

## TIILEN OMINAISUUKSIEN TODENTAMISEN AINETTA RIKKOMATTOMAT TESTIMENETELMÄT

Julkisivutiilet, Kytösuontie 9 - 11

### SPOLIA DESIGN OY

”Next Green Step”  
Spolia Design Oy on purettujen materiaalien uudelleen käyttöön erikoistunut asiantuntijaorganisaatio, joka suunnittelee cleantech rakennushankkeita.  
[www.spolia.fi](http://www.spolia.fi)

## 1 JOHDANTO

### Spolia Design Oy

Spolia Design Oy on rakentamisen kiertotalouden asiantuntijayritys, joka suunnittelee, testaa ja kehittää purettavien rakennusten rakennusosista käyttökelpoisia tuotteita uudisrakentamisen käyttöön. Yritys toteuttaa kiertotalouden periaatteita täysimääräisesti ja vähentää uudisrakentamisen hiilijalanjälkeä merkittävästi enemmän kuin nykyisellä rakennusmateriaalien kierrättämisellä.

### Kohde

Kytösuontien tiilien ehjänä purun kokeilun kohteena oli Helsingin yliopistokiinteistöjen rakennus Helsingin Ruskeasuolla osoitteessa Kytösuontie 9-11. Tiilien purukokeilu suoritettiin 5 - 12.07.2023. Hanke oli osa Helsingin kiertotalousklusterin tiilien ehjänä purkamisen kokeilua. Kohteen tiilet olivat sementtipohjaisella laastilla muurattuja reikätiiliä, joiden uudelleenkäyttöön tähtäävää valmistelua on pidetty perinteisesti haasteellisena.

Rakennus on rakennettu vuonna 1979, jolloin oletettavasti myös rakennuksen tiilet on valmistettu. Tiilet purettiin rakennuksen pohjois-julkisivulta. Kohdetta purettaessa pyrittiin analysoimaan ja kehittämään tiilien koneellisia purkumenetelmiä. Kokeilussa kehitettiin myös purettujen tiilien puhdistusmenetelmiä. Tiilille on tehty myös testit, joilla on varmennettu tiilien uudelleenkäyttöön vaadittavat ominaisuudet. Samoilta standardimenetelmillä varmennetuille tiilille tehtiin myös testejä ainetta rikkomattomilla menetelmillä, joiden soveltuvuutta tiilien ominaisuuksien todentamiseen tutkitaan. Tässä dokumentissa käsitellään tiilille tehtyjä epäsuoria ainetta rikkomattomia testejä (NDT) ja tehdään näistä johtopäätöksiä tulevien testimenetelmien ja otoskokojen kehittämiseen.



Kuva 1, Kytösuontie 9-11 tiilien koneellinen purku

## Testauksen tarkoitus ja tavoite

Kytösuontien rakennuksen julkisivutiilien testauksen tarkoituksena on määritellä tiilien olennaiset tekniset ominaisuudet ja todentaa näiden ominaisuuksien toteutuminen. Lisäksi tutkittiin standardoimattomien ainetta rikkomattomien testausmenetelmien soveltuvuutta ominaisuuksien toteutumisen määrittämiseen. Tavoitteena on myös luoda testiohjelma, jolla voidaan tulevaisuudessa testata tiiliä ainetta rikkomatta. Testauksessa hyödynnettiin niin standardoituja testausmenetelmiä, kuin standardoimattomia ainetta rikkomattomia testimenetelmiä (NDT). Standardoitujen menetelmien avulla tiilistä saatiin luotettavaa tietoa, jota verrattiin ainetta rikkomattomiin menetelmiin. Tavoitteena on löytää mahdollinen korrelaatio standardoitujen ja ainetta rikkomattomien menetelmien välillä, jotta ainetta rikkomattomia menetelmiä voitaisiin hyödyntää tulevaisuudessa paremmin ja säästää näin resursseja, aikaa sekä testeissä rikkoutuvia tiiliä. Tämä dokumentti käsittelee ainetta rikkomattomia testimenetelmiä. Standardoitujen testien tuloksista lisätietoa löytyy liitteestä 2.

Testiohjelmassa esitetyt ainetta rikkomattomat testimenetelmät perustuvat aiheutta tutkivan väitöskirjatutkija Aapo Räsänen tutkimuksiin uudelleenkäytettävien tiilien ominaisuuksien todentamisesta epäsuorin menetelmin. Epäsuoria testimenetelmiä ovat muun muassa tiilien ulkonäön vertailu tiilierän sisällä, tiilien iskuäänen (resonanssitaajuuden) korkeuden määrittäminen ja vertailu, ultraäänimittaukset sekä tiilien ohuthietutkimukset (Räsänen, 2022).

Kytösuontie 9-11:n julkisivutiilille tehdyissä ainetta rikkomattomissa (NDT) testeissä hyödynnettiin aiemman tutkimuksen perusteella potentiaalisimpia testimenetelmiä: tiilen iskuäänen korkeuden (resonanssitaajuus) määrittystä sekä tiilen ultraäänimittauksia. Näihin testeihin pyrittiin löytämään menetelmät, joilla testit olisivat mahdollisimman hyvin vakioitavissa ja toistettavissa. Testien otoskoot eivät noudata suoraan aiemman tutkimuksen perusteella määritettyjä ohjeellisia otoskokoja, vaan raportissa pyritään ottamaan kantaa tarvittavan otoskoon määrittämiseen sekä otoskoon määrittämisen kehittämiseen tulevaisuudessa.

## Ohjaavat standardit

Uudelleenkäytettävien tiilien ominaisuuksien todentamiseen ei ole toistaiseksi olemassa erillistä standardoitua testaustapaa, mutta Antti Koposen Helsingin kiertotalousklusterille toteuttama ehjänä irrotettavien rakennustuotteiden kelpoisuuden osoittamisen määrittävä työkalu- taulukko on pisimmälle viety ohjeistus ominaisuuksien todentamiseen ja se on esitelty myös rakennusvalvontojen TOPTEN- ryhmälle. Ominaisuuksien todentamiseen hyödynnetään soveltuvilta osin uusien tiilien ominaisuuksien todentamiseen tarkoitettuja testausmenetelmiä.

Suomessa käytettäviltä uusilta tiililtä vaadittavat ominaisuudet ja vaatimustasot on esitetty Suomen kansallisessa standardissa SFS 7001:2013. Tiilien ominaisuuksien vaatimukset riippuvat tiilen tulevasta käyttökohteesta.

## 2 TODENNETTAVAT OMINAISUUDET JA OTOSKOOT

Edellä esitellyn kelpoisuuden osoittamisen määrittävän työkalun perusteella kuhunkin käyttötarkoitukseen uudelleenkäytettävälle tiilille on määritetty ominaisuudet, testit ja testien tarvittavat otoskoot (Koponen, 2023). Kytösuontien 9-11 tiilille asetettiin todennettavat ominaisuudet uudelleenkäytettävien tiilien taulukoiden perusteella. Tuleva käyttötarkoitus

määrittää tarvittavia testejä ja testien otoskokoja. Kyseisten tiilien todennäköisimmäksi tulevaksi käyttötarkoitukseksi arvioitiin ei kantava julkisivu, joka on ollut myös tiilien aiempi käyttötarkoitus. Tiiliä puhdistettiin kokeilun aikana noin 760 kappaletta, jonka oletettiin olevan tiilten toimituserän koko. Toimituseräkohtainen testausmäärä määrittyy toimituserän koon perusteella. Toimituserän sisällä tiilten tulee olla samanlaisia, samasta purkukohteesta ja samoista olosuhteista. Kaikki Kytösuontie 9-11 kohteesta puretut tiilet ovat samanlaisia ja ne ovat kaikki samalta pohjoisjulkisivulta samoista olosuhteista. Tiilten alkuperäisiä tuotetietoja ei ollut saatavilla.

Seuraavassa taulukossa on Koposen laatimasta taulukosta tiivistetysti esitetty yleislaastilla muuratun poltetun U-tiilen todennettavat ominaisuudet sekä toimituseräkohtaiset testausmäärät ei kantavassa julkisivussa (harmonisoitu tuotestandardi EN 771-1+A1:2015) (Koponen, 2023). Tämän lisäksi standardoitujen testimenetelmien rinnalle määritettiin käytettävät ainetta rikkomattomat testimenetelmät, jotka on esitetty taulukossa todennettavien ominaisuuksien kohdalla suluissa.

Taulukko 1, Tiilen todennettavat ominaisuudet, testit ja otoskoot

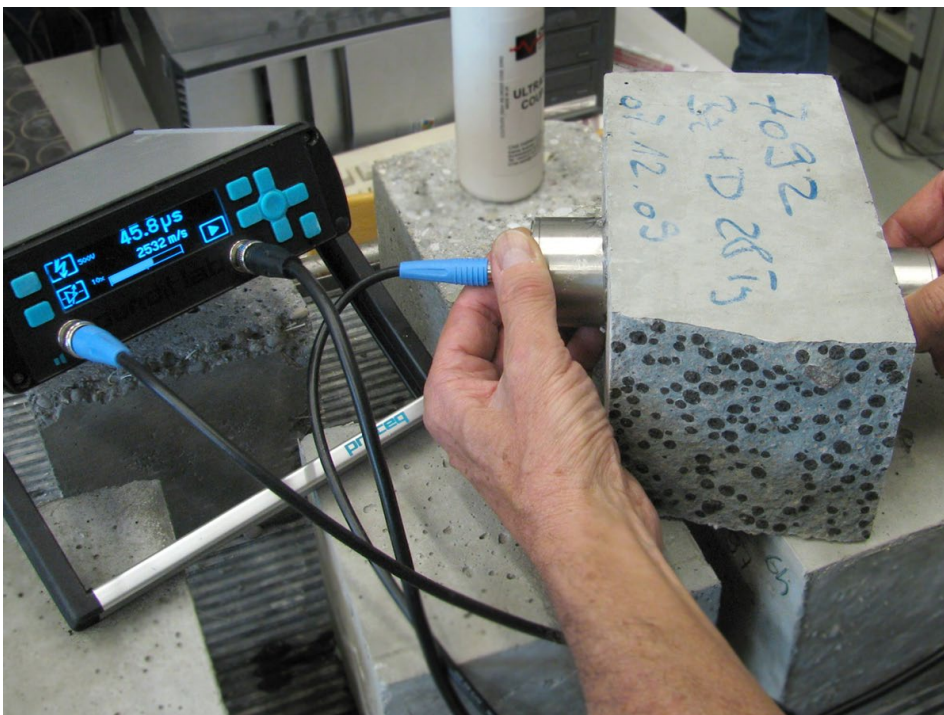
<b>Mitat ja mittapoikkeamat</b>	Mitataan mittanauhalla	3 testinäytettä / 10 000 tiiltä
<b>Kappaleen muoto</b>	Kuvataan tiilien rei'itys	3 testinäytettä / 10 000 tiiltä
<b>Puhtaus</b>	Silmämääräinen tarkistus	10 testinäytettä / 5 000 tiiltä
<b>Nurkat</b>	Silmämääräinen tarkistus	10 testinäytettä / 5 000 tiiltä
<b>Puristuslujuus</b>	Standardoitu puristustesti, EN 772-1 (Resonanssitaajuuden määrittäminen, ultraäänimittaus)	3 testinäytettä / 5 000 tiiltä (kategoria II tiili) 6 testinäytettä / 5 000 tiiltä (kategoria I tiili)
<b>Vedenimukyky</b>	Standardoitu puristustesti, EN 772-21 (Resonanssitaajuuden määrittäminen, ultraäänimittaus)	3 testinäytettä / 10 000 tiiltä
<b>Vesihöyrynläpäisevyys</b>	Standardoitu vesihöyrynläpäisevyyden testi, EN 17 (Resonanssitaajuuden määrittäminen, ultraäänimittaus)	
<b>Jäätymis-sulamiskestävyys</b>	Standardoitu jäätymis-sulamiskestävyys testi, SFS 7001 (Resonanssitaajuuden määrittäminen, ultraäänimittaus)	1 mittaus (5 tiiltä) / 10 000 tiiltä

### 3 TESTIMETODIT

#### 3.1 ULTRAÄÄNIMITTAUKSET

Ultraäänimittauksen ja tulosten raportoinnin toteutti SWECO FINLAND OY:n Ville Ruotsalainen ja Jaakko Roininen. Lisää tietoa mittauksista löytyy liitteestä 2.

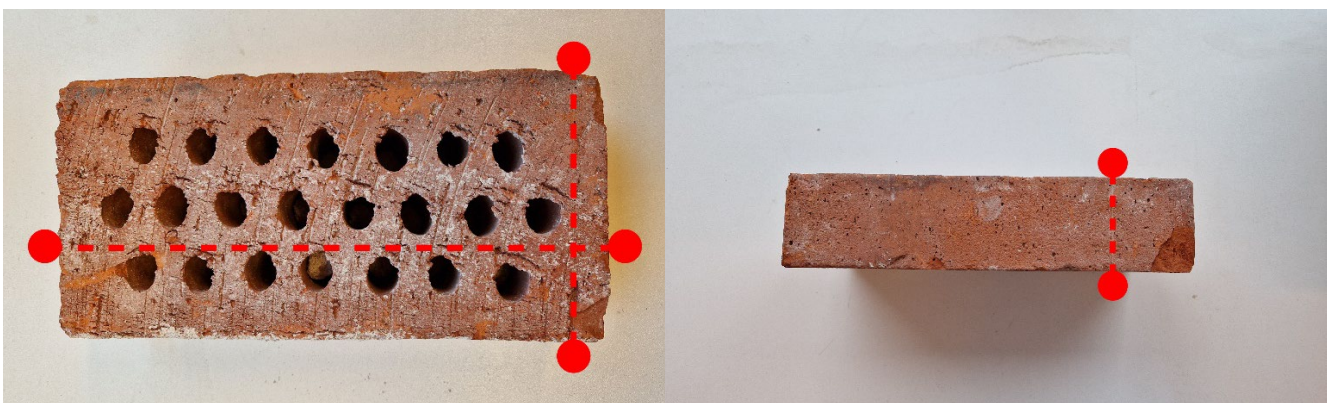
Ultraäänen etenemisnopeus on mitattu standardia SFS-EN 12504-4 soveltaen mittalaitteella Proseq Pundit Lab+ ja 54kHz mittapäällä. Mittaus on tehty tiilen pituus-, leveys-, ja syvyysuunnassa. Tulos on ilmoitettu laskennallisena ultraäänen nopeutena m/s, joka on saatu jakamalla mitattu matka mitatulla ajalla.



Kuva 2, Tiilen ultraäänimittauksiin käytetty mittauslaite

Kuva: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-lab>

Tiilistä mitattiin ultraäänen nopeus kolmesta eri kohdasta: pituus-, leveys ja korkeussuuntaan.



Kuva 3, Ultraäänimittausten mittaussuunnat

## 3.2 ISKUÄÄNEN KORKEUS (RESONANSSITAAJUUS)

Tiilen iskuäänen korkeutta tiilen ominaisuuksien todentamisessa on hyödynnetty aiemmassa tutkimuksessa korvakuulo-metodilla, jolla on pyritty laittamaan tiilet sointikorkeuden perusteella järjestykseen. Järjestyksen avulla on pyritty löytämään erän sisällä poikkeavat tiilet, jotta testausta on voitu kohdentaa näihin tiiliin. Taustalla koejärjestelylle on oletus, että soinniltaan korkeampitaajuiset tiilet ovat kovempia ja näin ollen puristuslujuudeltaan parempia. Puolestaan korkeampitaajuisilla tiilillä oletetaan olevan pienempi vedenimukyky sekä vedenalkuimunopeus. Tähän korrelaatioon viittaavista tutkimustuloksista on raportoitu väitöskirjatutkija Aapo Räsänen tutkimuksessa epäsuorien testimenetelmien soveltamisessa uudelleenkäytettävien tiilien ominaisuuksien todentamiseen (Aapo Räsänen, Tiilen uudelleenkäytettävyyden arviointi). Kytösuontien tiilien testaukseen hyödynnettiin korvakuulometodin sijaan iskuäänestä tallennetun äänispektrin analysointia, jota avataan seuraavassa.

Mittauksen ja tulosten raportoinnin toteutti AKUKON OY:n johtava akustikko Timo Peltonen. Lisää tietoa löytyy liitteestä 5: *Tiilen resonanssitaajuuden mittaukset*.

### TAUSTA

Rakennusmateriaalien kierrätykseen erikoistunut Spolia Design pyrkii kehittämään menetelmiä rakennuksista purettujen tiiliskivien rakenteellisen jäykkyyden ja kunnan arviointia varten. Toimeksianto liittyy testaukseen, jossa tiiliskiven kuntoa pyritään selvittämään kohdistamalla siihen mekaaninen impulssi, ja mittaamalla siitä aiheutuva akustinen vaste eli tiilen helähdys. Iskusta tallennetulle äänisignaalille voidaan tehdä kapeakaistainen spektrianalyysi ja määrittää kappaleen resonanssitaajuudet tarkasti.

Spolian tarkoituksena on verrata akustisen testauksen vasteita ja resonanssitaajuuksia samoille tiilille tehtävien NDT-laboratoriotestien tuloksiin. Tavoitteena on selvittää, löytyisikö näiden välillä sellaista korrelaatiota, jonka avulla akustisella testillä voisi erottaa hyväkuntoiset ja vaurioituneet tiilet toisistaan. Parhaimmillaan akustinen testaus voisi muodostaa kevyen, nopean, edullisen ja kenttäkelpoisen vaihtoehdon laboratoriossa tehdylle NDT-testaukselle.

Kohdekäynnillä tarkasteltiin akustisen testauksen lähtökohtia, edellytyksiä, menetelmiä sekä mittaukseen ja analyysiin soveltuvia työkaluja. Lisäksi tehtiin koeluontoisia testejä yksittäisille tiilille. Paikalla olivat Spolia Design/Petri Salmi, Mikko Piitulainen ja Santeri Paronen, sekä Akukon Oy/Timo Peltonen.

## MENETELMÄT

Tiilen resonanssitaajuus mitattiin tukemalla tiili betonilattialle kahden kapean ja joustavan kaistan varaan, ja kohdistamalla pyöreäpäisellä vasaralla kevyt isku tiilen keskelle yläpintaan. Mittaus tehtiin sekä kyljellään että lappeellaan lepäävälle tiilelle.

Tukipisteinä toimivat joustavat kaistat sijoitettiin kohtiin  $0,224 * L$  tiilen päädyistä, jossa  $L$  on tiilen pisin mitta. Tällä sijoittelulla varmistettiin, että tiilen resonanssit pääsevät heräämään vapaasti.



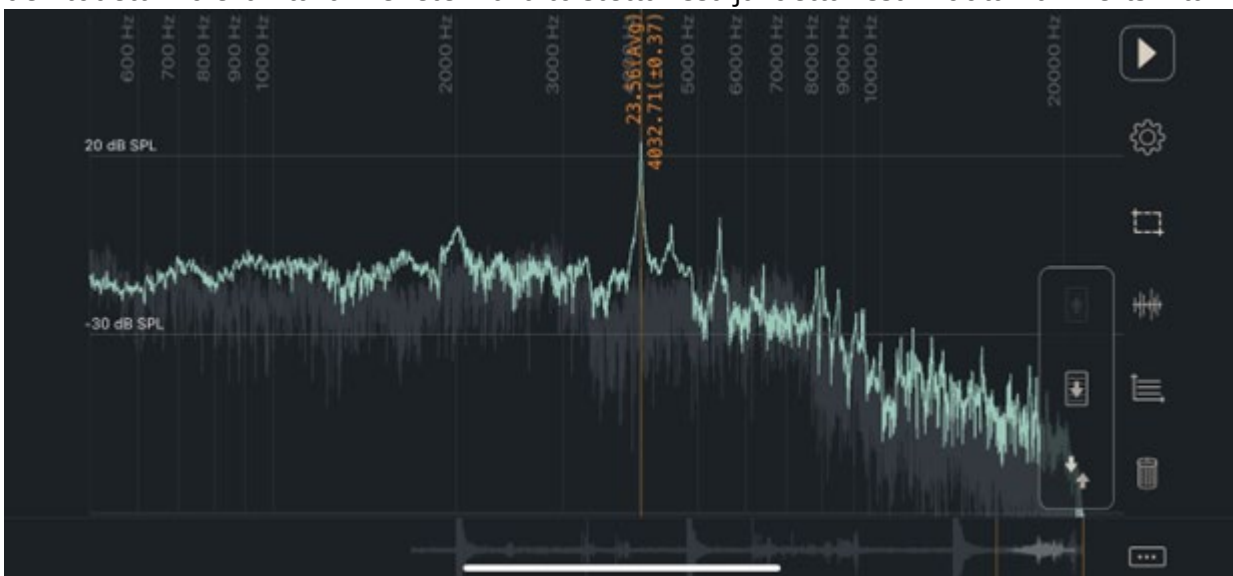
Kuva 4, Resonanssitaajuuden mittausten testialusta

Mittaus tehtiin rauhallisessa ympäristössä, jossa ei ollut voimakkaita hälyääniä.

## Älypuhelin mittauslaitteena

Mittauslaitteeksi soveltuu yksinkertaisimmillaan älypuhelin, jossa on sopiva äänisignaalin tallennukseen ja kapeakaistaspektri-analyysiin (FFT) kykenevä sovellus. Esimerkkinä käytettiin IOS-mobiililaitteilla toimivaa Sound Spectrum Analysis -appia: <https://usefulmobileapps.com/en/audio-spectrum-analyzer.php>

Kuvassa on esimerkki sovelluksella tiilikiven iskusta tallennetusta kapeakaistaspektristä. Kursori on sijoitettu tiilen perustaajuuden eli alimman selkeän resonanssihuipun kohdalle. Resonanssitaajuuden todettiin olevan tällä menetelmällä toistettavissa ja luettavissa muutaman hertsin tarkkuudella.



Kuva 5, Sound Spectrum Analysis -sovelluksen näkymä

Sovellus mahdollistaa mitattujen signaalien ja spektrien tallentamisen, nimeämisen ja lähettämisen edelleen. Sovelluksen asetukset on listattu liitteessä 5: *Tiilen resonanssitaajuuden mittaukset* – raportin liitteessä A.

### Läppäri signaalin tallennuksessa

Mittaus toistettiin käyttäen Windows 10 -kannettavaa ja sen sisäistä mikrofonia. Äänitykset tehtiin käyttäen ilmaista Ocenaudio-audioeditoria: <https://www.ocenaudio.com/>. Vaikka mittaus onnistuu sisäiselläkin mikrofonilla, ulkoisella mikrofonin käyttö antaisi lisää mahdollisuuksia. Tällöin mikrofoni ja tietokone voidaan sijoittaa käytön kannalta toimivimpiin paikkoihin. Mittauksiin soveltuu esim. edullinen USB-mittausmikrofoni tai USB-äänikortti ja siihen liitetty mikrofoni.

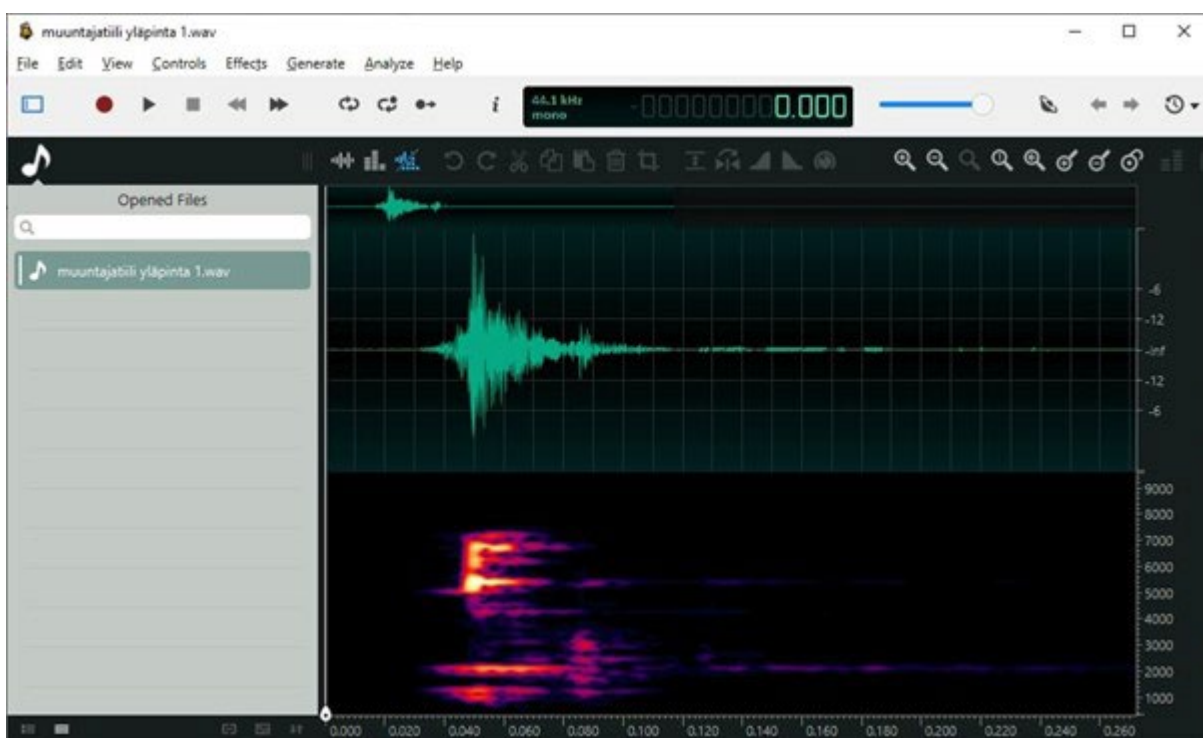
Taajuusvasteella ei ole suurta merkitystä, kunhan mikrofoni kykenee tallentamaan noin 100 Hz – 10 kHz kaistan, ja sen herkkyys on sopiva varmistamaan riittävän signaalikohinasuhteen.

Tallennuksen yhteydessä on varmistettava, etteivät mikrofonin tallentaman äänisignaalin huiput ole niin voimakkaita, että ne leikkaantuvat pois signaalista (clipping). Aikatason signaalin huippujen leikkautuminen sotkee myös signaalin spektrin, jolloin tulokset vääristyvät eikä niitä voi hyödyntää.

Mikrofonisignaalin tasoja voidaan säätää äänikortin tai Windowsin mikserisovelluksesta, tai mikrofoni voidaan sijoittaa hieman kauemmas testattavasta tiilestä. Rauhalliset iskut riittävät mittauksen tekemiseen.

Audioeditorilla äänitetystä tallenteesta (44100 Hz, 16 bit, mono) rajattiin yksittäiset iskut noin 1 sekunnin mittaisiin pätkiin, jotka tallennettiin yksittäisiksi wav-tiedostoiksi. Iskun on hyvä alkaa läheltä pätkän alkua.

Kuvassa näkyy yksittäisen iskun aikataason signaali sekä sen alla signaalista laskettu spektrogrammi, joka esittää taajuusjakauman vaihtelua ajan funktiona. Voimakkaimmat spektrihiiput näkyvät spektrogrammissa kirkkaana.

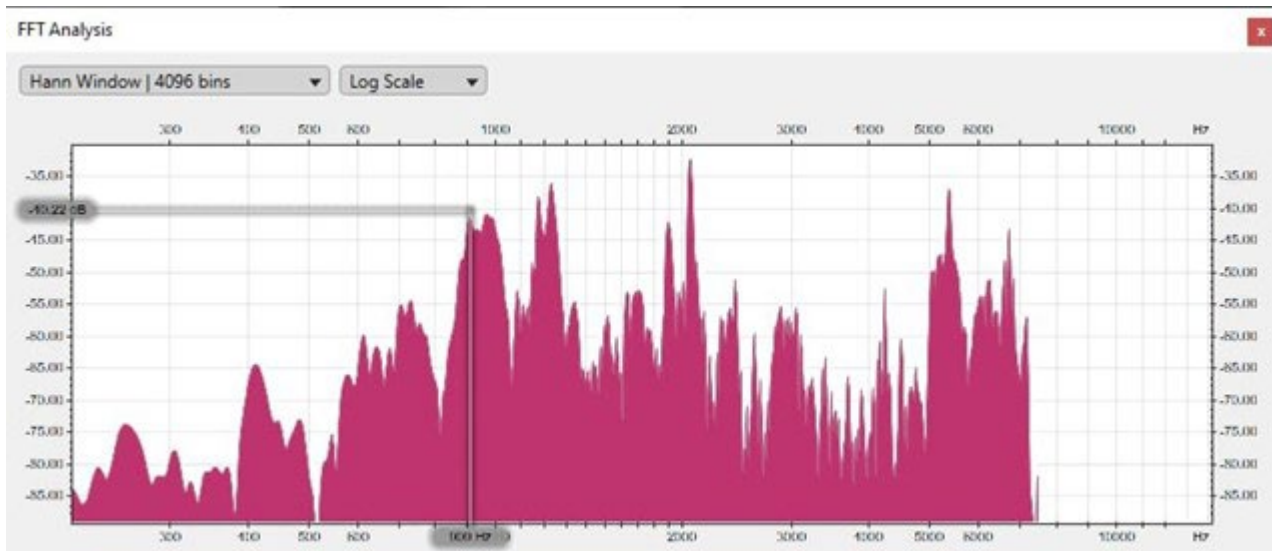


Kuva 6, Ocenaudio - audioeditorin näkymä



## Kapeakaistaspektrianalyysi audioeditorilla

Ocenaudio tarjoaa rajalliset työkalut kapeakaistaspektrin tarkasteluun. Aikatason impulssista valitaan voimakkain osa maalaamalla, jonka jälkeen Analyze/FFT Analysis-toiminto tuottaa kapeakaistaspektrin. (Asetukset: Hann Window/4096 bins, Log scale). Kuvaajaan voi zoomata hiirellä.

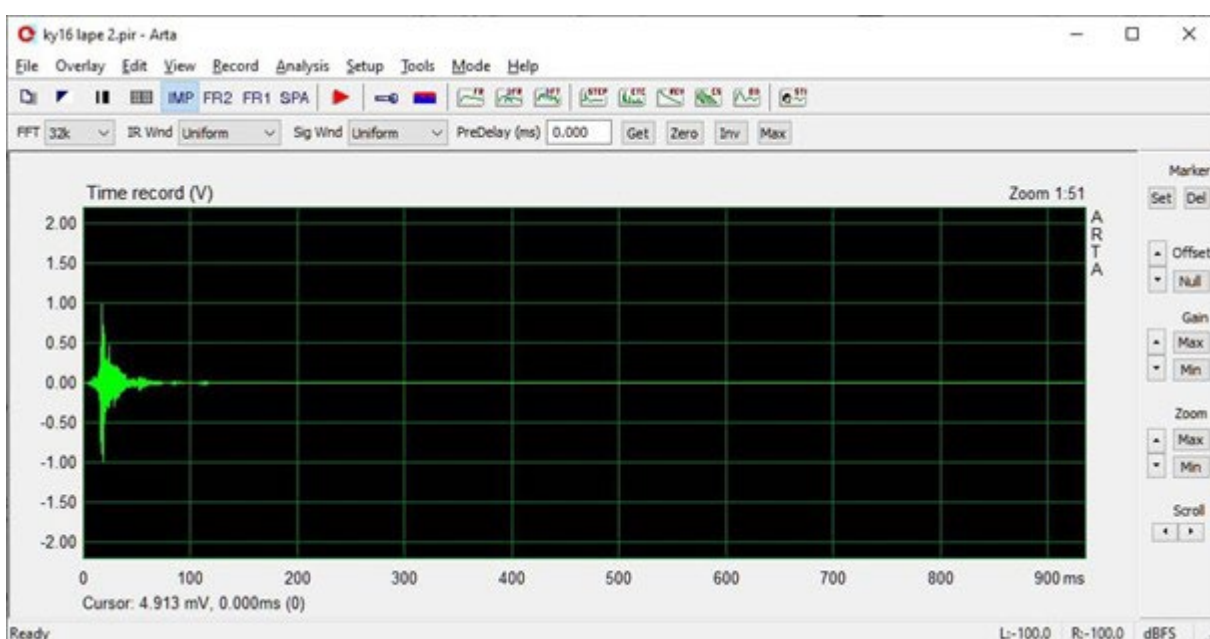


Kuva 7, Analyze/FFT Analysis-toiminnon tuottama kapeakaistaspektri

## Kapeakaistaspektrianalyysi Arta-ohjelmalla

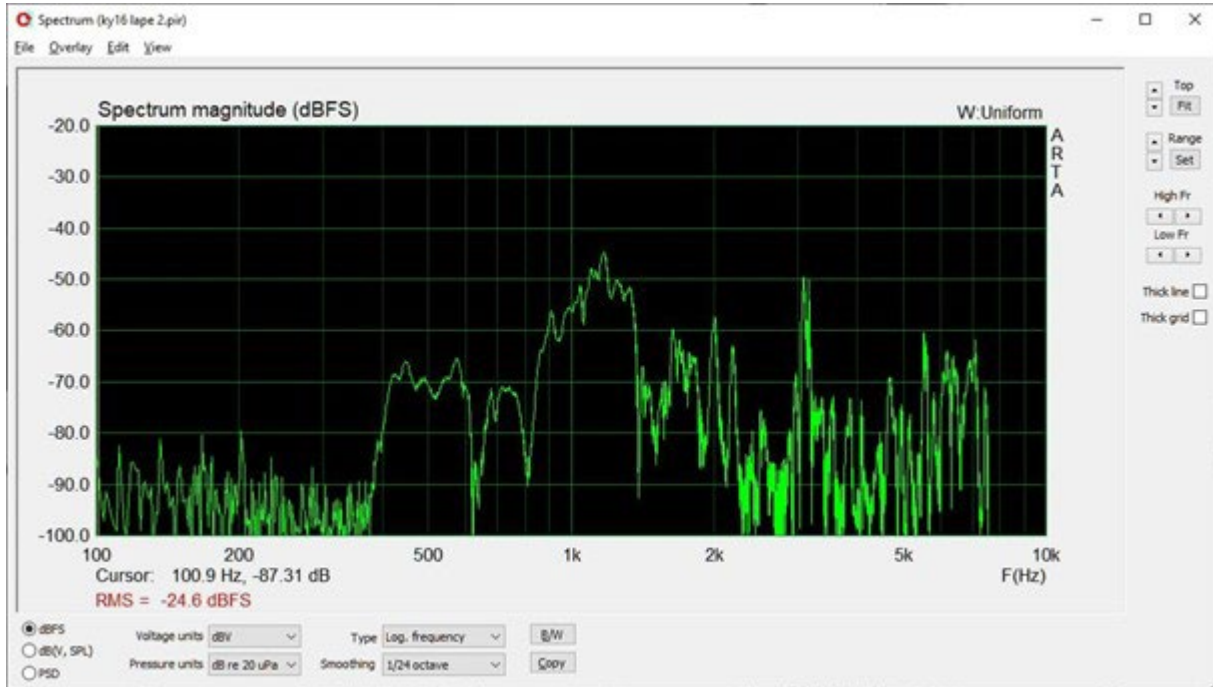
Wav-tiedostoon tallennettujen yksittäisten iskujen äänitallenteiden tarkempi ja helposti toistettava spektrianalyysi onnistuu esim. kaupallisella Arta-ohjelmalla: <https://artalabs.hr/download.htm>

Signaali ladataan valitsemalla File/Import/.WAV file. Näkymä rajataan koko signaalin mittaiseksi napsauttamalla oikean laidan työkalupalkista Zoom Min -painiketta.



Kuva 8, Arta-ohjelman näkymä

Varmista, että FFT-asetukset kuvaajan yläpuolella työkalurivillä ovat FFT: 4k, Uniform, Uniform. Kapeakaistaspektrin saa näkyviin valitsemalla Analysis/Unsmoothed DFT frequency response/Spectrum, tai napsauttamalla ylemmän työkalurivin DFT-painiketta:



Kuva 9, Kapeakaistaspektri Arta-ohjelmalla

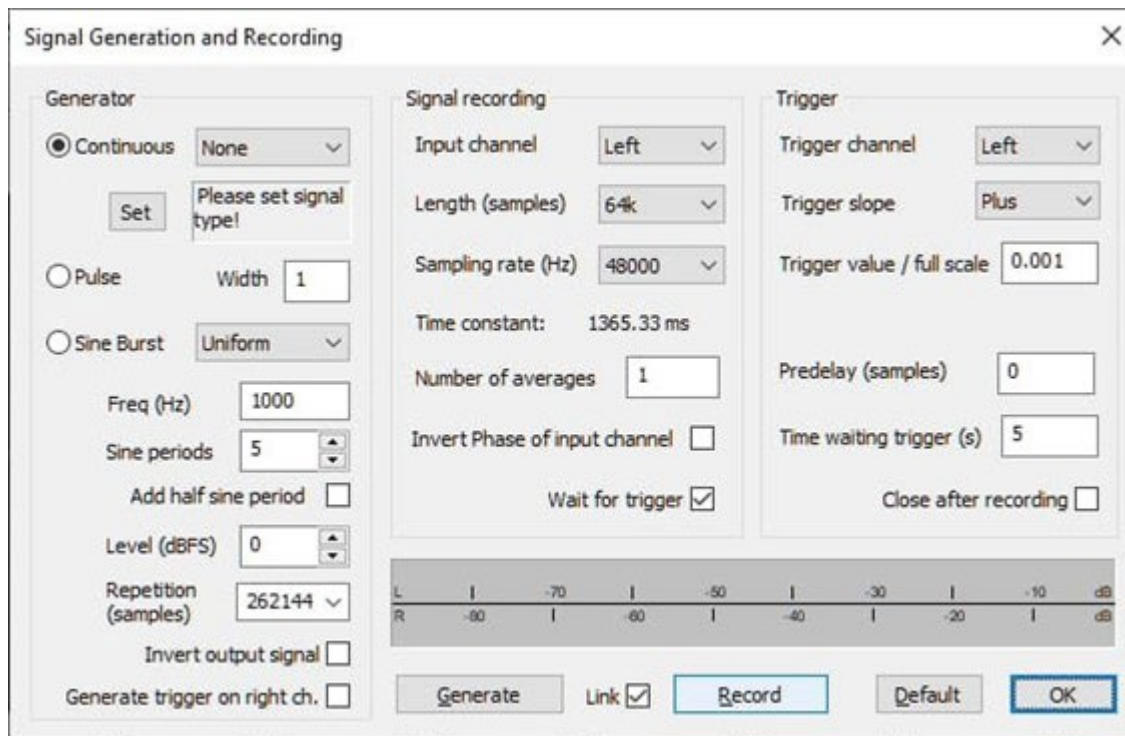
Kapeakaistaspektrin asetukset näkyvät kuvassa. Kuvaajaa napsauttamalla saa näkyviin kursorin, jonka avulla halutun taajuushuipun voi hakea ja lukea sen arvon kuvaajan alapuolelta (tässä 979.8 Hz).

Mitatut spektrit voi tallentaa jatkokäsittelyä varten numeerisesti (File/Export) tai bittikarttana (Edit/Copy). Bittikarttaan saa halutessaan valkoisen taustan (Edit/BW background color).

Mitatun spektrin voi myös lukita kuvaajan taustalle niin, että se on nähtävissä vertailukohtana myös seuraavissa mittauksissa (Overlay/Set as Overlay).

Uuden tiedoston voi avata ohjelman pääikkunasta sulkemalla ensin Spektri-ikkunan.

Arta-ohjelmalla on mahdollista myös tehdä mittaus ja tallentaa ääntä analysoitavaksi suoraan: Valitse pääikkunassa Record/Signal Time Record, ja varmista että asetukset ovat seuraavat:



Kuva 10, Arta-ohjelman äänettallennustoiminto

Napsauta ikkunan alareunan Record-painiketta. Mittaus käynnistyy näillä asetuksilla automaattisesti, kun mikrofoniin tuleva äänitaso on riittävän voimakas. Tallennus kestää runsaan sekunnin (65536/48000 s), joka riittää impulssin tallentamiseksi. Pitempikin aika on säädettävissä, jos on tarve. Napsauta mittauksen lopuksi OK-painiketta.

Valitse pääikkunan oikean laidan työkalupalkista jälleen Zoom Min, niin saat koko signaalin näkyviin. Tallennus onnistuu File-valikosta ja spektrianalyysi kuten edellä kuvattu.

## 4 TESTITULOKSET JA ANALYSOINTI

Seuraavassa avataan tiilen ainetta rikkomattomien testimenetelmien tuloksia. Testitulokset esitellään ultraäänimittauksista sekä tiilen resonanssitaajuuden määrittämisen mittauksista.

### 4.1. ULTRAÄÄNI

SWECO FINLAND OY, 1.11.2023

Ville Ruotsalainen, laatija, osastopäällikkö

Jaakko Roininen, tarkastaja, työnjohtaja

Seuraavassa on esitetty toteutettujen ultraäänimittausten testitulokset. Näiden mittausten lisäksi samoille tiilille suoritettiin ominaisuuksien vertailtavuuden vuoksi standardoituja testejä, joiden tuloksista löytyy lisätietoa liitteestä 2: *Raportti\_25010882\_Tiilen suorituskyvyn arviointi*.

## Ultraäänimittaukset

Kappaleista mitattiin ultraääninen nopeus ennen jäädytys-sulatuskoetta sekä kokeen jälkeen. Mittaukset suoritettiin myös vertailukappaleille. Tulos on ilmoitettu jakamalla mitattu pituus mitatulla ajalla.

Taulukko 2, Puristuslujuuskappaleista mitatut ultraääninnopeudet sekä kappalekohtaiset keskiarvot.

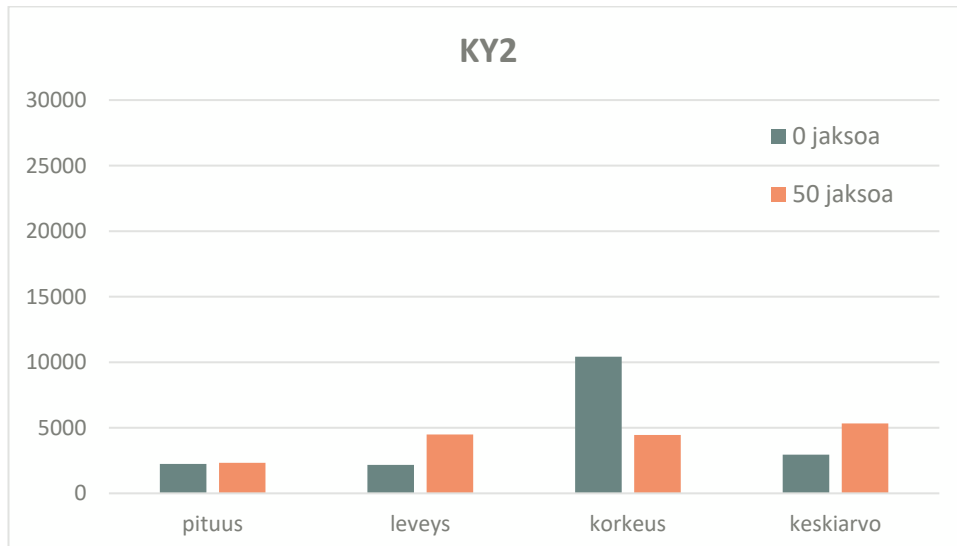
Jäädytys-sulatus-kappaleet		Mittaussuunta						Keskiarvo (m/s)
		Pituus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Leveys (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Korkeus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	
KY2	0-jaksoa	260	2243	128	2170	73	10429	2947
	50-jaksoa		2334		4491		4451	5332
KY9	0-jaksoa	260	3509	128	3596	73	10139	5747
	50-jaksoa		7831		25600		4451	12628
KY18	0-jaksoa	260	3089	128	3546	73	16977	7870
	50-jaksoa		5830		24151		4424	11468
Vertailukappaleet		Mittaussuunta						Keskiarvo (m/s)
		Pituus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Leveys (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Korkeus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	
KY3	0-jaksoa	260	3812	128	3939	73	22121	9957
			6616		7485		4650	6250
KY14	0-jaksoa	260	3179	128	3060	73	13774	6690
			6452		75294		3946	28557
KY17	0-jaksoa	260	3529	128	2864	73	11587	5993
			7927		8889		6636	7817

Testituloksista koherentin oli tiilen pituussuunnassa saatu tulos, joka on taulukossa ensimmäisessä tulos-sarakkeessa. Muissa suunnissa esiintyi merkittävää vaihtelua. Testituloksissa **keltaisella merkattu** tulos on mitattu ennen tiilille tehtyjä muita testejä. **Sinisellä merkattu** tulos on puolestaan mitattu muiden testien jälkeen. Ylemmässä taulukossa merkatut tulokset tehty tiilille, joita on pidetty vesihautteessa sekä pakkasessa jäädytys-sulatustestien mukaisesti. Alemmassa taulukossa on esitetty vertailukappaleiden mittaustulokset, jotka on jäädytys-sulatustestien kanssa samassa rytmissä pidetty vesihautteessa, mutta niitä ei ole pakastettu välissä. Myös puristuslujuudeltaan testatuille tiilille tehtiin ultraäänimittaukset. Alla olevat testitulokset on tehty tiilille ennen puristuslujuus-testejä.

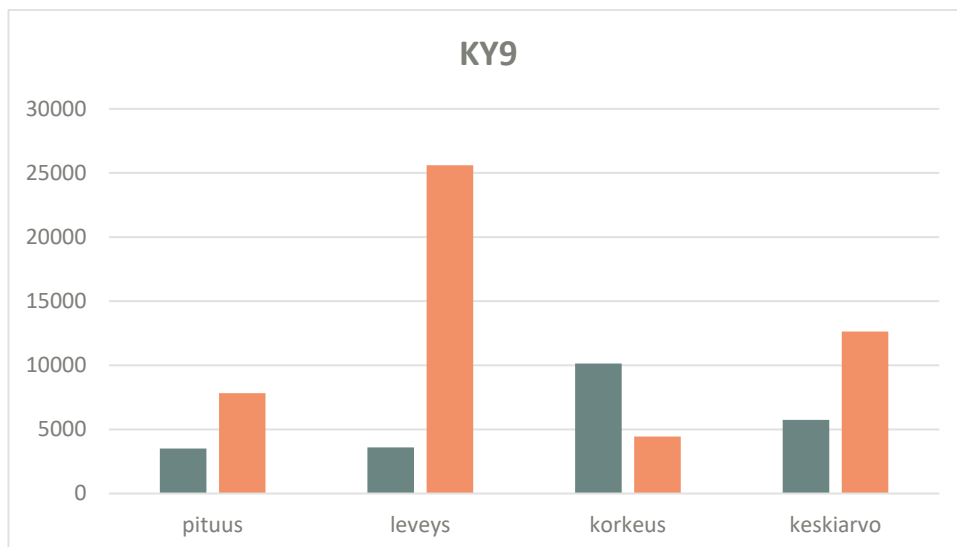
Taulukko 3, Puristuslujuuskappaleista mitatut ultraääninnopeudet sekä kappalekohtaiset keskiarvot

Tunnus	Mittaussuunta						Keskiarvo (m/s)
	Pituus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Leveys (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Korkeus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	
KY1	258	4148	124	1994	73	1174	3819
KY8	264	3204	127	2480	73	4056	3247
KY16	261	3457	126	2303	73	4506	3422

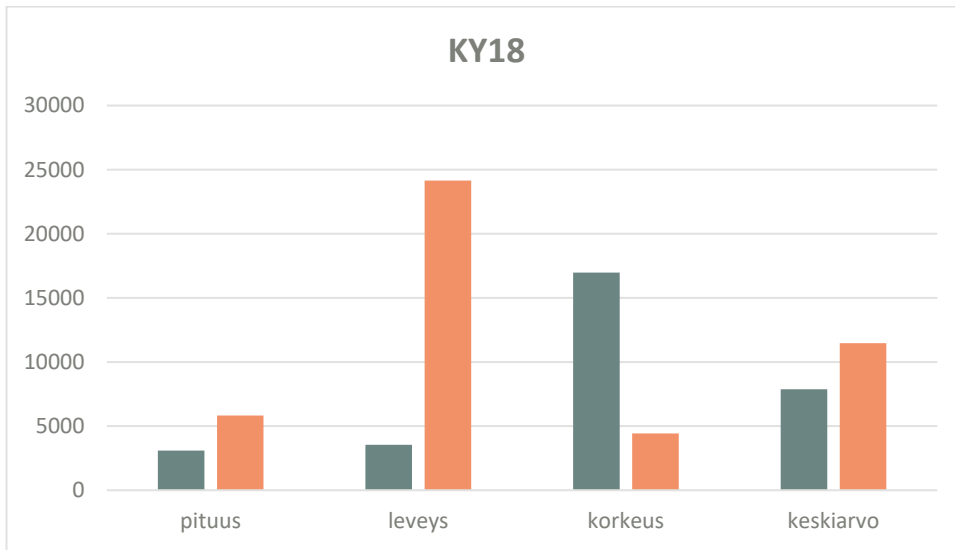
Seuraavissa taulukoissa ultraäänimittausten tulokset on esitetty havainnollistavan kuvaajan avulla. Kuvaajista voidaan huomata, että luotettavimmat testitulokset saatiin tiilen pituussuunnasta otetusta ultraäänimittauksesta. Muissa suunnissa vaihtelu oli varsin huomattavaa.



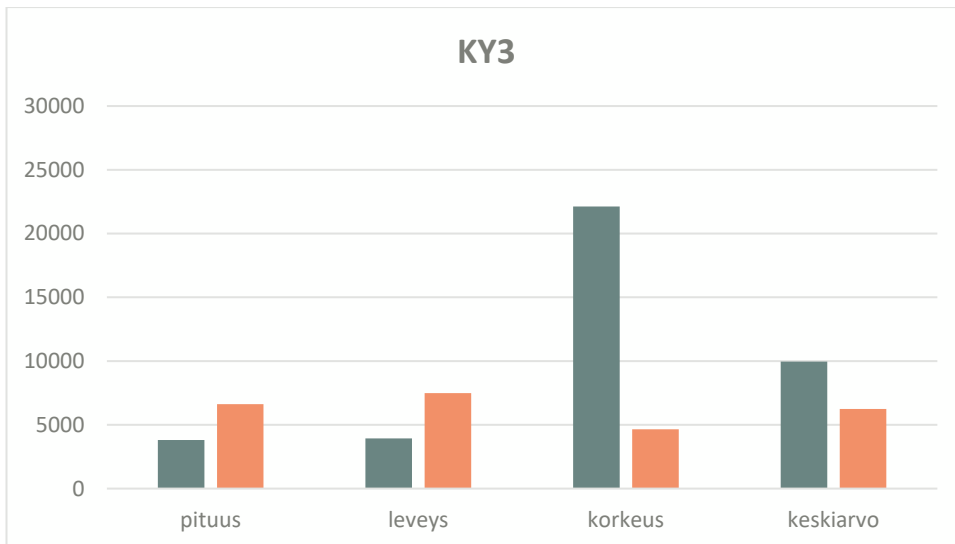
Kuva 11, KY2 tiilen ultraäänimittaukset



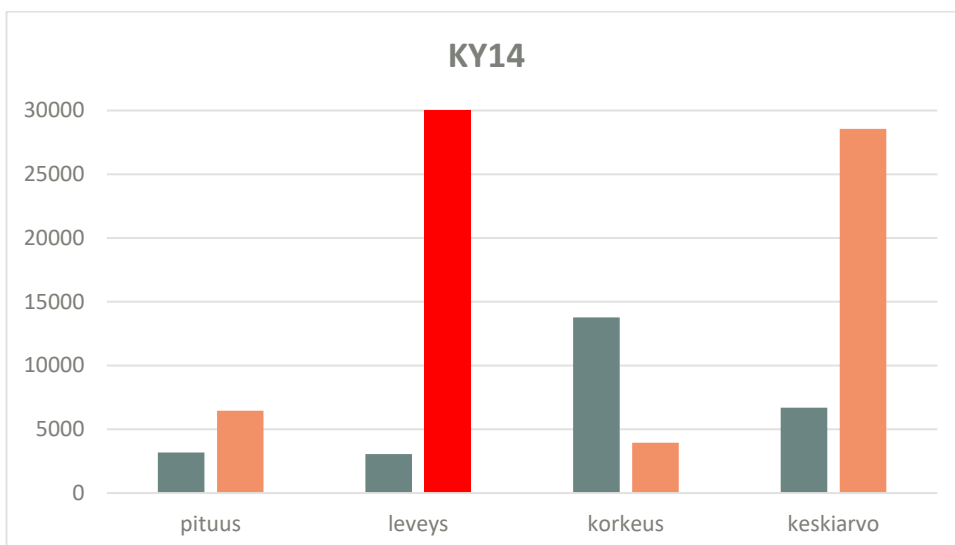
Kuva 12, KY9 tiilen ultraäänimittaukset



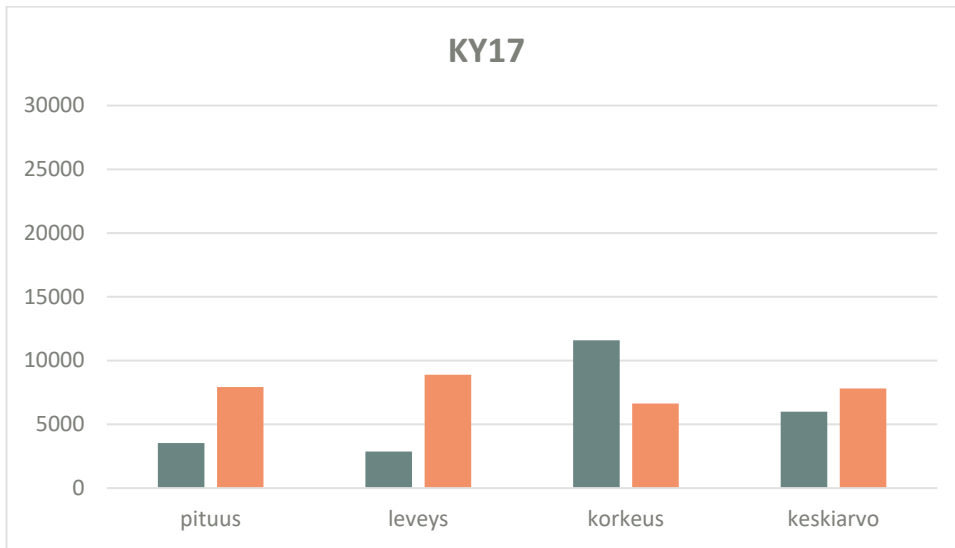
Kuva 13, KY18 tiilen ultraäänimittaukset



Kuva 14, KY3 tiilen ultraäänimittaukset

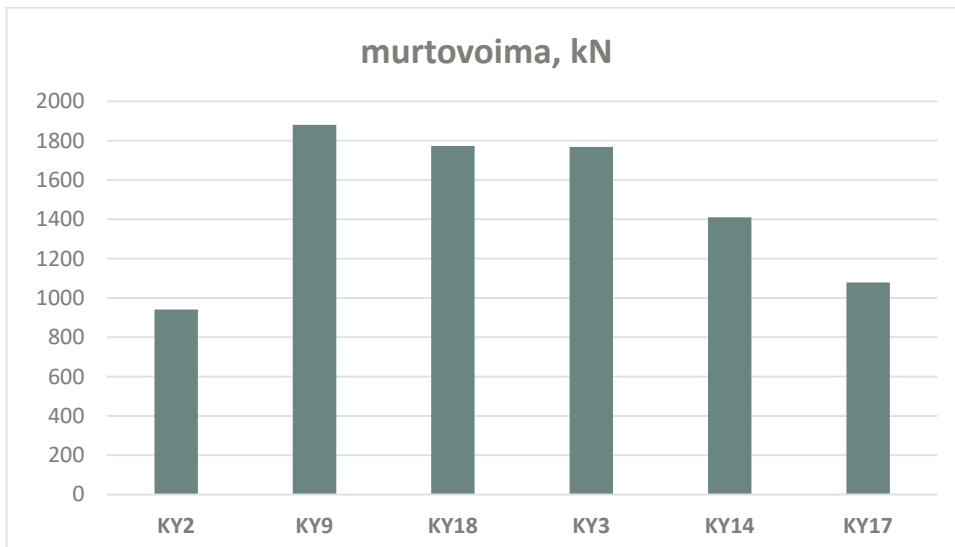


Kuva 15, KY14 tiilen ultraäänimittaukset

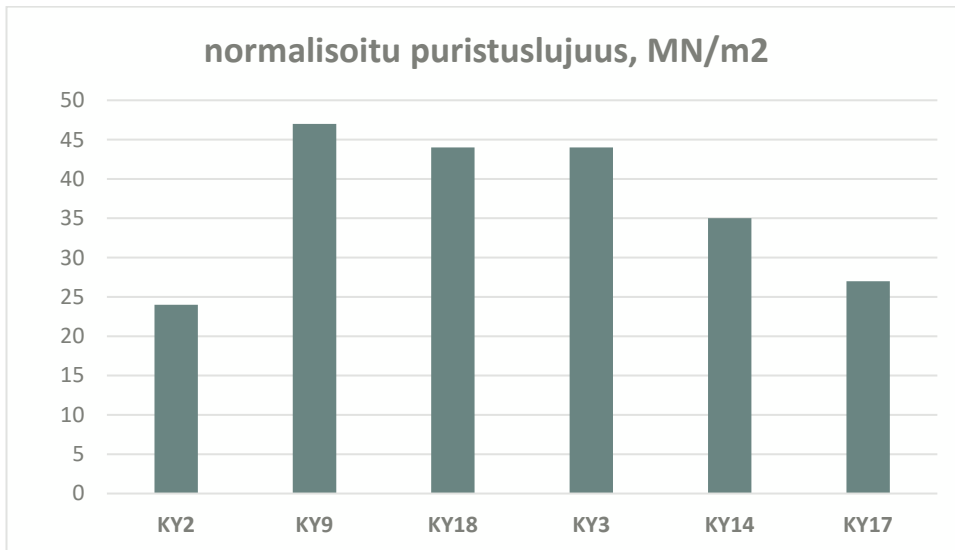


Kuva 16, KY17 tiilen ultraäänimittaukset

Seuraavissa kuvaajissa esitetty standarditestien avulla määritetty tiilien murtovoima sekä normalisoitu puristuslujuus. Tulosten perusteella KY2 ja KY17 tiilien murtovoima ja puristuslujuus olivat muita tiiliä heikommat.



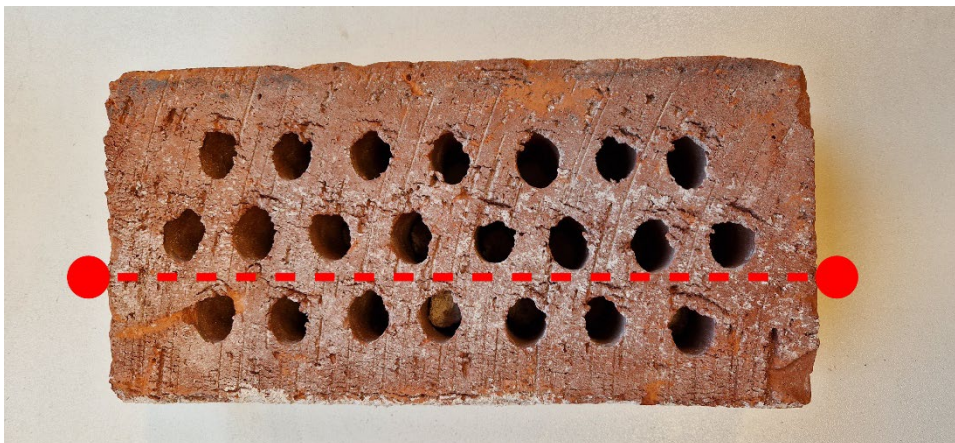
Kuva 17, Tiilikohtainen murtovoima



Kuva 18, Tiilikohtainen normalisoitu puristuslujuus

Ultraäänimittauksia on aiemman tutkimuksen perusteella pidetty potentiaalisimpana ainetta rikkomattomana menetelmänä tiilen ominaisuuksien todentamiseen. Tutkimuksissa havaittiin, että tiilen puristuslujuuden ja ultraäänen nopeuden välillä esiintyi korrelaatiota. Kaksi puristuslujuustestissä heikoimmaksi havaittua tiiltä olivat ultraäänimittauksissa nopeudeltaan alhaisempia. Kapean testiotoksen perusteella ei kuitenkaan voida vielä todeta varsinaista korrelaatiota.

Ultraäänimittaukset olivat nopeita toteuttaa ja niistä saatiin helposti numeerinen vertailtava arvo. Tiilien ultraäänimittauksissa huomioitiin, että pitkittäissuuntainen läpäisevyyden mittaustulos antoi kokonaisuudessaan koherenteimpia tuloksia. Reikätiilen reiät aiheuttavat mittauksiin herkästi häiriötä. Toteutettujen testien perusteella reikätiilten ultraäänimittaukset tulisi jatkossa toteuttaa hyödyntäen reikätiilen reikärivistöjen välistä kannasta, joka muodostaa mahdollisimman pitkän yhtenäisen lävistettävän matkan. Tämän mittaustavan arvioitiin olevan testitulosten perusteella luotettavin. Muista suunnista tehdyillä ultraäänimittauksissa esiintyi suurta vaihtelua ja suurimmat tulokset eivät ole uskottavia huomioiden tiilen normaalit ominaisuudet ja äänen nopeus kiinteässä materiaalissa, joka on tiilellä 3650 m/s 20-asteen lämpötilassa (Wikipedia).



Kuva 19, Potentiaalisin ultraääniantureiden sijainti tiilen pinnalla sekä reikätiilen mittaussvälin yhtenäinen kannas

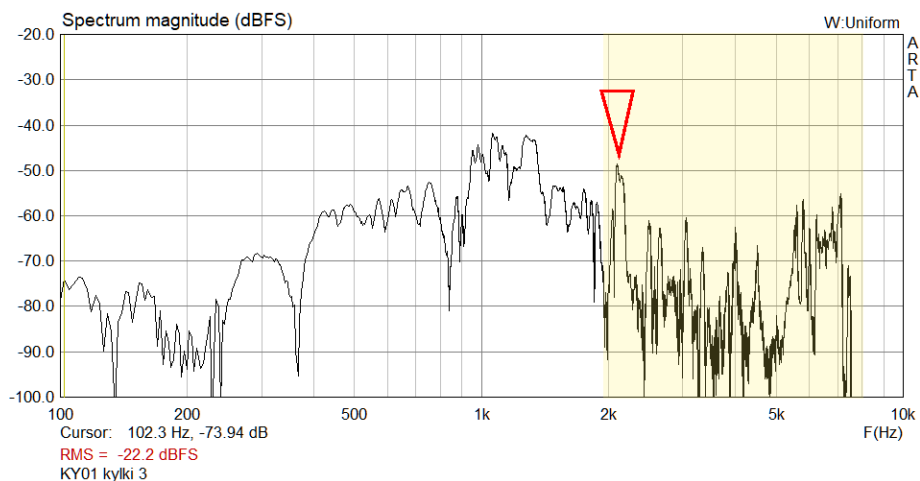
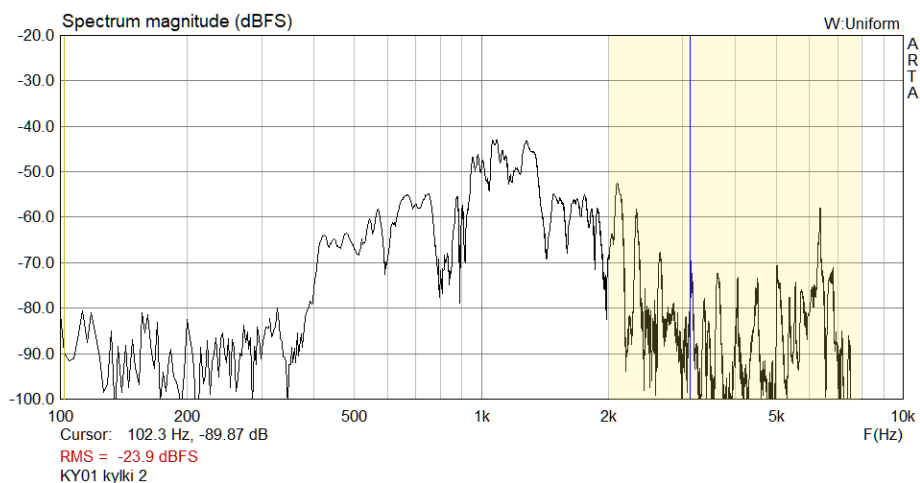
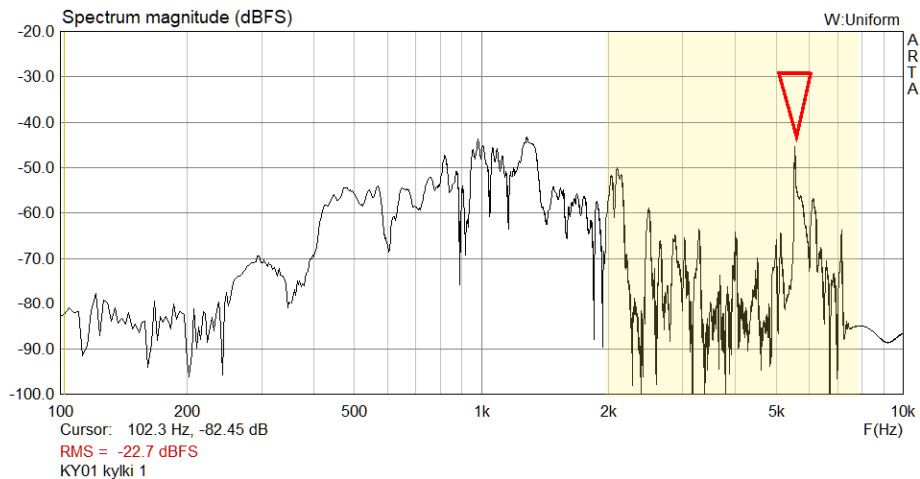


## 4.2 ISKUÄÄNEN KORKEUS (RESONANSSITAAJUUS)

AKUKON OY, 22.08.2021

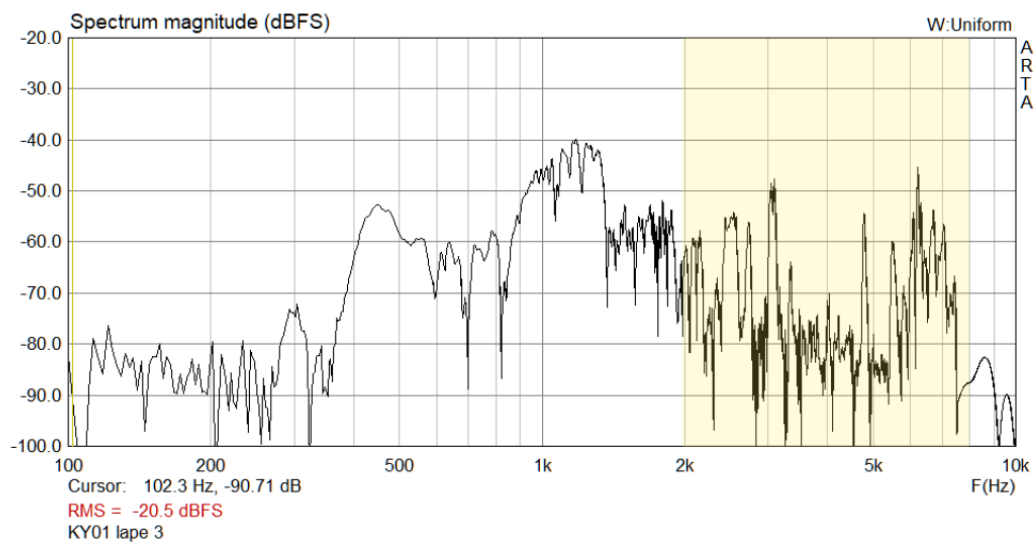
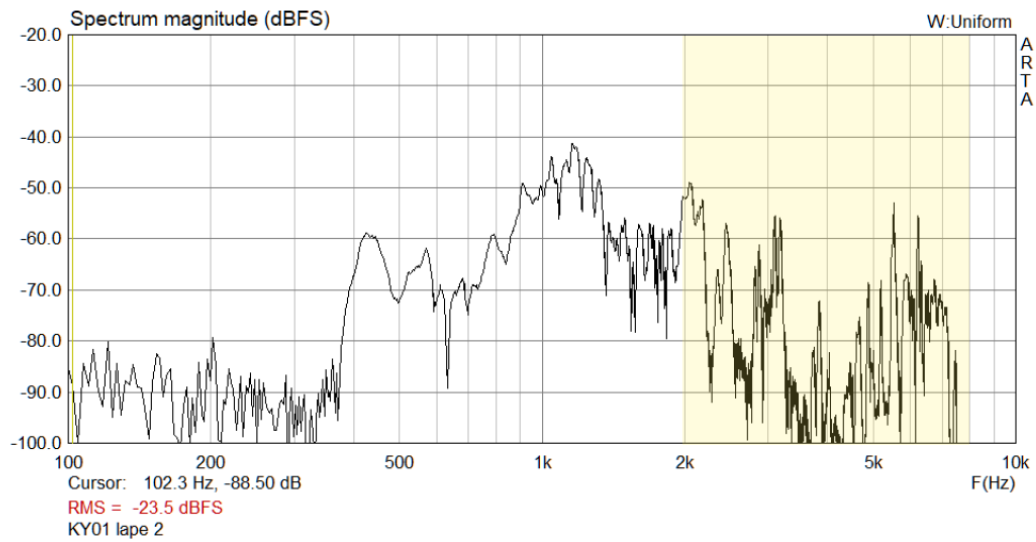
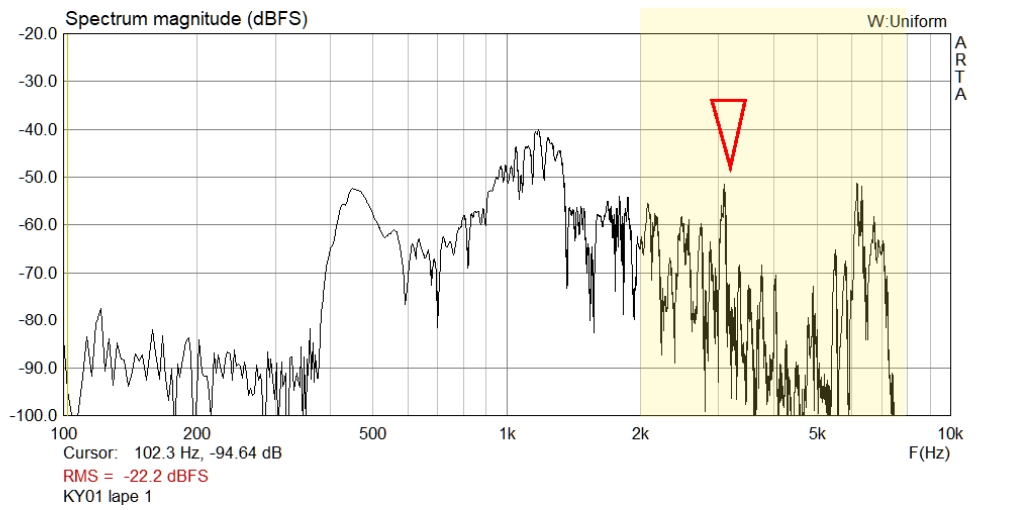
Timo Peltonen, johtava akustikko

KY01 kylki



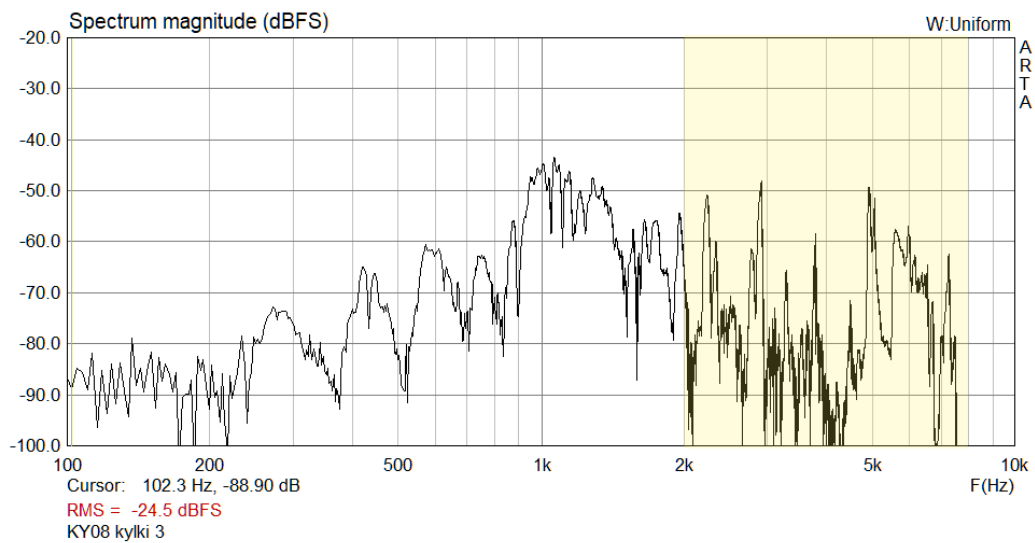
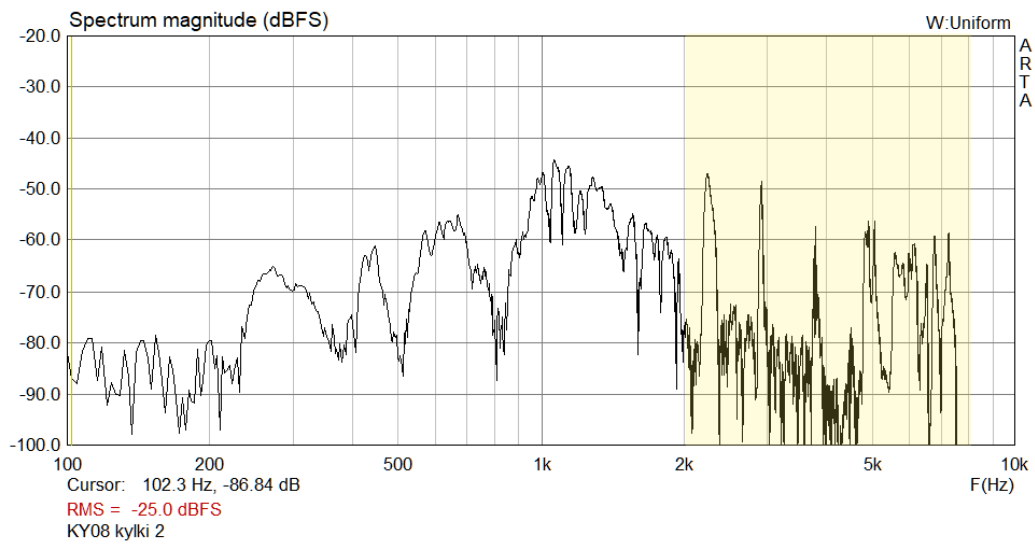
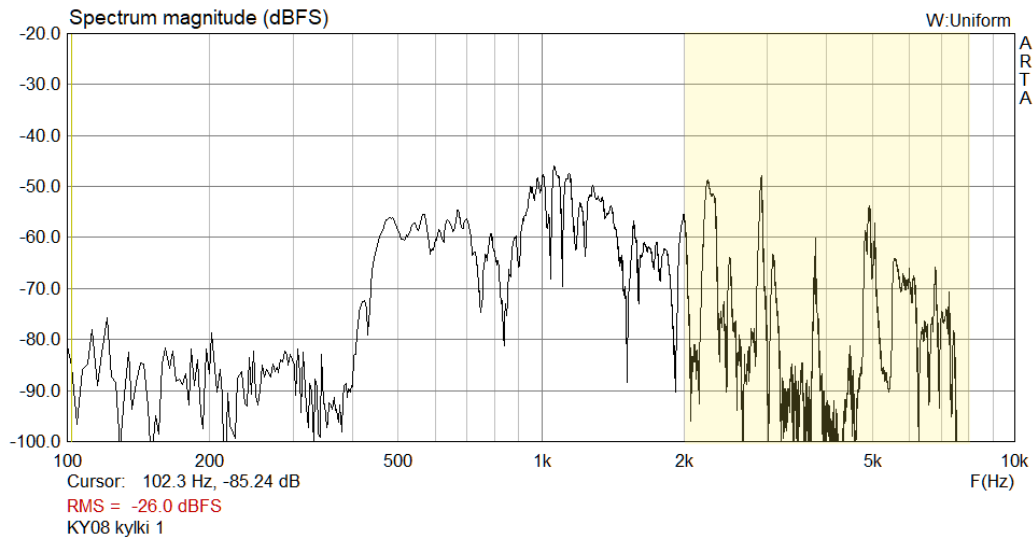
Kuva 20, Kyjellään olevan KY01 tiilen iskun äänispektrit

KY01 lape



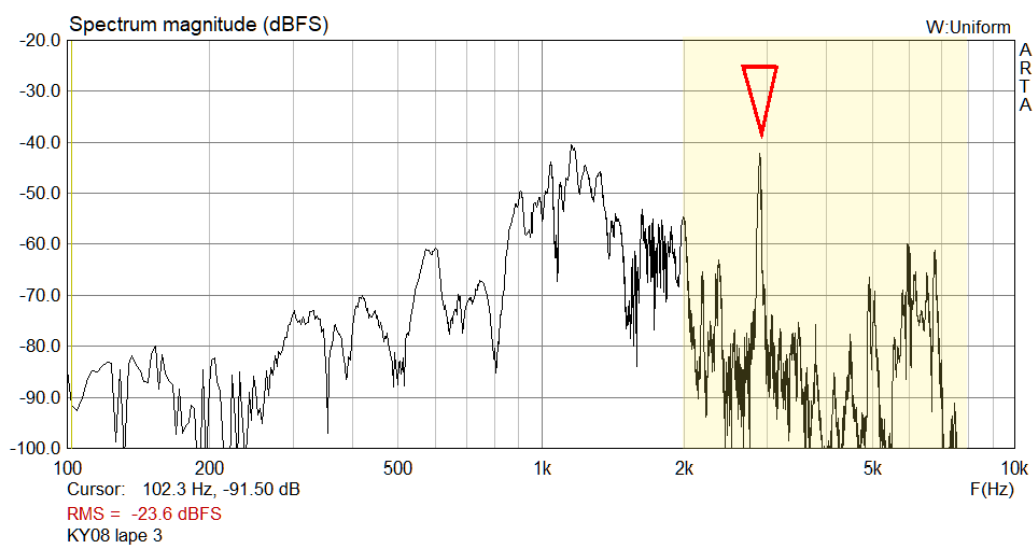
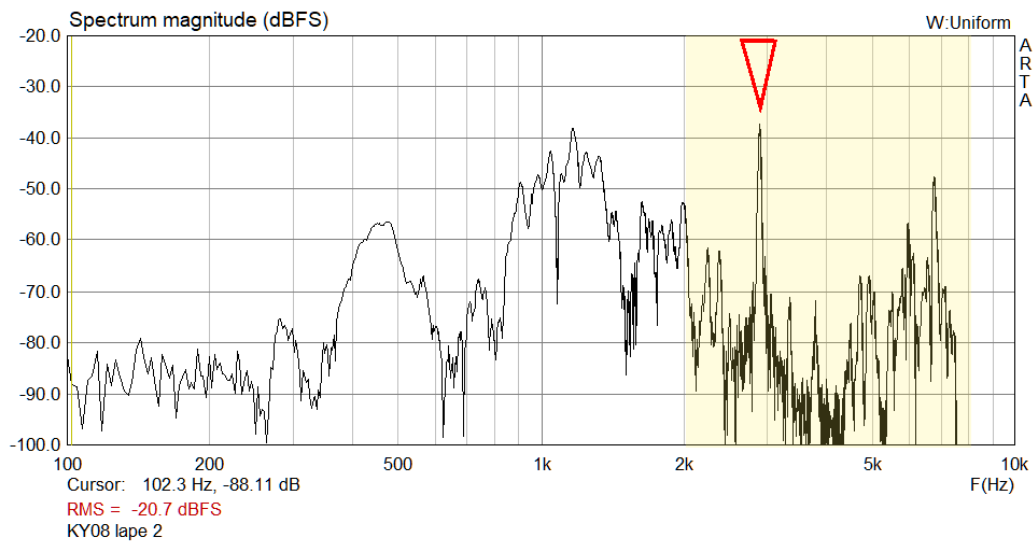
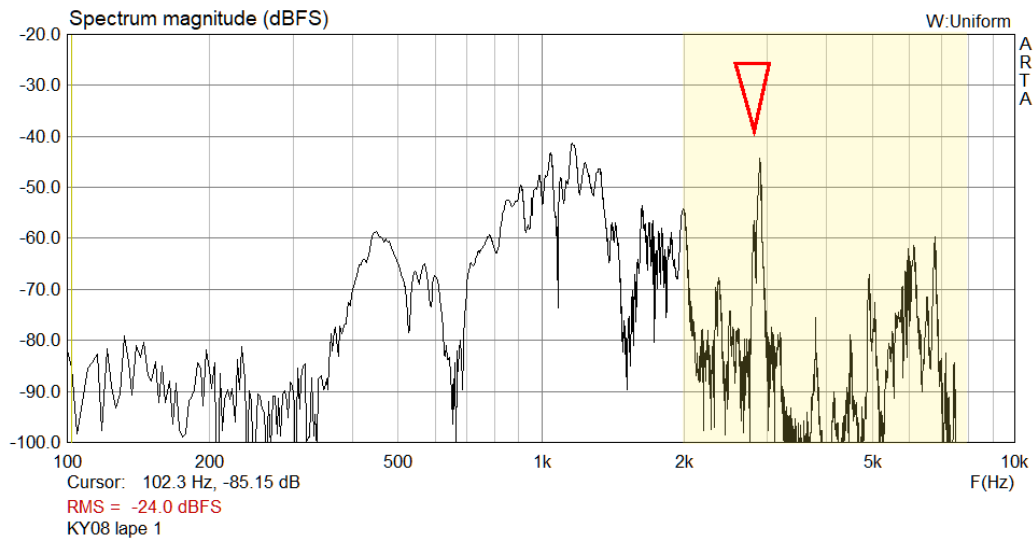
Kuva 21, Lappeellaan olevan KY01 tiilen iskun äänispektrit

## KY08 kylki



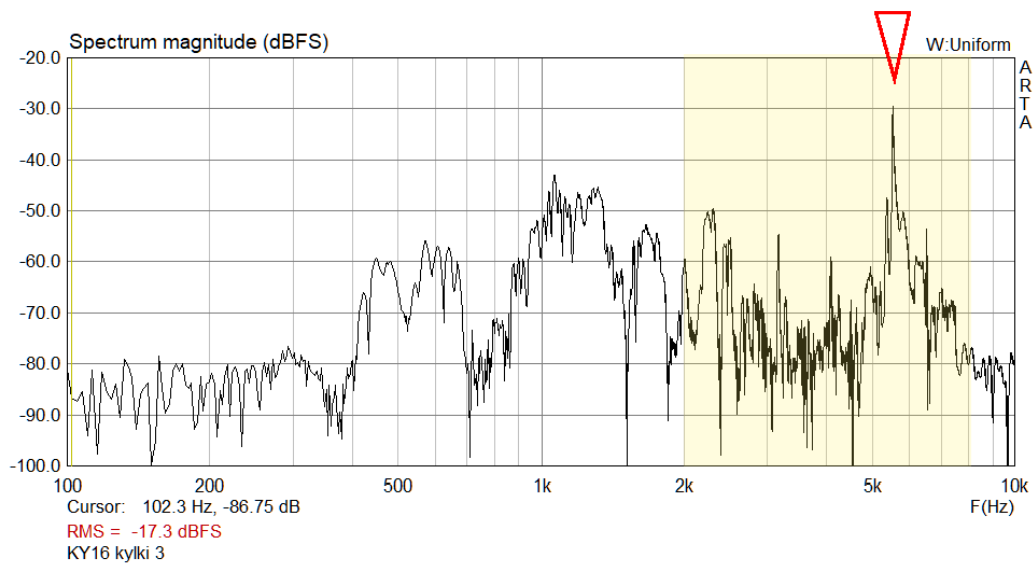
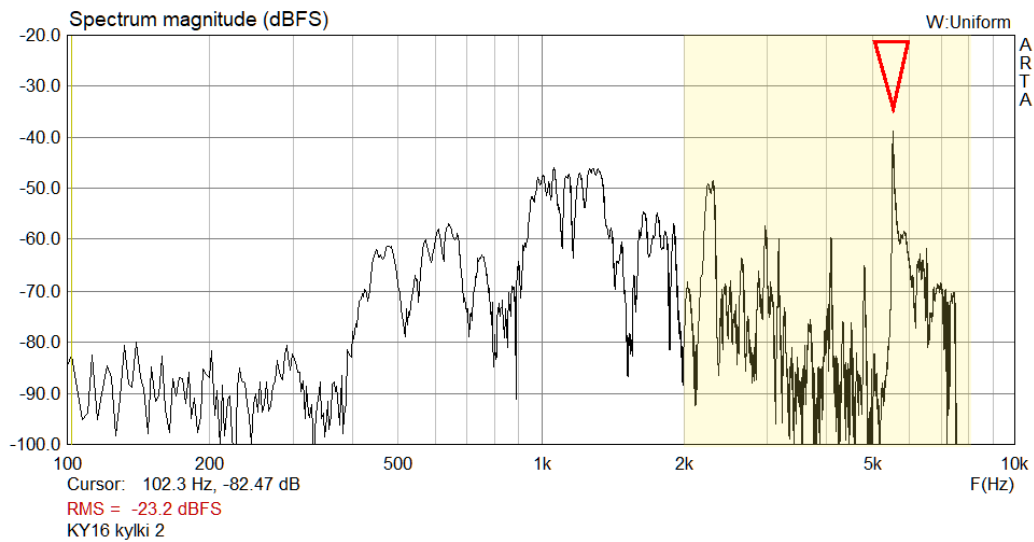
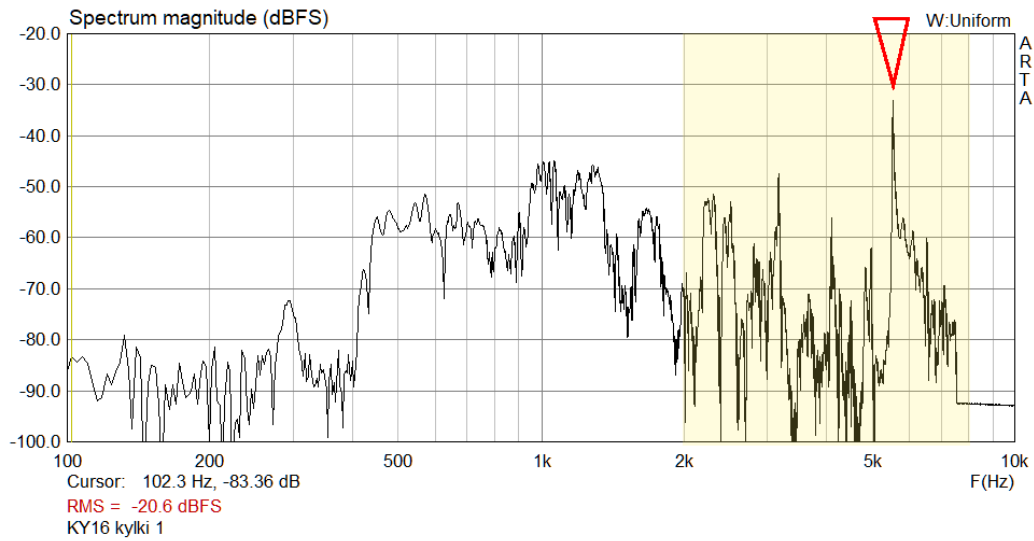
Kuva 22, Kyljellään olevan KY08 tiilen iskun äänispektrit

## KY08 lape



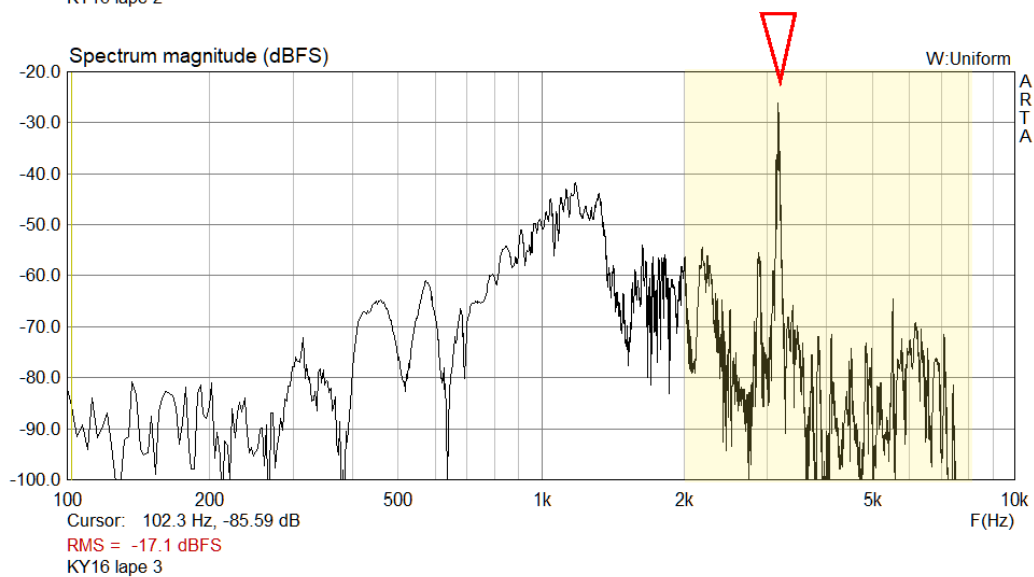
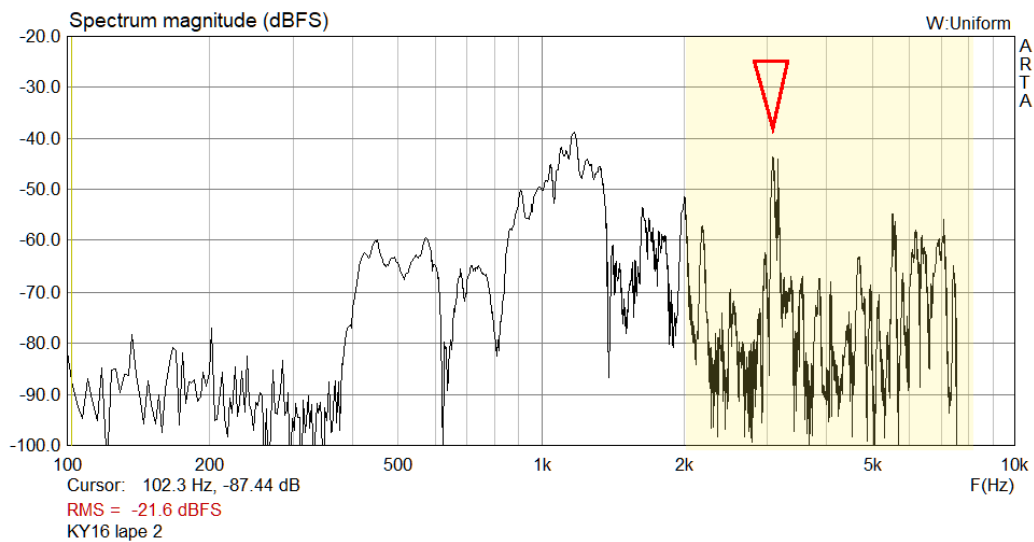
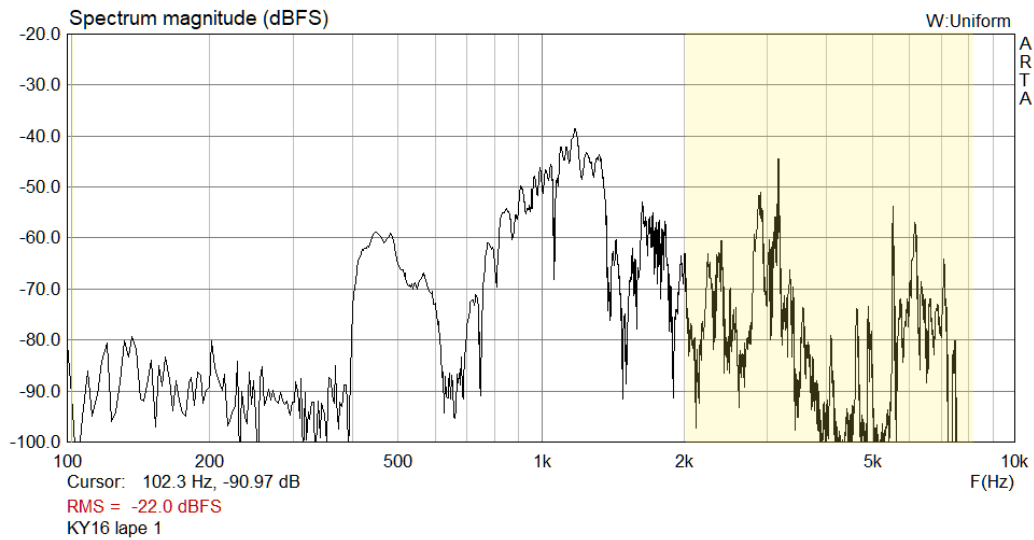
Kuva 23, Lappeellaan olevan KY08 tiilen iskun äänispektrit

## KY16 kylki



Kuva 24, Kyljellään olevan KY16 tiilen iskun äänispektrit

## KY16 lape



Kuva 25, Lappeellaan olevan KY16 tiilen iskun äänispektrit

## Tiilen iskuäänen korkeus (resonanssitaajuus)

Kytösuontien tiilien iskuäänen korkeutta pyrittiin tarkastelemaan äänestä tallennettujen spektrien avulla. Tällä tavoin pyrittiin kehittämään testausmetodin skaalattavuutta, toistettavuutta sekä luotettavuutta. Iskuäänen spektrin avulla pyrittiin määrittämään tiilen resonanssitaajuus, joka kuvaa iskuäänen soinnin taajuuskorkeutta. Testattu tiilierä kuulosti korvakuulolla homogeeniselta. Tiiliä olisi ollut vaikea laittaa sointiäänänen korkeuden perusteella korvakuulometodilla järjestykseen. Tiilierän tiilet olivat todennäköisesti varsin tasalaatuisia.

Yksittäisen tiilen resonanssitaajuuden määrittämisessä ääninauhoitteen spektrikäyrän avulla huomattiin merkittäviä haasteita. Osasta spektreistä ei saatu luotettavasti selville ominaista resonanssitaajuutta spektrin epäselvyyden takia. Osassa tiilistä spektristä oli luettavissa taajuushuippu, joka on tiilen resonanssitaajuus. Osassa tiilistä tallennetun äänispektrin huippupiste ja resonanssitaajuus ei kuitenkaan ollut yksiselitteisesti luettavissa. Haasteita aiheutti todennäköisesti käytetyt testimenetelmät sekä reikätiilen epähomogeeninen muoto. Äänispektrimittausten avulla ei saatu kaikille tiilille helposti numeerista vertailuarvoa. Testimetodologia vaatisi kehittämistä, jotta numeerinen arvo saataisiin helposti luettavaksi. Metodilla voi olla kuitenkin potentiaalia, mikäli testitulosten luotettavuutta saadaan parannettua.

Testimetodi on nopea ja edullinen eikä välttämättä vaadi erillisiä tarkoitukseen valmistettuja mittalaitteita, vaan testit voidaan toteuttaa älypuhelimien tai kannettavan tietokoneen avulla. Resonanssitaajuuden mahdollisesta korrelaatiosta tiilen ominaisuuksiin ei pienen aineiston perusteella voida vetää luotettavia johtopäätöksiä.

## 5 JATKOTUTKIMUS

Ainetta rikkomattomien testimenetelmien (NDT) hyödyntäminen osana tiilen ominaisuuksien varmennusprosessia vaatii jatkotutkimuksia. Epäsuorien ainetta rikkomattomien testimenetelmien (NDT) ja suorien standardoitujen testimenetelmien välisen korrelaation löytämiseksi testien otoskoko tulisi kasvattaa merkittävästi. Luotettavien tulosten ja tiilityyppien hajonnan määrittämiseen vaadittaisiin lisää testituloksia. Toteutettavien testien dataa tulisi kerätä tietokantaan, jonka avulla tulosten luotettavuus ajan mittaan paranee. Yleisesti kannatettavaa olisi hyödyntää tiiliä testattaessa useita eri ainetta rikkomattomia menetelmiä standardoitujen menetelmien rinnalla. Ultraäänimittaukset ja tiilen resonanssitaajuuden määrittäminen ovat menetelminä nopeita ja edullisia ja niitä olisi mahdollista toteuttaa edullisesti standarditestien yhteydessä ja kerätä näin dataa jatkotutkimuksia ajatellen.

Jatkotutkimuksissa uudelleenkäytettäviä tiiliä tulisi testata rinnan uusien tiilien kanssa, joiden ominaisuudet on varmennettu. Uusien tiilien avulla voidaan saada luotettavaa vertailudataa uudelleenkäytettävien tiilien ominaisuuksien varmentamisen prosessiin. Testeihin tulisi ottaa uusia tiiliä ja uudelleenkäytettävistä tiilistä hyväkuntoisia sekä mahdollisen vaurion saaneita tiiliä, jotta saadaan vertailudataa riittävien ominaisuuksien raja-arvojen määrittämistä varten.

Jatkotutkimuksissa tulisi hyödyntää ensisijaisesti umpitiiliä. Kytösuontien tiilille tehtyjen testien perusteella huomattiin, että testitulosten epävarmuutta lisää reikätiilien epähomogeeninen muoto. Tiilen iskuäänen korkeutta eli tiilen resonanssitaajuutta määrittäessä huomioitiin, että oli iskukohdalla oli suuri merkitys, joka johtuu todennäköisesti tiilen reiitetystä muodosta. Vastaavasti ultraääninopeusmittauksissa vaihtelu oli huomattavan suurta. Reikätiilien ultraäänimittauksissa tulisi hyödyntää tiilen pituus-suuntaista yhtenäistä kannasta. Kuitenkin ensisijaisesti olisi molempien ainetta rikkomattomien menetelmien kannalta luotettavampaa hyödyntää alkuun umpitiiliä häiriön minimoimiseksi. Umpitiilistä saatavia luotettavia tuloksia voidaan myöhemmin hyödyntää reikätiilien ominaisuuksien todentamisen testeissä.

Iskuäänen korkeuden eli resonanssitaajuuden määrittämisessä tulisi jatkossa hyödyntää mahdollisimman vakioituja olosuhteita. Vakioidun kuulapäisen lyöntityökalan, testialustan, iskuvoimakkuuden ja äänentallennusmenetelmän avulla voisi olla mahdollista lisätä testitulosten luettavuutta ja luotettavuutta. Kytösuontien tiiliä testattaessa huomioitiin, että lattapäisellä iskurilla (vasara) tuotettu isku osuu tiilen pintaan herkästi hieman väärässä kulmassa, joka saattaa aiheuttaa häiriötä tallennettuun äänispektriin, joka vaikeuttaa spektrin luettavuutta. Vakioitu testialusta voisi parantaa iskun kohdistettavuutta sekä selkeyttää tallennettavaa äänispektriä. Vakioidulla iskunvoimakkuudella voidaan puolestaan varmistaa, että äänen voimakkuus pysyy äänentallennuslaitteelle asetettujen raja-arvojen sisällä. Reikätiilien tutkimuksessa huomioitiin myös, että iskukohdalla oli reikätiilen geometrian vuoksi vaikutus tallennettuun äänispektriin. Tästä syystä tulisi ensisijaisesti käyttää jatkotutkimuksissa umpitiiliä.

Jatkotutkimuksissa voidaan huomioida myös, että resonanssitaajuuden mittausta voidaan potentiaalisesti hyödyntää myös kappaleen jäykkyyden, elastisuuden ja sisäisen kitkan arvioinnissa. Tästä lisätietoa löytyy liitteestä 5.

Tutkimuksessa havaittiin, että ultraäänimittaukset olivat verrattain nopeita toteuttaa. Jatkotutkimuksessa ultraäänimittausten otoskoko tulisi kasvattaa esimerkiksi 50 tiileen. Ultraäänimittausten avulla voidaan löytää testierästä poikkeavat tiilet. Tiilierästä tulisi löytää parhaat ja heikot yksilöt ja kohdentaa hitaampia standardoituja testejä näihin tiiliin. Tiilistä tulisi testata ultraäänimittausten perusteella parhaat, heikoimmat ja muutamia tältä väliltä.

Ultraäänimittauksia toteutetaan betonirakenteille myös työmaaolosuhteissa. Työmaaolosuhteissa toteutettujen mittausten luotettavuuden kannalta on keskeistä huomioida olosuhteet, erityisesti lämpötila, testejä toteutettaessa. Vastaavasti ultraäänimittauksia voidaan toteuttaa myös tiilille työmaaolosuhteissa. Testejä voidaan toteuttaa nykyisillä testimeteodeilla seinästä irrotetuille tiilille. Jatkotutkimuksessa voisi kuitenkin suunnitella testausmetodeja, joilla tiiliä voitaisiin analysoida myös tiiliseinäarakenteesta. Tällöin olisi mahdollista saada tiilien ominaisuuksista dataa jo ennen rakennuksen purkua.

## 6 VIITTEET JA LIITEAINEISTO

### Viitteet

Räsänen, A. (2022). Tiilen uudelleenkäytettävyyden arviointi. Diplomityö. Tampereen yliopisto.



Koponen, A. (2023). Rakennustuotteiden uudelleenkäytön määrittelyt. Haettu 14.11.2023 osoitteesta <https://testbed.hel.fi/kiertotalous/kirjasto/ehjana-irrotettujen-rakennustuotteiden-uudelleenkaytto-on-nyt-helpompaa/>

## **Liiteaineisto**

Liite 2 Raportti\_25010882\_Tiilen suorituskyvyn arviointi

Liite 5 Tiilien resonanssitaajuuden mittaukset

# Raportti 25010882

Tilaaaja:  
Spolia Desing Oy  
Petri Salmi  
040 707 8191  
petri@spolia.fi

Jakelu:  
Sweco Finland Oy  
Spolia Desing Oy, Petri Salmi

## Tilaus

3.7.2023, Petri Salmi, Spolia Desing Oy

## 1 Yleistiedot

Tilaaajan toimittamista käytetyistä tiilistä testattiin jäädytys-sulatuskestävyyttä, puristuslujuutta, muurauslaastin ja tiilen tartuntavetolujuutta sekä vedenimukykyä standardia SFS 7001 (9.12.2013) mukaisesti.

### 1.1 Näytteet

Tilaaajan toimittamat tiilinäytteet, yhteensä 21 kappaletta. Näytteet on merkattu tilaaajan toimesta tunnuksilla KY1-KY21. Koekappaleiden ikä on noin 50 vuotta.

Näytteet on toimitettu Vantaan laboratorioon 30.8.2023.



Kuva 1. Laboratorioon toimitettuja tiilinäytteitä. Näytteisiin on merkattu niissä ennen testausta havaitut vauriot, lohkeamat ja halkeamat.

## 1.2 Käytetyt testausmenetelmät ja testauspäivämäärät

Testaukset on suoritettu näytteille noudattaen taulukossa 1 lueteltuja testausmenetelmiä. Taulukossa 1 on esitetty myös testausaikataulu sekä testien suorittajat.

Taulukko 1. Suoritetut testaukset ja niiden päivämäärät (UÄ = Ultraäänen nopeus)

Testi:	Standardi	Kappaleet:	Testauspäivämäärä:	Testaaja:
Puristuslujuus+ UÄ	EN 722-1+A1-2015	KY1, KY8 ja KY16	10.10.2023	Taisto Huovinen
Jäätymis-sulamiskestävyys + UÄ	EN 722-18 (50-jaksoa)	KY2, KY9, KY18 (testisarja) KY3, KY4, KY17 (vertailusarja)	5.10-24.10.2023 Puristuslujuus 31.10.2023	Taisto Huovinen
Vedenimukyky	EN 772-21 (23.1.2011)	KY4, KY5, KY6	5.10-12.10.2023	Taisto Huovinen
Vedenalkuimunopeus	SFS 722-11 (23.1.2012)	KY11, KY12, KY13	5.10-10.10.2023	Taisto Huovinen
Vetolujuuden testaus	SFS 5445 (21.3.1988)	KY19, KY20, KY21	9.10.2023	Ari-Pekka Anttalainen

Normalisoitu puristuslujuus on laskettu kertomalla testauksessa saatu puristuslujuus kertoimella 0,83. Kerroin on saatu interpoloimalla SFS-EN 772-1, liite 1, taulukko A.1 arvoista kerroin mitoille 270x130x73.

Ultraäänen etenemisnopeus on mitattu standardia SFS-EN 12504-4 soveltaen mittalaitteella Proseq Pundit Lab+ ja 54kHz mittapäällä. Mittaus on tehty tiilen pituus-, leveys-, ja syvyysuunnassa. Tulos on ilmoitettu laskennallisena ultraäänen nopeutena m/s, joka on saatu jakamalla mitattu matka mitatulla ajalla.

## 1.3 Tutkimuksen luotettavuus

Sweco Finland Oy Tutkimukset ja laadunvarmistus toimii FINAS akkreditointipalveluiden akkreditoimana testauslaboratoriona T195. Toiminta täyttää standardin SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 vaatimukset. Pätevyysalue: [www.finas.fi](http://www.finas.fi). Akkreditoinnin piiriin kuuluvat testaukset on ilmoitettu menetelmäkohtaisesti. Laboratorioanalyysit on suoritettu Vantaan toimipisteessä erikseen mainittuja poikkeuksia lukuun ottamatta. Tämän asiakirjan osittainen julkaiseminen on sallittu vain Sweco Finland Oy Tutkimukset ja laadunvarmistus antaman kirjallisen luvan perusteella. Tutkimustulokset koskevat vain tutkittuja näytteitä. Mahdolliset mittausepävarmuudet saa laboratoriolta pyydettäessä.

## 2 Tutkimustulokset

### 2.1 Puristuslujuuden määrittäminen

Koekappaleiden puristuslujuus on määritetty standardin SFS-EN 772-1 mukaisesti. Koekappaleet on puristettu korkeutta vasten. Koekappaleet kuivattiin 105 °C ± 5°C 24 h, jonka jälkeen lämpötilan annettiin tasaantua huoneen lämmössä 4 h. Koekappaleiden pinnan tasaisuus on tarkastettu mittaamalla.

Kappaleista KY1, KY8 ja KY16 mitattiin ultraäänen nopeutta ennen puristuslujuuden testaamista. Tulos on ilmoitettu jakamalla mitattu pituus mitatulla ajalla.

Testaus suoritettiin näytteille KY1, KY8, KY16, 6.10.2023. Alla olevissa taulukoissa on esitetty testaustulokset.

Taulukko 2. Koekappaleiden puristuslujuudet ja kappaleiden mitat.

Tunnus	Koekappaleen mitat (mm)			Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Murtovoima kN	Puristuslujuus MN/m <sup>2</sup>	Normalisoitu puristuslujuus MN/m <sup>2</sup>
	a	b	h				
KY1	258,0	124,0	73,0	1640	1683,5	52,6	43,7
KY8	264,0	127,0	73,0	1570	460,2	13,7	11,4
KY16	261,0	126,0	73,0	1560	414,0	12,6	10,4
<b>Keskiarvo</b>				<b>1590</b>	<b>853</b>	<b>26,3</b>	<b>21,8</b>
<b>Keskihajonta</b>				<b>35,6</b>	<b>587,9</b>	<b>18,6</b>	<b>15,4</b>

Taulukko 3. Puristuslujuuskappaleista mitatut ultraääninnopeudet sekä kappalekohtaiset keskiarvot.

Tunnus	Mittaussuunta						Keskiarvo (m/s)
	Pituus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Leveys (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Korkeus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	
KY1	258	4148	124	1994	73	1174	<b>3819</b>
KY8	264	3204	127	2480	73	4056	<b>3247</b>
KY16	261	3457	126	2303	73	4506	<b>3422</b>

## 2.2 Tartuntavetolujuuden määrittäminen

Ennen vetolujuuden testausta toimitetuista kappaleista porattiin halkaisijaltaan 100 mm koekappaleita siten, että muurauslaastin molemmiin puolin on tartuntapintana tiili. Vetolujuuden laskennassa ei ole huomioitu tiilissä olevia reikiä.

Näyte-tunnus	Ø mm	Vetolujuus MN/m <sup>2</sup>	Murtotapa	Lisähuomiot murtopinnasta
KY19	99	0,5	Tiilen ja laastin tartuntapinta	-
KY20	99	0,1	Tiilen ja laastin tartuntapinta	-
KY21	99	0,2	Tiilen ja laastin tartuntapinta	-



Kuva 2. Kappale KY19 ennen porausta.



Kuva 3. Kappale KY21 ennen porausta.



Kuva 4. Testatut kappaleet ennen vetolujuuden testausta.



Kuva 5. Kappaleet vetolujuuden testauksen jälkeen.

## 2.3 Vedenimukyvyin määritys

Koekappaleiden vedenimukyky on määritetty standardin SFS-EN 772-21 mukaisesti. Koekappaleet kuivattiin 105 °C ± 5°C. Vakiopaino saavutettiin, kun kahden peräkkäisen 24 h välisen jakson kappaleen kokonaismassan ero ei ylittänyt 0,2 %. Kuivapaino saavutettiin 5d h kuivatuksen jälkeen 10.10.2023.

Tämän jälkeen kappaleiden annettiin tasaantua huoneen lämpöön, jonka jälkeen kappaleista mitattiin kuivapaino. Seuraavaksi kappaleet upotettiin vesiastiaan, jossa niiden annettiin olla upotuksissa 48 h, jonka jälkeen kappaleet punnittiin märkätainon mittaamiseksi. Märkätaino punnittiin 12.10.2023.

Kappaleiden mitat on tarkastettu rullamitalla.

Taulukko 4. Koekappaleiden vedenimukyky.

Näytteen tunnus	Kuivapaino g	Märkätaino 48h g	Vesimäärä (g)	Vedenimu %
KY4	3833	3929	96	2,6
KY5	3809	3849	40	1,3
KY6	3803	3927	124	3,3
<b>Keskiarvo</b>			<b>87</b>	<b>2,4</b>

## 2.4 Vedenalkuimunopeus

Koekappaleiden vedenimukyky on määritetty standardin SFS-EN 772-11 mukaisesti. Koekappaleet kuivattiin 105 °C ± 5°C. Vakiopaino saavutettiin, kun kahden peräkkäisen 24 h välisen jakson kappaleen kokonaismassan ero ei ylittänyt 0,2 %. Kuivapaino saavutettiin 5d h kuivatuksen jälkeen 10.10.2023.

Tämän jälkeen kappaleiden annettiin tasaantua huoneen lämpöön, jonka jälkeen kappaleista mitattiin kuivapaino. Seuraavaksi kappaleet upotettiin vesiastiaan 5 ± 1 mm syvyyteen, jossa niiden annettiin olla 1 min ajan, jonka jälkeen kappaleet punnittiin märkätainon mittaamiseksi. Märkätaino punnittiin 12.10.2023.

Kappaleiden mitat on tarkastettu rullamitalla.

Taulukko 5. Koekappaleiden vedenimukyky.

Näytteen tunnus	Kuivapaino g	Märkätaino 48h g	Vesimäärä (g)	Vedenimu %
KY11	3846	3856	10	0,31
KY12	3827	3852	25	0,77
KY13	3849	3860	11	0,34
<b>Keskiarvo</b>			<b>15</b>	<b>0,4</b>

## 2.5 Jäätymis-sulamiskestävyys

### 2.5.1 Jäätymis-sulamiskoe.

Koekappaleiden jäätymis-sulamiskestävyys on määritetty standardin SFS-EN 772-18 soveltaen. Ennen jäädytystä koekappaleet kuvattiin ja kappaleisiin merkattiin niissä ennen testausta olevat vauriot.

Tämän jälkeen kappaleet upotettiin veteen (lämpötila  $20 \pm 5$  °C) siten, että niiden pisin mitta on pystysuorassa asennossa. Aluksi koekappaleet olivat vedessä siten, että noin neljännes niiden korkeudesta oli vedessä. Tästä tunnin kuluttua koekappaleet olivat vedessä puolet niiden korkeudesta ja tästä tunnin kuluttua ne upotettiin veteen kolme neljäsosaa niiden korkeudesta.

Koekappaleet upotettiin kokonaan 24 tunnin kuluttua ja olivat vedessä tästä 24 tuntia. Tämä jälkeen aloitettiin koekappaleiden jäädytys.

Koekappaleet jäädytettiin pakastimessa, joka laskee lämpötilan 3 – 5 tunnissa – 15 °C. Koekappaleet pidettiin tässä lämpötilassa vähintään 2 tuntia, jonka jälkeen koekappaleet sulatettiin pitämällä niitä vähintään tunti täysin upotettuna veteen (lämpötila  $20 \pm 5$  °C).

Koekappaleita jäädytettiin ja sulatettiin edellä kuvatulla tavalla 50 sykliä.

#### Havainnot:

- Näytteissä ei esiintynyt jäädytys-sulatussykliä jälkeen uusia silmin havaittavia vaurioita.



Kuva 6. Vertailukappaleet sivulta kuvattuna.



Kuva 7. Testatut kappaleet sivulta ennen koetta



Kuva 8. Testatut kappaleet kokeen jälkeen päältä kuvattuna.



Kuva 9. Testatut kappaleet kokeen jälkeen sivulta kuvattuna.

## 2.5.2 Puristuslujuus jäätymis-sulamiskokeen jälkeen

Koekappaleiden puristuslujuus on määritetty standardin SFS-EN 772-1 mukaisesti jäädytys-sulatuskokeen jälkeen. Testaus suoritettiin näytteille 31.10.2023

Vertailukappaleille ei ole suoritettu jäädytys-sulatustestiä. Vertailukappaleet säilytettiin ennen testiä laboratorio-olosuhteissa.

Alla olevissa taulukoissa on esitetty testaustulokset.

Taulukko 6. Vertailukappaleiden puristuslujuus.

Tunnus	Koekappaleen mitat (mm)			Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Murtovoima kN	Puristuslujuus MN/m <sup>2</sup>	Normalisoitu puristuslujuus MN/m <sup>2</sup>
	a	b	h				
KY3	270	130	70	1580	1768,2	53,1	44,1
KY14	270	130	70	1570	1409,8	42,4	35,2
KY17	270	130	70	1500	1079,0	32,4	26,9
<b>Keskiarvo</b>				<b>1550</b>	<b>1419</b>	<b>42,6</b>	<b>35,4</b>
<b>Keskihajonta</b>				<b>35,6</b>	<b>281,4</b>	<b>8,5</b>	<b>7</b>

Taulukko 7. Koekappaleiden puristuslujuus jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.

Tunnus	Koekappaleen mitat (mm)			Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Murtovoima kN	Puristuslujuus MN/m <sup>2</sup>	Normalisoitu puristuslujuus MN/m <sup>2</sup>
	a	b	h				
KY2	270	130	73	1570	941,6	28,3	23,5
KY9	270	130	73	1550	1880,3	56,5	46,9
KY18	270	130	73	1550	1773,5	53,3	44,2
<b>Keskiarvo</b>				<b>1557</b>	<b>1532</b>	<b>46,0</b>	<b>38,2</b>
<b>Keskihajonta</b>				<b>9,4</b>	<b>419,6</b>	<b>12,6</b>	<b>10,5</b>



Puristuslujuus tuloksien vertailussa jäädytys-sulatus koekappaleiden puristuslujuuden keskiarvo ylittää vertailukappaleiden puristuslujuuden keskiarvon 3,4 MN/m<sup>2</sup>. Näytteen KY2 puristuslujuus on selkeästi vertailulujuustulosta alhaisempi.

### 2.5.3 Ultraäänimittaukset

Kappaleista mitattiin ultraäänin nopeus ennen jäädytys-sulatuskoetta sekä kokeen jälkeen. Mittaukset suoritettiin myös vertailukappaleille. Tulos on ilmoitettu jakamalla mitattu pituus mitatulla ajalla.

Taulukko 8. Puristuslujuuskappaleista mitatut ultraääninnopeudet sekä kappalekohtaiset keskiarvot.

Jäädytys-sulatus-kappaleet		Mittaussuunta						Keskiarvo (m/s)
		Pituus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Leveys (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Korkeus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	
KY2	0-jaksoa	260	2243	128	2170	73	10429	<b>2947</b>
	50-jaksoa		2334		4491		4451	<b>5332</b>
KY9	0-jaksoa	260	3509	128	3596	73	10139	<b>5747</b>
	50-jaksoa		7831		25600		4451	<b>12628</b>
KY18	0-jaksoa	260	3089	128	3546	73	16977	<b>7870</b>
	50-jaksoa		5830		24151		4424	<b>11468</b>
Vertailukappaleet		Mittaussuunta						Keskiarvo (m/s)
		Pituus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Leveys (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	Korkeus (mm)	UÄ-nopeus (m/s)	
KY3	0-jaksoa	260	3812	128	3939	73	22121	<b>9957</b>
			6616		7485		4650	<b>6250</b>
KY14	0-jaksoa	260	3179	128	3060	73	13774	<b>6690</b>
			6452		75294		3946	<b>28557</b>
KY17	0-jaksoa	260	3529	128	2864	73	11587	<b>5993</b>
			7927		8889		6636	<b>7817</b>

#### Sweco Finland Oy Tutkimukset ja laadunvarmistus, Vantaa

Akkreditoitu testauslaitos T195 (EN ISO/IEC 17025)



Ville Ruotsalainen

Laatija, osastopäällikkö



Jaakko Roinisto

Tarkastaja, työnjohtaja

<b>TILAAJA</b> Spolia Design Oy	<b>KOHDE</b> Kytösuoontie 9-11, Helsinki
<b>NÄYTE / NÄYTTEET OTETTU</b> 15.9.2023	<b>NÄYTTEENOTTAJA</b> Petri Salmi
<b>NÄYTE / NÄYTTEET VASTAANOTETTU</b> 15.9.2023 HELSINGIN KONALAN LABORATORIO 18.9.2023 TAMPEREEN LABORATORIO	<b>NÄYTE / NÄYTTEET VIJELTY</b> 18.9.2023 TAMPEREEN LABORATORIOSSA

## RAKENNUSMATERIAALINÄYTTEEN SUORAVILJELYMENETELMÄ

### ANALYYSIMENETELMÄ

Rakennusmateriaalinäytteen sienten, bakteerien ja aktinomykeettien eli sädesienten pitoisuuksien määrittäminen, näytteen mahdollinen suoramikroskopointi, sienilajiston tunnistaminen sekä tuloksen tulkinta suoritettiin Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen osan IV (Valvira, 2016) sekä siihen liittyvän Laboratorio-oppaan 2018 ja Ruokaviraston vertaillaboratorion uutiskirjeen 4/2021 ohjeistusten mukaisesti.

Rakennusmateriaalinäytteen mikrobipitoisuuksien määrittäminen tehtiin semikvantitatiivisella suoraviljelymenetelmällä. Menetelmässä näytteen osanäyte viljeltiin mikrobityypikohtaisesti suoraan eri elatusalustoille (MEA, DG18, HAGEM, THG). Kasvatustilapöytä oli 25±3°C ja -ajat sienille sekä bakteereille 7±1 vrk ja aktinomykeeteille 14±1 vrk. Viljelymenetelmällä saadaan selville vain käytetyillä elatusalustoilla kasvavat elinkykyiset mikrobit. Näytteen mikrobipitoisuudet on ilmoitettu määrärajoitettuna suhteellisella (+/-) -asteikolla. Samaa asteikkoa käytetään sekä mikrobien kokonaismäärän että tunnistettujen mikrobien määrien arvioimiseen. Mikäli sienten tai aktinomykeettien kokonaismäärät ovat korkeintaan kohtalaiset (alle 50 pesäkettä/elatusalusta), kunkin havaitun kosteusvaurioindikaattorin pesäkemäärä on esitetty suluisissa määrärajoitettuna viereissä.

Rakennusmateriaalinäytteiden suoramikroskopointi teippipreparaattimenetelmällä tehtiin osana viljelyanalyysiä joko materiaalin vaurioitumattomuuden tai mahdollisen kuolleen ja kuivuneen sienikasvuston havainnoimiseksi. Näytteen suoramikroskopointi tehtiin vain, mikäli viljelymenetelmällä analysoitu mikrobipitoisuus ei osoittanut kasvua tai ei ylittänyt toimenpiderajaa, näyttemateriaali oli suoramikroskopointiin soveltuvaa (kovat materiaalit) ja itse näytettä sekä siinä epäiltyä vauriokohtaa oli viljelyyn tarvittava määrä huomioiden riittävästi jäljellä. Tarkempi menetelmäkuvaus jäljempänä.

Rakennusmateriaalinäytteen sienilajiston tunnistaminen perustui sekä pesäkkeiden ulkonäköön elatusalustoilla että niiden hienorakenteiden tarkasteluun valomikroskooppilla. Näytteen lopullisessa tulosten tulkinnassa huomioidtiin sekä mikrobipitoisuudet, lajisto että havainnot aistinvaraisessa tarkastelussa ja mahdollisessa suoramikroskopoinnissa. Tulkinnassa huomioidtiin lisäksi laboratorion tekninen mittausepävarmuus, josta tarkemmin raportin lopussa. Mikäli näytteen mikrobipitoisuutta tai näytteessä esiintynyttä lajistoa ei voitu ilmoittaa tarkkoina määrärajoitettuna, ilmoitettiin ne joko arvioituna (Arvio) tai havaintoina (Havaintu).

**Menetelmä on FINAS akkreditoitu.** Akkreditointi ei koske tulosten tulkintaa. Laboratoriotulokset sekä laboratorion antamat lausunnot koskevat vain analysoituja näytteitä ja tulosten tulkinnassa laboratorio arvioi yksittäisen materiaalinäytteen tuloksia vain analyysituloksen osalta huomioiden näytteen mikrobipitoisuudet ja -lajiston. Rakennustekniset selvitykset, virhelähteet, muut mittaukset ja tutkimukset huomioon ottaen laboratorion analyysitulosten merkityksen arviointi sekä lopullinen tulosten tulkinta on joko tutkimuksen teettäjän, näytteenottosuunnitelman tekijän tai näytteenottajan vastuulla. Laboratorio ei vastaa puolueettoman näytteenottotapahtuman toteutumisesta.



Asiakkaan antama tieto



Laboratorion täyttämä tieto

\*

Kosteusvaurioindikaattorimikrobi

Steriili

Sieni, joka käytettävällä kasvatusalustalla muodostaa rihmastoja, mutta ei itiöitä

Muu home

Sienisuku/-lajiryhmä, jota laboratoriossa ei ole kyetty tunnistamaan, mutta joka ei kuulu Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen osa IV ilmoitettuihin kosteusvaurioindikaattoreihin

(YK)

Sienisuvun/-lajiryhmän ylikasvu, jolloin nopeasti kasvava sieni valtaa elatusalustan ja voi peittää toisten sienien pesäkkeitä alleen. Heikentää muiden pesäkkeiden tunnistus-/laskentatarkkuutta

#

Tunnistus ei ole akkreditoitu

Ei voitu havaita

Mikrobisuku/-lajiryhmä, jota ei ole voitu havaita eikä sen pitoisuutta ole voitu määrittää

Arvio

Mikrobisuku/-lajiryhmä, jonka pitoisuus on jouduttu arvioimaan

Havaintu

Mikrobisuku/-lajiryhmä, jonka esiintyminen on todettu joko ylikasvumaljoilta tai tunnistuksen yhteydessä. Tarkempaa pitoisuutta ei ole luotettavasti voitu määrittää tai sienisuku/-lajiryhmää kyetty tunnistamaan

Tampereen asbesti ja kuitulaboratorio Oy | Y-tunnus 1038007-8 | [www.asbestilaboratorio.fi](http://www.asbestilaboratorio.fi)

1

TAMPERE Kuokkamaantie 2, 33800 Tampere  
JYVÄSKYLÄ Vasarakatu 1, 40320 Jyväskylä  
HELSINKI Ristipellontie 25, 00390 Helsinki  
HELSINKI Laippatie 1, 00880 Helsinki  
TURKU Apilakatu 13, 20740 Turku

050 563 6543  
050 478 1628  
050 551 1366  
050 350 1697  
050 549 7552

[mikrobiologia@taklab.fi](mailto:mikrobiologia@taklab.fi)  
[jyvaskyla@taklab.fi](mailto:jyvaskyla@taklab.fi)  
[helsinki@taklab.fi](mailto:helsinki@taklab.fi)  
[helsinki@taklab.fi](mailto:helsinki@taklab.fi)  
[turku@taklab.fi](mailto:turku@taklab.fi)

## NÄYTETIEDOT JA KOONTI TULOISTA

ASIAKKAAN NÄYTETUNNUS LABORATORION NÄYTENUMERO		NÄYTTEENOTTOKOHTA	MATERIAALI	TULKINTA MIKROBIKASVUSTA NÄYTTEESSÄ
KY15PS	3767	—	Tiili	VOI VIITATA KASVUSTOON
KY15PU	3768	—	Tiili	VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN KASVUSTOA
KY6U	3769	—	Tiili	VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN KASVUSTOA
KY6S	3770	—	Tiili	VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN KASVUSTOA

## TULOKSET - Mikrobipitoisuudet

Määrittäysraja näytteille on 1 pmy/0,5 ml. Mikrobipitoisuudet ilmoitettu määräraivoina (+/-) -asteikolta.

ASTEIKKO	PESÄKEMÄÄRÄ / ALUSTA	SANALLINEN MÄÄRÄARVIO
-	0 pmy	ei mikrobikasvua
+	1–19 pmy	niukka mikrobikasvu
++	20–49 pmy	kohtalainen mikrobikasvu
+++	50–199 pmy	runsas mikrobikasvu
++++	> 200 pmy	erittäin runsas mikrobikasvu

ASIAKKAAN NÄYTETUNNUS LABORATORION NÄYTENUMERO		MEA	DG18	HAGEM	THG	
		SIENET HOMEET JA HIIVAT	SIENET HOMEET JA HIIVAT	SIENET HOMEET JA HIIVAT	KOKONAISBAKTEERIT	
					MUUT BAKTEERIT	AKTINO- MYKEETIT*
KY15PS	3767	+	++	++	+++	
					++	++ (22)
KY15PU	3768	+++	++	++	++	
					++	++ (20)
KY6U	3769	+	++	+	+++	
					+	++ (41)
KY6S	3770	++	++	+	+	
					+	+ (7)

## TULOKSET - Sienilajisto

ASIAKKAAN NÄYTETUNNUS LABORATORION NÄYTENUMERO		SIENISUVUT / -LAJIT	MEA	DG18	HAGEM
KY15PS	3767	<i>Penicillium</i> sp.	+		+
		<i>Cladosporium</i> sp.	+	+	+
		<i>Alternaria, Ulocladium</i> -lajiryhmä *	+ (1)		
		<i>Fusarium</i> -sukuryhmä *	+ (2)		
		<i>Aspergillus flavus</i> #	+	+	+
		<i>Chrysonilia</i> sp. #			+ (YK)
		Steriili #	+		+
		Havaittu			+
		Hiivat, vaalea	+	+	
KY15PU	3768	<i>Penicillium</i> sp.		+	+
		<i>Cladosporium</i> sp.		+	
		<i>Alternaria, Ulocladium</i> -lajiryhmä *			+
		<i>Chaetomium</i> -sukuryhmä *	+	+ (1)	
		<i>Coelomycetes</i> -sukuryhmä *	+++	+ (8)	++ (28)
		<i>Engyodontium</i> -sukuryhmä *		+ (2)	+ (2)
		<i>Fusarium</i> -sukuryhmä *		+ (2)	
		<i>Drechslera</i> sp. #	+		
		<i>Zygomycota</i> sp. #	+		
		Steriili #			+
		Muu home		+	
Hiivat, vaalea		+			
KY6U	3769	<i>Penicillium</i> sp.		++	+
		<i>Cladosporium</i> sp.	+	+	
		<i>Alternaria, Ulocladium</i> -lajiryhmä *		+ (1)	
		<i>Trichoderma</i> sp. *	+ (YK)		+ (YK)
		<i>Alternaria</i> sp. #	+		
		<i>Aspergillus flavus</i> #		+	
		<i>Zygomycota</i> sp. #	+ (YK)		
		Steriili #	+	+	
		Muu home		+	
Hiivat, vaalea		+			
KY6S	3770	<i>Penicillium</i> sp.		+	+
		<i>Cladosporium</i> sp.		+	
		<i>Acremonium</i> -sukuryhmä *		+ (3)	
		<i>Aspergillus ochraceus</i> -lajiryhmä *			+ (3)
		<i>Trichoderma</i> sp. *			+ (YK)
		<i>Aspergillus flavus</i> #	+	++	+
		<i>Aspergillus niger</i> # / <i>Aspergillus brasiliensis</i>	+	+	+
		<i>Zygomycota</i> sp. #	+		
Steriili #	+				

## TULOKSET - Aistinvaraiset havainnot ja suoramikroskopointi

ASIAKKAAN NÄYTETUNNUS LABORATORION NÄYTENUMERO		TEHDYT HAVAINNOT
KY15PS	3767	Näyttemateriaalissa havaittiin pinnalla tummapilkkuisuutta. Näytteen suoramikroskopoinnissa näytepreparaatissa havaittiin vähäisesti (< 3 näkökentässä) sienirakenteita: muutama yksittäinen itiö.
KY15PU	3768	Näyttemateriaalissa havaittiin pinnalla tummapilkkuisuutta. Näytteestä ei tehty suoramikroskopointia, koska näytteen viljelymenetelmällä analysoitu mikrobipitoisuus osoitti toimenpiderajan ylittävän määrän elinkykyisiä mikrobeja.
KY6U	3769	Näyttemateriaalissa ei aistinvaraisesti havaittu mitään poikkeavaa. Näytteen suoramikroskopoinnissa näytepreparaatissa havaittiin kattavasti (> 25 %) sienirakenteita: tummaa rihmastoa ja rihmastonkappaleita, vihreitä itiökasauomia sekä erilaisia itiöitä.
KY6S	3770	Näyttemateriaalissa havaittiin pinnalla keltapilkkuisuutta. Näytteen suoramikroskopoinnissa näytepreparaatissa havaittiin kattavasti (> 25 %) sienirakenteita: vaaleaa rihmastoa, tummia ja vaaleita rihmastonkappaleita, vihreä itiökasauoma sekä erilaisia itiöitä.

Näytettä tarkasteltiin ensin aistinvaraisesti suoraan ja/tai stereomikroskooppisesti sekä analysoitiin tämän jälkeen tarkastelemalla näytteestä otettua teippipreparaattia valomikroskooppisesti 400-kertaisella suurennoksella. Preparaatista havainnoitiin etenkin sienirihmaston, mutta myös itiöiden, itiöaggregaattien tai muiden sienirakenteiden esiintyminen. Tulosten tulkinta suoritettiin Laboratorio-oppaassa (2018) mainitun suoramikroskopointihavaintojen luokittelutaulukon mukaisesti. Suoramikroskopoinnilla voidaan havaita mahdollisen aktiivisen eli elävän sienikasvuston lisäksi kuollut sekä kuivunut sienikasvusto ja lahohtajasienirihmasto. Teippipreparaattimenetelmällä havaituista löydöksistä ei voi luotettavasti tehdä homesienten lajitunnistuksia eikä bakteeri- ja aktinomykeetti- eli sädesienikasvustojen havaintoja. Myös pelkkien itiöiden havaitseminen ei riitä tulkintaan kasvustosta, koska ne voivat olla kontaminaatiota muusta lähteestä.

## TULOSTEN TULKINTA

Laboratorio käyttää tulosten tulkinnassaan seuraavia määritelmiä, jotka pohjautuvat menetelmän toimenpiderajoihin.

RAKENNUSMATERIAALISSA EI KATSOTA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA
RAKENNUSMATERIAALIN LÖYDÖKSET VOIVAT VIITATA MIKROBIKASVUSTOON
RAKENNUSMATERIAALISSA VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA

ASIAKKAAN NÄYTETUNNUS LABORATORION NÄYTENUMERO		TULOKSEN TULKINTA
KY15PS	3767	Näytteen semikvantitatiivisen viljelyn tulosten perusteella sieni- sekä aktinomykeetti- eli sädesienipitoisuudet olivat kohtalaiset. Näytteen sienilajistossa ei esiintynyt merkittäviä määriä kosteusvaurioindikaattoreita. Suoramikroskopoinnissa ei havaittu mikrobikasvustoon viittaavia määriä sienirakenteita. <b>RAKENNUSMATERIAALIN LÖYDÖKSET VOIVAT VIITATA MIKROBIKASVUSTOON</b>
KY15PU	3768	Näytteen semikvantitatiivisen viljelyn tulosten perusteella toimenpiderajat ylittyivät sienten osalta. Lajistossa esiintyi useampaa eri kosteusvaurioindikaattoria aktinomykeetit eli sädesienet mukaan lukien. <b>RAKENNUSMATERIAALISSA VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA</b>
KY6U	3769	Näytteen semikvantitatiivisen viljelyn tulosten perusteella sieni- sekä aktinomykeetti- eli sädesienipitoisuudet olivat kohtalaiset. Näytteen sienilajistossa ei esiintynyt merkittäviä määriä kosteusvaurioindikaattoreita. Näytteen suoramikroskopoinnissa havaittiin toimenpiderajan ylittävä määrä sienirakenteita. <b>RAKENNUSMATERIAALISSA VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA</b>
KY6S	3770	Näytteen semikvantitatiivisen viljelyn tulosten perusteella sienipitoisuus oli kohtalainen. Lajistossa esiintyi useampaa eri kosteusvaurioindikaattoria aktinomykeetit eli sädesienet mukaan lukien. Näytteen suoramikroskopoinnissa havaittiin toimenpiderajan ylittävä määrä sienirakenteita. <b>RAKENNUSMATERIAALISSA VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA</b>

## MITTAUSEPÄVARMUUS

Toimenpiderajan katsotaan ylittyvän vasta, kun pitoisuustulokset ylittävät raja-arvot laboratorion mittausepävarmuus vähennettynä.

Seuraavat laboratorion teknisen suorituksen mittausepävarmuudet on huomioitu ainoastaan näytteiden tulosten tulkinnessa.

Sienet  $\pm 7\%$  (MEA ja DG18) ja  $\pm 13\%$  (HAGEM)

Muut bakteerit ja aktinomykeetit  $\pm 10\%$  (THG)

Mittausepävarmuutta ei voi laskea määritysrajan alittaville tuloksille eikä tuloksille, joissa pesäkelukumäärä ylittää 200 pmy/malja. Teknisen suorituksen mittausepävarmuus kattaa pesäkelaskentaan perustuvan tulosten suhteellisen toistotarkkuuden.

**TOIMENPIDERAJAT****RAKENNUSMATERIAALISSA VOIDAAN KATSOA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA****Toimenpiderajan ylitys**

Semikvantitatiivisen rakennusmateriaalinäytteen mikrobianalyysin tulosten perusteella materiaalissa voidaan katsoa esiintyvän mikrobikasvustoa eli toimenpiderajat ylittyvät, kun näytteen sieni- tai aktinomykeettipitoisuus on runsas (+++) / erittäin runsas (++++). Toimenpideraja ylittyy myös, mikäli näytteestä tehdyt visuaaliset havainnot osoittavat esim. lahovaurion ja/tai suoramikroskopoinnilla varmennetut tulokset kattavan sienirihmaston näytepreparaateissa >25 % mikroskoopin näkökentistä, joissa on näytemateriaalia. Tällainen sieni- tai aktinomykeettikasvusto viittaa materiaalissa olevaan kosteus- ja mikrobivaurioon, joka kohdentuu näytteenottokohtaan.

**RAKENNUSMATERIAALIN LÖYDÖKSET VOIVAT VIITATA MIKROBIKASVUSTOON****Toimenpiderajan ylityksen arviointi edellyttää näytteenottokohdan muiden mikrobilähteiden tarkastelua**

Semikvantitatiivisen rakennusmateriaalinäytteen mikrobianalyysin tulokset voivat viitata mikrobikasvustoon, mikäli näytteen sienipitoisuus on niukka (+) / kohtalainen (++) ja lajistossa esiintyy useita ( $\geq 2$ ) kosteusvaurioindikaattoreita (ei kuitenkaan yksittäisinä pesäkkeinä) millä tahansa viljellyistä alustoista aktinomykeetit eli sädesienet mukaan lukien tai aktinomykeettipitoisuus on kohtalainen (++)). Tulkinnassa usealla kosteusvaurioindikaattorilla tarkoitetaan useaa ( $\geq 2$ ) eri sienisuku- / lajiryhmää, ja näissä ryhmissä tulee havaita useita (>2) pesäkkeitä. Yhden kosteusvaurioindikaattoriryhmän pesäkkeet useallakaan eri alustalla eivät riitä tulkintaan "löydökset voivat viitata mikrobikasvustoon", eivätkä myöskään usean eri kosteusvaurioindikaattoriryhmän yksittäiset pesäkkeet. Tulokset voivat viitata mikrobikasvustoon myös silloin, kun näytteestä tehdyt suoramikroskopoinnilla varmennetut tulokset osoittavat sienirihmastoa useassa kohden näytettä eli näytepreparaateissa  $\geq 3$  mikroskoopin näkökentässä tai  $\geq 10$  % näkökentähavainnoista. Tällainen tulos lopullisen toimenpiderajan ylittymisen kannalta edellyttää aina näytteenottokohdan muiden mikrobilähteiden arviointia, koska sienikasvusto voi kertoa näytteenottokohdan läheisyydessä olevasta, kuivahtaneesta tai alkavasta mikrobikasvustosta, mutta tulos voi selittyä myös muualta kulkeutuneista mikrobeista.

**RAKENNUSMATERIAALISSA EI KATSOTA ESIINTYVÄN MIKROBIKASVUSTOA****Toimenpideraja ei ylity**

Semikvantitatiivisen rakennusmateriaalinäytteen mikrobianalyysin tulosten perusteella materiaalissa ei katsota esiintyvän mikrobikasvustoa eli toimenpiderajat eivät ylity, mikäli näytteen sienipitoisuus on ei mikrobeja (-), niukka (+) tai kohtalainen (++) eikä lajistossa esiinny kosteusvaurioindikaattoreita tai niitä esiintyy vain yksittäisiä pesäkkeitä. Toimenpideraja ei myöskään ylity, mikäli näytteen suoramikroskopoinnissa ei havaita rihmastoa tai havaitaan ainoastaan 1–2 yksittäistä rihmaston kappaletta tai pelkkiä itiöitä.

Laboratorion tuloksia tai tulkintoja tulkittaessa on hyvä huomioida mm., että

- Semikvantitatiivisen rakennusmateriaalinäytteen mikrobianalyysin bakteeripitoisuuksille ei viitekirjallisuudessa ole toimenpiderajoja. Näytemateriaalista viljelymenetelmällä havaittu suuri pitoisuus vain muita bakteereita kuin aktinomykeettejä voi johtua myös materiaalin likaisuudesta, joten ainoastaan bakteeripitoisuuden perusteella ei voida tehdä johtopäätöstä materiaalin vaurioitumisesta.
- Jos rakennusmateriaalinäytteen sienipitoisuus on alle toimenpiderajan, kyseessä voi olla vaurioitumaton näyte tai kuivunut/kuollut kasvusto. Usean indikaattorin esiintyminen pieninä pitoisuuksina saattaa viitata itiöiden kerääntymiseen näytemateriaaliin ajan myötä tai vanhaan kuivuneeseen vaurioon. Toimenpiderajan ylittymisen arviointi edellyttää näytteen suoramikroskopointia.
- Toimenpiderajat eivät koske näytettä (esim. lämmöneristeet), mikäli se on ollut suorassa kosketuksessa ulkoilman ja/tai maaperän kanssa eikä materiaalin sijaintirakenteesta ole varmistettua ilmayhteyttä sisätiloihin. Toimenpiderajat eivät myöskään ylity, mikäli pesuhuoneen tai muun vastaavan kostean tilan pinnoilla esiintyvä mikrobikasvu on poistettavissa puhdistamalla tai ennaltaehkäistävissä ilmanvaihtoa tehostamalla eikä muuta näyttöä rakenteeseen liittyvästä vauriosta ole.

Altisteen toimenpiderajalla tarkoitetaan pitoisuutta, mittaustulosta tai ominaisuutta, jolloin sen, kenen vastuulla haitta on, tulee ryhtyä terveydensuojelulain 27 §:n tai 51 §:n mukaisiin toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa sen poistamiseksi tai rajoittamiseksi. Lainaus: Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa IV, mikrobiologiset olot, Valvira, 8/2016

**VIITTEET:**

- Asumisterveysasetus 545/2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Helsingissä 1.1.2018.
- Asumisterveysasetuksen 545/2015 pohjalta laadittu Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa IV 8/2016, päivitetty 19.2.2020 (Asumisterveysasetus § 20)
- Laboratorio-opas, Mikrobiologisten asumisterveystutkimuksien näytteenotto ja analyysimenetelmät 2018, Anna-Mari Pessi ja Kaisa Jalkanen / Suomen Ympäristö- ja Terveysalan Kustannus Oy

Satu Nykänen



mikrobiologian johtava tutkija

puh. 050 322 2272

Anna Launonen



mikrobiologi

puh. 050 325 1772

Liite 4

Taulukkoarvot erään uuden poltetun tiilen suoritustasoilmoituksesta sekä vertailuarvoja Gamle Murstenin uudelleenikäytettyjen tiilien tuotannosta.

UUSI TIILI Poltettu punatiili umpi, suoritus- soilmoitus (DoP)	ARVOT	RE-cycled clay masonry units EAD: 170005-00-0305 ja ko. laitoksen testime- netelmät	Gamle Mursten, Tanska: tiilityypit: konepuhdistettuja uudelleenikäytettä- viä tiiliä: CE-merkintä perustuu EAD: 170005-00-0305 ja tuotes- taukset standardisarjan 772-menetelmiin				
SFS-EN 771-1:2012 + A1:2015 DoP Y0020 v.02 AVCP 2+	Seuraavien kappalei- den mitat ja painot ra- porteissa: katso linkki: tulokset!	<a href="#">G- Keltai- nen</a>	<a href="#">R-punainen</a>	<a href="#">F-Flensbur- gin kivi</a>	<a href="#">H- Hampu- rin kivi</a>	<a href="#">B- taka- kivi, Bags- ten</a>	
Puristuslujuus	30 N/mm <sup>2</sup>	Puristuslujuus EN 772- 1, kohta 7.3.2 b)	52,6 Mpa	60,4	37,1	38,1	39,8
			38,6 Mpa	44,4	27,1	27,3	29,1
Vedenimukyky	max 10 %	EN 772-7:1998	16,50 %	10,3	19,2	17,1	16,5
Pitkäaikaiskestä- vyys, durability	Säänkestävä F2 SFS 7001 liite 1, hyväk- sytty	EN 772-5, 5.2					
Bruttokuivatiheys	1 867 kg/m <sup>3</sup> D1 (± 10%)	Tiheys EN 772-13, bruttokuivatiheys kg/m <sup>3</sup>	1595	1749	1502	1578	1583
Veden alkui- munopeus	max 4,0 kg/m <sup>2</sup> /min	Vedenalkuimunopeu- den määrittäminen EN 772- 11	2 kg/m <sup>2</sup> /min.	0,7	1,8	1,9	2,1



## TIILIEN RESONANSSITAAJUUDEN MITTAUKSET

### 1 TAUSTA

Rakennusmateriaalien kierrätykseen erikoistunut Spolia Design pyrkii kehittämään menetelmiä rakennuksista purettujen tiiliskivien rakenteellisen jäykkyyden ja kunnon arviointia varten. Toimeksianto liittyy testaukseen, jossa tiiliskiven kuntoa pyritään selvittämään kohdistamalla siihen mekaaninen impulssi, ja mittaamalla siitä aiheutuva akustinen vaste eli tiilen helähdys. Iskusta tallennetulle äänisignaalille voidaan tehdä kapeakaistainen spektrianalyysi ja määrittää kappaleen resonanssitaaajuudet tarkasti.

Spolian tarkoituksena on verrata akustisen testauksen vasteita ja resonanssitaaajuuksia samoille tiilille tehtävien NDT-laboratoriotestien tuloksiin. Tavoitteena on selvittää, löytyisikö näiden välillä sellaista korrelaatiota, jonka avulla akustisella testillä voisi erottaa hyväkuntoiset ja vaurioituneet tiilet toisistaan. Parhaimmillaan akustinen testaus voisi muodostaa kevyen, nopean, edullisen ja kenttäkelpoisen vaihtoehdon laboratoriossa tehdylle NDT-testaukselle.

Kohdekäynnillä tarkasteltiin akustisen testauksen lähtökohtia, edellytyksiä, menetelmiä sekä mittaukseen ja analyysiin soveltuvia työkaluja. Lisäksi tehtiin koeluontoisia testejä yksittäisille tiilille.

Paikalla olivat Spolia Design/Petri Salmi, Mikko Piitulainen ja Santeri Paronen, sekä Akukon Oy/Timo Peltonen.

### 2 MENETELMÄT

Tiilen resonanssitaaajuus mitattiin tukemalla tiili betonilattialle kahden kapean ja joustavan kaistan varaan, ja kohdistamalla pyöreäpäisellä vasaralla kevyt isku tiilen keskelle yläpintaan. Mittaus tehtiin sekä kyljellään että lappeellaan lepäävälle tiilille.

Tukipisteinä toimivat joustavat kaistat sijoitettiin kohtiin  $0,224 * L$  tiilen päädyistä, jossa  $L$  on tiilen pisin mitta. Tällä sijoittelulla varmistettiin, että tiilen resonanssit pääsevät heräämään vapaasti.



Mittaus tehtiin rauhallisessa ympäristössä, jossa ei ollut voimakkaita hälyääniä.

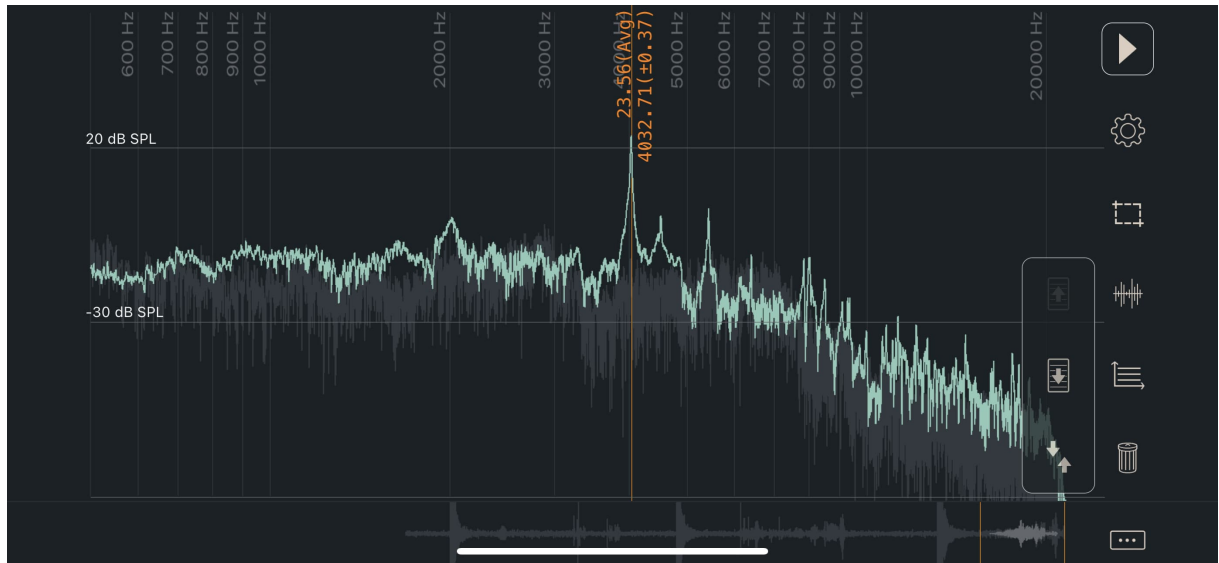
## 2.1 Älypuhelin mittauslaitteena

Mittauslaitteeksi soveltuu yksinkertaisimmillaan älypuhelin, jossa on sopiva äänisignaalin tallennukseen ja kapeakaistaspektrianalyysiin (FFT) kykenevä sovellus.

Esimerkkinä käytettiin IOS-mobiililaitteilla toimivaa Sound Spectrum Analysis -appia:

<https://usefulmobileapps.com/en/audio-spectrum-analyzer.php>

Kuvassa on esimerkki sovelluksella tiilikiven iskusta tallennetusta kapeakaistaspektristä. Kursori on sijoitettu tiilen perustaajuuden eli alimman selkeän resonanssihuipun kohdalle. Resonanssitaajuuden todettiin olevan tällä menetelmällä toistettavissa ja luettavissa muutaman hertsin tarkkuudella.



Sovellus mahdollistaa mitattujen signaalien ja spektrien tallentamisen, nimeämisen ja lähettämisen edelleen. Sovelluksen asetukset on listattu *liitteessä A*.

## 2.2 Lämpäri signaalin tallennuksessa

Mittaus toistettiin käyttäen Windows 10 -kannettavaa ja sen sisäistä mikrofonia. Äänitykset tehtiin käyttäen ilmaista Ocenaudio-audioeditoria: <https://www.ocenaudio.com/>.

Vaikka mittaus onnistuu sisäiselläkin mikrofonilla, ulkoisella mikrofonin käyttö antaisi lisää mahdollisuuksia. Tällöin mikrofoni ja tietokone voidaan sijoittaa käytön kannalta toimivimpiin paikkoihin. Mittauksiin soveltuu esim. edullinen usb-mittausmikrofoni tai usb-äänikortti ja siihen liitetty mikrofoni.

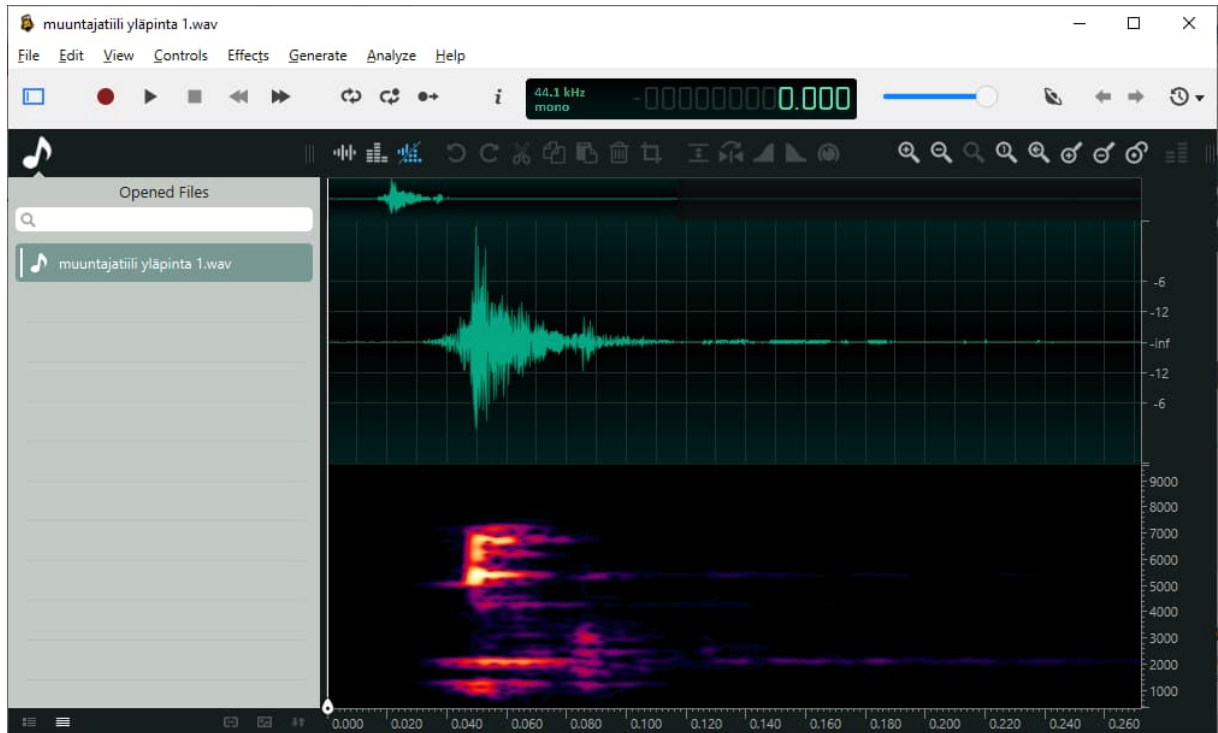
Taajuusvasteella ei ole suurta merkitystä, kunhan mikrofoni kykenee tallentamaan noin 100 Hz – 10 kHz kaistan, ja sen herkkyys on sopiva varmistamaan riittävän signaalikohinasuhteen.

Tallennuksen yhteydessä on varmistettava, etteivät mikrofonin tallentaman äänisignaalin huiput ole niin voimakkaita, että ne leikkaantuvat pois signaalista (clipping). Aikatason signaalin huippujen leikkautuminen sotkee myös signaalin spektrin, jolloin tulokset vääristyvät eikä niitä voi hyödyntää.

Mikrofonisignaalin tasoja voidaan säätää äänikortin tai Windowsin mikserisovelluksesta, tai mikrofoni voidaan sijoittaa hieman kauemmas testattavasta tiilestä. Rauhalliset iskut riittävät mittauksen tekemiseen.

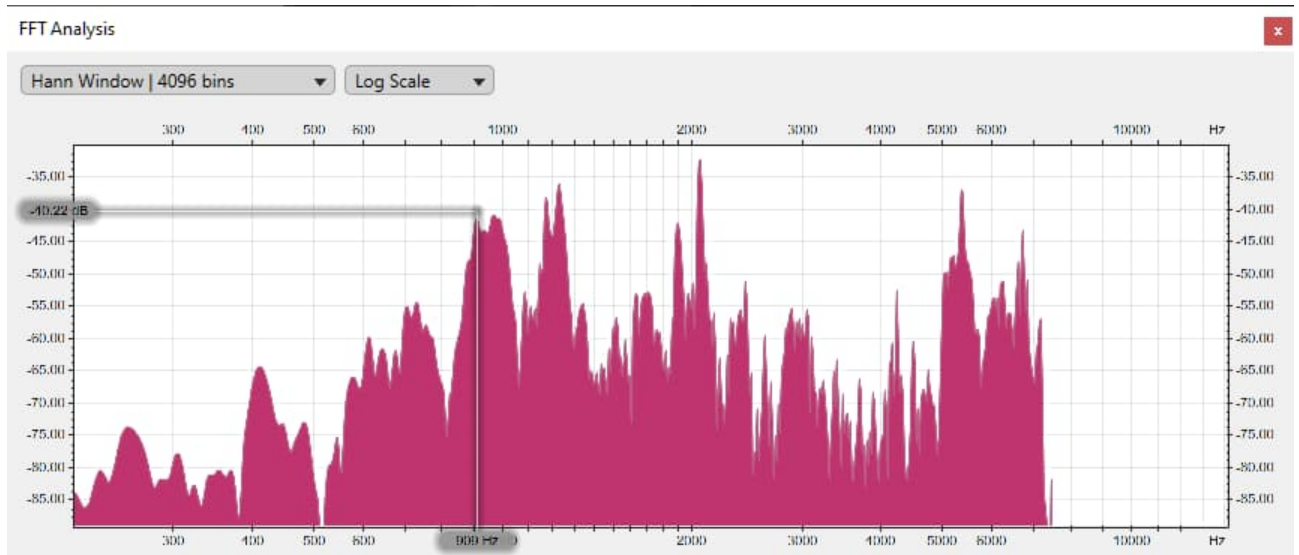
Audioeditorilla äänitetystä tallenteesta (44100 Hz, 16 bit, mono) rajattiin yksittäiset iskut noin 1 sekunnin mittaisiin pätkiin, jotka tallennettiin yksittäisiksi wav-tiedostoiksi. Iskun on hyvä alkaa läheltä pätkän alkua.

Kuvassa näkyy yksittäisen iskun aikatazon signaali sekä sen alla signaalista laskettu spektrogrammi, joka esittää taajuusjakauman vaihtelua ajan funktiona. Voimakkaimmat spektrihuiput näkyvät spektrogrammissa kirkkaana.



### 2.3 Kapeakaistaspektrianalyysi audioeditorilla

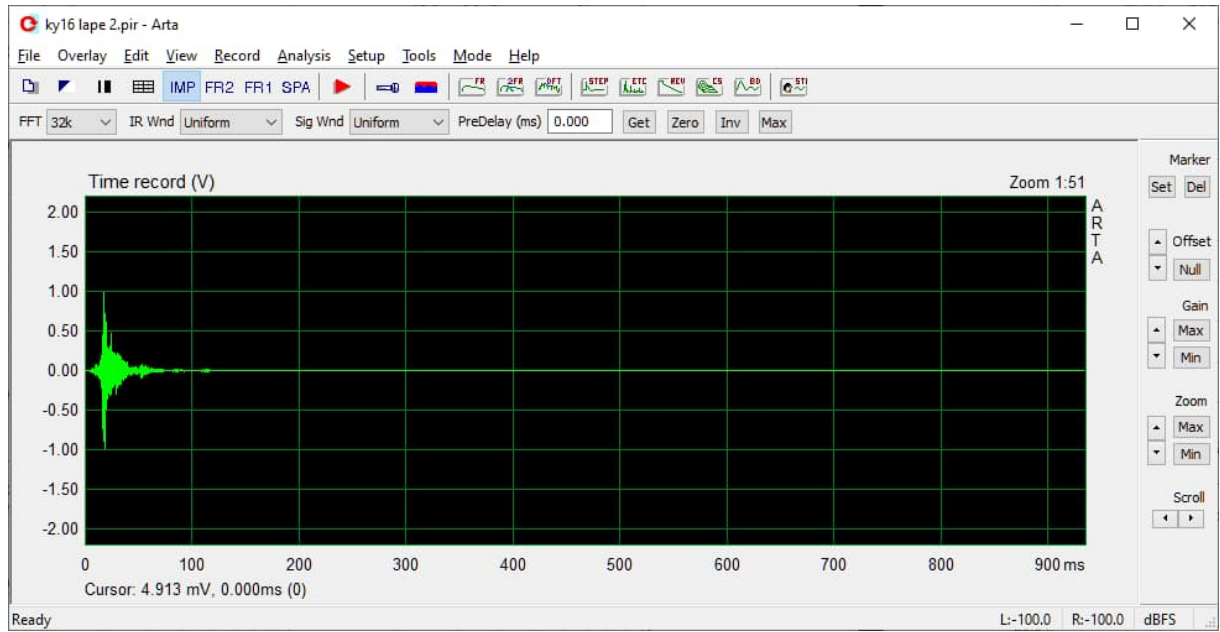
Ocenaudio tarjoaa rajalliset työkalut kapeakaistaspektrin tarkasteluun. Aikatazon impulssista valitaan voimakkain osa maalaamalla, jonka jälkeen Analyze/FFT Analysis-toiminto tuottaa kapeakaistaspektrin. (Asetukset: Hann Window/4096 bins, Log scale). Kuvaajaan voi zoomata hiirellä.



## 2.4 Kapeakaistaspektrianalyysi Arta-ohjelmalla

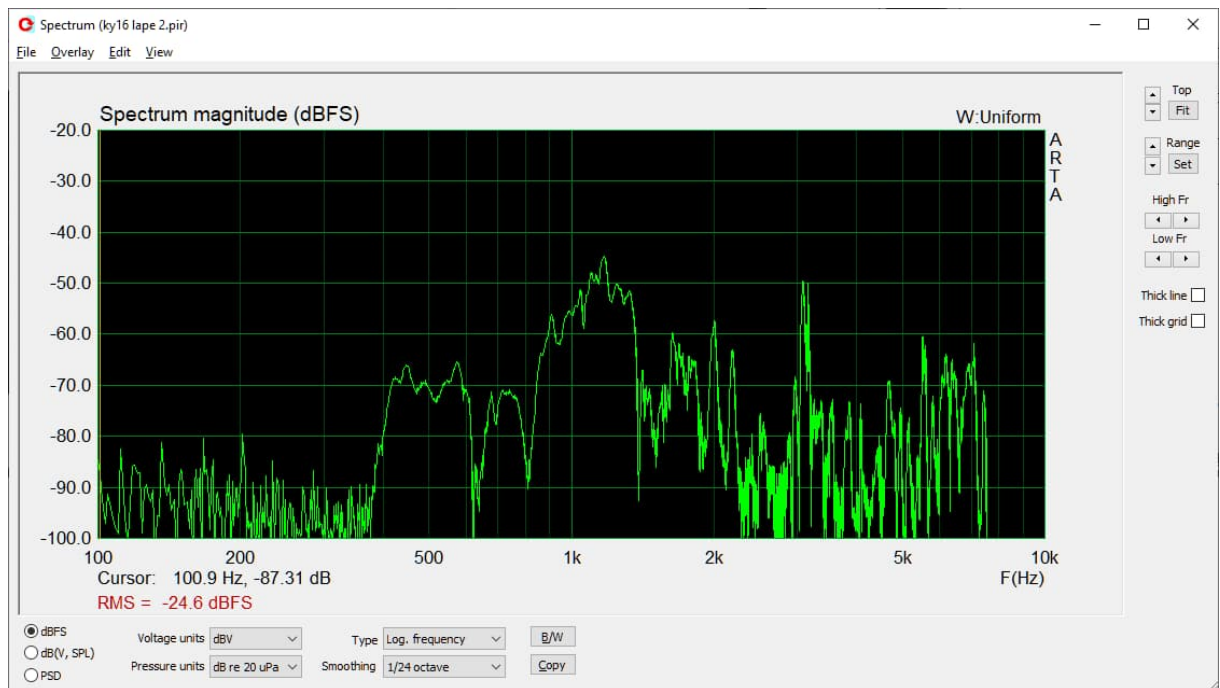
Wav-tiedostoon tallennettujen yksittäisten iskujen äänitallenteiden tarkempi ja helposti toistettava spektrianalyysi onnistuu esim. kaupallisella Arta-ohjelmalla: <https://artalabs.hr/download.htm>

Signaali ladataan valitsemalla File/Import/.WAV file. Näkymä rajataan koko signaalin mittaiseksi napsauttamalla oikean laidan työkalupalkista Zoom Min -painiketta.



Varmista, että FFT-asetukset kuvaajan yläpuolella työkalurivillä ovat FFT: 4k, Uniform, Uniform.

Kapeakaistaspektrin saa näkyviin valitsemalla Analysis/Unsmoothed DFT frequency response/Spectrum, tai napsauttamalla ylemmän työkalurivin DFT-painiketta:



Kapeakaistaspektrin asetukset näkyvät kuvassa. Kuvaajaa napsauttamalla saa näkyviin kursorin, jonka avulla halutun taajuushuipun voi hakea ja lukea sen arvon kuvaajan alapuolelta.

Mitatut spektrit voi tallentaa jatkokäsittelyä varten numeerisesti (File/Export) tai bittikarttana (Edit/Copy). Bittikarttaan saa halutessaan valkoisen taustan (Edit/BW background color).

Mitatun spektrin voi myös lukita kuvaajan taustalle niin, että se on nähtävissä vertailukohtana myös seuraavissa mittauksissa (Overlay/Set as Overlay).

Uuden tiedoston voi avata ohjelman pääikkunasta sulkemalla ensin Spektri-ikkunan.

Arta-ohjelmalla on mahdollista myös tehdä mittaus ja tallentaa ääntä analysoitavaksi suoraan:

Valitse pääikkunassa Record/Signal Time Record, ja varmista että asetukset ovat seuraavat:

Signal Generation and Recording

Generator

Continuous  Pulse  Sine Burst

None  Width  Uniform

Freq (Hz)  Sine periods  Add half sine period  Level (dBFS)  Repetition (samples)  Invert output signal  Generate trigger on right ch.

Signal recording

Input channel  Length (samples)  Sampling rate (Hz)  Time constant:  Number of averages  Invert Phase of input channel  Wait for trigger

Trigger

Trigger channel  Trigger slope  Trigger value / full scale  Predelay (samples)  Time waiting trigger (s)  Close after recording

L | -70 | -50 | -30 | -10 dB  
R | -60 | -60 | -40 | -20 | dB

Generate Link  Record Default OK

Napsauta ikkunan alareunan Record-painiketta. Mittaus käynnistyy näillä asetuksilla automaattisesti, kun mikrofoniin tuleva äänitaso on riittävän voimakas. Tallennus kestää runsaan sekunnin (65536/48000 s), joka riittää impulssin tallentamiseksi. Pitempikin aika on säädettävissä, jos tarvis. Napsauta mittauksen loppuksi OK-painiketta.

Valitse pääikkunan oikean laidan työkalupalkista jälleen Zoom Min, niin saat koko signaalin näkyviin. Tallennus onnistuu File-valikosta ja spektrianalyysi kuten edellä kuvattu.

### 3 MAHDOLLISUUKSIA JATKOTUTKIMUKSIIN

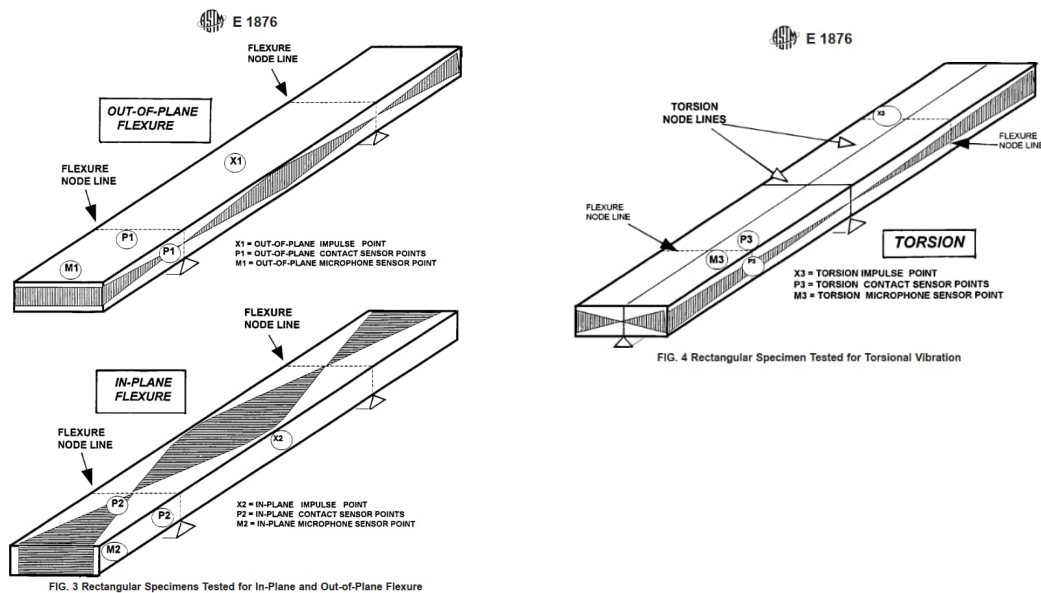
Resonanssitaajuuden mittausta voidaan hyödyntää myös kappaleen jäykkyyden, elastisuuden ja sisäisen kitkan arvioinnissa. Tiilikivien kimmokertoimen (Young's modulus), liukukertoimen (shear modulus) ja/tai Poissonin suhteen (Poisson's ratio) määrittäminen voisivat mahdollisesti korreloida tiilikivien rakenteellisen jäykkyyden sekä yksittäisten kivien välisten erojen tarkastelussa.

Impulssiherätemenetelmä (IET) perustuu tutkittavan kappaleen resonanssitaajuuden mittaukseen sekä kappaleen dimensioihin ja massaan. Menetelmä on kuvattu mm. Wikipediassa sekä ASTM-standardissa E 1876-01:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Impulse\\_excitation\\_technique](https://en.wikipedia.org/wiki/Impulse_excitation_technique)

[http://forlab.pt/wp-content/uploads/2015/08/E1876\\_mvuj8965.pdf](http://forlab.pt/wp-content/uploads/2015/08/E1876_mvuj8965.pdf)

Kappaleen taipumiseen (flexural vibration) liittyvät resonanssitaajuudet mitataan edellä kuvatulla tavalla lappeellaan ja kyljellään olevalle tiilelle. Lisäksi on mahdollista mitata myös vääntöväärhtelyiden (torsional vibration) resonanssitaajuus, mutta tässä kappaleen tuenta poikkeaa aiemmista.



Menetelmässä on esitetty laskentakaavat, joiden avulla kappaleen materiaalin kimmokerroin, liukukerroin ja Poissonin suhde voidaan määrittää mitatuista resonanssitaajuuksista sekä kappaleen dimensioista ja massasta.







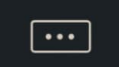

### 4 LISÄTIETOJA MITTAUKSISTA JA ANALYYSISTA

Lisätietoja akustisista mittauksista ja signaalianalysista on saatavilla Akukon Oy:stä. Yhteyshenkilönä toimii DI Timo Peltonen, 050 5894814, timo.peltonen@akukon.com

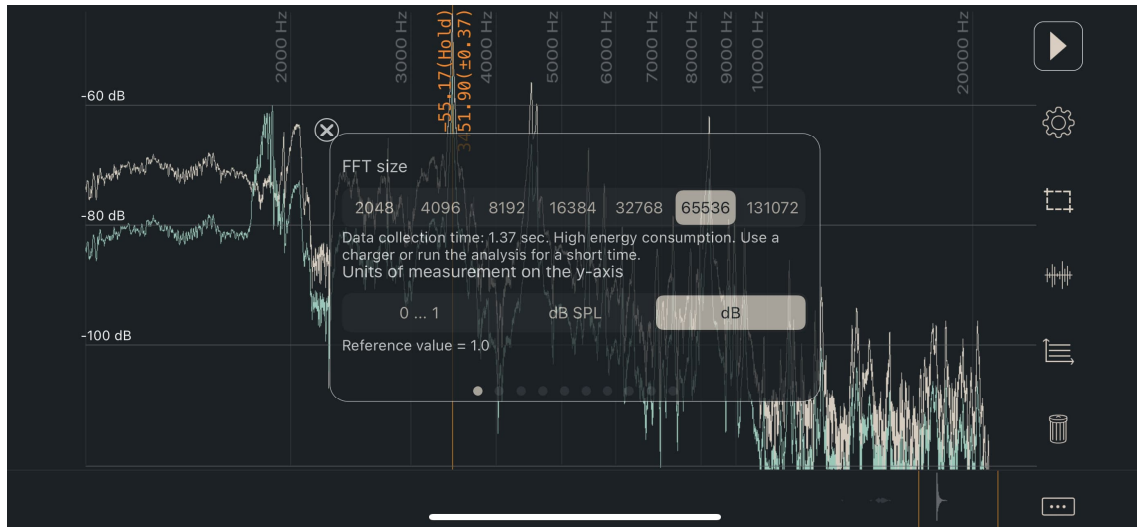
## LIITE A. SOUND SPECTRUM ANALYSIS -OHJELMAN SUOSITELLUT ASETUKSET



Oikean laidan painikkeet:

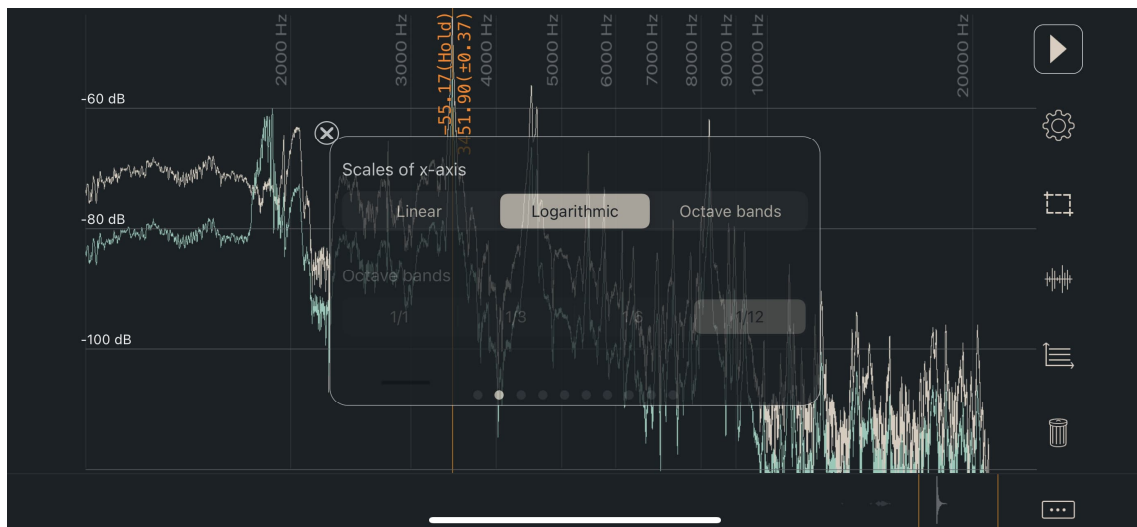
	Käynnistää mittauksen. Asetuksista voi valita mittaukselle kiinteän keston, jolloin tallennus päättyy esim. 4 sekunnin kuluttua.
	Asetusvalikko
	Rajaa signaalia.
	Vaihtaa aikatason ja taajuustason näkymien välillä
	Pystyakselin skaalaus. Floating = automaattinen, Fixed = kiinteä asetus, joka on säädettävissä (+)/(-).
	Näytöllä olevan signaalin tyhjennys uutta mittausta varten. Käytä tätä ennen uuden mittauksen käynnistämistä. Muista tallentaa haluamasi tulokset ensin!
	Avaa signaalien tallennus- ja latausvalikon: 

Seuraavat asetukset vaikuttavat toimivilta:



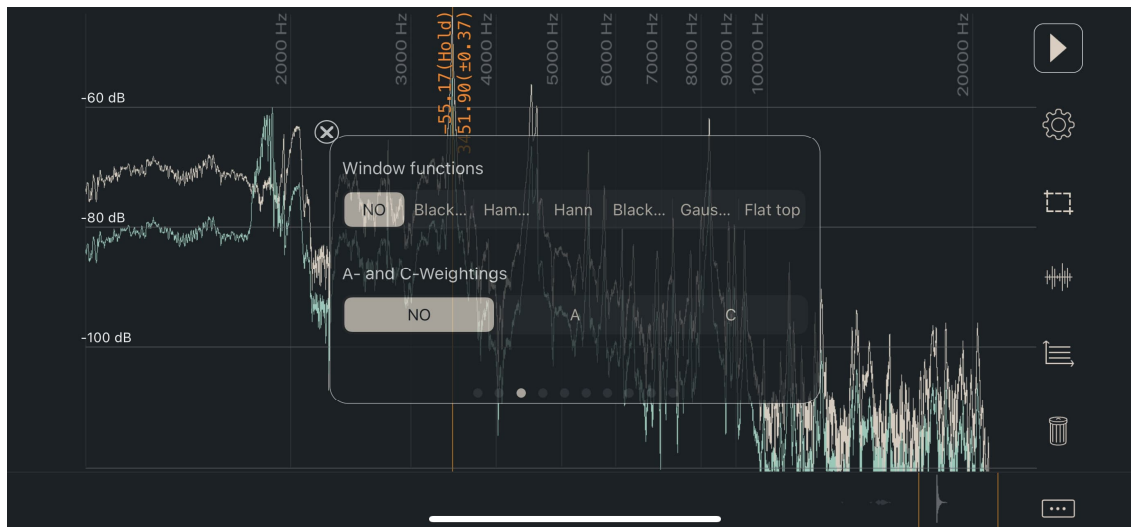
FFT:n koko kannattaa valita niin pitkäksi, että taajuusresoluutio on riittävä. Ohjelma tallentaa 48000 näytettä sekunnissa, joten 65536 kokoinen FFT vaatii vähintään 1,6 sekunnin mittaisen tallenteen.

Aikatason signaali näkyy ruudun alalaidan palkissa pienoiskoossa; näytön spektrikuvaaja lasketaan palkin oikeassa reunassa näkyvien oranssien viivojen väliseltä ajanjaksolta. Jos mittaus on pitempi kuin FFT:n koko, palkkia vierittämällä voi varmistaa, että FFT on laskettu juuri impulssin eikä muun taustahälyn kohdalta.

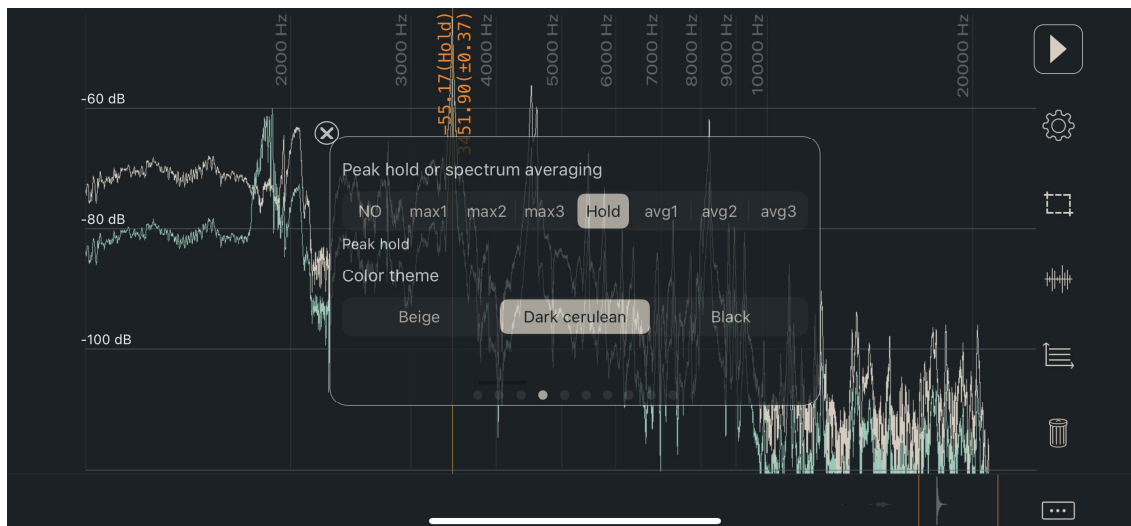


Taajuusakseliksi voi valita logaritmisen tai lineaarisen.

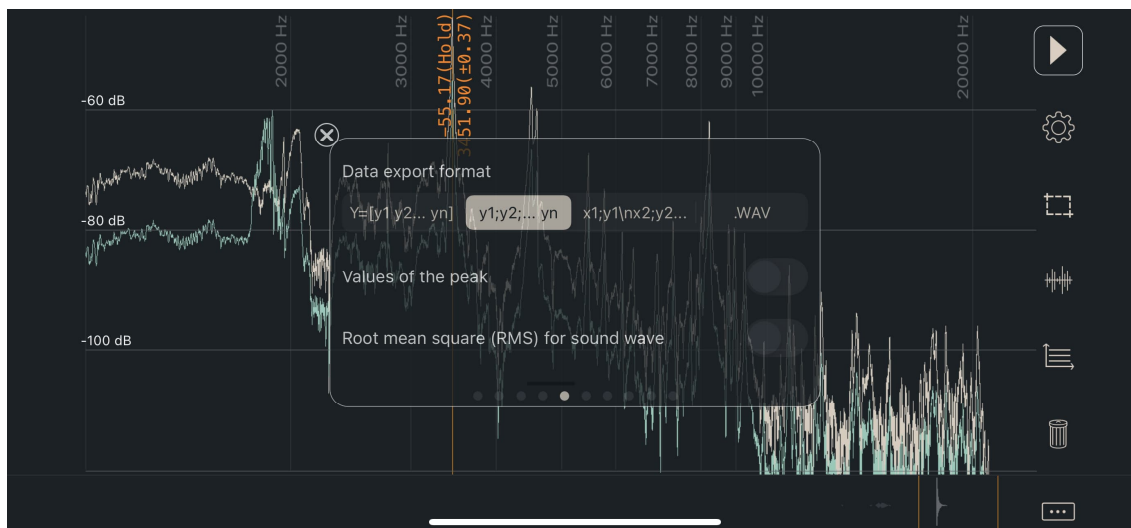




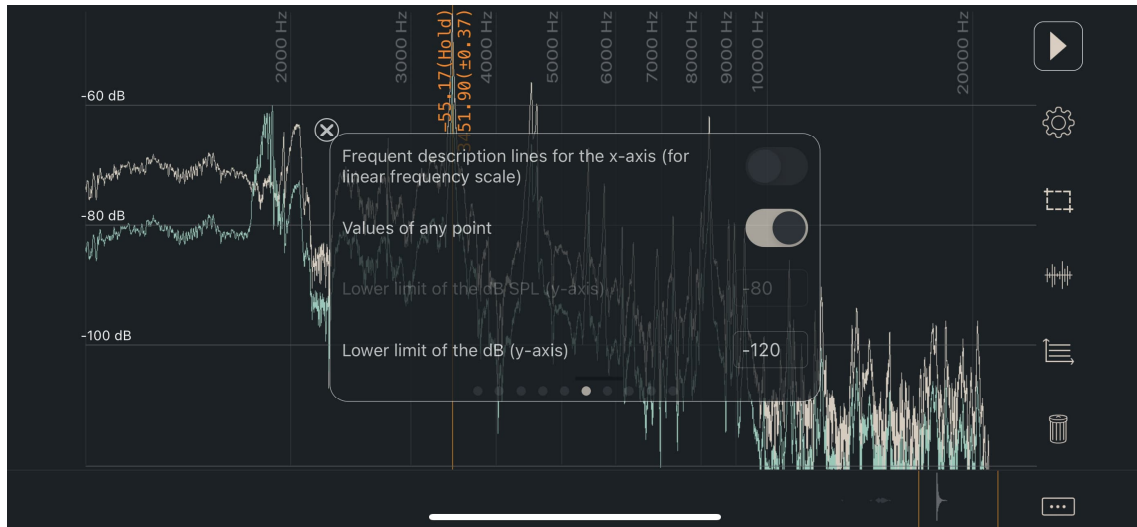
Ikkunointifunktio kannattaa pitää pois päältä, kun kyseessä on yksittäisen impulssin spektrianalyysi. Oletuksena on, että impulssi mahtuu aikaikkunaan, joka alkaa ja loppuu hiljaisuudesta.



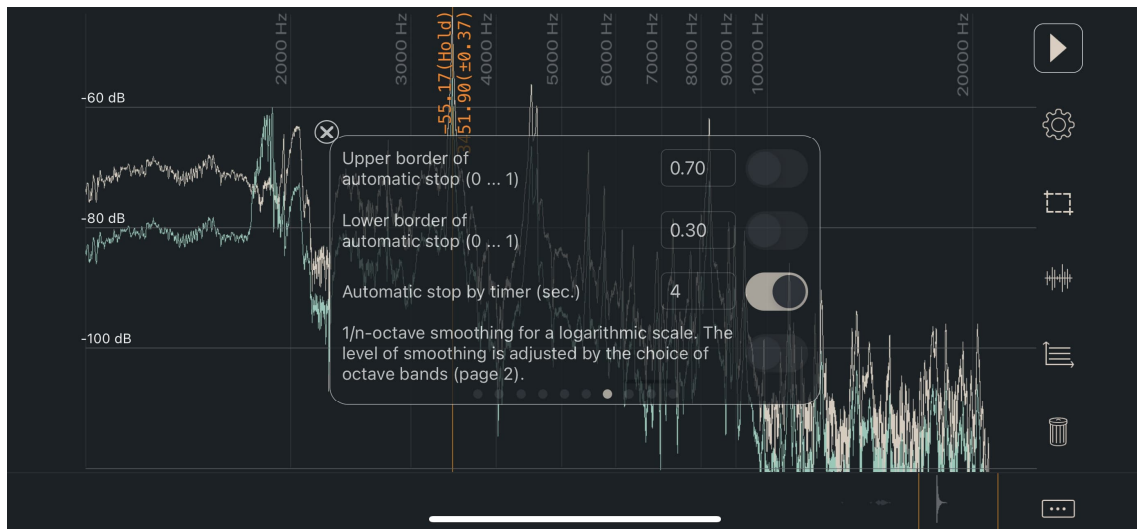
Hold-toiminto jättää voimakkaimman mittauksen aikana esiintyneen spektrin näkyviin. Tällä on merkitystä vain, jos valitsee asetukset niin että mittauksen ajalliseen keston mahtuu useampi FFT-ikkuna.



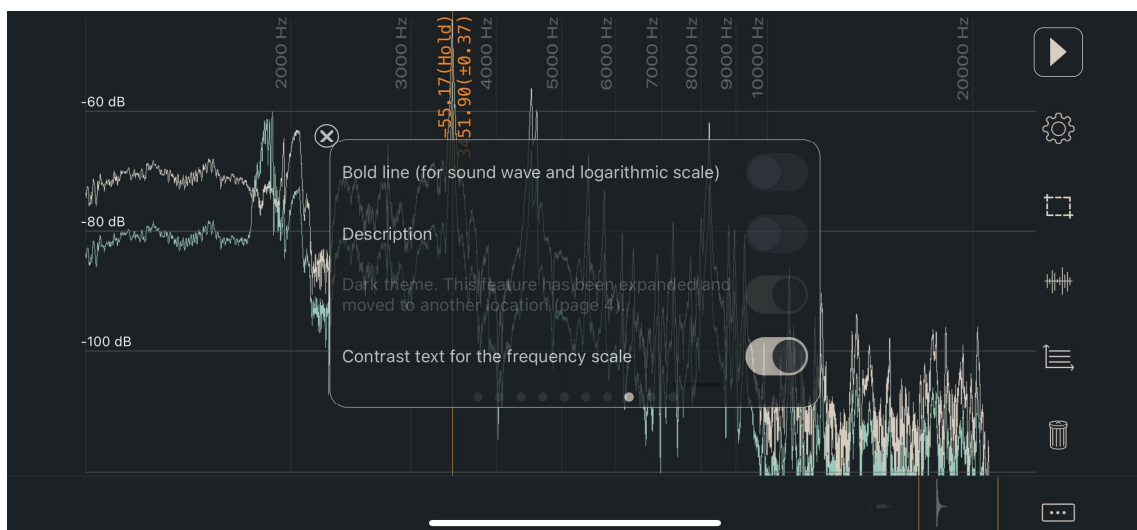
Tietojen vienti-/tallennusmuodon voi valita tästä.

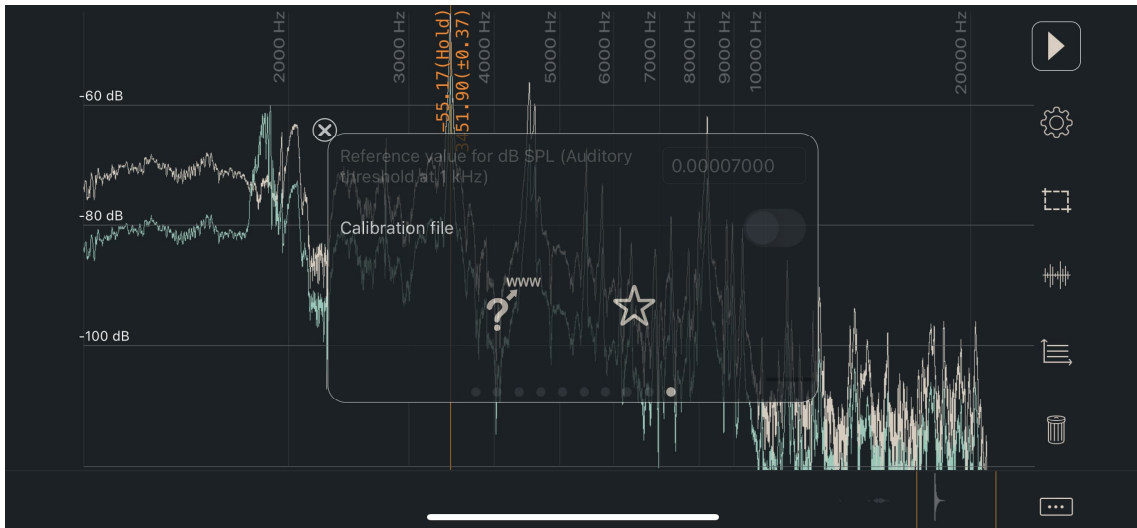
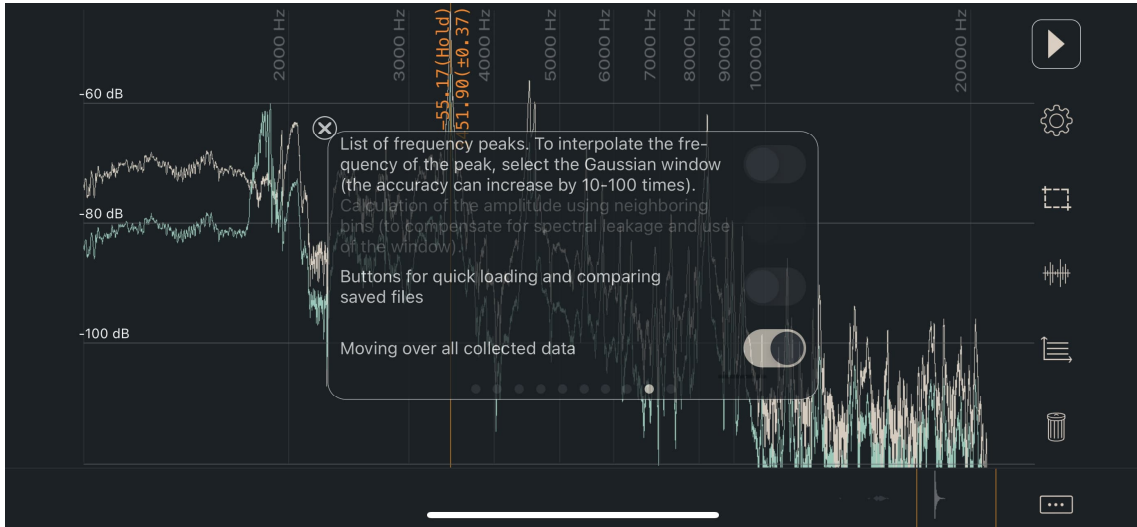


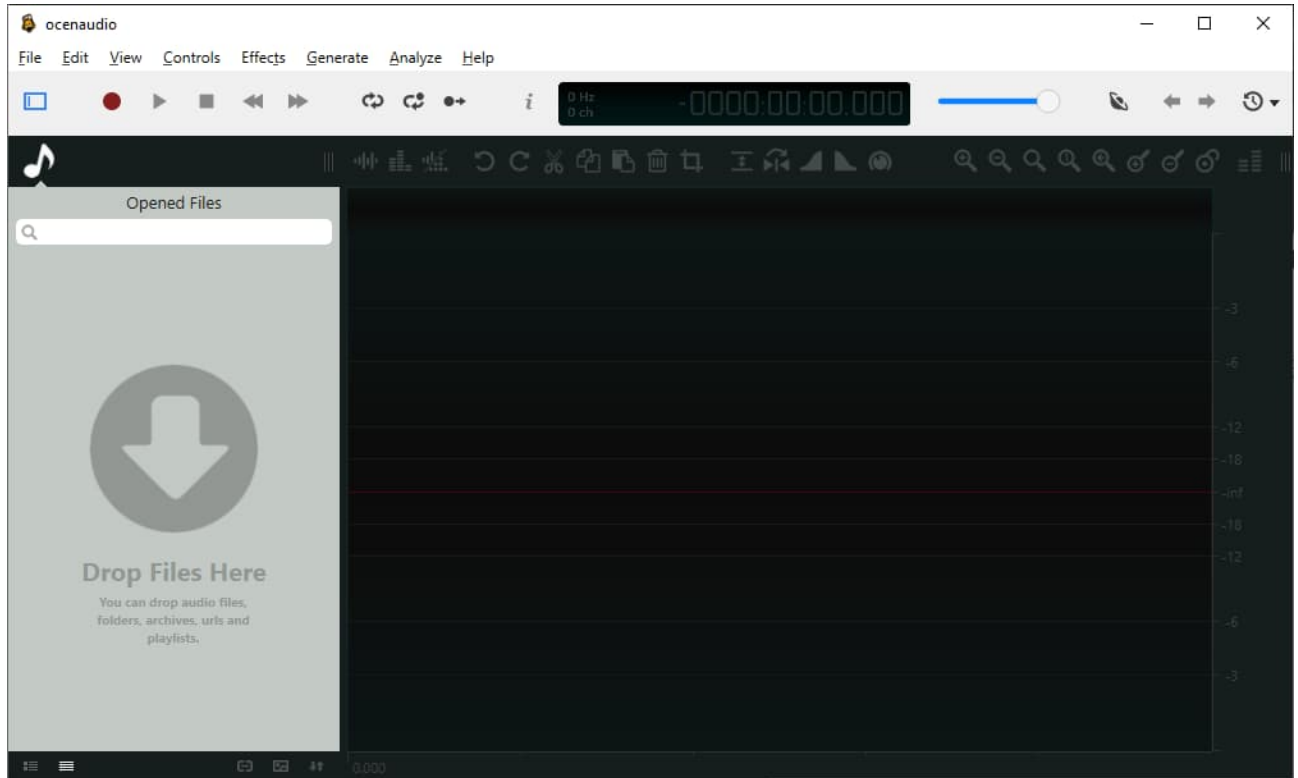
Näytölle saa kursorin, jonka avulla voi lukea taajuuden halutulta kohdalta.



Mittauksen kestoksi on tässä asetettu 4 sekuntia.

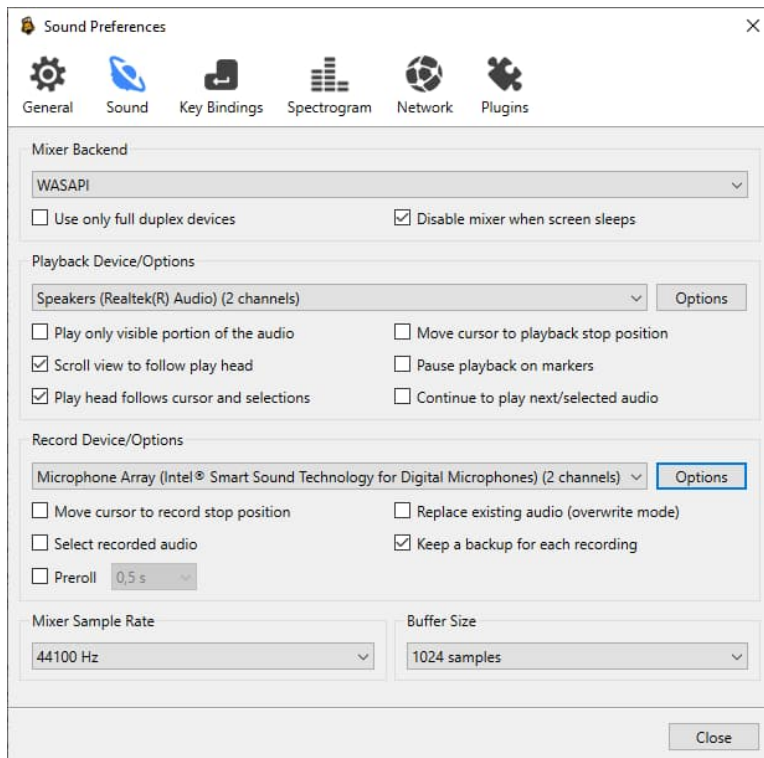




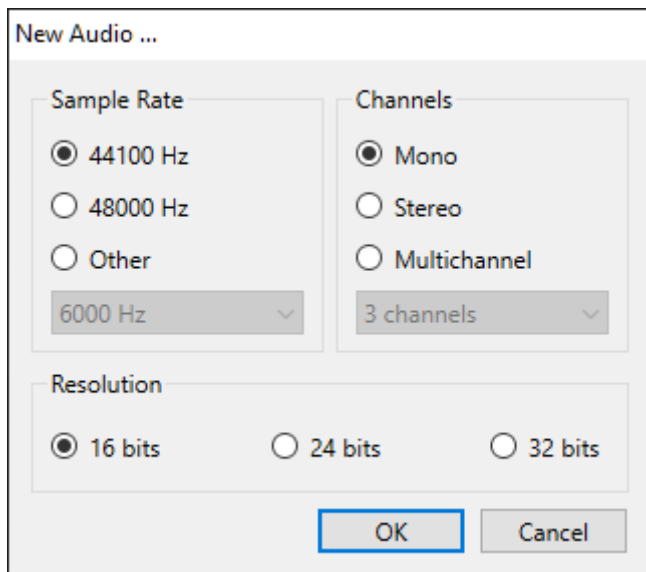
**LIITE B. OCENAUDIO-OHJELMAN KÄYTTÖ PÄHKINÄNKUORESSA**

Ohjelmalla voi luoda uuden tiedoston, äänittää ja tallentaa signaalin. Vaihtoehtoisesti voi avata äänitiedostoja levyltä.

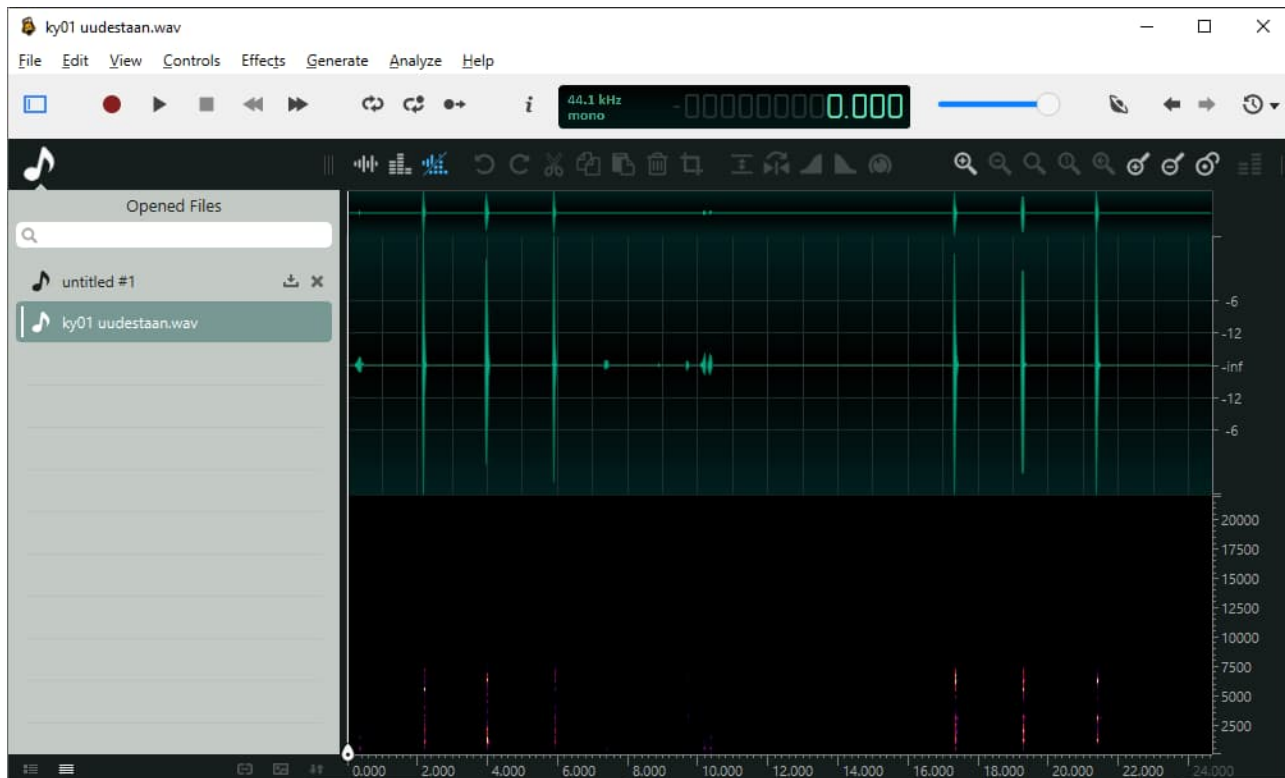
Äänikortin asetukset: Edit/Preferences, Sound-välilehti. Jos tietokoneessa on useampi äänilaite, täältä valitaan toisto- ja tallennuslaitteet. (Mixer Backend, Playback Device, Record Device).



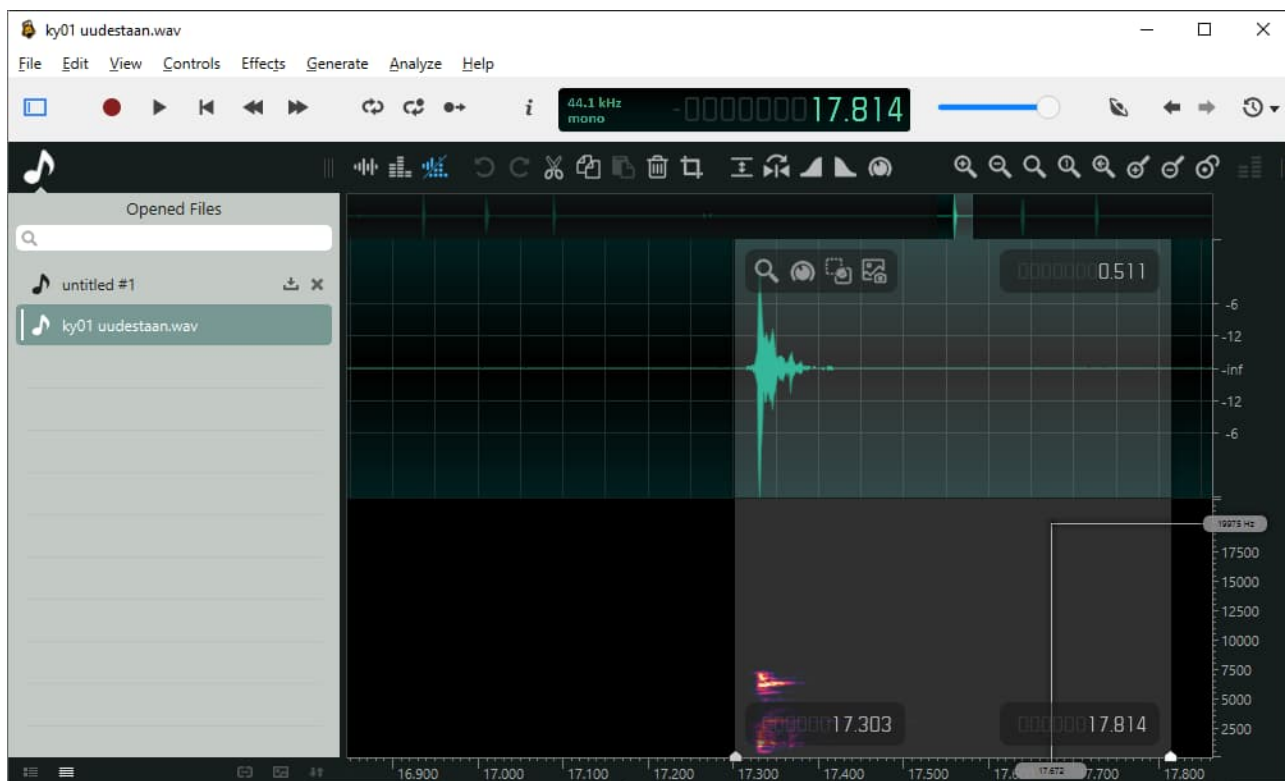
Äänittäminen: uuden tiedoston luonti. File/New, valitse seuraavat:



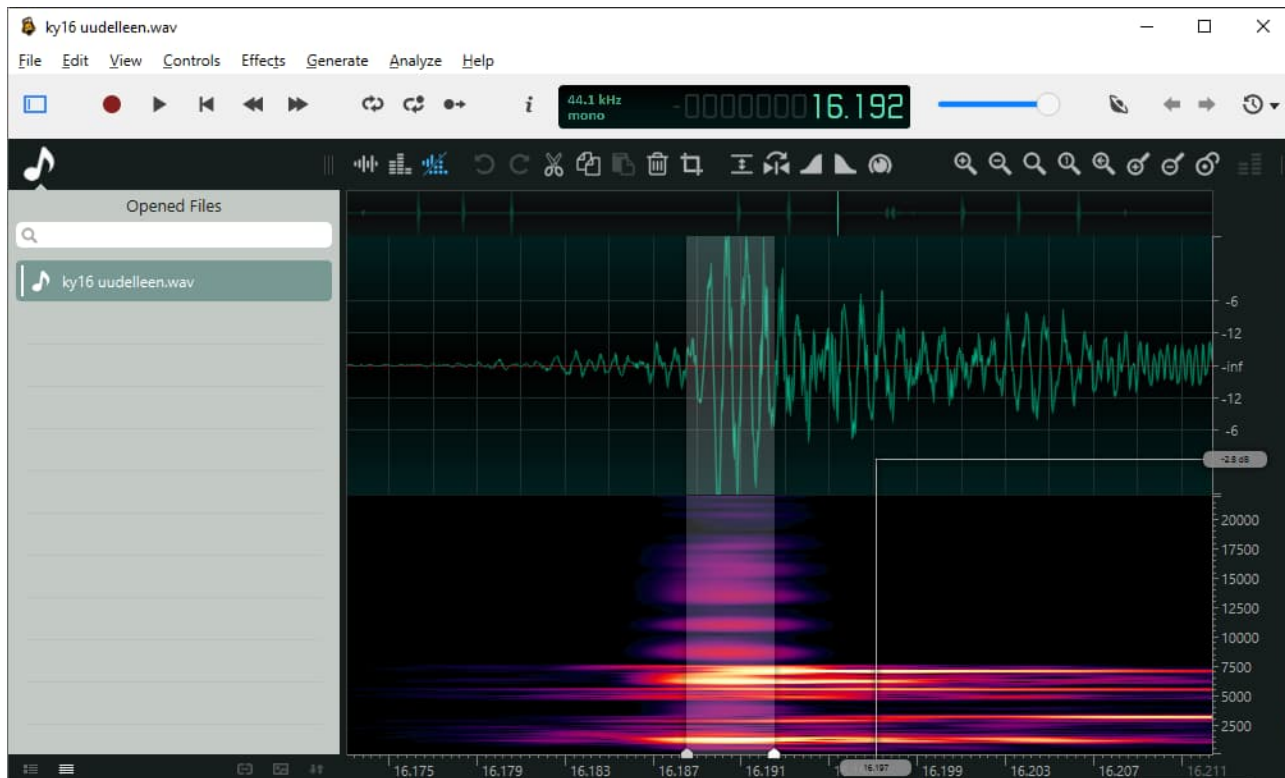
Äänitys käynnistyy pyöreästä rec-napista ja pysähtyy neliömäisestä stop-napista. Mitattu äänisignaali näkyy kuvaajassa. View-valikosta saa halutessaan sekä aikaisignaalin että spektrogrammin käyttöön.



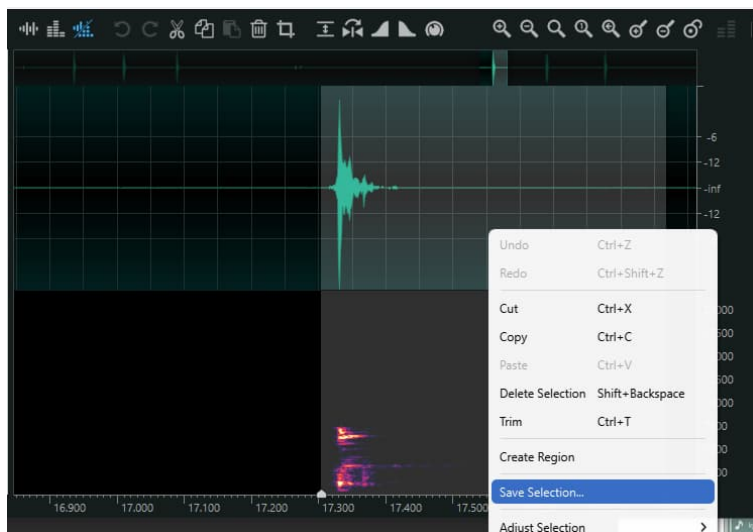
Zoomaa aikasignaaliin ja valitse yksittäinen isku maalaamalla. Kestoksi on hyvä valita noin 500...1000 millisekuntia (tässä 511 ms):



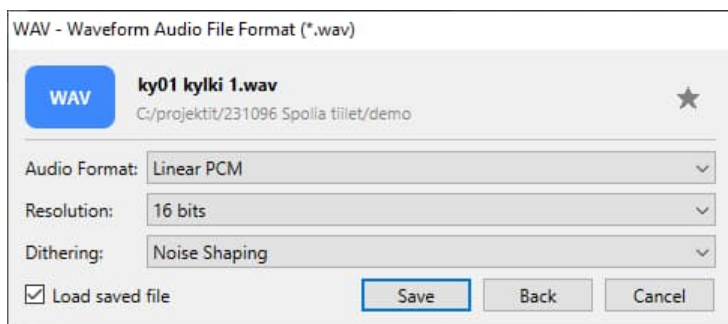
Varmista, että signaalien huiput eivät leikkaannu tallennuksessa. Jos signaalitaso ylittää 0 dB maksimin, signaalista leikkautuu huiput pois ja spektri vääristyy: Tässä esimerkki leikkaantumisesta:



Right click/Save Selection, tallenna jokainen isku omaksi wav-tiedostokseen.



Tallennusasetukset:



Tallennetut wav-tiedostot voi tämän jälkeen avata ja analysoida Artalla.