



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**SUBWOOFER SUUNNITTELU -
MALLINNUS JA VASTEEN ANALYSOINTI ERITYISESTI
IMPULSSIVASTEEN KANNALTA**

**(Designing a subwoofer - modeling and analyzing the response
especially taking into account the impulse response)**

Aleksi Mattsson

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Alexi Mattsson

Subwoofer suunnittelu – mallinnus ja vasteen analysointi erityisesti impulssivasteen kannalta

Kandidaatintyö

2011

29 sivua, 18 kuvaa, 7 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastaja: Mikko Kuisma

Hakusanat: Subwoofer, kaiutin

Tämä kandidaatintyö käsittelee subwoofer-kaiuttimen mallinnusta ja analysointia impulssivasteen perusteella. Refleksikoteloidulle kaiuttimelle muodostetaan siirtofunktio ja sen avulla simuloidaan kaiuttimen impulssivasteen käyttäytymistä erilaisilla kotelon virityksillä. Simuloinnit toteutetaan kolmella erilaisella kaiutinelementillä käyttäen kullekin viittä erityyppistä viritystä. Simulointien toimivuutta käytännössä yritetään todistaa mittauksilla, joissa simulointien pohjalta toteutetaan viisi viritystä rakentamalla refleksikotelo Seas P11RCY-kaiutinelementille ja mittaamalla kunkin virituksen tuottama askelvaste. Tämän jälkeen mitatuista askelvasteista määritetään impulssivasteet laskennallisesti ja verrataan niitä toisiinsa sekä simulointien tuloksiin yrittäen löytää mahdollinen korrelaatio simulointien ja mittausten välille. Määritetään myös mikä käytetyistä viidestä virityksestä tuottaa parhaimman vasteen kullekin kolmelle kaiutinelementille.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Program of Electrical engineering

Aleksi Mattsson

Designing a subwoofer – modeling and analyzing the response especially taking into account the impulse response

Bachelor's thesis

2011

29 pages, 18 figures, 7 tables and 7 appendices

Examiner: Mikko Kuisma

Keywords: Subwoofer, speaker

This thesis concentrates on the modeling of a subwoofer and analyzing its performance based on its impulse response. We form a transfer function for a vented-box loudspeaker and simulate its impulse response using three different loudspeaker drivers and five different tunings for the enclosure. To prove the simulated responses work in practice, we build a vented enclosure for a Seas P11RCY driver and measure its step response for five different tunings for the enclosure. We then calculate the impulse response of each tuning and compare them to each other and to the simulated responses and try to find a correlation between the measurements and simulations. We also determine which of the five tunings yields the best response for each of the three drivers.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| 1. Johdanto | 4 |
| 2. Dynaaminen kaiutin | 5 |
| 3. Refleksikotelo | 6 |
| 3.1 Refleksikotelon historiaa..... | 6 |
| 3.2 Refleksikotelon rakenne ja toiminta | 6 |
| 3.3 Refleksiputki | 7 |
| 3.4 Siirtofunktio | 8 |
| 4. Mitoitus | 10 |
| 4.1 Mitoitus siirtofunktion perusteella..... | 10 |
| 4.2 Mitoitus taulukoiden avulla | 11 |
| 4.3 WinISD | 12 |
| 5. Viritysten simulointi | 12 |
| 5.1 Seas P25REX | 13 |
| 5.2 Maelstrom-X | 16 |
| 5.3 Seas P11RCY | 18 |
| 6. Mittaukset..... | 20 |
| 6.1 Mittauslaitteisto..... | 20 |
| 6.2 Tila | 20 |
| 6.3 Kotelo..... | 21 |
| 6.4 Viritysten vertailu | 22 |
| 6.5 Vaimennusaineen lisäämisen vaikutus..... | 25 |
| 6.6 Refleksiputken koon muuttaminen säilyttämällä haluttu viritystaajuus | 27 |
| 7. Yhteenveto | 29 |

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|------------|---|
| A | poikkipinta-ala |
| C_{ms} | kaiutinelementin ripustuksen komplianssi |
| d | halkaisija |
| f | taajuus |
| f_3 | -3dB rajataajuus |
| f_b | viritystaajuus |
| f_d, f_s | resonanssitaajuus |
| h | virityssuhde |
| l | pituus |
| M_{ms} | kaiutinelementin liikkuvien osien massa |
| q | tilavuusnopeus |
| Q_a | absorption hyvyysluku |
| Q_b | häviöiden hyvyysluku |
| Q_{es} | sähköinen hyvyysluku |
| Q_l | vuotojen hyvyysluku |
| Q_{ms} | mekaaninen hyvyysluku |
| Q_p | aukkojen hyvyysluku |
| Q_{ts} | kokonaishyvyysluku |
| R_{ms} | kaiutinelementin ripustuksen mekaaninen resistanssi |
| S_d | kaiutinelementin efektiivinen pinta-ala |
| T_b | kotelon resonanssiaikavakio |
| T_d | kaiutinelementin resonanssiaikavakio |
| T_0 | refleksikoteloidun kaiuttimen resonanssiaikavakio |
| v | äänen nopeus |
| V | tilavuus |
| V_{as} | ekvivalenttitilavuus |
| V_b | kotelon tilavuus |
| V_d | maksimaalinen kartion syrjäyttämä tilavuus |
| x | korjauskerroin |
| X_{max} | maksimaalinen lineaarinen kartion liikepoikkeama |
| X_{mech} | maksimaalinen mekaaninen kartion liikepoikkeama |
| Z_b | kotelon akustinen impedanssi |

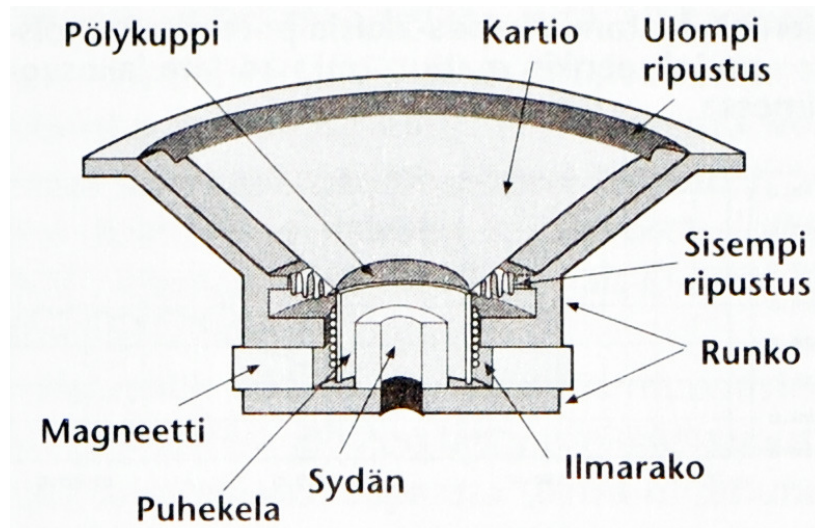
| | |
|------------|---|
| α | komplianssisuhde |
| λ | aallonpituus |
| ω_b | kotelon resonanssikulmataajuus |
| ω_d | kaiutinelementin resonanssikulmataajuus |
| BB_4 | neljännen asteen boom box |
| C_4 | neljännen asteen Chebyshev |
| EBS_3 | extended bass shelf -3db |
| EBS_6 | extended bass shelf -6db |
| LPK | liian pieni kotelo |
| LSK | liian suuri kotelo |
| QB_3 | quasi third order butterworth |
| SBB_4 | neljännen asteen super boom box |
| SC_4 | neljännen asteen sub-Chebyshev |

1. Johdanto

Kaiutinelementtiä tai kaiutinta, joka toistaa matalia taajuuksia, kutsutaan subwooferiksi. Kaiutinelementin rakenteen ja toimintaperiaatteen vuoksi voidaan se luokitella myös lineaarimoottoriksi. Työssä tarkastellaan järjestelmää, jossa kaiutin on sijoitettu aukolliseen koteloon. Tällaista järjestelmää kutsutaan refleksiviritteiseksi kaiuttimeksi ja aukon sisältävää koteloa refleksikoteloksi. Aukon sekä kotelon dimensioita muuttamalla, saadaan järjestelmä tuottamaan erilaisia vasteita. Koteloidulle kaiuttimelle voidaan muodostaa sijaiskytkentä ja sen avulla siirtofunktio, jonka jälkeen kaiutinta voidaan tarkastella kuten mitä tahansa muutakin dynaamista järjestelmää, esimerkiksi askel- tai impulssiherätteen avulla. Kaiuttimen transienttitoistoon liittyy keskeisesti impulssivaste, eli miten järjestelmä reagoi siihen syötettävään impulssiherätteeseen. Kolmelle erilaiselle kaiutinelementille suunnitellaan viisi erilaista viritystä kullekin ja vertaillaan näiden viritysten tuottamia impulssivasteita simuloimalla. Mittausosuudessa yritetään todentaa simulointimallin toimivuus käytännössä. Mittauksia varten rakennetaan kotelo yhdelle simuloinneissa käytetylle kaiutinelementille ja toteutetaan sillä simulointiosan viisi erilaista viritystä. Mittaukset suoritetaan askelherätteellä, josta saadun askelvasteen perusteella voidaan impulssivaste määrittää laskennallisesti.

2. Dynaaminen kaiutin

Jotta kaiutinsuunnittelun periaatteet olisivat helpommin ymmärrettävissä, aloitetaan ensin tutkimalla kaiuttimen toimintaperiaatetta. Yleisin kaiutinelementin tyyppi on dynaaminen. Se koostuu rungosta, puhekelausta, kestmagneetista, kartiosta ja ripustuksesta. Kuvassa 1. on esitetty dynaamisen kaiutinelementin rakenne.



Kuva 1. Dynaamisen kaiutinelementin rakenne (Tuomela, 1998)

Rungon tehtävänä on tarjota tukeva alusta muille kaiutinelementin osille. Kartion liikkeen aikaansaamiseksi puhekelan avulla, tarvitaan jokin kiinteä magneettikenttä. Tämä kiinteä magneettikenttä toteutetaan yleensä kestmagneetilla, mutta kenttä voidaan toteuttaa myös sähkömagneetilla. Sähkömagneetin tapauksessa kaiutinelementin parametrejä voidaan muuttaa magnetointia muuttamalla. Tällaista toteutusta kutsutaan field-coil -kaiuttimeksi. Puhekela on ohuesta langasta tehty käämi ja se on liitetty kartion alaosaan. Puhekelan suojana on myös yleensä pölykuppi, joka sijaitsee kartion keskellä. Puhekelaan johdettu muuttuva sähkövirta saa aikaan muuttuvan magneettikentän, joka yhdessä kestmagneetin kentän kanssa saa kartion värähtelemään ja syntyy ääniaaltoja, jotka ovat samalla taajuudella kuin puhekelaan syötetty sähkövirta. Kartio on liitetty runkoon ripustuksen avulla. Ripustus koostuu yleensä kahdesta osasta, jotka ovat ulompi ja sisempi ripustus. Ulompi ripustus sijaitsee aivan kartion reunalla ja kiinnittää sen runkoon. Sisempi ripustus sijaitsee kartion alaosassa ja kiinnittää myös kartion runkoon. Alemman ripustuksen tehtävä on keskittää puhekela magneetin sisään, ettei puhekela pääse ottamaan magneettiin kiinni, sekä rajoittaa kartion liikettä. Ulompi ripustus on ilmatiivis, joten kiinnitettäessä kaiutin koteloon, ei kotelon sisäinen paine pääse karkaamaan kaiutinelementin läpi. Kaiuttimen rakenteesta ja

toimintaperiaatteesta johtuen sen voidaan ajatella olevan lineaarinen sähkömoottori. (Tuomela 1998)

3. Refleksikotelo

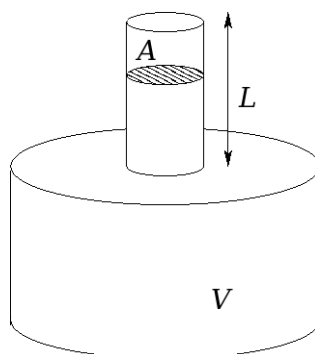
Kappaleessa tarkastellaan refleksikotelon toimintaperiaatetta ja rakennetta. Lisäksi esitetään siirtofunktio ja muita apufunktioita joiden avulla refleksikoiteloidun kaiuttimen toimintaa voidaan simuloida.

3.1 Refleksikotelon historiaa

Ensimmäisissä refleksikoteloissa vaikutusta elementin liikkeeseen ei tunnettu. Resonanssin ajateltiin kääntävän elementin taaksepäin säteilemän äänen vaihe pienillä taajuuksilla. Varsinaisen bassorefleksiperiaatteen esitti Bellin laboratorioissa työskennellyt Albert Thuras. Refleksikoteloiden ongelmana oli pitkään niiden vaikea mitoittaminen. Vaikka sijaiskytkentä tiedettiin, ei sen perusteella saatu määriteltyä edes kohtuullisen optimaalisia mitoitusperiaatteita eikä tarvittavia kaiutinelementin ominaisuuksia. Vasta 1970-luvun alussa J. E. Benson, A. Neville Thiele ja Richard H. Small esittivät systemaattisia menetelmiä, joilla refleksikotelon toimintaa voitiin ennustaa. He myös esittivät ylipäästösuodinten mitoitukseen käytettyjen menetelmien hyödyntämisen kaiuttimen parametrien määrittämiseksi. (Backman 2008)

3.2 Refleksikotelon rakenne ja toiminta

Refleksikotelo perustuu Helmholtz-resonaattoriin, joka koostuu tilavuudesta V ja siihen liitetystä aukosta tai putkesta, jonka pituus on l ja poikkipinta-ala A . Kuvassa 2 on esitetty Helmholtz-resonaattorin rakenne.



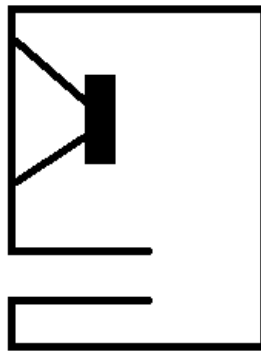
Kuva 2. Helmholtz-resonaattori (Wikimedia 2009)

Rakenteen resonanssitaajuus määritetään yhtälöllä

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}}, \quad (1)$$

jossa v on äänen nopeus ilmassa.

Refleksikotelossa kaiuttimelementti on asennettu muutoin tiiviiseen koteloon, jossa aukko tai resonanssitaajuuden allonpituutta huomattavasti lyhyempi putki muodostaa yksinkertaisen massajousiresonaattorin kotelon tilavuuden kanssa. Kuvassa 3 on esitetty refleksikotelon rakenne.



Kuva 3. Refleksikotelon rakenne poikkileikkauksena esitettynä, jossa näkyy refleksiputki ja kaiuttimelementti

Resonanssitaajuudella elementin säteily ja resonaattorin säteilemä ääni ovat samassa vaiheessa, jolloin ne vahvistavat toisiaan. Refleksikotelolla saadaan samalle kaiuttimelementille mitoitettuun suljettuun koteloon verrattuna suurempi äänenpaine resonanssin tuntumassa. Resonanssi kasvattaa samalla elementin kokemaa akustista kuormaa, jolloin elementin liikepoikkeama on pienempi resonanssitaajuudella. (Backman 2008)

3.3 Refleksiputki

Refleksiputken mitoitukseen tulisi kiinnittää erityisesti huomiota. Huonosti valituilla dimensioilla saatetaan saada aikaan ei-toivottuja resonansseja tai muita sivuääniä. Putken halkaisijan tulee olla riittävän suuri, jotta tarvittava ilmamassa kulkee putkesta vaivatta läpi eikä ilmamassan liikkeestä aiheudu ylimääräisiä ääniä. Refleksiputki voidaan toteuttaa monella tavalla. Se voi olla putki tai vain väliseinällä erotettu osa kotelosta. Putken muodolla ei niinkään ole väliä virityksen kannalta, vain sen dimensiot määrittävät kotelon tilavuuden V kanssa järjestelmän viritystaajuuden f_b . On myös syytä huomioda putken pituudesta syntyvä $\lambda/2$ resonanssi, joka ei saisi osua kaiuttimella toistettavalle alueelle tai sen lähistölle. Tästä syystä putkea ei saisi tehdä liian pitkäksi. Ylimääräistä

ilmamassan liikkeestä johtuvaa virtausääntä voidaan pienentää käyttämällä putkea, jonka päät on muotoiltu torvimaisesti. Putken pituutta laskettaessa on myös syytä ottaa huomioon putken kiinnityksestä ja päiden muodosta aiheutuva vaikutus putken efektiiviseen pituuteen. Putken fyysinen ja efektiivinen pituus ovat siis erilaiset.

3.4 Siirtofunktio

Jotta refleksikotelon käyttäytymistä voitaisiin tarkastella simuloimalla, on sille ensin määriteltävä siirtofunktio. Siirtofunktio saadaan määritettyä kaiuttimen sijaiskytkennän avulla. Toivanen (1976) ja Backman (2008) ovat esittäneet sijaiskytkennän johtamisen, jossa kaiutin voidaan ajatella sähköisenä muuntimena, joka muuntaa sen napoihin kytketyn jännitteen ja virran paineeksi ja tilavuusnopeudeksi. Kaiuttimen akustisesta sijaiskytkennästä voidaan laskea tilavuusnopeus q , jonka tunteminen määrää täysin systeemin ominaisuudet (Toivanen, 1976). Backman (2008) on esittänyt myös siirtofunktion johtamisen, jossa siirtofunktio saadaan muotoon

$$G(s) = \frac{s^4 T_0^4}{s^4 T_0^4 + a_1 s^3 T_0^3 + a_2 s^2 T_0^2 + a_3 s T_0 + 1}, \quad (2)$$

missä T_0 on resonanssiaikavakio sekä a_1 , a_2 ja a_3 siirtofunktion kertoimet. Resonanssiaikavakio on

$$T_0 = \sqrt{T_b T_d} = \frac{T_d}{\sqrt{h}}, \quad (3)$$

missä T_b on kotelon resonanssiaikavakio, T_d on kaiutinelementin resonanssiaikavakio ja h on v erityssuhde. Kotelon resonanssiaikavakio

$$T_b = \frac{1}{\omega_b}, \quad (4)$$

missä ω_b on kotelon resonanssikulmataajuus. Kaiutinelementin resonanssiaikavakio

$$T_d = \frac{1}{\omega_d}, \quad (5)$$

missä ω_d on kaiutinelementin resonanssikulmataajuus. V erityssuhde määritellään

$$h = \frac{f_b}{f_d} = \frac{T_d}{T_b}, \quad (6)$$

missä f_b on kotelon resonanssitaajuus ja f_d on kaiutinelementin resonanssitaajuus. Siirtofunktion kertoimet ovat

$$a_1 = \frac{Q_b + hQ_{ts}}{\sqrt{h}Q_b Q_{ts}}, \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{h + (\alpha + 1 + h^2)Q_b Q_{ts}}{hQ_b Q_{ts}} \quad (8)$$

ja

$$a_3 = \frac{hQ_b + Q_{ts}}{\sqrt{hQ_b Q_{ts}}}, \quad (9)$$

joissa α on komplianssisuhde, Q_b häviöiden hyvyysluku ja Q_{ts} kokonaishyvyysluku. Komplianssisuhde

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_b} \quad (10)$$

missä V_{as} on kaiutinelementin ekvivalenttitilavuus ja V_b on kotelon tilavuus.

Yhtälössä (2) esitetty siirtofunktio on kahden neljännen asteen polynomin suhde, joten refleksikoteloitu kaiutin käyttäytyy neljännen asteen ylipäästösuotimena. Vaste vaimenee rajataajuuden alapuolella 24 dB/oktaavi taajuuden pienetessä. Yleisessä tapauksessa ei kertoimia saada määritettyä suoraan tavoitteena olevasta siirtofunktion muodosta ja alarajataajuudesta. Ratkaisu ei ole yksikäsitteinen ja johtaakin usein suoraviivaisen ratkaisun sijaan optimointiongelmaan. Joissain tapauksissa suora ratkaisu on tosin mahdollista, mutta tällöinkin edellytyksenä on vähintään yhden parametrin valinta kiinteäksi. Esimerkiksi häviöiden hyvyysluku Q_b voidaan asettaa arvoon 5...10. Tällöin nimittäjäpolynomin kertoimet a_1 , a_2 ja a_3 voidaan määrittellä tunnettujen suodinfunktioiden avulla. (Toivanen, 1976; Backman, 2008)

Kaiutinsuunnittelussa tärkeää osaa näyttelevät myös Thiele-Small parametrit, jotka kuvaavat kaiutinelementin sähkömekaanisia ominaisuuksia. Osaa parametreista tarvitaan siirtofunktiossa, jotta sen avulla voidaan simuloida kaiutinta. Parametrit ovat saaneet nimensä A. Neville Thiele:n ja Richard H. Small:n mukaan, jotka määrittivät tämän tyyppisen lähestymistavan kaiuttimien analysointiin. Kaiutinelementin fyysisiä ominaisuuksia kuvaavat parametrit ovat kartion efektiivinen pinta-ala S_d , liikkuvien osien massa M_{ms} , ripustuksen komplianssi C_{ms} , ripustuksen mekaaninen resistanssi R_{ms} , puhekelan induktanssi L_e , puhekelan DC-resistanssi R_e , ja voimakero Bl . Nämä parametrit mitataan pienellä signaalitasolla ja niitä käytetään kaiuttimen sijaiskytkennässä. Resonanssitaajuus f_s , sähköinen hyvyysluku Q_{es} , mekaaninen hyvyysluku Q_{ms} , kokonaishyvyysluku Q_{ts} ja ekvivalenttitilavuus V_{as} voidaan määrittää mittaamalla kaiutinelementin impedanssi resonanssitaajuuden lähistöllä käyttäen pientä signaalitasoa, jolloin kaiutinelementin käyttäytyminen on lineaarista. Haluttaessa määrittää kaiuttimesta saatava äänenpaine, voidaan

käyttää parametrejä, jotka ovat maksimialinen lineaarinen kartion liikepoikkeama X_{max} , maksimaalinen mekaaninen kartion liikepoikkeama X_{mech} ja maksimaalinen kartion syrjäyttämä tilavuus V_d . V_d saadaan parametrien S_d ja X_{max} tulona. (Small 1972, 1973a; Thiele 1978)

4. Mitoitus

Refleksikotelon mitoitus aloitetaan yleensä valitsemalla haluttu viritys. Virityksellä tarkoitetaan kotelon ja refleksiputken mitoittamista halutun taajuusvasteen (esimerkiksi Butterworth-tyyppinen) saavuttamiseksi käytettävällä kaiutinelementillä. Erilaisia mahdollisia virityksiä on käytännössä ääretön määrä, mutta esimerkiksi työssäkin apuna käytetty WinISD-ohjelma tarjoaa valmiina vaihtoehtoina BB_4/SBB_4 , QB_3 , C_4/SC_4 , EBS_3 ja EBS_6 viritykset. Näistä virityksistä tarkastellaan lähemmin virityksiä BB_4/SBB_4 , QB_3 ja EBS_3 . BB_4/SBB_4 on lyhenne sanoista (Super-) Boom Box ja sen tyypillisenä ominaisuutena on kotelon virittäminen taajuudelle $f_b = f_s$. SBB_4 on laajennus BB_4 :lle pienemmän Q_{ts} :n omaavia kaiutinelementtejä varten. SBB_4 virityksellä sanotaan olevan hyvä reagointi transientteihin (Dickason 1997 s.44). BB_4 :lle tyypillinen ominaisuus on piikki taajuusvasteessa viritystaajuuden ympäristössä. QB_3 eli Quasi Third-Order –viritys on useimmin käytetty viritys, koska se voidaan toteuttaa pienemmällä kotelolla ja matalammalla rajataajuudella f_3 käytettäessä saman Q_{ts} :n omaavaa elementtiä. Kuitenkaan sillä ei päästä yhtä hyvään tulokseen transienttien osalta, kuin SBB_4 :llä (Dickason 1997 s.44). EBS_3 eli Extended Bass Shelf -3dB tarjoaa matalamman rajataajuuden kuin edellä mainitut viritykset. Negatiivisena puolena kotelon koko on huomattavasti suurempi.

4.1 Mitoitus siirtofunktion perusteella

Mitoitus voidaan tehdä siirtofunktion pohjalta vertaamalla yhtälöä (2) johonkin tunnetun suodinfunktioon. Tavoitteena on saada ratkaistua kertoimet a_1 , a_2 ja a_3 siten, että siirtofunktiolla saatava vaste vastaa haluttua suodinfunktiota. Small (1973b) ja Thiele (1978) ovat esittäneet esimerkin, jossa Butterworth-tyyppiselle alipäästösuotimelle pätee yhtälö

$$|E(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^8}, \quad (11)$$

joka muuntamalla ylipäästösuotimen muotoon saadaan yhtälö

$$|E(j\omega)|^2 = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^8}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^8 + 1} = \frac{\omega^8 T_0^8}{\omega^8 T_0^8 + 1}. \quad (12)$$

Nyt voidaan yhtälöä (12) verrata yhtälön (2) muotoon

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{\omega^8 T_0^8}{\omega^8 T_0^8 + (a_3^2 - 2a_2)\omega^6 T_0^6 + (a_2^2 + 2 - 2a_1 a_3)\omega^4 T_0^4 + (a_1^2 - 2a_2)\omega^2 T_0^2 + 1} \quad (13)$$

ja saadaan ehdot

$$\begin{cases} a_3^2 - 2a_2 = 0 \\ a_2^2 + 2 - 2a_1 a_3 = 0, \\ a_1^2 - 2a_2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

joiden tulee täyttyä. Ratkaisemalla yhtälökolmikko (14), saadaan kertoimien a_1 , a_2 ja a_3 arvoiksi

$$\begin{cases} a_1 = a_3 = \sqrt{4 + 2\sqrt{2}}, \\ a_2 = 2 + \sqrt{2} \end{cases} \quad (15)$$

Tämän jälkeen tehtäväksi jää suureiden α ja h ratkaisu yhtälöistä (7)...(9) käyttäen yhtälöitä (6) ja (10), jolloin saadaan ratkaistua kotelon tilavuus V_b ja viritystaajuus f_b .

4.2 Mitoitus taulukoiden avulla

Refleksikotelon mitoitus voidaan toteuttaa valmiiksi lasketulla taulukolla kyseille viritykselle (Dickason, 1997). Ratkaisua varten tulee tietää käytetystä kaiutinelementistä parametrit f_s , Q_{ts} ja V_{as} . Ensin valitaan taulukko halutun virityksen ja arvioidun Q_b :n perusteella. Taulukkoon on laskettu arvot h , α ja f_3/f_s erilaisilla Q_{ts} :n arvoilla. Taulukosta valitaan käytetyn kaiutinelementin Q_{ts} :n perusteella oikea rivi. Tämän jälkeen tarvittava kotelon tilavuus saadaan lausekkeella

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha}. \quad (16)$$

Kotelon viritystaajuus saadaan lausekkeella

$$f_b = hf_s. \quad (17)$$

Kaiuttimen vasteen 3dB:n vaimennusta vastaava piste on

$$f_3 = \frac{f_3}{f_s} f_s. \quad (18)$$

Refleksiputken pituus saadaan ratkaisemalla l yhtälöstä (1), jolloin yhtälö saadaan muotoon

$$l = \frac{1}{16\pi} \frac{v^2 d^2}{f_b^2 V_b}. \quad (19)$$

Kun l ilmoitetaan senttimetreissä, v metreissä per sekunti, d senttimetreissä, f_b hertseissä ja V_b litroissa ja käyttämällä äänen nopeudelle arvoa 343m/s, saadaan yhtälö suureiden yksiköiden perusteella muotoon

$$l = \frac{23405d^2}{f_b V_b}, \quad (20)$$

missä d on refleksiputken halkaisija senttimetreissä ilmoitettuna. Yhtälöllä (20) saadaan laskettua pelkästään putken efektiivinen pituus. Halutessa tietää putken fyysinen pituus, tulee laskussa käyttää korjaavaa kerrointa. Yhtälö saadaan nyt muotoon

$$l = \frac{23405d^2}{f_b V_b} - xd, \quad (21)$$

missä x on käytettävän korjauskertoimen arvo. Korjauskertoimella voidaan huomioida putken liittäminen kotelon seinämään sekä putken päiden mahdolliset pyöritykset. Dickason (1997) on esittänyt lukuisia esimerkkejä taulukoista erilaisten viritysten toteuttamiseksi.

4.3 WinISD

WinISD on ilmainen kaiutinsuunnitteluohjelma, jolla voidaan toteuttaa suljettuja kotelaita sekä refleksi- ja kaistanpäästökotelaita. Ohjelma tarjoaa valmiina vaihtoehtoina BB₄/SBB₄, QB₃, C₄/SC₄, EBS₃ ja EBS₆ refleksiviritykset. Ohjelmasta löytyy valmiina TS-parametrit useille kaiutinelementeille ja siihen on mahdollista syöttää parametreja myös itse. Kotelon mitoitus aloitetaan valitsemalla haluttu kaiutinelementti ohjelman tarjoamasta listasta tai syöttämällä haluamansa kaiutinelementin TS-parametrit. Tämän jälkeen valitaan kaiutinelementtien määrä, kotelotyyppe, sekä haluttu viritys. Kotelon häviöiden parametreille vuotojen hyvyysluku Q_t , absorption hyvyysluku Q_a ja aukkojen hyvyysluku Q_p voidaan myös asettaa halutut arvot. Ohjelma laskee annetuilla syötteillä tarvittavan kotelotilavuuden ja refleksiputken dimensiot halutun virityksen toteuttamiseksi.

5. Viritysten simulointi

Viritykset BB₄/SBB₄, QB₃ ja EBS₃ toteutettiin kolmelle erilaiselle kaiutinelementille. Toteutettiin lisäksi vielä kaksi viritystä, joista käytettiin nimityksiä LSK ja LPK. LSK virityksessä käytettiin jokaiselle kaiutinelementille liian suurta kotelotilavuutta, jolloin kaiuttimen vaste vääristyy. LPK

viritys toteutettiin käyttäen liian pientä kotelotilavuutta, joka myös aiheuttaa vasteen vääristymistä. Näiden kahden virityksen on tarkoitus demonstroida, mitä tapahtuu, jos kaiutinelementti laitetaan koteloon, jota ei ole mitoitettu oikein. Mitoitukset toteutettiin käyttäen edellä esiteltyä WinISD-ohjelmaa, jonka jälkeen vasteita simuloitiin Matlab:lla käyttäen kullekin viritys-kaiutinelementti - yhdistelmälle muodostettua siirtofunktiota WinISD:n antamien parametrien V_b ja f_b sekä kaiutinelementtien TS-parametrien Q_{ts} , f_s ja V_{as} avulla. Kaikille virityksille käytettiin arvoja $Q_l = 10$, $Q_b = 100$ ja $Q_a = 100$, joita WinISD käyttää oletusasetuksenaan.

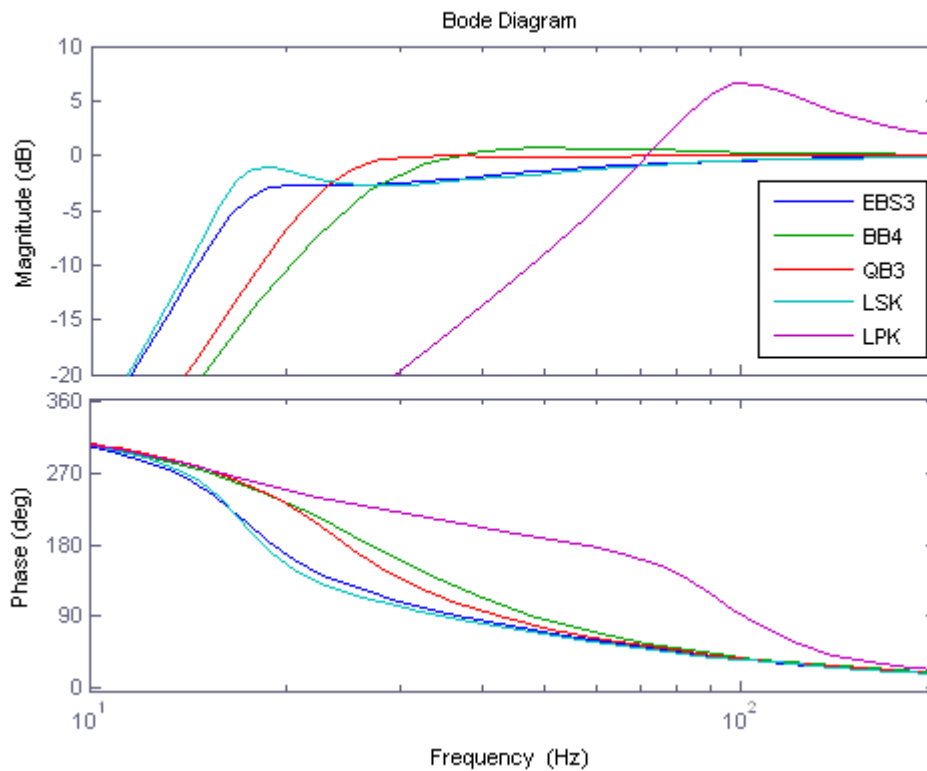
5.1 Seas P25REX

Ensimmäinen valituista kaiutinelementeistä on Seasin valmistama P25REX. Osaltaan valintaan vaikutti se, että elementti olisi ollut saatavilla lainaan myös mittauksia varten. Elementin TS-parametrit löytyvät liitteestä I. Kotelon tilavuuden V_b ja viritystaajuuden f_b arvot käytetyillä virityksillä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Parametrien V_b ja f_b arvot käytetyillä virityksillä

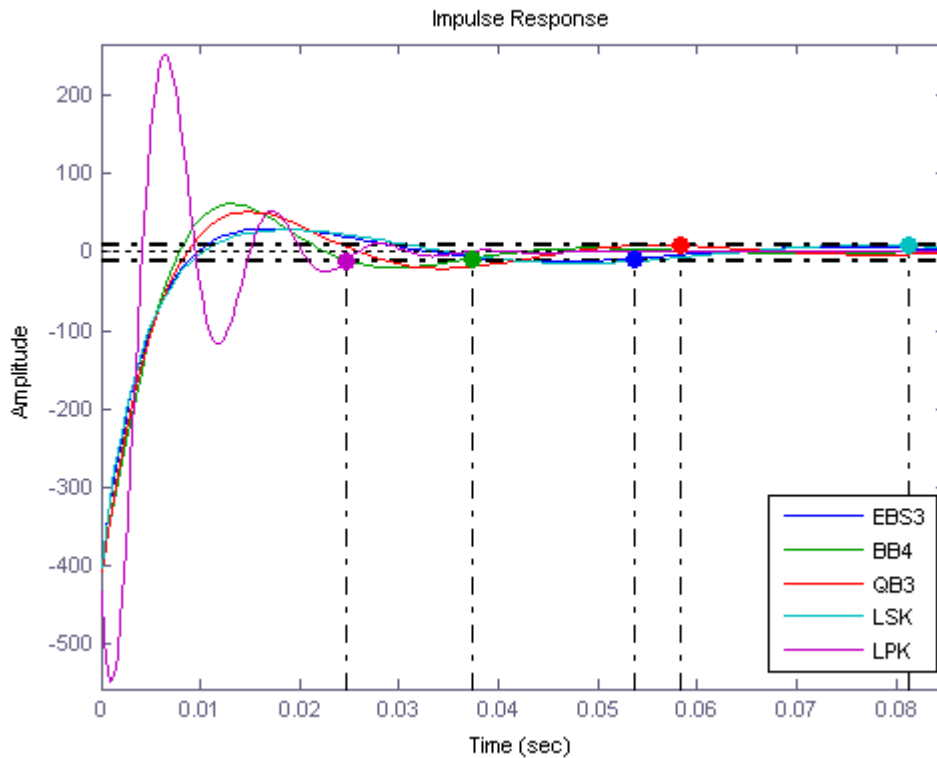
| | BB4 | QB3 | EBS3 | LPK | LSK |
|------------|--------|--------|--------|------|-----|
| V_b [l] | 134,83 | 211,79 | 323,43 | 19,8 | 500 |
| f_b [Hz] | 27 | 24,58 | 18,64 | 59,5 | 18 |

Parametrien määrittämisen jälkeen syötettiin saadut arvot siirtofunktioon ja saatiin määritettyä Matlabilla kaiuttimen taajuus- ja impulssivaste. Kuvassa 10 on esitetty simuloitua taajuusvasteita Seas P25REX:lle, kun käytetään taulukossa 1 esitettyjä virityksiä.



Kuva 4. Simuloidut itseisarvo- ja vaihevasteet käytettäessä Seas P25REX -kaiutinelementtiä

Kuvasta 4 huomataan, miten virityksillä LPK ja LSK syntyy vääristymiä vasteeseen viritystaajuuden lähistöllä. Seas P25REX:llä toteutuva viritys arvolla $f_b = f_s$ on BB_4 , koska elementin Q_{ts} on liian suuri SBB_4 viritystä ajatellen. BB_4 virityksen ominaisuutena on piikki vasteessa viritystaajuuden lähistöllä, joka on myös havaittavissa kuvasta 4. Kyseisen kaiutinelementin tapauksessa piikki on tosin hyvin pieni. BB_4 tuottaa kuitenkin lineaarisimman vaihevasteen. EBS_3 virityksellä saadaan rajataajuus siirrettyä muita virityksiä alemmas ilman suurempia vääristymiä vasteessa. Virityksillä saatavat impulssivasteet on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Simuloidut impulssivasteet käytettäessä Seas P25REX –kaiutinelementtiä

Kuvasta 5 huomataan, että LPK viritys tuottaa suurimman ylityksen impulssiherätteellä, joten se on joukon huonoin. Simuloinnin perusteella parhaimman impulssivasteen tuottaa viritys EBS₃. Vaikka kuvan 5 perusteella virityksellä LSK näyttäisi olevan aavistuksen pienempi ylitys verrattuna viritykseen EBS₃, on sen asettumisaika kuitenkin huomattavasti pidempi. LSK:lla on myös kuvassa 4 esiintyvä kumpu taajuusvasteessa viritystaajuuden tuntumassa, joka ei ole toivottava ominaisuus. Vastaavasti korkeammilla taajuuksilla taajuusvastekäyrä käy hetkellisesti EBS₃-virityksen käyrää alempana, joka saattaa korreloida pienemmän ylityksen kanssa impulssivastekäyrässä. Impulssivasteiden asettumisajat kullekin viritykselle on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Simuloidut impulssivasteiden asettumisajat

| | EBS3 | BB4 | QB3 | LSK | LPK |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Asettumisaika (2%) [s] | 0.0537 | 0.0374 | 0.0582 | 0.0812 | 0.0247 |

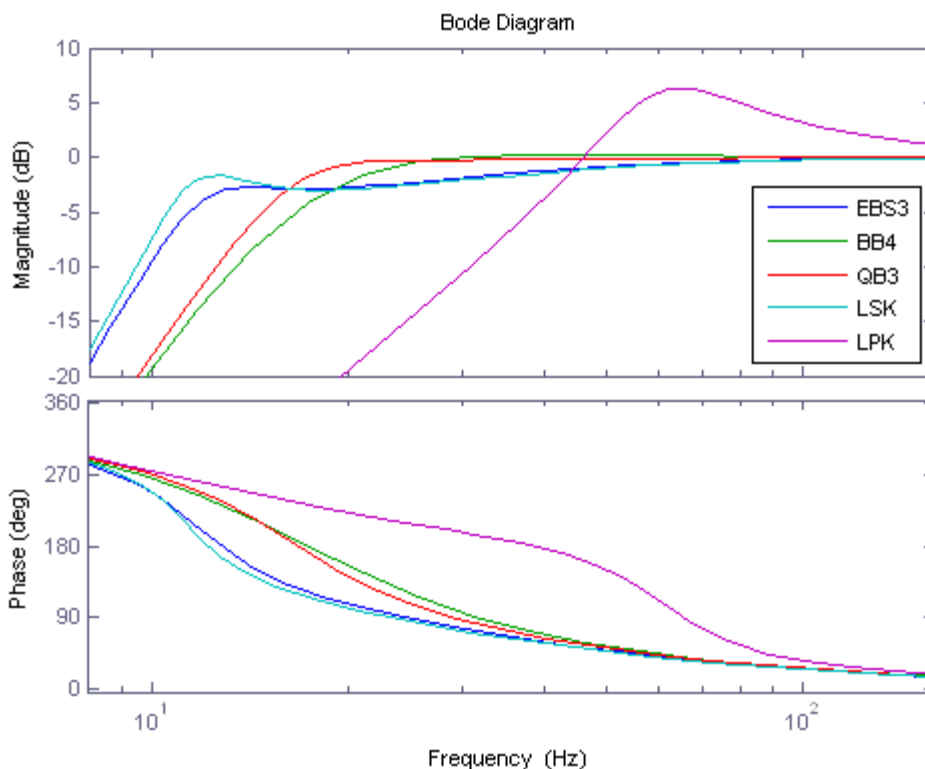
5.2 Maelstrom-X

Toiseksi kaiuttimelementiksi valittiin Exodus Audion valmistama Maelstrom-X. Elementin TS-parametrit löytyvät liitteestä II. Kotelon tilavuuden V_b ja viritystaajuuden f_b arvot käytetyillä virityksillä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Parametrien V_b ja f_b arvot käytetyillä virityksillä

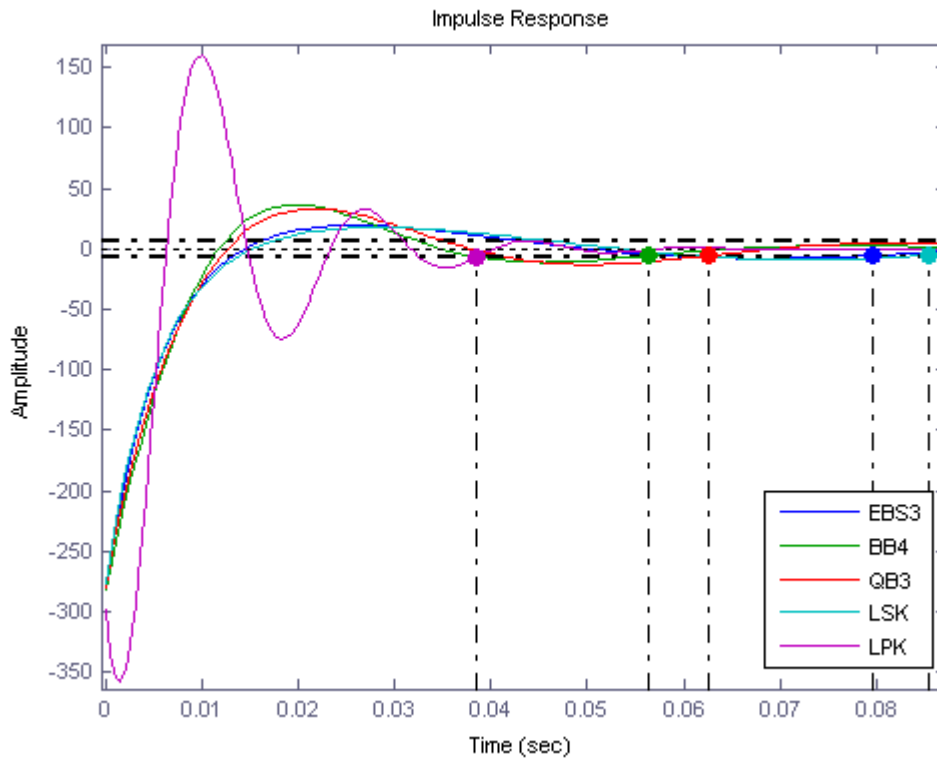
| | BB4 | QB3 | EBS3 | LPK | LSK |
|------------|------|--------|--------|-----|------|
| V_b [l] | 288 | 408,34 | 696,58 | 50 | 1000 |
| f_b [Hz] | 17,4 | 16,68 | 12,54 | 40 | 12 |

Kuvassa 6 on esitetty kyseisellä elementillä saadut taajuusvasteet kullakin virityksellä, josta todetaan jälleen virityksillä LPK ja LSK esiintyvät piikit vasteessa viritystaajuudella. Elementin Q_{ts} :stä johtuen viritystaajuudella $f_b = f_s$ toteutuva viritys on BB₄, mutta viritystaajuuden lähistöllä tapahtuva piikki on kuitenkin pienempi kuin vastaavalla virityksellä Seas P25REX:n tapauksessa. BB₄ tuottaa jälleen lineaarisimman vaihevasteen. Virityksellä EBS₃ saadaan jälleen matalin rajataajuus ilman suurempia vääristymiä vasteessa.



Kuva 6. Simuloidut taajuus- ja vaihevasteet käytettäessä Maelstrom-X –kaiuttimelementtiä

Kuvassa 7 on esitetty impulssivasteet kullakin virityksellä.



Kuva 7. Simuloidut impulssivasteet käytettäessä Maelstrom-X –kaiutinelementtiä

Kuvan 7 perusteella impulssivastekäyrien muodot ovat hyvin samankaltaisia kuin käytettäessä Seas P25REX-kaiutinelementtiä. Virityks LPK on jälleen selkästi huonoin, koska sillä on suurin ylitys. Viritykset EBS₃ ja LSK ovat hyvin lähellä toisiaan tuottaen pienen ylityksen. QB₃ ja BB₄ tuottavat myös keskenään hyvin samankaltaiset vasteet. LSK:n ja EBS₃:n välillä on vaikea todeta suurta eroa pelkästään kuvan 7 perusteella, mutta tarkasteltaessa kuvaa 6, nähdään, että viritys LSK aiheuttaa vääristyneen vasteen, joka näkyy kumpuna vasteessa. EBS₃ näyttäisi siis tuottavan parhaimman tuloksen, koska sillä on vain vähän ylitystä impulssivasteessa, mutta ei piikkiä taajuusvastessa. Kuten edellä mainittiin, saadaan EBS₃:lla myös matalin rajataajuus ilman vääristymiä vasteessa. Taulukossa 4 on esitetty impulssivasteiden asettumisajat kullekin viritykselle.

Taulukko 4. Simuloidut impulssivasteiden asettumisajat

| | EBS3 | BB4 | QB3 | LSK | LPK |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Asettumisaika (2%) [s] | 0.0795 | 0.0564 | 0.0625 | 0.0853 | 0.0385 |

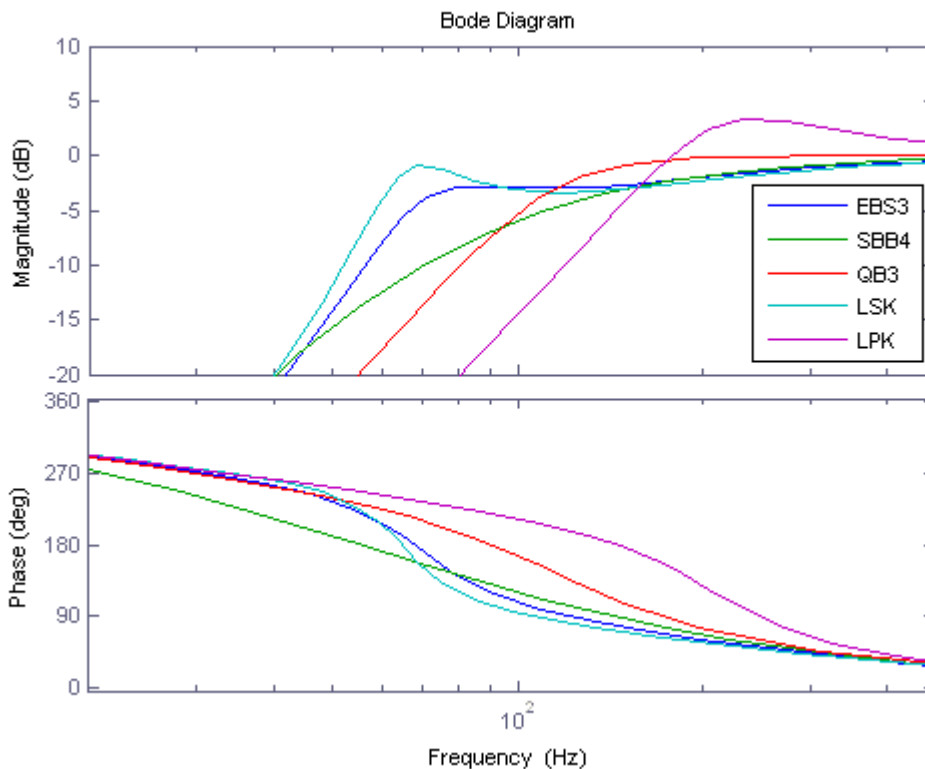
5.3 Seas P11RCY

Kolmanneksi kaiutnelementiksi valittiin Seas P11RCY, joka myöskin oli saatavilla mittauksia varten. Elementin TS-parametrit löytyvät liitteestä III. Kotelon tilavuuden V_b ja viritystaajuuden f_b arvot käytetyillä virityksillä on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Parametrien V_b ja f_b arvot käytetyillä virityksillä

| | SBB4 | QB3 | EBS3 | LPK | LSK |
|------------|------|-------|-------|-----|-----|
| V_b [l] | 1,21 | 0,98 | 2,75 | 0,5 | 5 |
| f_b [Hz] | 55 | 92,02 | 68,04 | 150 | 65 |

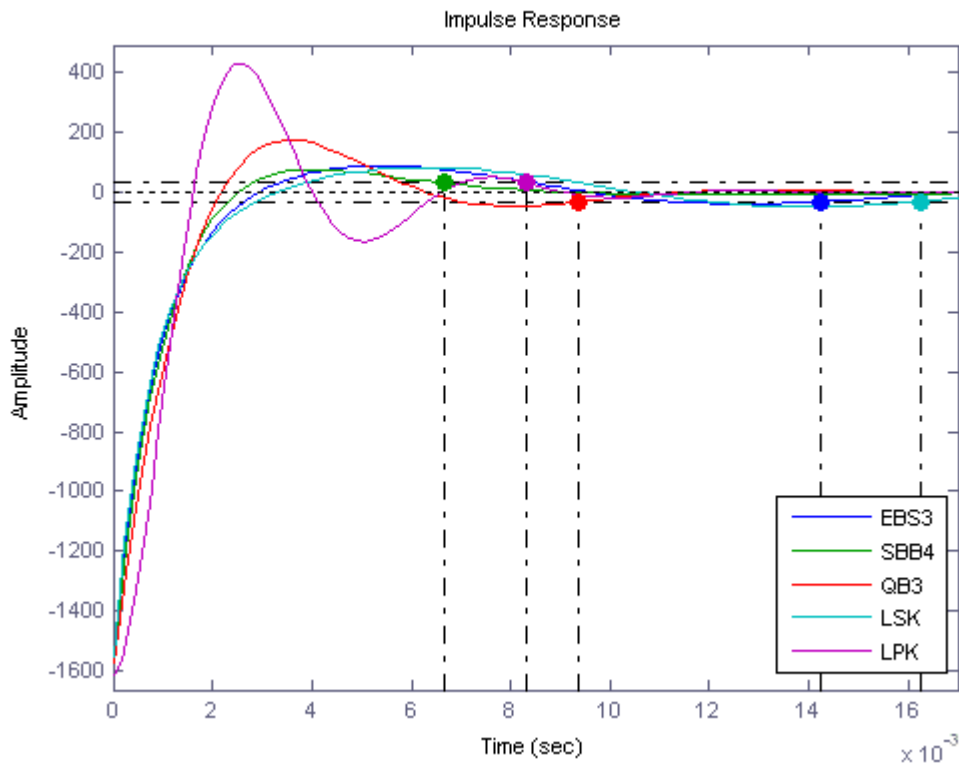
Kuvassa 8 on esitetty taajuusvasteet käytetyillä virityksillä. Viritykset LPK ja LSK erottuvat taas selkeästi vääristyneillä vasteillaan aiheuttaen piikit vasteisiin viritystaajuuksilla.



Kuva 8. Simuloidut taajuus- ja vaihesteet käytettäessä Seas P11RCY -kaiutnelementtiä

Seas P11RCY omaa pienen Q_{ts} :n, joten viritystaajuudella $f_b = f_s$ toteutuva viritys on SBB₄. SBB₄ erottuu kahdella muulla elementillä toteutuneesta BB₄ virityksestä jo korkeammalta alkavalla ja loivemmalla vaimenemisella. Virityksen SBB₄ vaihevaste muuttuu myös hyvin lineaarisesti verrattuna muihin virityksiin, joiden vaihe muuttuu jyrkemmin viritystaajuuden tuntumassa.

Viritystaajuuden kohdalla ei myöskään esiinny piikkiä vasteessa. Kuvassa 9 on esitetty virityksillä saatavat impulssivasteet.



Kuva 9. Simuloidut impulssivasteet käytettäessä Seas P11RCY –kaiutinelementtiä

Kuvasta 9 voidaan todeta, että LPK tuottaa jälleen suurimman ylityksen. EBS₃ ja LSK ovat ylityksen ja asettumisajan puolesta hyvin lähekkäin. LSK:lla on kuitenkin jälleen pisin asettumisaika. QB₃:lla puolestaan on LSK:ta ja EBS₃:a jonkin verran suurempi ylitys. SBB₄ näyttää tuottavan pienimmän ylityksen, joka puolestaan vahvistaa väitettä, että SBB₄-virityksellä saataisiin hyvä transienttivaste (Dickason, Vance s.44). Verrattaessa SBB₄ viritystä kahdella muulla elementillä toteutuneeseen BB₄ viritykseen, voidaan huomata niiden eroavan toisistaan melkoisesti niin taajuusvasteen kuten impulssivasteenkin osalta, vaikka suunnitteluperiaate on sama. On kuitenkin otettava huomioon se seikka, että SBB₄ virityksen tuottama rajataajuus on huomattavasti korkeammalla kuin esimerkiksi EBS₃:lla. Subwooferilla on kuitenkin tarkoitus tuottaa matalia taajuuksia, joten katsottaessa tuloksia tältä kantilta on EBS₃ hyvä kompromissi impulssivasteen ja rajataajuuden kannalta. Taulukossa 6 on esitetty kunkin virityksen impulssivasteiden asettumisajat

Taulukko 6. Simuloidut impulssivasteiden asettumisajat

| | EBS3 | SBB4 | QB3 | LSK | LPK |
|------------------------|--------|---------|---------|--------|---------|
| Asettumisaika (2%) [s] | 0.0142 | 0.00665 | 0.00936 | 0.0163 | 0.00832 |

Tarkasteltaessa kullakin kolmella kaiutinelementillä sekä kaikilla virityksillä toteutuneita asettumisaikoja, voidaan huomata, että niiden perusteella ei voida päätellä paljoakaan tälläisen järjestelmän todellisesta suorituskyvystä. Suurimman ylityksen tuottava viritys tuottaa nopeimman asettumisajan lähes kaikissa simuloituissa tapauksissa, kun taas esimerkiksi pienen ylityksen tuottava EBS₃ tuottaa pitkän asettumisajan. Poikkeuksena kuitenkin viritys SBB₄, jolla on sekä nopea asettumisaika, että pieni ylitys. Asettumisaika vaikuttaisikin siis riippuvan lähes täysin siitä, kuinka matalia taajuuksia kaiutin toistaa.

6. Mittaukset

Mittausten tavoitteena oli todistaa simulointimallin toimivuus käytännössä. Mittauksia varten rakennettiin kotelo, jolla saatiin toteutettua vaadittavat viritykset käytettävälle elementille. Mitattavaksi elementiksi valittiin simulointien perusteella Seas P11RCY, koska kahdella muulla elementillä kotelotilavuus oli niin suuri, ettei niitä käytännön syistä kannattanut rakentaa. Seas P11RCY ei kuitenkaan ole subwoofer-elementti, mutta koska mittauksien tarkoituksena oli vain todentaa mallin toimivuus, kelpasi se käyttötarkoitukseen hyvin. Mittaukset tehtiin kullekin P11RCY-kaiutinelementillä simuloitulle viritykselle. Viritysten vertailun lisäksi tutkittiin vaimennusaineen lisäämisen vaikutusta viritykseen LSK sekä refleksiputken koon muuttamisen vaikutusta viritykseen EBS₃.

6.1 Mittauslaitteisto

Mittaukset suoritettiin G.R.A.S 40BF -mikrofonilla, joka oli kytkettynä Tie Pie Instruments Handyscope HS4 –oskilloskooppiin. Oskilloskoopin näytteenottotaajuutena oli 195,31 kS/s ja näytteen pituutena 50000. Mikrofonin oli asetettuna metrin päähän kaiuttimesta ja kaiutin ja mikrofonin 90 cm:n päähän lattiasta. Kaiuttimelle syötettiin kanttiaaltoja 100 ms:n pulssinleveydellä signaaligeneraattorilla, joka oli kytkettynä päätevahvistimeen. Oskilloskooppi oli liitetty kannettavaan tietokoneeseen, jolla mittaustuloksia voitiin tarkastella ja tallentaa myöhempää analysointia varten.

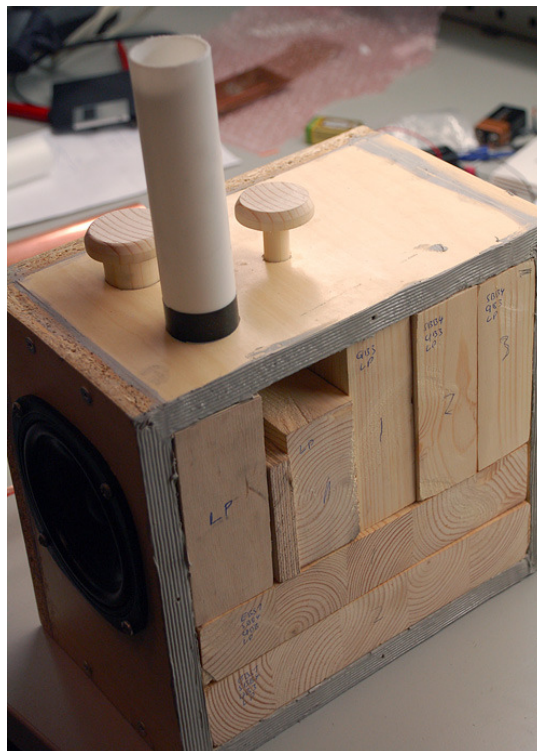
6.2 Tila

Mittaukset suoritettiin koululla olevassa vaimennetussa tilassa. Tilan sisäpuolen seinät oli vuorattu pyramidipintaisilla akustointielementeillä. Tila on alunperin tarkoitettu RF-taajuuksien mittaamista

varten, joten se ei ole täysin optimaalisesti suunniteltu äänitaajuksien mittaamista silmälläpitäen. Edellä mainitulla kaiuttimen ja mikrofonin sijainnilla ensimmäinen heijastus tapahtui lattian kautta, jolloin heijastunut ääniaalto kulki noin 189 cm pituisen matkan. Heijastunut aalto saapui mikrofonin siis 2,59 millisekuntia suoraa ääntä myöhemmin, joten se asettuu impulssivasteesta tarkastellun alueen ulkopuolelle. On kuitenkin mahdollista, että heijastus näkyi jollain tapaa taajusvaste kuvaajissa.

6.3 Kotelo

Kotelo suunniteltiin sellaiseksi, että sen tilavuus oli muutettavissa kutakin haluttua viritystä varten. Refleksiputki täytyi myös olla vaihdettavissa, koska putken dimensiot olivat erilaiset kullakin virityksellä. Toisesta kotelon sivuseinästä tehtiin irroitettava, jotta sisälle voitiin lisätä täytettä tilavuuden muuttamiseksi. Irrotettavan sivuseinän ja kotelon välilinen liitos tiivistettiin tiivistenauhalla. Refleksiputkia varten tehtiin kolme erimittaista reikää ja reikiä varten tulpat, jolloin käyttämättömät reiät voitiin tukita mittauksien ajaksi. Kuvassa 10 on esitetty mittauksissa käytetty kotelo.

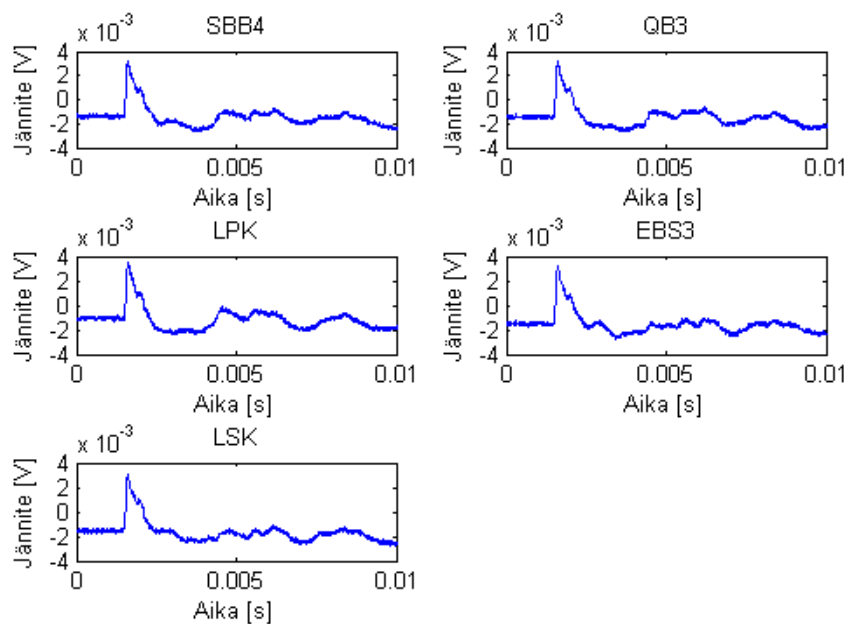


Kuva 10. Mittauksissa käytetty kotelo (Kuva: Mikko Kuisma)

Kuvasta 10 havaitaan, miten kotelon tilavuutta saatiin muutettua. Kutakin virityksen vaatimaa tilavuutta vastaavat puukappaleet asetettiin koteloon sisälle ja kotelon sivuseinä asetettiin paikalleen puristimien avulla. Puristimia käyttämällä kotelo oli nopeasti avattavissa ja suljetavissa. Kotelon suunnittelemisesta, refleksiputkista ja puukappaleiden tekemisestä vastasi työn kirjoittaja. Kotelon on ystävällisesti mittauksia varten rakentanut Mikko Kuisma. Piirustukset on esitetty liitteessä IV.

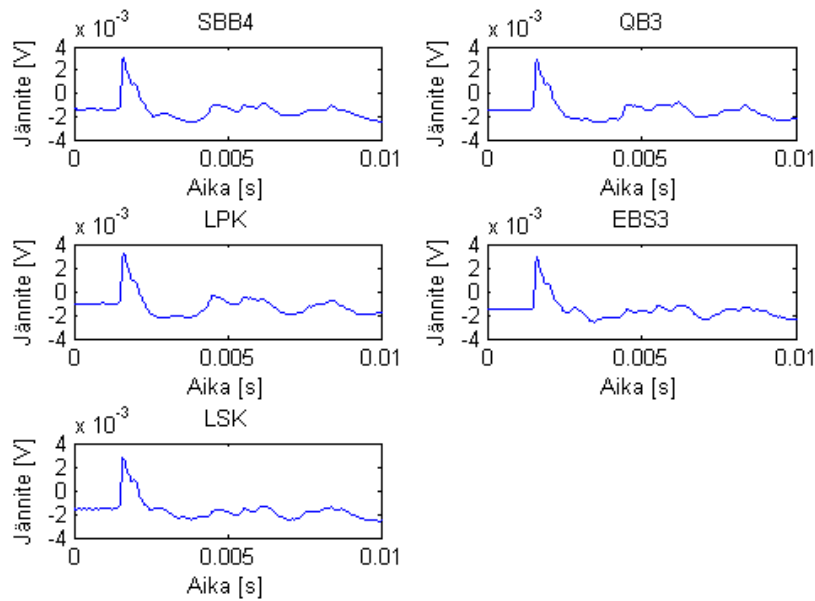
6.4 Viritysten vertailu

Kullakin virityksellä mitattiin kaiuttimen tuottama askelvaste käyttäen kanttiaaltoa. Kanttiaallon pulssinleveys asetettiin sellaiseksi, että kaiuttimen värähtely kerkesi loppua pulssinleveyden aikana. Kokeiluperiaatteella päädyttiin pulssinleveyden arvoon 100 ms. Kuvassa 11 on esitetty kunkin virityksen tuottamat askelvasteet.



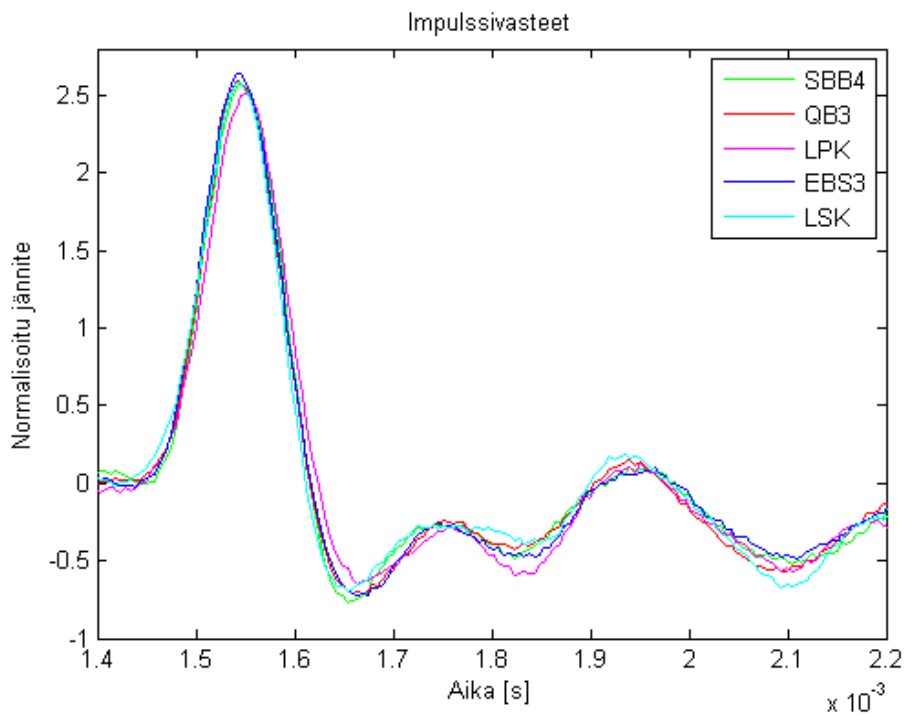
Kuva 11. Virityksille mitatut askelvasteet

Mitatuista askelvasteista laskettiin impulssivasteet derivoimalla. Matlab-koodi on esitetty liitteessä V. Mitatuissa askelvasteissa esiintyneen korkeataajuuksisen häiriön takia, ei derivoimalla määritetystä impulssivasteen kuvaajasta saanut käyrämuotoa kunnolla erotettua. Askelvasteista on tämän takia suodatettu korkeat taajuudet pois ennen derivointia käyttäen Matlab:n `filtfilt`-funktioita, jotta käyriä voitaisiin tarkastella. Suodatuksen Matlab-koodi on esitetty liitteessä VI. Kuvassa 12 on esitetty askelvasteet suodatuksen jälkeen.



Kuva 12. Askelvasteet suodatuksen jälkeen

Kuvasta 12 voidaan havaita, että askelvasteiden käyrämuodot pysyvät lähes muuttumattomana, lukuun ottamatta korkeataajuisen häiriösignaalin amplitudin pienenemistä. Askelvasteista derivoimalla lasketut impulssivasteet on esitetty kuvassa 13.

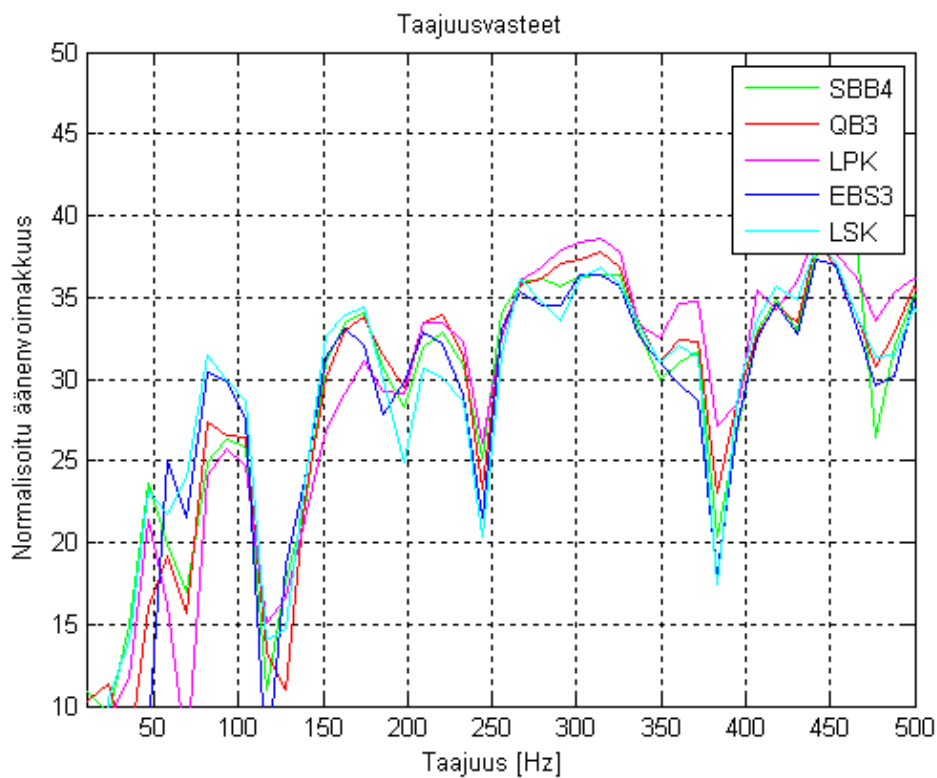


Kuva 13. Askelvasteiden perusteella lasketut impulssivasteet.

Kuvasta 13 voidaan todeta, että ylityksien ja jälkivärähtelyiden tasot ovat paljon lähempänä toisiaan kuin simuloinneissa. Virityksien paremmuusjärjestystä on lähes mahdoton määrittää näiden

mittausten perusteella. Vasteissa on toki pieniä eroja, mutta ne voivat hyvinkin johtua mittausepä tarkkuudesta. Osasyynä vasteiden samankaltaisuuteen voi olla kotelon mitoitus. Mitoitusta varten valittiin Q_b :lle jokin arvo ja jos tämä arvo ei vastaa rakennetun kotelon arvoa, ei viritys ole kohdallaan. Kotelossa oli refleksi putkia varten kolme reikää, joista muut yhtä lukuunottamatta tukittiin mittauksien välillä. Jos reikien tukkimiseen käytettyjen tulppien liitos ei ollut täysin tiivis, muuttuu Q_b :n arvo jo pelkästään sen takia erilaiseksi.

Impulssivasteista voidaan edelleen laskemalla määrittää taajuusvasteet kullekin viritykselle käyttäen Fast Fourier Transformia Matlab:ssa. Laskennassa käytetty Matlab-koodi on esitetty liitteessä VII. Impulssivasteen perusteella lasketut taajuusvasteet on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Impulssivasteen perusteella lasketut taajuusvasteet kullekin viritykselle

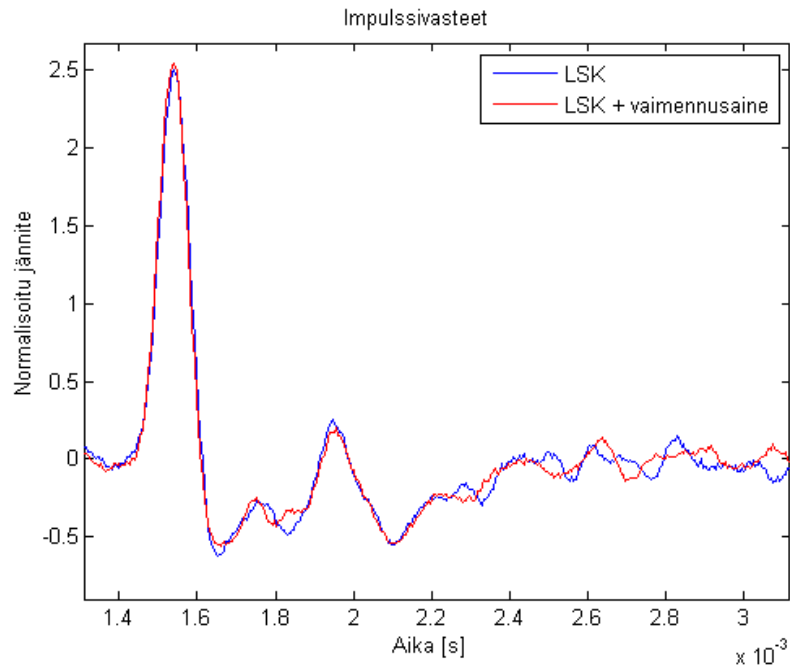
Kuvasta 14 huomataan kolme suurta kuoppaa vasteessa. Kuoppien voisi luulla johtuvan tilassa ilmenevistä seisovista aalloista, mutta mittauksessa käytetyn signaalin ollessa pitkän pulssinleveyden omaavaa kanttiaaltoa, ei sen pitäisi herättää tilasta johtuvia seisovia aaltoja ainakaan mittauksissa tarkastellulle alueelle. On kuitenkin mahdollista, että kuopat johtuvat lähimmistä rajapinnoista (esimerkiksi lattia) tapahtuvasta heijastuksesta. Mitattua dataa on kuitenkin tallennettu siltäkin ajanjaksolta, jolla heijastus lattiasta on saapunut mikrofoniiin. Tarkasteltaessa aluetta 50...100Hz, asettuvat mitatut viritykset kutakuinkin samaan järjestykseen

kuin simuloinnissa saadut vasteet kuvassa 8. Kuvasta 14 on myös havaittavissa virityksestä LPK aiheutuva korkeampi amplitudi vasteeseen alueella 260...380Hz. Vertaamalla tätä kuvan 8 simulointiin, voidaan todeta toteutuneen viritystaajuuden sijoittuvan hieman korkeammalle kuin oli tarkoitus. Tämä johtuu luultavasti siitä, että kotelon mitoituksessa kaiutinelementin viemää tilaa kotelon sisältä arvioitiin jollakin tilavuudella V . Tämä tilavuus on suurusluokaltaan merkittävä verrattaessa sitä kotelotilavuuteen $V_b = 0,5L$ kyseisellä virityksellä, joten on hyvinkin mahdollista, että todellinen kotelotilavuus V_b on erisuuruinen tavoitellusta tilavuudesta, jos kaiutinelementin viemä tilavuus on arvioitu virheellisesti. Haastavaksi tilavuuden arvioimisen tekee kaiutinelementin muoto.

Mittausten tarkoituksena oli todistaa simulointimallin toimivuus käytännössä. Valitettavasti saatujen mittaustulosten perusteella simulointimallin toimivuutta ei pystytä todistamaan. Kuvassa 20 esitetyt taajuusvasteet asettuvat oikeaan järjestykseen, mutta vastaavasti mitatuilla askevasteilla laskennallisesti määritetyt impulssivasteet ovat niin lähellä toisiaan, ettei niitä voida yksikäsitteisesti erottaa paremmuusjärjestykseen, mikä simulointien perusteella oli kuitenkin mahdollista.

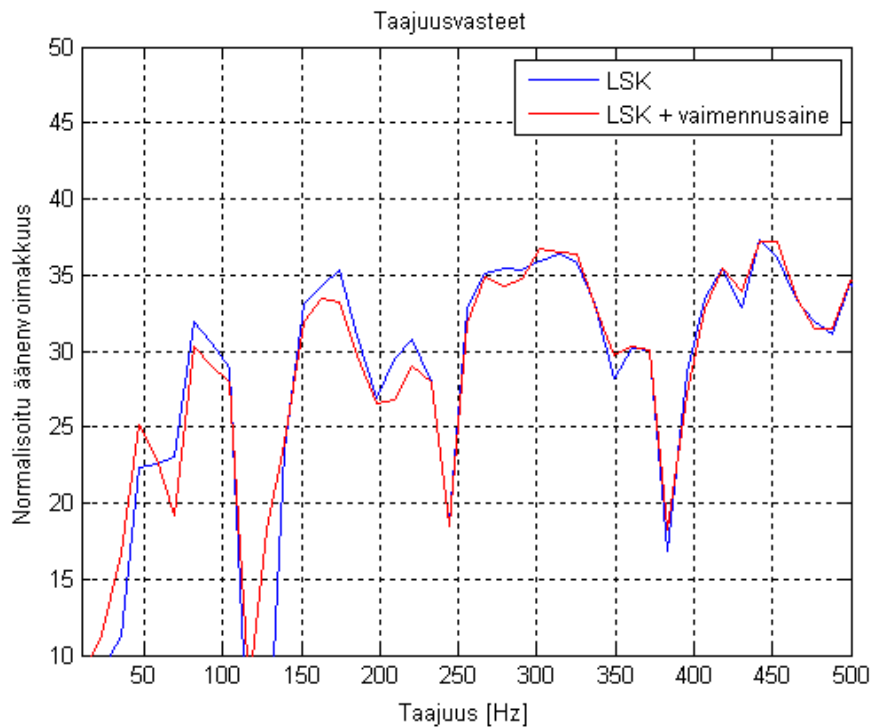
6.5 Vaimennusaineen lisäämisen vaikutus

Erilaisten virityksien vertailemisen lisäksi tutkittiin myös vaimennusmateriaalin vaikutusta viritykseen. LSK viritys mitattiin ilman vaimennusmateriaalia ja vaimennusmateriaalin kanssa siten, että kotelo laitettiin lähes täyteen vaahtomuovia. Refleksiputken ympäristö kotelon sisäpuolelta jätettiin kuitenkin vapaaksi, ettei ilman liikkuminen putkessa estyisi. Impulssivasteet ilman vaimennusmateriaalia ja vaimennusmateriaalin kanssa on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Impulssivasteet LSK-virityksellä ilman vaimennusainetta ja vaimennusaineen kanssa

Kuvasta 15 huomataan, että vasteen jälkivärähtelyn taso hyvin samankaltainen vaimennusaineen kanssa ja ilman vaimennusainetta. Kuvassa 16 on esitetty impulssivasteiden perusteella lasketut taajuusvasteet LSK-viritykselle vaimennusaineen kanssa ja ilman vaimennusainetta.



Kuva 16. Taajuusvasteet LSK-virityksellä vaimennusaineen kanssa ja ilman vaimennusainetta.

Kuvasta 16 voidaan havaita, että vaimennusaineen lisäämisen jälkeen vaste näyttäisi lähtevän vaimenemaan jo korkeammalta taajuudelta kuin ilman vaimennusainetta. Ero on kuitenkin hyvin pieni. Taajuusvasteet ovat lähes identtiset välillä 250...500 Hz, mutta taajuuden 250 Hz alapuolella on vaimennusaineen kanssa saadun käyrän amplitudi pienempi. Simuloimalla vaimennusaineen lisäämistä WinISD:llä, päädytään myös samaan tulokseen, eli vaimennusaineen lisäys nostaa viritystaajuutta. Simuloinnin perusteella vaimennusaineen lisäyksellä pitäisi kuitenkin syntyä korkeampi piikki vasteeseen viritystaajuuden kohdalle kuin ilman vaimennusainetta. Tätä piikkiä ei ilmene kuvassa 23, mutta jos tarkastellaan taajuusaluetta 100...150Hz, voidaan todeta, että punainen käyrä ei käy niin alhaalla kuin sininen. On hyvinkin mahdollista, että taajuusvasteessa oleva piikki osuu käyrässä olevan kuopan kohdalle, jolloin se ei ole niin selkeästi havaittavissa.

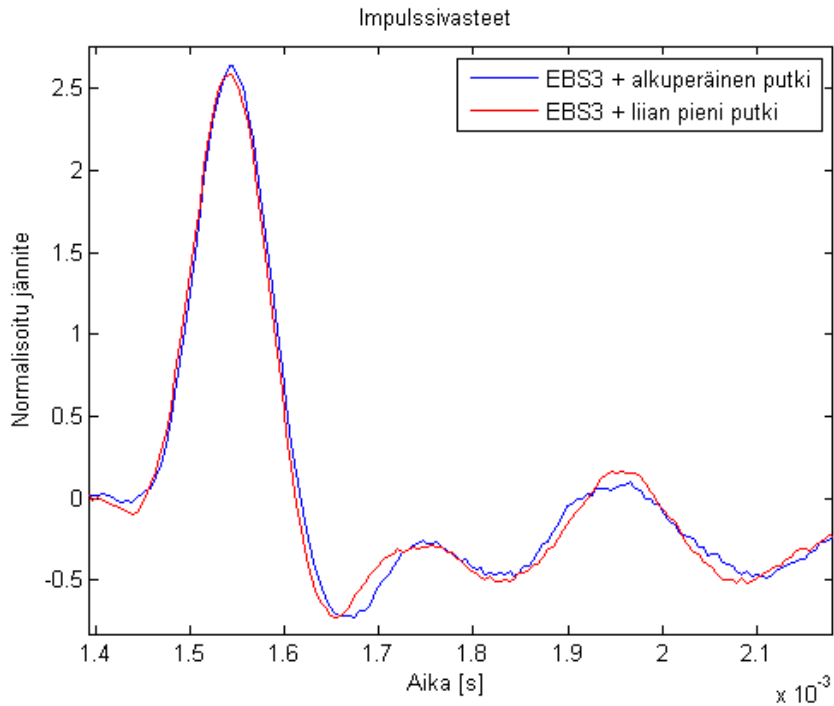
6.6 Refleksiputken koon muuttaminen säilyttämällä haluttu viritystaajuus

Mittauksen tarkoituksena oli määrittää, mitä tapahtuu, jos asiallisesti mitoitettu refleksiputki vaihdetaan huomattavasti pienemmän halkaisijan omaavaan putkeen siten, että kotelon viritystaajuus pysyy samana. Putkelle määritettiin simuloinnin perusteella kahdet erilaiset dimensiot, jotka tuottivat laskennallisesti mahdollisimman samansuuruisen viritystaajuuden. Putkien dimensiot ja laskennalliset viritystaajuudet on esitetty taulokossa 7.

Taulukko 7. Putkien dimensiot ja laskennalliset viritystaajuudet

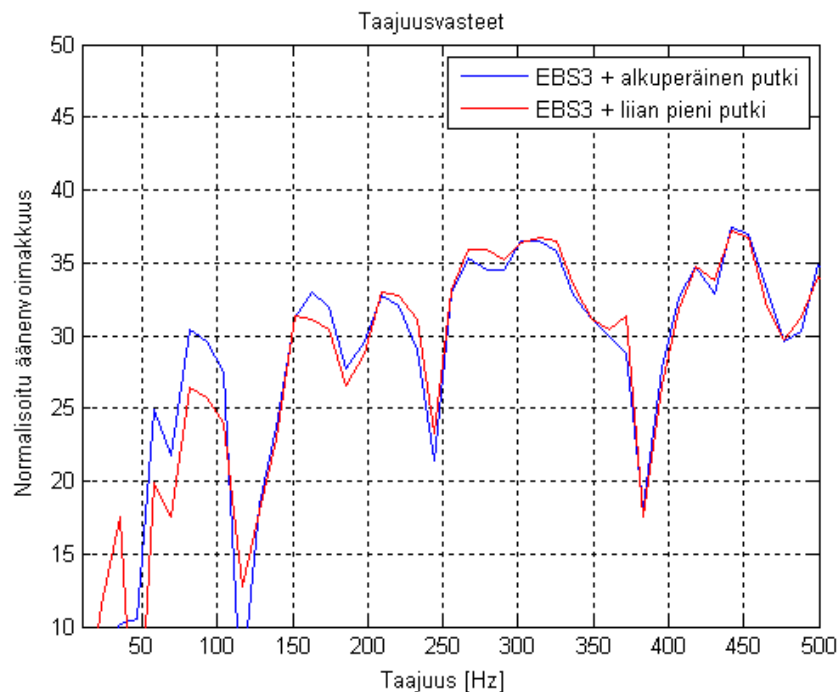
| | halkaisija [cm] | pituus [cm] | fb [Hz] |
|--------------------|-----------------|-------------|---------|
| Alkuperäinen putki | 2.8 | 12.42 | 68.04 |
| Liian pieni putki | 1.2 | 1.5 | 69.88 |

Taulukosta 7 voidaan todeta, että viritystaajuudet molemmilla putkilla eivät ole täysin samat laskennallisesti, mutta jos liian pieni putki ahdistaa ilman kulkua jotenkin, se huomataan luultavasti suurempana vaikutuksena mittauksissa, kuin alle 2Hz:n erona viritystaajuudessa. Kuvassa 17 on esitetty molemmilla putkien koilla saadut impulssivasteet.



Kuva 17. Impulssivasteet LSK-virityksellä, kun käytetään alkuperäistä ja liian pientä refleksiputkea

Kuvasta 17 voidaan todeta, että impulssivasteet ovat hyvin samankaltaiset eikä niitä voida laittaa selkeään paremmuusjärjestykseen



Kuva 18. Taajuusvasteet LSK-virityksellä, kun käytetään alkuperäistä ja liian pientä refleksiputkea

Kuvasta 18 voidaan todeta, että liian pientä putkea käytettäessä vaste alkaa laskea jo korkeammalta taajuudelta, kuin suuremmalla putkella. Pienenä putkenä käytettiin kuitenkin koteloon porattua

reikää, joten pieni heitto sen halkaisijassa saattaa aiheuttaa kyseisen muutoksen rajataajuuteen. Ei voida siis yksikäsitteisesti todeta rajataajuuden johtuvan pienemmästä putken halkaisijasta. On hyvinkin mahdollista, että käytetty pieni kaiutinelementti ei aiheuttanut tarpeeksi suurta tilavuuspoikkeutusta, jolla ilmamassan liikkeen rajoitus saisi aikaan selkeitä muutoksia. Pieni putki aiheutti kuitenkin kuuluvaa ääntä ilmamassan liikkeessa putken kautta.

7. Yhteenveto

Erilaiset viritykset tuottivat simulointien perusteella selkeästi erilaista suorituskykyä. Viritys SBB₄ näytti impulssivasteen perusteella arvioituna parhaalta vaihtoehdolta, mutta vaati matalan Q_{ts} :n omaavan kaiutinelementin, koska korkeammilla arvoilla toteutuva viritys on BB₄, vaikka käytetään periaatteessa samoja suunnittelukriteerejä. BB₄ virityksellä ei kuitenkaan päästy lähelle samoja tuloksia impulssivasteessa kuin SBB₄:llä, vaan BB₄ tuotti suuremman ylityksen vasteeseen. Viritys EBS3 näytti myös tuottavan simulointien perusteella hyviä tuloksia pienellä ylityksellään LPK:n ollen selkeästi huonoin tuottaen suurimman ylityksen vasteeseen. QB₃ näytti sopivan paremmin käytettäväksi kaiutinelementtien kanssa, joilla ei Q_{ts} :n arvon takia voida toteuttaa SBB₄ viritystä, koska sillä oli pienempi ylitys impulssivasteissa kuin BB₄:llä. QB₃ tuottaa myös matalamman rajataajuuden viritykseen BB₄ verrattessa. QB₃ tuotti SBB₄ viritystä suuremman ylityksen impulssivasteeseen. QB₃:lla saatiin kuitenkin matalampi viritystaajuus kuin SBB₄:llä.

Mittauksissa ei saatu toistettua simuloinneissa näkyneitä selkeitä eroja impulssivasteissa virityksien välillä. Valitettavasti viritykset olivat mittausten perusteella lasketuissa impulssivasteissa niin lähellä toisiaan, ettei niitä voitu asetella selkeään paremmuusjärjestykseen. Simuloinnin perusteella olisi ollut odotettavissa, että ainakin LPK olisi erottunut suuremmalla ylityksellään impulssivasteessa. Voitiinkin siis todeta, että simulointimallin toimivuutta käytännössä ei näillä mittauksilla saatu todistettua.

Virityksien vertailun lisäksi tutkittiin vaimennusaineen lisäystä ja refleksi-putken halkaisijan pienennystä. Vaimennusaineen lisäyksellä ei näyttänyt olevan suurta vaikutusta impulssivasteeseen, mutta virityksen rajataajuus näytti siirtyvän korkeammalle taajuudelle. Rajataajuuden muutos ei kuitenkaan ollut suuruusluokaltaan kovin iso. Refleksi-putken halkaisijan pienentäminen ei myöskään näyttänyt aiheuttavan suuria muutoksia impulssivasteeseen. Pienemmällä putkella saatiin kuuluviin myös pienimutoista ääntä ilmamassan liikkeestä putkessa.

LÄHTEET

Backman, Juha (2008) Sähköakustiikka, Opetusmoniste 2008 osa 2

http://www.acoustics.hut.fi/teaching/S-89.3410/Sahkoakustiikka_k-08_osa_2.pdf

Small, Richard H, (1972). Closed-box loudspeaker system analysis part I. Audio Engineering Society

Small, Richard H, (1973a). Vented-box loudspeaker systems part I. Audio Engineering Society

Small, Richard H. (1973b). Vented-box loudspeaker systems part IV. Audio Engineering Society

Thiele, A. N. (1978). Loudspeakers in vented boxes part I. Audio Engineering Society.

Toivanen, Jarmo (1976). Teknillinen akustiikka. TKY Otapaino, Espoo

Tuomela, Pekka (1998). Tee itse hifikaiuttimia. Helsinki media erikoislehdet.

Vance. Dickason (1997). The Loudspeaker Design Cookbook. Peterborough, New Hampshire.

Wikimedia (2009) http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Helmholtz_Resonator.png

LIITE I

Seas P25REX

Fs: 27 Hz

Le: 0.6 mH

Re: 6.1 Ohms

Qms: 2.3

Qes: 0.54

Qts: 0.44

Mms: 34 g

Cms: 1.0 mm/N

Vas: 156.8 L

Sd: 350 cm²

BL: 8.5

X-max: 6.0 mm

Sensitivity 93 dB SPL

LIITE II

Exodus Audio Maelstrom-X

Fs: 17.1 Hz

Le: 0.87 mH

Re: 3.1 Ohms (Voice Coils wired in parallel)

Qms: 6.88

Qes: 0.43

Qts: 0.40

Mms: 442g

Cms: 0.19 mm/N

Vas: 383L

Sd: 1182 cm²

Vd: 7.8L

BL: 18.6

X-max: 33mm

X-mech: 40mm

Pmax: 1500W

Sensitivity 88.4dB/1W/1m

Huom: Työn valmistumisen hetkellä tuotannossa olevan elementin parametrit poikkeavat vanhemmasta versiosta, jonka parametreja käytetään simuloinneissa. Uutta elementtiä myydään nimikkeellä Maelstrom-18”

LIITE III

Seas P11RCY

Fs: 55 Hz

Le: 0.65 mH

Re: 5.7 Ohms

Qms: 1.54

Qes: 0.27

Qts: 0.23

Mms: 6.5 g

Cms: 1.3 mm/N

Vas: 5.3 L

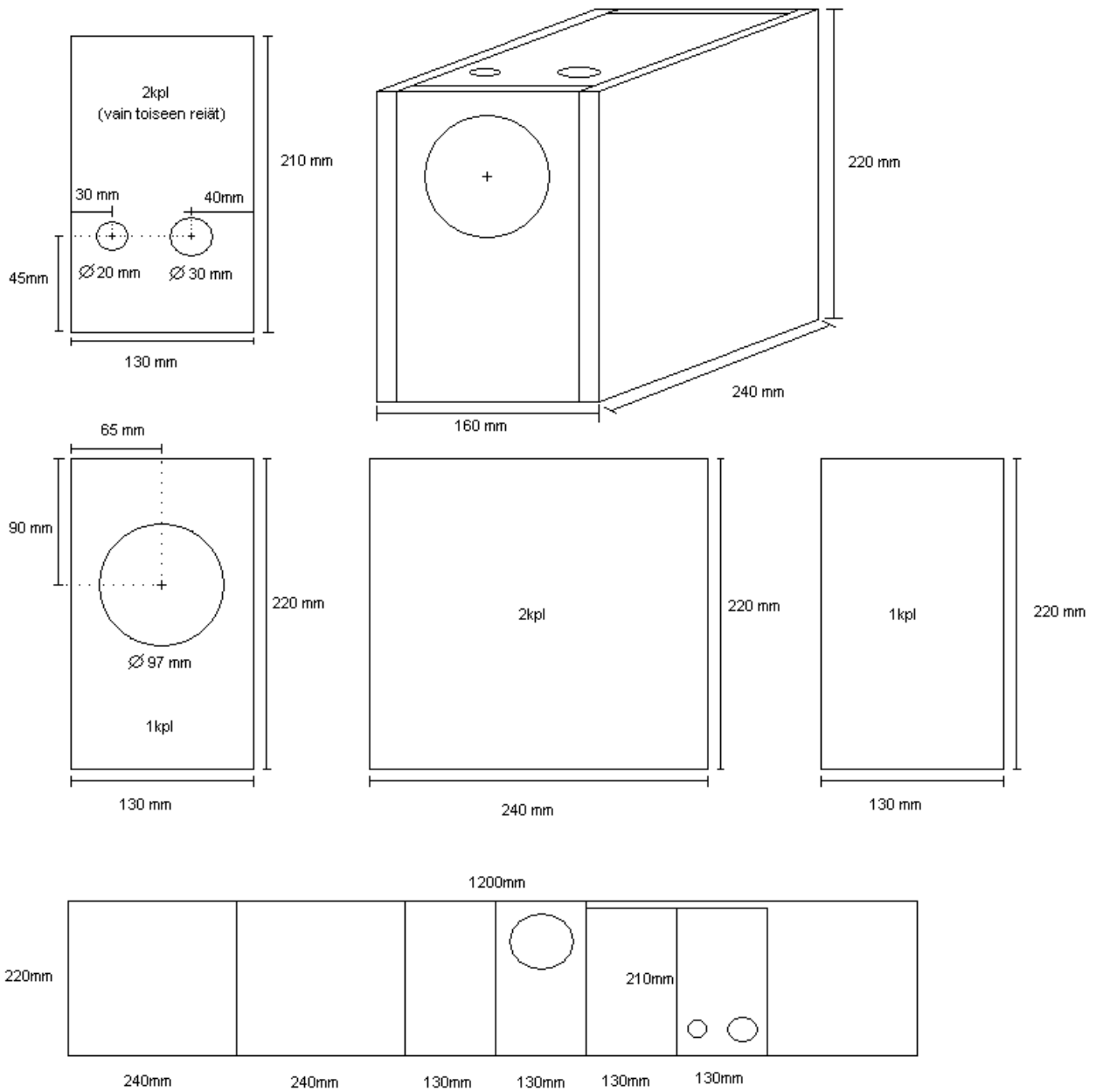
Sd: 55 cm²

BL: 7

X-max: 6.0 mm

Sensitivity 86 dB SPL

LIITE IV



LIITE V

```
%Valitaan datapisteistä tarkasteltava alue
```

```
ste=S1(23200:40000,1);  
ste2=S2(23200:40000,1);  
ste3=S3(23200:40000,1);  
ste4=S4(23200:40000,1);  
ste5=S5(23200:40000,1);
```

```
%Aikavektoreiden muodostus
```

```
t1=[0:(1/195310):((length(ste)-1)*(1/195310))];  
t2=[0:(1/195310):((length(ste2)-1)*(1/195310))];  
t3=[0:(1/195310):((length(ste3)-1)*(1/195310))];  
t4=[0:(1/195310):((length(ste4)-1)*(1/195310))];  
t5=[0:(1/195310):((length(ste5)-1)*(1/195310))];
```

```
%Derivointi
```

```
data1=diff(ste./20)./diff(t1);  
data2=diff(ste2./20)./diff(t2);  
data3=diff(ste3./20)./diff(t3);  
data4=diff(ste4./20)./diff(t4);  
data5=diff(ste5./20)./diff(t5);
```

LIITE VI

```
%Määritellään suodin  
  
N=10;  
B=ones(1,N)/N;  
A=1;  
  
%Datan suodatus  
  
ste=filtfilt(B,A,ste);  
ste2=filtfilt(B,A,ste2);  
ste3=filtfilt(B,A,ste3);  
ste4=filtfilt(B,A,ste4);  
ste5=filtfilt(B,A,ste5);
```

LIITE VII

```
% Näytteenottotaajuus

fs=195310;

% Datapisteiden määrä

N1=length(data1);
N2=length(data2);
N3=length(data3);
N4=length(data4);
N5=length(data5);

% N:nneen pisteen muunnos

temp = fft(data1,N1);
temp2 = fft(data2,N2);
temp3 = fft(data3,N3);
temp4 = fft(data4,N4);
temp5 = fft(data5,N5);

% Tarkastellaan ensimmäistä puoliskoa

fftdata = temp(1:N1/2);
fftdata2 = temp2(1:N2/2);
fftdata3 = temp3(1:N3/2);
fftdata4 = temp4(1:N4/2);
fftdata5 = temp5(1:N5/2);

% Logaritminen asteikko

m = 20*log10(abs(fftdata));
m2 = 20*log10(abs(fftdata2));
m3 = 20*log10(abs(fftdata3));
m4 = 20*log10(abs(fftdata4));
m5 = 20*log10(abs(fftdata5));

% Taajuudet hertseissä

f1 = (0:N1/2-1)*fs/(N1);
f2 = (0:N2/2-1)*fs/(N2);
f3 = (0:N3/2-1)*fs/(N3);
f4 = (0:N4/2-1)*fs/(N4);
f5 = (0:N5/2-1)*fs/(N5);
```