

# KAIKUPEDAALIN VAIKUTUKSET PIANON ÄÄNEEN: ANALYYSI JA SYNTEESI

**Heidi-Maria Lehtonen, Henri Penttinen, Jukka Rauhala ja Vesa Välimäki**

Teknillinen korkeakoulu

Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio

PL 3000, 02015 TKK, Espoo

heidi-maria.lehtonen@tkk.fi, www.acoustics.hut.fi/~hml

## 1 JOHDANTO

Nykypäivän piano sai alkunsa 1700-luvulla, kun Bartolomeo Christofori vaihtoi cembalon kieliä näppäävät plektrat vasaroihin [1]. Ensimmäisen pianon varusteisiin ei kuitenkaan kuulunut pedaaleita, vaan ne yleistyivät vasta 1800-luvulla. Tavallisesti pianossa on kaksi tai kolme pedaalia. Oikealla oleva pedaali on aina kaikupedaali, joka on kaikkein yleisimmin käytetty pedaali pianonsoitossa. Se nostaa vaimentimet kielten päältä, jolloin pianoa soittaessa koko kielikerta pääsee värähtelemään vapaasti. Kaikupedaali sitoo äänet toisiinsa, eli se mahdollistaa *legato*-soiton silloinkin, kun se ei ole mahdollista millään sormituksella. Lisäksi kaikupedaali tuo lisää syvyyttä ja väriä pianon ääneen.

Muita pedaaleja ovat vasemmalla oleva *una corda* -pedaali sekä mahdollinen keskimäinen pedaali, jonka tarkoitus vaihtelee soittimesta riippuen. Pystypianossa se on ns. harjoituspedaali, joka laskee huovan vasaroiden ja kielten väliin ja vaimentaa siten soittimen ääntä. Flyygelissä keskimäinen pedaali on yleensä bassokaikupedaali, joka toimii muuten samalla tavalla kuin tavallinen kaikupedaali, mutta se nostaa vaimentimet kielten päältä vain soittimen bassopäässä.

Tässä artikkelissa esittelemme tekemäämme tutkimusta flyygelin kaikupedaaliin liittyen. Vaikka tarkastelun alla on flyygele, tulokset ovat yleistettävissä myös pystypianoon. Ensin tutkimme kaikupedaalin vaikutusta flyygelin ääneen analysoimalla äänitetyjä ääniä, minkä jälkeen esittelemme synteesimenetelmän, jolla kaikupedaalin tärkeimmät piirteet voidaan mallintaa. Laajempi katsaus aiheeseen löytyy viitteestä [2].

## 2 ÄÄNITYKSET JA SIGNAALIANALYYSI

Äänitykset tehtiin Finnvox-studiolla Helsingissä helmikuussa 2006. Äänitetty soitin oli Yamahan konserttilyygele, ja se oli viritetty juuri ennen äänityssessiota. Signaalianalyysia varten kerättiin tietokanta, joka koostui yksittäisistä pianon äänistä ilman pedaalia ja pedaalin kanssa. Äänitykset tehtiin kahdella kanavalla, mutta lopulta vain oikeaa kanavaa käytettiin analyysivaiheessa, sillä sen signaali-kohinasuhde osoittautui hieman paremmaksi. Kaikki signaalit äänitettiin 44.1 kHz näytetaajuudella ja 16 bitillä.

Soittovoimakkuus (*mezzo forte*) pidettiin vakiona painamalla kosketin alas n. 0.5 kg painoisen pienen kolikkopinon avulla. Diskanttipäässä tämä menetelmä korvattiin taval-

lisella soittotyylillä, sillä kolikkopino aiheutti ylimääräisen äänen koskettimen painuessa pohjaan. Tällöinkin soittovoimakkuus pyrittiin pitämään mahdollisimman vakiona.

Signaalianalyysi jaettiin kahteen osaan. Ensimmäinen vaihe koostui yksittäisten osäänesten erottelusta sekä niiden amplitudiverhokäyrien tutkimisesta kahdessa tapauksessa: ilman pedaalia sekä pedaalin kanssa. Tutkimuksen kohteena olivat myös harmonisten lähtöamplitudit sekä vaimenemisajat. Analyysin toisessa vaiheessa tutkittiin jäännösignaaleja, jotka saatiin alkuperäisistä äänistä suodattamalla kaikki osäännekset pois. Tämän jälkeen jäännösignaalien energiat laskettiin kriittisillä kaistoilla kummasakin tapauksessa: kaikupedaalilla ja ilman kaikupedaalia.

## 2.1 Osäänesten piirteiden analyysi

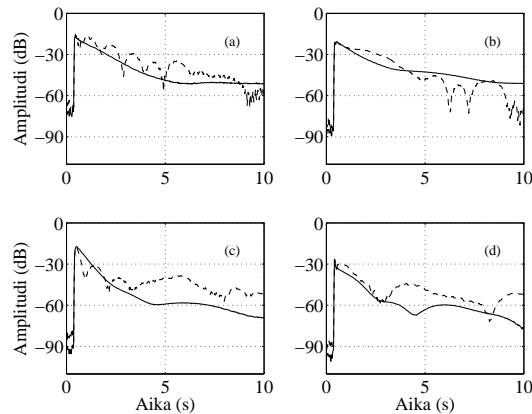
Tässä kappaleessa näytämme osäänesten analyysin tulokset viidelle äänelle: C2, C3, C4, D5 ja C6. Aluksi tutkittavien äänten perustaajuudet ( $f_0$ ) ja epäharmonisuuskertoimet ( $B$ ) laskettiin, jotta yksittäisten osäänesten erottelu onnistuisi. Näiden parametrien estimointiin on olemassa useita menetelmiä [3, 4]. Tässä työssä parametrit estimointiin etsimällä valkaistun spektrin huiput ja sovittamalla sopiva ( $f_0, B$ ) pari dataan. Parametrit on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1: *Analysoitavien äänten perustaajuudet ja epäharmonisuuskertoimet.*

Ääni	Perustaajuus $f_0$ (Hz)	Epäharmonisuuskertoimen $B$
C2	65.6	0.000038
C3	131.2	0.00011
C4	262.7	0.00033
D5	589.1	0.0012
C6	1052.8	0.0023

Osäännekset erotettiin signaaleista suodattamalla, ja niiden lähtötasoja, amplitudiverhokäyriä ja huojuntaa tutkittiin. Kuvassa 1 on esitetty äänen C3 neljän ensimmäisen osäänneksen amplitudiverhokäyrät. Kuvassa yhtenäinen viiva ja katkoviiva vastaavat tapauksia, jossa ääni on soitettu ilman kaikupedaalia ja sen kanssa. Kuvissa näkyvät tasoerot pohjakohinassa johtuvat kontaktiäänestä, joka syntyy kun vaimentimet nousevat kielen päältä pedaalia painettaessa alas. Kuvasta nähdään, että amplitudiverhokäyrät muuttuvat pedaalia käytettäessä; pianon äänelle tyypillinen kaksivaiheinen vaimeneminen [5] ei ole enää yhtä selvää, ja lisäksi huojunta näyttää lisääntyneen. Samanlainen käyttäytyminen osäänesten amplitudiverhokäyrissä on huomattavissa myös muilla koskettimilla [2]. Kaikupedaalin käytön ei huomattu vaikuttavan merkittävästi osäänesten lähtötasoihin; kaikki muutokset olivat 1 dB:n sisällä.

Äänten  $T_{60}$ -ajat (aika, jona ääni vaimenee 60 dB) laskettiin sovittamalla suora pienimmän neliösumman mielessä äänten amplitudiverhokäyriin log-asteikolla [6] ensimmäisten 6 sekunnin ajalle. Estimaatit  $T_{60}$ -ajoille laskettiin suorien kulmakertoimista. Tulokset esimerkkiäänille on listattu Taulukossa 2. Taulukosta nähdään, että vaimenemisajat pitenevät kaikupedaalia käytettäessä keskialueella (äänet C3, C4 ja D5). Basso- ja diskanttialueella vaimenemisajat ovat suunnilleen samat molemmissa tapauksissa.



Kuva 1: Äänen C3 (a) ensimmäisen, (b) toisen, (c) kolmannen ja (d) neljännen osa-äänneksen amplitudiverhokäyrät. Yhtenäinen viiva vastaa tapauksia, joissa ääni on soitettu ilman kaikupedaalia ja katkoviiva kuvaa tapauksia, joissa ääni on soitettu kaikupedaalin kanssa.

Taulukko 2: Esimerkkiäänten estimoidut  $T_{60}$ -ajat (sekunneissa).

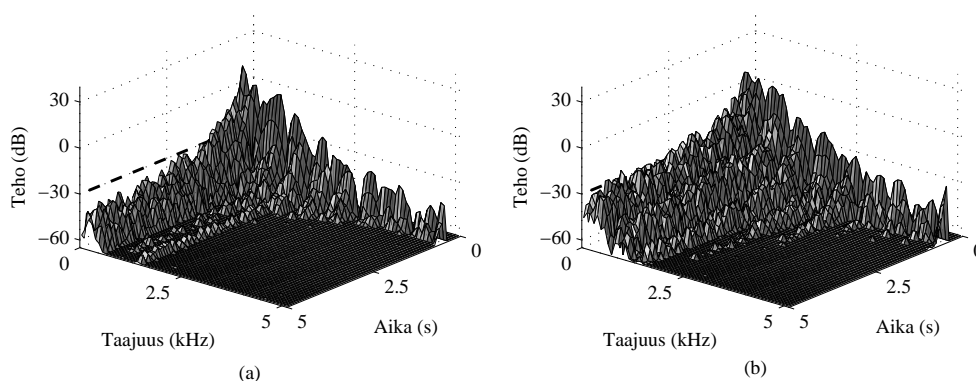
Ääni	$T_{60}$ -aika ilman pedaalia	$T_{60}$ -aika pedaalin kanssa
C2	20.3	18.1
C3	12.5	14.8
C4	9.5	15.3
D5	14.7	18.3
C6	12.0	12.0

## 2.2 Kielikerran ja kaikupohjan vasteen analyysi

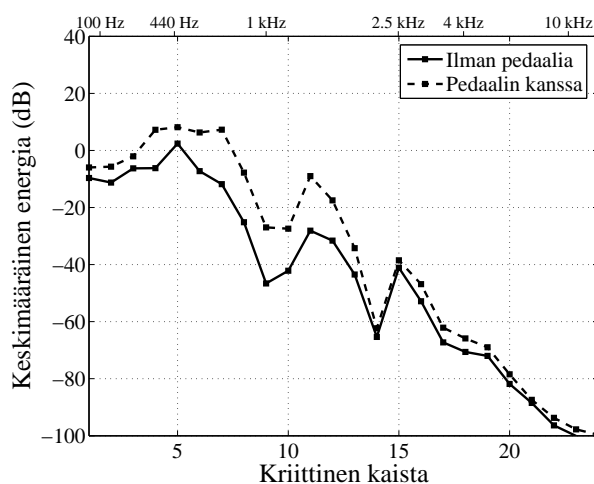
Kielikerran ja kaikupohjan heräämistä kaikupedaalilla soittaessa tutkittiin poistamalla äänitetyistä äänistä osaaäänokset suodattamalla. Kuvassa 2 on esitetty D5-äänen aika-taajuuskuvat kun ääni on soitettu (a) ilman kaikupedaalia ja (b) kaikupedaalin kanssa. Taajuusanalyysi on tehty 2048-pisteisellä FFT:llä käyttämällä 512-pisteistä Hanning-ikkunaa 256 näytteen välein. Kuvan 2 molemmissa alakuvissa oleva katkoviiva esittää sen tehon (-30 dB), jonka kaikupedaalin kanssa soitettu ääni saavuttaa 5 sekunnin päästä äänen syttymisestä. Tämän avulla nähdään, että kun kaikupedaalia ei käytetä, signaalin teho on 5 sekunnin kuluttua n. 10 dB matalampi kuin silloin, jos kaikupedaalia käytetään. Samanlainen trendi on huomattavissa myös tarkasteltaessa muita ääniä [2].

Kielikerran vasteiden energiat mitattiin kriittisillä kaistoilla molemmissa tapauksissa, jotta saataisiin tietoa siitä, millä taajuusalueella energia ensisijaisesti lisääntyy. Kriittiset kaistat valittiin, koska näin lasketut arvot tarjoavat kuulon kannalta tärkeää informaatiota [7]. Energiat laskettiin 1 sekunnin mittaisesta näytteestä 110 ms alukseen jälkeen.

Kuva 3 esittää analyysin tulokset äänelle C6. Yhtenäinen viiva esittää tapausta, jossa kaikupedaalia ei käytetty ja katkoviiva puolestaan vastaa tapausta, jossa ääni soitettiin kaikupedaalin kanssa. Kuvasta 3 nähdään, että kaikupedaalia käytettäessä kielikerran vasteen energia on n. 5-20 dB suurempi kuin silloin, kun kaikupedaalia ei käytetä.



Kuva 2: Äänen D5 kielikertavasteiden aika-taajuuskuvaajat kun ääni on soitettu (a) ilman pedaalia ja (b) pedaalin kanssa. Katkoviiva osoittaa sen tason, jonka vaste saavuttaa kun kaikupedaalilla soitettu ääni on vaimentunut 5 sekuntia.



Kuva 3: Äänen C6 residuaalisignaalin energia, kun ääni on soitettu ilman kaikupedaalia (yhtenäinen viiva) ja kaikupedaalin kanssa (katkoviiva).

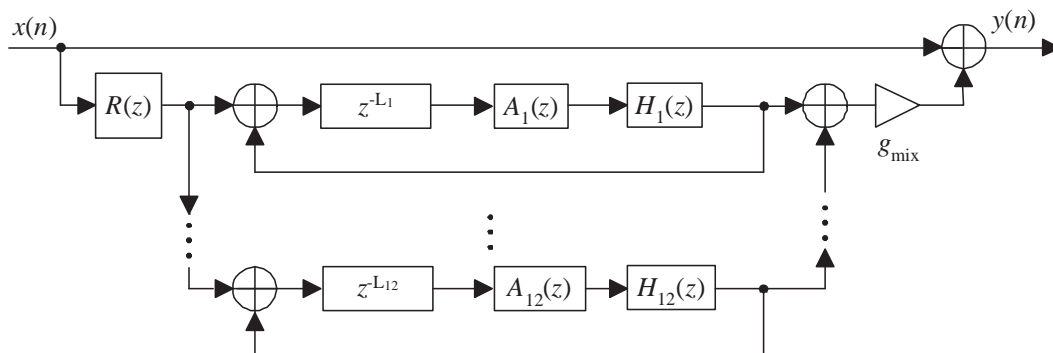
### 3 KAIKUPEDAALIN SYNTEESI

Tässä työssä kaikupedaali mallinnetaan kaikualgoritmeilla [8]. Kaikualgoritmeja on aikaisemmin käytetty mm. soittimien kaikukopan mallintamiseen [9, 10]. Kaikualgoritmin käyttöä on ehdotettu myös kaikupedaalin mallintamiseen [11], mutta varsinaista toteutusta ei ole esitetty. Kaikupedaalin mallintaminen pohjautuu ideaan, jossa pitkät viivelinjat simuloivat pianon alimpia kieliä [12]. Kun malli koostuu alimman oktaavin yhteensä 12 kielestä, niiden yläsävelten voidaan ajatella approksimoivan ylempiä pianon kieliä [2]. Kuva 4 esittää algoritmin lohkokaavion.

Jokaisen viivelinjan kanssa samaan takaisinkytkentäsilmuksaan on sijoitettu kaksi suodinta, joista toinen mallintaa taajuusriippuvaa vaimenemista ja toinen dispersiota, joskin dispersiosuotimen merkitys kaikualgoritmissa on ”hajottaa” spektrin rakennetta enemmän kuin mallintaa dispersiota. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että viivelinjassa syn-

tyvä täsmälleen harmoninen spektri muuttuu epätasaisemmaksi ja vastaa siten enemmän käytännön tilannetta.

Kuvassa 4 suotimet  $A_k(z)$ ,  $k = 1, \dots, 12$  ovat dispersiosuotimia ja suotimet  $H_k(z)$  ovat häviösuotimia.  $R(z)$  on resonaattorisuodin, joka suunnitellaan residuaalisignaalien energiaeron perusteella, ja  $g_{\text{mix}}$  on miksauskerroin, joka määrittää kaiutetun äänen suhteen suoraan ääneen. Suotimien  $A_k(z)$  ja  $H_k(z)$  parametrit lasketaan analyysistä saatavan datan perusteella: dispersiosuotimet ovat toisen asteen IIR-suotimia, jotka suunnitellaan mitatun  $B$ -kertoimen pohjalta [13], ja häviösuodin on ensimmäisen asteen IIR-suodin, joka sovitetaan harmonisten vaimenemisaikoihin perustuvaan dataan [6]. Tarkempi kuvaus parametrien suunnittelusta on esitetty viitteessä [2].



Kuva 4: Kaikupedaalin synteisiin käytettävän algoritmin lohkokaaavio.

## 4 YHTEENVETO

Tässä työssä on esitetty katsaus pianon kaikupedaalin analyysiin ja synteisiin. Signaalianalyysi suoritettiin äänitetyille äänille, jotka soitettiin kaikupedaalilla ja ilman kaikupedaalia. Analyysissä todettiin, että kaikupedaalin käyttö kasvattaa äänen vaimenemisaikoja keskialueella, mutta basso- ja diskanttiosuonissa tätä ilmiötä ei havaittu. Huojunta lisääntyi amplitudiverhokäyrissä eikä kaksivaiheista vaimenemista ole selkeästi havaittavissa, kun ääni soitetaan kaikupedaalin kanssa. Kielikerran vasteita tutkittiin poistamalla osäänekset signaaleista ja havaittiin, että jäännössiinaalin energia on suurempi niissä tapauksissa, joissa kaikupedaalia käytettiin. Kaikupedaalin synteisiä varten suunniteltiin kaikualgoritmi, joka perustuu pianon kielikerran mallintamiseen 12 kieli-mallilla, jotka vastaavat pianon 12 alinta kieltä. Esimerkkejä tuloksista on kuunneltavissa osoitteessa <http://www.acoustics.hut.fi/publications/papers/jasa-piano-pedal/>.

## 5 KIITOKSET

Heidi-Maria Lehtosen väitöskirjatyötä rahoittavat GETA-tutkijakoulu sekä Suomen Kulttuurirahasto. Jukka Rauhalan väitöskirjatyötä rahoittaa Nokia Oyj:n säätiö. Kirjoittajat haluavat kiittää Risto Hemmiä ja Finnvox-studiota mahdollisuudesta suorittaa äänitykset.

## VIITTEET

- [1] FLETCHER N H & ROSSING T D, *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, New York, 1991.
- [2] LEHTONEN H M, PENTTINEN H, RAUHALA J, & VÄLIMÄKI V, Analysis and modeling of the piano sustain-pedal effects, *J. Acoust. Soc. Am.*, **122**(2007).
- [3] GALEMBO A & ASKENFELT A, Signal representation and estimation of spectral parameters by inharmonic comb filters with application to the piano, *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, **7**(1999) 2, 197–203.
- [4] RAUHALA J, LEHTONEN H M, & VÄLIMÄKI V, Fast automatic inharmonicity estimation algorithm, *J. Acous. Soc. Am. Express Letters*, **121**(2007) 5, EL184–EL189.
- [5] WEINREICH G, Coupled piano strings, *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**(1977) 6, 1474–1484.
- [6] VÄLIMÄKI V, HUOPANIEMI J, KARJALAINEN M, & JÁNOSY Z, Physical modeling of plucked string instruments with application to real-time sound synthesis, *J. Audio Eng. Soc.*, **44**(1996), 331–353.
- [7] ZWICKER E & FELDTKELLER R, *The Ear as a Communication Receiver*, The Acoustical Society of America, Woodbury, NY, 1999.
- [8] GARDNER W G, Reverberation algorithms, in M Kahrs & K Brandenburg, editors, *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*, pages 85–131, Kluwer Academic, Boston, Mass, USA, 1998.
- [9] PENTTINEN H, KARJALAINEN M, PAATERO T, & JÄRVELÄINEN H, New techniques to model reverberant instrument body responses, in *Proc. Int. Computer Music Conf.*, pages 182–185, Havana, Cuba, Sept. 6-9 2001.
- [10] VÄLIMÄKI V, PENTTINEN H, KNIF J, LAURSON M, & ERKUT C, Sound synthesis of the harpsichord using a computationally efficient physical model, *EURASIP J. Applied Signal Process.*, **7**(2004), 934–948.
- [11] BANK B, AVANZINI F, BORIN G, DE POLI G, FONTANA F, & ROCCHESO D, Physically informed signal processing methods for piano sound synthesis: A research overview, *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, **10**(2003), 941–952.
- [12] DE POLI G, CAMPETELLA F, & BORIN G, Pedal resonance effect simulation device for digital pianos, U. S. Patent No. 5,744,743, April 1998.
- [13] RAUHALA J & VÄLIMÄKI V, Tunable dispersion filter design for piano synthesis, *IEEE Signal Process. Lett.*, **13**(2006) 5, 253–256.