

Suomen kalliomaalauskohteiden arkeoakustinen tutkimus

Kai Lassfolk & Riitta Rainio

Musiikki 50/1–2: 17–44. <https://musiikki.journal.fi/article/view/95484>

Abstract

The article gives a full report of the sound analysis and visualization methods used for examining the acoustic characteristics of the echoes at prehistoric rock art sites in Finland. The methods developed in the University of Helsinki Music Research Laboratory are exemplified with previously unpublished data gathered mostly during the field season 2018 in the Lake District of southeastern Finland. The primary audio analysis method is multichannel impulse response measurement using a custom-designed tetrahedron microphone array and various types of excitation signals. The impulse responses are used for analyzing both the audio spectrum and angle of arrival of the echoes projected by the painted cliffs using custom-written signal analysis software.

1. Johdanto

Arkeologiassa menneisyyden ihmistä ja hänen toimintaansa tutkitaan maahan tai maisemaan jääneiden aineellisten jälkien eli muinaisjäännösten avulla. Muinaisesineiden, luiden, rakennusten tai näiden perustusten avulla on perinteisesti tehty päätelmiä ihmisten elinkeinoista, teknologioista ja yhteisöjen rakenteista, mutta viime vuosien aistien arkeologiaksi kutsutussa suuntauksessa huomio on kiinnittynyt siihen, että tällaiset lähteet välittävät tietoa myös menneisyyden aistikokemuksista: tuoksuista, mauista, kosketuksista ja äänistä (Skeates 2010; Hamilakis 2011 ja 2013). Äänistä ja ääniympäristöistä kertovia lähteitä ovat esimerkiksi maasta löytyvät soittimet tai näiden kuvat, ihmisen rakentamat tai käyttämät akustiset tilat sekä eläinluut ja kasvijäänteet, jotka välittävät tietoa ympäristön äänilähteistä. Äänen arkeologisessa tutkimuksessa – painotuksista riippuen joko musiikkiarkeologiassa tai arkeoakustiikassa – tieteidenvälinen yhteistyö on tärkeää, sillä äänivärentelyn tai soivien rakenteiden analysoiminen ja tulkitseminen edellyttävät erikoisosaamista äänen ja musiikin alalta (vrt. Scarre ja Lawson 2006; Till 2014 ja 2019). Vaikka musiikin historian tutkimus perustuu enimmäkseen nuotteihin tai muihin kirjallisiin lähteisiin, soitintutkimuksesta, akustiikasta ja äänimaisematutkimuksesta on löydettävissä metodeja ja käsitteitä, jotka soveltuvat hyvin menneen ajan aineellisten jälkien tutkimiseen. Yhdistämällä näitä arkeologian tarkkoihin kenttätyö- ja kartoitusmenetelmiin, perinteisiin kulttuurin tutkimuksen menetelmiin tai vaikkapa digitaalisten ihmistieteiden laskennallisiin mittaus-, mallinnus- ja kokeellisiin menetelmiin, voidaan tuottaa uutta tietoa menneisyyden ääniympäristöistä ja

äänellisestä kokemusmaailmasta, vuosituhansilta, jotka aiemmin ovat olleet tutkimuksen tavoittamattomissa.

Viime vuosikymmenen aikana äänen arkeologinen tutkimus on tuottanut kiehtovia tuloksia ja suuren määrän tutkimuskirjallisuutta Kiinasta Eurooppaan ja Etelä-Amerikkaan asti. Musiikkiarkeologisissa tutkimuksissa on kaivettu esiin tai saatettu jälleen soimaan esimerkiksi jääkauden aikaisia luuhuiluja tai -puhaltimia, pronssikautisia trumpetteja ja kelloja sekä Lähi-idän korkeakulttuurien lyyria, luuttuja ja harppuja (Both *et al.* 2008; Eichmann *et al.* 2012 ja 2016; Jiménez *et al.* 2013; Morley 2013; De Angeli *et al.* 2018). Arkeoakustisissa tutkimuksissa on mitattu seisovia aaltoja, jälkikaiuntaa ja puheen erotettavuutta kalliomaalauksia tai -piirroksia sisältävissä luolissa ja puoliluolissa (Reznikoff ja Dauvois 1988; Reznikoff 2002 ja 2014; Díaz-Andreu ja Garcia Benito 2012; Mattioli *et al.* 2017; Till *et al.* 2017), megaliittitemppeleissä ja -hautoissa (Watson ja Keating 1999; Devereux 2002; Fazenda 2013), Mesoamerikan seremoniakäytöksissä (Lubman 1998; Kolar 2013), antiikin teattereissa ja oraakkeleissa (Hak *et al.* 2017; Iannace ja Berardi 2017a ja 2017b) sekä varhaiskristillisissä kirkkoissa (Murphy 2006; Tronchin ja Knight 2008; Valière *et al.* 2013). Useimmissa tapauksissa mittaustulokset osoittavat, että näiden pyhinä pidettyjen paikkojen akustiikassa on muusta ympäristöstä poikkeavia, anomaalisia piirteitä, kuten voimakkaita heijastuksia, kaikuja ja jälkikaiuntaa. Tulokset viittaavat siihen, että ääni ja akustiikka olivat olennaisessa osassa paikkoihin muinoin liittyneissä uskomuksissa sekä niillä suoritetuissa rituaaleissa ja seremonioissa, myös mahdollisissa musiikkiesityksissä. Samaan viittaavat myös monet kalliomaalauksen tai -piirrosten, hautojen ja temppelien yhteydestä löytyneet soittimet tai soittajien ja tanssijoiden kuvat.

Vuonna 2013 käynnistyneessä arkeoakustisessa tutkimusprojektissa olemme tutkineet kaikuja ja äänen heijastumista Suomen esihistoriallisilla kalliomaalauksilla eli kivi- ja varhaismetallikauden (5200–1000 BC) metsästäjä-keräilijöiden oletetuilla pyhillä paikoilla (vrt. <https://www.helsinki.fi/en/researchgroups/acoustics-of-sacred-sites>). Maalaukset sijaitsevat tyypillisesti pystysuorissa, jääkauden sileiksi hiomissa rantakallioissa, muinaisten tärkeiden vesireittien varsilla. Koska kalliot nousevat usein suoraan vedestä, ilman välittävää maakaistaletta tai tasannetta, maalaukset on täytynyt tehdä veneestä tai talvella jäältä käsin (Seitsonen 2005; Lahelma 2008). Maalauksen aiheet, kuten kaatuvat, tanssivat, sarvipäiset tai eläimiksi muuntuvat ihmishahmot sekä kallioiden edustoilta löytyneet uhrilahjat viittaavat siihen, että paikkojen käyttö oli luonteeltaan uskomuksellista ja rituaalista, useimpien tulkintojen mukaan šamanistista (Siikala 1980; Miettinen ja Willamo 2007; Lahelma 2008). Suomen kalliomaalauksen kaikuisasta akustiikasta kirjoitti ensimmäisenä ranskalainen musiikintutkija Iégor Reznikoff (1995) kolmella kohteella suorittamansa kuulonvaraisen testauksen perusteella. Reznikoffin havainto ei sinällään ole yllättävä, sillä maalattujen kallioiden kaltaiset sileät ja kovat graniittipinnat ovat heijastuskyvyltään mahdollisimman herkkiä. Yhdessä avoimen järvenpinnan kanssa ne muodostavat akustisesti jännittäviä, erikoislaatuisia ympäristöjä, jotka poikkeavat selvästi monien muiden alueiden kalliomaalauksen ja -piirrosten ympäristöistä, erityisesti Ranskan ja Espanjan tunnetuista luolista ja puoliluolista.

Reznikoffin havainnon innoittamassa tutkimusprojektissamme olemme pyrkineet kehittämään akustisia mittausta- ja kenttätymenetelmiä, jotka soveltuvat parhaiten Suomen kalliomaalausten akustisiin, maastollisiin ja ilmasto-olosuhteisiin (Rainio *et al.* 2014; 2017a ja 2017b). Ensisijainen analyysimenetelmä on monikanavainen, tarkoitusta varten suunnitellulla mikrofonijärjestelmällä ja signaalinkäsittelyohjelmalla suoritettava impulssivastemittaus. Menetelmän avulla kallioista heijastuvien kaikujen spektri ja tulokulma voidaan laskea tarkasti. Tutkimuskohteiden akustiikka voidaan myös tallentaa tiläänä ja auralisoida eli toistaa kuulokkeilla tai monikanavaisella kaiutinjärjestelmällä. Muita käytettyjä menetelmiä ovat GIS- eli paikkatietojärjestelmäpohjainen kartoitus, laserkeilaus sekä sen perusteella tutkimuskohteista rakennetut geometriset ja virtuaaliympäristömallit sekä digitaalinen kuvankäsittely, jonka avulla esimerkiksi Suomussalmen Väräkallion maalauksesta saatiin esiin aiemmin dokumentoimattomia rummuttavia ihmishahmoja (Rainio *et al.* 2017b). Mittauksilla todettuun akustiikkaan mahdollisesti liittyneitä äänirituaaleja voidaan pyrkiä hahmottelemaan etnografisista lähteistä löytyvän, kaikuihin liittyvän uskomus- ja rituaaliperinteen avulla (esim. Paulaharju 1932; Waller 2006; Waller ja Arsenault 2008). Tässä artikkelissa esittelemme Helsingin yliopiston musiikkitieteen tutkimuslaboratoriossa kehittämiämme arkeoakustisia mittausten menetelmiä ja -laitteistoja laajemmin ja yksityiskohtaisemmin kuin aiemmissa, varsinaisiin tutkimustuloksiin keskittyneissä artikkeleissa. Havainnollistamme käytetyn signaalinkäsittelyohjelman toimintaa ja mahdollisuuksia uusilla, kenttätymenettelyillä 2014 ja 2018 aineistoista tulostetuilla graafisilla kuvaajilla. Lisäksi arvioimme kehitetyn menetelmän vahvuuksia ja heikkouksia sekä pohdimme, mitä uutta akustinen impulssivastemittaus, spektrianalyysi sekä näihin perustuva arkeoakustinen tutkimuksemme voivat tuoda musiikin ja äänellisen kulttuurin tutkimukseen sekä Suomen musiikin ja äänimaiseman esihistoriaan ja historiaan.

2. Kalliomaalauskohteiden tutkimusmetodologia

Impulssivasteita hyödynnetään kalliomaalauskohteiden tutkimuksessa kahdella tavalla: 1) kohteessa syntyvien kaikujen äänenlaadun ja muiden akustisten erityispiirteiden arvioinnissa signaalianalyysin avulla sekä 2) kohteiden akustisten ominaispiirteiden havainnollistamisessa auralisaatiomenetelmien avulla. Äänenlaadun arvioinnissa tehdään vertailuja yhtäältä kohteessa äänitettyjen herätesignaalien ja näiden synnyttämien vasteiden ja toisaalta eri kohteiden vasteiden välillä. Tässä artikkelissa käsiteltäviä kohteita ovat Väräkallion kalliomaalaus Suomussalmella (Kuva 1), Siliävuoren kalliomaalaus Luumäellä (Kuva 2), Verlan kalliomaalaus Kouvolassa (Kuva 3) sekä Verijärven kalliomaalaus Mikkelissä (Kuva 4). Näistä Väräkalliolla, Siliävuorella ja Verlassa maalauskaali on säilynyt ehjänä ja sileäpintaisena, kun taas Verijärvellä suuri osa maalauskaalin pinnasta on rapautunut rosoiseksi ja romahtanut edustalla olevaan järveen.

<<< Kuvat 1-4 >>>

Tutkimuskohteiden keskeisenä akustisena erityispiirteenä on maalauskaulion tuottama voimakas kaiku, joka useimmissa kohteissa toistaa subjektiivisesti havaittuna esimerkiksi puheen varsin tarkasti ja tunnistettavasti. Tällä selvästi erottuvalla toistokaiulla on lisäksi selvästi subjektiivisesti havaittava tulosuunta, joka korreloi hyvin usein kalliomaalausten sijainnin kanssa. Kohteissa mitataankin laskennallisin menetelmin myös kaiun tulosuuntaa, jotta voidaan esimerkiksi tehdä päätelmiä kohteen akustiikan ja maalausten sijainnin mahdollisista yhteyksistä. Hypoteesin mukaan pystysuorasta kalliosta kimpoava, selvästi erottuva kaiku on ollut yksi syy siihen, että paikka merkittiin maalauksilla ja miellettiin pyhäksi.

Havainnollistamisessa impulssivasteita käytetään tuottamaan kohteiden akustiikkaa vastaava kuulovaikutelma laboratorio- tai näyttelytilassa. Menetelmänä on äänituotannossa yleisesti käytetty konvoluutio (Farina 2000), jossa mikä tahansa äänisignaali voidaan käsitellä jonkin akustisen järjestelmän, esimerkiksi konserttisalin, äänentoistolaitteen tai tässä tapauksessa kalliomaalauskohteen impulssivasteella ja näin tuottaa käsiteltävään signaaliin impulssivasteen kohdetta muistuttava kuulokuva. Projektissa havainnollistamista on tehty sekä pelkästään äänen avulla että yhdistettynä Helsingin yliopiston kognitiotieteen toteuttamaan visuaaliseen 3D-malliin.

Impulssivastemittaus vaatii äänityslaitteiston, joka tässä tapauksessa on räätälöity kohteiden erityispiirteiden mukaiseksi. Samoin äänitteistä muodostuvan tutkimusaineiston analysointiin on kehitetty erikoistuneita tietokoneohjelmia. Peruslähtökohdانا on ollut hyödyntää vakiintuneita, koeteltuja menetelmiä ja yleiskäyttöisiä laitteita mahdollisimman paljon. Varsinkin äänityslaitteiston kehitysprosessi on itsessään vaatinut runsaasti soveltavaa tutkimusta ja kehitystyötä sekä laboratorioissa että kentällä. Siksi artikkelissa selostetaan myös laitteiston vaiheittaista kehitysprosessia.

Tutkimuskohteiden akustiikan analyysi perustuu monikanavaisen, mikrofonihiilojen (engl. microphone array) avulla suoritettuun tiläänen tallennukseen. Tutkimuksessa on sovellettu impulssivastemittauksiin perustuvaa tiläänen tutkimusta (mm. Farina ja Ayalon 2003, Sakari et al. 2013) että mikrofonihiilajärjestelmiin perustuvaa tutkimusta (mm. Yamasaki ja Itow 1989, Williams ja Le Dû 2004). Näiden pohjalta projektin käyttöön räätälöitiin tutkimuskohteiden erityispiirteisiin soveltuva analyysimenetelmä ja tallennuslaitteisto.

2.1 Laitteisto

Äänityslaitteiston tärkeimmät vaatimukset ovat 1) korkeatasoinen, tarkkoihin ja toistettaviin mittauksiin soveltuva äänenlaatu sekä 2) kuljetettavuus ja käytettävyys (kestävyys, pystytyksen

nopeus, virrantarve) kentällä. Budjetti ja laitteiden ylläpitotarve asettavat käytännön rajoituksia suunnitteluun.

Veden ja talvella jään päällä olevat mittauspaikat ja kohteiden sijainti tiettömässä, vaikeakulkuisessa maastossa asettavat erityisvaatimuksia laitteistolle. Sen on oltava kuljetettavissa kohteeseen, pystytettävissä ja purettavissa lyhyessä ajassa, pysyvä vakaana mittaustapahtuman aikana ja kestävä sääolosuhteet talvella ja kesällä. Koska sääolosuhteet, esimerkiksi lämpötila, vaikuttavat merkittävästi ääniaaltojen liikkeeseen (ks. esim. Rossing et. al. 2002, 53), laitteistolla on pystyttävä keräämään vertailuaineistoa samoista kohteista sekä kesällä että talvella.

Tiivistetysti esitettynä impulssivastemittauksissa tarvitaan jokin herätesignaalinlähde sekä mikrofoni ja äänitallentimesta koostuva äänentallennuslaitteisto. Digitaaliset kannettavat tallentimet ovat kehittyneet 2010-luvulla huomattavasti ja kilpailevat äänenlaadussa ammattistudiolaitteiden kanssa. Mikrofoneina voidaan käyttää pienikalvoisia kondensaattorimikrofoneja, joiden teknologia kehittyi jo 1960- ja 1970-luvulla käytännössä nykyiselle tasolle. Herätesignaalinlähde kohdalla haasteita on enemmän. Herätesignaalin pitäisi synnyttää nopea hetkellinen ilmanpaineen kohouma ilman omaa esi- tai jälkivärähtelyä. Tällaista ei pystytä täydellisesti tuottamaan millään tunnetulla käytännöllisellä välineellä, vaan heräte on aina kompromissi.

Useimmat tallennuslaitteistot ja äänituotantoon tarkoitetut kaupalliset tietokoneohjelmat on suunniteltu ja optimoitu kaksikanavastereoäänitykseen. 2010-luvulla myös erilaiset tilaäänijärjestelmät ja näitä tukevat äänityslaitteet ovat yleistyneet. Useimmat näistä on kuitenkin suunniteltu elokuvaäänien tuotantoon tarkoitettuihin äänentoistojärjestelmiin, joista tunnetuin on 5.1-järjestelmä. Niiden haittapuolena on, että ne on optimoitu tiettyyn kuvan katselusuuntaan, eikä niiden äänikenttä ole tasainen. Viime aikoina virtuaalitodellisuusteknologian läpimurto on tuonut markkinoille myös äänityslaitteita, joissa pyritään simuloimaan kolmiulotteista akustiikkaa. Tutkimuksemme alkaessa 2013 tällaisia valmiita, silloiseen pieneen budjettiin sopivia laadukkaita laitteistoja ei vielä ollut saatavilla, joten jouduimme suunnittelemaan tilaääninäänitysjärjestelmän itse. Toisaalta tällä ratkaisulla laitteisto pystyttiin optimoimaan tutkimusasetelman vaatimuksiin. Projektimme laitteisto onkin kehittynyt vaiheittain kokemuksen ja budjetin kasvaessa pienestä prototyypilaitteistosta monipuoliseksi ja skaalautuvaksi, rinnakkaisista äänitysjärjestelmistä koostuvaksi kokonaisuudeksi. Laitteiston suunnittelussa on turvauduttu tilaäänityksen aiempaan tutkimukseen. Sitä on sovellettu projektia varten rakennettuihin mikrofoni-järjestelmiin, jotka hyödyntävät yleiskäyttöisiä, korkealuokkaisiksi yleisesti tunnettuja laitteita. Viime aikoina laitevalikoimaa on kasvatettu myös valmiilla kaupallisella tilaäänimikrofonilla.

Ensimmäinen, vuonna 2013 kenttä-äänityksissä käytetty laitteisto koostui nelikanavaisesta Zoom H4n -tallentimesta ja kahdesta Neumann KM 183 -mikrofonista. Nämä asetettiin yhdessä H4n:n sisäänrakennetun mikrofoniin kanssa tasasivuisen kolmion muotoiseen asetelmaan. KM 183 -

mikrofonien signaalia käytettiin spektrianalyysissa, ja kaiun tulokulma laskettiin KM 183 -parin tallentamien kaikujen saapumisaikerojen pohjalta käyttämällä Zoomin omaa mikrofontia apuna erottamaan takaa ja edestä tulevat kaiut toisistaan. Herätesignaali lähteet olivat akustisia: starttipistoolin laukauksia, taputuksia ja lepenelaudan kalahduksia. Lisäksi äänitettiin puhetta ja luisen imutrumpetin ääntä kuuntelukokeita ja äänidemonstraatioita varten. Äänitteiden avulla pystyttiin tekemään alustavia johtopäätöksiä kaikujen äänenlaadusta ja tulokulmista. Tulokulmalaskenta tehtiin tässä vaiheessa käsin, karkealla tarkkuudella. Tuloksia käytettiin ensimmäisessä tutkimusraportissa (Rainio *et al.* 2014) ja kertyneitä kokemuksia uuden, tarkemman laitteiston kehittämisessä.

Uuden laitteiston suunnittelun tavoitteena oli sekä parantaa herätesignaalin laatua että tulokulmalaskennan tarkkuutta. Herätesignaaliiksi valittiin sinipyyhkäisy, joka äänitetään kohteessa ja puretaan laskennallisesti impulssivasteeksi Angelo Farinan (2000) esittelemällä menetelmällä. Herätesignaali lähteeksi rakennutettiin dodekaedrikaiutin, joka tuottaa likimain samanlaisen signaalin joka suuntaan kolmeulotteisessa tilassa. Sinipyyhkäisytekniikallakaan dodekaedrikaiuttimen tuottama herätesignaali ei ole ideaali impulssi, mutta käytännössä se on osoittautunut riittävän tarkaksi sekä tulokulmalaskentaan että kaikujen äänenlaadun analysointiin. Zoom H4n:ää käytettiin herätesignaalin toistolaitteena, kaiuttimen vahvistimena JBL:n autopäätevahvistinta ja virtalähteenä 12 voltin moottoripyöräakkaa.

Mikrofonijärjestelmäksi kehitettiin nelikanavainen mikrofonihila, joka koostuu neljästä KM 183 -mikrofonista. Ne asennetaan pystyasentoon tetraedrin muotoon rakennettuun mikrofonitelineeseen. Mikrofonikapselien keskinäinen etäisyys on 40 cm. KM 183 on tyypiltään niin sanottu paine- tai painekalibroitu mikrofoni (Nielsen 1994, 77; Lahti 1997, 22), jonka taajuusvaste on tasainen keskimäärin kaikista suunnista saapuvilla äänisignaaleilla. Pystyyn asennetun painemikrofonin taajuusvasteen tasaisin alue on vaakasuunnassa mikrofontiin nähden. Mikrofoniasetelma mahdollistaa yksittäisten kaikujen tulokulman automaattisen laskennan alle 1° tarkkuudella ja yksittäisten mikrofonisignaalien käytön äänenlaadun analysoinnissa.

Kenttä-äänityksiä usein haittaavan tuulen aiheuttamien akustisten ja osin mekaanisten häiriöiden vähentämiseksi teetätimme mikrofoneille erikoisrakenteiset, harvasta teräsverkosta ja tämän varaan pingotetusta ohuesta nailonkankaasta tehdyt tuulisuojat. Tuulisuojien tarkoituksena oli estää (ainakin heikohkon) tuulen aiheuttama kohina ilman tavanomaisten, vaahtomuovipohjaisten tuulisuojien aiheuttamaa korkeiden taajuuksien vaimentumista impulssivasteissa.

Tallentimena käytettiin ensin kuusikanavaista Zoom H6:ta ja sittemmin kahdeksankanavaista Zoom F8:aa 96 kHz näytteenottotaajuudella. F8-mallin etuna on mahdollisuus tallentaa kaksi nelikanavaista signaalia eri äänitystasoilla, mikä vähentää herätesignaalin yliohjautumisvaaraa¹ ja parantaa merkittävästi kaikujen signaalikohinasuhdetta. Mikrofonietuvahvistimina käytettiin

¹ Tämä on erityisesti starttipistoolin ongelma

Zoom-tallentimien omia etuvahvistimia. Myös mikrofonien phantom-virta otettiin Zoom-tallentimista.² Uuden laitteiston haittapuolina ovat osin kasvanut pystytysaika ja erityisesti kuljetuskapasiteetin tarve. Siksi vaikeakulkuisissa kohteissa ja pienellä kenttätöryhmällä liikuttaessa dodekaedrikaiutin korvataan usein läpimitaltaan 40 cm:n lateksi-ilmapalloilla. Tässäkin on oma haasteensa, koska äänityspaikkaa ei voida roskata. Lateksipallot eivät kuitenkaan hajoa kovin moniksi pieniksi kappaleiksi, joten kaikki näiden tuottamat roskat saadaan talteen.

Mittausten ja tulokulmalaskennan lisäksi impulssivasteita on äänitetty myös kuuntelukokeita, kuulonvaraisia demonstraatioita ja tilojen virtuaalimallinnusta varten. Näitä äänityksiä on tehty tarkoitusta varten rakennetulla kuusikanavaisella suuntamikrofonihilalla ja Ambisonics-tiläänijärjestelmään perustuvalla Sennheiser Ambeo VR -mikrofonilla. Näistä edellistä on käytetty kaiutinäänentoistossa ja jälkimmäistä pääosin kuulokekuuntelussa. Kuusikanavainen suuntamikrofonihila on kehitetty Williamsin ja Le Dûn (2004) esittelemän viisikanavaisen tasasivuisen tiläänimikrofonihilan pohjalta laajentamalla tätä pystyyn asennetulla keskimikrofonilla. Mikrofonihilalla voidaan taltioida akustisen tilan suuntavaikutelma vaakatasossa. Keskimikrofonilla voidaan mikrofonyyppistä riippuen joko taltioida pysty akselin suuntavaikutelmaa tai kerätä ääntä signaalianalyysia varten. Mikrofoneina käytetään viittä Neumann KM 185 -hyperherttamikrofonia ja keskimikrofonina KM 183, KM 184 tai KM 185 -mallia riippuen tutkimusasetelmasta. Asetelman etuna on, että se tuottaa tasaisen tiläänikentän vaakatasossa ja taltioitu impulssivaste voidaan syöttää suoraan kanavalukumäärältään vastaavaan tasasivuisen kaiutinasetelmaan ilman tilääneen liittyvää jälkikäsitteilyä. Näin yksittäisten mikrofonisignaalien äänenlaatu pysyy korkeana ilman jälkikäsitteilyn tuottamia artefakteja.

Ambisonics-mikrofonin etuna on puolestaan laaja ohjelmistotuki. Tarjolla on useita jälkikäsitteilyohjelmia, joilla äänitteet voidaan muuntaa esimerkiksi kuulokekuunteluun sopiviksi. Myös Youtube-videopalvelun 360 asteen ja VR-videoissa voidaan käyttää Ambisonicsilla taltioitua ääntä. Ambeo VR:n ja Youtuben tukeman 1. asteen Ambisonicsin tilääniä ei kuitenkaan ole kovin tarkka.

Myös herätesignaali lähdevalikoimaa on kasvatettu suuntaavalla, vaihelineaarisella RCF ART 708-A MK IV -kaiuttimella. Tätä hyödynnetään, kun halutaan suunnata herätesignaali johonkin yksittäiseen kohteeseen. Vaihelineaarisuutensa ansioista kaiutin myös toistaa herätesignaalin tarkemmin impulssimaisena kuin dodekaedrikaiutin.

Kokonaisuudessaan kenttätökalusto (Kuva 5) sisältää kaksi erityyppistä kaiutinta virtalähteineen, kolme mikrofonijärjestelmää, kaksi monikanavaäänitallenninta sekä herätesignaalin toistoon käytetyn äänitallentimen. Lisäksi sulan veden aikaan tehtäviin äänityksiin on rakennettu veneestä operoitava äänityslautta mikrofonihilaa ja herätesignaalikaiutinta varten. Laitteistosta valitaan

² Laitteiston testausvaiheessa tallentimien phantom-jännite tarkistettiin mikrofonien virrankulutuksen perusteella

kenttä-äänityksiin jokin mittaustehtävää palveleva osakokonaisuus kuljetusmahdollisuuksien ja sääolosuhteiden puitteissa. Lisäksi kenttätyövarustukseen kuuluu dokumentointivälineistöä kuten valokuvakamera, 360°-kamera, videokamera, tarkkuuskompassi ja tarkkuus-GPS-mittari.

<<< Kuva 5 >>>

2.2 Ohjelmisto

Impulssivasteiden analyysissa käytetään Helsingin yliopistossa kehitettyä avoimen lähdekoodin Spectutils-ohjelmistoa (Lassfolk & Uimonen 2008). Spectutils koostuu joukosta GNU Octave -ohjelmointikielellä kirjoitettuja äänisignaalin analyysityökaluja, joilla voidaan tuottaa tarkkoja spektrianalyysi- ja muita signaalianalyysikuvaajia. Spectutilsin etuna esimerkiksi vuorovaikutteisiin, point-and-click -tyyppisiin ohjelmiin on mittausten helppo toistettavuus ja tulosten korkea esitystarkkuus. Lisäksi käytännössä kaikkia spektrianalyysin parametrejä voidaan säätää päinvastoin kuin monissa musiikintutkimuksessa yleisesti käytetyissä ohjelmissa, esimerkiksi Sonic Visualizerissa tai Audacityssa.

Spectutilsia on projektia varten laajennettu kaiun tulokulmalaskentaan ja impulssivasteiden jälkikäsitteilyyn tarkoitetuilla ohjelmilla. Sinipyyhkäisyinä tuotetut ja äänitetyt signaalit puretaan Angelo Farinan (2000) kehittämää dekonvoluutioalgoritmia hyödyntävällä ohjelmalla monikanavaiseksi impulssivasteeksi. Ilmapalloimpulsseja käytetään sellaisenaan ilman dekonvoluutiota. Auralisaatiota varten impulssivasteet käsitellään kaupallisilla kohinanpoisto-ohjelmilla.

Kaikujen tulokulmalaskenta tehdään vertaamalla kaiun tuottaman äänenpainetason kohouman saapumisaikoja tetraedrimikrofonihilan kapselien kesken. Samantapaista menetelmää ovat käyttäneet esimerkiksi Yamasaki ja Itow (1989) konserttisaliakustiikan tutkimuksessa. Kaiun saapumisajat saadaan mikrofonisignaalien välisen ristikorrelaatiolaskennan kautta. Tämän jälkeen ohjelma laskee kaiun tulokulman kolmiulotteisessa tilassa trigonometrian avulla. Tuloksena ovat kaiun atsimuutti- ja elevaatiokulmat, eli vaaka- ja pystytason kulmat. Laskennan tulos skaalataan lopuksi maapallon koordinaatistoon.

2.3 Tulosten analyysi ja visualisointi

Kaikujen äänenlaatua arvioidaan visuaalisesti vertaamalla herätesignaalin aikapainekuvaajaa ja magnitudispektriä kaiuista otettuihin vastaaviin kuvaajiin. Mikäli kaiku vastaa herätesignaalia sekä värähtelykuvioiltaan että spektriltään, voidaan todeta, että kaiku toistaa herätesignaalin varsin tarkasti. Tällöin tunnistettavissa oleva herätesignaali on tunnistettavissa myös kaiusta ja kaiku

toistaa esimerkiksi puheen äänneet ja sävelkorkeudet tunnistettavasti. Kaiun aiheuttava pinta muodostaa myös haamuäänilähteen, joka on paikannettavissa suuntakuulon avulla.

<<< Kuva 6 >>>

Kuvassa 6 on amplitudikuvaaja Luumäen Siliävuorella talvella 2018 äänitetystä impulssivasteesta. Kuvaajassa näkyy äänenvoimakkuuden, tarkemmin maksimiamplitudin vaihtelu ajan suhteen. Kuvaajan ensimmäinen, voimakas amplitudin korostuma on kaiuttimen toistama herätesignaali. Toinen korostuma aiheutuu maalauskaaliosta. Tätä seuraa mittauspisteen muusta akustisesta ympäristöstä aiheutuva diffusoitunut jälkikaiunta, josta ei tässä tapauksessa erotu muita kovin selviä yksittäisiä heijastumia. Herätesignaalin ja maalauskaalin heijasteen välissä on suhteellisen hiljainen, kaiuton jakso herätesignaalin kulkiessa järvellä kohti heijastavia pintoja. Kyseessä on tyypillinen, hyvin säilynyt veteen rajoittuva maalauskaali (Kuva 2), jossa kaali tuottaa erittäin voimakkaan kaiun muuhun ympäristöön verrattuna. Kaikua edeltävä hiljainen, kaiuton jakso korostaa maalauskaalin tuottaman kaiun tuottamaa subjektiivista vaikutelmaa.

<<< Kuva 7 >>>

Kuvassa 7 on kolmiulotteinen magnitudispektrogrammi Suomussalmen Värikalliolta talvelta 2014. Siinä näkyvät sekä signaalin amplitudin että taajuustoiston muutokset ajan suhteen. Vasemmalla oleva herätesignaalin aiheuttama kohouma on taajuustoistoltaan laajakaistainen ja tämän oikealla puolella oleva kohouma on maalauskaalin aiheuttama. Herätesignaalin ja maalauskaalin taajuusvasteet ovat hyvin lähellä toisiaan, mikä osoittaa, että maalauskaali toistaa herätesignaalin selvästi ja samankaltaisesti. Kohoumien välisessä hiljaisemmassa jaksossa näkyy myös kaksi pienempää kohoumaa, jotka aiheutuvat (muiden mittausten avulla tarkistettuna) todennäköisimmin maalauskaalin eteen rakennetusta katselulaiturista. Tämä osoittaa, että käyttämällämme menetelmällä ja välineistöllä saadaan esiin varsin yksityiskohtaista tietoa tutkimuspaikan rakenteiden vaikutuksesta akustiikkaan.

<<< Kuvat 8 ja 9 >>>

Kuvissa 8 ja 9 on vertailupari hyvin säilyneestä, pinnaltaan tasaisesta maalauskaaliosta ja rapautuneesta tai muuten vaurioituneesta kohteesta, jonka kaaliopinta on epätasainen. Kohteina ovat Kouvolan Verla ja Mikkelin Verijärvi. Vertailua havainnollistetaan oskillogrammeilla, jotka kuvaavat herätesignaalin aikaansaamaa, kaaliopinnasta heijastuvaa ilmanpaineen vaihtelua ajan suhteen. Verlan kaalin (Kuva 8) tasaisen pinnan aiheuttama painevaihtelu on nopea hetkittäinen impulssi. Verijärven rosoisen ja pinnaltaan vaurioituneen maalauskaalin (Kuva 9) impulssivaste puolestaan koostuu useista yksittäisistä heijastuksista ja täysin diffusoituneesta kaiunnasta. Siinäkin maalauskaalin synnyttämä kaiku erottuu kuitenkin muun ympäristön kaiunnasta. Verlan impulssimainen kaiku on tyypillinen hyvin säilyneille kaaliopinnalle, kun taas Verijärven

kaikua voidaan pitää esimerkkinä tavallisesta, Järvi-Suomen rosoisilla rantakallioilla tavattavasta kaiusta.

<<< Kuvat 10 ja 11 >>>

Kuvissa 10 ja 11 havainnollistetaan tulokulmalaskennan tuloksia. Näissä kohteina on Luumäen Siliävuori. Kuvassa 10 kohteen karttaan on merkitty punaisella maalausallion sijainti sekä dodekaedrikaiuttimen ja tetraedrimikrofonin sijainnit järven jäällä, maalausallion edustalla. Näiden kautta on piirretty katkoviivalla suora akseli ja mitattu heijastuksen tulosuunta on kuvattu nuolella. Mittauksen mukaan kaiku heijastuu selvästi maalausallion edustalla. Kuvassa 11 on saman kohteen elevaatiokulmamittauksen tulokset eri etäisyyksillä sijaitsevista mittauspisteistä. Tulokset osoittavat, että kaiun pystytulokulma vaihtelee tässä koveran muotoisessa kohteessa eri etäisyyksillä. Allion lähellä kaiku heijastuu kutakuinkin maalausten korkeudelta, mutta nousee maalausten yläpuolelle etäisyyden kasvaessa.

Kaikissa tähän mennessä mitatuissa hyvin säilyneissä kohteissa voimakkain kaiku tulee mittauspisteeseen vaakatasossa maalausallion ja maalausten suunnasta. Muutamissa kohteissa kaiku tulee myös pystytasossa maalausten korkeudelta. Maalausallio muodostaa siis haamuäänilähteen, joka on paikannettavissa kalliopintaan tai joissain tapauksissa jopa maalauksiin. Pinnaltaan vaurioituneista kohteista tulokulmalaskenta puolestaan antaa useita tulosuuntia eri puolilta maalattua aluetta. Näissä tapauksissa kaiku ei ole yhtä yksiselitteisesti paikannettavissa.

2.4 Auralisaatio

Edellä esitellyillä impulssivasteiden analyysillä saadaan objektiivista mittaustietoa kohteiden akustisista ominaispiirteistä. Kohteiden synnyttämistä subjektiivisista kuulovaikutelmista ne eivät kuitenkaan suoraan kerro. Paikan päällä tehdyt kuulohavainnot ja kokeilut metsästäjä-keräilijöiden mahdollisesti käyttämällä akustisilla äänilähteillä, esimerkiksi lauluäänellä tai lyömäsoittimilla, ovat arkeoakustisessa tutkimuksessa jääneet toistaiseksi yleensä tutkijoiden omien subjektiivisten havaintojen varaan. Sekä yleisöä että erityisesti musiikintutkijoita kiinnostaakin, miltä kallioalausten akustiikka kuulostaa "todellisuudessa" eli musiikillisia äänilähteitä käytettäessä. Kohteiden vaikeakulkuisuuden vuoksi asiaa on kuitenkin vaikea tutkia tieteellisesti paikan päällä tehdyillä, koehenkilöillä teetetyillä kuuntelukokeilla. Meidän tutkimuksessamme asiaa lähestytään virtuaalimallinnuksen ja impulssivasteita hyödyntävän auralisaation avulla.

Impulssivasteita voidaan käyttää kohteiden akustiseen mallintamiseen (mm. Merimaa & Pulkki 2005) äänisignaalin konvoluution (Oppenheim *et al.* 1999) avulla. Konvoluutio on laskennallinen menetelmä, jossa impulssivasteeseen taltioitu tieto tutkimuskohteen akustiikasta voidaan lisätä

toiseen äänisignaaliin ja saada tämä signaali kuulostamaan siltä, että se on äänitetty kyseisessä kohteessa. Edellytyksenä on, että impulssivaste on korkeatasoinen ja että käsiteltävä signaali on akustisesti neutraali, toisin sanoen ilman jonkin toisen tilan jälkikaiuntaa.

Menetelmää on alustavasti kokeiltu pilottitutkimuksessa, jossa reaaliajassa tehty äänisignaalin konvoluutio yhdistettiin Helsingin yliopiston kognitiotieteen tutkimusryhmän toteuttamaan kolmiulotteiseen visuaaliseen virtuaaliodellisuusmalliin. Visuaalisessa mallinnuksessa käytettiin projektimme 3D-laserkeilausdataa sekä Maanmittaushallituksen avointa, ilmakuvaattua 3D-laserkeilausdataa. Kohteena oli Luumäen Siliävuori. Pilottitutkimuksessa auralisaatio toteutettiin Apple Logic Pro -äänituotanto-ohjelman Space Designer -konvoluutio-ohjelmistoliitännäisen avulla, jolle syötettiin Siliävuorella Williamsin ja Le Dûn (2004) esittelemällä suuntamikrofonihilalla äänitettyjä impulssivasteita. Ne oli esikäsitelty Logic Pron taustakohinan poisto-ohjelmalla. Äänisignaali toistettiin koehenkilön ympärille tasasivuin asetetun kaiutinhilan kautta, jossa on yksi kaiutin kutakin mikrofonihilan mikrofonia kohti. Kuuntelussa käytettiin sekä itse (napsahduksilta kuulostavia) impulsseja että koehenkilön päähän asennetulla pantamikrofonilla taltioitua ääntä, joka konvoluotoitiin reaaliajassa. Koeasetelmassa testattiin sekä impulssien että koehenkilöiden itse tuottaman äänisignaalin aiheuttaman kaiun paikantumista kaiutinhilan avulla toteutetussa (tässä vaiheessa kaksiulotteisessa) virtuaaliakustiikassa ja sen vertaamista virtuaaliodellisuuslaseilla tulostettuun visuaaliseen malliin.

Vaikka pilottitutkimus oli toteutettu kokeiluluontoisesti pienellä ja mielivaltaisesti valikoidulla koehenkilöjoukolla, sen tulokset olivat rohkaisevia. Metodiat aiotaan kehittää edelleen sekä jatkotutkimusta että yleisödemostratioita varten. Auralisaation avulla pyritään jatkotutkimuksessa vastaamaan yllä mainittuun kysymykseen kohteiden kuolonvaraisesta akustiikasta.

2.5 Pragmaattiset ja eettiset tekijät

Keskeinen osa metodologiaa on myös kenttätyöretkien suunnittelu ja käytännön toiminta tutkimuskohteissa niin kesä- kuin talviolosuhteissakin. Optimaaliset äänitysajat ajoittuvat molempina vuodenaikoina illan, aamuyön ja varhaisaamun tyyniin hetkiin. Impulssivasteiden äänittäminen vie lyhimmillään vain joitakin minuutteja ja tyypillisesti tunnin tai kaksi, mutta kokonaisuutena mittausprosessi on pitkäkestoinen ja haastava tehtävä. Koska erityisesti tuuliolosuhteet rajoittavat kenttä-äänityksiä, retket on ajoitettava tarkoin sääennustusten avulla ja tutustumalla kohteen erityispiirteisiin. Äänitykset on tehtävä poutaisella ja tyynellä säällä (tuulen nopeus maksimissaan 2–3 m/s), käytännössä usein aamuyöllä tai varhain aamulla. Kohteeseen pääsy majoituspaikasta vie aikaa ja laitteiston kokoaminen omansa. Siksi laitteiston pakkaamista ja kokoamista harjoitellaan ennakkoon. Kaikki kokoamista tai kuljettamista tarpeettomasti hidastavat tekijät pyritään eliminoimaan sekä työtapa- että laitteisto-kehittämällä. Tällä on

merkitystä myös turvallisuuden kannalta. Kovalla pakkasella laitteita operoitaessa on paleltumien vaara. Myös kesällä vesitse liikuttaessa on kiinnitettävä huomiota sekä tutkimusryhmän että laitteiden turvallisuuteen. Äänitysajankohtia, kulkureittejä ja vesillelaskupaikkoja suunniteltaessa on lisäksi huomioitava kohteiden lähiympäristössä sijaitsevat kesämökit ja muut yksityisalueet ja vältettävä näiden häiritsemistä. Kansallispuistoissa ja luonnonsuojelualueilla äänitettäessä asiaankuuluva tutkimuslupa on haettava pari kuukautta etukäteen.

Tutkimusaineistoa kertyy projektissa runsaasti sekä kenttä-äänityksissä että analysointivaiheessa. Siksi aineiston hallintaan (tallentamiseen, järjestämiseen, dokumentointiin ja pitkäaikaissäilytykseen) on kiinnitettävä erityistä huomiota. Aineisto koostuu impulssivasteiden lisäksi muista äänitteistä, tekstimuotoisesta dokumentaatiosta, valokuvista, videoista, kartoista ja laserkeilausdatasta. Tämä tallennetaan yhtenäiseksi hierarkkiseksi tietokannaksi analysointia ja pilvipalvelua hyödyntävää pitkäaikaissäilytystä varten.

3. Menetelmän arviointia ja sovellusmahdollisuuksia

Suomen kalliomaalauskohteiden arkeoakustinen tutkimusmetodologia tuottaa yksityiskohtaista ja tarkkaa, kvantitatiivista tietoa tutkittavan tilan tai ympäristön äänellisistä olosuhteista. Tällaista tietoa voidaan käyttää, tulkita ja hyödyntää useilla eri tavoilla. Suomen esihistoriallisten kalliomaalausten tapauksessa monikanavainen impulssivastemittaus sekä siihen kytkeytyvä äänen tulokulmalaskenta osoittavat, että maalausalliot ovat tehokkaita äänen heijastajia. Ne muodostavat voimakkaita ja tarkkoja toistokaikuja sekä kallioihin tai itse maalauksiin paikantuvia haamuäänilähteitä, jotka animoivat kohteensa antamalla näille äänen. Tällaisilla ominaisuuksilla on voinut olla merkitystä paikkoihin liittyneissä uskomuksissa ja niillä suoritetuissa rituaaleissa. Käytetty tulokulmalaskenta soveltuu parhaiten Suomen kalliomaalauskohteiden kaltaisiin ulkotiloihin, joissa esiintyy yksittäisiä diskreettejä, suhteellisen voimakkaita heijastuksia ja kaikuja. Päällekkäiset ja limittäiset heijastukset, joita esiintyy esimerkiksi luolissa, puoliluolissa ja muissa sisätiloissa, haittaavat tulokulman laskentaa tai estävät sen pahimmillaan kokonaan. Ulkotiloissa muiden, päällekkäisten heijastusten aiheuttamaa haittaa sekä maasto-olosuhteista aiheutuvia mittausepä tarkkuuksia voidaan minimoida sijoittamalla äänityslaitteisto suhteellisen lähelle tutkittavaa kalliokohdetta, enintään 50–60 metrin päähän. Tällöin kalliokohteen heijastama kaiku on riittävän voimakas tulokulma-algoritmille ja itse kohde täyttää sen verran suuren sektorin näkökentässä, ettei asteen luokkaa olevilla kompassivirheillä ole vaikutusta tulokulmalaskennan tuloksiin. Voidaan hyvin olettaa, että myös esihistorialliset rituaalit sijoittuivat suhteellisen lähelle maalausalliota, veneisiin tai jälle, näköyhteyden päähän alle puolen metrin kokoisista maalauskuvioista.

Paristakymmenestä kalliomaalauskohteesta kertyneen kokemuksen perusteella metodimme on robusti eli tuottaa selkeitä ja johdonmukaisia tuloksia. Ohjelmoitavana ja monipuolisena alustana GNU Octave on osoittautunut erinomaiseksi työkaluksi, joskin tutkimusohjelmisto vaatii

ajoittaista päivittämistä toimiakseen Octaven ajantasaisissa versioissa. Suurimmat haasteet liittyvät kenttä-äänitysten osalta logistisiin seikkoihin ja sääolosuhteiden vaihteluun, jotka molemmat asettavat käytännön rajoituksia aineiston hankintaan. Yleiskäyttöisten painekondensaattorimikrofonien ansiosta monikanavainen tetraedrijärjestelmä tuottaa korkeatasoisia äänitteitä myös talvella, kokemuksemme mukaan jopa 10–14 asteen pakkasessa. Erikoisvalmisteisista tuulisuojista ja tetraedrimikrofonijärjestelmän painemikrofonien suhteellisesta epäherkkyydestä huolimatta tuulen aiheuttama kohina on kuitenkin ongelmallista. Erityisesti auralisaatiotarkoitukseen käytetyt suuntamikrofonit sekä äänityslautta ovat tuuliherkkiä. Tästä syystä äänitykset on tehtävä tyynessä, tuulettomassa säässä, mieluiten aamuvuoruhetkellä tai myöhään illalla. Vaikeiden maasto-olosuhteiden ja logististen haasteiden takia äänityslaitteiston määrää on usein rajoitettava ja samassa kohteessa käytävä pari, kolme kertaa.

Tulokulmalaskentaa ja spektrianalyysia voidaan käyttää, paitsi kalliomaalauskohteiden ja muiden tilojen akustisten ominaisuuksien selvittämiseen, myös minkä tahansa ääniympäristön tai äänimaiseman kokonaisuuden tai osien esittämiseen, analysoimiseen ja tulkitsemiseen. Monikanavaäänitystä ja tetraedritelinettä käyttämällä tallennetuille impulssimaisille äänille voidaan laskea tulokulma eli saapumissuunta. Graafisia äänianalyysikuvaajia tulostamalla ääniä ja niiden muodostamia kokonaisuuksia voidaan tarkastella aika-, taajuus-, amplitudi- ja äänenpainetasoakseleilla sekä mitata ja vertailla täsmällisesti keskenään. Myös äänenväriin liittyvät ominaisuudet ovat luettavissa kuvaajista. Spektrianalyysi tarjoaa siis eksaktin analyysimetodin kuulonvaraisen aineksen tarkastelemiseen, koostuipa se sitten ympäristöäänistä, äänimaisemista tai musiikista (Lassfolk 2013; 2014; vrt. myös Rainio *et al.* 2017c). Metodina spektrianalyysi on datamäärältään suurempi ja siten tarkempi kuin esimerkiksi perinteisesti toteutettu graafinen äänimaisema-analyysi tai desibelimittarilla suoritettu melutasomittaus, etenkin yhdistettynä arkeologian tarkkoihin paikannus- ja kartoitusmenetelmiin.

Kalliomaalauksilla tai muissa pyhissä paikoissa suoritettu impulssivastemittaus ei ole pelkästään akustista tutkimusta, vaan tulkinnalliselta potentiaaliltaan ja sovellutuksiltaan lähellä musiikin ja äänellisen kulttuurin tutkimusta. Suomen kalliomaalaukset, kuten megaliittitemppelit, oraakkelit ja kirkot, tulkitaan yleisesti paikoiksi, joissa kokoonnuttiin ja suoritettiin yhteisöllisesti tärkeitä, kulttuurisesti määrittäytyneitä rituaaleja ja seremonioita. Paikkojen akustiikka toimi taustana tällaiselle toiminnalle, väritti sen kuulokuvaa sekä muokkasi ajan kuluessa jopa äänellisten tapahtumien rakennetta ja muotoa. Akustiikka oli näin ollen olennainen osa rituaalia tai seremoniaa. Koska pyhien paikkojen akustiikka on mittausten mukaan usein muusta ympäristöstä poikkeava – lähinnä kaikuisa (esim. Reznikoff ja Dauvois 1988; Waller 1993; Lubman 1998; Watson ja Keating 1999; Reznikoff 2002; Diaz-Andreu ja Garcia Benito 2012; Fazenda 2013; Iannace ja Berardi 2017a; Mattioli *et al.* 2017) – tällainen poikkeava akustiikka saattoi olla yksi syy siihen, että juuri näitä paikkoja pidettiin pyhinä. Eri puolilta maailmaa kootun etnografisen aineiston mukaan kaiut liitettiin säännönmukaisesti henkiolentoihin ja ymmärrettiin näiden ääneksi tai puheeksi (Waller 2006; Waller ja Arsenault 2008). Kaikuisalla paikalla voitiin siis kommunikoida suoraan henkien kanssa, kun vain ääneltiin oikealla tavalla. Mielenkiintoista

kyllä, saamelaisten, pohjoisamerikkalaisten ja afrikkalaisten myyttien mukaan musiikin oikeanlainen tekemisen tapa, joikaaminen tai laulaminen, oli opittu tai omaksuttu alun perin juuri hengiltä ja sen tarkoituksena oli mahdollistaa kommunikointi henkimaailman kanssa (Qvigstad 1929; Morley 2013, 17, 20, 28). Mainitun perinneaineiston valossa näyttäisi siltä, että akustiikkaa tutkittaessa ollaan – ainakin pyhien paikkojen tapauksessa – musiikin synnyn ja perimmäisen olemuksen äärellä. Tällaisessa arkeoakustisessa tutkimuksessa akustiikka ja musiikkitiede kietoutuvat perustavanlaatuisella tavalla toisiinsa sekä maadoittavat vuosisatoja vanhan etnomusikologisen perimätietoaineiston tämän päivän maastoon ja mittaustuloksiin. Tutkimuksen tulokset johdattavat myös ekomusikologisten kysymysten äärelle: pohtimaan musiikin ja äänellisen kulttuurin syntyä ja varhaisvaiheita sekä luonnonympäristön, akustiikan ja menneisyyden ihmisen välistä suhdetta.

Impulssivastemittaukseen perustuva kalliomaalauskohteiden auralisaatio yhdistettynä virtuaaliympäristössä toteutettavaan visualisoitiin avaa monenlaisia mahdollisuuksia tutkimustulosten testaamiseen ja havainnollistamiseen. Immersiivisessä, heräteääniin reaaliaikaisesti vastaavassa ääni- ja kuvamaailmassa voidaan suorittaa subjektiivisia kuulovaikutelmia, äänen koettua suuntaa ja psykoakustiikkaa koskevia kokeita. Konvoluoitavien instrumentaalinäytteiden ja virtuaalimaailmaan kutsuttavien muusikoiden avulla voidaan testata suuntakaikuisen akustiikan vaikutusta rummutukseen, joikaamiseen ja muihin arkaaisiin äänentuottamistapoihin sekä saada näin selville, miltä paikoilla suoritetut rituaalit kuulostivat tai tuntuivat. Virtuaalitodellisuusrekonstruktioista tuotettavat audiovisuaaliset toisinteet avaavat esihistorialliset näkymä- ja kaikukokemukset myös suurelle yleisölle, mahdollisuuksien mukaan jopa heidän omilla päätelaitteillaan. Museonäyttelyissä tai taidegallerioissa voidaan järjestää tilaisuuksia, joissa muusikot tai performanssi- ja äänitaiteilijat demonstroivat pyhien paikkojen akustiikkaa ja musiikillista potentiaalia herättäen muinaiset äänirituaalit näin ikään kuin henkiin. Vaikuttavimmillaan tällaiset kokemukset olisivat tietenkin luonnossa, alkuperäisissä kalliomaalauskohteissa. Värikallion, Verlan, Ristiinan Astuvansalmen ja Kirkkonummen Hvitträskin maalauksilla on viime vuosina järjestettykin musiikkiesityksiä ja perinteisiä konsertteja (esim. Kokko ja Kasper 2014), mutta kaikkien osallistujien sijoittaminen järvelle, parhaisiin ääntely- ja kuuntelupisteisiin, on käytännössä haasteellista, ellei mahdotonta. Useimmat maalaukset sijaitsevat myös hankalien kulkuyhteyksien päässä, kaukana kaikesta. Virtuaalitodellisuusrekonstruktio tarjoavat siis käytännöllisen ja ekologisen sekä erällä tapaa myös autenttisen vaihtoehdon esihistorian ja musiikin historian elävöittämiseen: Virtuaalitodellisuuslaseilla ja kuulokkeilla ympäristöstään eristetty kokija muistuttaa näet yllättävästi šamaania, joka asettaa kasvot peittävän päähineen päähänsä, ottaa rummun ja kääntyy pois tästä maailmasta kuuntelemaan sisäisiä tuntemuksiaan ja aistimuksiaan. Virtuaalitodellisuuskokemuksen intensiteettiä ja kiinnostavuutta voitaisiin kenties vielä lisätä simuloimalla virtuaaliympäristöön transsimatkan ääniä ja näkyjä: liikkuvia kallioita, lentäviä ihmisiä ja nauravia hirviä.

Arkeoakustinen tutkimusprojektimme jatkuu näillä näkymin vähintäänkin vuoteen 2023 asti. Tulevina vuosina suoritamme impulssivastemittauksia paitsi Suomen esihistoriallisilla kalliomaalauksilla, myös Venäjän (Ural) ja Kanadan (Quebec, Ontario) kalliomaalauksilla, jotka ovat luonnonympäristöltään, topografialtaan ja jopa kuva-aiheiltaan Suomen maalauksia läheisesti muistuttavia. Tutkimusmetodologiamme ja -laitteistomme soveltuvat siis näihin kohteisiin todennäköisesti hyvin. Suomessa tarkoituksena on suorittaa mittauksia kaikissa niissä kohteissa, joissa edustalla olevan järven pinta on säilynyt esihistoriallista vastaavalla tasolla. Lisäksi jonkun järviolosuhteiltaan muuttuneen kohteen, kuten kuuluisan ja Suomen suurimman Astuvansalmen maalauksen, akustiikka voitaisiin saada kuuluviin mallintamalla eli rakentamalla kolmiulotteinen geometrinen malli, johon vedenpinta nostetaan maalausajankohtaa vastanneelle tasolle. Tämä tosin edellyttää uusien laitteistojen ja ohjelmistojen hankintaa.

Lähteet

Both, Arnd Adje, Ricardo Eichmann, Ellen Hickmann ja Lars-Christian Koch, toim. 2008. *Studien zur Musikarchäologie* VI. Berlin & Rahden Westfalen: Deutsches Archäologisches Institut & Marie Leidorf.

De Angeli, Stefano, Arnd Adje Both, Stefan Hagel, Peter Holmes, Raquel Jiménez Pasalodos ja Cajsja S. Lund, toim. 2018. *Music and Sounds in Ancient Europe*. Roma: European Music Archaeology Project.

Devereux, Paul. 2002. *Stone Age Soundtracks: The Acoustic Archaeology of Ancient Sites*. London: Vega.

Diaz-Andreu, Margarita ja Carlos Garcia Benito. 2012. ”Acoustics and Levantine Rock Art: Auditory Perceptions in La Valltorta Gorge (Spain)”. *Journal of Archaeological Science* 39: 3591–3599.

Eichmann, Ricardo, Fang Jianjun ja Lars-Christian Koch, toim. 2012. *Studien zur Musikarchäologie* VIII. Berlin & Rahden Westfalen: Deutsches Archäologisches Institut & Marie Leidorf.

Eichmann, Ricardo, Fang Jianjun ja Lars-Christian Koch, toim. 2016. *Studien zur Musikarchäologie* X. Berlin & Rahden Westfalen: Deutsches Archäologisches Institut & Marie Leidorf.

Fazenda, Bruno M. 2013. ”The acoustics of Stonehenge”. *Acoustics Bulletin* 38 (1): 32–37.

Oppenheim, Alan W., Ronald W. Schafer ja John R. Buck 1999. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.

Farina, Angelo. 2000. "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique". Paper number 5093 presented at the 108th AES Convention, Paris, France, 19–22 February 2000. The Audio Engineering Society E-Library. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10211>. Accessed 14 Jul 2016.

Farina, Angelo ja Regev Ayalon. 2003. "Recording concert hall acoustics for posterity". *Audio Engineering Society 24th International Conference on Multichannel Audio*. The Audio Engineering Society E-Library. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12277>.

Iannace, Gino ja Umberto Berardi. 2017a. "The Acoustics of Cumaean Sibyl". *Proceedings of Meetings on Acoustics* 30: 015010. DOI: 10.1121/2.0000606.

Iannace, Gino ja Umberto Berardi. 2017b. "Acoustic virtual reconstruction of the Roman theater of Posillipo, Naples". *Proceedings of Meetings on Acoustics* 30: 015011. DOI: 10.1121/2.0000607.

Jiménez, Raquel, Rupert Till ja Mark Howell, toim. 2013. *Music and Ritual: Bridging Material and Living Cultures*. Publications of the ICTM Study Group on Music Archaeology 1. Berlin: Ekho Verlag.

Hak, Constant, Nils Hoekstra, Bareld Nicolai ja Remy Wenmaekers. 2017. "Falling coins, striking matches, and whispering voices to demonstrate the acoustics of an open air amphitheatre". *The Journal of the Acoustical Society of America* 141 (5): 3859.

Hamilakis, Yannis. 2011. "Archaeologies of the Senses". Teoksessa *The Oxford Handbook of the Archaeology of Ritual and Religion*, toim. Timothy Insoll. Oxford: Oxford University Press.

Hamilakis, Yannis. 2013. *Archaeology of the Senses: Human Experience, Memory, and Affect*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kokko, Laura ja Mia Kasper. 2014. Kalliot kaikuvat esihistoriaa elokussa 2014. Lehdistöiedote 15.7.2014. <https://us8.campaign-archive.com/?u=6b15d5ce4a52fe2ea46a93910&id=5111c736c9>.

Kolar, Miriam A. 2013. *Archaeological Psychoacoustics at Chavín de Huántar, Perú*. Stanford, CA: Stanford University.

Lahelma, Antti. 2008. *A Touch of Red: Archaeological and Ethnographic Approaches to Interpreting Finnish Rock Paintings*. Iskos 15. Helsinki: Finnish Antiquarian Society.

Lahti, Tapio 1997. *Akustinen mittaustekniikka*. Raportti 38, 2. painos. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio.

Lassfolk, Kai 2013. ”Fourier-muunnos ja spektrianalyysikuvaajien tulkinta musiikintutkimuksessa, osa 1”. *Musiikin suunta* 35 (1): 57–65.

Lassfolk, Kai. 2014. ”Fourier-muunnos ja spektrianalyysikuvaajien tulkinta musiikintutkimuksessa, osa 2”. *Musiikin suunta* 36 (1): 67–72.

Lassfolk, Kai ja Jaska Uimonen. 2008. ”Spectutils: an audio signal analysis and visualization toolkit for GNU Octave”. Teoksessa *Proceedings of the 11th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-08), September 1–4, 2008, Espoo, Finland*, toim. J. Pakarinen, C. Erkut, H. Penttinen ja V. Välimäki, 289–292.

Lubman, David. 1998. ”Archaeological acoustic study of chirped echo from the Mayan pyramid at Chichén Itzá”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 104: 1763.

Mattioli, Tommasi, Angelo Farina, Philippe Hameau ja Margarita Díaz-Andreu. 2017. ”Echoing landscapes: Echolocation and the placement of rock art in the Central Mediterranean”. *Journal of Archaeological Science* 83: 12–25.

McCormack, Leo, Archontis Politis, Oliver Scheuregger ja Ville Pulkki. 2019. ”Higher-order processing of spatial impulse responses”. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany*. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000685.pdf>

Merimaa, Juha ja Ville Pulkki. 2005. ”Spatial impulse response rendering I: Analysis and synthesis”. *Journal of the Audio Engineering Society* 53.12: 1115–1127.

Miettinen, Timo ja Heikki Willamo. 2007. *Pyhät kuvat kalliossa*. Helsinki: Otava.

Morley, Iain. 2013. *The Prehistory of Music: Human Evolution, Archaeology, & the Origins of Musicality*. Oxford: Oxford University Press.

Murphy, Damian T. 2006. ”Archaeological Acoustic Space Measurement for Convolution Reverberation and Auralization Applications”. *Proceedings of the 9th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06), Montreal, Canada, September 18–20*.

Nielsen, Torben 1994. "Precision Microphones for Measurements and Sound Reproduction." *Microphone Engineering Handbook*. Gayford, M. (toim.). Oxford: Focal Press.

Paulaharju, Samuli. 1932. *Seitoja ja seidan palvontaa*. Helsinki: Suomalaisen Kirjallisuuden Seura.

Qvigstad, J. 1929. *Lappiske eventyr og sagn* 4. Oslo: Aschehoug.

Rainio, Riitta, Antti Lahelma, Tiina Äikäs, Kai Lassfolk ja Jari Okkonen. 2014. "Acoustic Measurements at the Rock Painting of Värrikallio, Northern Finland". Teoksessa *Archaeoacoustics: The Archaeology of Sound*, toim. Linda C. Eneix, 141-152. Myakka City (FL): The OTS Foundation.

Rainio, Riitta, Tiina Äikäs, Antti Lahelma ja Kai Lassfolk. 2017a. "Nauravat kalliot: Pohjois-Suomen pyhien paikkojen kaikututkimus". Teoksessa *Muuttuvat suomalaiset äänimaisemat*, toim. Heikki Uimonen, Meri Kytö ja Kaisa Ruohonen. Tampere: Tampere University Press.

Rainio, Riitta, Antti Lahelma, Tiina Äikäs, Kai Lassfolk ja Jari Okkonen. 2017b. "Acoustic measurements and digital image processing suggest a link between sound rituals and sacred sites in northern Finland". *Journal of Archaeological Method and Theory* 25 (2): 453–474.

Rainio, Riitta, Kristiina Mannermaa ja Juha Valkeapää. 2017c. "Recapturing the sounds and sonic experiences of the hunter-gatherers at Ajvide, Gotland, Sweden (3200–2300 cal BC)". *Journal of Sonic Studies* 15. <https://www.researchcatalogue.net/view/408924/408925>

Reznikoff, Iegor. 1995. "On the sound dimension of prehistoric painted caves and rocks". Teoksessa *Musical Signification: Essays in the Semiotic Theory and Analysis of Music*, toim. Eero Tarasti, 541–558. Berlin: Mouton de Gruyter.

Reznikoff, Iegor. 2002. "Prehistoric Paintings, Sound and Rocks". Teoksessa *Studien zur Musikarchäologie* III, toim. Ellen Hickmann, Anne D. Kilmer ja Ricardo Eichmann, 39–56. Rahden Westfalen: Marie Leidorf.

Reznikoff, Iegor. 2014. "On the Sound Related to Painted Caves and Rocks". Teoksessa *Sounds Like Theory: XII Nordic Theoretical Archaeology Group Meeting in Oulu 25.–28.4.2012.*, toim. Jnne Ikäheimo, Anna-Kaisa Salmi ja Tiina Äikäs, 101–110. Helsinki: The Archaeological Society of Finland.

Reznikoff, Iegor ja Michel Dauvois. 1988. "La Dimension sonore des grottes ornées". *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 85: 238–246.

Rossing, Thomas, F. Richard Moore ja Paul A. Wheeler. 2002. *The Science of Sound*. Third Edition. San Francisco: Addison-Wesley.

Scarre, Chris ja Graeme Lawson, toim. 2006. *Archaeoacoustics*. Cambridge: McDonald Institute for Archaeological Research.

Seitsonen, Oula. 2005. "Shoreline displacement chronology of rock paintings at Lake Saimaa, eastern Finland". *Before Farming: The Archaeology and Anthropology of Hunter-Gatherers* 2005 (1): 1–21.

Siikala, Anna-Leena. 1980. "Mitä kalliomaalaukset kertovat Suomen kampakeraamisen väestön uskomusmaailmasta?" *Suomen antropologi* 4: 177–193.

Skeates, Robin. 2010. *An archaeology of the senses: prehistoric Malta*. New York, NY: Oxford University Press.

Tervo, Sakari, Jukka Pätynen, Antti Kuusinen ja Tapio Lokki. 2013. "Spatial decomposition method for room impulse responses". *Journal of the Audio Engineering Society* 61.1/2: 17–28.

Till, Rupert. 2014. "Sound archaeology: terminology, Palaeolithic cave art and the soundscape". *World Archaeology* 46 (3): 292–304.

Till, Rupert. 2019. "Sound Archaeology and the Soundscape". Teoksessa *Archaeology of Sound, Acoustics and Music: Studies in Honour of Cajsa S. Lund*, toim. Gjermund Kolltveit ja Riitta Rainio. Berlin: Ekho Verlag.

Till, Rupert, Chris Scarre, Raquel Jiménez Pasalodos, Carlos García Benito, Roberto Ontañón, Simon Wyatt, Helen Drinkall, Frederick Foulds ja Manuel Rojo Guerra. 2017. "Cave acoustics in prehistory: Exploring the association of Palaeolithic visual motifs and acoustic response". *The Journal of the Acoustical Society of America* 142 (3): 1332.

Tronchin, Lamberto ja David J. Knight. 2008. "The Acoustical Survival of San Vitale, Ravenna, Italy Through Two Millennia". *Proceedings of the Institute of Acoustics* 30 (3).

Valière, Jean-Christophe, Bénédicte Palazzo-Bertholon, Jean-Dominique Polack ja Pauline Carvalho. 2013. "Acoustic Pots in Ancient and Medieval Buildings: Literary Analysis of Ancient

Texts and Comparison with Recent Observations in French Churches”. *Acta Acustica united with Acustica* 99 (2013): 70–81.

Waller, Steven J. 1993. ”Sound and rock art”. *Nature* 363 (6429): 501.

Waller, Steven J. 2006. ”Intentionality of Rock-art Placement Deduced from Acoustical Measurements and Echo Myths”. Teoksessa *Archaeoacoustics*, toim. Chris Scarre ja Graeme Lawson, 31–39. Cambridge: McDonald Institute.

Waller, Steven J. ja Daniel Arsenault. 2008. ”Echo Spirits Who Paint Rocks: Memegwashio Dwell Within Echoing Rock Art Site Eigf-2”. *American Indian Rock Art* 34: 191–201.

Watson, Aaron ja David Keating. 1999. ”Architecture and sound: an acoustic analysis of megalithic monuments in prehistoric Britain”. *Antiquity* 73: 325–336.

Williams, Michael ja Guillaume Le Dû 2004. ”The Quick Reference Guide to Multichannel Microphone Arrays Design Part II: using Supercardioid and Hypocardioid Microphones.” AES Convension Paper 6059 Presented at the 116th Convention 2004 May 8–11 Berlin, Germany.

Yamasaki, Yoshio ja Takeshi Itow. 1989. ”Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method”. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 10.2: 101–110.

FT Kai Lassfolk (kai.lassfolk@helsinki.fi) toimii musiikkitieteen yliopistonlehtorina Helsingin yliopiston filosofian, historian ja taiteiden tutkimuksen osastossa.

FT, dosentti Riitta Rainio (riitta.rainio@helsinki.fi) on arkeologian akatemiatutkija Helsingin yliopiston kulttuurien osastossa.



Kuva 1: Suomussalmen Väräkallion kalliomaalaus.



Kuva 2: Luumäen Siliävuoren kalliomaalaus.



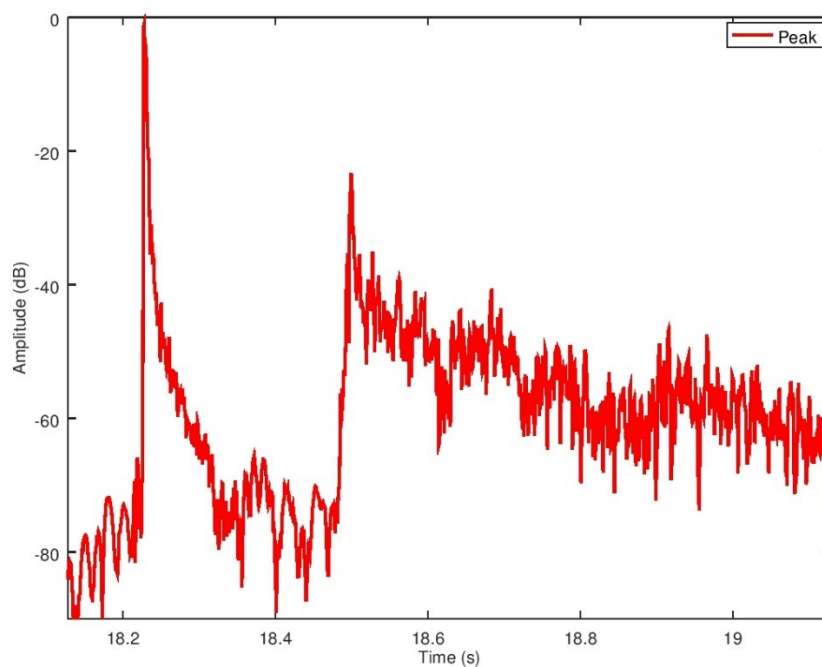
Kuva 3: Kouvolan Verlan kalliomaalaus.



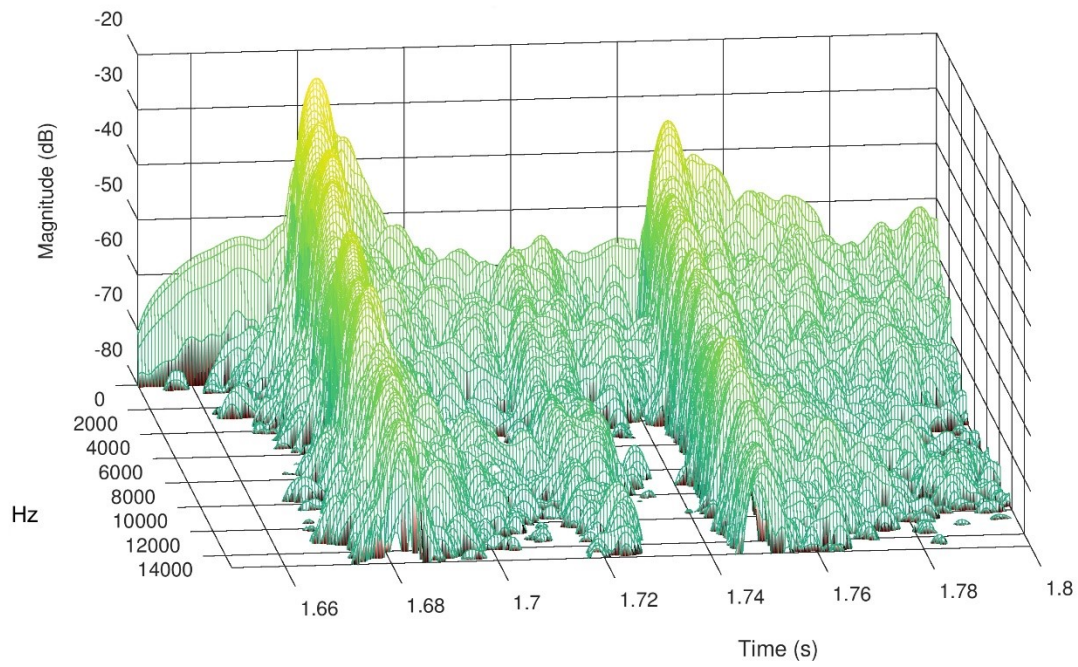
Kuva 4: Mikkelin Verijärven kalliomaalaus.



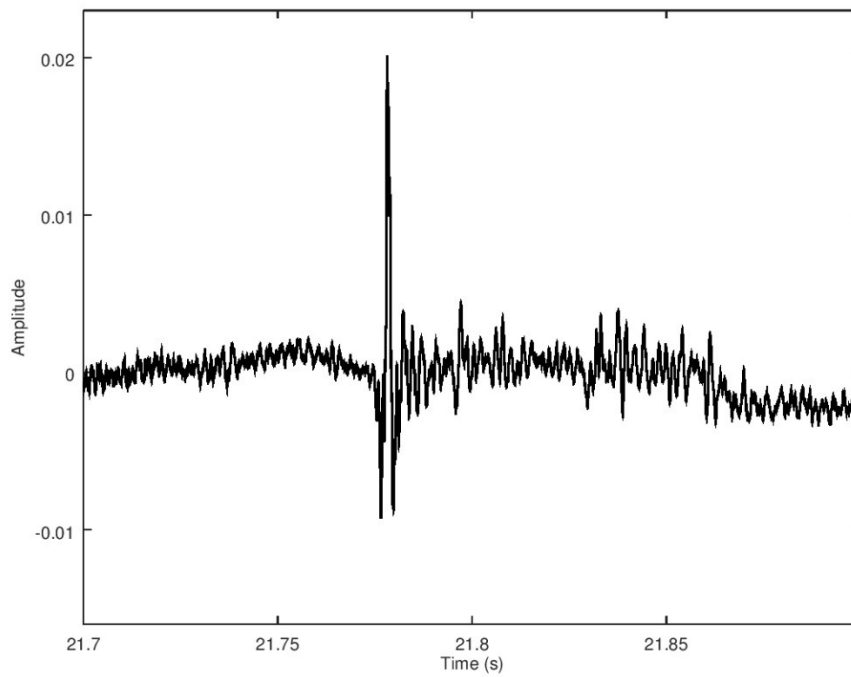
Kuva 5: Kenttätyöäänityskalusto yhteiskuvassa riveittäin vasemmalta oikealle: ylhäällä herätelähteet ART 708-A, lateksi-ilmapallo ja dodekaedrikaiutin, keskellä kuusikanavamikrofonihila (vas.) tetraedrimikrofoni ja Ambeo VR -mikrofoni, alhaalla Zoom H4n ja F8 -tallentimet.



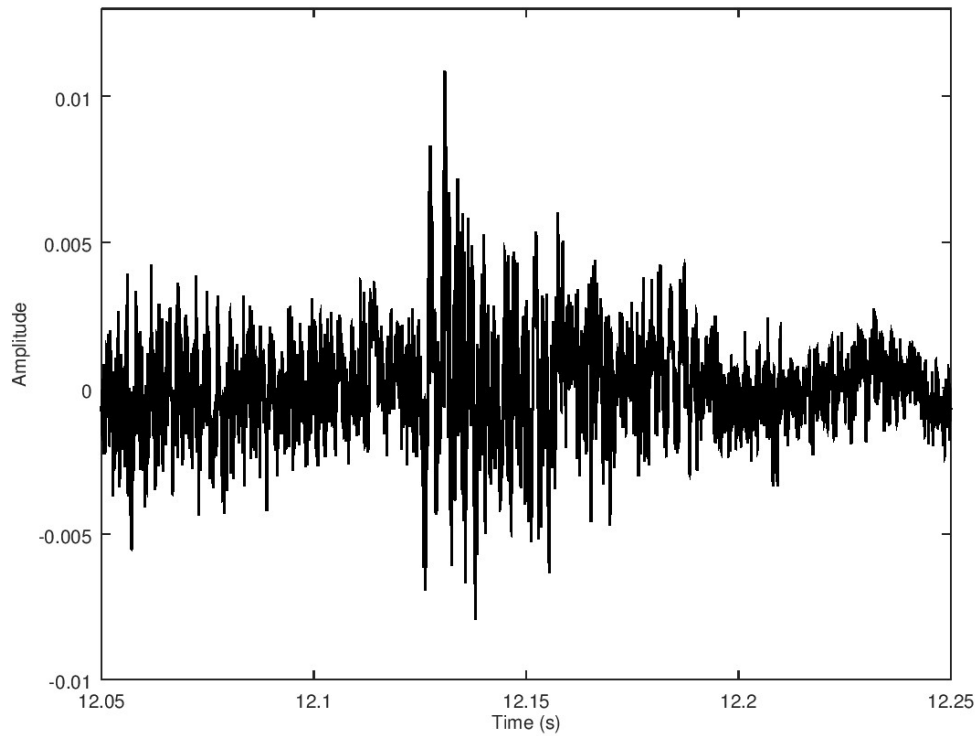
Kuva 6: Luumäen Siliävuoren maalaus kallion amplitudikuvaaja.



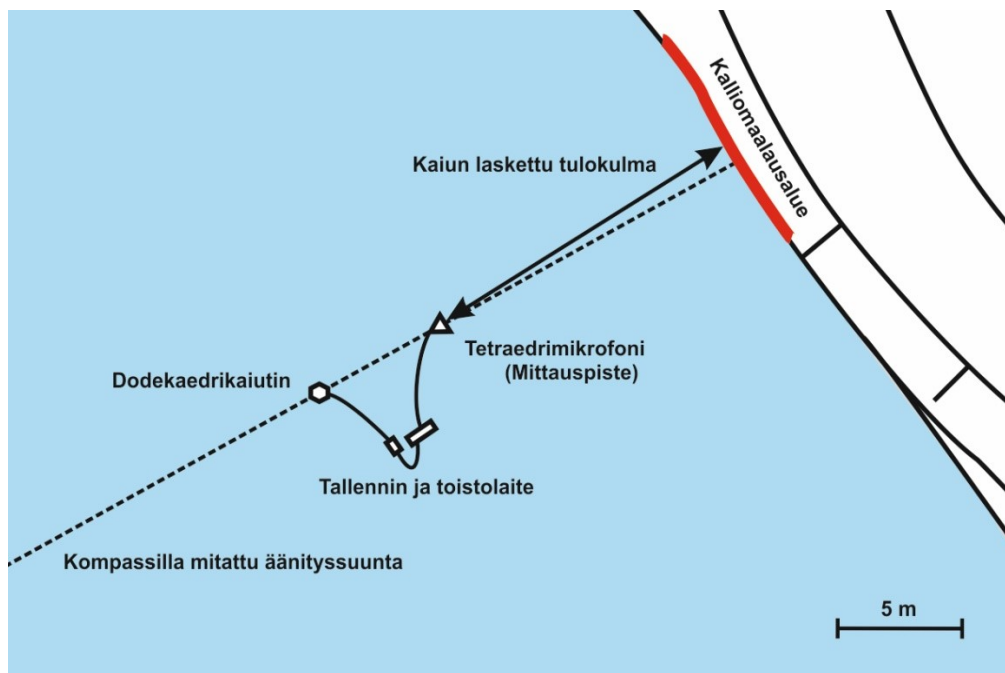
Kuva 7: Spektrogrammi Suomussalmen Värikalliosta.



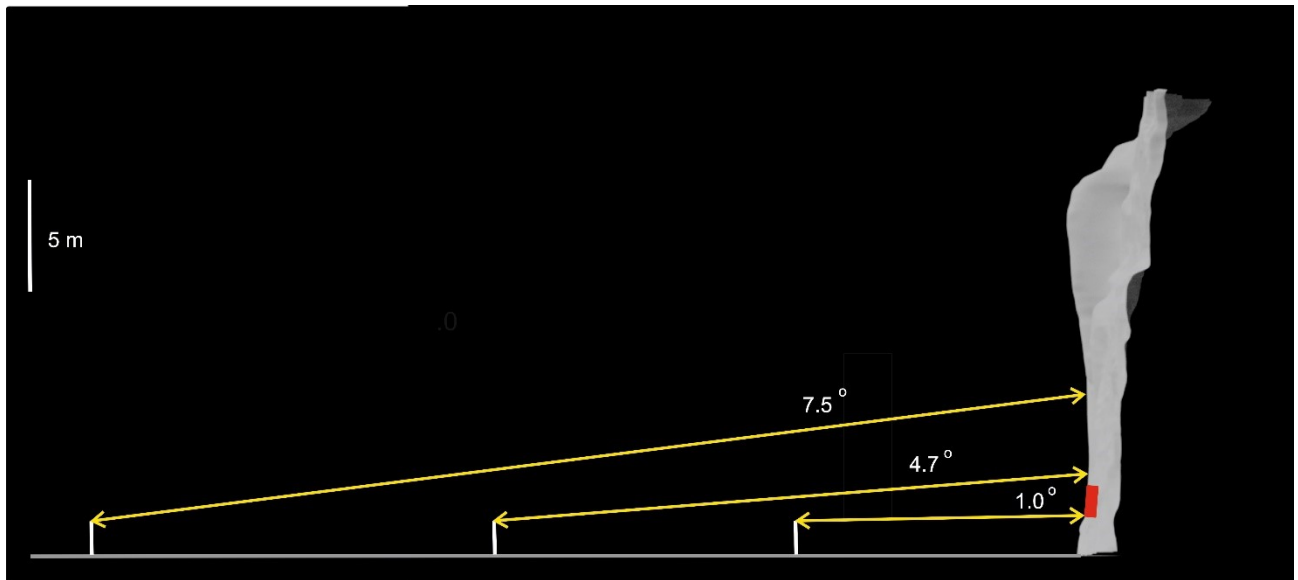
Kuva 8: Kouvolaan Verlan maalausallion kaiun oskillogrammi.



Kuva 9: Mikkelin Verijärven maalausallion kaiun oskillogrammi.



Kuva 10: Luumäen Siliävuoren kaiun horisontaalinen tulokulma.



Kuva 11: Siliävuoren maalauskaallion kaiun vertikaalinen tulokulma kolmessa eri mittauspisteessä.