paikallisia tapauksia on seurattu päivägrammeista. Grammit ovat kuvia, joihin piirtyy jatkuva signaali seismiseltä asemalta. Niistä voidaan havaita tapauksia, jotka ovat jääneet automaattiselta detektorilta huomaamatta. Tampereen asemien tuottama aineisto käsiteltiin päivittäisanalyysin lisäksi jälkikäteen, kun myös geofoniasemien data oli saatavilla, paikalliseen verkkoon kohdistetun detektio- ja paikannusprosessin avulla. Tavoitteena oli löytää päivittäisanalyysissä havaitsematta jääneitä tapauksia.

Automaattidetektorilla löydetty tapaukset tunnistetaan ja luokitellaan rekisteröinnin muodon sekä taajuussisällön perusteella automaattisesti joko maanjäristyksiksi tai räjäytyksiksi (Kortström ym. 2016). Päivittäisanalyysin yhteydessä maanjäristysten tai muuten merkittävien tapausten seismisten aaltojen tuloajat luetaan uudelleen seismogrammeista ja näiden tuloaikojen avulla määritetään lähdetiedot eli tapahtuma-aika ja -paikka, voimakkuus ja syvyys. Tarastenjärven valvonta-alueelta havaitut seismiset tapaukset luokiteltiin myös manuaalisesti tapauksen koosta riippumatta.

Viimeisen kolmen vuoden aikana 20 kilometrin päässä Tarastenjärven voimalasta havaittujen seismisten tapausten määrät ja suuruudet ovat taulukossa 3. Vuoden 2021 aikana havaitut tapaukset näkyvät kartalla kuvassa 11.

Taulukko 3: Seismologian instituutin vuosina 2019–2021 20 kilometrin säteellä Tarastenjärven voimalasta havaitsemien ja paikantamien seismisten tapausten määrät ja suuruudet.

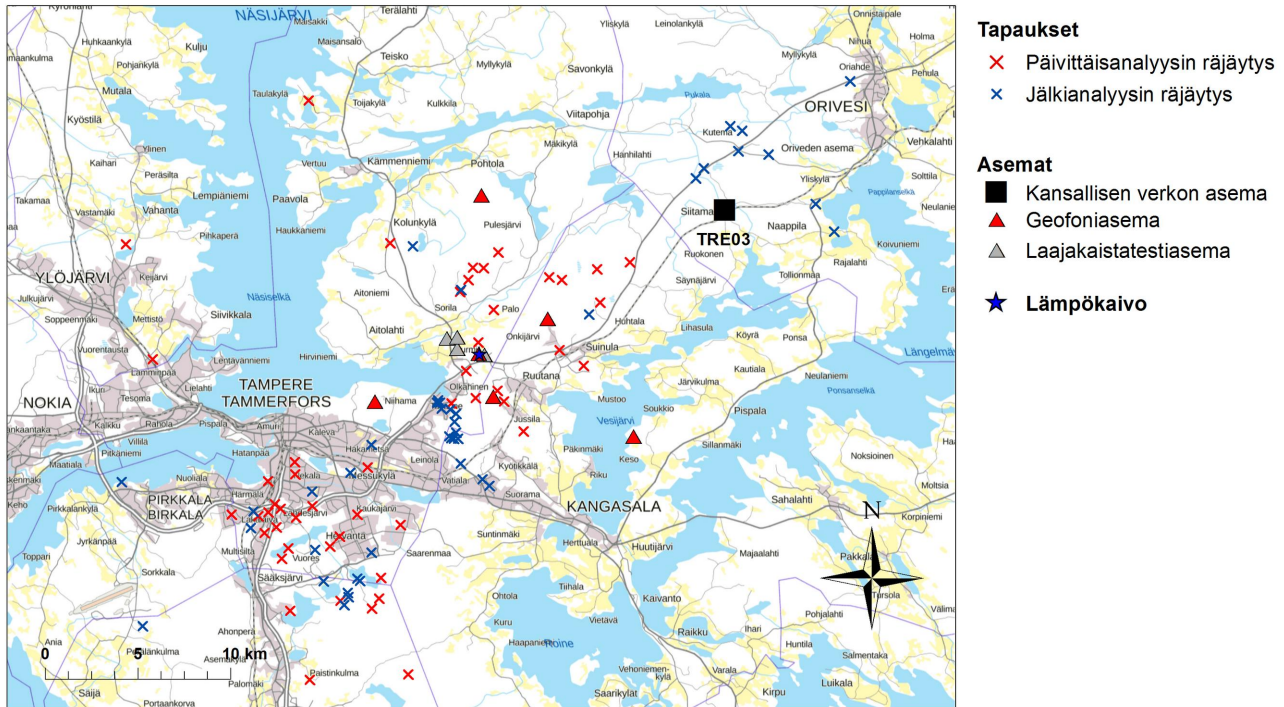
Table 3: Number and size of earthquakes that the Institute of Seismology University of Helsinki has detected and located within 20 kilometers from the Tarastenjärvi power plant.

Aineisto	tapauksia	Pienin magnitudi	Suurin magnitudi	Magnitudin keskiarvo	Magnitudin mediaani
2019 päivittäisanalyysi, paikannetut	50	0,5	1,3	1,0	1,1
2020 päivittäisanalyysi, paikannetut	57	0,2	1,2	0,9	1,0
2021 päivittäisanalyysi, paikannetut	50	0,1	1,3	0,8	0,7
2021 havaittu päivittäisanalyysissä, paikannettu jälkianalyysissä	40	-0,7	1,3	0,1	0,1
2021 yhteensä	90	-0,7	1,3	0,5	0,5

Kaikki tapaukset ovat räjäytyksiä. Valvontajakson 18.5.–30.11.2021 ulkopuolella havaittuja tapauksia on saattanut olla enemmänkin, mutta kaikkia selviä räjäytyksiä ei normaalissa päivittäisanalyysissä paikanneta, eikä niitä silloin tilastoida paikan mukaan.

Ennen tarkemman seismisen valvonnan aloittamista, pystyttiin Tampereelta havaitsemaan noin magnitudin 0,5 ja sitä suuremmat tapaukset. Pienten tapausten paikannuksessa on voinut kuitenkin olla usean kilometrin epävarmuus, koska lähimmätkin asemat ovat olleet liki sadan kilometrin päässä. Tampereen reaaliaikaisen aseman mukaantulo ei ole vaikuttanut kovin paljoa automaattidetektoiden herkyyteen, mutta paikantaminen on helpottunut. Päivittäisanalyysissä on voitu havaita asemien TRE01 ja TRE03 grammien perusteella merkittävästi aiempaa pienempiä tapauksia. Nämä on voitu

luokitella reaaliaikaisen aseman rekisteröinnin taajuussisällön perusteella räjäytyksiksi ja tapaukset on paikannettu myöhemmin geofoniasemien datan avulla. Tapauksista pienimmän magnitudi on -0,7. Suurin osa on suuruudeltaan muutaman kymmenyksen päässä nolasta. Ero havaittujen tapausten koossa on merkittävä, koska magnitudiasteikko on logaritminen. Esimerkiksi magnitudin 0,8 tapaus on kymmenen kertaa suurempi kuin magnitudin -0,2 tapaus ja siinä vapautuu noin 32 kertaa enemmän energiaa.



Kuva 11: Vuoden 2021 havaitut seismiset tapaukset 20 kilometrin säteellä Tarastenjärven voimalaitoksesta.

Figure 11: Detected seismic events of year 2021 within 20 kilometers from the Tarastenjärvi power plant. Red crosses: explosions located on daily seismic analyses, blue crosses: explosion located with data from the Tampere geophone station network.

Geofoniasemien datalle ajettiin jälkikäteen sama automaattidetektio kuin reaaliaikaiselle datalle. Tällä menetelmällä löydettiin lisää pieniä räjäytyksiä Tarastenjärven lähialueelta, mutta ei maanjäristyksiä. Löydetyt pienet räjäytykset eivät olleet Tarastenjärven voimalaitoksen välittömästä läheisyydestä.

Seurantajakson aikana 18.5.–31.11.2021 olemme voineet havaita ja paikantaa Tarastenjärven voimalaitoksen läheltä lukuisia alle magnitudin nolla olevia seismisiä tapauksia. Kaikki havaitut tapaukset ovat olleet räjäytyksiä, mutta on syytä olettaa, että myös samansuuruiset maanjäristykset olisi havaittu.

Lähteet

Kaupunkilämpö. 2021. "Geolämpökaivon poraus keskeytettiin talven ajaksi." Julkaistu 8.12.2021 <https://kaupunkilampo.fi/geolampokaivonporaus-keskeytettiin-talven-ajaksi/>.

Kortström, J., M. Uski, and K. Oinonen, 2018. The Finnish National Seismic Network, *Summ. Bull. Internatl. Seismol. Cent.*, January - June 2015, 52 (I), pp. 41–52, Thatcham, United Kingdom.

Kortström, J., M. Uski, and T. Tiira, 2016. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network, *Computers & Geosciences* 87:22-30.

McNamara, D. E. and R. Buland, 2004. Ambient Noise levels in the Continental United States, *Bulletin of the Seismological Society of America* 94(4):1517-1527.

Pekkinen. 2021. Sähköpostit 25.8.2021 ja 9.11.2021.

Sähkölaitos. 2021. "Tampereen Tarastenjärvellä aletaan porata geolämpöä." Julkaistu 15.6.2021. <https://www.sahkolaitos.fi/blogiarkisto/tampereen-tarastenjarvella-aletaan-porata-geolampoa/>

Uski, M. ja K. Piipponen, 2019. Selvitys geotermisen energian syväreikäporaamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta. Helsingin yliopisto, Seismologian instituutti, raportti S-68.

Veikkolainen, T., Kortström, J., Vuorinen, T., Salmenperä, I., Luhta, T., Mäntyniemi, P., Hillers, G. and T. Tiira, 2021. The Finnish National Seismic Network: Toward Fully Automated Analyses of Low-Magnitude Seismic Events, *Seismological Research letters* (2021) 92 (3):1581-1591.



T-105

ISSN 0781-9579
ISBN 978-952-10-9606-8