



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tietotekniikan koulutusohjelma

TIMO SUNDELIN
KIVIMATERIAALIN TUNNISTUS
PUUNKÄSITTELYPROSESSISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Tarmo Lipping
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tietotekniikan osastoneuvoston
kokouksessa 03. syyskuuta 2008

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tietotekniikan koulutusohjelma

SUNDELIN, TIMO: Kivimateriaalin tunnistus puunkäsittelyprosessissa

Diplomityö, 45 sivua

Lokakuu 2010

Pääaine: Signaalinkäsittely

Tarkastaja: professori Tarmo Lipping

Avainsanat: Kiventunnistusjärjestelmä, rullasto, taajuusanalyysi, signaalinkäsittely, tehospektri, Fourier-muunnos

Kivimateriaalin esiintyminen puunkäsittelylinjan haketusprosessissa aiheuttaa yleensä aina laitevauriota ja tätä kautta tuotantokatkoksia. Kivenpoistoon tarkoitetut aukot haketustulinjalla eivät aina pysty poistamaan puiden joukkoon joutuneita kivikappaleita. Tilannetta parantamaan on tässä diplomityössä pyritty löytämään menetelmä, jolla haketustulinjalle joutunut kivi pystytään tunnistamaan ja pysäyttämään linja kivenpoistamista varten.

Työn aluksi käydään läpi muutamia menetelmiä, joiden avulla olisi mahdollista kehittää kiventunnistusjärjestelmä. Tässä diplomityössä tutkimuskohteeksi on valittu äänen taajuusanalyysiin perustuva menetelmä, jossa mikrofonilta tuleva ääni-informaatio siirretään signaaliprosessorille analysoitavaksi. Kivenkolahduksessa syntyvän äänen taajuusanalyysin avulla on mahdollista kehittää algoritmi, jonka avulla kiventunnistus on toteutettavissa. Tuotantoprosessissa syntyvää äänimateriaalia tallennettiin taajuusanalyysin sekä tunnistusalgoritmin kehittämistä varten. Tallenne sisälsi prosessiäänien lisäksi kivien ja muiden kolahdusten aiheuttamia ääniä. Monipuolinen testimateriaali mahdollistaa ottamaan menetelmäkehityksessä huomioon erilaisia poikkeustapauksia niin että lopputuloksena oleva menetelmä tuottaa mahdollisimman vähän vääriä hälytyksiä.

Äänen taajuussisältöä tutkittiin Matlab-ohjelmalla, jolla toteutettiin myös kiventunnistusalgoritmi. Toimiva koodi siirrettiin reaaliaikaiseen signaaliprosessoriympäristöön, joka pystyy toimimaan itsenäisesti tuotantoprosessin yhteydessä ja tuottamaan tarvittavan ohjaussignaalin kiventunnistuksen yhteydessä.

Kaikki testiaineistossa olevat kivenkolahdukset saatiin tunnistettua sekä Matlab-ohjelmassa että reaaliaikaisessa ympäristössä. Virheellisiä tunnistuksia testiaineiston sisältämistä muista kolahdusäänistä ei tullut. Tutkimus osoittaa, että ääneen perustuvalla tunnistusmenetelmällä saadaan toteutettua luotettava kiventunnistus. Menetelmää voidaan soveltaa myös puunkäsittelyprosessin muilla osa-alueilla. Tämä edellyttää kuitenkin äänimateriaalin tutkimista kyseisen prosessin osalta, sisältäen samalla kivimateriaalin aiheuttamia kolahdusääniä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

SUNDELIN, TIMO: Recognition of stone material in wood handling process

Master of Science Thesis, 45 pages

October 2010

Major: Signal processing

Examiner: Professor Tarmo Lipping

Keywords: Stone recognition system, frequency analysis, signal processing, power spectrum, Fourier-transform

Occurrence of stone material in chipping process of wood handling line usually always causes equipment damages and herewith production breaks. Stone removal holes on a chipping line can't always remove stones. In this Master's Thesis a system has been developed to detect the occurrences of stones on the chipping line so that the line can be stopped and stones removed.

At the beginning of this study, some methods are presented which would make it possible to develop a stone recognition system. The sound base recognition system has been chosen for further examination subject in this Master's Theses, where sound information, coming from microphone, is transferred to signal processor for analyzing. Using frequency analysis of a stone clank, it is possible to develop an algorithm capable to recognize stones in the chipping process. Sound material from production process was stored to develop a recognition algorithm based on frequency analysis. The sound file included sound from the process and as well as clanks of stones and other events. Sound material containing various disturbing sounds (like hammering, for example) helps to develop a robust algorithm producing as few false alarms as possible.

The frequency content of sound was examined and the stone recognition algorithm developed using Matlab-software. An operational code was transferred to the real time signal processing environment, which can work independently within the production process and produce a control signal that is needed to alarm about the occurrence of a stone.

The algorithm implemented in Matlab as well as that implemented in the real-time signal processing environment succeeded in recognizing all the stone clanks in the test material. No false alarms caused by other clanks or disturbing noises occurred. The examination proves that using a sound based recognition method a reliable stone recognition system can be implemented. The same system can also be applied in other areas of the wood handling processes. This requires, however, examinations of sound materials in these process areas, including clanks are caused by stone material.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Metso Paper Oy:n puunkäsittely-yksikölle parantamaan prosessien tehokkuutta ja luotettavuutta.

Haluan esittää erityiskiitokset työn ohjaajana ja valvojana toimineelle professori Tarmo Lipping:lle saamastani tuesta sekä arvokkaista neuvoista. Myös osoitan kiitokset vanhempi tutkija Jari Turuselle hänen antamistaan ohjeista sekä tuesta. Kiitän myös Metso Paper Oy:tä ja sen tarjoamaa mahdollisuutta suorittaa diplomi-insinöörin tutkinto työni ohella. Haluan myös esittää kiitokset Metson puolesta työn valvojana toimineelle Ari Havulle sekä Esa Laineelle ja Pekka Jaakohuhdalle, jotka opastivat ja tukivat työn suorittamista.

Haluan myös kiittää kaikkia lähipiirissäni olevia henkilöitä saamastani tuesta sekä kannustuksesta saattaa aloittamani opiskeluprojektini päätökseen.

Porissa 07.10.2010



Timo Sundelin

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|-----|
| Tiivistelmä | II |
| Abstract | III |
| Alkusanat | IV |
| Termit ja niiden määritelmät | VI |
| 1. Johdanto | 1 |
| 2. Kiventunnistusperiaatteet | 3 |
| 2.1. Radiometrinen kiventunnistus..... | 4 |
| 2.2. Ultraääni..... | 5 |
| 2.3. Spektrikuvaus | 8 |
| 2.4. Äänitunnistus | 9 |
| 2.4.1. Mikrofonit | 12 |
| 3. Äänisignaalin spektrianalyysi ja suodatus kiventunnistuksen yhteydessä | 14 |
| 3.1. Diskreettiaikainen Fourier'n muunnos | 14 |
| 3.2. Tehotiheysspektri-Periodogrammi | 16 |
| 3.3. Tehotiheysspektri-Welch:n menetelmä | 16 |
| 3.4. Spektrianalyysimenetelmien vertailu | 19 |
| 3.5. Häiriöiden vaikutus spektrianalyysin tuloksiin..... | 21 |
| 3.6. Kiventunnistus seulontaprosessin yhteydessä..... | 24 |
| 3.7. Signaalin mediaanisuodatus | 25 |
| 4. Reaaliaikainen kiventunnistusjärjestelmä | 27 |
| 4.1. Prosessiympäristö äänitunnistuksessa | 27 |
| 4.2. Tunnistusjärjestelmän komponentit | 28 |
| 4.3. Algoritmin kehitys, C-kieli | 30 |
| 5. Kiventunnistusjärjestelmän testaus ja tulokset | 34 |
| 5.1. Testiaineisto | 34 |
| 5.2. Testaus Matlab-ympäristössä..... | 37 |
| 5.3. Testaus signaaliprosessointikortilla..... | 40 |
| 5.4. Testaustulokset..... | 41 |
| 6. Johtopäätökset | 44 |
| 6.1. Yhteenveto | 44 |
| 6.2. Sovellettavuus | 44 |
| 6.3. Jatkotoimenpiteet..... | 45 |
| Lähteet..... | 46 |
| LIITE 1: TESTAUSDATAN ANNOTOINTI | 48 |

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | |
|------------------|--|
| Matlab | Tieteelliseen laskennassa käytettävä ohjelmisto. |
| Twiddle-factors | Kertoimet taajuusanalyysissä |
| Fourier-muunnos | Muunnos, jolla siirrytään signaalin aikatason esityksestä taajuustason esitykseen |
| Prosessin tyyppi | Puunkäsittelyjärjestelmän yhteydessä esiintyvien eri prosessialueiden tyyppi kuten esimerkiksi kuorinta, haketus, seulonta |
| Dspic | Digital Signal Processing Integrated Circuit |
| Rullasto | Haketuslinjan yhteydessä rullista muodostuva kuljetin, joka poistaa epäpuhtauksia puuvirrasta |
| Haketusprosessi | Pöllimäisen puuaineksen muuttaminen sellunvalmistukseen sopiviksi hakepalasiksi |
| Kuorintaprosessi | Kuoriaineksen irrottaminen pöllimäisestä puuaineksesta |
| Annotointi | Tapahtuman kuvaus |
| Spektrogrammi | Signaalin voimakkuuden aikataajuusesitys |
| Desimointi | Näytteenottotaajuuden lasku |

1. JOHDANTO

Puunkäsittelyprosesseissa tapahtuvasta kivimateriaalin poistosta on tullut viime aikoina erittäin tärkeä prosessin osa, kun halutaan maksimoida tuotantokapasiteetit ja saavuttaa prosessille asetetut vaatimukset. Perinteisten mekaanisesti toimivien erotusmenetelmien rinnalle on noussut myös muita toteutusmahdollisuuksia, jolloin korvataan aiemmin käytetty menetelmä tai tehostetaan nykyisten laitteiden toimintaa. Nämä toimenpiteet parantavat prosessin tehokkuutta välttämällä laitevaurioista aiheutuvia tuotantokatkoksia.

Teollisuuden kapasiteettivaatimusten kasvaessa luodaan uusia haasteita toteuttaa tehokkaita ja toimivia prosessiratkaisuja. Tällöin pyritään myös löytämään tekijöitä, jotka edesauttavat saavuttamaan laitteille mahdollisimman pitkän käyttöajan ilman tuotantokatkoksia. Tässä on tehokkaalla kivenerotuksella erittäin tärkeä rooli, koska se estää laiterikkoja, pidentää terähuoltovälejä sekä myös vaikuttaa saavuttamaan mahdollisimman tasainen prosessivirta ilman suuria tuotannon heilahteluita.

Mekaaninen kivenerotus perustuu tietyn kokoisten kivien erottamiseen, jolloin erotusaukon koolla säädetään erottuvan ainesosan koko. Jos kuitenkin materiaali on suurempaa kuin erotusaukko pystyy poistamaan, on tuloksena usein laiterikko ja tuotantokatkos. Erotusaukon suurentaminen johtaa usein prosessin käsittelyn ongelmiin kuten ruuhkat ja tukokset pöllilinjalla sekä ilman vettä tapahtuvassa erottelussa puumateriaalin hävikin kasvaminen. Vesikäyttöisessä erottelussa veden määrä kiviloukussa kasvaa, joka johtaa suurempien vedenkäsittelykomponenttien käyttöön. Näin ollen on tyydyttävä kompromisseihin, jolloin pyritään saavuttamaan kohtuullinen kivenerotus tiettyjen kustannusrajojen puitteissa.

Tietokoneiden yleistyessä ja laskentakapasiteetin kasvaessa on prosesseissa alettu hyödyntämään erotettavan materiaalin tunnistukseen perustuvaa ratkaisua. Tällöin mittauskohteesta saatu mittaustieto on tuotu tietokoneelle, jonka avulla on suoritettu analysointi tilanteeseen sopivalla ratkaisumallilla. Tämän päivän laskentakapasiteetti tietokoneissa riittää reaaliaikaisen analyysin suorittamiseen, jolloin on mahdollisuus käynnistää kivenpoistoon liittyvä prosessi, ennen kuin laitevaurioita ehtii tapahtua.

Työssä on tutkittu muutamaa eri menetelmää, ajatellen lähinnä menetelmän tehokkuutta, mutta ennen kaikkea myös huomioiden siitä aiheutuvat kustannukset. Erilaisia menetelmiä on olemassa useita, mutta niiden toimivuus jää teollisuusympäristössä usein hyvin kyseenalaiseksi. Toisaalta toimivat ratkaisut saattavat osoittautua kustannuksiltaan liian kalliiksi investoinneiksi eivätkä sen vuoksi ole johtaneet menetelmän käyttöön. Tutkinnan kohteena olevien menetelmien käyttäminen on yleisesti tunnettua teollisuusympäristössä ja sen vuoksi niiden soveltuvuuden selvittäminen kiventunnistusmenetelmäksi on puolusteltua. Täysin uuden menetelmän kokeilu vaatii pitkäaikaista kehittä-

telyä, eikä välttämättä ole paras mahdollinen valinta. Selvitystyön alla olevista menetelmistä ääneen perustuva tunnistus on valittu toteutettavaksi menetelmäksi. Muut menetelmät rajoittuvat kirjalliseen selvitykseen.

Puunkäsittelyprosessin eri vaiheita on useita. Prosessissa syntyvät äänet vaihtelevat riippuen siitä, missä kohtaa prosessia materiaalivirtaa halutaan tutkia. Jossain tapauksessa ympäristön äänet saattavat olla jopa vallitsevia (esimerkiksi liikennemelu), jolloin prosessin laitteiden melutaso ei ole tärkein tekijä. Tämä on kuitenkin harvinainen tilanne, mutta on syytä huomioida äänianalyysiä tehtäessä.

Prosessin olosuhteet vaihtelevat eikä täsmälleen samanlaista laiteympäristöä helposti ole löydettävissä. Laitevalintaan vaikuttavia tekijöitä on useita joista tärkeimpinä voidaan pitää

- Käsiteltävä materiaali
- Prosessin kapasiteetti
- Prosessityyppi
- Ympäristöolosuhteet
- Tehdasstandardit

Näin ollen voidaan sanoa prosessien olevan melko yksilöllisiä, jolloin ääniolosuhteet on usein kartoitettava tapauskohtaisesti. Myös ympäristötekijät on huomioitava, koska prosessit eivät aina toimi rakennusten sisällä ja tästä johtuen prosessin laitteet altistuvat säärasiukselle, jolloin joudutaan miettimään sopivien suojarakenteiden toteuttamista.

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus kehittää äänianalyysiin perustuva kiventunnistusmenetelmä haketuslinjalla olevan rullaston yhteyteen. Järjestelmä toteutetaan reaaliaikaisessa signaaliprosessoriympäristössä, josta tunnistustapahtuman johdosta saadaan ohjaussignaali prosessin ohjausjärjestelmään linjan pysäytystä varten, jonka jälkeen kivenpoisto suoritetaan manuaalisesti.

2. KIVENTUNNISTUSPERIAATTEET

Kivimateriaalin erottaminen puuraaka-aineen joukosta on haasteellinen tehtävä. Erilaisia menetelmiä on useita. Valinnassa on huomioitava menetelmän luotettavuus arvioiden samalla kustannustehokkuutta.

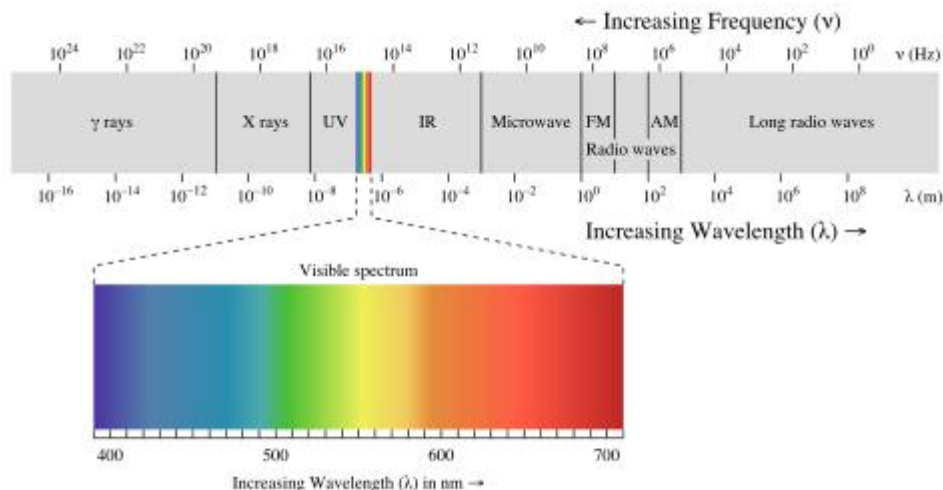
Seuraavissa kappaleissa on kuvattu menetelmiä, joita on mahdollista soveltaa tunnistusjärjestelmän toteuttamiseksi sekä pohdittu niiden soveltuvuutta puunkäsittelyprosessin kiventunnistukseen. Menetelmien sijoituspaikkana ajatellaan olevan kuvan 2.1 mukaisen rullaston yhteyteen, joka toimii kuorinta- ja haketusprosessissa.



Kuva 2.1. Erotusrullasto puunkäsittelylinjalla.

2.1. Radiometrinen kiventunnistus

Sähkömagneettiseen säteilyyn käyttö kiventunnistukseen perustuu säteilyn absorptioon, joka vaihtelee eri aineilla. Säteilylajit jaotellaan riippuen niiden aallonpituudesta. Kuvassa 2.2 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn spektri, jossa erikseen on erotettu näkyvän valon alue.



Kuva 2.2. Sähkömagneettisen säteilyn spektri [1].

Säteilyn intensiteetti I vaimenee sen kulkiessa materiaalin läpi ja noudattaa yleistä absorptiolakia [2]

$$(2-1)$$

μ_m = massavaimennuskerroin

ρ = aineen tiheys

x = kerrospaksuus

Sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvaa Röntgen-kuvantamista on mahdollista käyttää erilaisten materiaalien tunnistukseen. Menetelmästä löytyy useita erilaisia kaupallisia sovelluksia, joissa pyritään löytämään joko materiaalien rakenteellisia vikoja tai selvittämään mikä materiaali kulloinkin on kyseessä. Erästä tällaista järjestelmää kuvaa NTB elektronische Geraete GmbH toimittama melko yksinkertainen tunnistusjärjestelmä, jossa säteilylähteen avulla tuotetaan röntgensäteitä. Säteilyä seurataan viivakameralla, joka on yhdistetty tietokoneeseen. Tutkittava kohde kuljetetaan säteilykentän läpi, jolloin epäpuhtaudet näkyvät tietokoneen ruudulla tummina alueina [3].

Kyseiset laitteet eivät sellaisenaan sovellu tutkimuksen kohteena olevaan ongelmaan vaan vaativat muutoksia laitteistoon. Pöllilinjan leveys asettaa tiettyjä vaatimuksia laitteistolle, jolloin päädytään monimutkaisiin ratkaisuihin sekä korkeaan kustannustasoon.

Suomalaisen *Mikropuu Oy:n* tarjoama ratkaisu perustuu myös säteilylähteen tuottamaan röntgensäteilyn absorptioon, jota tutkitaan viivakameran sekä tietokoneen tunnistusohjelman avulla. Kohteesta riippuen on mahdollista sijoittaa useita säteilylähteitä ja viivakameroita riippuen miten tarkkaa tunnistusta halutaan. Neljällä kameralla varustetun skannausaseman kustannukset nousevat useisiin satoihin tuhansiin euroihin [4]. Tällaisia laitteistoja on käytössä lähinnä sahateollisuudessa sahatukkien laadunvalvonnassa, jolloin tarkkaillaan esimerkiksi lahovikoja ja pihkataskuja tukkipuissa. Samalla voidaan myös tutkia ei-toivottujen partikkeleiden esiintymistä ja poistaa ne prosessista.

Röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä ja esiintyy 1 pm-100 nm aallonpituusalueella. Se on ionisoivaa säteilyä ja on terveydelle haitallinen [5]. Tämän johdosta säteilykohteen ympärillä oleviin suojarakenteisiin on kiinnitettävä erityistä huomiota sekä on laadittava ohjeistus laitteiston turvalliselle käytölle.

Johtuen melko korkeista laitteistokustannuksista, on röntgentunnistuksella melko vaikea saavuttaa taloudellisesti kannattavaa kiventunnistusjärjestelmää, kun tavoitteena on ainoastaan kiviaineksen tunnistus. Haketukseen menevän puun laatua ei ole tarpeellista analysoida, jolloin pelkkä kivitunnistus tuottaa liian korkeat kustannukset. Eräs etu röntgenmenetelmässä on se, että tunnistus voidaan saada myös puuvirran eri kerroksista. On myös mahdollista tunnistaa muita ei-toivottuja partikkeleita kuten esimerkiksi metalli tai muovi. Tällä menetelmällä on mahdollista toteuttaa kivitunnistukseen tarkoitettu järjestelmä.

2.2. Ultraääni

Ultraäänitekniikka tarjoaa erään mahdollisuuden toteuttaa järjestelmä, jolla voidaan löytää kivimateriaali pöllivirran joukosta.

Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä, joka tarvitsee etenemiseen väliaineen (esimerkiksi ilma). Ääniaallot ovat ultraäänialueella, kun niiden taajuus on 20 kHz ja enemmän. Ultraääniaaltojen etenemisnopeus vaihtelee eri väliaineissa (taulukko 2.1).

Taulukko 2.1. *Ultraäänen nopeus väliaineessa.*

| Väliaine | Nopeus, m/s (20 °C) |
|----------|---------------------|
| Ilma | 343 |
| Vesi | 1500 |
| Alumiini | 2700 |
| Teräs | 5900 |

Taulukosta 2.2 voidaan nähdä, että puun ollessa väliaineena, nopeudet vaihtelevat riip-puen puulajista ja myös tiheydestä [7]:

Taulukko 2.2. Ultraäänen nopeus puumateriaalissa.

| Puulaji | Nopeus, m/s (28 °C) | Tiheys kg/m ³ |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Pinus caribea | 4100 | 450 |
| Eucalyptus grandis | 5100 | 660 |
| Eucalyptus citriodora | 4800 | 1130 |

Aaltotyyppejä esiintyy erilaisia, joista mittaustekniikassa hyödynnetään lähinnä pitkit-täis- ja poikittaisaaltoja.

Aaltojen etenemisnopeus voidaan myös laskea kaavalla [8]:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho_0} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2-2)$$

Jossa

E = kimmokerroin

ρ_0 = aineen tiheys

μ = Poisson'n vakio

Menetelmästä löytyy sovelluksia monelta eri alueelta, joista tunnetumpia ovat etäisyy-den mittaukset tai rikkomaton aineenkoestus. Myös lääketieteen alueelta löytyy erilaisia sovelluksia, joissa pyritään saamaan esille mahdolliset kudosaauriot.

Ultraäänimittauksen toimintaperiaate perustuu anturipariin, jossa on sekä lähetin että vastaanotin. Lähettimellä tuotetaan ultraäänen taajuudella oleva ääniaalto. Kun lähete-aalto kohtaa eri materiaalien rajapinnan, aiheutuu siitä heijastuminen, jota voidaan ana-lysoida vastaanottimella. Takaisinheijastusajasta voidaan päätellä materiaalin pinnan etäisyys tai tutkia aallon etenemää uudessa väliaineessa ja sieltä takaisin syntyviä hei-jastuksia. Tätä käytetään hyväksi materiaalivikojen paikannuksessa.

Eräs ultraäänianturi on kulkuaikaeroon perustuva mittari, jossa ultraäänen nopeus noudattaa kaavaa [8]:

$$v = c^2(t_2 - t_1)(\cos \alpha \cdot 2L) \quad (2-3)$$

jossa

c = ultraäänen etenemisnopeus väliaineessa

t_2 = takaisinheijastumisaika

t_1 = kulkuaika kohteeseen

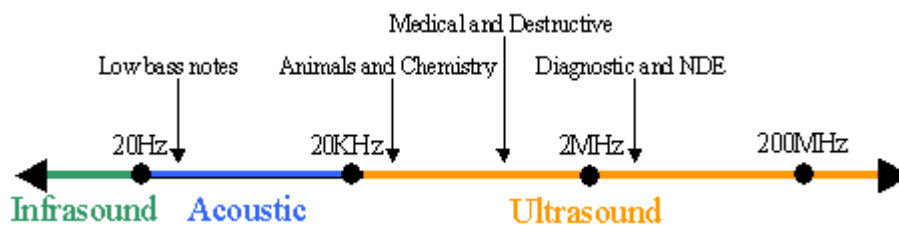
L = matka

α = tulokulma

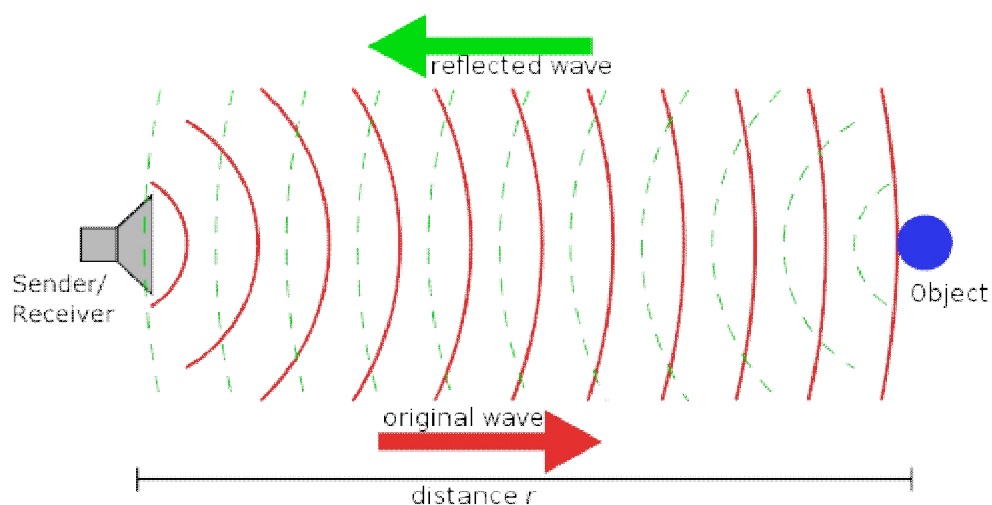
Kuten kaavasta (2-2) voidaan huomata, ultraäänen etenemisnopeus vaihtelee eri aineilla. Myös aaltojen takaisinheijastuminen vaihtelee, jolloin on mahdollista suorittaa materiaalien tunnistuksia perustuen ko. ominaisuuteen. Yhtälön (2-3) mukaan voidaan havaita, että heijastumisnopeus antaa lisäinformaatiota tunnistettavasta kohteesta.

Puuvirran joukossa olevien kivien löytäminen on mahdollista, koska kivi eroaa materiaalina puusta, jolloin aaltojen takaisinheijastumisesta on mahdollista päätellä onko puuvirrassa kivi vai ei. Haittapuolena on se, että jos kivi sijaitsee puuvirran alla, voi tunnistus epäonnistua. Useamman anturin käyttö sijoitettuna sopivaan asentoon puuvirtaan nähden antaa paremmat mahdollisuudet kivimateriaalin löytymiselle.

Röntgenmenetelmään verrattuna on ultraäänitekniikka selvästi edullisempi toteuttamisvaihtoehto, jolloin järjestelmän kustannukset ovat luokkaa 30 000-40 000 Euroa. Koejärjestelyiden rakentaminen on kuitenkin melko työläs toimenpide. Myös kehittäminen vaatii melko pitkäaikaisia tehdasolosuhteissa toteutettuja testaussarjoja sopivan tunnistusalgoritmin löytämiseksi. Kuvassa 2.3 on esitetty ultraäänen sijoittuminen taajuusalueella sekä kuvassa 2.4 on esitetty ultraäänen perustuvan tunnistuksen toimintaperiaate.



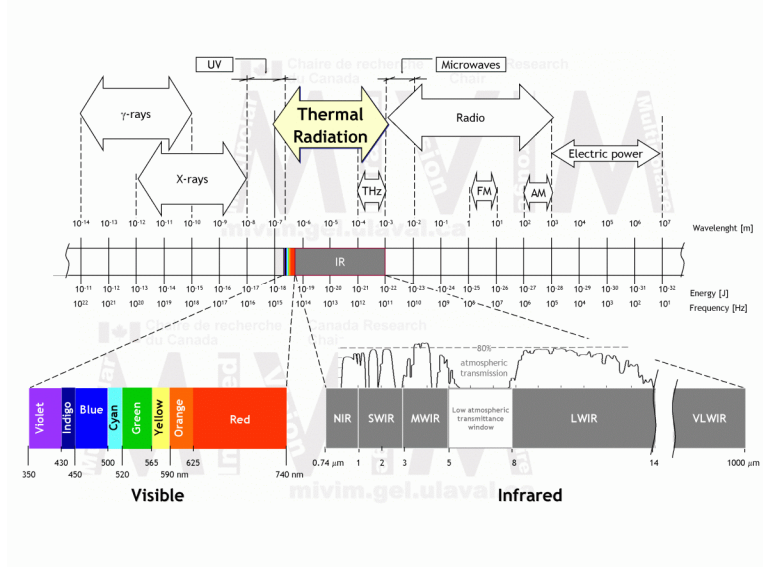
Kuva 2.3. Ultraäänialue [20].



Kuva 2.4. Ultraäänitunnistuksen toimintaperiaate [20].

2.3. Spektrikuvaus

Kappaleessa 2.1 tarkasteltiin sähkömagneettisen spektrin alkuosaa. Kun sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus kasvaa, päästään alueelle, jota hyödynnetään spektrikuvauksessa. Kuvassa 2.5 on esitetty tarkemmin eri aallonpituusalueiden jaottelua



Kuva 2.5. Sähkömagneettisen säteilyn spektrin osa-alueet [9].

Spektrikuvaus perustuu siihen, että eri materiaalien reflektanssit poikkeavat toisistaan. Tätä ominaisuutta hyödynnetään spektrikuvauksissa. Pintamateriaalin ominaisuudet vaihtelevat karkeista sileisiin, joilla on vaikutus säteilyn heijastumiseen tai imeytymiseen. Reflektanssi eli heijastussuhde määritellään kaavalla [10]

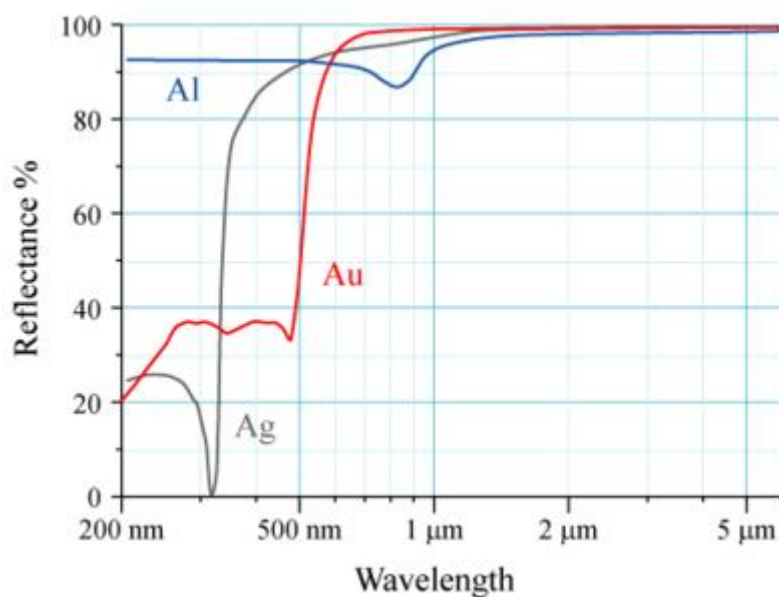
$$\rho = \frac{R(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (2-4)$$

jossa

R = kohteesta heijastunut säteily

I = kohteeseen tulevan säteilyn intensiteetti

Eri materiaalien reflektansseja on määritelty hyvinkin laajasti, joista eräs tällainen tiedonhakumahdollisuus on ASTER-tietokanta. Kuvassa 2.6 on esitetty metallien reflektanssien sijoittumista sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueelle.



Kuva 2.6. Kullan, hopean ja alumiinin reflektanssit [10].

Markkinoilla on saatavissa melko kattava valikoima erilaisia spektrikameroita, jotka toimivat ns. älykameroina. Tällöin kameraan on yhdistetty optiikkaa, kuvan digitalisointia ja kuvankäsittelyä sekä myös erilaisia suodatuksia. Tämän lisäksi tarvitaan tietokonepohjaisia kuvantunnistusohjelmia, jotka mahdollistavat automaattisen tunnistustapahtuman.

Kivitunnistus on mahdollista rakentaa perustuen spektrikuvaukseen, koska kiven reflektanssit eroavat puun reflektansseista. Tässäkin, kuten ultraäänimenetelmässä, tunnistusta haittaava tekijä on, ettei kuvausta voida tehdä puuvirran alle. Tällöin kivimateriaalia voi kulkeutua tunnistusalueen ohi. Kustannuksiltaan kameratunnistus on samaa suuruusluokkaa kuin ultraäänitunnistus.

2.4. Äänitunnistus

Äänitunnistuksella tarkoitetaan tässä yhteydessä mikrofonin ja tietokoneen avulla tapahtuvaa äänianalyysiä, kun toimitaan taajuusalueella 16 Hz-20 kHz. Tämä vastaa suunnilleen ihmiskorvan kuuloaluetta. Tietynlaisia kolahduksia puunkäsittelyprosessin yhteydessä on melko helppo tunnistaa ihmiskorvan kuuloaistimuksen perusteella. Tähän on melko helposti yhdistettävissä automaattinen tunnistustapahtuma, jossa mikrofonilta tulevaa ääni-informaatiota analysoidaan reaaliaikaisesti tietokoneen avulla ja pyritään löytämään halutut tapahtumat prosessista. Myös ne tapahtumat, joista ei haluta tunnistusta, olisi pyrittävä analysoimaan siten, ettei virheellisiä tunnistuksia tapahtuisi ja prosessin toiminta ei häiriintyisi.

Mikrofoneja on rakenteeltaan erilaisia riippuen käyttötarkoituksesta ja siitä mitä taajuusalueita erityisesti halutaan tutkia. Ääneen liittyvää aineistoa ja tutkimustietoa on

saatavilla melkoinen määrä. Äänen analysointiin liittyy muutamia peruskäsitteitä, joita seuraavaksi on tarkoitus käsitellä hieman tarkemmin.

Äänenpainetason suuruuden ilmaisemiseen käytetään desibeliesitystä seuraavasti [11]:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2-5)$$

jossa p = äänenpaine, Pa
 p_0 = referenssiäänepaine 20 μ Pa

Kuten kaavasta (2-5) voidaan havaita, äänenpainetta verrataan referenssiäänepaineeseen, joka vastaa suunnilleen pienintä kuultavaa ääntä, jonka ihmisen korva pystyy aistimaan.

Ihmiskorva käyttäytyy hieman eri tavalla eri taajuusalueilla. Tästä syystä melumittauksia laadittaessa pyritään korostamaan juuri niitä taajuusalueita, joilla korva on herkimmillään. Äänen intensiteetti määritellään kaavalla [11]:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (2-6)$$

jossa p = äänenpaine, Pa
 ρ_0 = väliaineen tiheys
 c = äänen etenemisnopeus väliaineessa

Intensiteetti kuvaa energian siirtymistä tietyssä aikayksikössä pinta-alayksikköä kohden eli ääniaallon tehoa pinta-alayksikköä kohden. Herkimmillään korva on taajuusalueella 2-4 kHz. Ihmiskorvan aistimaa äänekkyuden tasoa eri taajuuksilla kuvaavat Fletcher-Munsonin äänekkyyskäyrät (kuva 2.7).

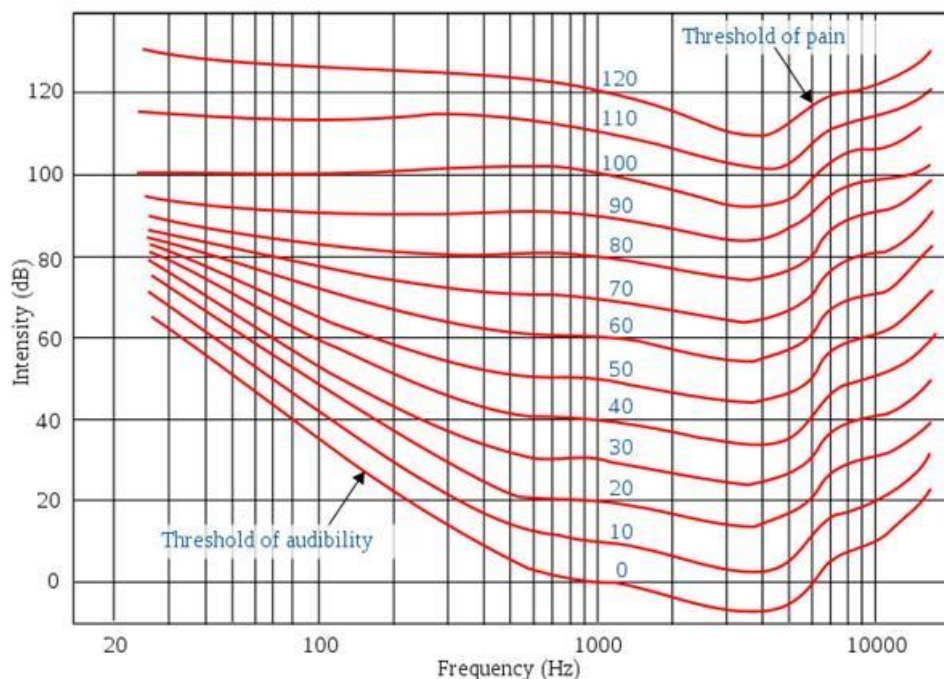
Kuuloaistimuksen voimakkuutta määriteltäessä äänekkyuden yksikkönä on soni, kun äänekkyuden tason yksikkö on foni. Näiden kahden yksikön välillä on yhteys, joka voidaan esittää [11]:

$$N = 2^{\frac{L_N - 40}{10}} \quad (2-7)$$

jossa N = äänekkyys, yksikkö soni
 L_N = äänekkyystaso, yksikkö foni

Stevensin tutkimusten mukaisesti 10 dB:n nousu äänenpaineessa kaksinkertaistaa kaavassa (2-7) esiintyvän äänekkyuden.

Kuvasta 2.7 on nähtävissä kuultavuuden rajan muuttuminen taajuuden muuttuessa. Myös kipukynnys vaihtelee taajuuden mukaan.



Kuva 2.7. Fletcher-Munsonin äänekkyyskäyrät [12].

Kuvassa 2.7 intensiteetti esittää äänenpaineen tasoa desibeleinä. Ihmiskorva aistii täten voimakkaampana saman äänenpainetaso äänen esimerkiksi 1000 Hz:n kohdalla verrattuna 100 Hz:n taajuuteen. Äänekkyystason yksikkö on foni vastaa 1 kHz:n kohdalla olevaa äänenpaineen tasoa. Käyrästä hyödynnetään myös mikrofonien herkkyyksiä määrittäessä.

Melutasoja määriteltäessä käytetään äänenpainetasoa (kaava 2-5), joka normaalisti on A-painotettu (kuva 2.8). Tällöin korostetaan niitä taajuusalueita, jotka vastaavat ihmisen korvan kuuloaluetta. Kun melutaso on yli 80 dB, katsotaan tarvittavan suunnitelma melun torjumiseksi, joka voi olla esimerkiksi kuulosuojainten käyttö. Rajat voivat hieman vaihdella yksilöittäin. Kuulovaurion riski kasvaa, kun äänenpainetaso nousee yli 85 dB. Tällöin myös altistumisaika melulle pienenee. Esimerkiksi 130 dB äänenpainetasoon riittää 1 s altistumisaika kuulovaurion syntymiseen [13].

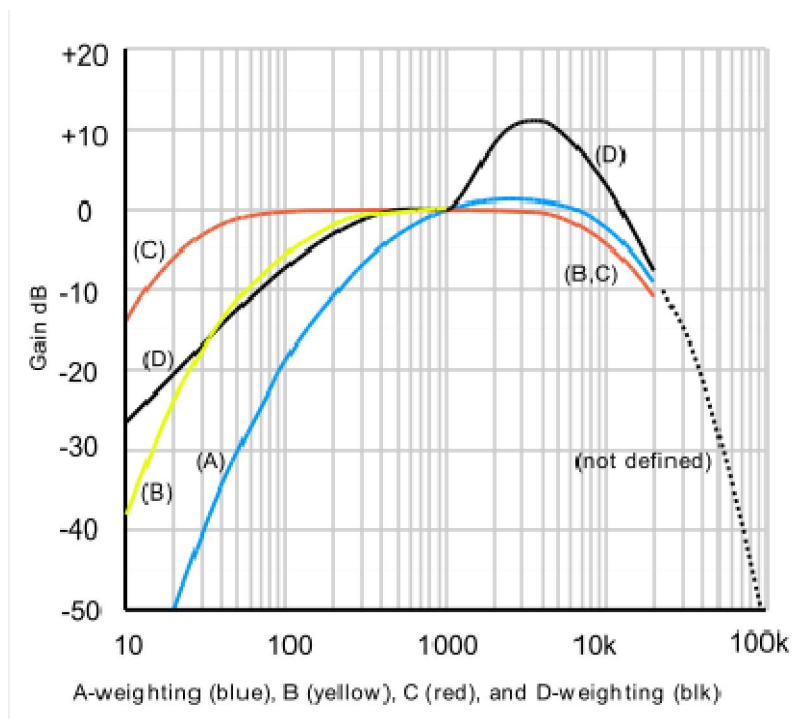
Vakiintunut käytäntö meluannoksen määrittämiseen on käyttää vakioenergiäsäätöön perustuvaa määrittelyä, joka esitetään kaavalla [14]:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \sum_i \Delta t_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2-8)$$

jossa

- L_{eq} = vakioäänitaso (dB)
- T = aikaväli, jossa tarkastelu tehdään
- L_i = melutaso (dB)
- Δt = aikaväli melutasolle L_i

Melualtistusta seurataan yleensä päiväannoksina, joka vastaa 8 h altistusta. Tällöin 85 dB ylitys tai 140 dB huippuarvo (L_c , taajuudet c-käyrän mukaan painotettu, kuva 2.8) aiheuttaa yleensä toimenpiteitä ja edellyttää työnantajalta meluntorjunnalle toimintasuunnitelmaa [14].



Kuva 2.8. Taajuusalueiden painotuskäyrästä [15].

Kehitettäessä äänianalyysiin perustuvaa kiventunnistusjärjestelmää, on hyvä tunnistaa myös ihmiskorvalle tyypillisiä fysikaalisia ominaisuuksia. Tämä on perusteltua sen vuoksi, että kehitettäessä järjestelmää osittain myös kuulohavainnon perusteella, on tiedettävä miten korva käyttäytyy eri taajuusalueilla. Järjestelmät eivät aina pysty toteuttamaan sellaisia suodatuksia, joita ihmiskorva kykenee tekemään. Myös prosessiympäristössä tapahtuva työskentely edellyttää kuulosuojainten käyttöä, jolloin analysoitavaa materiaalia on kuunneltava toistamalla tallennettua materiaalia toistolaitteen avulla.

2.4.1. Mikrofonit

Mikrofoneja on saatavilla kaupallisina tuotteina erittäin kattava joukko riippuen käyttötarkoituksesta. Mikrofonin valinnassa on huomioitava missä käyttöolosuhteissa mikrofonia aiotaan käyttää. Mittauslaitteen mikrofonin toisto-ominaisuudet ovat tärkeässä asemassa varmistamaan mittaustuloksen oikeellisuutta jolloin mittaustulokset ovat myös vertailukelpoisia muissa kohteissa tehtyihin mittauksiin. Ääntä voidaan taltioida myös myöhempää toistotarkoitusta varten. Tällöinkin valintaan vaikuttaa miten laadukasta äänimateriaalia halutaan taltioida. Fysikaaliset ominaisuudet (kosteus, lämpötila, värinä, dynamiikka) asettavat vaatimuksia mikrofonin valinnalle. mittausmikrofonien ominai-

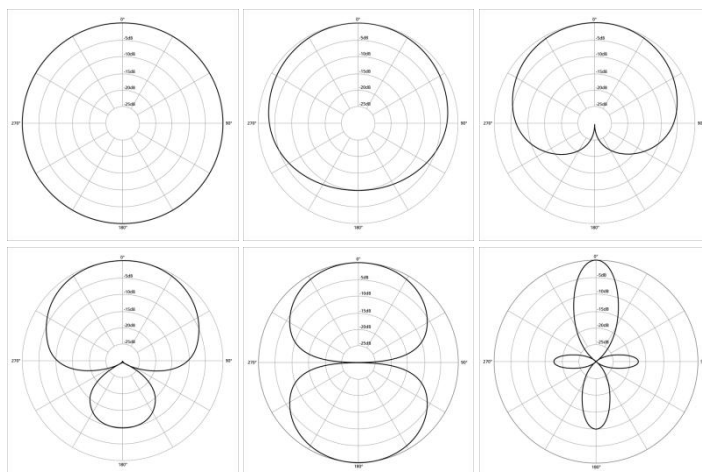
suudet on optimoitu jotain erityistä käyttötarkoitusta varten ja sen takia ne ovat kalliimpia. Rakenteeltaan mikrofonit voidaan jakaa seuraavasti:

- Dynaamiset mikrofonit
- Kondensaattorimikrofonit
- Nauhamikrofonit
- Elektrettimikrofonit
- Optiset mikrofonit

Ensimmäiset mikrofonyypit olivat hiilimikrofoneja ja niitä käytettiin yleisesti puhelimissa. Nykyään ehkä yleisimpiä ovat dynaamiset ja kondensaattorityyppiset mikrofonit. Dynaamisen mikrofonin toimintaperiaate on magneettikentässä liikkuva johdin, joka liikkuu ilmanpaineen vaihteluiden seurauksena. Liikkuva johdin aiheuttaa sähkövirran, joka muunnetaan vahvistimen avulla tallennuskelpoiseen muotoon.

Mikrofoni on käänteinen toiminto kaiuttimelle. Kondensaattorimikrofonissa ilmanpaineen vaihteluiden seurauksena saadaan muunneltua mikrofonissa olevan kondensaattorin sähkövarausta, joka esivahvistettuna tuottaa signaalin jatkokäsittelyä varten. Kondensaattorimikrofonit ovat melko herkkiä kosteudelle ja vaativat toimiakseen polarisaatiojännitteen. Elektrettimikrofonit ovat kondensaattorimikrofoneja, mutta niissä varaus on materiaalivalinnalla saatu pysyväksi, eikä polarisaatiojännitettä näin ollen tarvita.

Mikrofonin valintaan vaikuttava tärkeä seikka on suuntakuvio, jotta saadaan tallennettua haluttua ääntä halutusta suunnasta minimoiden häiriöt muilta suunnilta. Kuvassa 2.9 on esitetty tyypillisiä suuntakuvioita mikrofoneille.



Kuva 2.9. Mikrofonien suuntakuvioita [16].

Kuvan 2.9 ylärivin vasen pallomainen suuntakuvio poimii kaikista suunnista tulevat äänet samalla voimakkuudella. Saman rivin hertta-tyyppin kuviot poimivat edestä ja sivulta tulevia ääniä. Alarivin herttakuviot poimivat myös takaa tulevia ääniä. Äärimmäisenä oikealla oleva kuvio pyrkii taltioimaan tarkasti vain edestä tulevia ja hieman heikommin takaa ja sivulta tulevia ääniä. Tällaiset suuntakuviot ovat yleisiä televisiotuotannossa.

3. ÄÄNISIGNAALIN SPEKTRIANALYYSI JA SUODATUS KIVENTUNNISTUKSEN YHTEYDESSÄ

Spektrianalyysin toteuttamiseen löytyy useita erilaisia menetelmiä. Tavoitteena on löytää kiventunnistuksen kannalta luotettavin spektrianalyysi, jolloin tunnistustapahtumat syntyisivät halutuissa kohdissa ja vältettäisiin virheelliset tunnistukset.

Hankittua äänimateriaalia tutkittiin aluksi Matlab-ohjelman avulla, jolloin tavoitteena oli kehittää signaaliprosessointikortille toimiva tunnistussovellus. Matlab-ohjelman etuja ovat valmiiksi ohjelmoituneet signaaliprosessointiin tarkoitetut erikoisfunktiot, joiden avulla oikean testausalgoritmin löytäminen nopeutuu. Myös ohjelmassa olevat kuvaajien piirto-ominaisuudet antavat visuaalista palautetta kulloinkin kyseessä olevan algoritmin toiminnasta.

Ensimmäinen vaihe kehitystyössä oli selvittää mitä taajuusalueita tallennusmateriaali sisältää sekä miten kivenkolahdusten ja häiriölähteiden taajuudet sijaitsevat verrattuna normaaliin kuorimomeluun. Taajuusalueiden määrittämiseen on useita menetelmiä, joita käsitellään seuraavissa kappaleissa. Luvuissa esitetään myös useita esimerkkejä taajuusanalyysin tuloksista. Kaikissa kuvissa signaalin amplitudi ja teho ovat ilmaistuna suhteellisissa yksiköissä. Kuvaajissa oleva taajuus akseli on asetettu 0...3000 Hz:n alueelle, koska oleellinen kolahduksista syntyvä taajuusinformaatio esiintyy tuolla alueella.

Kivenkolahduksen taajuusalue rajoittuu selvästi alle 4 kHz, jolloin näytteenottotaajuutena voidaan käyttää 8 kHz. Koska korkeampia taajuuksia ei ole tarvetta tutkia, saadaan täten signaaliprosessoinnin laskentaa kevennettyä. 8 kHz:n taajuus perustuu Nyquistin näytteenottoteoreemaan, jossa signaalitaajuus ω saadaan selville jos näytteenottotaajuus on vähintään 2ω .

3.1. Diskreettiaikainen Fourier'n muunnos

Signaalin aika- ja taajuustasoesityksen välillä vallitsee yhteys [19]:

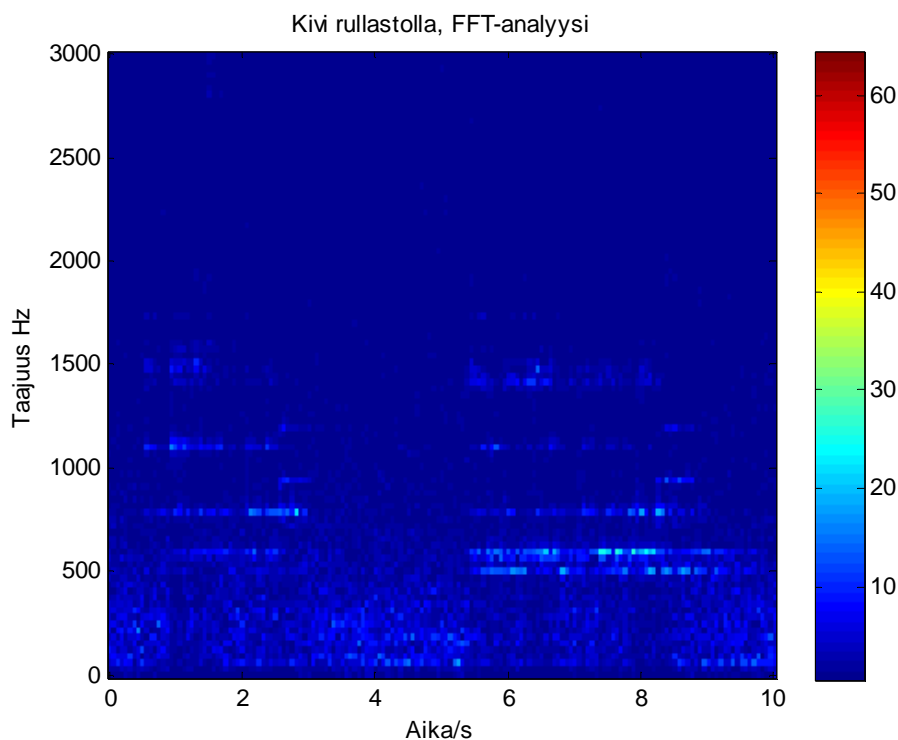
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (3-1)$$

Yhtälön 3-1 tuloksena saadaan signaalin kompleksimuotoinen taajuustasoesitys, joka kertoo mitä taajuuksia kyseinen signaalin osa sisältää. Matlab-ohjelmisto käyttää Fourier'n muunnoksen laskentaan FFT (Fast Fourier Transform) algoritmia. Tällöin yhtälön

3-1 taajuuksien lukumäärän N on oltava luvun kaksi potenssi. Kiventunnistuksen yhteydessä tutkitaan vain Fourier'n muunnoksen itseisarvoa kompleksimuodon sijaan.

Kuvan 3.1 spektrogrammi esittää FFT-menetelmällä analysoidua signaalinpätettä, joka sisälsi kuorinta- ja haketusprosessissa syntyvää äänimateriaalia sekä rullastolla syntyviä kivenkolahduksia. Kyseisessä kuvassa kivenkolahdukset esiintyvät 1...3 sekä 5...9 sekunnin välillä sisältäen useita yksittäisiä kolahdusääniä. Kivenkolahdusten vaikutus taajuusalueella on nähtävissä 500...1600 Hz:n alueella sinisestä taustaväristä poikkeavana värierona. Kuvaajan väripylvästä voidaan lukea kivenkolahdusten voimakkuus taajuus-/aika-akselistossa. Tulokset on esitetty spektrogrammin muodossa, jolloin seuraavat parametrit ovat olleet käytössä:

- Näytteenottotaajuus 8 kHz
- 256 pisteen FFT, jolloin saadaan 128 eri taajuusarvoa
- Analysoitavan ikkunan pituus 768 näytettä
- Limitys ikkunoiden välillä 30 %
- Taajuusarvojen normalisointi sekä skaalaus arvolla 150 (värierojen selventäminen spektrogrammissa)



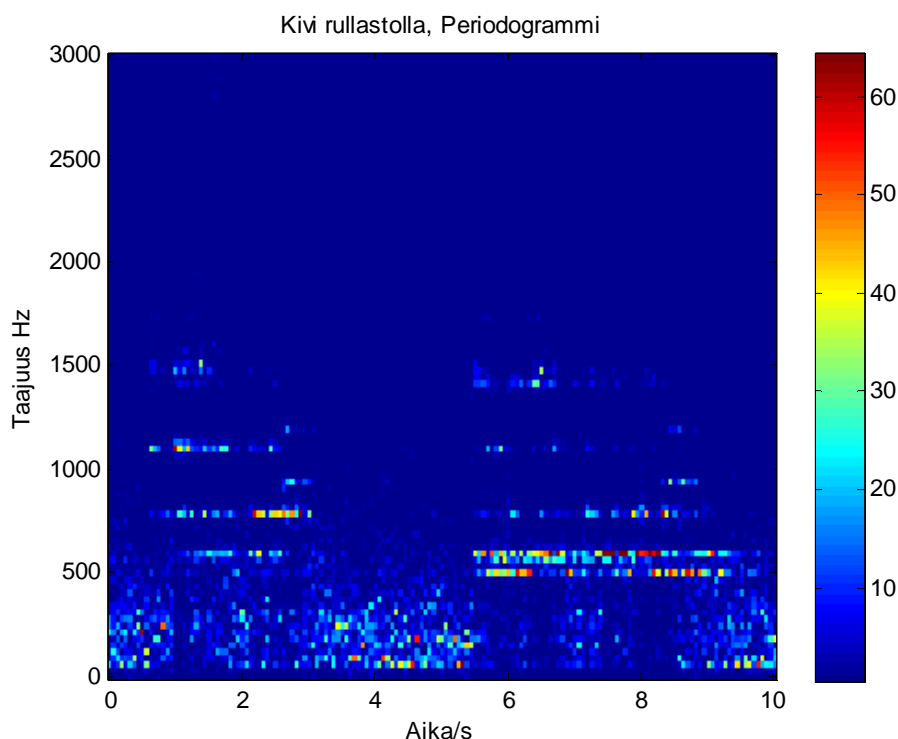
Kuva 3.1. Spektrogrammi, FFT:n itseisarvo.

3.2. Tehotiheyspektri-Periodogrammi

Yleensä taajuusanalysissä käytetään kuitenkin Fourier'n muunnoksen itseisarvon sijaan sen tehollisarvoa, joka voidaan ilmaista seuraavasti:

$$P[k] = \frac{1}{N} |X[k]|^2 \quad (3-2)$$

Kaava 3-2 kuvaa miten signaalin teho on jakautunut eri taajuuksille ja se voidaan ilmaista yksikkönä W/Hz. Kaavassa 3-2 oleva termi $1/N$ voidaan jättää pois jos tulos normalisoidaan, jolloin laskentaa saadaan kevennettyä. Kuvan 3.2 spektrogrammi esittää periodogrammin avulla analysoitua signaalinpätettä, joka on ollut sama kuin kappaleessa 3.1. Myös analyysin parametrit ovat samoja.



Kuva 3.2. Spektrogrammi, Periodogrammi.

3.3. Tehotiheyspektri-Welch:n menetelmä

Kappaleessa 3.2. esitetyn taajuusanalyysin tulos vaihtelee hyvin voimakkaasti taajuuden mukaan. Sanotaan että signaalin tehospektrin estimaattina Periodogrammin varianssi on suuri eikä se pienenee analysoitavan signaalinpätjän pidentyessä. Toinen Periodogrammin epäkohta on spektrivuoto, joka voi aiheuttaa ylimääräisiä taajuuskomponentteja analyysin tuloksessa. Spektrivuodon vaikutusta voidaan lievittää kertomalla analysoitava signaalinpätke ikkunafunktiolla $w[n]$ ennen Fourier'n muunnoksen kohdistamista [18]:

$$V[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left| x[n]w[n]e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \right|^2 \quad (3-2)$$

Eri ikkunafunktioilla voidaan tehdä kompromissi spektrivuodon ja taajuusesityksen muiden ominaisuuksien (esimerkiksi taajuusresoluutio) välillä. Tällaista taajuusesitystä kutsutaan modifioituksi periodogrammiksi. Periodogrammin varianssia tehospektrin estimaattina voidaan vähentää jakamalla analysoitava signaalinpätke ali-ikkunoihin, laskemalla jokaisesta ali-ikkunasta periodogrammi ja keskiarvottamalla ne taajuustasolla:

$$P_w[k] = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L V_i[k] \quad (3-3)$$

jossa L on ali-ikkunoiden lukumäärä

Welch:n tehospektrin laskennassa voidaan eritellä seuraavat vaiheet:

1. Signaali jaetaan haluttuun määrään ali-ikkunoita, jotka limitetään toisiinsa (oletuksena limitys 50 %)
2. Jokainen ali-ikkuna kerrotaan ikkunafunktiolla (tässä työssä Hamming-ikkuna)
3. Lasketaan jokaisesta ali-ikkunasta modifioitu periodogrammi [19]
4. Lasketaan ali-ikkunoiden periodogrammien keskiarvo
5. Suoritetaan normalisointi

Matlab-ohjelmassa on mahdollista toteuttaa kyseinen laskenta yhdellä käskyllä (`pwelch`) seuraavasti:

$$P_{xx} = \text{pwelch}(\text{seg}, w, \text{overl}, \text{nfft}, F_s);$$

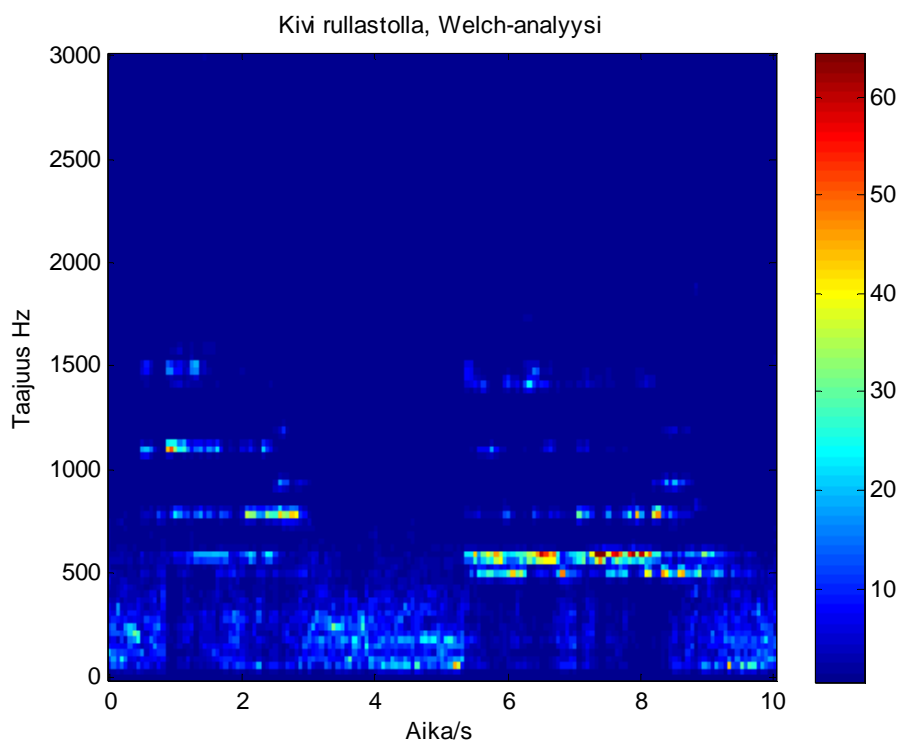
jossa funktion argumentit tarkoittavat

- *seg*; käsiteltävä näytesegmentti
- *w*; ikkunafunktio
- *overl*; limitys
- *nfft*; FFT:n pituus (mikäli FFT:n pituus on suurempi kuin näytesegmentin pituus, algoritmi lisää segmenttiin nollia)
- *F_s*; näytteenottotaajuus

Signaaliprosessorikortilla valmista käskyä ei löydy, jolloin kyseinen laskenta on suoritettava vaiheittain.

Vaiheessa kolme laskettavaa periodogrammia kutsutaan modifioiduksi [19], jos ikkunafunktiona on käytetty suorakaideikkunasta poikkeavaa ikkunaa. Vaiheessa viisi suoritettava normalisointi poistaa signaalitason vaikutuksen. Tällöin laskennasta saatavat tulokset ovat vertailukelpoisia riippumatta tulosignaalin voimakkuudesta. Matlab-ohjelman `pwelch`-käskyn tulos jaetaan termillä π sekä ikkunafunktion neliösummalla. Tämä vaikutus kuitenkin poistuu normalisoinnin yhteydessä, jolloin nämä termit voidaan jättää pois ja täten keventää laskentaoperaatiota. Kuvan 3.3 spektrogrammi esittää Welch:n menetelmällä analysoitua signaalinpätettä, joka on ollut sama kuin kappaleessa 3.1. Tulokset on esitetty spektrogrammin muodossa, jolloin seuraavat parametrit ovat olleet käytössä:

- Näytteenottotaajuus 8 kHz
- 256 pisteen FFT, jolloin saadaan 128 eri taajuusarvoa
- Analysoitavan ikkunan pituus 768 näytettä
- Limitys ikkunoiden välillä 30 %
- Ali-ikkunoiden lukumäärä viisi, limitys 50 % ali-ikkunoiden välillä
- Ali-ikkuna kerrotaan Hamming-ikkunalla
- Taajuusarvojen normalisointi sekä skaalaus arvolla 150 (värierojen selventäminen spektrogrammissa)



Kuva 3.3. Spektrogrammi, Welch-analyysi.

3.4. Spektrianalyysimenetelmien vertailu

Tavoitteena on tuoda esille kappaleissa 3.1...3.3 esitettyjen taajuusanalyysimenetelmien ominaisuuksia ja pyrkiä löytämään soveltuvin analysointimenetelmä kiventunnistusta varten.

Kuvassa 3.1...3.3 on havaittavissa, että kiven aiheuttama kolahdus näkyy taajuusalueella vaaleampina alueina ja sijaitsee noin 500-1600 Hz:n alueella. Kuorinta- ja haketusprosessista aiheutuvan äänen taajuusalueet painottuvat alle 500 Hz:n. FFT tuo esiin useita taajuusalueita, kun taas periodogrammi painottaa paremmin kivenkolahduksen taajuudet helpottaen täten tunnistusmenetelmän kehittelyä.

Welch:n analyysissä data pilkotaan pienempiin osiin ja tällä tavalla pyritään tuomaan taajuussisällön informaatio tarkemmin esille. Verrattaessa kuvia 3.2 ja 3.3, voidaan molemmissa havaita kolahduksen aiheuttama muutos taajuusalueella. Kuitenkin Welch:n kuvaajassa on nähtävissä miten energia keskittyy selvemmin kivenkolahduksen taajuusalueelle eikä normaalin kuorimomelun alueelle. Myös kolahdusalueen ulkopuolella Welch-analyysi poistaa jyrkkiä muutoksia, joka edesauttaa oikean tunnistustapah-tuman toteuttamista.

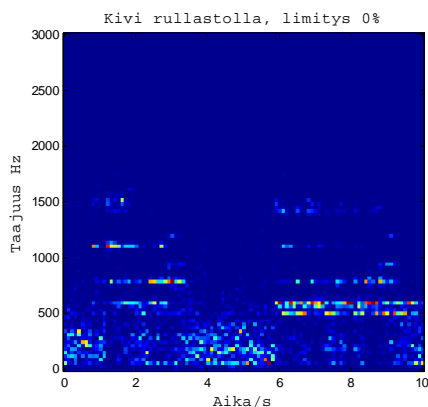
Kuvissa 3.4...3.10 on tuotu esille ikkunan limityksen ja pituuden vaikutuksia taajuusalueella. Analysoinnin kohteena on käytetty samaa signaalinpätkää kuin kappaleessa 3.1. Vertailussa on käytetty normaalia Periodogrammia, jotta ali-ikkunoinnin vaikutus ei näkyisi tuloksissa.

Limityksen vaikutus taajuusesitykseen

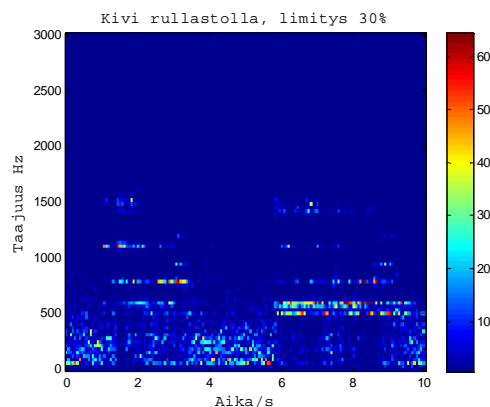
Kuvissa 3.4...3.6 on vertailtu miten käsiteltävien data-ikkunoiden limitys toisiinsa vaikuttaa. Tulokset on esitetty spektrogrammin muodossa, jolloin seuraavat parametrit ovat olleet käytössä:

- Näytteenottotaajuus 8 kHz
- 256 pisteen FFT, jolloin saadaan 128 eri taajuusarvoa
- Analysoitavan ikkunan pituus 768 näytettä
- Limitys ikkunoiden välillä 0, 30 % tai 50 %
- Taajuusarvojen normalisointi sekä skaalaus arvolla 150 (värierojen selventäminen spektrogrammissa)

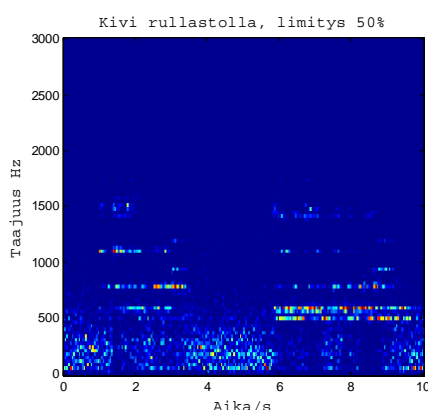
Kuvasarjasta voidaan havaita, että limityksen kasvaessa, saadaan hieman parannettua kivi-iskujen esiintymistä taajuus- aika-alueella, jolloin taajuuskomponentit korostuvat kivialueella selvemmin. Limityksen kasvattaminen lisää laskentaan tarvittavaa aikaa. Limityksen lisääminen 50 %:iin ei anna lisäinformaatiota, jolloin 30 % limitys on riittävä.



Kuva 3.4. Periodogrammi, limitys 0%.



Kuva 3.5. Periodogrammi, limitys 30%.



Kuva 3.6. Periodogrammi, limitys 50%.

Signaalinpätkien pituuden vaikutus taajuusesitykseen

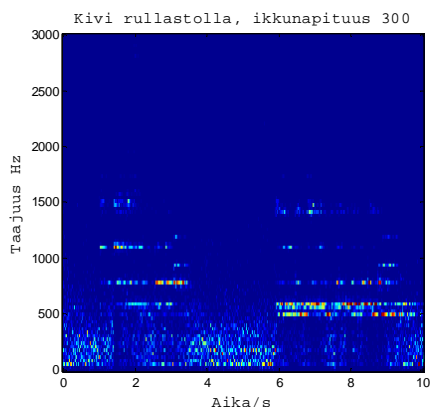
Kuvissa 3.7...3.10 on vertailtu data-ikkunoiden pituuden vaikutusta taajuusanalyysiin. Tulokset on esitetty spektrogrammin muodossa, jolloin seuraavat parametrit ovat olleet käytössä:

- Näytteenottotaajuus 8 kHz
- 256 pisteen FFT, jolloin saadaan 128 eri taajuusarvoa
- Analysoitavan ikkunan pituus 300,768, 1000 tai 1300 näytettä
- Limitys ikkunoiden välillä 30 %
- Taajuusarvojen normalisointi sekä skaalaus arvolla 150 (värierojen selventäminen spektrogrammissa)

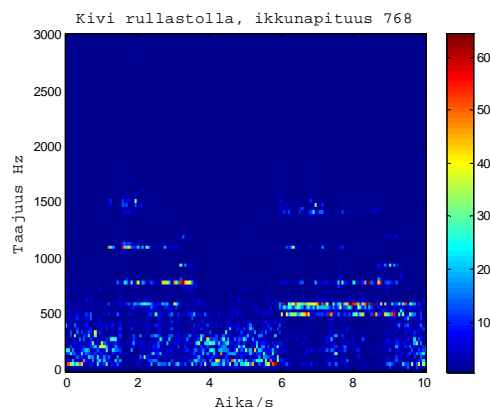
Kuvasarjasta voidaan nähdä, että ikkunan pituuden lyhentäminen parantaa kivi-iskun esille tuloa, mutta samalla laskentaan tarvittava aika kasvaa.

Signaaliprosessorikortilla dataikkunan pituudeksi on valittu 768 näytettä. Tämä mahdollistaa FFT:n laskentaan kehitettyjen kirjastofunktioiden tehokkaan käytön prosessorikortilla. Limityksen pituudeksi on valittu 30 %. Tällä toimenpiteellä pyritään

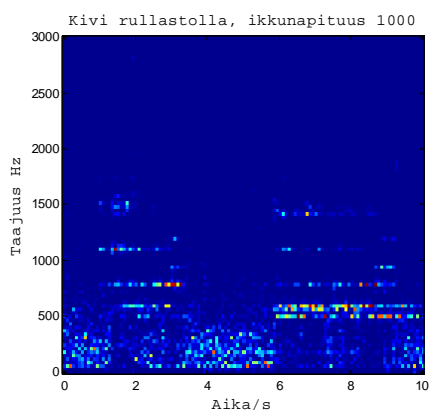
varmistamaan, että kaikki tarpeellinen näytteenotosta saatava informaation saataisiin analysoitua.



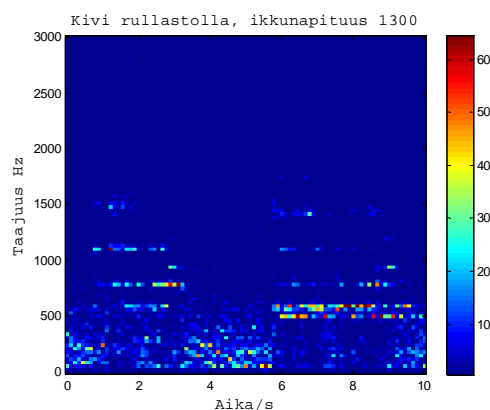
Kuva 3.7. Periodogrammi, ikkuna 300



Kuva 3.8. Periodogrammi, ikkuna 768



Kuva 3.9. Periodogrammi, ikkuna 1000



Kuva 3.10. Periodogrammi, ikkuna 1300

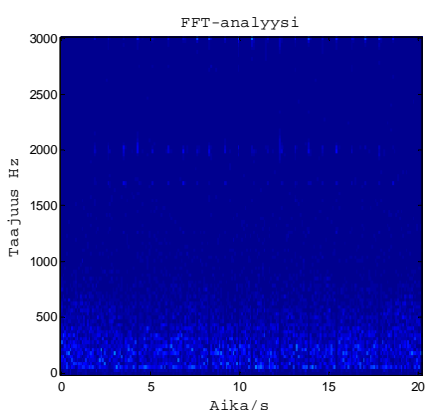
3.5. Häiriöiden vaikutus spektrianalyysin tuloksiin

Eri sovelluksia testattiin myös kivenkolahduksista poikkeavien äänien yhteydessä. Ku-
vissa 3.11...3-16 on spektrogrammin avulla tutkittu kappaleissa 3.1...3.3 mainittujen
sovellusten käyttäytymistä ja on pyritty saamaan esille mahdolliset tilanteet, jolloin tun-
nistusalgorithmi saattaa aiheuttaa virheellisen tunnistustapahtuman. Häiriölähteiden ana-
lysointi on tarpeellista suorittaa, jotta virheellisten tunnistusten määrä voitaisiin mini-
moida eikä prosessiin aiheutuisi turhia katkoksia. Kuitenkin on olemassa joukko hyvin
erilaisia häiriölähteitä, joiden analyysiä ei voida selvittää ja jotka tulevat esille pidempi-
aikaisten seurantajaksojen kuluessa. Analyysien parametrit ovat olleet samoja kuin kap-
paleissa 3.1... 3.3 on esitetty kunkin menetelmän yhteydessä.

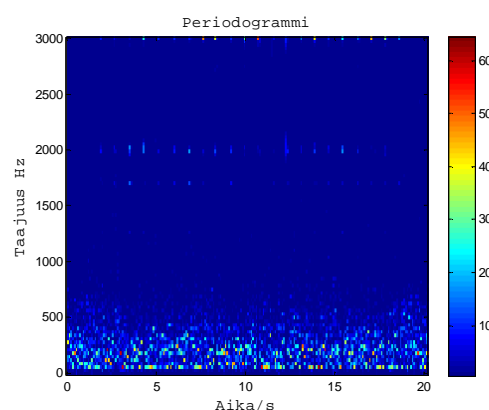
Vasarointi häiriölähteenä

Kuvien 3.11...3.13 spektrogrammi esittää kuorinta- ja haketusprosessissa syntyvän äänimateriaalin taajuussisältöä. Prosessiäänien lisäksi tuotettiin vasaraniskujen aiheuttamaa häiriöääntä iskemällä vasaraa rullaston yläpuolella olevaan teräspalkkiin. Äänimateriaalia on analysoitu kappaleissa 3.1...3.3 esitetyillä menetelmillä, jolloin on käytetty myös samoja analysointiparametrejä.

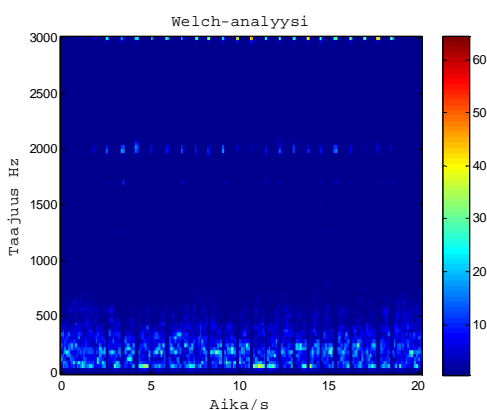
Kuvista voidaan havaita taajuusalueen sijaitsevan eri alueella kivenkolahduksen taajuusalueeseen verrattuna. Taajuusalueen energian sijaintia tutkimalla, voidaan häiriön aiheuttama virhetunnistus eliminoida.



Kuva 3.11. Vasarointi, FFT-analyysi.



Kuva 3.12. Vasarointi, Periodogrammi.



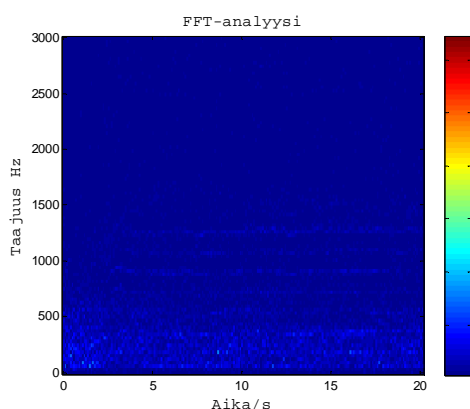
Kuva 3.13. Vasarointi, Welch-analyysi.

Moottorisaha häiriölähteenä

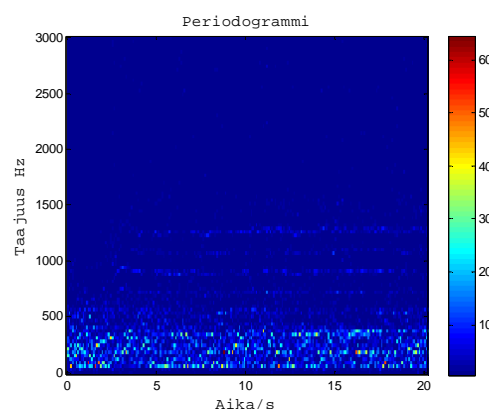
Kuvien 3.14...3.16 spektrogrammi esittää kuorinta- ja haketusprosessissa syntyvän äänimateriaalin taajuussisältöä. Prosessiäänien lisäksi tuotettiin moottorisahan aiheuttamaa häiriöääntä käyttämällä moottorisaha rullaston yläpuolella. Äänimateriaalia on analysoitu kappaleissa 3.1...3.3 esitetyillä menetelmillä, jolloin on käytetty myös samoja analysointiparametrejä.

Kuvissa voidaan nähdä moottorisahan aiheuttaman äänen käyttäytyminen taajuusalueella, joka sijaitsee melko lähellä kivenkolahduksen taajuusalueella. Kuitenkin voimakkuus tällä alueella on melko heikko. Welch:n sovellus poistaa tehokkaammin energiaa kivenkolahduksen taajuusalueelta verrattuna muihin sovelluksiin pienentäen näin virhetunnistuksen mahdollisuutta. Lisäksi voidaan havaita taajuusalueen energian ulottuvan myös alle 500 Hz:n, jolloin taas lähestytään normaalia kuorimon melun äänialuetta.

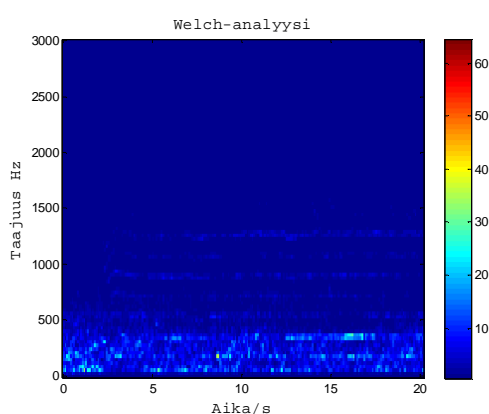
Kuvasarjoista voidaan päätellä Welch:n sovelluksen antavan hienoisen edun pyrittäessä löytämään luotettavin menetelmä kivitunnistukseen, jolloin myös virheellisten tunnistusten osuus on minimoitu. Laskenta on hieman vaativampi verrattuna periodogrammiin, mutta signaaliprosessorikortilla kyseinen reaaliaikainen laskenta on mahdollista toteuttaa.



Kuva 3.14. Moottorisahaus, FFT.



Kuva 3.15. Moottorisahaus, Periodogrammi



Kuva 3.16. Moottorisahaus, Welch.

Tarkasteltaessa kuvaa 3.3, voidaan myös havaita miten kolahduksen aiheuttama taajuusspektri käyttäytyy ajan funktiona. Kolahduksen aiheuttamat muutokset amplitudispektrissä näkyvät ajallisesti pidemmällä alueella kuin esimerkiksi kuvassa 3.11 olevan häiriöäänien aiheuttamat muutokset taajuusalueella. Tätä ominaisuutta on myös mahdollista hyväksikäyttää tunnistusalgoritmin kehittäessä.

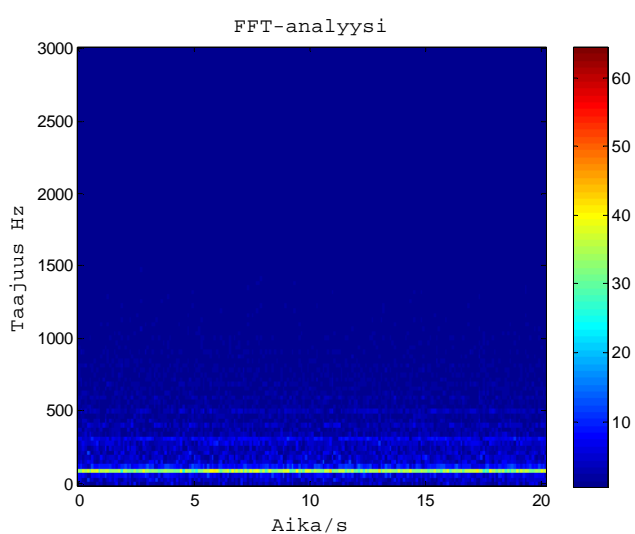
3.6. Kiventunnistus seulontaprosessin yhteydessä

Kuvassa 3.17 on nähtävissä tikkuhakkua edeltävä seulontalaite käynnissä, josta kuvien 3.18...3.20 spektrogrammit on tuotettu. Taajuusanalyysin tarkoituksena oli kartoittaa ääneen perustuvan tunnistusmenetelmän soveltuvuutta harkittaessa tulevaisuudessa mahdollisesti uutta puunkäsittelyprosessin sovellusaluetta. Tällöin kyseessä olisi kiventunnistus seulontaprosessin yhteydessä, jolloin tavoitteena on tikkuhakun suojaaminen kivivaurioilta. Taajuus alueet näyttävät pääsääntöisesti olevan alle 500 Hz, jolloin on mahdollista hyödyntää samaa algoritmia myös tässä tapauksessa.

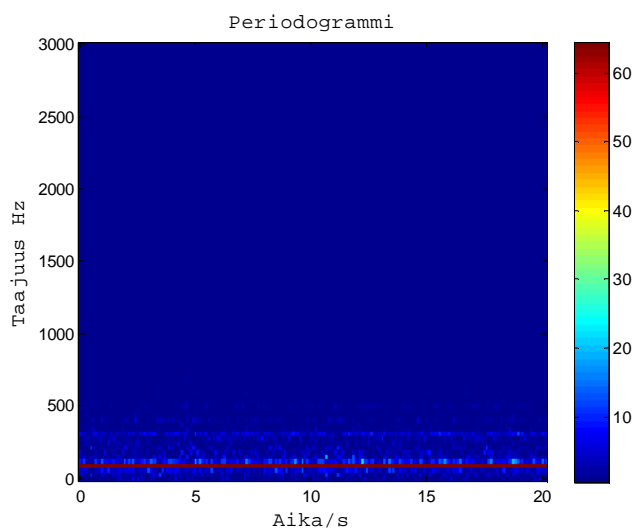
Tässäkin vertailussa Welch:n sovellus osoittautuu luotettavammaksi ratkaisuksi, jolloin voidaan havaita energian painottuvan 300 Hz:n alapuolelle kun taas muiden sovellusten yhteydessä energiaa saattaa esiintyä myös kivenkolahdusten alueella.



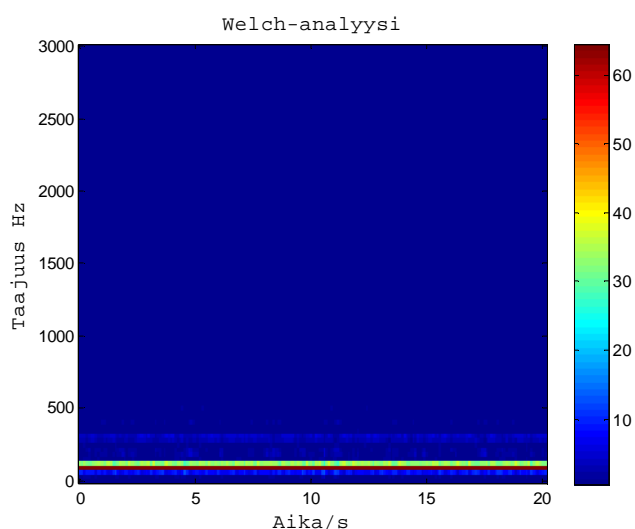
Kuva 3.17. Skalpperin seulontaprosessi.



Kuva 3.18. Kiekkoseulonta + tikkuhakku, FFT-analyysi



Kuva 3.19. Kiekkoseulonta + tikkuhakku, Periodogrammi



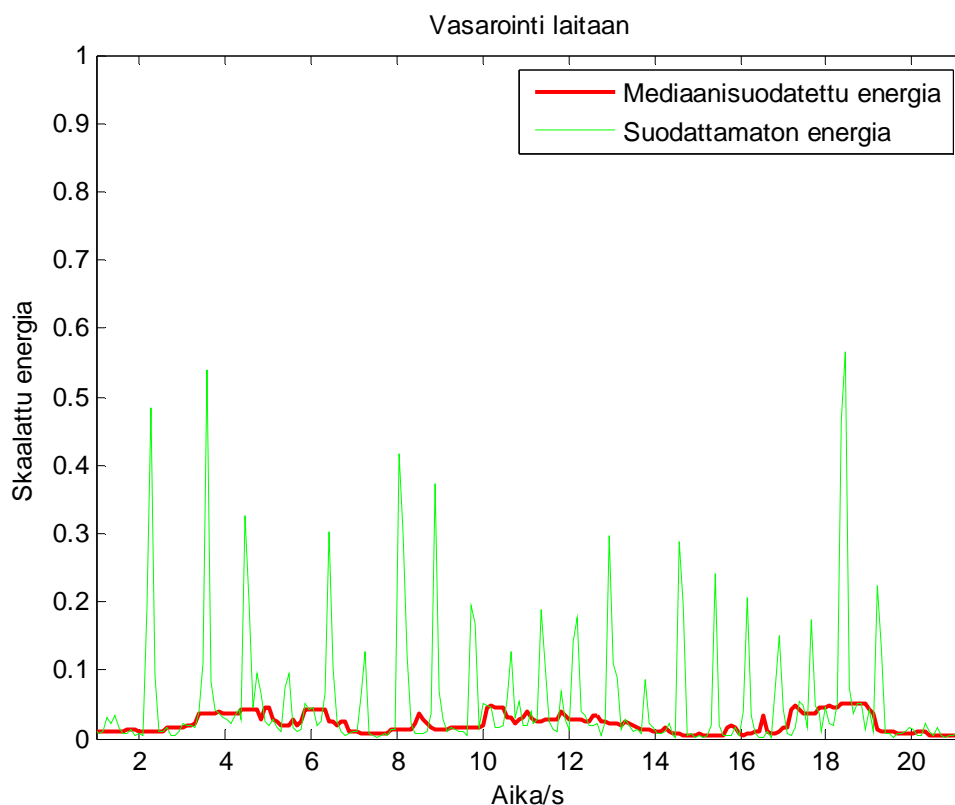
Kuva 3.20. Kiekkoseulonta + tikkuhakku, Welch-analyysi

3.7. Signaalin mediaanisuodatus

Mediaanisuodatuksen tarkoitus on poistaa poikkeavia arvoja datasta. Tällaisia ovat juuri satunnaiset kolahdukset tai vasaraniskut, jotka eivät aiheudu rullastolla olevasta kivenkolahduksesta. Suodatuksen kohteena on mikrofonilta tulevan signaalin teho taajuusalueella 500...1600 Hz suhteessa tehoon taajuusalueella 0...1600 Hz. Yksi arvo suodatettavassa signaalissa vastaa näin ollen kokonaista signaalinpätkää alkuperäisessä audio-signaalissa. Suhteellisen tehon laskennassa on käytetty Welch'in periodogrammin menetelmää joka on kohdistettu 768 näytteen signaalinpätkille limityksellä 30%. Kukin signaalinpätkä on jaettu viiteen ali-ikkunaan. Mediaanisuodatuksessa on käytetty 11 näytteen ikkunanpituutta.

Suodatuksessa vektorin alkiot lajitellaan suuruusjärjestykseen joista valitaan keskimäinen alkio, jos näytteitä on pariton määrä. Parillisen määrän yhteydessä valitaan vektorin kaksi keskimäistä alkioita ja lasketaan näiden keskiarvo, jolloin saadaan vektorin suodatettu arvo.

Kuvassa 3.21 voidaan nähdä suodatuksen vaikutus. Vihreällä värillä esiintyvät energiapiikit kuvaavat vasaran iskua ilman suodatusta, jolloin energiapiikit nousevat yli 0.2 kynnysarvon. Punaisella värillä esiintyvä kuvaaja on mediaanisuodatettu ja tuloksena saadut energiapiikit jäävät selvästi alle kynnysarvon 0.2.



Kuva 3.21. Mediaanisuodatus

4. REAALIAIKAINEN KIVENTUNNISTUSJÄRJESTELMÄ

Luvussa 2 esiteltiin eri menetelmiä, joilla olisi mahdollista toteuttaa luotettava kiventunnistusjärjestelmä kuorimon pöllilinjalle. Edellä olevista menetelmistä mikrofonin kautta saatava äänisignaali ja sille tehtävä taajuusanalyysi valittiin tutkimuskohteeksi. Kustannuksiltaan kyseinen menetelmä on edullinen mukaan lukien mikrofoni sekä siihen liittyvä signaaliprosessointikortti eikä tunnistuslaitteiden lisääminen vaadi muutoksia olemassa oleviin prosessilaitteisiin.

Tässä luvussa tuodaan esille reaaliaikaisen tunnistusjärjestelmän komponentit sekä c-kielellä toteutettu tunnistusalgoritmi. Sovelluksen kehittämisessä esiintyy seuraavia vaiheita:

- Prosessorin valinta
- Projektin luonti
- Ohjelmointikielen valinta
- Tarvittavien tiedostojen lisäys projektiin
- Käännettyjen aliohjelmien linkitys ajettavaksi koodiksi
- Testaus
- Alustan ohjelmointi ICD-3 ohjelmointityökalun avulla

4.1. Prosessiympäristö äänitunnistuksessa

Tämä tutkimus kohdistuu kuorinta- ja haketusprosessissa olevan rullakuljettimen yhteyteen, jossa tavoitteena on toteuttaa kivimateriaalin tunnistusjärjestelmä. Peruslähtökohta tunnistusmenetelmän valinnalle oli, että ihmiskorvalla pystytään kuulemaan tietyn tyyppinen kilahdusääni kiven kulkiessa rullastolla puuvirran mukana. Tutkimuksen eräs perusselvitys oli taajuusalueen määrittäminen, jolloin kilahdusäänen tunnistus tulisi mahdolliseksi. Edellytys äänen esille tuloon on, että kivi ei kulkeudu puiden päällä vaan osuu rulliin ja saa aikaan kilahdusefektin. On mahdollista, että kivimateriaali kulkeutuu myös puiden päällä. Tällöin ei kilahdusääntä onnistuta saamaan, eikä tunnistus onnistu.

Ympäristöllä, jossa ääninäytteet on tallennettu, on suuri merkitys analysoinnin onnistumisen kannalta. Taajuusalueet vaihtelevat puunkäsittelyprosessin eri vaiheissa, jolloin tarvitaan lisäselvityksiä jos pyritään rakentamaan tunnistusta muuhun ympäristöön. Lähtökohtana oletetaan kuorinta- ja haketusprosessiin osallistuvien laitteiden olevan käynnissä prosessin ohella.

Prosessissa pöllit lastataan kuorimarummun syöttökuljettimelle, joka siirtää pöllivirran kuorimarumpuun kuorintaprosessia varten. Pöllimassa pyörii kuorimarummussa kulkeutuen samalla rummun purkauspäätä kohden ja samanaikaisesti rummussa olevista kuoriaukoista poistuu kuoripitoinen aines. Pöllit puretaan rummusta kuljetinlinjalle, jossa sijaitsee tutkimusalueena oleva rullakuljetin. Tässä vaiheessa kiviaines normaalisti ohjautuu puuvirran pohjalle, jolloin rullastolla tapahtuva ääniperustainen tunnistusprosessi tulee mahdolliseksi. Rullaston jälkeen pöllit siirtyvät joko suoraan tai kuljettimen välityksellä hakulla tapahtuvaan haketusprosessiin, jossa normaalisti teräjärjestelmällä varustettu kiekkomainen hakku muuttaa pöllimäisen puuaineksen hakkeeksi. Hakusta hake siirretään kuljetusjärjestelmiin joko puhallusperiaatteella tai ruuvipurkuun perustuvan purkaustaskun avulla. Muita prosessin äänimaailmaan vaikuttavia tekijöitä ovat

- Kuorenkäsittelyn laitteet
- Pöllien sulatus- ja pesujärjestelmät
- Kuljetinjärjestelmät
- Puhaltimet (pölyn- ja höyrynpisto)
- Huoltoon liittyvät toimenpiteet

4.2. Tunnistusjärjestelmän komponentit

Äänitunnistuksen suorittamiseksi valittiin signaalianalysointia varten Microchip Technology Inc.:n tuottama kehitysalusta (dsPICDEM 1.1 Plus), jossa on valmiudet tuoda mikrofoniilta tuleva signaali analysointia varten. Alustalla voidaan toteuttaa reaaliaikainen äänisignaalin taajuusanalyysi, jolloin on mahdollista saada ohjaustieto haketusprosessin ohjausjärjestelmille jatkotoimenpiteitä varten.

Mikrofonin valinnassa oikean dynamiikan valinnalla on merkitystä, koska äänenpaineen tasot saattavat nousta 110 dB:n tasolle. Sopivien mikrofonien valmistajia löytyy markkinoilta useita. Tässä tapauksessa päädyttiin Shure Inc. tuottamaan ripustusmikrofoniin, joka ylittää aina 120 dB:n äänenpainetasoihin 1 kHz:n taajuudella. Mikrofoni pysyy myös toimimaan tutkittavan taajuusalueen puitteissa, joka on alle 4 kHz.

Mikrofoni on elektrettityyppinen kondensaattorimikrofoni, joka kestävänsä rakenteensa ansiosta on sopiva haketusprosessin yhteyteen. Kondensaattorimikrofonin yhteyteen on liitettävä erillinen virtalähde, jonka avulla mikrofoni saa phantom-virtaa. Kuvassa 4.1 on esitetty analysoinnissa käytetty testauskalusto, joka sisältää seuraavia komponentteja:

- H4-Handy Recorder, digitaalinen tallennuslaite
- ICD 3, alustan ohjelmointityökalu
- Mikrofoni + vahvistin
- Phantom-virtalähde mikrofonille
- Signaaliprosessorikortti



Kuva 4.1. Analysointilaitteisto.

Alustan prosessoriksi valittiin dsPIC33-prosessori, joka on kehitetty audiosovelluksia varten. Alustan LCD-näyttö mahdollistaa takaisinkytkennän alustan ulkopuolelle antaen tietoa analyysin etenemisestä. Mikrofoniliitännän kautta voidaan äänisignaali syöttää signaaliprosessorikortille prosessoitavaksi. Kortilla olevan kaiutinliitännän avulla voidaan seurata alustan toimintaa kuulohavainnon perusteella.

Ohjelmointi on mahdollista tehdä assembler-kielessä tai vaihtoehtoisesti C-kielen avulla, jota käytettiin tässä yhteydessä. C-ohjelmointi suoritetaan MicroChip:n kehittämässä Mplab-ohjelmointiympäristössä, josta valmis ohjelma voidaan ladata ICD 3 ohjelmointityökalun avulla prosessorille.

Kehitysalusta tarjoaa useita erilaisia mahdollisuuksia testata erilaisia sovelluksia. Alustalta löytyy seuraavia ominaisuuksia:

- RS-232 sarjaportti
- CAN-portti
- RS-485/422 portit
- Anturi lämpötilan tunnistukseen

- Ohjelmoitavia painonappeja
- Ohjelmoitavat LED:it
- Digitaalinen potentiometri
- ICD liitin ohjelmointityökalun kytkentään (ICD3)
- Si3000 koodekki, 16-bittinen AD/DA muunnos
- LCD näyttö

Alustalla on mahdollista käyttää eri prosessoreita, joissa käyttöjännitetaso on joko 3.3 V tai 5.0V. Tässä työssä on hyödynnetty dsPIC33FJ256GP710 prosessori, joka toimii 3.3 V jännitteellä.

Äänen koodaukseen on käytetty MicroChip:n kehittämiä puheenkoodaukseen tarkoitettuja kirjastofunktioita, jotka sisältävät pakkaus- ja purkualgoritmit. Tässä sovelluksessa nämä vaiheet ovat ohitettu, jolloin ääninäytteet on siirretty suoraan taajuusanalyysiin. Analyysin jälkeinen siirto takaisin kaiuttimiin ei ole välttämätön tunnistuksen kannalta, mutta auttaa selvittämään toimiiko koodi vai ei.

Alustalla oleva Silicon Laboratories Inc:n kehittämän Si3000-koodekin avulla voidaan suorittaa äänen näytteistykseen liittyvät AD/DA muunnokset sekä siirrot mikrofonin- ja kaiutin liittimiin. Mikrofonin sisääntulo ja kaiuttimien ulostulo voidaan ohjelmallisesti vahvistaa -34 dB...12 dB välillä.

AD/DA muunnoksen dynamiikka on 84 dB. LED:ien avulla on myös mahdollista saada visuaalista palautetta alustan toiminnoista ja niiden etenemisestä ohjaamalla ohjelmallisesti niiden toimintaa. Erilaisia toimintoja saadaan simuloitua syyttämällä tai sammuttamalla tietyssä järjestyksessä LED-valoja.

4.3. Algoritmin kehitys, C-kieli

C-ohjelmoinnissa on samanlaisia piirteitä ja rakenteita, joita löytyy myös Matlab ohjelmoinnissa. Signaaliprosessorikortilla signaalinkäsittely tapahtuu reaaliaikaisesti, jolloin ohjelmoinnin tavoitteena on luoda suoritustasoltaan optimaalinen koodi, jotta signaalinkäsittelyyn tarvittava laskenta voidaan suorittaa mahdollisimman tehokkaasti. Ohjelmointirutiinien testaus Matlab-ympäristössä nopeuttaa sopivan ja tehokkaan algoritmin rakentamista ennen kuin toimiva algoritmi siirretään dsp-ympäristössä olevaan C-ohjelmaan.

Johtuen dsp-kortin ominaisuuksista sekä käytettävästä käskykannasta, on loppukäyttöön tuleva koodi hieman erilainen verrattuna Matlab:n koodiin. Sovelluksen kehittäminen tapahtuu MicroChip:n tuottaman MpLab-kehitystyökalun avulla.

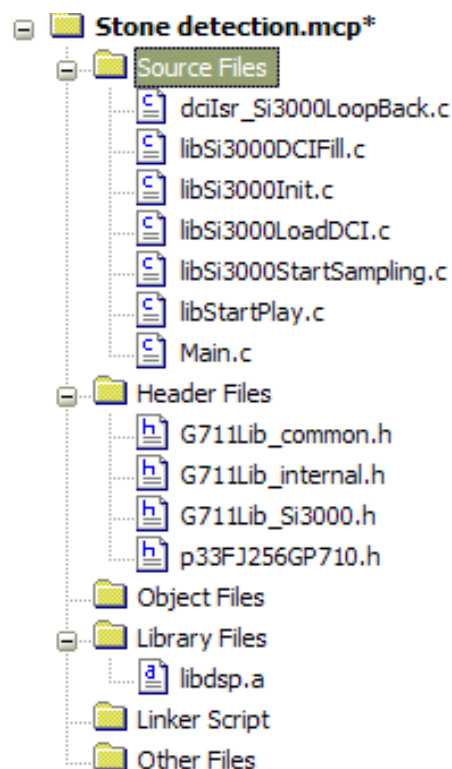
Tunnistusohjelmassa voidaan erottaa seuraavat päävaiheet:

1. Näytteenotto, taajuus 8 kHz
2. Näytteiden siirto laskentavektoriin
3. Vaiheittainen tehospektrin laskenta Welch:n analyysillä
4. Taajuusalueen energian laskenta ja siirto energiavektoriin
5. Energiavektorin mediaanisuodatus
6. Mediaanisuodatetun energia-arvon vertaaminen kynnyks arvoon (0.2) kivitunnistuksen todentamiseksi

Projektin luontivaiheessa suoritetaan alustavat laitevalinnat sekä päätetään millä ohjelmointikielellä ohjelmointi suoritetaan. Kuvassa 4.2 on esitetty MpLab-ohjelman kiventunnistusprojekti sekä siihen liittyvät tiedostot. Tiedosto Main.c on projektin pääohjelma, jossa on c-ohjelmointiin tyypillinen ohjelmarunko.

```
int main ( void )
{
}

```



Kuva 4.2. Projektirakenne, kiventunnistus, MpLab.

Aaltosulkeiden sisällä muodostetaan aliohjelmakutsut ja ohjataan ohjelman kulkua. Header-tiedostoissa alustetaan käytettävä laiteympäristö. Tässä prosessorin määrittelyt suoritetaan tiedostossa p33FJ256GB710.h. Muut header-tiedostot ohjaavat lähinnä Si3000-koodekin toimintaa. Vektorien käsittelyyn sekä Fourier-muunnoksen tekoon kehitetty dsp-kirjaston alustus suoritetaan libdsp.a tiedostossa.

Kääntäjä muuttaa c-koodin konekieliseen muotoon sisältäen tarvittavat muistiviittaukset muuttujille sekä varsinaiselle ohjelmakoodille. Konekielinen versio syötetään linkkaus-modulille, joka tuottaa prosessorilla ajettavan tiedoston sekä myös testausta varten debug-tiedoston. Tämän testaukseen tarkoitetun tiedoston avulla voidaan simuloida varsinaisen ohjelman toimintaa sekä lukea ohjelman käyttämien muuttujien sisältöä. MpLab-ohjelmassa on toiminto 'Watch', jolla muuttujien arvoja voidaan tutkia. Toiminnon ikkunaan voidaan tuoda useita eri muuttujia sekä vektoreita. Muuttujien arvoja voidaan lukea ohjelman ajon pysäyttämisen jälkeen.

Mplab-kehitysympäristön C-kielen mukana on funktiokirjasto, joka sisältää valmiiksi ohjelmoituja käskyjä kuten

- Vektorien kerto-, jako-, summaus- sekä vähennyslaskenta
- Kompleksimuotoinen FFT:n laskenta

Näiden laskenta perustuu murtoluku-aritmetiikkaan (1.15 formaatti), jolloin luvut määritellään 16-bittisinä. Koska ensimmäinen bitti on merkkibitti, voidaan tällöin kuvata lukualuetta -32768...32768. Tämä on otettava huomioon suoritettaessa laskentaoperaatioita. Muuttujien arvot pitää pysyä näiden rajojen sisäpuolella, jotta vältytään yli-
vuodolta ja sen seurauksena koodin toiminnan virheellisyydeltä.

Kirjaston sisältämät vektorilaskennan funktiot käyttäytyvät eri tavalla kuin laskettaessa yksittäisiä lukuja keskenään. Esimerkiksi käytettäessä kirjastofunktiota kertolaskun yhteydessä, vektorien elementit kerrotaan keskenään ja jokaisen kertolaskun tulo jaetaan luvulla 32768. Käytettäessä tavallista c-kielen kertolaskutoimintoa kahden luvun välillä, tulokseksi saadaan tällöin näiden kahden luvun tulo, vaikka luvut olisivat määritelty murtolukutyyppeiksi muuttujiksi. Jotta kirjastofunktion kertolaskun tulos voidaan esittää murtoluku-aritmetiikan ehdoilla, on vektorilaskennan elementtien tulo oltava alueella $32768 \dots 32768^2$. Tulon jäädessä alarajan alle saadaan tulokseksi nolla. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää esimerkiksi näytteenotossa, jos halutaan eliminoida merkityksettömiä näytearvoja. Tällöin voi olla tilanne, jossa varsinainen prosessi on pysähtynyt ja saadaan erittäin heikkoja näytearvoja. Näin saadaan kertolaskujen tulot nollattua sekä laskentaoperaatiota kevennettyä.

Vektorien summaus saattaa aiheuttaa myös helposti lukualueen ylityksen, koska tuloista ei jaeta kuten kertolaskussa. Jakolaskuoperaatioissa voi tulla tilanteita, jolloin joudutaan suorittamaan jako nolllalla. Tämä esiintyy mahdollisesti tilanteessa, jossa signaali on heikko tai analyysi antaa nolla-arvoisia taajuuskomponentteja. Tämä on kuitenkin melko helposti tutkittavissa koodin yhteydessä. Nolla-jako ei jumiuta ohjelmaa, mutta mahdollisesti ohjelma voi toimia jatkossa virheellisesti.

Reaaliaikaisessa näytteenotossa näytteenottotaajuutena on 8 kHz. Näytteet luetaan vuorotellen kahteen puskuriin, jolloin toista puskuria täytettäessä, voidaan toisen puskurin näytteet siirtää prosessoitavaksi.

FFT:n laskentaan kirjastofunktioissa on mahdollista käyttää seuraavaa käskyä

```
FFTComplexIP (8, &fft_vec[0], &twiddleFactors[0], COEFFS_IN_DATA);
```

jossa funktion argumentit tarkoittavat

- 8 on 2-kantainen logaritmi luvusta 256 (256-pisteen FFT)
- &fft_vec[0] on kohdevektori
- &twiddleFactors[0], FFT-kertoimet
- COEFFS_IN_DATA, muistialue, jossa laskenta on suoritettava

Funktion argumenttina oleva termi 'twiddlefactor' [18] kuvaa kaavan (3-3) termiä

$$e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn}$$

Kertoimien laskentaan dsp-kirjastossa löytyi valmis käsky, jolla saatiin kertoimet määriteltä. Kyseinen toiminto antoi alustuksen kompleksimuotoisen FFT:n laskentaan. Koska kyseessä on kuitenkin reaaliarvoisen taajuusalueen tulkinta, otetaan kompleksimuodosta itseisarvo käskyllä

```
fft_real[j]=sqrt(pow(fft_vec[j].real,2)+pow(fft_vec[j].imag,2));
```

jossa kompleksimuodon reaali- ja imaginääriosasta lasketaan neliösumma sekä neliöjuuri. Tällöin saadaan tulokseksi reaalimuotoinen taajuusvektori. Tehospektrin laskenta voidaan suorittaa tämän jälkeen kappaleessa 3.3 esille tuodun vaiheistuksen mukaisesti.

5. KIVENTUNNISTUSJÄRJESTELMÄN TESTAUS JA TULOKSET

Algoritmi testattiin Matlab-ympäristössä sekä signaaliprosessointikortilla. Testauksessa signaalin suhteellinen teho oli skaalattu välille 0...1, jolloin kynnsarvona pidettiin suhteellisen tehotason arvoa 0.2. Tämän yli olevat arvot tulkittiin kiven aiheuttamiksi kohalduksiksi.

5.1. Testiaineisto

Algoritmin kehitystä varten suoritettiin kuorinta-haketuslinjalla äänitallennuksia kuvassa 4.1 näkyvän tallennusvälineen avulla. Kuorinta- ja haketusprosessista tulevaa äänimateriaalia kerättiin rullaston yläpuolelta useista eri vaiheista pyrkien luomaan mahdollisimman todenmukainen tilanne kiventunnistusta varten.

Rullastolla olevan kiven kilahdusäänen esille saamiseksi eripainoisia testikiviä pudoteltiin rullastolle joko puuvirran joukkoon tai tyhjälle rullastolle. Myös virheäänien aiheuttamaa äänimateriaalia taltioitiin pyrkien täten hankkimaan materiaalia viallisten tunnistusten välttämiseksi. Kuvassa 5.1 esitetään testauksessa käytetty kivimateriaali ja liitteessä 1 on esitetty testausmateriaalin annotointi.

Annotoinnin tarkoituksena on kartoittaa kaikki tapahtumat, jotka mahdollisesti voivat vaikuttaa tunnistusalgoritmin kehittämiseen. Tällä vaiheella myös nopeutetaan jatkokokehittelyä, koska tapahtumien tarkka sijainti ajallisesti on selvitetty. Näin voidaan nopeasti löytää kiinnostava alue tutkimuksen kohteeksi.

Annotoinnin suorittamiseksi apuna käytettiin Audacity-äänieditori ohjelmaa, jolla on mahdollista suorittaa tallenteelle erilaisia muokkaustoimenpiteitä. Tässä yhteydessä kuitenkin tarkoitus oli selvittää missä kohtaa näytealueella kukin tapahtuma sijaitse kuuntelemalla materiaalia sekä kirjaamalla tapahtuman näytealue muistiin.

Testauksen tapahtumat tallennettiin myös videonauhalle. Tällöin voitiin, aikaleimoja vertaamalla, tarkistaa mikä tapahtuma äänitallenteessa kulloinkin oli kyseessä. Kaikki tapahtumat nimettiin ja niiden sijainti näytealueella kirjattiin muistiin. Tiedot siirrettiin MS Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, jolla suoritettiin tietojen lopullinen muokkaus.

Annotoinnissa eri väreillä on pyritty selventämään onko testaustilanteessa jotain poikkeavaa ja täten saada erilaiset tapahtumat paremmin ryhmiteltyä. Jokainen tapahtuma on selitetty omassa sarakkeessaan ja samanlaisille tapahtumille on annettu samanlainen värikoodi. Näytealue osoittaa kunkin tapahtuman sijainnin äänitallenteessa näytenumeroilla ilmaistuna. Eri kivikokojen testaukset näkyvät nro-sarakkeesta ja lkm-sarake esittää kuinka monta kertaa kivi on osunut rulliin testauksen aikana. Kivenko-

lahdusten lukumäärä on arvioitu kuuntelemalla testiaineistoa jotta nähdään aiheuttavatko peräkkäiset kolahdukset jotain poikkeavuuksia järjestelmän toimintaan. Tavoitteena kuitenkin on aikaansaada ilmoitus tunnistustapahtumasta jo yhdenkin kolahduksen kohdalla. Laitakolahduksessa kivi on osunut rullaston laitaan. Tämä on ajateltu olevan häiriöääni eikä näin ollen kuulu tunnistettavan tapahtuman piiriin. 7.7 kg:n kiven testinumero neljässä eriteltiin ajallisesti melko pitkä rullaston kolahduksesta aiheutunut ääni, joka on tyypillinen myös muiden kolahdusten yhteydessä. Taulukossa 5.1 on eritelty testauksessa käytettyjen kivien koot.



Kuva 5.1. Testikivet rullaston kivenkolahdusanalyysiin.

Taulukko 5.1. Testauskivien koot

| Kiven paino, kg | Koko, mm x mm x mm |
|-----------------|--------------------|
| 7.7 | 160 x 180 x 200 |
| 5.6 | 150 x 170 x 200 |
| 3.8 | 110 x 120 x 200 |
| 2.9 | 90 x 130 x 150 |
| 2.1 | 90 x 100 x 140 |
| 1.2 | 90 x 90 x 120 |

Prosessiympäristössä suoritetussa äänen tallennusvaiheessa näytteenottotaajuutena käytettiin 44,1 kHz, koska tallennuslaiteessa ei ollut mahdollisuutta valita pienempää näytteenottotaajuutta. Tämän vuoksi oli suoritettava desimointi, jotta näytteenottotaajuudeksi tulisi 8 kHz ja näin ollen taajuus vastaisi reaaliaikaisen järjestelmän ominaisuuksia. Näytteenottotaajuuden muunnos toteutettiin Matlab-ohjelmalla.

Koodissa suoritetaan ensin näytteenottotaajuuden korotus kertoimella 80 ja sen jälkeen lasketaan taajuus käyttäen kerrointa 441. Tämä on tehtävä sen vuoksi, koska desimointikäsky hyväksyy vain kokonaisluvut eikä näin ollen päästäisi tarkasti 8 kHz:n taajuuteen.

Desimoinnissa tapahtuu taajuusalueiden limitys [17]. Tämän vuoksi desimoinnin yhteydessä suoritetaan alipäästösuodatus. Matlab:n *'desimate'*-käslyn argumentti *'fir'* luo 30 asteen *'fir'*-alipäästösuotimen, jolla voidaan taajuusalueiden limitys välttää. Näytteenottotaajuuden muunnos suoritettiin testausta varten prosessiympäristöstä tallennetulle äänimateriaalille, jolloin näytteenottotaajuus oli 44.1 kHz. Reaaliaikaisessa signaaliprosessoriympäristössä näytteenottotaajuus voidaan asettaa suoraan 8 kHz:iin, jolloin näytteenottotaajuuden muunnosta ei tarvita.

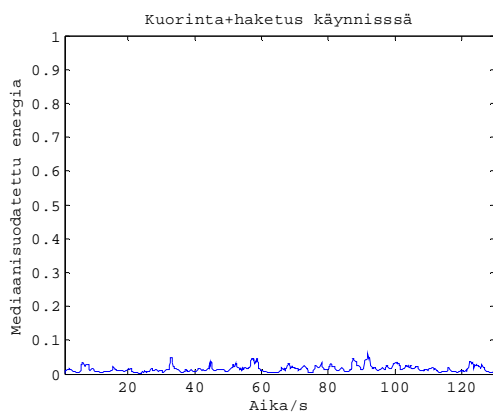
Liitteessä 1 esiintyy 8 kHz:n taajuus, koska testimateriaali on alasnäytteistetty tälle taajuudelle. Kuvassa 5.2 on esitetty testausalue prosessiympäristössä sekä tallennukseen käytetyn mikrofonin sijainti.



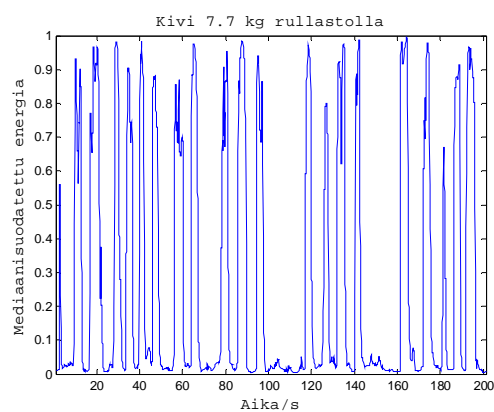
Kuva 5.2. Äänitallennus prosessilinjalla.

5.2. Testaus Matlab-ympäristössä

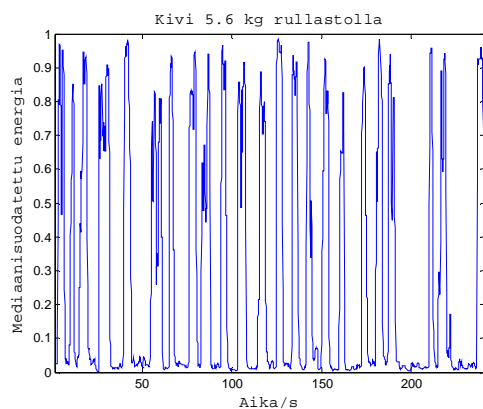
Kuvissa 5.4...5.9 on esitetty kiven aiheuttamia energiapiikkejä, jossa yhtä piikkiä vastaa kiven käynti rullastolla sisältäen useita kolahduksia. Useampi piikki kuvissa esittää useampaa testausta samalla testikivellä. Kuvassa 5.3 on esitetty kuorinta- ja haketusprosessin aiheuttama energiasisältö. Kaikki kuvat 5.3...5.17 esittävät suhteellista tehoa taajuusalueella 0...1600 Hz.



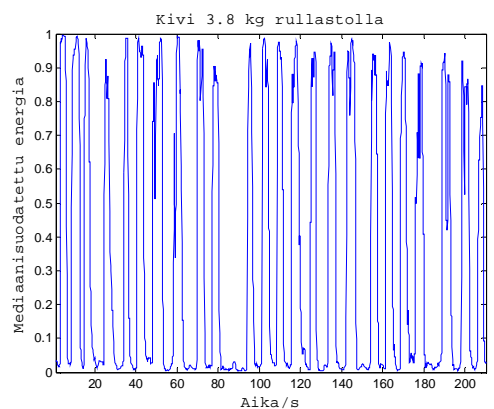
Kuva 5.3. Kuorimomelu.



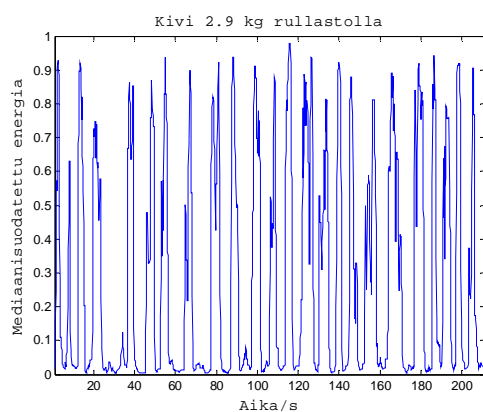
Kuva 5.4. Kuorimomelu + kivi 7.7 kg.



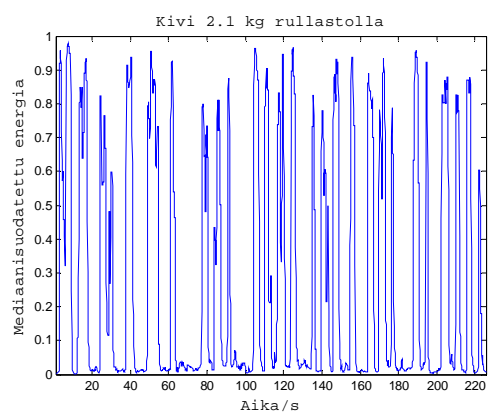
Kuva 5.5. Kuorimomelu + kivi 5.6 kg.



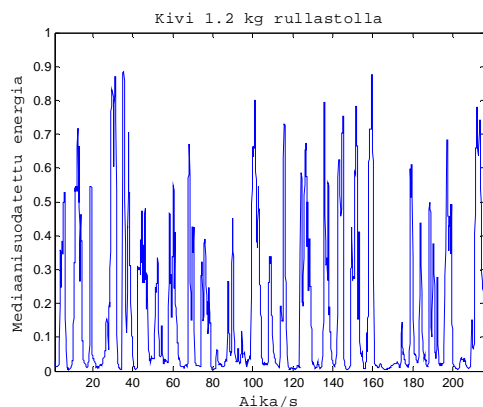
Kuva 5.6. Kuorimomelu + kivi 3.8 kg.



Kuva 5.7. Kuorimomelu + kivi 2.9 kg.

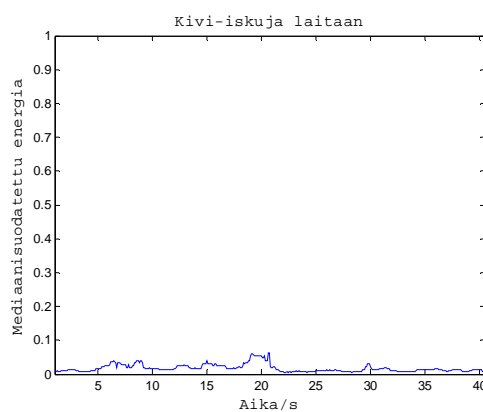


Kuva 5.8. Kuorimomelu + kivi 2.1 kg.

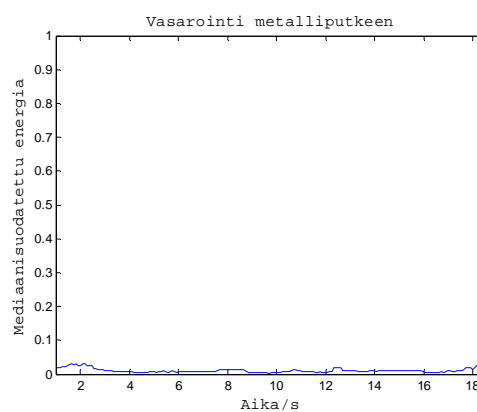


Kuva 5.9. Kuorimomelu + kivi 1.2 kg.

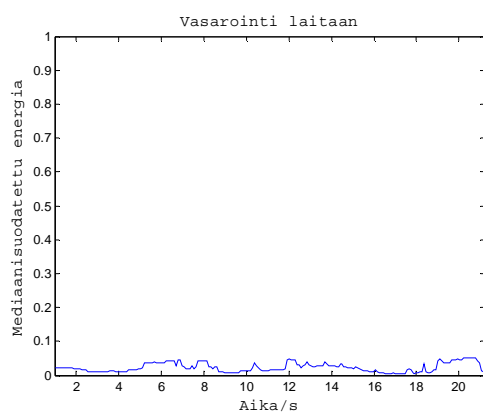
Kuvissa 5-10...5-17 testattiin algoritmin toimintaa muiden häiriöäänien esiintymisen yhteydessä. Kaikissa testausilanteissa on kuorinta- ja haketusprosessi käynnissä.



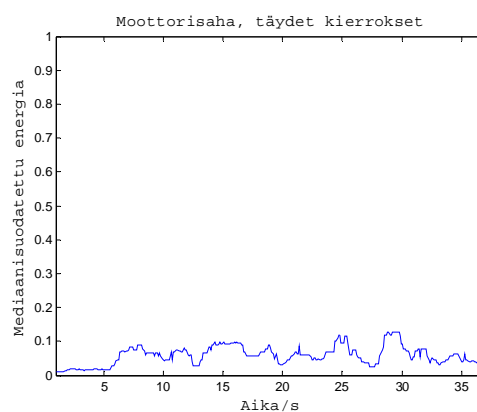
Kuva 5.10. Kivi-iskuja laitalevyyn.



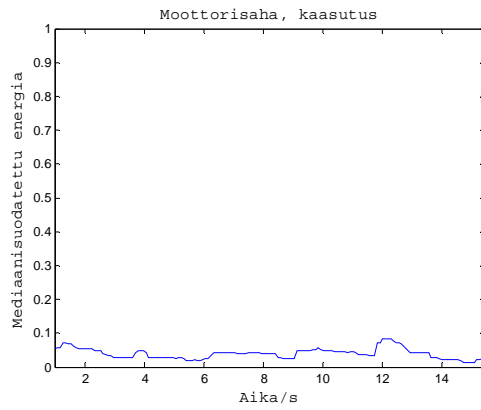
Kuva 5.11. Vasaraiskuja metalliputkeen.



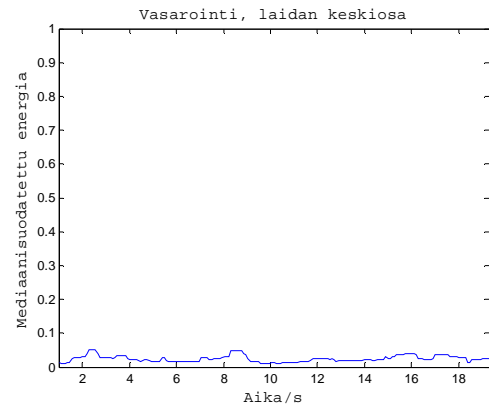
Kuva 5.12. Vasaraiskuja laitalevyyn.



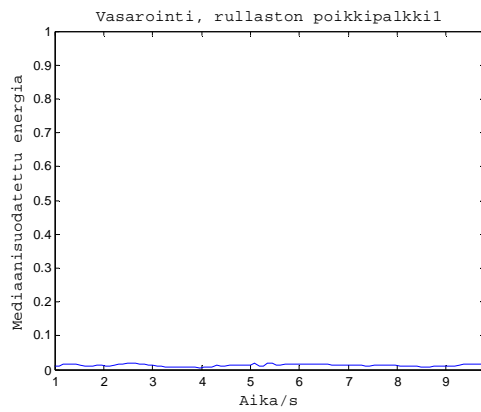
Kuva 5.13. Moottorisaha, täydet kierrokset



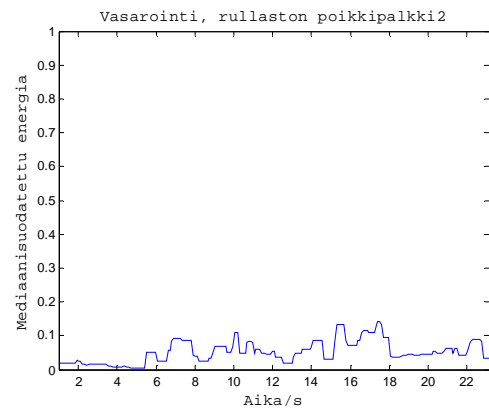
Kuva 5.14. Moottorisaha, kaasuttaminen.



Kuva 5.15. Vasaraikuja laitalevyn keskiosaan.



Kuva 5.16. Vasaraikuja neliöputkeen.



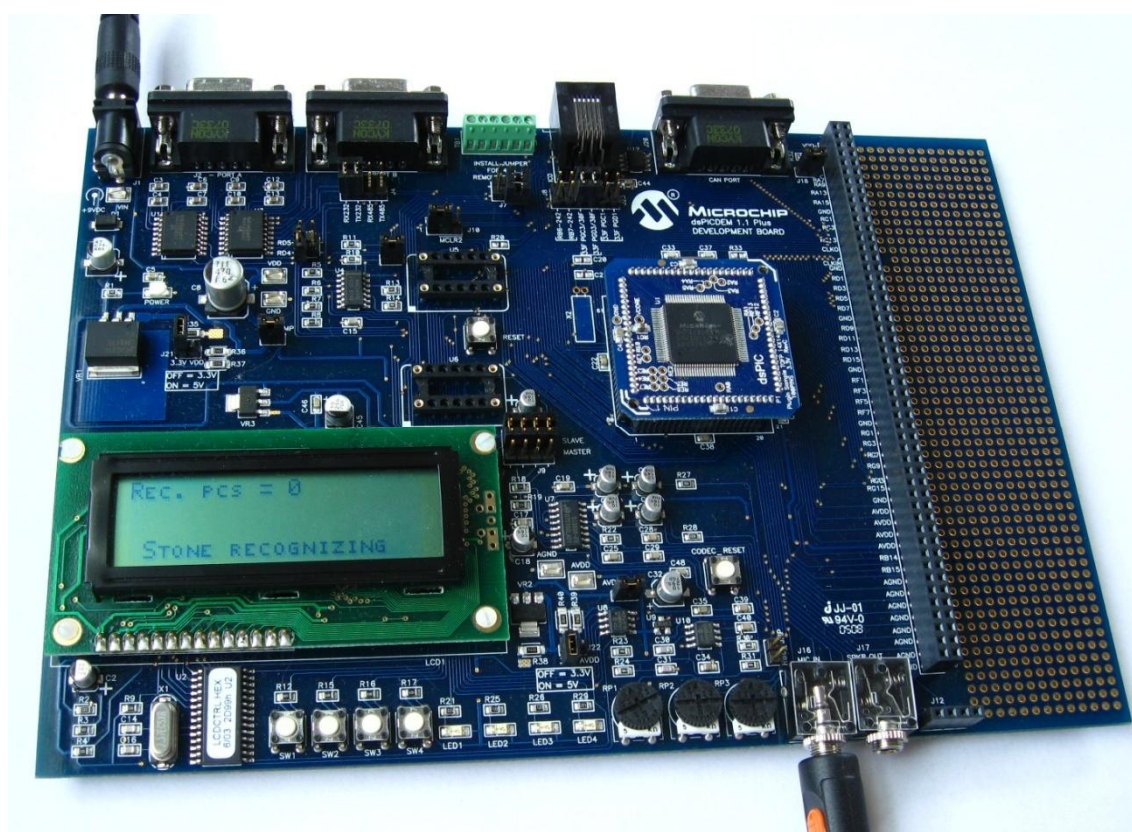
Kuva 5.17. Vasaraikuja tukipalkkiin.

5.3. Testaus signaaliprosessointikortilla

Testausta varten c-kielellä koodattu tunnistusalgoritmi ohjelmoitiin kortille toimimaan itsenäisesti eli virrankytken jälkeen tunnistusohjelma käynnistyy automaattisesti pyrkien löytämään kivityyppisen kolahduksen muun melun joukosta.

Äänite käynnistettiin Audacity-ohjelmalla, josta on mahdollista audio-visuaalisesti havaita milloin kivenkolahdus tapahtuu. Tietokoneen kaiutinliitäntä kytkettiin kortin mikrofoniinliitäntään, jolla simuloitiin todellista tunnistustilannetta.

Kuvassa 5.18 näkyy testauksen aloitustilanne. Kortilla olevaan LCD-näyttöön ohjelmoitiin laskuri osoittamaan milloin tunnistus tapahtui. Kuulokkeiden ollessa kytkettynä signaalin kanssa rinnakkain, oli mahdollista seurata muuttuiko laskurin arvo kivenkolahduksen esiintymisen yhteydessä. Jos kolahdusääntä rullastolta ei kuulunut, laskurin arvo oli tarkoitus pysyä muuttumattomana.



Kuva 5.18. Kiventunnistus käynnissä.

5.4. Testaustulokset

Taulukossa 5.2 on esitetty tunnisteiden lukumäärä eripainoisilla testikivillä sekä tunnustapahtumat eri häiriölähteiden yhteydessä.

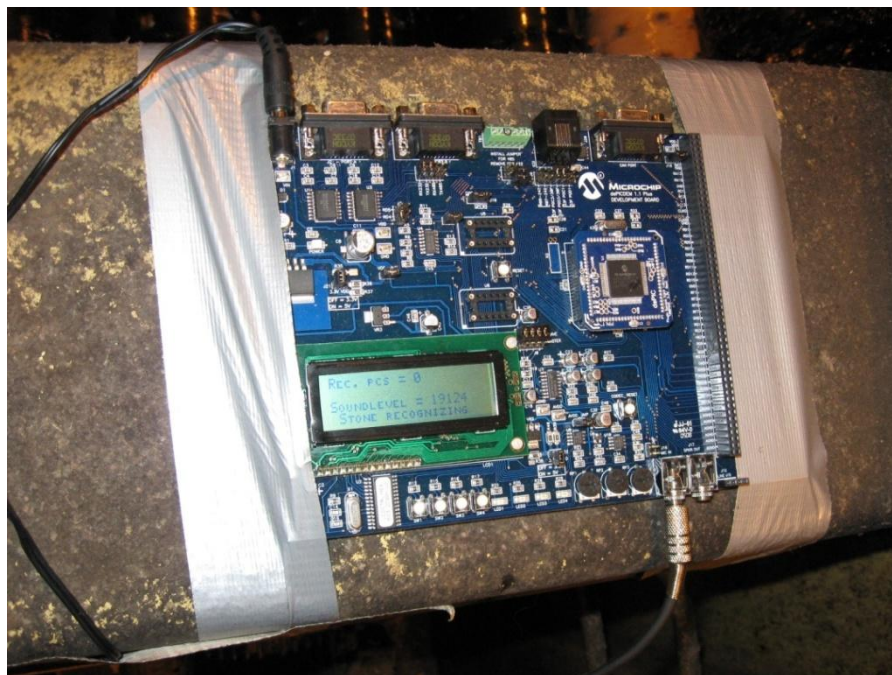
Taulukko 5.2. Testaustulokset.

| Testaustulokset dsp-kortilla | | | | |
|-------------------------------------|----------|--------------------|--------------------------------------|----------------|
| Näytealue | | | | |
| Fs=8000 Hz | | | | |
| Alku | Loppu | lkm | Testikivi / kg | Tunnistus, lkm |
| 676973 | 1704883 | 23 | 7,7 | 23 |
| 2121226 | 3344692 | 23 | 5,6 | 23 |
| 3738459 | 4827127 | 25 | 3,8 | 25 |
| 5250262 | 6340475 | 27 | 2,9 | 27 |
| 6577027 | 7745757 | 29 | 2,1 | 29 |
| 8003358 | 9118964 | 27 | 1,2 | 27 |
| Häiriöäänät | | | | |
| Alku | Loppu | Tunnistus alueella | Häiriöäänänen kuvaus | |
| 0 | 676973 | 0 | Kuurimomelu | |
| 9505868 | 9530258 | 0 | Harjateräs + harjateräs, iskuja | |
| 9689296 | 9855685 | 0 | Kivi + rullaston laita, kolahdus | |
| 12086561 | 12182452 | 0 | Vasara + metalliputki, iskuja | |
| 12187130 | 12292709 | 0 | Vasara + laidan yläosa, iskuja | |
| 12642192 | 12831301 | 0 | Moottorisaha, täydet kierrokset | |
| 12832303 | 12911822 | 0 | Moottorisaha, vaihtelevat kierrokset | |
| 13685629 | 13783525 | 0 | Vasara + laidan keskiosa, iskuja | |
| 13829298 | 14097926 | 0 | Vasara + poikkipalkki, iskuja | |

Kuten taulukosta 5.2 on nähtävissä, algoritmi tunnisti kaikki testikivet myös dsp-kortilla. Häiriöäänien ja kuurimomelun analysoinnissakaan tunnistusta ei aiheutunut. Tulokset ovat odotetusti samanlaisia kuin testitulokset Matlab-ohjelman yhteydessä. Johtuen hieman erityyppisten muuttujien käytöstä, taajuusalueena oli hieman laajempi alue. Myös kynnsarvo oli hieman korkeampi.

Tunnusomaista dsp-kortille on, että analyysiä suoritetaan reaaliaikaisesti. Tällöin näytteitä tuotetaan puskureihin ja samanaikaisesti suoritetaan taajuusanalyysiä. Analyysin valmistuttua täytetään puskurit uusilla arvoilla. Näitä toimenpiteitä ei Matlab-puolella suoritettu, koska näytteitä luetettiin suoraan vektorista. Ennen analyysin alkua, ääninäytteet luettiin tiedostosta vektoriin. Dsp-ympäristön reaalinäytteistyksessä saataan hukata muutama näyte puskureiden täytön ja tyhjennyksen aikana. Ohjelman kiertajasta aiheutuva viive aiheuttaa myös näytteiden meetyksiä. Näytteiden menetykset ovat kuitenkin melko pieniä eikä testien mukaan vaikuta tunnistusta haittaavasti.

Kuvissa 5.19 ja 5.20 on esitetty koejärjestelyt todellisessa prosessiympäristössä, jossa taulukossa 5.2 esiintyvät koesarjat toistettiin. Testikivet ja häiriöäänit sekä testauslukumäärät olivat samoja kuin äänitallenteen testauksessa. Prosessiympäristön äänimateriaali syötettiin mikrofonin avulla suoraan signaaliprosessorikortille. Kivistä ja häiriöäänistä aiheutuneet äänet tuotettiin rullaston yhteydessä kuorinta- ja haketusprosessin aikana ja tunnistuksesta saadut tulokset kerättiin taulukkoon 5.3.



Kuva 5.19. Kiventunnistus käynnissä prosessiympäristössä.



Kuva 5.20. Mikrofonin sijainti kiventunnistuksen yhteydessä.

Taulukko 5.3. Testaustulokset prosessiympäristössä.

| Testaustulokset dsp-kortilla, prosessiympäristö | | |
|--|----------------|--------------------------------------|
| Fs=8000 Hz | | |
| lkm | Testikivi / kg | Tunnistus, lkm |
| 23 | 7,7 | 23 |
| 23 | 5,6 | 23 |
| 25 | 3,8 | 25 |
| 27 | 2,9 | 27 |
| 29 | 2,1 | 29 |
| 27 | 1,2 | 27 |
| Häiriöäänet | | |
| lkm tai aika | Tunnistus, lkm | Häiriöäänien kuvaus |
| 10 min | 0 | Kuorimomelu |
| 15 kpl | 0 | Harjateräs + harjateräs, iskuja |
| 15 kpl | 0 | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 15 kpl | 0 | Vasara + metalliputki, iskuja |
| 15 kpl | 0 | Vasara + laidan yläosa, iskuja |
| 20 s | 0 | Moottorisaha, täydet kierrokset |
| 20 s | 0 | Moottorisaha, vaihtelevat kierrokset |
| 15 kpl | 0 | Vasara + laidan keskiosa, iskuja |
| 15 kpl | 0 | Vasara + poikkipalkki, iskuja |

Taulukossa 5.3 voidaan havaita tunnistustestauksen onnistuneen odotuksien mukaisesti, jolloin kivet tunnistettiin jokaisella testikerralla eivätkä häiriöäänet aiheuttaneet virheellisiä tunnistustapahtumia. Kuvassa 5.20 näkyvän kumiverhon tehtävänä on estää veden roiskuminen pesualueelta ympäristöön. Verho toimii myös ääntä vaimentavana esteenä, jotta verhon takana tapahtuvat kolahdukset eivät kantautuisi mikrofonille saakka. Verhon vaimennusominaisuutta testattiin synnyttämällä rullaston kivenkolahduksia kumiverhon takana. Testauksessa tuli esille, että rullaston kolahdukset saattavat kantautua mikrofonille, jos kolahdus on tarpeeksi voimakas. Tässä tilanteessa tunnistusta ei saisi tulla ennen kivimateriaalin vesierotusta. Testissä kokeiltiin kahdenlaisia mikrofoneja, joista toisessa oli 12 dB:n vaimennus. Vaimennuksella varustettu mikrofoni toimi selvästi paremmin eikä tunnistusjärjestelmä reagoanut verhon takana tapahtuviin kolahduksiin.

Vaimennus voidaan toteuttaa myös lisäämällä säätövastus mikrofonilta tulevaan signaaliin. Tällöin voidaan signaaliprosessorikortilla esittää tulevan signaalin voimakkuus ja säätää tällä tavoin mikrofonin herkkyyttä jotta vältetään turhilta prosessikatkoksilta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1. Yhteenveto

Testaustuloksista voidaan päätellä, että äänen taajuusanalyysiin perustuva tunnistusmenetelmä pystyy tunnistamaan haketuslinjan rullastolla olevan kivimateriaalin. Myös yksittäisten kolahdusten aiheuttamat äänet pystytään rajaamaan tehokkaasti pois minimoiden täten virheellisten tunnistusten osuus ja poistaen näistä aiheutuvat tuotantokatkokset.

Tunnistuksen edellytyksenä on, että kivi osuu rullaston rulliin mahdollistaen täten taajuusanalyysin soveltamisen. Jos kivimateriaali sijaitsee puiden päällä, ei tunnistusta ole mahdollista saada aikaiseksi. Tämä on jossain ruuhkatilanteissa mahdollista, mutta tasaisen puuvirran yhteydessä kivimateriaali putoaa pois puiden päältä ja kulkeutuu normaalitilanteessa puuvirran pohjalla.

Kiven poisto tunnistustapahtuman jälkeen perustuu linjan ajon pysäyttämiseen, jonka yhteydessä kivi poistetaan manuaalisesti. On myös mahdollista suunnitella automaattinen poisto, joka mahdollisesti perustuisi avautuvaan luokkuun rullaston yhteydessä. Tämä tosin saattaa tuoda epävarmuustekijöitä poiston onnistumiseen etenkin suurten kappaleiden yhteydessä. Normaalitilanteessa kivien osuus on kuitenkin melko pieni, jolloin automaattisen poiston toteuttaminen ei ole tarpeen. Tällöin ajon pysäyttäminen ja manuaaliseen kivenpoistoon kuluva aika ei ole merkittävä jos täten pystytään estämään kiven aiheuttamat laitevauriot erityisesti hakun teräkalusteille.

Rullaston rakenne saattaa aiheuttaa tiettyjä erityistoimenpiteitä, kuten silloin jos rullaston yhteydessä käytetään vesitoimista kiviloukkua kivenpoistoon. Tällöin pieni kivi erottuu loukulla, jolloin tunnistusta ei tarvita. Kilahdusääni heti loukun jälkeen vaatii mahdollisesti äänieristeen, jotta tässä tilanteessa ei turhaa pysäytystä aiheudu linjalla. Suuret kivet, jotka eivät mahdu loukun aukkoon putoamaan, tunnistetaan äänitunnistuksen avulla.

6.2. Sovellettavuus

Tunnistusmenetelmää on mahdollista soveltaa myös puuperäisen materiaalikäsitteilyn muihin osa-alueisiin, kuten kuoren- ja hakkeen käsittelyssä tai voimalaitosten yhteydessä olevissa materiaalin käsittelyn linjoissa. Tällöin kyseessä yleensä on pyrkimys estää seulonnan yhteydessä olevan murskauslaitteen vauriot, jotka aiheutuvat laitteisiin joutu-neista kivistä. Murskauslaitteet, joissa ylisuuren jakeen murskaus perustuu leikkaaviin

teriin, ovat melko arkoja kivimateriaalille jolloin niiden kapasiteetti kivien aiheuttamien vaurioiden jälkeen putoaa erittäin nopeasti.

Äänitunnistuksen soveltaminen edellä olevissa tapauksissa edellyttää samanlaisia toimenpiteitä joita suoritettiin haketuslinjan yhteydessä. Tällöin selvittämiseen kuuluu kyseisen prosessialueen äänimaailman mittaukset pyrkien samalla saamaan kiven aiheuttamat äänet mukaan äänitallennusmateriaaliin. Tämän perusteella on mahdollista esiselvittää tutkittavat taajuusalueet, joista tunnistus on suoritettava. Kivimateriaalin poistaminen hakemaisen materiaalin yhteydessä on tapahduttava automaattisesti esimerkiksi hetkellisesti materiaalivirran sivuun siirtävällä ohitusläpällä. Tällöin osa materiaalivirtaa joudutaan poistamaan prosessista, mutta vältetään kuitenkin kivivauriosta johtuvat tuotannon keskeytykset.

6.3. Jatkotoimenpiteet

Menetelmän luotettavuus tulee parhaiten esille pidempiaikaisen testausjakson aikana todellisessa tuotantoympäristössä. Tavoitteena on saattaa järjestelmä koekäyttöön tehdasympäristössä, jossa koekäytön pituus on useita kuukausia. Tällöin saadaan todellinen kuva järjestelmän tehokkuudesta ja luotettavuudesta. Myös virrehälytysten osuus voidaan selvittää ja mahdollisesti suorittaa tarvittavia muutoksia tunnistusalgoritmiin.

LÄHTEET

- [1] Philip Ronan. [WWW]
[Viitattu 22.11.2009]. Saatavissa:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:EM_spectrum.svg
- [2] Sakari Härkönen, Ilkka Lähteenmäki, Taisto Välimaa. Teollisuuden mittaustekniikka. Helsinki 1992. Opetushallitus. 162 s.
- [3] NTB elektronische Geraete GmbH. [WWW]
[Viitattu 14.11.2009]. Saatavissa:
http://www.ntbxray.com/products/digital_linescan_camera_functional_principle.html
- [4] Mikropuu Oy. [WWW]
[Viitattu 14.11.2009]. Saatavissa: <http://www.mikropuu.fi/fi/tukkimittarit.html>
- [5] Heidi Nyberg, Kari Jokela, Sisko Salomaa, Tarja K. Ikäheimonen, Roy Pöllänen, Anne Weltner, Olavi Pukkila, Wendla Paile, Jorma Sandberg, Olli J. Marttila, Jarmo Lehtinen ja Hilikka Karvinen . Sähkömagneettiset kentät. Hämeenlinna 2006. Säteilyturvakeskus. 26 s.
- [6] Hannu Peltonen, Juha Perkkiö ja Kari Vierinen. Insinöörin (AMK) fysiikka. Jyväskylä 2002. Kummerus Kirjapaino Oy. 478 s.
- [7] Fabiana Goia Rosa de Oliveira, Almir Sales. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods[WWW]
[Viitattu 22.11.2009]. Saatavissa:
http://www.ppgciv.ufscar.br/arquivos/File/almir_artigos/almir7.pdf
- [8] Olli Aumala. Teollisuusprosessien mittaukset. Tampere 1996. Tampereen pikakopio Oy. 376 s.
- [9] Clemente Ibarra-Castanedo @ Canada Research Chair in Multipolar Infrared Vision-MIViM[WWW]
[Viitattu 22.11.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_vision
- [10] Bob Mellish[WWW]
[Viitattu 22.11.2009]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>
- [11] Jarmo Toivanen. Teknillinen akustiikka. Espoo 1991. Otapaino. 518 s.

- [12] Oarith[WWW]
[Viitattu 22.11.2009]. Saatavissa:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/FletcherMunson_ELC.svg/350px-FletcherMunson_ELC.svg.png
- [13] Wikipedia. [WWW]
[Viitattu 05.12.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Melu>
- [14] Työsuojeluhallinto. [WWW]
[Viitattu 06.12.2009]. Saatavissa: <http://www.tyosuojelu.fi/fi/melu>
- [15] Wikipedia. [WWW]
[Viitattu 06.12.2009]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>
- [16] Wikipedia. [WWW]
[Viitattu 06.12.2009]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>
- [17] Zohar Z. Karu. Signals and Systems, third printing.
USA 1999. ZiZi Press. 201 s.
- [18] Sen M. Kuon Woon-Seng Gan. Digital Signal Processors.
USA 2005. Pearson Education Inc. 601 s.
- [19] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer with John R. Buck. Discrete-time Signal Processing, second edition. USA 1999. Prentice-Hall Inc. 807 s.
- [20] Wikipedia. [WWW]
[Viitattu 16.05.2010]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>

LIITE 1: TESTAUSDATAN ANNOTOINTI

| Testausdatan annotointi | | | | | |
|-------------------------|---------|-----|-----|----------------|--|
| Näytealue | | | | | |
| Fs=8000 Hz | | | | | |
| Alku | Loppu | nro | lkm | Testikivi / kg | Tapahtuma rullastolla |
| 0 | 676973 | | | | Kuorinta / haketus käynnissä |
| 676973 | 695566 | 1 | 2 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 718961 | 744703 | 2 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 754996 | 785209 | 3 | 12 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 785209 | 799818 | 4 | | 7,7 | Helähdyskaiku + kaksi laitakolahdusta |
| 812102 | 837003 | 5 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 837335 | 870536 | 6 | 5 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 902409 | 932955 | 7 | 5 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 953539 | 997033 | 8 | 9 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1000021 | 1031230 | 9 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 1074060 | 1101617 | 10 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 1114233 | 1149759 | 11 | 9 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1159055 | 1189268 | 12 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 1229109 | 1242390 | 13 | | 7,7 | Kivi osuu laitaan |
| 1277251 | 1303480 | 14 | 9 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1322073 | 1348302 | 15 | 5 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1352950 | 1385487 | 16 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 1400096 | 1423337 | 17 | 6 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1489739 | 1500032 | 18 | | 7,7 | Laitakolahdus |
| 1507336 | 1544521 | 19 | 8 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1565786 | 1595651 | 20 | 12 | 7,7 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 1611256 | 1631176 | 21 | 5 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 1641137 | 1667034 | 22 | 7 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 1671350 | 1704883 | 23 | 14 | 7,7 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 2090017 | 2121226 | 1 | 10 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 2129527 | 2156420 | 2 | 7 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 2158080 | 2189289 | 3 | 13 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 2210870 | 2253699 | 4 | 14 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 2283581 | 2315454 | 5 | 13 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 2365256 | 2412733 | 6 | 18 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 2417050 | 2444607 | 7 | 8 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 2472494 | 2508021 | 8 | 12 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 2511673 | 2547530 | 9 | 12 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 2570439 | 2592020 | 10 | 6 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 2616921 | 2648794 | 11 | 9 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 2676019 | 2709884 | 12 | 10 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 2730137 | 2758358 | 13 | 10 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 2773963 | 2804508 | 14 | 6 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |

| | | | | | |
|---------|---------|----|----|-----|--|
| 2819449 | 2846673 | 15 | 9 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 2862942 | 2891495 | 16 | 14 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 2911748 | 2936649 | 17 | 9 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 2980142 | 3004711 | 18 | 6 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3020316 | 3051193 | 19 | 13 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3057501 | 3084726 | 20 | 9 | 5,6 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 3176030 | 3196614 | 21 | 4 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3205579 | 3238780 | 22 | 8 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 3314479 | 3344692 | 23 | 9 | 5,6 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3738459 | 3766016 | 1 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3770332 | 3801209 | 2 | 11 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 3802537 | 3823786 | 3 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3852339 | 3881556 | 4 | 9 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 3904133 | 3923721 | 5 | 6 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 3933682 | 3961239 | 6 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 3976511 | 4009049 | 7 | 12 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4027641 | 4054202 | 8 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4087404 | 4117285 | 9 | 10 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4125917 | 4163766 | 10 | 9 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4211908 | 4237473 | 11 | 7 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4253742 | 4281631 | 12 | 6 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4281631 | 4288271 | 13 | 6 | 3,8 | Laitakolahdus |
| 4292919 | 4312176 | 14 | 9 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4325456 | 4360318 | 15 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4377582 | 4401819 | 16 | 10 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4420080 | 4451621 | 17 | 11 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4467890 | 4499431 | 18 | 9 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4526988 | 4557533 | 19 | 9 | 3,8 | Kivi rullastolla, ei puita, kivenkolahdus |
| 4567493 | 4592726 | 20 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4606007 | 4632236 | 21 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4644188 | 4676725 | 22 | 9 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 4710591 | 4744788 | 23 | 11 | 3,8 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 4760724 | 4786953 | 24 | 8 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 4799238 | 4827127 | 25 | 6 | 3,8 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 5250262 | 5266633 | 1 | 4 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5269975 | 5295033 | 2 | 3 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 5298374 | 5327099 | 3 | 5 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5338802 | 5366534 | 4 | 9 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5368204 | 5373884 | 5 | 8 | 2,9 | Laitakolahdus |
| 5423333 | 5455408 | 6 | 6 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5476123 | 5508866 | 7 | 11 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 5511539 | 5545952 | 8 | 7 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 5573016 | 5603420 | 9 | 10 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5639838 | 5672582 | 10 | 11 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5685946 | 5729715 | 11 | 8 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5747089 | 5778161 | 12 | 11 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5794533 | 5820594 | 13 | 5 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |

| | | | | | |
|---------|---------|----|----|-----|--|
| 5829281 | 5860353 | 14 | 9 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5867704 | 5913478 | 15 | 11 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 5829281 | 5860353 | 16 | 10 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5916150 | 5952235 | 17 | 8 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 5956244 | 5990324 | 18 | 10 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 5993665 | 6023067 | 19 | 15 | 2,9 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 6031754 | 6080200 | 20 | 13 | 2,9 | Kivi rullastolla, ei puita, laitakolahdus |
| 6089890 | 6144016 | 21 | 8 | 2,9 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 6155042 | 6193465 | 22 | 9 | 2,9 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 6204825 | 6225205 | 23 | 5 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 6224537 | 6230885 | 24 | | 2,9 | Laitakolahdus |
| 6231554 | 6261290 | 25 | 9 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 6263963 | 6291360 | 26 | 5 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 6294033 | 6340475 | 27 | 12 | 2,9 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 6577027 | 6618791 | 1 | 15 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 6623803 | 6662560 | 2 | 16 | 2,1 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 6680937 | 6735063 | 3 | 15 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 6747091 | 6755110 | 4 | | 2,1 | Laitakolahdus |
| 6756112 | 6786182 | 5 | 8 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 6785848 | 6791862 | 6 | | 2,1 | Laitakolahdus |
| 6815584 | 6860356 | 7 | 15 | 2,1 | Kivi rullastolla, ei puita, laitakolahdus |
| 6878064 | 6901786 | 8 | 7 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 6964599 | 6995672 | 9 | 11 | 2,1 | Kivi rullastolla, ei puita, laitakolahdus |
| 6998344 | 7028081 | 10 | 9 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 7033761 | 7049798 | 11 | 4 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7104927 | 7132324 | 12 | 11 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 7134663 | 7160724 | 13 | 9 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7171081 | 7201820 | 14 | 12 | 2,1 | Kivi rullastolla, ei puita, laitakolahdus |
| 7206163 | 7229551 | 15 | 6 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7265301 | 7279668 | 16 | 4 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7279668 | 7284680 | 17 | | 2,1 | Laitakolahdus |
| 7291028 | 7320096 | 18 | 8 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7325442 | 7353507 | 19 | 9 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 7363531 | 7395271 | 20 | 7 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7412646 | 7444720 | 21 | 7 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 7450400 | 7477129 | 22 | 11 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7479802 | 7499515 | 23 | 5 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7542616 | 7567674 | 24 | 10 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7575025 | 7595072 | 25 | 2 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7616789 | 7648196 | 26 | 10 | 2,1 | Kivi rullastolla, ei puita, laitakolahdus |
| 7656548 | 7687621 | 27 | 6 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 7690628 | 7709338 | 28 | 8 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 7716355 | 7745757 | 29 | 5 | 2,1 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8003358 | 8038440 | 1 | 8 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8042784 | 8072520 | 2 | 10 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 8074190 | 8098581 | 3 | 3 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8118294 | 8163065 | 4 | 11 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |

| | | | | | |
|---------------------|----------|----|----|-----|--|
| 8169747 | 8196476 | 5 | 9 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 8197813 | 8250602 | 6 | 12 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 8252273 | 8283012 | 7 | 8 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8285350 | 8320432 | 8 | 10 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8337806 | 8370883 | 9 | 9 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8371886 | 8406300 | 10 | 12 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8371886 | 8406300 | 11 | 13 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8410977 | 8435033 | 12 | 5 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8437372 | 8471786 | 13 | 7 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 8474793 | 8503527 | 14 | 5 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8501188 | 8544623 | 15 | 12 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 8546293 | 8573022 | 16 | 7 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8574024 | 8612448 | 17 | 7 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8632494 | 8674593 | 18 | 12 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 8690630 | 8719364 | 19 | 8 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8722705 | 8760126 | 20 | 15 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8766140 | 8803561 | 21 | 10 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 8805565 | 8834967 | 22 | 10 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 8889094 | 8939545 | 23 | 12 | 1,2 | Kivi rullastolla, ei puita |
| 8940881 | 8968279 | 24 | 5 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 8969615 | 9007036 | 25 | 8 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| 9010043 | 9043454 | 26 | 9 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta, laitakolahdus |
| 9074193 | 9118964 | 27 | 17 | 1,2 | Kivi rullastolla + puuvirta |
| Häiriöäännet | | | | | |
| 9505868 | 9530258 | | | | Harjateräs + harjateräs, iskuja |
| 9689296 | 9695978 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9707672 | 9713686 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9728721 | 9735069 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9737074 | 9744759 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9749771 | 9758123 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9773158 | 9778504 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9788194 | 9796212 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9809911 | 9820937 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9834635 | 9843322 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 9847666 | 9855685 | | | | Kivi + rullaston laita, kolahdus |
| 12086561 | 12182452 | | | | Vasara + metalliputki, iskuja |
| 12187130 | 12292709 | | | | Vasara + laidan yläosa, iskuja |
| 12642192 | 12831301 | | | | Moottorisaha, täydet kierrokset |
| 12832303 | 12911822 | | | | Moottorisaha, vaihtelevat kierrokset |
| 13685629 | 13783525 | | | | Vasara + laidan keskiosa, iskuja |
| 13829298 | 13878079 | | | | Vasara + poikkipalkki, iskuja |
| 13982990 | 14097926 | | | | Vasara + poikkipalkki, iskuja |