

Suvi Lindberg

# Virtuaaliakustinen mallinnus akustisen suunnittelun apuna

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

13.5.2013

Tekijä Otsikko	Suvi Lindberg Virtuaaliakustinen mallinnus akustisen suunnittelun apuna
Sivumäärä Aika	42 sivua 13.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	digitaalinen media
Ohjaaja	yliopettaja Harri Airaksinen
<p>Insinööriyössä tutkittiin ääniaallon peruskäsitteitä ja virtuaaliakustista mallintamista. Työn tavoitteena oli selvittää, mitä virtuaaliakustisilla mallinnusohjelmilla voidaan tehdä, kuinka realistisesti mallinnusohjelmat kykenevät laskemaan äänen kulkua tilassa ja millä tavalla mallinnusohjelmia voidaan hyödyntää akustisessa suunnittelussa.</p> <p>Insinööriyössä tarkasteltiin markkinoilta löytyviä mallinnusohjelmia, mallinnettiin viisi erilaista akustista tilannetta ja analysoitiin niistä saatuja tuloksia. Virtuaaliakustisen mallinnuksen todettiin olevan käyttökelpoinen työkalu apuna akustisessa suunnittelussa, mutta rakennusteknisiä päätöksiä ei tule tehdä puhtaasti mallinnusohjelman antamien lukujen perusteella. Akustiikan esittämisessä ja havainnollistamisessa virtuaaliakustisen mallinnuksen todettiin kuitenkin olevan erittäin hyödyllinen työkalu työskenneltäessä akustiikkaan perehtymättömien henkilöiden kanssa.</p>	
Avainsanat	virtuaaliakustiikka, akustiikka, mallintaminen

Author Title	Suvi Lindberg Virtual Acoustic Modeling Assisting in Acoustic Design
Number of Pages Date	42 pages 13 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Digital Media
Instructor	Harri Airaksinen, Principal Lecturer
<p>This Thesis deals with the basic concepts of sound waves and virtual acoustic modeling. The aim of this Thesis was to examine what can be done with virtual acoustic modeling software, how realistic are the calculations made by these softwares and how can these softwares be used in acoustic design.</p> <p>This Thesis examined different modeling softwares found in the market. Five different scenarios were modeled and the results were analyzed. Virtual acoustic modeling was found to be a useful tool in assisting acoustic design but decisions in structural engineering should not be made only by the calculations of virtual acoustic modeling softwares. In presenting and demonstrating acoustics virtual acoustic modeling it was found to be very useful when working with people who have little or no experience in acoustics.</p>	
Keywords	Virtual acoustic, acoustic, modeling

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Ääni ja akustiikka	2
2.1	Äänen peruskäsitteitä	2
2.2	Akustiikka	7
2.2.1	Absorptio	8
2.2.2	Puheensiirtoindeksi STI	10
2.2.3	Absorboivat pinnat	11
3	Virtuaaliakustinen mallinnus	14
3.1	Mallinnus ja auralisaatio	14
3.2	Mallinnusohjelmat	15
4	Mallintaminen Ecotect Analysis -ohjelmalla	20
4.1	Mallintamisen aloittaminen ja ohjelman tarkkuus	20
4.2	Mallintaminen	22
4.2.1	Tilan nurkkaan sijoitetun äänilähteen heijastukset	25
4.2.2	Äänen suuntaavuuden merkitys luokkatilassa	32
4.2.3	Äänen eteneminen sokkeloisessa tilassa	34
5	Yhteenveto	38
	Lähteet	40

## 1 Johdanto

Perehdyn insinööriopintojeni päättötyössä virtuaaliakustiseen suunnitteluun ja siihen, miten virtuaaliakustista mallintamista voi käyttää hyväksi erilaisia akustisia tiloja suunniteltaessa, miten jo olemassa olevat mallinnusohjelmat tukevat akustista suunnittelua ja miten eri tavoin ääniaaltojen etenemistä tilassa voidaan esittää, niin että se on helposti hahmotettavissa. Ajatus akustiikkaa käsittelevään insinööriyöhön syntyi kiinnostuksesta äänimaailmaa kohtaan. Insinööriyö on ennen kaikkea henkilökohtainen oppimismatka, mutta toivon sen tarjoavan myös muille jotakin uutta. Ennen kuin voi ymmärtää virtuaaliakustiikkaa, on kuitenkin ymmärrettävä pääpiirteet sekä ääniaaltojen ominaisuuksista että akustiikan perusteista. Työn ensimmäisen osuuden tarkoituksena on perehdyttää näihin peruskäsitteisiin ja varmistaa tarvittava pohja virtuaaliakustisten mallinnusohjelmien ymmärtämiseen, joita käsitelen työn toisessa osassa.

Akustisessa suunnittelussa otan huomioon ainoastaan huoneakustiikkaan liittyvät rajoitukset, sillä akustiikka kokonaisvaltaisena käsitteenä on erittäin laaja ja vaatisi laajempaa perehtymistä. Huoneakustiikan osa-alueista jätän myös huomioimatta mahdolliset ilmanvaihtokanavista ja esimerkiksi hisseistä aiheutuvat erilaiset taustääänet, sillä ne kuuluvat enemminkin rakennusakustisen suunnittelun puolelle.

Pyrin työssäni selvittämään äänen erilaiset aspektit ja mallintamaan Autodesk Ecotect Analysis -ohjelman avulla äänen kulkua erilaisissa suljetuissa tiloissa. Työn kolmas ja viimeinen osuus koostuu omista kokemuksistani ja päätelmistäni, jotka pohjautuvat työskentelyyn mallinnusohjelman kanssa. Pohdin myös, miten äänilähteen sijainti vaikuttaa äänen kuuluvuuteen, miten huoneen akustiikkaan voi vaikuttaa ja miten se tulee ottaa huomioon huoneen eri käyttötarkoituksia pohdittaessa.

## 2 Ääni ja akustiikka

### 2.1 Äänen peruskäsitteitä

Monimuotoinen äänimaailma on osa jokapäiväistä elämää ja kykenemme tunnistamaan tuhansia ääniä ja erottamaan niitä toisistaan. Jotkin äänet kykenemme jättämään huomiotta, toiset äänet taas kiinnittävät huomiomme. Täydellinen hiljaisuus voi olla epäluonnollinen tila, lähes utopistinen, sillä jo pelkästään yksinkertaisessa asunnossa on lukuisia äänilähteitä, jotka kuulemme ainoastaan, kun oikeasti keskitymme kuuntelemaan. Harva kuitenkaan osaa tarkasti kertoa, mitä ääni on ja miten kuuloaistimus syntyy.

Ääni syntyy, kun staattisessa vallitsevassa ilmanpaineessa tapahtuu vaihtelua. Ilmassa esiintyy tällöin ilmamolekyylien tihentymiä ja laajentumia, jotka aiheutuvat äänilähteen värähtelystä. Tämä ääni etenee pitkittäisaaltona ympäristöön. [1, s. 35.] Ääniaalto etenee ketjureaktion ansiosta, kun ilmamolekyylit tönivät toisiaan edestakaisin [2]. Kun äänen aiheuttama ilmanpaineen vaihtelu saapuu korvaan, se saa korvan rumpukalvon värähtelemään. Ääniaallon taajuus määrää, miten nopeasti rumpukalvo värähtelee, ja juuri taajuus määrää, millaisena ääni kuullaan. [1, s. 35.]

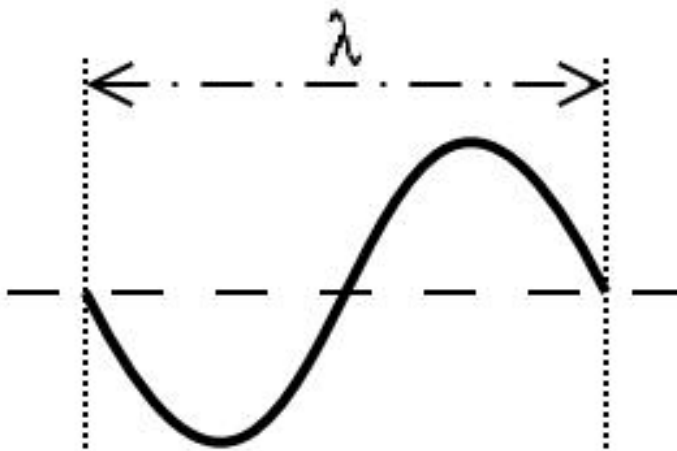
Taajuus  $f$  kuvaa ilmanpaineen tihentymien ja harventumien määrää sekunneissa, ja se ilmoitetaan hertseinä, Hz. Tiheät värähtelyt kuullaan korkeina ääнинä, ja pienitaajuiset värähtelyt kuullaan matalina ääнинä. Taajuus voidaan laskea kun, tiedetään värähtelyiden määrä  $n$  ja aikajakso  $T$ [s], jolloin värähtelyt havaitaan kaavan 1 mukaisesti.

$$f = \frac{n}{T} \tag{1}$$

Ihminen kykenee kuulemaan ääniä, jotka ovat taajuudeltaan 20–20 000 Hz, tätä kutsutaan kuuloalueeksi. Infraääniksi kutsutaan alle 20 Hz:n taajuuksia, jotka voidaan aistia tärinänä. [1, s. 35.] Ultraäänistä puhutaan, kun äänen taajuus on yli 20 000 Hz ja ihminen ei enää kykene niitä aistimaan. Yleinen esimerkki ultraäänistä on lepakko ja sen suunnistuksessa käyttämät erittäin lyhyet naksahdukset, joiden kesto on vain noin 30–40 millisekuntia. Ultraäänit eivät yleensä ole kuulolle haitallisia. [3.]

Ääni voi edetä ilman lisäksi myös väliaineessa, mutta ei tyhjiössä. Ilmaääni etenee nimensä mukaisesti ilmassa, ja sen nopeus on riippumaton taajuudesta. [1, s. 36.] Ihmisen puhe etenee lähes aina ilmaäänenä, samoin kuin eri soittimien ja kotoa löytyvien elektroniikkalaitteiden aiheuttamat äänet [4, s. 27]. Tämä ilmaääni saa väliaineen, esimerkiksi kiinteän seinän, värähtelemään, jolloin ääni etenee seinän rungossa sen läpi taivutusaaltona [1, s. 36]. Taivutusaalto synnyttää rakenteissa taipumia, jotka ovat kohdistuorassa äänen etenemissuuntaan nähden. Runkoääntä taas aiheuttavat esimerkiksi kävely ja muut lattiaan kohdistuvat äänet. [4, s. 28.] Äänen nopeuteen vaikuttaa kuitenkin lämpötila: äänennopeus kasvaa, kun lämpötila nousee [5]. Huonelämpötilassa ilmassa etenevän äänen nopeus on 340–345 metriä sekunnissa [1, s. 36].

Ääniaallon pituus  $\lambda$  saadaan mittaamalla yhden jakson pituus. Pisteet voidaan valita mistä kohtaa aaltoa tahansa, kunhan ne ovat keskenään samassa vaiheessa. Ääniaalto piirretään usein kaksiulotteiseksi aalloksi, jolloin tihentymiä kuvaavat aallon huiput ja harventumia aallon matalat kohdat. Tosin vain harva äänilähde antaa kuvan 1 näköisen puhtaan sinikäyrän, sillä yleensä perusäänen mukana äänilähde tuottaa erilaisia yliaä-neksiä [5, s. 163].



Kuva 1: Aallonpituus  $\lambda$  on yhden jakson mittainen [6].

Aallonpituus  $\lambda$  saadaan määritettyä jakamalla äänen nopeus  $c$  sen taajuudella  $f$ , jolloin yhtälö näyttää tältä:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Esimerkiksi 20 Hz:n taajuudella ääniaallon pituus on jopa 17 metriä, kun taas 10 000 Hz:n taajuus tuottaa 3,4 cm:n pituisen aallon. [4.]

Äänenä aistittavat ilmanpaineen vaihtelut eli äänenpaineen vaihtelut ovat hyvin pieniä lukuarvoja ilmakehän ilmanpaineen ollessa noin 100 kPa, joten käytännöksi on tullut kuvata äänen voimakkuutta logaritmisella desibeliasteikolla [dB], jossa kuulokynnyksen alarajalle on asetettu arvo 0 desibeliä ja kipukynnyksen rajaksi 120–130 desibeliä [1, s. 36]. Desibeliasteikko auttaa hahmottamaan äänen voimakkuutta ja sen muutoksia. Fysiikkaa harjoittamattoman on helpompi sisäistää 0 dB sen sijaan, että kuulokynnyksen alarajan ilmoitettaisiin olevan 0,0002 Pa 1000 Hz:n taajuudella. [7.]

Kuvassa 2 esitellään suuntaa antava desibeliasteikko, jossa on esitetty yleisiä ääniä ja niitä vastaavat desibeliarvot. Vaikka 85 dB on kaukana varsinaisesta kipurajasta, on voimakkaalle äänelle pitkäaikainen altistuminen haitallista. Moni joka on viettänyt lauantai-iltaansa meluisassa tanssiravintolassa, on saattanut kokea aamuyön tunteina nukahtamisen vaikeaksi korvien soimisen takia. Mitä pidempiaikaista altistuminen on ja mitä suuremmalle melulle altistutaan, sitä suuremmaksi kuulojärjestelmän vaurioitumisen riski kasvaa [8].

<b>DESIBELIASTEIKKO ARKIELÄMÄN ÄÄNILLE</b>	
<b>0 dB</b>	kuulokynnys
<b>10 dB</b>	lehtien havina
<b>20 dB</b>	tyhjän studion kohinat
<b>30 dB</b>	kodin pohjahäly
<b>40 dB</b>	konserttisalissa hiljaisin pianissimo
<b>50 dB</b>	hiljainen keskustelu
<b>60 dB</b>	kovaääninen keskustelu
<b>70 dB</b>	radion kuuntelu- voimakkuus, keskim.
<b>85 dB</b>	diskon meluraja
<b>100 dB</b>	telakka, kova melu katupora
<b>130 dB</b>	kipuraja
<b>yli 130 dB</b>	kuulolle vaarallinen melu

Kuva 2: Vakiintuneita desibeliesimerkkejä [7].



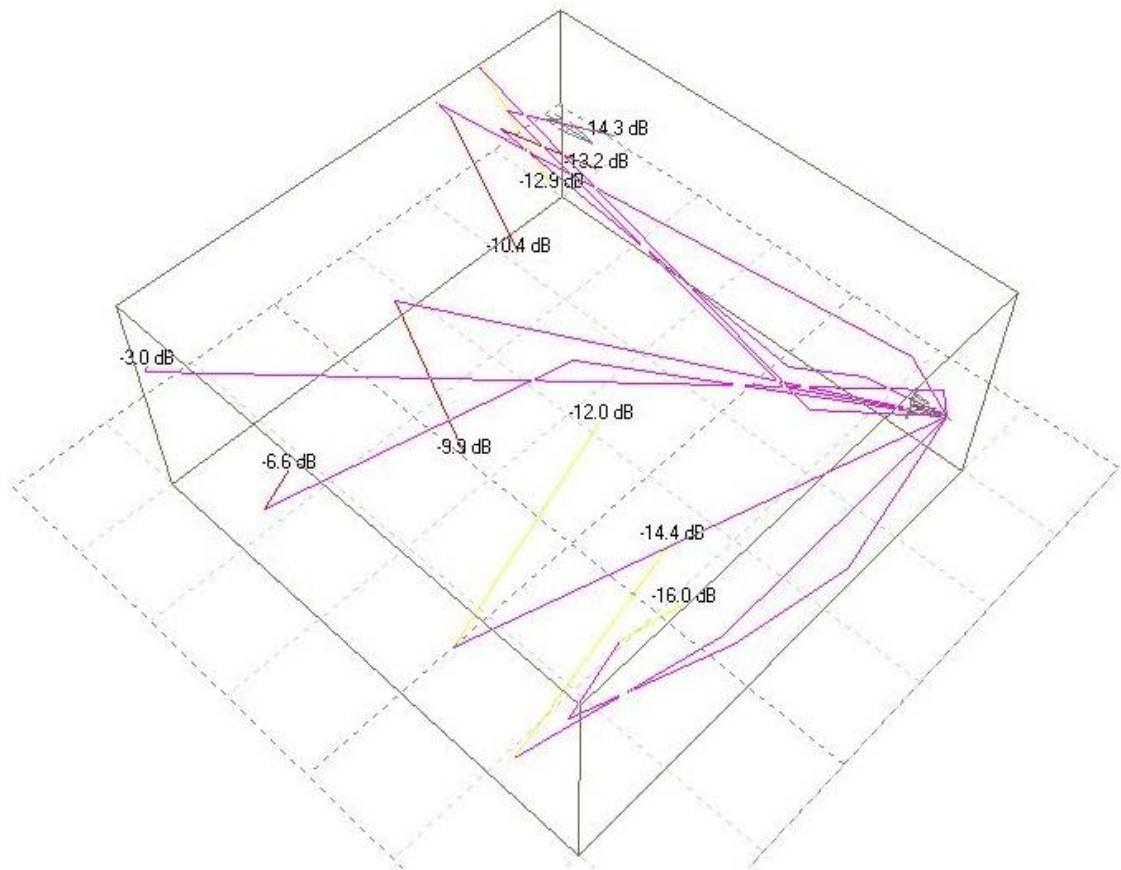
Desibeliasteikon logaritmisuus tulee ottaa huomioon esimerkiksi kotiteatterin kaiuttimia asennettaessa. Jos asennetaan kaksi kaiutinta, jotka tuottavat molemmat 70 dB:n äänenpainetaso, on niiden yhdessä tuottama äänenpainetaso 3 dB korkeampi. Jos taas kaiuttimien äänenpainetasojen ero on suurempi kuin 10 dB, niiden yhdessä tuottama äänenpainetaso määräytyy voimakkaamman kaiuttimen perusteella. [1, s. 37.]

Jos pascaleina ilmoitettu äänenpaine kaksinkertaistuu, ihmiskorvaan se kuulostaa ai-noastaan hieman voimakkaammalta. Kuuloaistin avulla kaksinkertaiseksi arvioitu ääni vastaa desibeliasteikolla noin 10 dB:n nousua. [9, s. 28–30.] Tämän vuoksi desibeliasteikko on saavuttanut niinkin vakiintuneen jalansijan, että lähes kaikki, myös äänimaailmaan perehtymättömät, tuntevat sen terminä.

Usein ääntä toistavia laitteita hankittaessa saa lukea ominaisuuksissa mainittavan äänitehon, jolla ilmoitetaan laitteen ympäristöön tuottaman melupäästön määrä. Ääniteho  $W$  kertoo äänilähteen tuottaman kokonaisäänienergian sekuntia kohti. Jakamalla ääniteho pinta-alalla saadaan äänen intensiteetti  $I$ . [1, s. 41–44.] Kun etäisyys äänilähteestä kasvaa, äänienergia hajaantuu suuremmalle pinta-alalle, jolloin intensiteetti pienenee ja ääni vaimenee. Intensiteetti riippuu myös äänilähteen suunnasta, ja lähes kaikki äänilähteet ovat jossain määrin suuntaavia [10, s. 1]. Sisätiloissa oltaessa suuntaavuudella on merkitystä, jos ollaan hyvin lähellä äänilähdettä. Liikuttaessa kauemmas äänilähteestä äänikenttä tasoittuu heijastusten ansiosta. [1, s. 41–44.]

Ilmassa ääni etenee, kunnes se törmää esteeseen, kuten kiinteään seinään tai ikkunanverhoihin. Osa äänestä jatkaa kulkuaan väliaineessa, osa absorboituu eli vaimenee, ja osa heijastuu esteestä takaisin. [1, s. 46–49.] Jos kaikki ääni heijastuisi takaisin eikä siitä absorboituisi yhtään, korottaisivat heijastuneet äänet äänenpainetasoa, jolloin se kasvaisi äärettömän suureksi [4, s. 41]. Ääniaallon ensimmäistä heijastumista pinnalta kutsutaan varhaiseksi tai aikaiseksi heijastukseksi. Tällöin ääni saapuu kuuntelupaikalle vain yhden pinnan, kuten seinän tai lattian kautta. Suoran äänen ja tämän ensimmäisen heijastuksen kulkemat matkat ovat melko lähellä toisiaan, ja äänet saapuvatkin lähes yhtä voimakkaina ja samanaikaisesti kuuntelupaikalle, muutaman millisekunnin erolla, jolloin ihminen ei aisti heijastunutta ääntä kaikuna. [6.]

Kuvassa 3 varhaiset heijastukset näkyvät keltaisina ja punaisina viivoina. Alkuperäinen äänilähde sijaitsee huoneen nurkassa. Selkeyden vuoksi, kuvan äänilähde tuottaa ai-noastaan kymmenen ääniaaltoa.



Kuva 3: Varhaisia heijastuksia pinnalta.

Keltaiset heijastukset ovat käyttökelpoisia, sillä niiden voimakkuus ei ole merkittävästi laskenut alkuperäisestä 6 dB:stä. Ne saapuvat keskellä huonetta seisovan kuulijan korvaan lähes samanaikaisesti alkuperäisen äänen kanssa, vain pienellä viiveellä, eivätkä ole erotettavissa alkuperäisestä äänestä. Punaiset viivat ovat heijastuneet useammalta pinnalta ja näin heikentyneet alkuperäisestä voimakkuudesta huomattavasti.

Kun kuuntelupaikalle tulee ääntä heijastuneena useilta rajapinnoilta ja eri aikoina, puhutaan jälkikaiunnasta. Jos ääni on ehtinyt myös matkalla vaimentua huomattavasti, on se myös ihmisen kuuloaistin havaittavissa. [11.] Toisaalta jälkikaiunta-aika  $T$  [s] kertoo, kuinka nopeasti tilan äänenpainetaso laskee, kun äänilähde sammutetaan. Tämän ajan kuluessa äänenpainetaso laskee 60 dB. Tämä pystytään määrittelemään ainoastaan testaamalla tilakohtaisesti voimakkaan äänilähteen avulla ja mittaamalla samanaikaisesti äänenpainetasomittarilla (desibelimittari). Mitä lyhyempi jälkikaiunta-aika, sitä nopeammin puheen tavut vaimenevat. Jälkikaiunta-ajan lyhentäminen saattaa parantaa

ääniolosuhteita vain tiettyyn pisteeseen asti, jolloin äänitaso laskee taustamelun tasolle ja näin ollen vaikeuttaa puheen erottuvuutta. [1, s. 50.] Jälkikäytäntö-aikaan liittyviä laskentakaavoja käsitellään tarkemmin Absorptio -luvussa (2.2.1).

## 2.2 Akustiikka

Akustiikasta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä tilojen huoneakustiikkaa: miten puhujan ääni kantaa tilan läpi tai kuinka auditorio sopii musiikkitapahtuman järjestämiseen. Tarkoituksenmukaisessa tilassa esiintyjän on helpompaa puhua niin, että kuulija saa puheesta selvää. Huolimatta yleisestä assosiaatiosta on akustiikka käsitteenä huomattavasti laajempi. Huoneakustiikan lisäksi akustiikan osa-alueita ovat rakennusakustiikka, meluntorjunta ja tärinänvaimennus. Meluntorjunta ja tärinänvaimennus kuuluvat rakennusakustisuunnitteluun, vaikka joitakin meluhaittoja pysytäänkin torjumaan myös jo olemassa olevissa tiloissa. [1, s. 24.] Lisäksi akustiikka erotellaan fysikaaliseen akustiikkaan, johon sisältyvät kaikki juuri luetellut akustiikan osa-alueet, psykoakustiikkaan ja sähköakustiikkaan. Psykoakustiikka tutkii kuuloaistia ja kuulohavaintoja ja sähköakustiikka taas erilaisia ääneen liittyvien sähköisten laitteiden ominaisuuksia. [12.]

Akustiikkaan kiinnitetään usein huomiota vasta siinä vaiheessa, kun se on häiritsevän huono: luokkatilassa opettajan ääni ei kanna luokan perälle asti tai naapurin askeleet rappukäytävässä kaikuivat makuuhuoneeseen asti. Monet näistä ongelmista kuuluvat rakennusakustisen suunnittelun puolelle, mutta kaiken akustisen suunnittelun lähtökohdaksi on ihmiselle haitallisen melun poistaminen tai vähentäminen. On myös kustannustehokkaampaa kiinnittää akustiikkaan huomiota jo rakennusvaiheessa, kuin lähteä tekemään suuriakin korjaustöitä jälkepäin. Luomalla tilaan hyvät ääniolosuhteet edistetään tilan toimintaa. Monissa tapauksissa on helpompaa vahvistaa jo olemassa olevaa ääntä, kuin vaimentaa sitä. [1, s. 9–13.]

Huoneakustiikka pyrkii hallitsemaan äänen kulkua, heijastumista ja vaimenemista tilan sisällä. Tilaan tulee käyttötarkoituksen perusteella sijoittaa sekä heijastavia että vaimentavia pintoja. Heijastavat pinnat auttavat äänen kulkeutumisessa kuulijalle, ja vaimentavat pinnat pyrkivät vähentämään tilassa tapahtuvaa kaiuntaa. [1, s. 158.] Akustisella suunnittelulla pyritään myös poistamaan melun aiheuttamat häiriötekijät. Melu määritellään usein ei-toivotuksi ääneksi, joka häiritsee ihmisten toimintaa. Ympäristö usein määrittelee, mikä ääni koetaan meluksi: tietty ääni voidaan kokea meluksi vasta

yöaikaan, kun se huomattavasti häiritsee nukahtamista ja unenlaatua. Melu onkin fyysikaalinen ilmiö yhdistettynä ihmisen subjektiiviseen kokemukseen, ja siitä saattaa seurauksena olla fysiologinen haitta. [1, s. 10-12.] Vaikka melun kokemukset voivat olla hyvinkin yksilöllisiä, on yleisenä käytäntönä suorittaa melua aiheuttavat toimenpiteet, esimerkiksi työmaaraajäytykset, päiväsaikaan.

Vaikka huonetilan akustiikasta puhutaan usein hyvänä tai huonona, eivät ilmassa etenevät äänet ole kumpaakaan. Ne ovat ainoastaan puhtaasti erilaisia akustisia ääniä, joiden paremmuutta ei voi millään ihmisen luomalla asteikolla mitata. [13.]

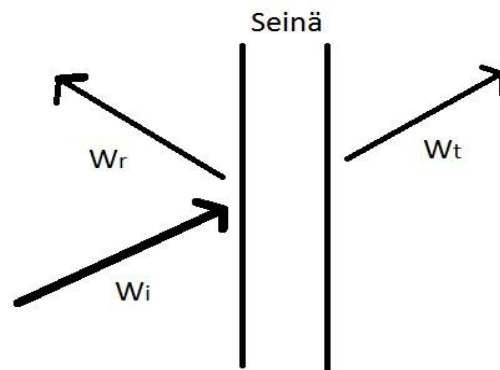
Akustiikan parantamista huonetilassa kutsutaan akustoinniksi. Akustoinnin lähtökohtana on erilaisilta pinnoilta tapahtuvien heijastusten ja kaiun vähentäminen. Tämä tulee toteuttaa niin, että jäljelle jäävä kaiunta on eri taajuuksilla mahdollisimman tasais- ta, mutta niin, ettei mikään taajuualue ei vaimennu liikaa. [11.]

### 2.2.1 Absorptio

Absorptio on eräs huoneakustiikan parantamiseen käytettävä keino. Absorption tarkoituksena on vaimentaa huonetilan sisällä syntyvää ääntä vähentämällä äänen heijastumista pinnoilta. Absorptiota ei tule sekoittaa huoneiden välille tehtävään äänieristykseen, joka on tiiviiden rakenteiden ominaisuus ja harvoin tehtävissä jälkikäteen. Absorptiosta puhuttaessa käytetään eri absorptiopintoja määrittelevää absorptiosuhdetta  $\alpha$ , joka on yksikötön. Absorptiosuhde kertoo, kuinka suuren määrän äänestä pinta absorboi. [1, s. 46.]

Äänen absorptiosuhde  $\alpha$  pystytään selvittämään, kun tiedetään kuvan 4 tapauksessa seinään kohdistuva ääniteho  $W_i$ , rakenteesta takaisin heijastuva ääniteho  $W_r$  ja seinän toiselle puolelle kulkeutuva ääniteho  $W_t$ . Tällöin saadaan lauseke

$$\alpha = \frac{W_i - W_r}{W_i} \quad (3)$$



Kuva 4: Äänitehon heijastuminen rakenteesta.

Absorptiosuhde voi saada arvoja  $0 \leq \alpha \leq 1$ , jolloin 0-kertoimen saanut pinta heijastaa kaiken siihen osuvan äänen. [1, s. 46–48.] Hyvin absorboivan pinnan kertoimen tulee olla suurempi kuin 0,8 [14]. Hyvin harva pinta heijastaa sataprosenttisesti kaiken äänen takaisin, joten esimerkiksi massiivisen kiviseinänkin absorptiosuhde on noin 0,05 [1, s. 46–48]. Suuri absorptiosuhde ei myöskään takaa hyviä ääniolosuhteita, sillä useimmissa puhetilaisissa tarvitaan pintoja, joista ääni heijastuu kuulijalle.

Absorptioala  $A$  on huoneakustiikan keskeisimpiä termejä, ja sen antama informaatio on absorptiosuhdetta tärkeämpi. Absorptioala kertoo tilassa olevien absorptiomateriaalien kokonaismäärän neliömetreinä. Yksikköä merkitään [ $\text{m}^2 \cdot \text{Sab}$ ] erottamaan se tavallisesta pinta-alasta. Absorptioala ei ole sama kuin materiaalin pinta-ala, vaan absorptioalaa laskettaessa on otettava huomioon absorptiosuhde. Esimerkiksi jos absorptiomateriaalin absorptiosuhde on 0,6 ja sen pinta-ala on  $10 \text{ m}^2$ , tulee materiaalin absorptioalaksi tällöin  $0,6 \text{ m}^2 \cdot \text{Sab}$ . [1, s. 49.]

Kun tilan jokaisessa pisteessä vallitsee sama äänenpainetaso, puhutaan diffuusista äänikentästä. Tällainen tilanne on mahdollinen ainoastaan kuutionmallisessa ja kovapintaisessa tilassa. Kuution särmien tulee myös olla huomattavasti pidemmät kuin tutkittavan äänen aallonpituus, jotta aalto mahtuu kulkemaan tilassa. Tällaista keinotekoisesti luotua tilaa voidaan käyttää kaiuntahuoneena erilaisissa tutkimuksissa. [1, s. 50.]

Diffuusin äänikentän jälkikaiunta-aikaa laskettaessa voidaan käyttää Sabinen kaavaa:

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (4)$$

jossa  $V$  kertoo tilan tilavuuden ja  $A$  absorptioalan. Sabine'n kaava käy yleensä riittävällä tarkkuudella myös muiden tilojen jälkikaiunta-ajan laskemiseen, poisluettuna suuret ja voimakkaasti absorboivat tilat, kuten avotoimistot tai kirjastot. Sabine'n kaavan antama tulos on myös vääristynyt silloin, kun tilan kaikki absorboiva materiaali on sijoitettuna esimerkiksi yhdelle seinustalle ja muut pinnat ovat täysin heijastavia. [1, s. 50.]

Jälkikaiunta-aika on pitkälti riippuvainen taajuudesta, mutta yleisesti käytetään taajuuden arvoa 500 Hz antamaan suuntaa antava arvo. Taulukossa 1 esitetään yleisiä keskiarvoja jälkikaiunta-ajoissa. Kivikirkossa tulee puhua melko rauhalliseen tahtiin, jotta sanat eivät puuroutuisi kaiun vuoksi. Elokuvateatterin penkit ja verhoillut seinät parantavat elokuvaelämystä absorboimalla ääntä ja vähentämällä kaikua.

Taulukko 1. Jälkikaiunta-aikoja noin 500 Hz:n taajuudella [1, s. 50].

Jälkikaiunta-aika	Esimerkki tilasta
> 5 s	kivikirkko tyhjänä
1,8 - 2,2 s	konserttisali
1,5 s	kalustamaton makuuhuone
0,5 s	kalustettu makuuhuone
0,3 - 0,8 s	elokuvateatteri
0,2 - 0,3 s	äänitarkkaamo

### 2.2.2 Puheensirtoindeksi STI

Puheen erotettavuuteen huonetilassa vaikuttavat monet tekijät. Puhujan äänitason ja taustamelun välisen eron tulee olla riittävän suuri, jälkikaiunta-ajan tulee olla juuri kyseiseen tilaan sopiva ja puhujan tulee mielellään suunnata puhe kohti kuulijoita ja olla heistä sopivan etäisyyden päässä. Puheensirtoindeksi STI (Speech Transmission Index) on kehitetty mittaamaan puheen erotettavuutta puhujan ja kuulijan välillä. [1, s. 55.]

Puheensiirtoindeksi STI määräytyy kansainvälisen IEC (International Electrotechnical Commission) -standardin 20268–16 [30] mukaan. Lukuarvo vaihtelee välillä 0,00 – 1,00, ja se esittää puheen siirron laatua. Mitä suurempi luku on, sitä parempi puheen erotettavuus on. Jotta puhe olisi täydellisesti erotettavissa, sen on saatava STI-arvoksi vähintään 0,75. Maksimiarvo 1,00 on mahdollista saavuttaa ainoastaan sisätiloissa puhujan välittömässä läheisyydessä. Vastaavasti puheesta, joka on saanut minimiarvon 0,00, ei saa selvää tavuakaan. Puheensiirtoindeksiä käytetään erityisesti, kun arvioidaan opetus- ja puhetiluja, jolloin pyritään mahdollisimman korkeaan STI-lukuun. Pieneen STI-lukuun taas pyritään suunniteltaessa esimerkiksi avotoimiston työpisteitä, jotta mahdollistetaan työntekijöille mahdollisimman rauhallinen työtila. Tällaisessa tilanteessa STI-arvosta käytetäänkin termiä puheyksityisyys tai hyvä puheenpeitto. [1, s. 55–56.]

### 2.2.3 Absorboivat pinnat

Tilan kaiuntaa ja äänen heijastumista voidaan vähentää erilaisilla absorptiomateriaaleilla. Kaikki tilaan sijoitetut esineet ja huonekalut absorboivat jonkin verran ääntä, sillä täysin heijastavia materiaaleja ei tavallisesti tiloja rakennettaessa kuitenkaan käytetä. Suurissa ja niukasti sisutetuissa tiloissa, kuten luokkatiloissa, tarvitaan kuitenkin usein pöytien ja tuolien lisäksi ylimääräistä absorptiopintaa. Jälkikaiunta-ajan lyhenemisen lisäksi absorboiva pinta omalta osaltaan myös parantaa tilan ääneneristävyyttä [1, s. 88].

Absorboiva pinta on rakenne, jonka pinnalla on huokoinen materiaalikerros. Huokoisia materiaaleja ovat esimerkiksi mineraalivilla ja paksut tekstiilit, ja näiden lisäksi käytetään myös ruiskutteita. Näiden kaikkien absorptio perustuu siihen, että ahtaissa kuiturakenteissa ääniaallon energia muuttuu kitkan vuoksi lämmöksi. Parhaiten huokoinen materiaali absorboi yli 4 000 Hz:n taajuuksia, kun aallonpituus on yli 80 mm. [1, s. 149.]

Reiitetyt levyt eli akustiikkalevyt ovat yleensä kipsilevyä, vaneria tai puukipsilevyä, ja niiden taustalla on ilmaa läpäisevä huopa. Reikälevyn absorptiokyky perustuu massajousijärjestelmään, jossa reiässä oleva ilma toimii massana ja ilmavälissä oleva ilma jousena. Absorptiosuhde riippuu ilmavälin paksuudesta, reiän koosta ja reikien lukumäärästä, levyn paksuudesta ja reiän muodosta. [1, s. 150–151.]

Reikälevyt asennetaan usein kattoon tai seinille. Nykyään näkee reikälevyjä käytettävän myös sisustuselementteinä. Kuten kuvasta 5 voi nähdä, levyihin voi painattaa lähes minkälaisia kuvioita tahansa.



Kuva 5: Vasemmalla: reikälevyn taakse asennetaan huopaa. Oikealla: reikälevyä saa myös erilaisin painatuksin. [15.]

Kuvan 5 kuviot on teetetty varta vasten tanskalaisen päiväkodin tarpeisiin, jonka toiveena oli, että akustiikkapaneelit saataisiin yhdistettyä sisustukseen [15].

Mikrorei'itetyissä levyissä reiän koko on alle 1 mm. Mikrorei'itetty levy eroaa tavallisesta reikälevystä siten, että kun reiät ovat pienempiä, myös ilmavastus reiässä kasvaa korkeammaksi ja näin ollen levyn takana ei tarvita huopaa. Mikrorei'itetyn levyn absorptiokyky on hieman tavallista reikälevyä pienempi, mutta käyttämällä läpinäkyvää levyä se saadaan melko näkymättömäksi. [1, s. 151.]

Levyresonaattorit ovat rei'ittämättömiä levyjä, joiden takana on tyhjä tai mineraalivillalla täytetty ilmaväli. Matalille taajuuksille levyresonaattorit toimivat absorboivina materiaaleina, mutta korkeat taajuudet ne heijastavat takaisin. Tällaisina levyresonaattoreina toimivat yleisesti ovet ja ikkunat. Jos levyn takana oletetaan olevan levyyn verrattuna jäykkää materiaalia, voidaan levyresonaattorin ominaistaajuus  $f_0$  laskea kaavalla

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad (5)$$

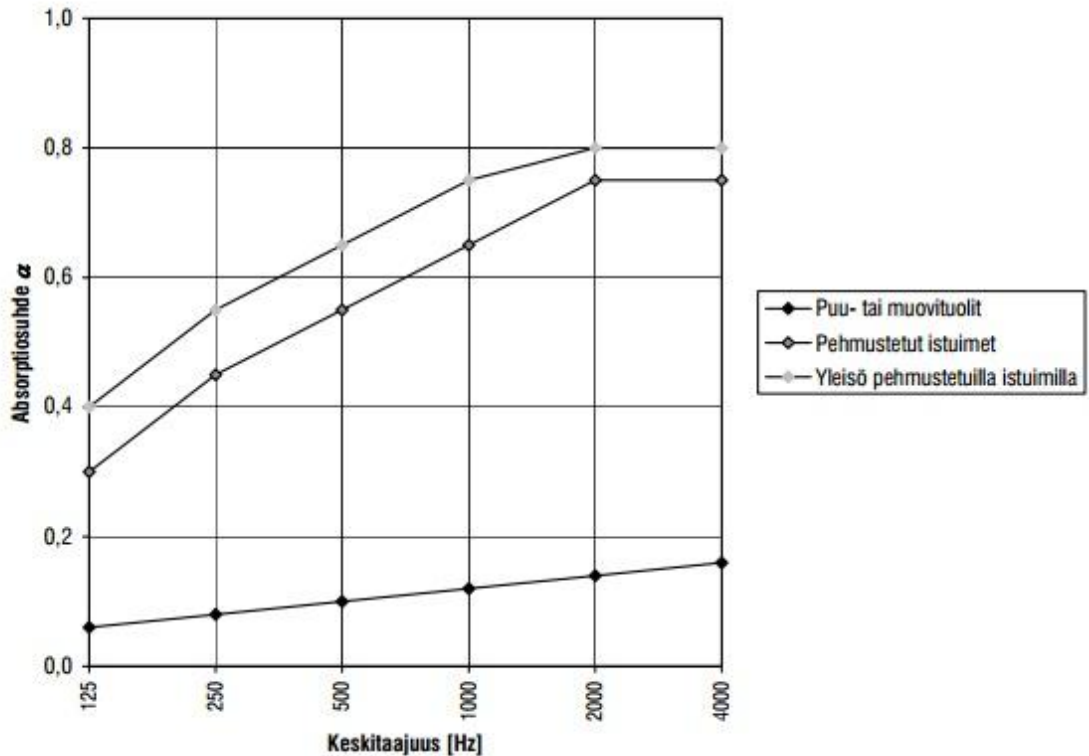
jossa  $m'$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] on levyn pintamassa ja  $d$  [m] on ilmaväli. Ominaistaajuus  $f_0$  on sitä alhaisempi, mitä suurempia pintamassa ja ilmaväli ovat. Jos ilmaväli on täytetty huokoisella materiaalilla, absorptiosuhde on yleensä hieman korkeampi. Levyresonaattori vaatii toimiakseen myös, että levyn takana oleva ilmatila on tiiviisti suljettu. Jos siinä on



aukkoja, menetetään ilman jousivaikutus ja absorptiosuhde määräytyy levyn materiaalin mukaan. Jos levyresonaattorin massa kasvaa liian suureksi, se menettää absorptiokykynsä, vaikka sen takana olisi ilmaväli. Kun levyn pinta on lisäksi kova ja tiivis, se toimii ennemminkin heijastajana. Tällaisia ovat esimerkiksi tiiliseinät ja betonirakenteet, joiden absorptiosuhde on alle 0,2. [1, s. 152–154.]

Usein huonetilan kaiuntaa pyritään vähentämään sisustamalla. Verhot, pehmustetut tuolit tai kirjahyllyt toimivat kotioiloissa erittäin hyvin absorptiomateriaaleina. Myös auditorio-tiloja suunniteltaessa tulee olla tiedossa penkkien materiaali, ennen kuin pohditaan mahdollisten akustiikkalevyjen tarvetta. Suurissa tiloissa kalustuksella ja etenkin yleisöllä on suuri vaikutus jälkikaiunta-aikaan. Yleisön absorptiosuhde voi olla ratkaiseva tekijä, ja mitä suurempi tila on, sitä enemmän väkeä se vetää. Vaativat tilat tulisikin suunnitella niin, että akustiset olosuhteet pysyisivät mahdollisimman samoina riippumatta siitä, onko tilassa yleisöä vai ei. [1, s. 153–154.]

Kuvasta 6 voidaan todeta, kuinka suuri absorptiosuhteen ero on puu- tai muovituoleilla ja pehmustetuilla istuimilla. Ero korostuu sitä enemmän, mitä suuremmille taajuuksille mennään. Esimerkkinä voidaan esittää skenaario suomalaisille tutusta jääkiekon maailmasta. Kaikki, jotka ovat käyneet jäähallissa sen ollessa lähes täysi ja istuneet hyvin tiiviisti sijoitetuilla muovituoleilla, tietävät, kuinka kova hälinä jääkiekkohallissa voi olla. Tästä hälinästä huolimatta kiekon kolahtamisen jääkiekkoilijan lapaan voi kuulla hyvin selkeästi, vaikka suuri ihmismassa absorboikin osan äänestä. Jos kuvitellaan, että Hartwall Areenan kaikki 13 000 katsojaa istuisivat pehmustetuilla penkeillä päällään paksut takit, olisiko mahdollista edes kuulla toisella puolella hallia raikuvaa kannatuslaulua? Vaikka pehmustettu tuoli tekisi ottelun fyysisestä katselukokemuksesta mukavamman, veisi pehmustetuista tuoleista johtuva absorptiosuhteen kasvu suuren osan elämyksestä ja hallissa vallitsevasta tunnelmasta.



Kuva 6: Yleisöalueen vaikutus äänen absorptioon. Riviväli 0,9–1,2 m [1, s. 154].

Ilma absorboi myös jonkin verran ääntä, mutta käytännössä sillä on merkitystä ainoastaan suurissa tiloissa ja suurilla taajuuksilla. Ilman absorptio riippuu myös lämpötilasta ja suhteellisesta ilmankosteudesta. Kuivalla ilmalla kaiunta on suurilla taajuuksilla vähäisempää. [1, s. 155.]

### 3 Virtuaaliakustinen mallinnus

#### 3.1 Mallinnus ja auralisaatio

Virtuaaliakustisella mallinnuksella simuloidaan tietokoneohjelman avulla ääniaaltojen etenemistä tilassa. Pyrkimyksenä on simuloida tilan akustiset ominaisuudet mahdollisimman realistisesti ja visuaalisesti jo suunnitteluvaiheessa. Mallinnettu tila pyritään esittämään mahdollisimman selkeästi, jotta akustiikkaan perehtymätönkin kykenee hahmottamaan tilan tapahtumat. [1, s. 169.] Virtuaaliakustinen mallinnus koostuu yleensä kolmesta osasta: mallinnettavasta tilasta, äänilähteestä ja kuuntelijasta [16, s. 18].

Käsite auralisaatio on hyvin tiukasti sidoksissa akustiseen mallintamiseen. Auralisaatio on tekniikka, jonka avulla mallinnettu ääni voidaan kuunnella [15]. Auralisaation tavoitteena on vaikutelman luominen tilan akustisista ominaispiirteistä, äänistä ja niiden sijainnista sekä kuulijan sijainnista. Jos kolmiulotteisessa mallinnuksessa mallinnetaan yleensä rakennuksia ja tiloja, auralisaatiolla mallinnetaan äänimaisema. [18, s. 35–36.]

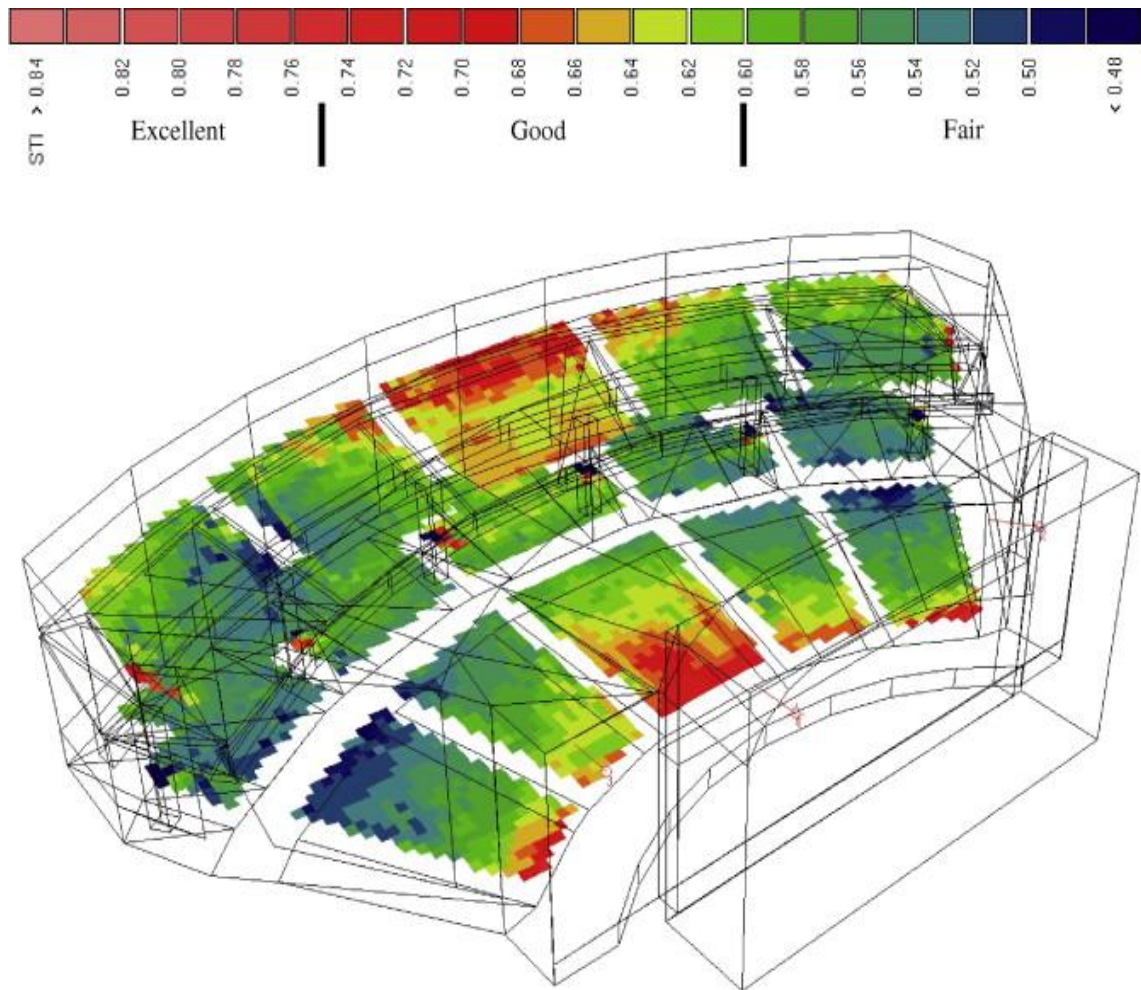
Auralisaatiossa käytettävän äänen tulee olla kaiuton, minkä hankkiminen voi olla haasteellista, jos käytössä ei ole kaiutonta huonetta. Teknisessä korkeakoulussa, nykyisessä Aalto-yliopistossa, käytettiin vuonna 2008 kaiutonta huonetta hyväksi sinfoniaorkesterin nauhoittamiseen. Dosentti Tapio Lokki tutkimusryhmineen äänitti kaiuttomassa huoneessa sinfoniaorkesterin soittajat yksi kerrallaan, ja näin jokaisen soittimen ääni saatiin taltioitua omalle raidalleen. [15.]

### 3.2 Mallinnusohjelmat

#### **ODEON**

ODEON Room Acoustics Software on tanskalaisen Odeon-yrityksen kehittämä akustiseen mallinnukseen tarkoitettu ohjelma. Odeon-projekti aloitettiin vuonna 1984 yhteistyössä Technical University of Denmarkin kanssa, ja sen tarkoituksena oli tuottaa luotettava huoneakustinen mallinnusohjelma. Ensimmäinen versio, ODEON 1.0, julkaistiin vuonna 1991. ODEON on erikoistunut etenkin auralisaatioon ja sisältää valmiiksi mallinnettuja tiloja konserttisaleista metroasemiin. [19.]

Kuva 7 esittää ODEON-ohjelmalla mallinnettua konserttisalia, ja värit esittävät, kuinka hyvin määritelty ääni kuuluu yleisön eri osiin. Punaisella kuvataan äänen erinomaista kuuluvuutta. Luonnollisesti ääni kuuluu erittäin hyvin eturiveille ja keskikatsomoon. Heikosti ääni kuuluu katsomon sivuille ja yläkatsomon alapuolelle, mikä on kuvattu sinisellä värillä. Yleensä yleisö hakeutuu teattereissa keskipaikoille hyvän näköyhteyden vuoksi, mutta kuvan 7 perusteella näin kannattaa toimia myös hyvän kuuluvuuden vuoksi. Toki tulee ottaa huomioon, että konserttisaleissakin on eroja.



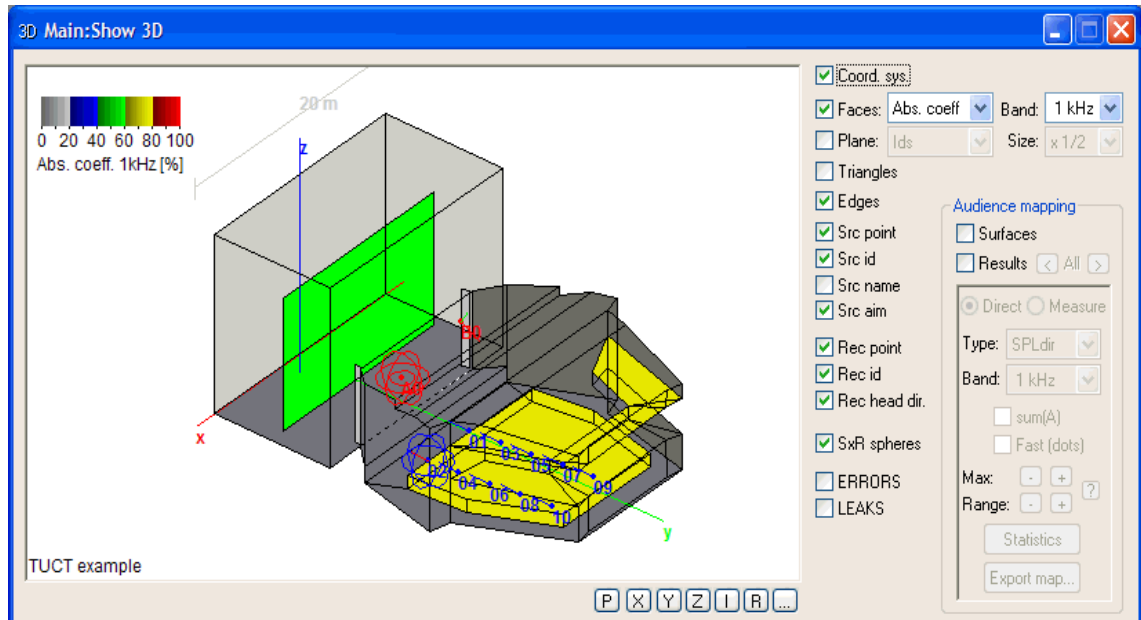
Kuva 7: ODEON-ohjelmalla tehty mallinnus konserttisalista [20].

ODEON on virtuaaliakustisen mallinnuksen pioneereja, ja ohjelma vaikuttaa tarkasteltaessa erittäin helppokäyttöiseltä ja monipuoliselta. En ole päässyt mallintamaan tällä ohjelmalla, sillä hintaa sille kertyy täytenä versiona hieman yli 15 000 euroa, mikä on useimpia vaihtoehtoisia sovelluksia lähes viisi kertaa kalliimpi. ODEONin internetsivuilta [www.odeon.dk](http://www.odeon.dk) voi ladata suppean kokeiluversion, jolla ei kuitenkaan voi määrittellä itse haluamaansa akustista tilaa. ODEON toimii tällä hetkellä ainoastaan Windows-käyttöjärjestelmällä. [21.]

### **CATT Acoustic**

CATT Acoustic on ruotsalaisen Bengt-Inge Dalenbäckin kehittämä virtuaaliakustinen ohjelma, jonka ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 1998 [22].

Kuvan 8 perusteella CATT Acoustic vaikuttaa ohjelmana yksinkertaiselta ja pelkistetyltä, mutta kuuluvuuden värimaailman portaattomuus häiritsee. Tässä suhteessa ODEONin määrittelemä kuuluvuusalue (kuva 7) vaikuttaa realistisemmalta.



Kuva 8: CATT Acousticin valintaikkunan lyhenteet eivät aukea kokemattomalle käyttäjälle [22].

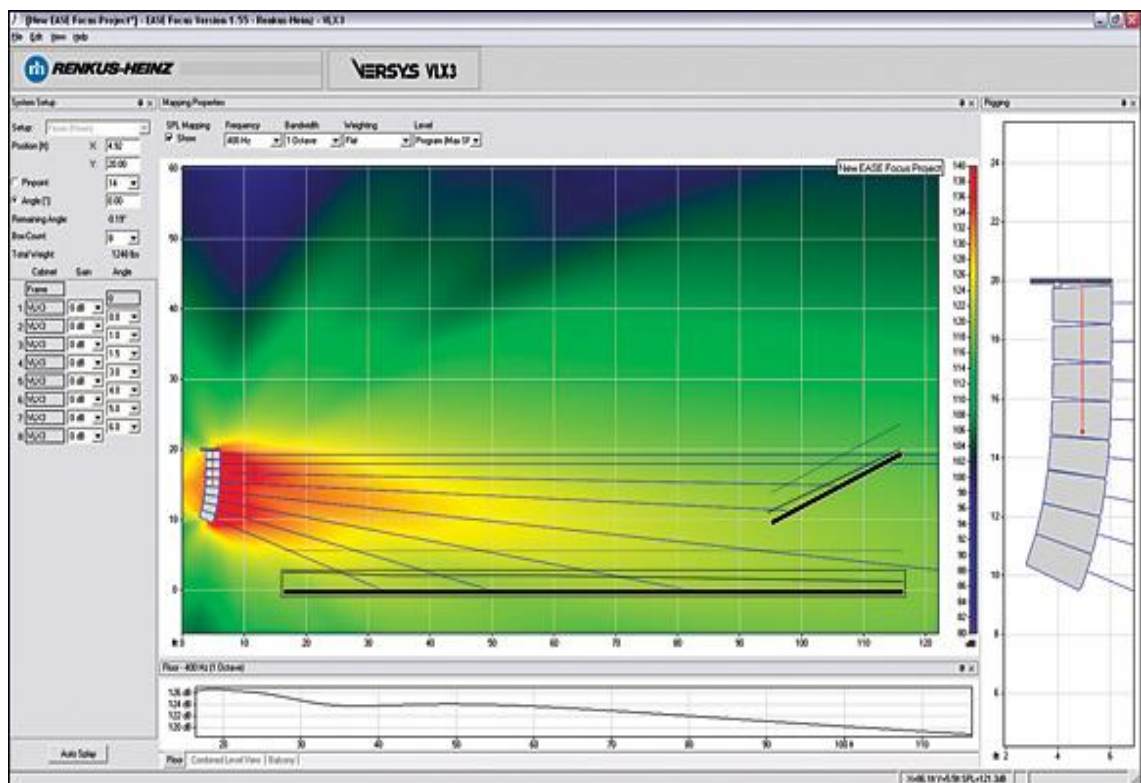
CATT Acousticin tilojen mallintaminen vaikuttaa melko yksinkertaiselta sekä hyvässä että pahassa, eikä yritys tarjoa tukea käyttäjälle ohjelman käytön aloittamisessa. CATT Acoustic onkin tarkoitettu pääasiassa ammattilaiskäyttöön, ja kenties sen vuoksi sen hankkiminen on tehty vaikeaksi. CATT Acousticin hintaa ei ilmoiteta yrityksen internet-sivustolla, eikä sitä voi sieltä suoraan myöskään hankkia. Internetsivusto ohjaa tuotteesta kiinnostunutta ottamaan yhteyttä jälleenmyyjään, joita on noin 20 maassa. Jos haluaisin suomalaisena hankkia ohjelman, tulisi minun ottaa yhteyttä suoraan yritykseen. Internetsivustolla [www.catt.se](http://www.catt.se) oleva esittelyvideo ei myöskään ole kovin vakuuttava. [22.]

## EASE

EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) on amerikkalaisen Renkus-Heinzin kehittämä ohjelma. Yrityksen perustajien, Harro K. Heinzin ja Algis Renkuksen, päämääränä on jo vuodesta 1979 lähtien ollut paremmalta kuulostavan maailman luominen, ja yritys toimii akustiikan maailmassa laajemminkin kuin vain suunnittelumielessä. Renkus-Heinz valmistaa kaiuttimia ja kaiutinjärjestelmiä kaikenlaisiin tiloihin konsert-

tisaleista juna-asemien kuulutusjärjestelmiin. EASE onkin kehitetty tukemaan tätä akustista suunnittelua, ja sitä käyttävät erityisesti ääniteknikot, jotka työkseen huolehtivat isojen konserttien ja tilaisuuksien äänentoistosta. [23.] EASE sisältääkin laajimman kaiutinkirjaston verrattuna muihin samantyyppisiin ohjelmistoihin, ja tilasuunnittelussa se tukee Autodeskin Autocad-ohjelmassa luotuja arkkitehtuurisia malleja ja Sketchup-tiedostoja [24].

Kuvassa 9 on esitetty pilarikaiuttimen tuottaman äänen kuuntelualue. Punainen väri merkitsee voimakasta ääntä ja vihreä miellyttävää ääntä. Kuvassa nähdään, että kaiuttimen tuottama ääni saavuttaa oikeassa reunassa olevan yksinkertaisen katsomon vihreänä, eli miellyttävänä kuuluvana äänenä. Ohjelman avulla saadaan määriteltyä pilarikaiuttimen eri osien voimakkuudet ja suuntaavuudet erittäin tarkasti.



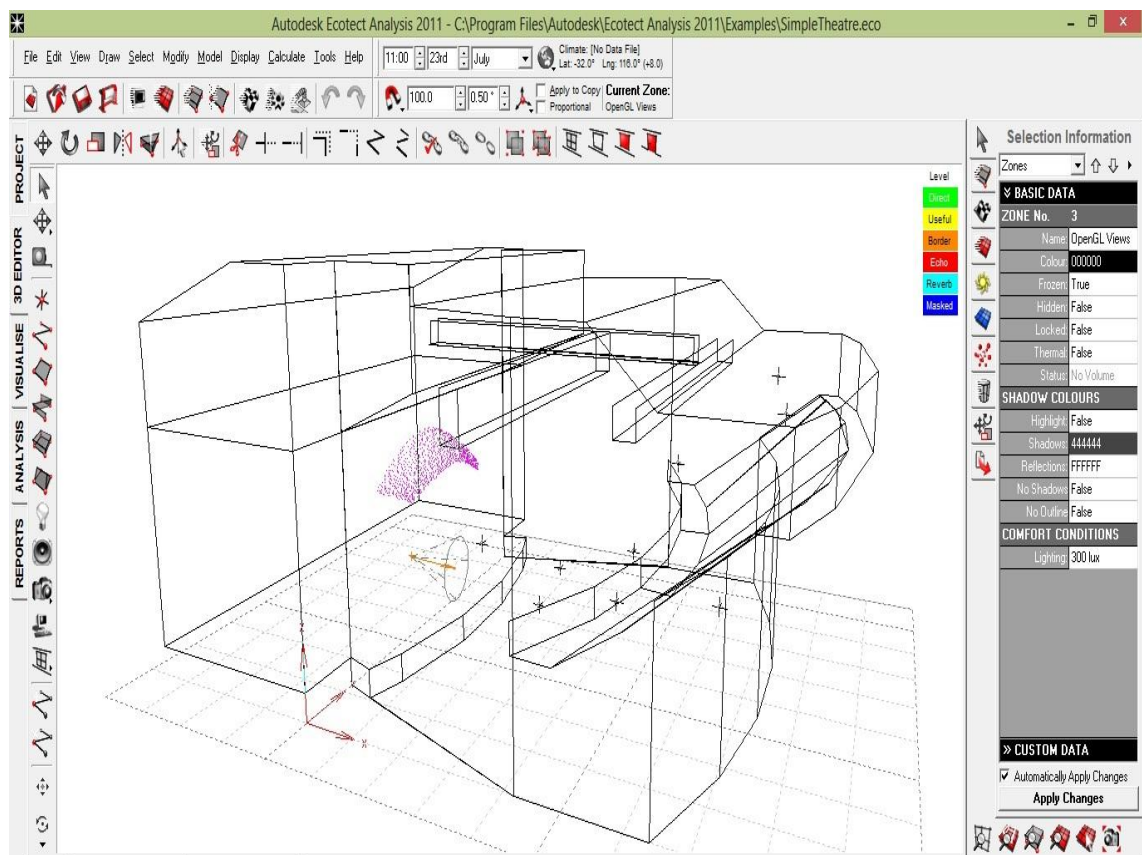
Kuva 9: Pilarikaiuttimen tuottaman äänen kuuntelualue EASE-ohjelmassa [25].

Renkus-Heinz tarjoaa käyttäjälle myös tukea tarjoamalla käyttöoppaita ja opetusvideoita internetsivustonsa [www.renkus-heinz.com](http://www.renkus-heinz.com) kautta. Hintaa ohjelmalle ilman lisäosia tulee noin 2 300 Yhdysvaltain dollaria eli hieman alle 2 000 euroa. [26.]

## Ecotect Analysis

Ecotect Analysis on Autodeskin ohjelmisto, joka on kehitetty tukemaan kestävän kehityksen suunnittelua. Ecotect Analysis ohjelman on kehittänyt Square One Research, jolta Autodesk osti sen vuonna 2008. [27.] John Walkerin vuonna 1982 perustama Autodesk tunnetaan paremmin visuaalisen mallinnuksen ohjelmistaan kuten 3ds Max, ja Maya sekä rakennustekniseen suunnitteluun paremmin sopivasta AutoCADista. Ecotect Analysis poikkeaa siksi Autodeskin aiemmasta ohjelmistotarjonnasta, eikä sitä ole markkinoitu yhtä voimakkaasti. [28.]

Kuvassa 10 on esitetty Ecotect Analysisin käyttöliittymää. Kuvassa ei ole näkyvillä äänen saavuttamia alueita, mutta kuten ODEON ja CATT Acoustic, Ecotect Analysis käyttää samaa värimaailmaa ja värien selitykset ovat näkyvissä toisin kuin CATT Acousticissa. Usein tarvittavat toiminnot on ripoteltu suoraan päänäkymään kuvakkeiden alle ja muut toiminnot löytyvät ylärivin valikoista.



Kuva 10: Ecotect Analysis -ohjelma on Autodeskin tyylille uskollisesti käyttäjäystävällinen.

Ohjelmalla pystytään analysoimaan rakennusten energiankulutusta, lämpöenergiä ominaisuuksia ja päivänvalon osuutta rakennuksen valaisusta. Pääasiassa sitä käytetäänkin juuri lämpöenergiseen simulointiin. Virtuaaliakustinen mallinnus on vain ohjelmiston pieni osa-alue, mutta kuten Autodeskin ohjelmat yleensä, on Ecotect Analysis erittäin käyttäjäystävällinen. Päädyin monien vaiheiden jälkeen käyttämään työssäni juuri tätä ohjelmaa, joten kerron ohjelman käytettävyydestä lisää luvussa 4. Autodesk tarjoaa ohjelmistojensa lisenssit ilmaiseksi opiskelijoille opiskelun ajaksi, mutta jos ohjelmiston haluaisi ostaa, pitäisi hintaa tiedustella erikseen suomalaiselta jälleenmyyjältä. Ecotect Analysis ei ole myynnissä Autodeskin verkkokaupassa [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com), mutta verkkokaupassa myytävien Autodeskin ohjelmistojen hinnat vaihtelevat 2 000:n ja 6 000 euron välillä. Kuten aiemmatkin esittelemäni ohjelmistot, myös Ecotect Analysis on saatavilla ainoastaan Windows-käyttöjärjestelmälle. [29.]

## **4 Mallintaminen Ecotect Analysis -ohjelmalla**

### **4.1 Mallintamisen aloittaminen ja ohjelman tarkkuus**

Ensimmäinen ajatukseni oli lähteä työstämään insinööriyöni visuaalista osuutta Autodeskin 3ds Maxin avulla, sillä se oli minulle ennestään tuttu ohjelma. Jo hyvin pian kävi selväksi, ettei 3ds Max sisältänyt tarvitsemiani algoritmeja, vaan visuaalinen esitys olisi pitänyt työstää ennalta laskettujen parametrien pohjalta, jolloin työni olisi painottunut ennemminkin kolmiulotteiseen mallintamiseen eikä niinkään akustiikkaan.

Käytin tunteja Autodeskin AutoCAD-ohjelman perusteiden ymmärtämiseen ja olin jo hetken aikaa vakuuttunut, että työstän insinööriyön sen pohjalta. Sain luotua tiloja ja määriteltyä seinille eri materiaaleja erilaisilla absorptiokertoimilla, mutta olennainen puuttui, äänilähde.

Miksi sitten päädyin käyttämään Ecotect Analysis -ohjelmaa aikaisemmassa luvuissa esiteltujen, jo pitkään alalla vaikuttaneiden ohjelmien sijaan? Autodesk tarjoaa opiskelijalisenssillä kaikki ohjelmansa opiskelun ajaksi käyttöön ilmaiseksi. Sain Ecotect Analysis -ohjelman ladattua kotikoneelleni alle 15 minuutissa ja pääsin tutustumaan siihen omalla ajallani kaikessa rauhassa. Muutaman testin jälkeen totesin ohjelman tottelevan komentoja melko miellyttävästi. Ecotect Analysis -ohjelmalla pystyn myös määrittämään seinille ja muille pinnoille eri materiaaleja monipuolisemmasta materiaalikirjastos-



ta kuin AutoCAD-ohjelmalla. Osa komennoista löytyi eri näppäimien takaa, kuin mihin olin Autodeskin ohjelmien kanssa työskennelleenä tottunut. Tämä johtunee siitä, ettei Ecotect Analysis ole alun perin Autodeskin kehittämä, ja voin vain toivoa, että tulevaisuuden päivitetty versio on yhtenäisempi yrityksen muiden tuotteiden kanssa.

Ennen kuin esittelen ja analysoin mallintamiani akustisia tilanteita, on kuitenkin syytä pohtia, onko ohjelma nuoren ikänsä vuoksi yhtä toimiva kuin kilpailijansa. Voiko sen laskemiin tuloksiin luottaa? Minkälaisiin algoritmeihin ohjelman tekemä laskenta perustuu? Kenties ohjelman nuoren iän vuoksi näihin kysymyksiin oli yllättävän vaikea löytää vastausta. Tutkimuksia Ecotect Analysisin tarkkuudesta on tehty erittäin vähän, ja suurin osa niistä keskittyy sen termodynamiikan osa-alueisiin. Voiko termodynamiikan tarkkuuden perusteella myös olettaa, että ohjelman akustinen laskenta on vähintään yhtä tarkkaa? Määritteleekö ohjelman yksi useaan otteeseen testattu osa-alue koko ohjelman luotettavuuden? Onko korrektia tieteellisessä tutkimuksessa vetää johtopäätöksiä yhden osa-alueen pohjalta? Vastaus on yksinkertaisesti ei, mutta näin olen kuitenkin tehnyt. Työni laajuus ja tähänastinen koulutukseni eivät riitä, jotta voisin tehdä testejä, verrata niitä ohjelman laskemiin ja saada tieteellisesti vakuuttavia lopputuloksia. Testausympäristön kehittämiseen voin kenties palata tulevaisuudessa diplomityön merkeissä.

Harvard Universityn opiskelijat Diego Ibarra ja Christoph Reinhart vertasivat vuonna 2009 Ecotect Analysisin päivänvalosimulaattoria Lawrence Berkley Laboratoriesin Radiance-nimiseen valosimulaattoriin. He saivat tutkimuksensa tulokseksi Ecotect Analysisin antavan keskimäärin 36 prosenttia alhaisemman tuloksen verrattuna Radiancen antamaan tulokseen. Heidän johtopäätöksensä tuki Radiancen käyttöä päivänvaloa simuloitaessa. [30, s. 203.]

Roberst ja Marsh Cardiff Universitysta Walesista ovat tutkimuksessaan sitä mieltä, että Ecotect Analysisin tarkkuus on pitkälti riippuvainen siitä, kuinka paljon ja kuinka tarkkaa informaatiota ohjelmalle on annettu, ennen kuin se suorittaa laskutoimenpiteet. He toteavat mahdollisten rajoitusten olevan samaa luokkaa kuin manuaalisesti laskettaessa ja tämän olevan useimpien ammattilaisten tiedossa. Ammatillainen osaa suhtautua ohjelmiston tuottamaan informaatioon riittävän kriittisesti: se on suorassa yhteydessä syötettyihin arvoihin. Kun halutaan Ecotect Analysisin laskevan tarkemmin, on sille myös tarjottava enemmän informaatiota, johon perustaa laskelmat. Roberts ja Marsh

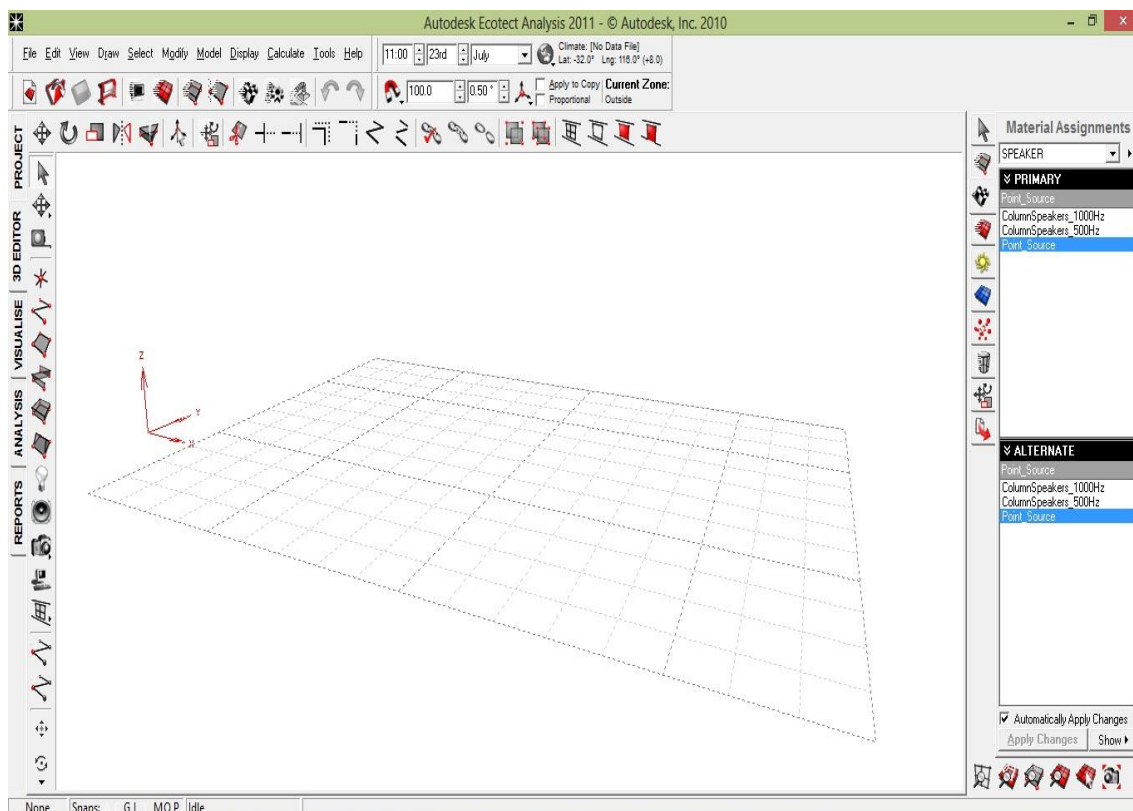
toteavat, että suunnittelija määrittelee lopputulokseen vaadittavan vaivan ja tarkkuuden, eikä sovelluksen kehittäjä. [31, s. 3.]

Autodesk itse perustelee Ecotect Analysisin tarkkuutta sillä, että sen laskelmat noudattavat kansainvälisiä standardeja ja rakennussäädöksiä [32]. Lukemieni artikkelien pohjalta olen tehnyt johtopäätöksen, että Ecotect Analysis toimii erinomaisesti visuaalisena työkaluna silloin, kun halutaan esittää esimerkiksi työn tilaajalle, kuinka väliseinän purkaminen vaikuttaa huoneiston lämmitykseen ja äänen kulkuun. Ohjelman laskelmat ovat oikean suuntaisia, mutta eivät kyllin tarkkoja, jotta ne yksinomaan riittäisivät ohjeistamaan rakentamista. Virtuaaliakustiikan näkökulmasta voidaan siis olettaa, että visuaalinen esitys ääniaaltojen kulusta on hyvin realistinen, mutta raportin sisältämät arvot eivät ole aivan tarkkoja.

## 4.2 Mallintaminen

Ecotect Analysisin alkunäkymä on kolmiulotteinen ja mittaruudukko on xy-tasossa. Jos ei halua itse mallintaa rakennusta tai haluaa ensin tutustua ohjelman mahdollisuuksiin, on ohjelman mukana tulevassa kirjastossa lukuisia erilaisia valmiita skenaarioita.

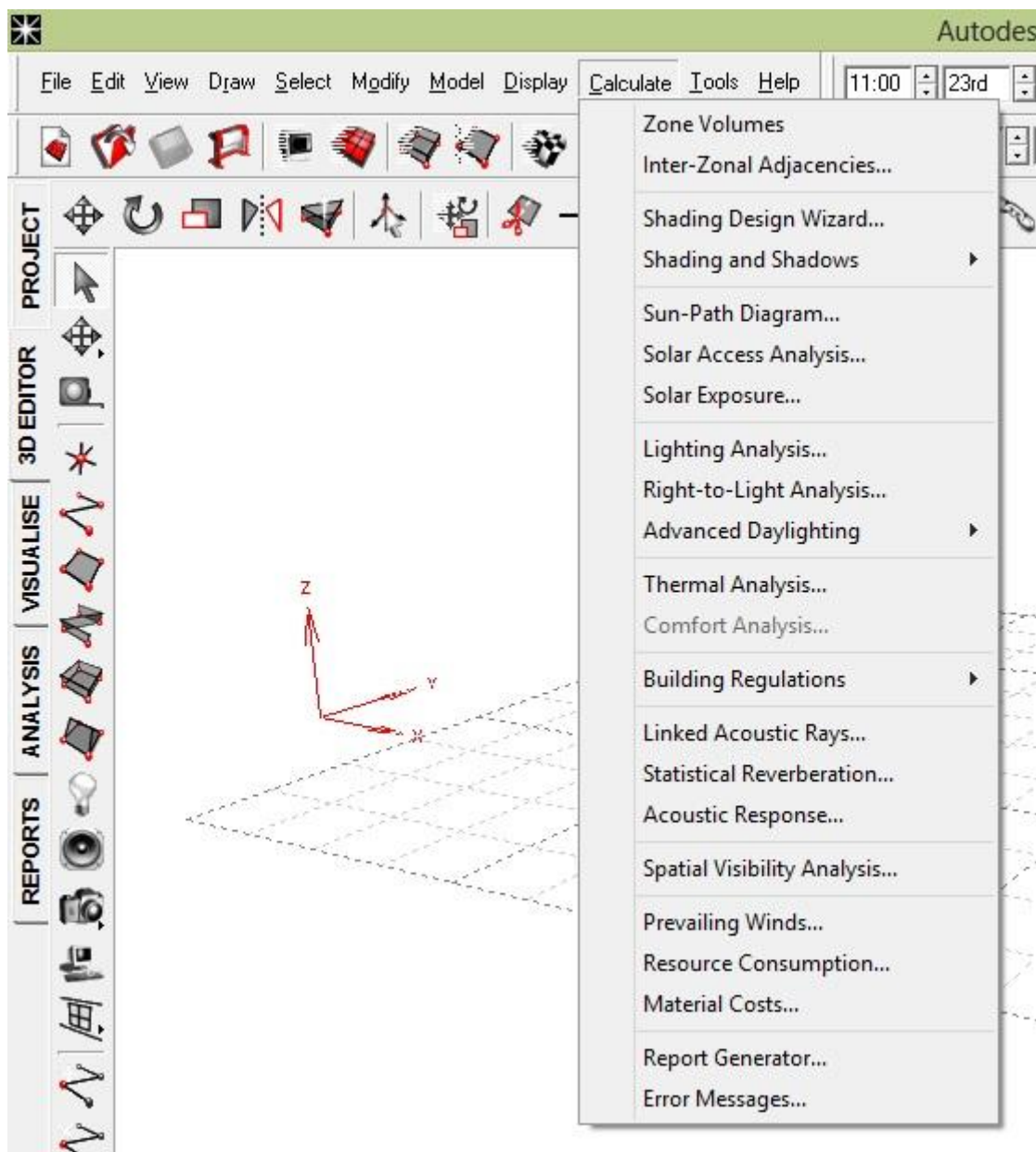
Kuva 11 esittää, kuinka ohjelman vasemmasta laidasta löytyvät erilaiset piirtotyökalut, kaiuttimet, kamerat ja navigaatiotyökalut. Oikeassa laidassa ovat välilehdet, joita tarvitaan materiaalien ja esimerkiksi kaiuttimien hallintaan. Virtuaaliakustisessa mallintamisessa tärkeimmällä välilehdellä hallitaan säteitä ja partikkeleita ja määritellään muun muassa heijastusten lukumäärä (Rays and Particles). Toinen tärkeä välilehti on materiaaliosio, jossa voidaan valita käytettävän kaiuttimen tyyppi (Material Assignments).



Kuva 11: Ecotect Analysisin alunäkymä.

Ennen mallintamisen aloittamista suosittelen myös tutustumaan ylävalikon Calculate-valikkoon, josta on pääsy kaikkiin mahdollisiin laskentavaihtoehtoihin.

On hämmästyttävää, kuinka paljon laskenta-algoritmeja ohjelmassa on, sillä se kuitenkin toimii koneella nätisti eikä takettele edes monimutkaisempien mallien kohdalla, kuten esimerkiksi 3ds Max tekee. Kuvan 12 Calculate-valikon vaihtoehdoista keskityn ainoastaan Acoustic Responseen ja siihen, mitä informaatiota tämä laskenta tuottaa.

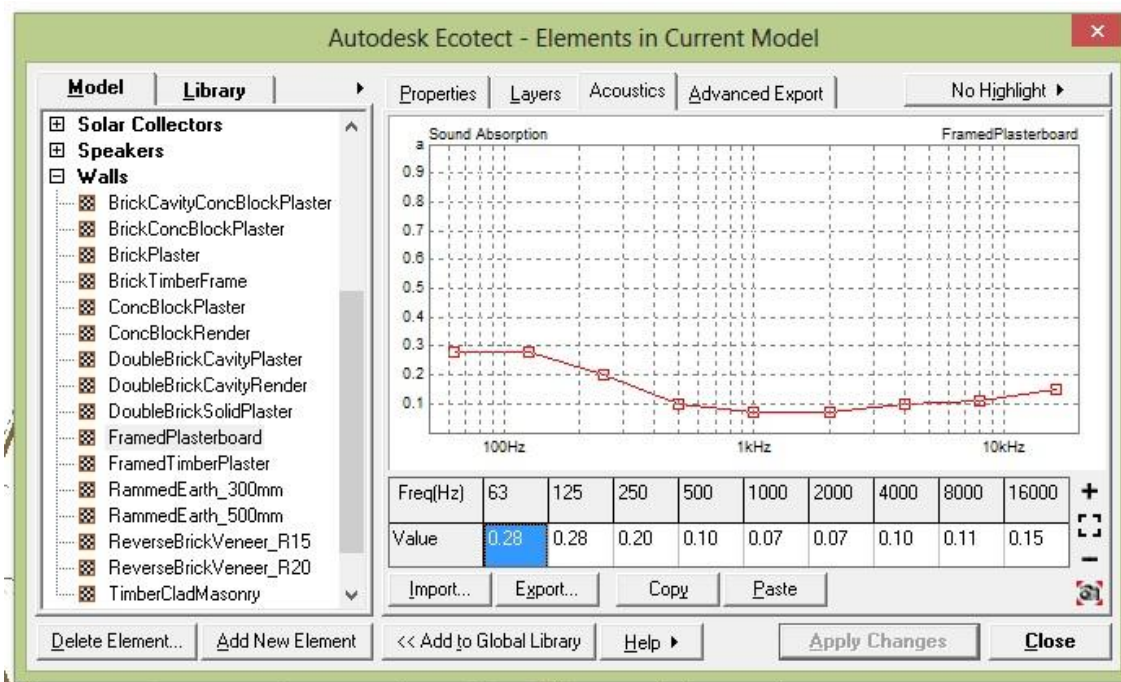


Kuva 12: Ecotect Analysisin valikot ovat selkeät ja informatiiviset.

Valikot ovat selkeät, ja pienen hapuilun jälkeen tarvittavat asetukset ja valikot löytyvät. Käyttöliittymä on yksinkertainen, mutta ei kuitenkaan lelumainen eikä liian pelkistetty. Kuvakkeet ovat selkeitä, ja kun kursoria pitää halutun kuvakkeen päällä, ohjelma kertoo kuvakkeen toiminnon. Objektien liikuttaminen ei ollut yhtä yksinkertaista, kuin olisi voinut toivoa, ja objekteja liikutetaankin hiiren sijasta näppäimistön koordinaattia vastaavilla kirjaimilla, x, y ja z.

#### 4.2.1 Tilan nurkkaan sijoitetun äänilähteen heijastukset

Loin ensimmäiseksi erittäin yksinkertaisen suorakaiteen muotoisen tilan ja valitsin seinien materiaaliksi hyvin yksinkertaisen kipsilevyseinän. Kipsilevyjen paksuus on 10 mm ja niiden väliin jää 80 mm:n ilmatila. Kuvan 13 mukaan kipsilevyn absorptio on parhaimmillaan alhaisilla taajuuksilla, jolloin absorptiosuhde on 0,28. Huonoimmillaan kipsilevy absorboi 1 000 Hz:n taajuuksia, jolloin absorptiosuhde on alimmillaan 0,07.

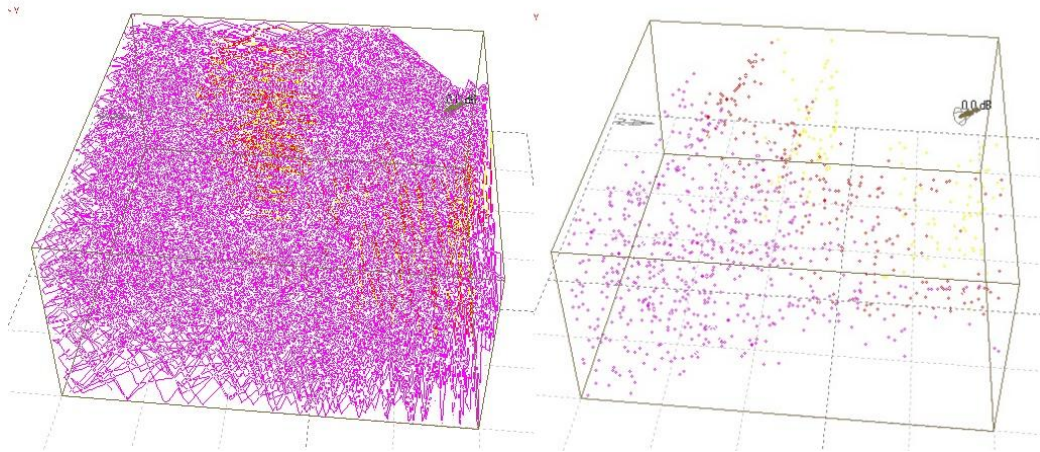


Kuva 13: Seinäelementin hallintapaneelin akustiikkanäkymä.

Kun seinän absorptiosuhde on alhainen, seinän tulisi siis heijastaa suuri osa äänestä takaisin. En luonut tähän tilaan ikkunoita tai esteitä, vaan pidin tilan mahdollisimman yksinkertaisena.

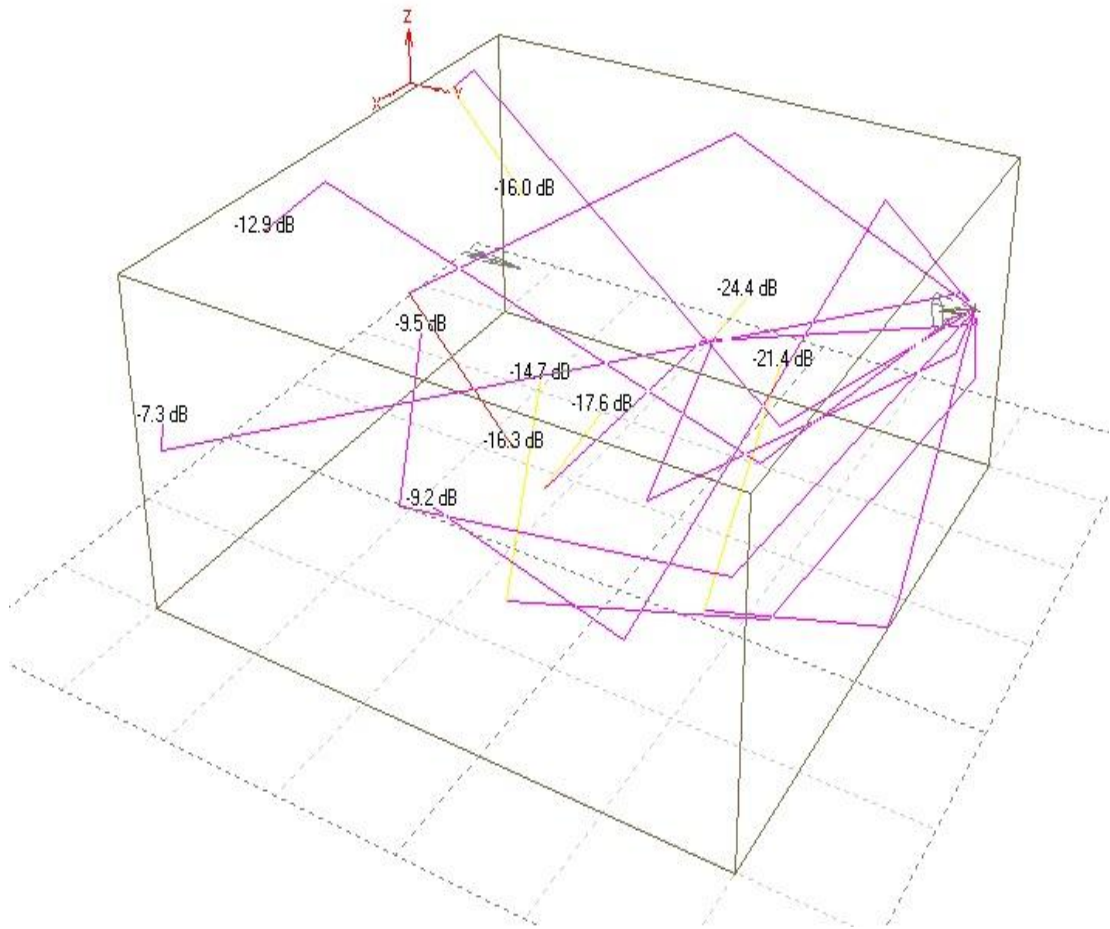
Huoneen nurkkaan asensin 500 Hz:n kaiuttimen, noin puoleenväliin huonekorkeutta, kohti huoneen keskustaa. Kaiutin tuottaa ääntä 90 asteen kulmassa vaakatasossa ja 45 asteen kulmassa pystytasossa. Ohjelma esittää ääniaallot joko partikkeleina eli pisteinä tai säteinä (rays). Partikkelit liikkuvat tilassa pisteinä, mutta säteet näkyvät jatkuvina viivoina, jolloin usealta pinnalta heijastuessaan visualisointi voi näyttää tukkoiselta. Jostain syystä ohjelma ei esitä ääniaaltoja paineaaltona.

Säteet ja partikkelit tulee valita haluttavan visualisoinnin mukaan; laskennallisesti niillä ei ole mitään eroa. Kuvassa 14 äänilähteestä eli kaiuttimesta lähtee 1 000 sädettä, mutta selkeyttäakseni tapahtumaa, laskin säteiden määrän kymmeneen kappaleeseen ja heijastusten määrän viiteen. Tämä ei ole realistinen skenaario, mutta helpottaa asioiden tarkastelua ja havainnointia.

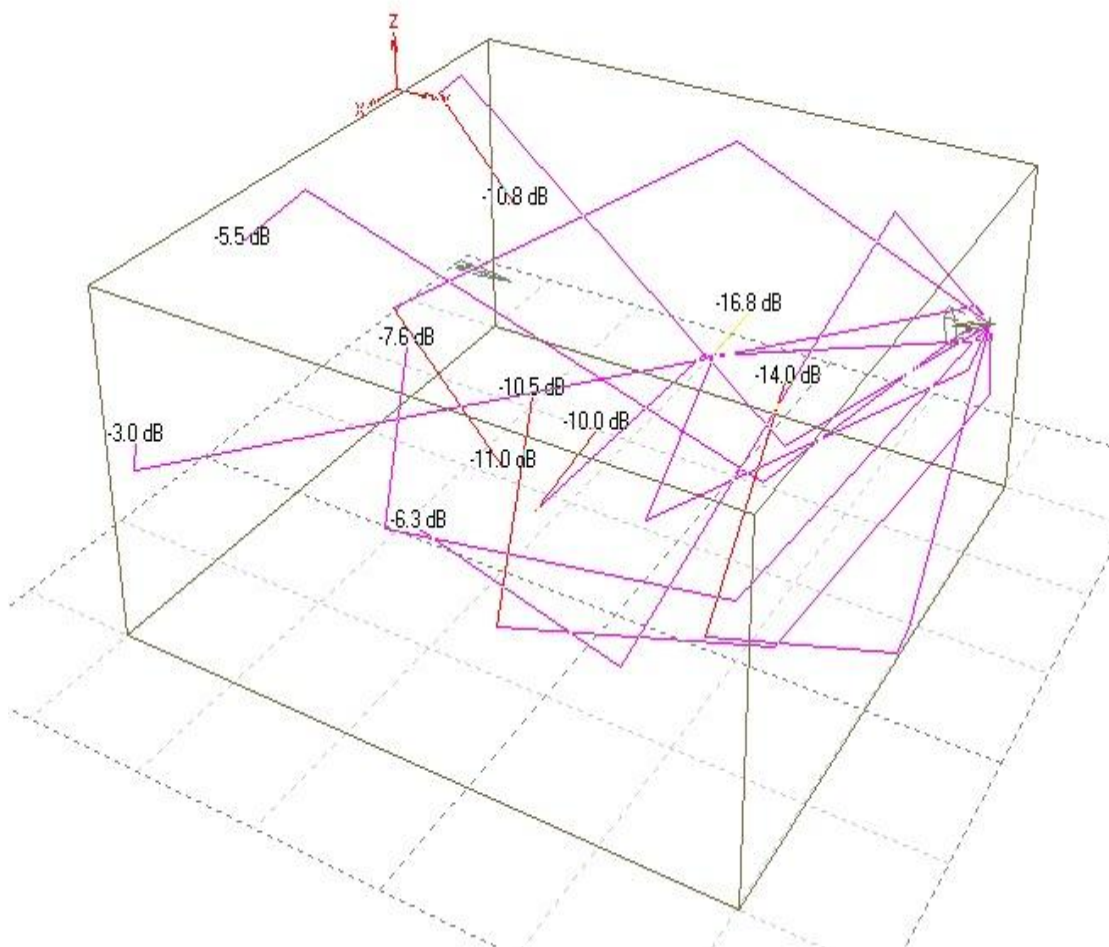


Kuva 14: Sama tilanne esitettynä sekä säteillä että partikkeleilla ajanhetkellä 22,0 ms.

Ensimmäisessä skenaariossa äänilähde värähtelee alhaisella 63 Hz:n taajuudella. Animaatiosta pysäytetystä kuvasta (kuva 15) näkyy, kuinka äänen voimakkuus on laskenut 7,3–24,4 dB alkuperäisestä, kun aikaa on kulunut 21,1 ms. Vaimenemisen suuruus riippuu heijastusten lukumäärästä. Skenaariossa 2 äänilähde värähtelee 1 000 Hz taajuudella. Kuvan 13 absorptiosuhteiden perusteella on syytä olettaa, ettei ääni vaimene skenaarion 1 mukaisesti. Kuvasta 16 voidaankin nähdä, että ääni on vaimentunut 3,0–16,8 dB, kun aikaa on kulunut vastaavat 21,1 ms.



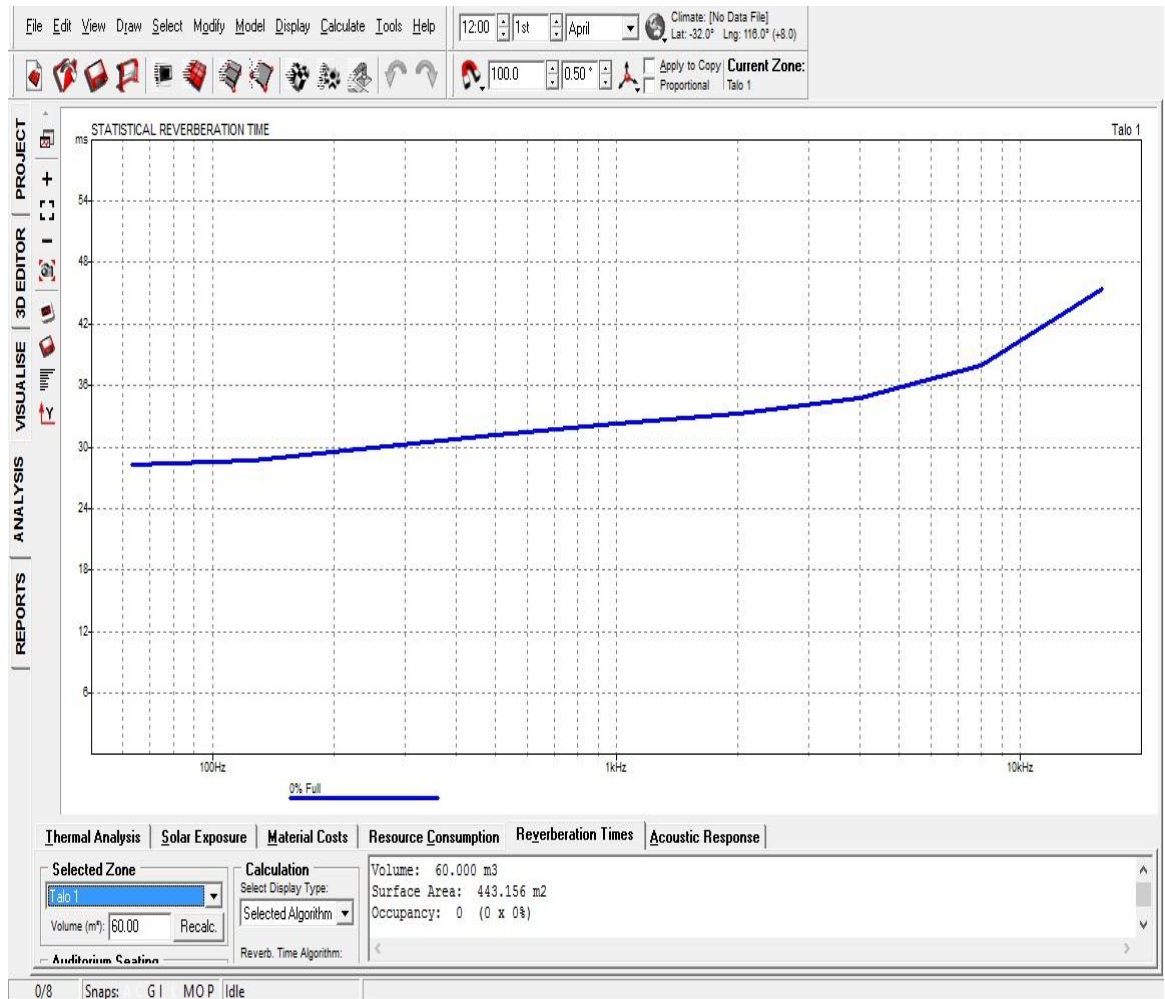
Kuva 15: Skenaario 1 ajanhetkellä 21,1 ms, jolloin alkuperäinen 63 Hz:n ääni on vaimentunut jopa 24,4 dB.



Kuva 16: Skenaario 2 ajanhetkellä 21,1 ms, jolloin alkuperäinen 1 000 Hz:n ääni on vaimentunut enimmillään 16,8 dB.

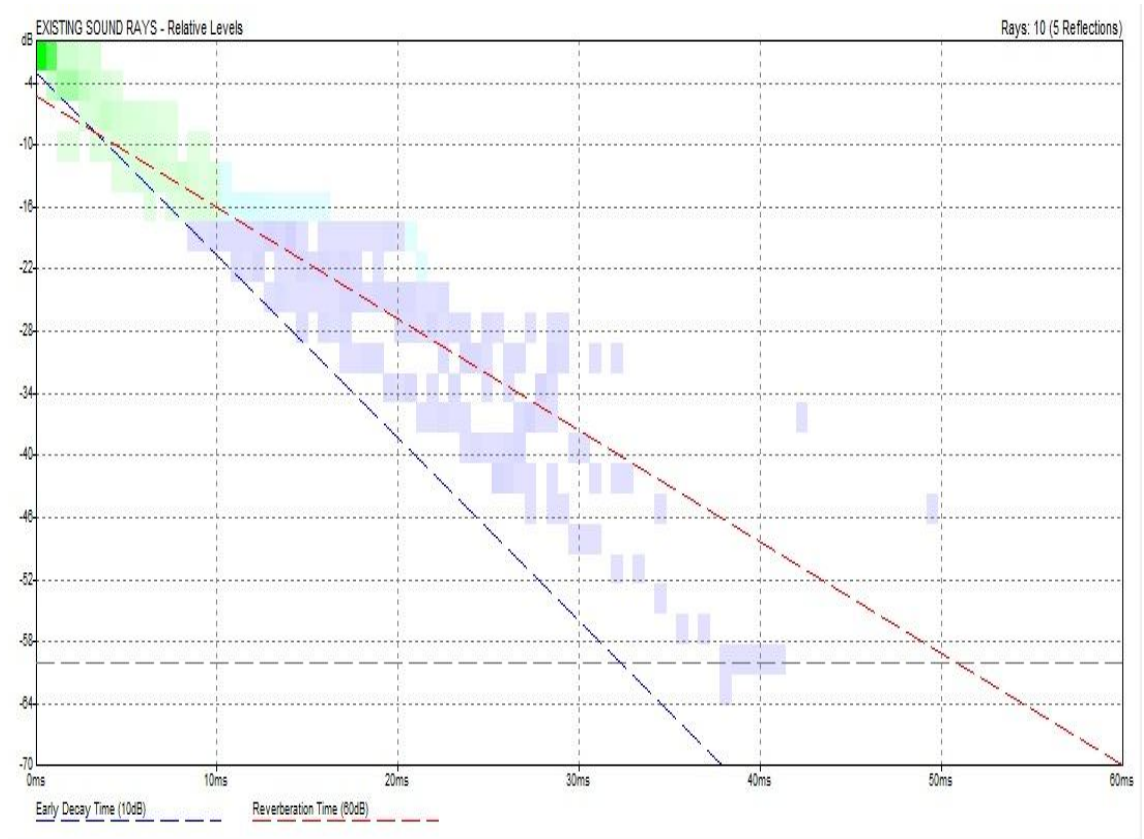
Kun silmämääräiset havainnot on tehty animaation perusteella, on aika tarkastella koneen laskemia tuloksia. Ecotect Analysisin analyysi-ikkunassa on kaksi tärkeää ikkunaa: Reverberation Times eli jälkikaiunta-ajat ja Acoustic Response eli akustinen vaste. Kuvasta 17 nähdään, että ohjelma on käyttänyt laskemiseen Sabinen kaavaa. Koska tila on lähes kuution mallinen, Sabinen kaavaa voidaan pitää riittävän tarkkana. Tässä kohtaa voi myös määritellä tilaan erilaisia istuimia, niiden lukumäärän ja täyttöasteen. Skenaarioissa 1 ja 2 pidän kuitenkin tilat tuolittomina. Kuvasta 17 voidaan nähdä, että jälkikaiunta-aika on sitä lyhyempi, mitä alhaisempi äänen taajuus on. Tämä tukee aikaisempaa päätelmää absorptiosuhteen ja vaimenemisen riippuvuussuhteesta. Koska tilan tilavuus ja absorptioala ovat skenaarioissa 1 ja 2 samat, kuvan 17 käyrä on identtinen molemmissa skenaarioissa.



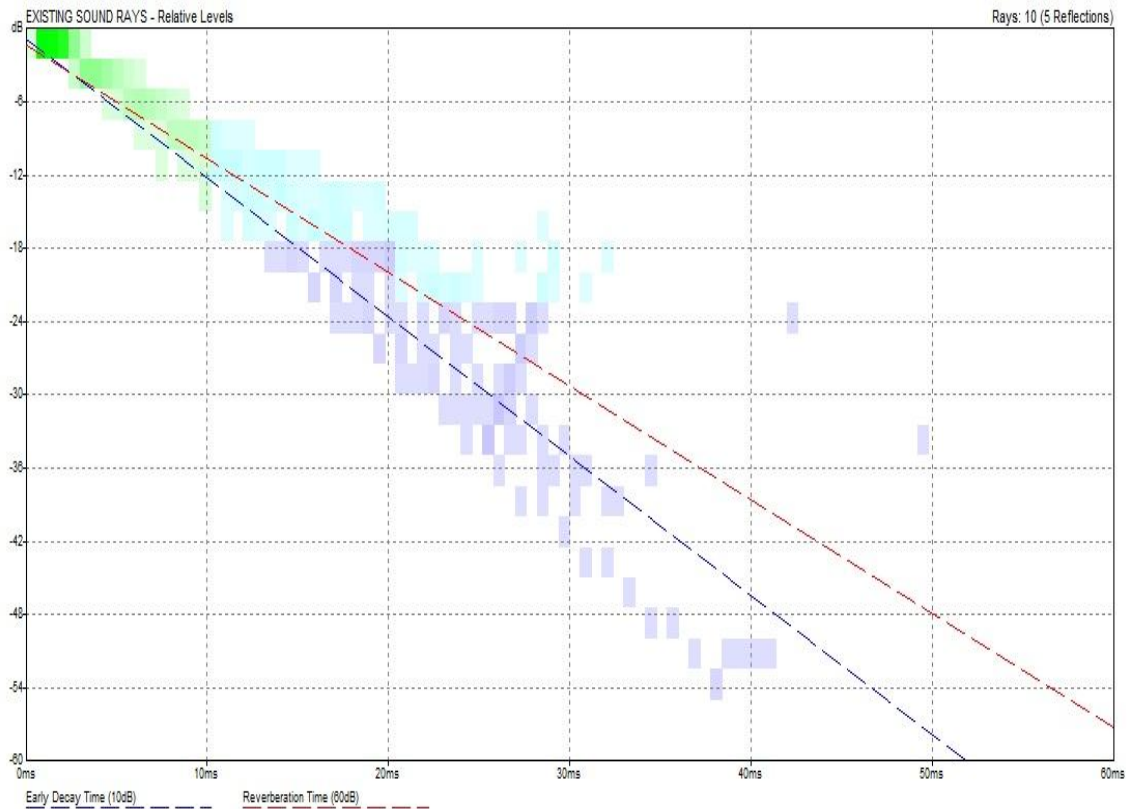


Kuva 17: Sabinen kaavan mukainen käyrä skenaarioille 1 ja 2.

Skenaarioiden 1 ja 2 erot tulevat esille vasta äänen vaimenemis- ja jälkikaiunta-ajoissa. Skenaarioiden 1 alhaiset taajuudet vaimenevat nopeammin korkeamman absorptioluvun vuoksi, ja näin ollen jälkikaiunta-aikakin on lyhyempi. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty skenaarioiden vaimenemis- ja jälkikaiunta-ajat ajan funktiona 60 ms.



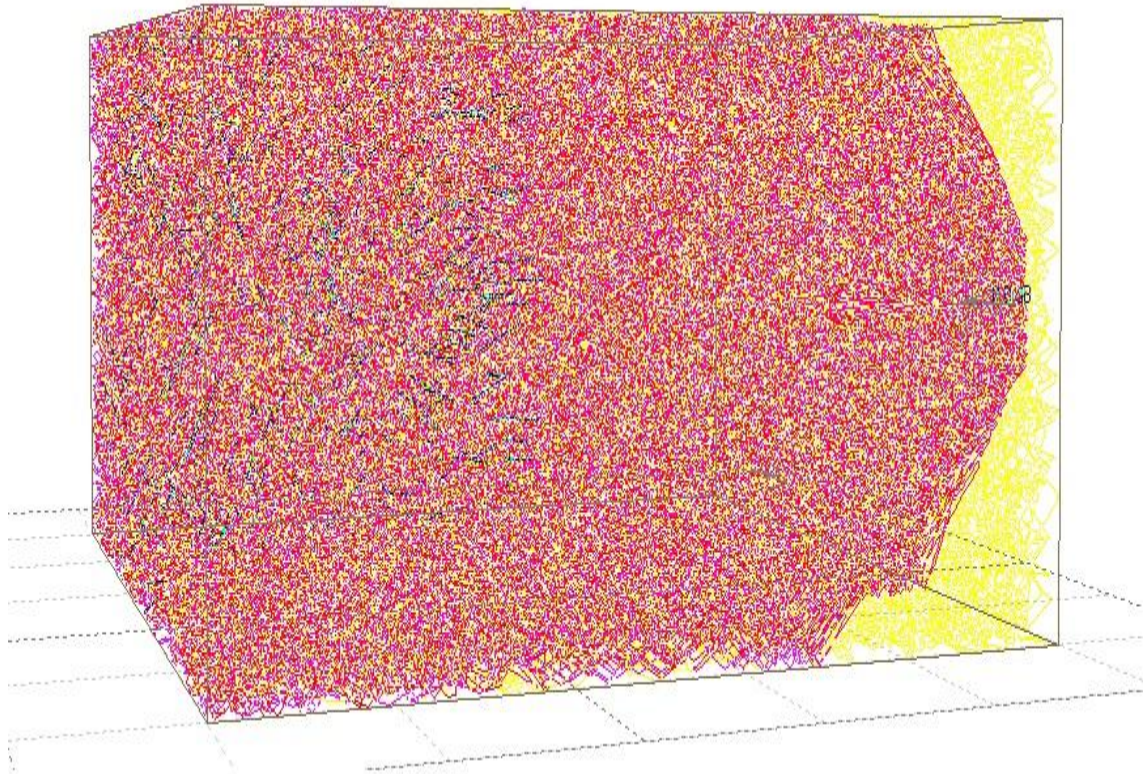
Kuva 18: Skenaarion 1 vaimenemiskäyrä.



Kuva 19: Skenaarion 2 vaimenemiskäyrä.

Vaimenemisaikojen ero on selvästi kuvista havaittavissa, ja laskennallisestikin se on hyvin merkittävä, lähes 20 ms.

Kun käytetään suurempaa säteiden määrää, voidaan hyvin selvittää, kuinka suuren alueen ääniaallot kattavat tilasta. Kun säteet täyttävät tilan lähes täysin, aukot on helppo havaita. Kuvassa 20 on esitetty skenaario 1 sillä erotuksella, että säteiden määrä on nostettu 2 000:een ja heijastusten määrä 15:een. Näin saadaan katettua tila mahdollisimman kokonaisvaltaisesti.



Kuva 20: Äänen leviäminen tilassa.

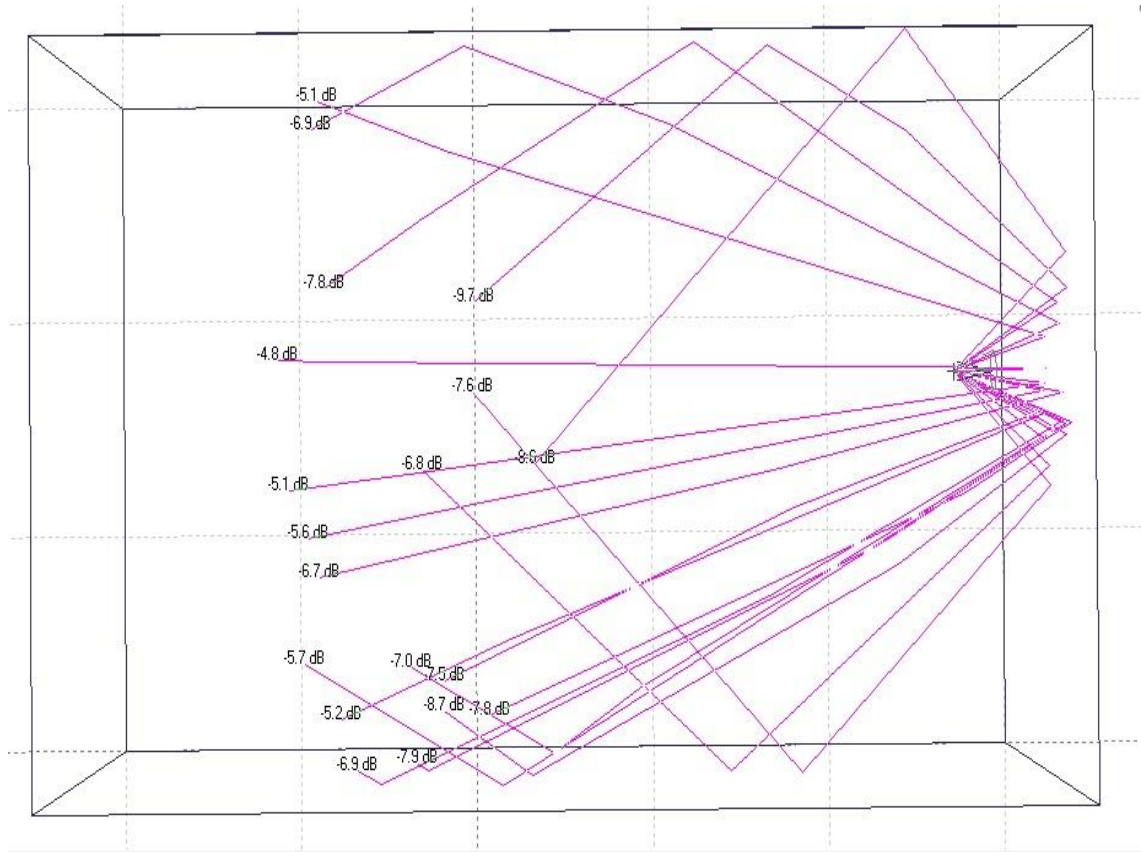
Kuvasta 20 voidaan havaita, että kaiuttimen ylä- ja alapuolelle sekä taakse yltävät ainoastaan heijastukset, eivätkä ne näin ollen ole optimaalisia kuuntelupaikkoja.

#### 4.2.2 Äänen suuntaavuuden merkitys luokkatilassa

Skenaarioissa 3 ja 4 tilana on luokkahuone. Skenaariossa 3 opettaja puhuu kohti taulua ja skenaariossa 4 kohti oppilaita. Tarkoitukseni on näillä skenaarioilla esittää, kuinka suuri vaikutus suuntaavuudella on äänen etenemisessä. Seinämateriaalina on sama kipsilevyseinä kuin skenaarioissa 1 ja 2. Opettajana on mieshenkilö, jonka puheäänien taajuus on 125 Hz.

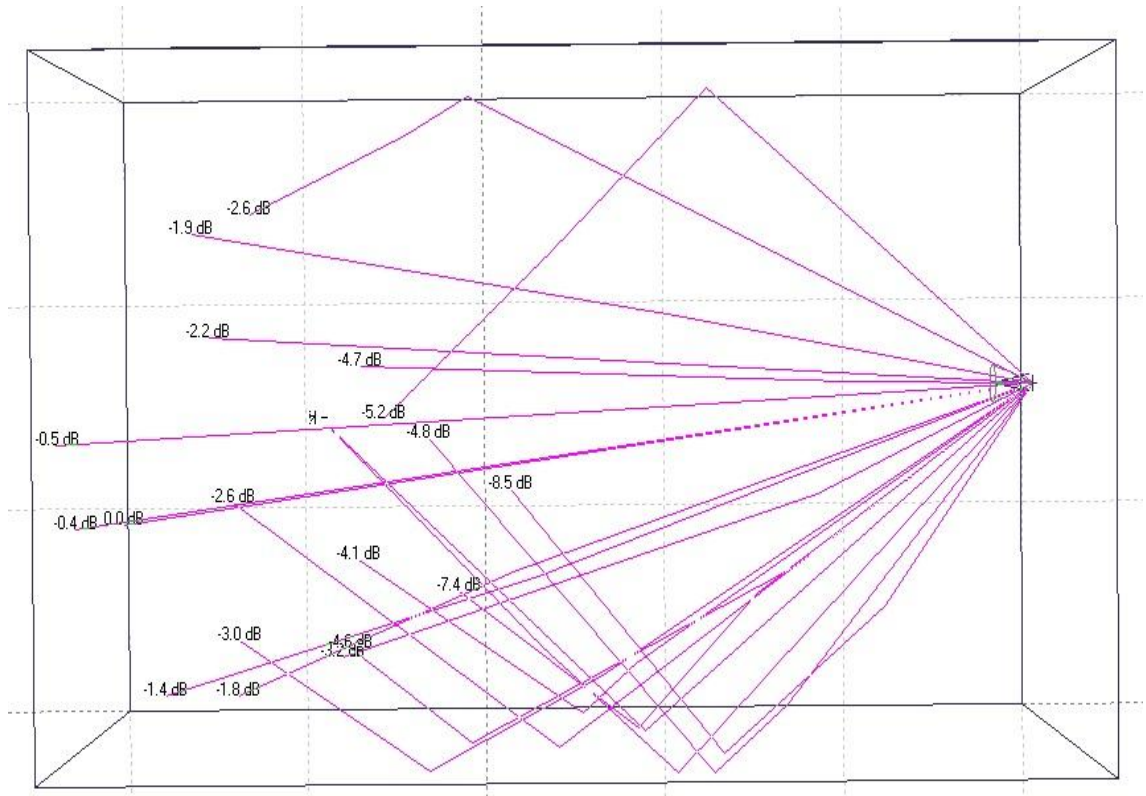
Kuvasta 21 voidaan todeta, että kun ensimmäiset äänet saavuttavat luokan keskiosan, ovat skenaarion 3 ääniaallot heijastuneet jo kerran seinäpinnoilta. Ääni on tällöin hei-

kentynyt ja saavuttanut kuuntelijan hiukan hitaammin, kuin jos puhe olisi tullut suoraan kuuntelijaa kohti.



Kuva 21: Skenaariossa 3 ääniaallot heijastuvat seinän kautta.

Skenaarion 4 ääniaallot tulevat kuvan 22 mukaisesti suoraan luokan keskiosaan ilman heijastusta, ja ne ovat samalla ajanhetkellä kuin skenaariossa 3 jo jatkaneet matkaa luokan takaosaan, jolloin äänihäviö on huomattavasti pienempi.



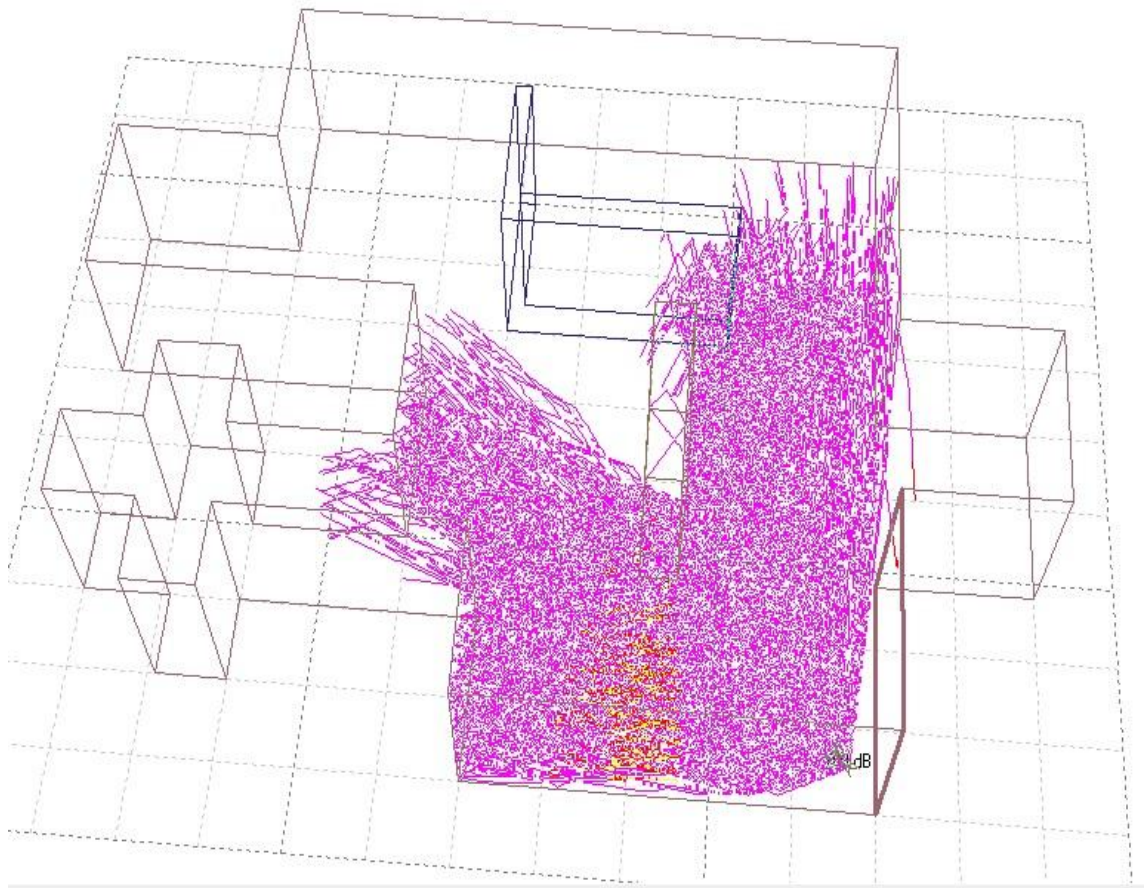
Kuva 22: Skenaariossa neljä ääniaallot suuntautuvat suoraan kohti luokan takaosaa.

Suuntaavuudella on erittäin suuri merkitys äänen kuuluvuuden kannalta. Etenkin opetustapahtumassa, jossa informaatio siirtyy opettajilta oppilaille, on tärkeää, että opettajan ääni kantaa luokan perälle asti. Suuntaavuuden merkitys korostuu etenkin silloin, kun oppilaat aiheuttavat luokkatilaan taustahälinää. Jo tavallisessa keskustelutilanteessa on huomattava ero, jos toinen keskustelun osapuolista puhuu kengillensä.

#### 4.2.3 Äänen eteneminen sokkeloisessa tilassa

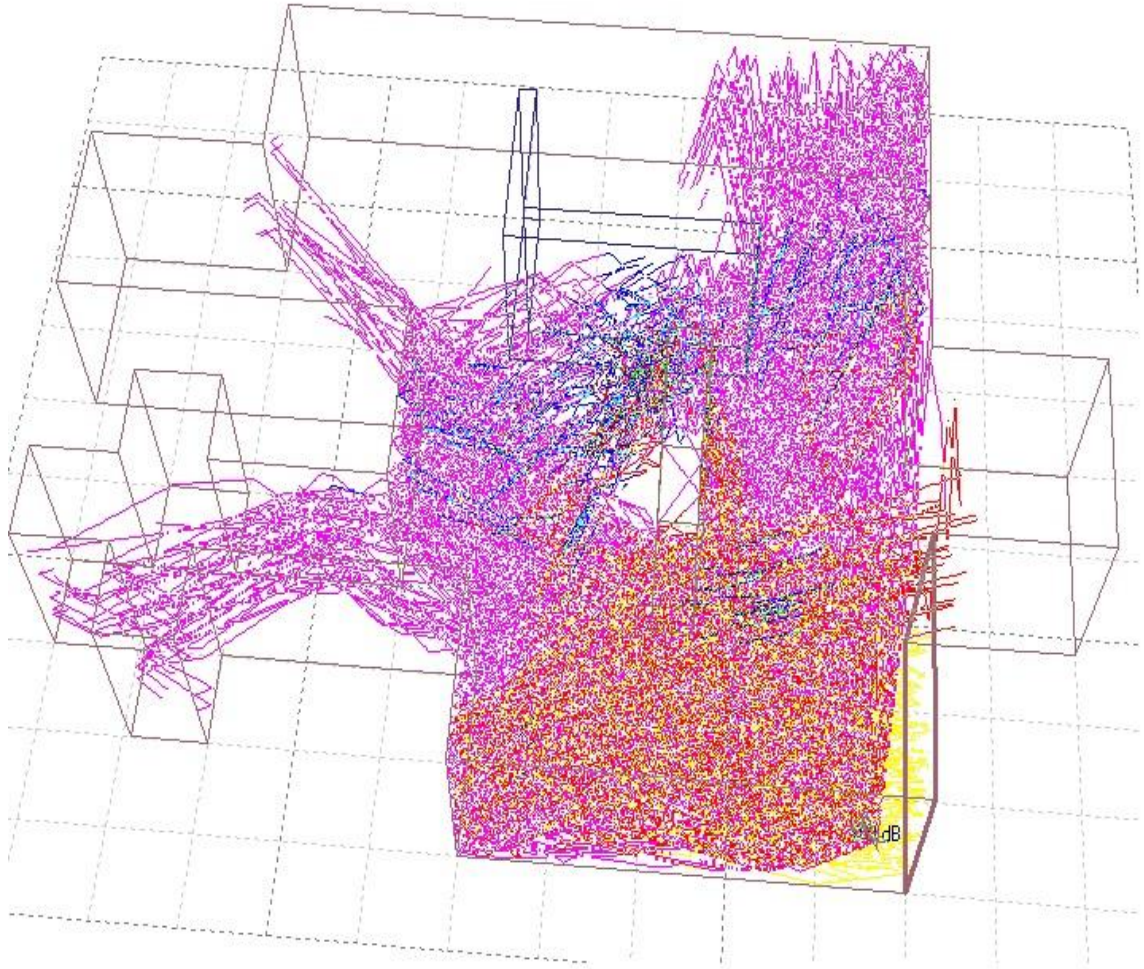
Skenaario 5 esittää, kuinka esteet ja epäsymmetria vaikuttavat äänen kulkuun. Labyrinttimaisessa tilassa ääni ei saavuta kaikkia pisteitä, vaan saattaa jäädä pieneen tilaan heijastumaan edes takaisin, kunnes vaimenee lopullisesti. Skenaariossa 5 seinämateriaalin sisäpinta on 10 mm:n paksuinen kipsilevy, ulkopinta on 110,0 mm paksua keskisuurta tiiltä ja näiden välissä on 75,0 mm:n ilmaväli. Seinäpinnan absorptiosuhde alhaisilla taajuuksilla 0,9–0,12 ja korkeammilla taajuuksilla lähellä nollaa (0,01–0,02). Äänen vaaka- ja pystykulmat ovat 50 asteen kulmassa.

Kuvassa 23 esitetään, kuinka ajanhetkellä 21,1 ms ääni on törmännyt jo ensimmäiseen esteeseen ja hajaantunut sen ympärille. Äänilähteen lähiympäristössä ääni on muuntu-  
nut jo kaiuksi (punaiset ja keltaiset alueet). Koska ääni ei osunut sopivassa kulmassa ensimmäiseen esteeseen, oikealla olevaan tilaan ei ole heijastunut ääntä, vaan ääni on jatkanut matkaansa suoraan tilan ohi.



Kuva 23: Äänen leviäminen ajanhetkellä 21,1 ms.

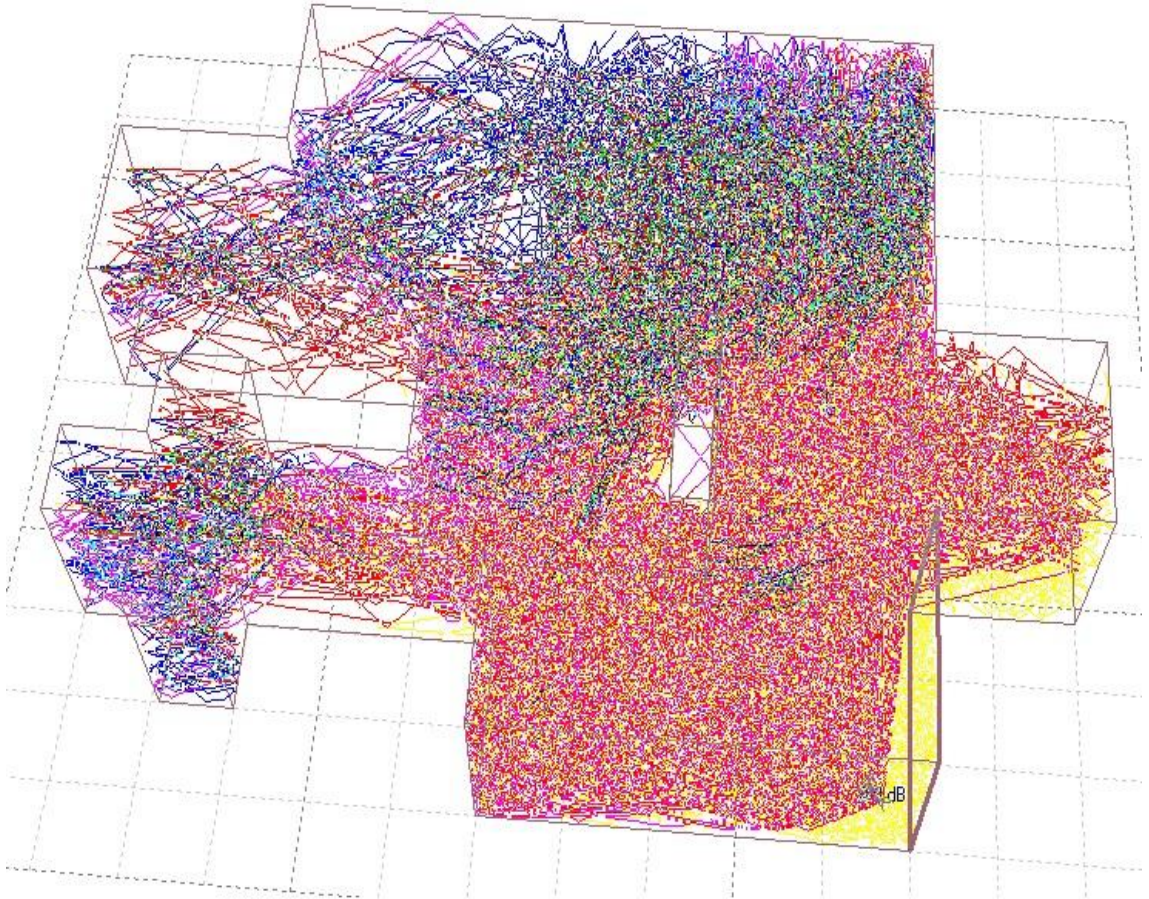
Kuva 24 esittää samaa tilaa ajanhetkellä 30,1 s. Ääni ei ole edelleenkään saavuttanut oikealla sijaitsevaa tilaa. Osa kaiusta on kuitenkin ylettynyt tilan suuaukollen. Äänen lähtöpisteessä on suuri määrä kaikua.



Kuva 24: Äänen leviäminen ajanhetkellä 30,1 ms.

Kun aikaa on kulunut 140,1 ms, ääni on saavuttanut lähes jokaisen pisteen labyrintissa, mutta alkuperäinen ääni on lähes hukkunut kaikujen ja heijastusten alle. Kuvasta 25 nähdään, kuinka vasempaan yläkulmaan lopulta saapuneet äänet eivät ole kovin käyttökelpoisia, sillä ne ovat vaimentuneet alkuperäiseen ääneen nähden peräti 40 dB.





Kuva 25: Äänen leviäminen ajanhetkellä 140,1 ms.

Autodesk Ecotect Analysis on pääpiirteissään miellyttävä ja helppokäyttöinen. Tilojen mallintaminen itse ohjelmassa on melko yksinkertaista, ja ovi- ja ikkunavaihtoehtoja on lähes yhtä monta kuin seinämateriaalejakin. Mallintaminen on melko nopeaa, ja tarvittavat muutokset on helppo tehdä vielä jälkikäteenkin. Ainoana harmillisena puutteena on videoiden tuominen ulos ohjelmasta. Autodeskin 3ds Maxia käyttäneenä olen tottunut saamaan luomani animaation ulos kuva kerrallaan ja olen saanut myös määritellä kuvataajuuden itse. Ecotect Analysisin luoma animaatio toimii ohjelmassa moitteetta, mutta ulos otettu video ei ole miellyttävää katsottavaa. Videon formaattivalikko on erittäin suppea, ja valmis video on nykivä ja hyppivä. Jos animaatiota nauhoittaessa pyörittää luotua tilaa, kaikki ääniä kuvaavat viivat ja partikkelit muuttuvat mustiksi, jolloin animaatiosta saa vielä huonommin selvää. Ohjelmasta saa ulos kyllä erittäin tarkoituksenmukaisia kuvia, mutta videoasetuksiin toivon Autodeskin paneutuvan tulevaisuudessa.

## 5 Yhteenveto

Äänen etenemisestä tilassa ei voi puhua ottamatta huomioon akustisia olosuhteita. Akustiikkaa ei myöskään voi ymmärtää, ellei ymmärrä äänen peruskäsitteitä ja sitä, miten ääni liikkuu väliaineessa, kuten ilmassa. On sinänsä mielenkiintoista, kuinka jokin niin arkipäiväinen asia kuin puhe, puheentuottaminen, äänen eteneminen ja ääniaallon vastaanottaminen voivat olla teoreettisella tasolla kovin vieraita. Tarkoitukseni oli insinööriyöraportissani kertoa äänestä ja akustiikasta mahdollisimman yksinkertaisesti ja niin, että asiaan perehtymätönkin voi ymmärtää lukemansa ja samalla oppia jotain uutta.

Äänen kulkuun väliaineessa, esimerkiksi ilmassa, vaikuttavat taajuuden, aallonpituuden, lämpötilan ja ilmankosteuden lisäksi akustiset olosuhteet: minkälaisilta pinnoilta ääni heijastuu ja kuinka suuri osa äänestä absorboituu erilaisten materiaalien vuoksi. Absorptioon taas vaikuttavat äänen taajuus ja absorptiomateriaalien sijoittuminen tilassa: pääseekö ääni kulkemaan tilassa vapaasti vai törmääkö se matkalla esteisiin, kuten väliseiniin tai esimerkiksi kirjahyllyihin.

Tilaa suunniteltaessa tulee ottaa huomioon sen käyttötarkoitus, sillä juuri käyttötarkoitus määrittelee, kuinka paljon ja minkälaisia absorboivia materiaaleja tilaan tarvitaan. Jos tilaan halutaan luoda paras mahdollinen tarkoitusta vastaava akustinen ympäristö, on akustinen suunnittelu otettava mukaan jo rakennuksen suunnittelun alkuvaiheessa. Jälkeenpäin pystytään parantamaan tilan akustiikkaa, mutta jos seinämateriaali on jo alun perin väärä, tulevat jälkeenpäin tehtävät akustiset korjaukset kalliiksi.

Virtuaaliakustiikka on käsitteenä monelle tuntematon, vaikka sitä on tutkittu Suomessakin jo yli kaksi vuosikymmentä. Itsekin pääsin riipaisemaan asiasta vain pintaa, sillä vaikka asiaa on tutkittu hiljakseen pitkään, se ei ole saavuttanut yleistä mielenkiintoa, ja näin ollen tieto on pysynyt melko tiiviisti tutkijoiden hallussa.

Virtuaaliakustisen mallinnuksen avulla pystytään visualisoimaan äänen kulku tietyssä tilassa. Tällä tavoin havainnollistettu äänen kulku on myös ääneen tai akustiikkaan perehtymättömien helppo hahmottaa. Mallinnetuissa skenaarioissa 1 ja 2 on nähtävissä, kuinka äänen taajuus vaikuttaa sen vaimenemiseen tilassa. Samassa tilassa, mutta eri taajuuksilla etenevien äänten ero on todettavissa vaimenemis- ja jälkikaiunta-ajoissa.

Alhaisella taajuudella etenevän äänen jälkikaiunta-aika on lyhyempi, ja riippuen absorboivasta materiaalista, se myös vaimenee nopeammin.

Skenaariot 3 ja 4 käsittelevät äänen suuntaavuuden merkitystä. Esimerkkinä käytetään luokkatilaa, jossa puhujana on mieshenkilö, jonka puheäänien taajuus on 125 Hz. Jo hyvin yksinkertaisen esimerkin avulla on selkeästi havaittavissa, kuinka suuri merkitys suuntaavuudella on. Ääni saapuu kohteeseen huomattavasti myöhemmin heijastuessaan matkan varrella useammalta pinnalta, kuin jos se etenisi suoraan kohti kuulijaa. Äänen saapuminen kohteeseen myöhemmin tarkoittaa myös sitä, että ääni on ehtinyt vaimentua matkalla enemmän, ja näin ollen kuuntelukokemus saattaa kärsiä.

Skenaariossa 5 esitetään esteiden vaikutus äänen etenemiseen. Jos ääni joutuu edetäkseen heijastumaan usealta pinnalta, kestää sen etenemisenkin kauemmin, jolloin se myös heikkenee. Heijastusten kulmat myös vaikuttavat siihen, mihin suuntaan ääni etenee ja leviääkö se sokkelomaisessa tilassa kaikkialle.

Virtuaaliakustinen mallinnus tuntuu olevan vielä kokeiluasteella, eikä aivan luotettavaa, helppokäyttöistä ja visuaalisesti näyttävää lopputulosta tuottavaa mallinnusohjelmaa ole vielä onnistuttu kehittämään. Kenties sellaiselle ei vielä ole tarpeeksi kysyntää, tai sitten ääniaallon eteneminen riippuu niin monesta tekijästä, että sitä on loppujen lopuksi mahdoton varmasti ennustaa. Sellaisenaan ohjelmat tukevat kyllä akustista suunnittelua, ja ne toimivatkin erittäin hyvin työkaluina havainnollistamisen tukena, mutta niiden luomien laskelmien varaan ei kannata kuitenkaan suunnitella kallista taloprojektia.

## Lähteet

1 Rakennusten akustinen suunnittelu, Akustiikan perusteet. 2007. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

2 Ääni syntyy. 2007. Verkkodokumentti. Tampereen ammattikorkeakoulu.  
<[http://aanipaa.tamk.fi/synty\\_1.htm](http://aanipaa.tamk.fi/synty_1.htm)>. Päivitetty 2007. Luettu 15.1.2013.

3 Äänen taajuus. 2007. Verkkodokumentti. Tampereen ammattikorkeakoulu.  
<[http://aanipaa.tamk.fi/taajuu\\_1.htm](http://aanipaa.tamk.fi/taajuu_1.htm)>. Päivitetty 2007. Luettu 15.1.2013.

4 Kylliäinen, Mikko. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto.

5 Mäkelä, Mikko, Mäkelä, Riitta, Siltanen, Olavi. 1997. Insinöörikoulutuksen Fysiikka 2. Tampere: Tammertekniikka.

6 Aallonpituus. 2011. Verkkodokumentti. Hamwiki.  
<<http://wiki.ham.fi/images/7/7d/Hamwiki-jakso.png>>. Luettu 15.1.2013.

7 Äänen voimakkuus. 2007. Verkkodokumentti. Tampereen ammattikorkeakoulu.  
<[http://aanipaa.tamk.fi/voima\\_1.htm](http://aanipaa.tamk.fi/voima_1.htm)>. Päivitetty 2007. Luettu 15.1.2013.

8 Meluvamman synty. 2009. Verkkodokumentti. Kuuloliitto ry.  
<[http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/kuulonsuojelu/meluvamman\\_synty/](http://www.kuuloliitto.fi/fin/kuulo/kuulonsuojelu/meluvamman_synty/)>. Luettu 19.3.2013.

9 Blomberg, Esa, Lepoluoto, Ari. 1992. Audiokirja: audiotekniikkaa ammattilaisille ja kehittyneille harrastajille. Verkkodokumentti. <[ari.lepoluo.to/audiokirja/](http://ari.lepoluo.to/audiokirja/)>. Luettu 6.1.2013.

10 Björk, Erkki. 2005. Ääntä vahvistavat olosuhdetekijät. Verkkodokumentti. Akustinen Seura Oy.  
<<http://www.akustinenseura.fi/images/stories/akustiikkapaivat2005/bjork.pdf>>. Luettu 19.3.2013.

11 Huoneakustiikka. 1997. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto.  
<[www.students.tut.fi/~jmikkola/hifiopas/](http://www.students.tut.fi/~jmikkola/hifiopas/)>. Luettu 20.11.2012.

12 Psykoakustiikka. 2007. Verkkodokumentti. Tampereen ammattikorkeakoulu.  
<[http://aanipaa.tamk.fi/psyko\\_1.htm](http://aanipaa.tamk.fi/psyko_1.htm)>. Päivitetty 2007. Luettu 15.1.2013.

13 Akustiikan perusteita. 2007. Verkkodokumentti. Tampereen ammattikorkeakoulu.  
<[http://aanipaa.tamk.fi/aku\\_1.htm](http://aanipaa.tamk.fi/aku_1.htm)>. Päivitetty 2007. Luettu 15.1.2013.

- 14 Akustiikkasanasto. 2013. Kotiakustiikka.  
<<http://www.kotiakustiikka.fi/akustiikkasanasto.html>>. Luettu 19.3.2013.
- 15 Koristeellista akustiikkaa. 2013. Verkkodokumentti. Knauf Danoline.  
<[http://www.knaufdanoline.fi/CREATE\\_it/Luovuus/Koristeellista\\_akustiikkaa.aspx](http://www.knaufdanoline.fi/CREATE_it/Luovuus/Koristeellista_akustiikkaa.aspx)>.  
Luettu 19.3.2013.
- 16 Savioja, Lauri. 1999. Modeling Techniques for Virtual Acoustic. Tutkimus. Helsinki University of Technology, Telecommunications Software and Multimedia Laboratory.
- 17 Akatemiatutkija Tapio Lokki selvitti akustiikassa tärkeät soittimien suuntakuviot. 2008. Verkkodokumentti. Suomen Akatemia. <<http://www.aka.fi/fi/A/Suomen-Akatemia/Mediapalvelut/Tiedotteet/Tiedotteet-2008/Akatemiatutkija-Tapio-Lokki-selvitti-akustiikassa-tarkeat-soittimien-suuntakuviot/>>. Luettu 7.1.2013.
- 18 Kärkkäinen, Aki. 2002. Spatiaalinen ääni käyttöliittymässä piiloinformaation välittäjänä ja visuaalisen kuorman keventäjänä. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto.
- 19 History. 2013. Verkkodokumentti. ODEON. <<http://www.odeon.dk/development-room-acoustics-software>>. Luettu 7.1.2013.
- 20 The acoustical design of the new lecture auditorium, Faculty of Law, Ain Shams University. 2012. Verkkodokumentti. Science Direct.  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447912000317>>. Luettu 7.1.2013.
- 21 Specifications. 2013. Verkkodokumentti. ODEON.  
<<http://www.odeon.dk/specifications>>. Luettu 7.1.2013.
- 22 CATT. 2013. Verkkodokumentti. <[www.catt.se](http://www.catt.se)>. Luettu 7.1.2013.
- 23 Inside RH. 2011. Verkkodokumentti. Renkus-Heinz. <<http://www.renkus-heinz.com/inside/inside.html>>. Luettu 7.1.2013.
- 24 Interactive tour. 2011. Verkkodokumentti. Renkus-Heinz. <[http://www.renkus-heinz.com/ease/ease\\_intro/intro\\_about\\_ease.html](http://www.renkus-heinz.com/ease/ease_intro/intro_about_ease.html)>. Luettu 7.1.2013.
- 25 Ease Focus. 2011. Verkkodokumentti. Renkus-Heinz. <<http://www.renkus-heinz.com/loudspeakers/linearrays/ease-focus/>>. Luettu 7.1.2013.
- 26 Price List. 2013. Verkkodokumentti. AFMG. <<http://www.afmg.eu/index.php/pricelist-en.html>>. Luettu 7.1.2013.
- 27 Autodesk Completes Acquisition of Assets of Square One Research and Green Building Studio. 2008. Verkkodokumentti. Autodesk.  
<<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?siteID=123112&id=11680648&linkID=14271589>>. Luettu 29.4.2013.

28 About Autodesk. 2013. Verkkodokumentti. Autodesk.  
<<http://usa.autodesk.com/company/>>. Luettu 7.1.2013.

29 System Requirements. 2010. Verkkodokumentti. Autodesk.  
<[http://images.autodesk.com/adsk/files/autodesk\\_ecotect\\_analysis\\_2011\\_system\\_requirements.pdf](http://images.autodesk.com/adsk/files/autodesk_ecotect_analysis_2011_system_requirements.pdf)>. Luettu 7.1.2013.

30 Ibarra, Diego, Reinhart, Christoph. 2009. Daylight factor simulations –How close do simulation beginners 'really' get? Tutkimus. Harvard University, Graduate School of Design.

31 Roberts, Andrew, Marsh Andrew. 2001. ECOTECT: Environmental Prediction in Architectural Education. Cardiff University.

32 Validation of Ecotect Analysis results. 2013. Verkkodokumentti. Autodesk.  
<<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/ps/dl/item?siteID=123112&id=14576143&linkID=13734494>>. Luettu 7.1.2013.

