



Anton Iakovkin

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI AULA AKUSTILISTE TINGIMUSTE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond
Hoonete ehituse eriala

Tallinn 2014



Ehitusteaduskond

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Diplomand: Anton Iakovkin..... Üliõpilase kood e09049 Õpperühm EI-91.....

Eriala: Hoonete ehitus (kood 1827)

Lõputöö teema:Tallinna Tehnikaülikooli aula akustiliste tingimuste

analüüs.....

.....
.....

Lähteandmed töö koostamiseks: ..Tallinna Tehnikaülikooli olemasoleva aula arhitektuurne ja
sisearhitektuurne lahendus.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Töö koosseis, lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu.

Töö koosseis: sissejuhatus, arhitektuuriakustika mõistete seletus, ülevaade ruumiakustika
parameetritest, ruumiakustika mõõtmiste kirjeldus, akustikaparameetrite arvutused ja
akustikatingimuste analüüs.

Töö eesmärgiks on akustkamõõtmiste abil leida aula ruumiakustika parameetrid ja nende analüüsi
põhjal langetada otsus, kas aula lahendus tagab soodsad akustilised tingimused kõne ja
muusika edastamiseks. Vajadusel teha ettepanekud akustiliste tingimuste parandamiseks

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:
.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Seletuskiri peab olema trükitud kas masinkirjas või arvutil.
Joonised vormistada kas käsitsi või arvutil.

Lõputöö konsultandid:

Valdkond	Konsultandi nimi	Allkiri	Kuupäev
Akustika	Dmitri Tiško		

Lõputöö juhendaja: Linda Madalik.....
(nimi) (allkiri) (kuupäev)

Diplomand: Anton Iakovkin.....
(nimi) (allkiri) (kuupäev)

Kinnitan ülesande: Martti Kiisa
Ehitusteaduskonna dekaan (allkiri) (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 25 november 2013 a.

Lõputöö esitamise tähtaeg: 12 mai 2014 a.

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	8
1. AKUSTIKA PÕHIMÕISTE	10
1.1. Heli	10
1.2. Sagedus.....	10
1.3. Õhuheli	10
1.4. Helirõhk ja helirõhutase.....	11
1.5. Sagedusribad.....	13
1.6. Helivõimsus	13
1.7. Heli levimine	14
1.7.1. Helineelduvus.....	14
1.7.2. Neeldumispind	14
1.7.3. Ruumi helisummutus.....	15
1.7.4. Heli sumbumine siseruumides	15
2. RUUMIAKUSTIKA.....	16
2.1. Eesmärgid	16
2.2. Heli peegeldumine	16
2.3. Ruumi kuju	17
2.4. Pinna kuju	17
2.5. Ruumi omavõnkumine	18

3.	AKUSTILISTE PARAMEETRITE MÕÕTMISE METOODIKA	19
3.1.	Olulisemad mõisted akustika mõõtmisel	19
3.1.1.	Languskõver	19
3.1.2.	Katkenud müra meetod	19
3.1.3.	Impulssreaktsioon.....	20
3.1.4.	Järelkõlakestus	20
3.1.5.	Varajane järelkõlakestus	21
3.1.6.	Helienergia keskaeg	21
3.1.7.	Helitugevus.....	22
3.1.8.	Heli selgus	22
3.1.9.	Kõne selgusarv	22
3.1.10.	Ruumi täituvuse seisundid.....	23
3.2.	Mõõtmise põhinõuded	23
3.2.1.	Üldiselt	23
3.2.2.	Mõõteriistad	23
3.3.	Mõõtmise asukohad	24
4.	TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI AULA AKUSTILISTE PARAMEETRITE MÕÕTMISE ESMÄÄRK	26
5.	TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI AULA AKUSTILISTE PARAMEETRITE MÕÕTMISED.....	27
5.1.	Saali pindade kirjeldus.....	27
5.1.1.	Põrand.....	27
5.1.2.	Istekohad	27
5.1.3.	Lagi.....	27
5.1.4.	Külgseinad.....	27
5.1.5.	Tagasein	28

5.1.6.	Esisein	29
5.2.	Heliallikate punktid	29
5.3.	Heli vastuvõtupunktid.....	29
5.4.	Mõõtmiste tulemused	30
5.4.1.	Heliallika esimene asukoht.....	30
5.4.2.	Heliallika teine asukoht	34
5.4.3.	Heliallika kolmas asukoht	38
5.5.	TTÜ aula neeldumispindade mõju järelkõlakesusele.....	43
6.	TTÜ AULA AKUSTILISTE PARAMETRITE ANALÜÜS.....	44
6.1.	Aula helineeldumispind.....	44
6.2.	Aula järelkõlakesus toolide ja inimestega	45
6.3.	Aula vaipkate	47
6.4.	Varajane järelkõlakesus.....	47
6.5.	Helienergia keskaeg.....	48
6.6.	Heli selgus	48
6.7.	Kõne selgusarv	49
6.8.	Eeldatav helitugevus	49
6.9.	Ruumi külgmiste helipeegelduste osakaal.....	50
6.10.	Basside osakaal	51
KOKKUVÕTTE		52
SUMMARY		54
VIIDATUD ALLIKATE LOETELU.....		56
LISAD		57
Lisa 1. – TTÜ aula vaade fragment (A.Põime)		57

SISSEJUHATUS

Lõputöö objekti otsingul soovis lõputöö autor leida teemat, kus saaks suurel määral uusi teadmisi huvitavas ehituse valdkonnas. Õpingute käigus selgus, et minu õppeprogrammis puudub akustika õpetamine. Ehitusteaduskonna eesmärgid on ehitustööde organiseerimise õpetamine ja ehitiste baas projekteerimisteadmiste andmine. Õpingute jooksul tekkis arusaam, et hoonete projekteerimisel mängivad suurt rolli järgmised distsipliinid: piirete soojajuhtivus, konstruktsioonide kandevõime, tehnoloogiline lihtsus. Hetkel koguvad populaarsust ehitiste energiatõhusus, keskkonnasõbralikus ning BIM. Akustika on seotud nii meie ümbritseva keskkonna kui ka ruumide mugavusega, kuna tänava mürataseme vähenemine ja kuulamiseks sobilike tingimuste tagamine loovad ruumi mugavust. Suurte linnade vanadel hoonetel tavaliselt piirete helipidavus on madal ning müra levib kergesti läbi seinte ja akende. Kontserdisaalide projekteerimisel on kõike tähtsam heli levik vaadeldavas ruumis. Vanades hoonetes tehakse vajalikud tööd soodsate akustiliste tingimuste tagamiseks. Lõputöö raames tehtud uuring annab võimaluse tutvuda ja paremini aru saada, kuidas heli ja akustika käituvad vaadeldud tingimustel ja üldjuhul.

Termin akustika sisaldab paljusid valdkondi. Ehitusakustika on füüsika osa, mis tegeleb heli kontrollimisega ehitises. Ehitusakustikaga püstitatud küsimused võib jagada kahte pearühma. Esimese rühma eesmärk on kindlustada ruumis kuulajatele täisväärtuslik ja moonutusteta heli, mis on seotud tämbri loomulikkusega, kaja puudumise ja parima kõlavusega [1]. Teise rühma eesmärk on segavhelide nõrgendamine või isoleerimine[1]. Eelkõige on heli kontrolli peamine ülesanne on soodsate tingimuste loomine inimestele mugavaks kuulamiseks. Kuulamise mugavuse täitmiseks on vaja võtta arvesse mitte ainult ehitise esteetilisuse ja funktsionaalsuse kriteeriumid, vaid ka võimalikud konstruktsioonide ja materjalide lahendused.

Tihti jäetakse ruumi akustilised tingimused tähelepanuta. Muidugi projektide kavandamisel ehitiste projekteerijad ja arhitektid puutuvad kokku erinevate ehitusakustika nõudmistega.

Akustika oma põhimõttes käsitleb heli olekut. Läänes, mõnedes suurtes ettevõtetes on organiseeritud spetsiaalsed osakonnad. Üks nendest osakondadest võib tegeleda ainult materjalide ja konstruktsioonide akustiliste omaduste ning parameetrite uurimistega. Uuringute andmeid saab kasutada projekteerimisel. Vastavalt standardi EVS 811:2012 „Hoone ehitusprojekt” nõuetele peab ehitusprojekt käsitlema ka ehitusakustikat. Nõudmised ehitusakustikale esitatakse standardis EVS 842:2003 „Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest”. Projekteerimisel kasutatakse teavet materjalide ja konstruktsioonide akustiliste omaduste kohta. Valmis ehitisel on võimalik akustikanõuete täitmist kontrollida mõõtmistega.

Töö eesmärgiks on akustika mõõtmiste abil leida TTÜ aula ruumiakustika parameetrid ja nende analüüsi põhjal langetada otsus, kas aula lahendus tagab soodsad akustilised tingimused kõne ja muusika edastamiseks. Vajadusel teha ettepanekud akustiliste tingimuste parandamiseks.

Lõputöö tegemisel läbiviidud uuring annab võimaluse võrrelda ning analüüsida TTÜ aula praktilisi parameetreid teoreetilistega. Ruumi akustilised mõõtmised on tehtud vastavalt standardile ISO 3382-1 „Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Aula ruumiakustika projekteerimisel on kasutatud erinevad võtted: puitribid seinte pindadel ja nende taga villaplaadid, siirdesein, vineerist helipeegeldi laes ning Decocoat helineelav süsteem..

1. AKUSTIKA PÕHIMÕISTE

1.1. Heli

Heli on õhurõhu kõikumine staatilise õhurõhu suhtes. Vibratsiooniallikad tekitavad ümbritsevasse õhku tihendusi ja hõrendusi. Pikilainetena heli kandumine heliallikast keskkonda toimub õhuosakeste liikumisega lükkab liikvele järgmised õhuosakesed. [2]

1.2. Sagedus

Sagedus on võngete arv sekundis. Kuulmisaisting tekib, kui õhurohu kõikumine paneb kõrva trumminaha võnkuma. Kui võnked on sagedased, loetakse heli kõrgeks. Väikese sagedusega võnkeid kogetakse madala helina. Helisagedus $f(\text{HZ})$ leitakse järgmise valemiga: [2]

$$f = \frac{n}{T}, \quad (1)$$

kus n - võngute arv;

$T[\text{s}]$ - aeg.

Inimene on võimeline kuulma helisid sagedusega 20 ja 200 Hz.

1.3. Õhuheli

Heli vajab levimiseks ainet: vaakumis helid levida ei saa. Õhus liikuva heli kohta kasutatakse nimetust õhuheli. Seda põhjustavad kõne, muusika, helivõimendusseadmed, hoone tehnoseadmed ja mitmesugused masinad. Helikiirus c (m/s) sõltub temperatuuris t ($^{\circ}\text{C}$): [2]

$$c = 331 + 0,6t, \quad (2)$$

kus t [$^{\circ}\text{C}$] – temperatuur.

Toatemperatuuril on heli kiirus õhus 340-345 m/s. Heli kiirus, sagedus ja õhuheli pikilaine lainepikkus λ [m] on omavahel sõltuvuses ning järgmisest valemist on leitav heli sagedus f [Hz]: [2]

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (3)$$

kus c [m/s] - heli kiirus;

λ [m] - lainepikkus.

1.4. Helirõhk ja helirõhutase

Atmosfääri õhurõhk on umbes 100 kPa, kuid kuuldelävi ehk vähim õhurõhu muutus, mida inimene on võimeline aistima, on $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Helina aistitava õhurõhu muutust nimetatakse helirõhuks p (Pa). Heliasiting muutub valuasitinguks, kui helirõhk on ligemale 20 kPa. Kuna helirõhu numbriline väärtus on väga väike, kuid kuuldeläve ja valuläve vahe on suur, seetõttu oleks helirõhku keeruline kasutada praktilises projekteerimistöös. Seepärast võrreldakse helirõhu p võrdlusaluseks võetud kuuldelävega p_0 . Pärast seda on helitugevust võimalik kirjeldada helirõhutasega L_p (dB): [2]

$$L_0 = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}, \quad (4)$$

kus p [Pa] - helirõhk;

p_0 [Pa] - vähem õhurõhu muutus.

Tabel 1

Helitasemeid hoone siseruumides [2]

Helirõhutase L_p	Ühikud	Heliallikas
25	dB	Vaikne korter ööajal
35	dB	Kontoriruumi taustmüra
45	dB	Pangasaali taustmüra
55	dB	Kontor, kus on kuulda kõneheli
65	dB	Tavaline kõneheli 1 meetri kaugusel
75	dB	Tugev kõneheli 1 meetri kaugusel
85	dB	Suurköögis, kus masinad töötavad
95	dB	Sümfooniaorkestri tugevaimad helid
105	dB	Valju rock-kontserdi ajal

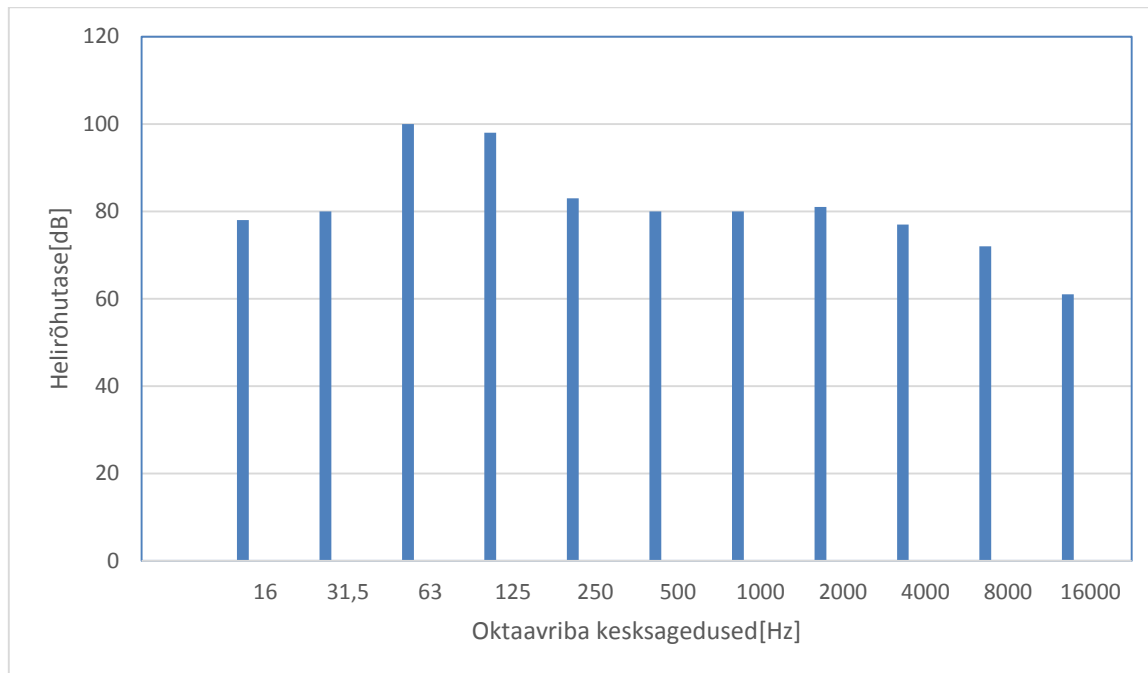
Kui heliallikas ruumis alustab toimimist, siis kuulja märkab esimesena heliallikast kõrva jõudnud heli. Pärast seda saavad tema kõrvu esimesed peegeldused seintelt, laest ja põrandalt. Pindadelt peegelduvad helid tõstavad helirõhutatset võrreldes otse saabunud heli rõhutasemega. Kui ruumis oleksid kõik pinnad täielikult peegeldavad ning heliallikast tulev helivõimsus ei neelduks üldse, isegi õhu mõjul mitte, siis helirõhutase kasvaks ruumis määratult suureks. [2]

Heliallika poolt ruumi tekitava helirõhutaseme kindlakstegemiseks oletatakse sageli, et heliväli on difuusne. Difuusne heliväli tähendab, et ruumi kõigis punktides on helirõhutaseme ühesuurune. See on võimalik, kui ruum on kuubikujuline, jäikade pindadega ja ruumi mõõtmed märgatavalt suuremad vaadeldava heli lainepikkusest. [2]

1.5. Sagedusribad

Heli allikate tekitatavad helirõhutasemed on üksiksagedusel erinevad. Seepärast jagatakse akustikas heli sagedusjaotus ehk helispekter väiksemaks osadeks, millede nimetus segadusribad. Sagedusribade kirjeldamiseks kasutatakse oktaavribasid. [2]

Nüüdisaegsete seadmete helitasemed ja masinate omadused näidatakse kesksagedusel 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ning 4000 Hz. [2]



Joonis 1. Helirõhutase oktaavriba kesksagedustel [2]

1.6. Helivõimsus

Seadmete mürasaaste keskkonda antakse helivõimsuse kujul. Helivõimsustase ei võimalda otse hinnata, millisena mingi heliallikas teatud ruumis või keskkonnas kuulduks, sest ruumi ja keskkonna omadused mõjutavad heliallika tekitavaid helirõhutasemeid. [2]

Heliallika tekitatav koguhelienergia sekundis on helivõimsus $W[W]$. Helivõimsus ei olene mõõtmiskaugusest või kajast ruumis, nagu heliallika tekitatav helirõhk seda teeb. [2]

1.7. Heli levimine

1.7.1. Helineelduvus

Helineelduvus on siseruumis tekkivate helide neeldumine. Helineelduvus on peamiselt pinnakattematerjalide omadus. Helineelduvus ei tohi segada materjali heliisolatsiooniga. Heliisolatsioon takistab heli kostumist ühest ruumist teise. Alati osa helist peegeldub tarindi pinnalt, kuid teine osa levib teise ruumisse. Seda nähtust iseloomustatakse helineeldumisteguriga $[\alpha]$: [2]

$$\alpha = \frac{W_i - W_r}{W_t}, \quad (5)$$

kus $W_i[W]$ - tarindile mõjuv helivõimsus;

$W_r[W]$ - tarindilt peegelduv helivõimsus;

$W_t[W]$ - tarindi läbiv helivõimsus.

Helineeldumisteguri väärtus võib jääda vahemikku $0 \dots 1$ ja see oleneb tugevasti sagedusest. Mida suurem on helineeldumistegur, seda vähem materjal peegeldab heli tagasi ruumi. Tarindi helineeldumisteguri kasvamisel väheneb peegeldunud heli intensiivsus. [2]

1.7.2. Neeldumispind

Neeldumispind on ruumiakustika tähtsamaid mõisted. Neeldumispind iseloomustab ruumis oleva helineeldematerjali koguhulka ruutmeetrites. Neeldumispinna määratlemine tähendab just sellise materjali pindala, mille helineeldumistegur on 1. [2]

Tegelikkuses võib ruumis olla kõikvõimalike materjale. Ruumi pindade kattematerjalide helineeldumistegurite α_i ja nende pindade $S_i[m^2]$ põhjal saab arvutada ruumi neeldumispinna iga oktaavriba kesksagedusel. Ühe ruumis leiduva materjali neeldumispind on selle materjali helineeldumisteguri ja pindala korrutis. Ruumi koguneeldumisala on kõigi pinnakattematerjalide neeldumisalade summa $A[m^2]$: [2]

$$A = \alpha_1 * S_1 + \alpha_2 * S_2 + \alpha_n * S_n, \quad (6)$$

kus α_i - helineeldumistegur;

$S_i[m^2]$ - materjali pindala.

1.7.3. Ruumi helisummutus

Kui heliallikas ruumis alustab toimimist, siis kuulaja märkab esimesena otse heliallikast kõrva jõudnud heli. Varsti pärast seda saavad tema kõrva esimesed peegeldused seintelt, laest ja põrandalt. Kõigilt pindadelt peegelduvad helid tõstavad helirõhutase võrreldes otse saabunud heli rõhutasemega. Kui ruumis oleksid kõik pinnad täielikult peegeldavad ning heliallikast tulev helivõimsus ei neelduks üldse, siis helirõhutase kasvaks määratult suureks. [2]

1.7.4. Heli sumbumine siseruumides

Järelkõlakestus on algselt kasutusele võetud kirjeldamiseks suurte ja kajavate ruumide (näiteks kirikud, auditooriumid). Järelkõlakestuse kasutamine on laienenud praktikas igasugustele hooneakustilistele rakendustele selle pärast, et Sabine'i ja heli sumbumise valemeid on lihtne rakendada. Valemite kasutamisel on eelduseks siiski, et ruumi heliväli on difuusne. See tähendab, et ruum peaks olema tühi, tugeva kõlaga ning proportsionaalse kujuga ja võimalikult kuubikujuline. Helineeldematerjalid peavad olema ühtlaselt jaotunud ruumi pindadele. [2]

2. RUUMIAKUSTIKA

2.1. Eesmärgid

Ruumikasutika eesmärk on kontrollida heli liikumist, peegeldamist ja summutamist ruumis. Otstarbekohases ruumis on esinejal on lihtne kõnelda häält pingutamata, nii et saab kõnest aru. Selleks peavad ruumis olema nii heli peegeldavad kui ka summutavad pinnad. Peegeldavate pindade ülesanne on esineja hääle suunamine publikuni. Kõnesaali summutavate pindade mõte on vähendada ruumi kõlavust selliselt, et kõnesilbid eristuksid korralikult. [2]

Kõneleja hääle võib maskeerida hoone tehnosüsteemide heli või kõrval paiknevatest ruumidest kanduv heli. Seega ei tuleks kõneruume projekteerida eraldi, vaid ruumid tuleb arvesse võtta tervikuna. Hoone õhu- ja löögheliisolatsioon peab olema otstarbekohane ning hoone tehnosüsteemide tekitav helitase õigesti valitud. [2]

2.2. Heli peegeldumine

Suletud ruumides on suurem osa helienergiast, mida kuulmise teel aistitakse, peegeldunud ruumi seinte, lae ja põranda pinnalt. Kui suures kontserdisaalis heliallikas välja lülitada, kuuleb pealtvaataja veel umbes sekundi jooksul heli, mis peegeldunud umbes kakskümmend korda. Heli peegeldub peamiselt samas kombel kui valgus: nurk, mille all helilaine kohtub pinnaga, on sama suur kui nurk, mille all ta peegeldub pinnast eemale. [2]

Ruumi kuju mõjutab seda, milliseks kujuneb kõne arusaadavus või millised tingimused saadakse esinejatele. Üheks ruumi ruumiakustiliseks näitajaks peetakse ajavahet otseheli ja esimese peegelduse vahel. Ristkülikukujulises ruumis peegeldused hajuvad ja ruumi võib jääda kohti, kus peegelduste hulk on vähene. Hea peegeldumine on erinevatel sagedustel erinev. Mida madalam on helisagedus, seda suurem peab olema peegeldav pind. Väike pind ei põhjusta peaaegu üldse

hääreid madala sagedusega helilainele, sest lainepikkus on suur. Sile suur pind peegeldab heli samal viisil kui peegel valgust, kuid ebatasase pinnaga saab peegeldusi hajutada. [2]

2.3. Ruumi kuju

Ruumi põhikuju mõjutab seda, milliseks kujuneb kõne arusaadavus või millised tingimused saadakse esinejatele. Üheks ruumi ruumiakustiliseks kriteeriumiks võib pidada ajavahet otseheli ja esimesse peegelduse vahel. Ristkülikukujulises ruumis tekivad peegeldused külgsentelt ühtlaselt kogu ruumi ulatuses. Levikujulises ruumis peegeldused hajuvad ja ruumi võib jääda kohti, kus peegelduste hulk on vähene. Ümmargust ruumi ja kaarjaid pindu tuleks vältida selle pärast, et sellistes ruumide võivad tekkida tugevad helide kontsentratsioonid. [2]

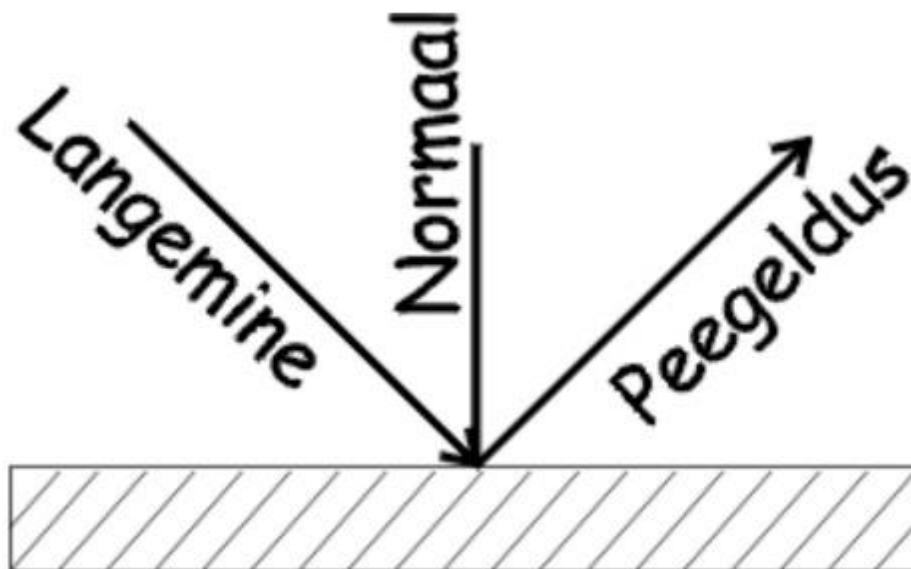
Kaldus lagi ja selle kalde suund mõjutavad ruumi ruumiakustikat. Ristkülikukujulise ruumide puhul vahemaa ruumi esiosa ja tagamiste ridade vahel kujuneb liiga pikaks. [2]

2.4. Pinna kuju

Heli peegeldumine sõltub sagedusest. Mida madalam on helisagedus, seda suurem peab olema peegeldav pind. [2]

Pinna kujule mõjutab peegeldumist pinna ebatasasus. Suur sile pind peegeldab heli kõige paremini (vt pilt 1), aga ebatasane pind saab peegeldusi hajutada. Kui pinna muster ei ole korrapärane, siis see hajutab heli laias sagedusdiapasoonis. Heli hajutamiselgi väheneb järelkõlakesus, kui mitte nii palju kui helineeldumise suurendamisel. Ruumis olev mööbel hajutab heli samal viisil kui konarlik pind. [2]

Kui heliallikas paikneb nõgusa pinnale lähedal, siis pind koondab heli. Nõgus pind hajutab heli juhul, kui heliallikas ja kuulaja paiknevad sellest kaugel. Kumer pind seevastu toimib alati hajutava tarindina. [2]



Joonis 2. Helilainete peegeldamine siledalt pinnalt [1]

2.5. Ruumi omavõnkumine

Difuusne heliväli moodustab heli poolt tekitatud ruumi omavõnkumiset. Kõrgetel sagedustel on omavõnkesagedused nii lähestikku, et neid pole võimalik üksteisest eristada. Madalatel sagedustel on omavõnkumisi vähe ja järelkõlakestus ning helitase ruumis võivad eri kohtades tugevasti kõikuda. [2]

3. AKUSTILISTE PARAMEETRITE MÕÕTMISE METOODIKA

Vanasti arvati, et järelkõlakestus on kõige olulisem ruumiakustika näitaja. Kuigi järelkõlakestus on ikkagi veel jäänud tähtsamaks ruumiakustika parameetriks, peetakse vajalikuks ruumi akustiliste omaduste paremaks hindamiseks teostada teisigi uuringuid. Need uuringud näitavad, millised on järgmised parameetrid:

1. Suhteline helirõhk
2. Varaline/hiline energia suhtarvud
3. Külgmised energia fraktsioonid
4. Taustamüra tase

[3]

3.1. Olulisemad mõisted akustika mõõtmisel

Lõputöö uuringust arusaamiseks on tähtis selgeks teha mõned akustilised parameetrid. Terminite selgitused on toodud järgmistes pealkirjades.

3.1.1. Languskõver

Ruumi heli rõhutaseme languse graafiline kujutamine aja funktsioonina pärast heliallika peatamist. [3]

3.1.2. Katkenud müra meetod

Languskõvera saamine heli rõhutaseme langemise otse salvestamisega lairiba või piiratud laineala heli tekkimisel. [3]

3.1.3. Impulssreaktsioon

Helirõhu ajaline areng vaadeldava ruumi punktis, mis on saadud Dirac'i impulsi emissiooni tulemusena. [3]

3.1.4. Järelkõlakestus

Aeg, mille vältel helienergia tase langeb esmaväärtusest 60 dB pärast heliallika väljalülitamist [4]. Mida lühem on järelkõlakestus, seda kiiremini kõnesilbid sumbuvad. See tähendab, mida pikem järelkõlakestus, seda kauemaks jäävad silbid üksteise taustale kõlama ja kõnest arusaadavus on häiritud. Kui neeldumispind on liiga suur, siis võib kõne helitase langeda taustmüra tasemele, mis omalt poolt raskendab kõne eristamist. Järelkõlakestust $T[s]$ saab hõlpsasti hinnata ruumi kubatuuri ja ruumis leiduvate helineelavate materjalide põhjal, kasutades algset Sabine'i võrrandit [4]:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}, \quad (7)$$

kus $V [m^3]$ – ruumi ruumala.

Ruumi akustika hindamiseks kasutatakse ka järelkõlakestusi 20 dB (T_{20}) ja 30 dB (T_{30}), mis on aeg, mille vältel helirõhutase langeb vastavalt 20 ja 30 dB. [3].

Tabel 2

Erinevate ruumide järelkõlakestused keskmisel sagedusel 500 Hz [2]

Järelkõlakestus	Ruum
>5 s	Tühi kivikirik
2-3 s	Suur saal, kus ei ole summutust
1,8-2,2 s	Kontsertsaal
1,5 s	Möbleerimata magamistuba
1,0-1,2 s	Teater, auditoorium
0,5-0,8 s	Hästi projekteeritud klassituba
0,5 s	Möbleeritud magamistuba
0,3-0,8 s	Kinosaal olenevalt mahust
0,2-0,3 s	Helitehnika ruum olenevalt mahust

3.1.5. Varajane järelkõlakestus

Varajane järelkõlakestus on aeg, mille vältel heli vaibub 10 dB võrra. Inglise keeles nimetatakse seda mõistet EARLY DECAY TIME, mis tähistatakse EDT. Ideaalis peaks saali EDT olema võrdne järelkõlakestusega või olema sellest veidi madalam. EDT on parameeter, mis sõltub otsestelist ja esimestest helipeegeldustest. [4]

3.1.6. Helienergia keskaeg

Helienergia keskaeg (T_s) on aeg, mille vältel vaadeldavasse punkti saabub pool helienergiast. Parameeter, mis iseloomustab ruumi kõlavusastet ja heli selgust. Kui T_s väärtused on suhteliselt madalad, siis jõuab suurem osa helienergiast kuulajani lühikese aja vältel. Suured helienergia keskaega väärtused näitavad, et helienergia koguneb pika aja vältel. Helienergia keskaeg sõltub järelkõlakestusest, aga samuti ruumi eripärast (geomeetria, helisummutusmaterjalide paigutus). Mõnede autorite arvates on T_s optimaalsed väärtused vahemikus 20...140 [s]. [4]

3.1.7. Helitugevus

Helitugevus on parameeter, mis kirjeldab helivälja suhtelist tugevust ruumis. See ei ole otseselt võrdeline järelkõlakestusega. Helitugevust mõjutab oluliselt ruumi kuju. Iseloomustab helienergia jaotumist ruumis. [4]

Parameeter G [dB] väljendab ruumis mõõdetud energiahulga suhet energiahulka, mis on mõõdetud 10 m kaugusel samast allikast vabas heliväljas [3]:

$$G = 10 * \log \frac{\int_0^\infty \rho^2(t) dt}{\int_0^\infty \rho_{10}^2(t) dt}, \quad (8)$$

kus $\rho(t)$ - helirõhu impulsi reaktsioon mõõdetud mõõtmise hetkel;

$\rho_{10}(t)$ - helirõhu impulsi reaktsioon mõõdetud 10 m. Kaugusel.

3.1.8. Heli selgus

See on parameeter, mis näitab esimese 80 ms jooksul saabunud helienergia suhet hiljem saabunud helienergiasse. Heli selgus (C_{80}) on kõige olulisim kontsertsaalidele sellepärast, et parameetri nõutava väärtuse täitmisel on muusika kuulamisel tagatud selgus. See väärtus on vahemikus -2...+2 dB vahemikus. [4]

3.1.9. Kõne selgusarv

Parameetri väärtus iseloomustab esimese 50 ms jooksul saabunud helienergia ja kogueenergia suhet. Kõne arusaadavus sõltub selgusarvust (D). Kui parameetri näitaja on nõutavas diapsoonis, siis kõne selgus on kõige kõrgem. [4]

3.1.10. Ruumi täituvuse seisundid

1. Kuulajateta (tühi) ruum: ruum, mis on mõeldud kõnelejate või esinejate ning kuulajate jaoks, kuid ilma nende isikute juuresolekuta. [3]
2. Stuudio seisund: ruum on kasutusel ainult kõnelejatele või esinejatele, ilma kuulajateta. [3]
3. Kuulajatega ruum: auditooriumi või teatri seisund, kui kuulajaid on 80 kuni 100% [3]

3.2. Mõõtmise põhinõuded

3.2.1. Üldiselt

Järelkõlakestuse mõõtmise võib läbi viia nii tühjas kui kuulajatega ruumis. Kui ruumis on reguleeritavad detailid, mis pakuvad muutuvaid akustilisi omadusi, siis oleks asjakohane teostada eraldi mõõtmised erinevates olukordades. Ruumi temperatuuri ja õhu suhtelise niiskuse suurused peavad olema mõõdetud täpsusega vastavalt $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ja 5%. Järelkõlakestuse mõõtmisel on oluline täpselt kirjeldada ruumi täituvuse seisundit. [3]

3.2.2. Mõõteriistad

3.2.2.1. Heliallikas

Heliallika lained peavad levima ruumi igas suunas. Allika heli rõhutase peab olema piisav selleks, et anda helirõhutaseme languskõverad ilma taustmürata. Allikas ja sarnased instrumendid peavad olema adekvaatsed, et anda ühtlane signaali tase sagedusvahemikus 125 Hz kuni 4000 Hz. [3]

3.2.2.2. Mikrofonid

Mikrofonid peavad vastu võtma heli rõhu igast suunast. Mikrofonide suurus peab olema võimalikult väike ja eelistavalt minimaalse diafragma 13 mm. Mikrofonide maksimaalselt lubatav diameeter on 26 mm. Mikrofonid on vaja kalibreerida erinevate andmete registreerimiseks. [3]

3.2.2.3. Registreerimisseade

Kui heli languskõver on esmalt salvestatud magnetlindile või digitaalsele salvestusseadmele, siis võimenduse automaatne kontroll või dünaamiline signaali/müra optimeerimine on keelatud. Iga languskõvera registreerimisaeg peab olema piisavalt pikk, et oleks võimalik määratleda lõplik foonitase pärast languskõvera lõppu; viis sekundit pluss oodatav järelkõlakestus on soovitatav miinimum. [3]

Registreerimisseadmel peavad olema järgmised tunnused:

1. Salvestusseadme sageduskarakteristik peab olema ühtlane kogu mõõtmisdiapasooni ulatuses tolerantsiga ± 3 dB
2. Dünaamiline diapsoon peab olema piisav, et tagada languskõvera ulatuse nõutud miinimum.
3. Taasesituse kiiruse ja salvestamise kiiruse suhe peab olema $10^{0,1 \cdot n}$, ± 2 % piirides, kus n on täisarv. [3]

3.3. Mõõtmise asukohad

Heli allikas peab paiknema asukohas, kus on loomuliku heliallika tavaline seisukoht ruumis. Minimaalselt on nõutud kaks heliallikat. Heliallikate akustilise keskpunkti kõrgus peab olema 1,5 meetrit põrandapinnalt. [3]

Mikrofonid peavad paiknema kohtades, kus tavaliselt kuulajad seisavad või istuvad. Järelkõlakestuse mõõtmisel on tähtis, et mõõtmise asukohad kataksid kogu ruumi. Mikrofonipositsioonide vahekaugus peab olema vähemalt kaks meetrit, mis on pool lainepikkust tavalise sagedusdiapasooni korral. Kaugus mikrofonist helipeegeldava pinnani peab olema vähemalt üks meeter, mis on veerand lainepikkusest. [3]

Mikrofonid ei tohi olla heliallikate lähedal. Ruumides kõne ja muusika jaoks peab mikrofonide kõrgus põrandapinnalt olema 1,2 meetrit. See number on põhjustatud tavalise istuva kuulaja kõrva kõrgusest. Mikrofonide positsioonide jaotusel on vaja arvesse võtta ka need kohad, mis võivad põhjustada järelkõlakestuse erinevusi kogu ruumi lõikes. Need positsioonid on istekohad

seinte kõrval või rõdude all. Mikrofonipositsioonide arv sõltub istekohtade arvust, mis on toodud järgmises tabelis (vt tabel 3). [3]

Tabel 3

Mikrofonipositsioonide arvu sõltuvus istekohtade arvust [3]

Istekohtade arv	Minimaalne mikrofonide arv
500	6
1000	8
2000	10

4. TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI AULA AKUSTILISTE PARAMEETRITE MÕÕTMISE ESMÄÄRK

TTÜ aula akustiliste parameetrite mõõtmiste põhieesmärk on ruumi akustilise omaduste uurimine. Toodud aula näidisel saab teada erinevate akustiliste parameetrite soovitud väärtused ja ruumide akustiliste parameetrite parandamise võtteid.

Saadud Mõõtmistega saab uurida, kas aula akustilised näitajad vastavad nõuetele. Renoveerimisel aulale oli koostatud projekt tema akustiliste omaduste parandamiseks. Läbiviidud töö loob sobiliku keskkonna heli levimiseks igasugustel üritusel saalis.

Töö eesmärgiks on akustika mõõtmiste abil leida aula ruumiakustika parameetrid ja nende analüüsi põhjal langetada otsus, kas aula lahendus tagab soodsad akustilised tingimused kõne ja muusika edastamiseks. Vajadusel teha ettepanekud akustiliste tingimuste parandamiseks.

5. TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI AULA AKUSTILISTE PARAMEETRITE MÕÕTMISED

5.1. Saali pindade kirjeldus

5.1.1. Põrand

Tegemist on tasapinnalase põrandaga ruumiga. Põrandat katab puitparkett. Põranda pindala on sõltuvalt siirdeseina kasutamisest, kas 519 m² või 771 m² (koos auditooriumiga).

5.1.2. Istekohad

Ruumi istmed on polsterdatud. Istumisala ei ole statsionaarne.

5.1.3. Lagi

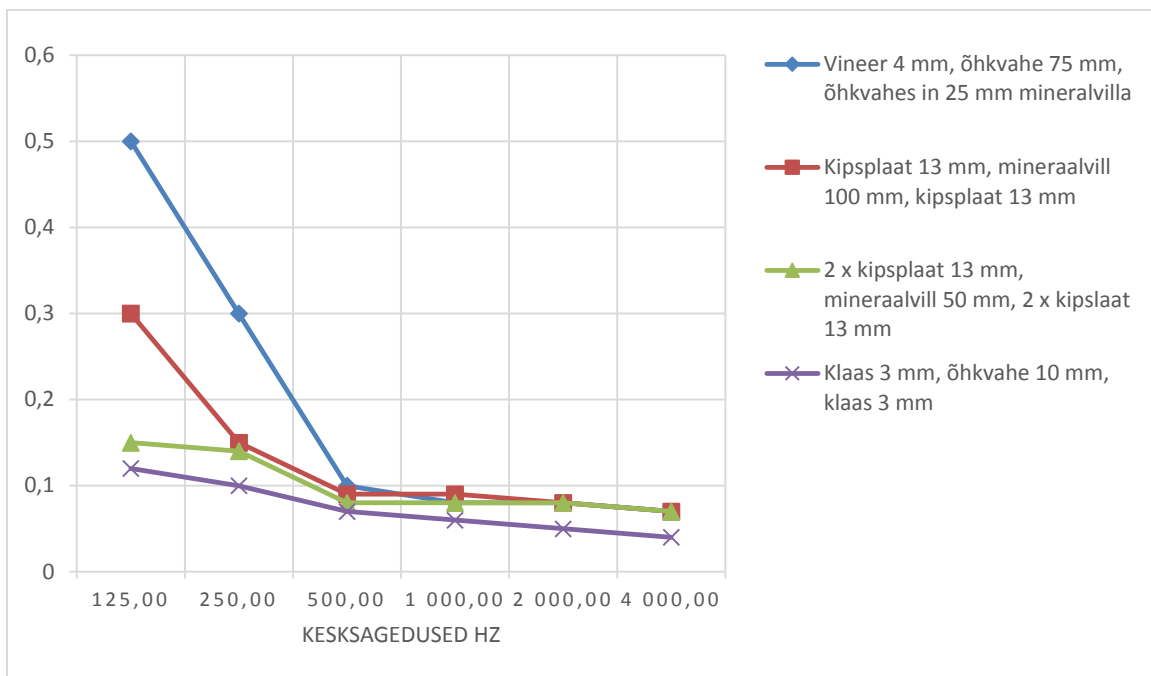
Lagi on konstruktiivne betoonlagi. Lae esiosas on vineerist helipeegeldi.

5.1.4. Külgseinad

Telg 23 – teise korruse rõdu sein on värvitud betoonsein, väljaulatuv osa on kaetud akustilise villaplaadiga, mille peal on omakorda puitribid. Sein on helihajutavate/helineelavate omadustega.

Rõdualune sein on kaetud vineeriga, mille taga on õhuvahe. Selline konstruktsioon töötab plaatresonaatorina.

Plaatresonator on tarind, milles homogeense ehitusplaadi taga on tühi või mineraalvillaga täidetud õhkvahe. Plaatresonaatorites neelduvad madala sagedusega helid. Kõrgetel sagedustel on plaatresonatorid peegelduvad tarindid. Ruumi aknad, seinad ja suurel määral ka ukSED on plaatresonatorid. Plaatresonaatori omasagedus on seda madalam, mida suurem on plaadi pinnamass ja mida laiem on õhkvahe. [2]



Joonis 3. Helineeldumisteguri sõltuvus tarindi konstruktsioonist [2]

5.1.5. Tagasein

Tagaseinas on lükandsein, mille pind on kaetud perforeeritud puitspooniga. Puitspooni helineeldetegur kõrgetel sagedustel suureneb sellepärast, et lühemalaineline helilaine läbib augud ja neeldub plaadi taga olevas poorses materjalis [5]. Aukude läbimõõt ei tohi olla väiksem kui plaadi paksus [5].

Taga seina ülemine osa on kaetud akustilise krohvisüsteemiga Decocoat. Decocoat'i akustiline krohvisüsteem moodustub 20 mm paksustest akustilistest villaplaatidest, kaetakse spetsiaalse akustilise krohviga kohapeal. Villaplaadid on paigaldatud vertikaalsetele C-profiilidele ja on põhiseinast ≥ 120 mm kaugusel. Villplaat on poorne materjal, mis neelab heli.

Poorse materjali pinnale langev helilaine tungib materjali pooridesse, pannes seal õhuosakesed võnkuma. Poorse materjali helineeldetegur α sõltub materjali poorsusest ja paksusest, helilaine sagedusest f , langemisnurgast ning õhuvahest materjali ja jäiga aluse vahel. [5, p. 66]

Materjali helineeldetegur suureneb materjali poorsuse suurendes ning mida suurem on helieenergia langemisnurk, seda väiksem on neeldetegur. Poorse materjali helineeldetegur sõltub ka materjali pinna struktuurist ja töötlemisest. Seepärast ei tohi materjali värvida. [5, p. 66]

Kui ruumis kasutada ainult poorseid helineeldematerjale, siis on helisumbumus kõrgetel sagedustel suur, võrreldes sumbumusega madalatel sagedustel, ja ruumis saadakse madala tämbriga ilma särata heli [5, p. 66]. Sellel põhjusel kasutatakse ruumis peale poorsete materjalide veel resoneerivad helineeldematerjale. [5, p. 67]

5.1.6. Esisein

Esisein on betoonsein. Lava esiseina kaardus kergsein on kaetud akustilise krohvisüsteemiga Decocoat.

5.2. Heliallikate punktid

Laval oli valitud minimaalselt nõutud kolm heliallikate asukohad. Nende kõrgus põrandapinnast oli 1,5 m.

Esimene heliallikas asukoht on paigutatud teljele 20(vt lisa 1)

Teine heliallikas asukoht on paigutatud teljele 21 (vt lisa 1)

Kolmas heliallikas asukoht on paigutatud teljele 22 (vt lisa 1)

5.3. Heli vastuvõtupunktid

Mõõtmisel saalis oli kasutatud neli heli vastuvõtupunkti, kuid nõutud on vähemalt kuus. See on põhjustatud sellest, et aulas on 450 istekohta. Kuus vastuvõtupunkti peab olema siis, kui saalis istukohtade arv on 500. Mikrofonid olid paigutatud kohtadele, kus on tavaliselt üritusel on inimesed asukohad on. Saal oli jaotatud sektoriteks, kus seisis üks mikrofoni. Mikrofonide kõrgus põrandapinnast oli 1,2 m. See väärtus iseloomustab istuvate inimeste kõrvade asukohta.

5.4. Mõõtmiste tulemused

5.4.1. Heli allika esimene asukoht

Tabel 4

Saadud akustilised andmed esimesest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakesus [s]	1,75	1,6	1,69	1,76	1,91	1,48	1,39	0,94	0,45
Järelkõlakesus T_{30} [s]	1,89	1,66	1,67	1,77	1,69	1,61	1,49	1,06	0,61
Järelkõlakesus T_{20} [s]	1,89	1,56	1,65	1,73	1,69	1,59	1,48	1	0,62
Helienergia keskaeg [ms]	102	126	129	114	118	100	104	70	30
Heli selgus [dB]	1,2	-1,4	-0,6	0,4	0,5	0,9	0,3	3,1	10
Kõne selgusarv [%]	69	33	33	45	40	44	39	56	85

Tabel 5

Saadud akustilised andmed teisest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	1,89	2,15	1,71	1,68	1,74	1,56	1,2	0,75	0,39
Järelkõlakestus T_{30} [s]	1,73	1,64	1,84	1,72	1,67	1,64	1,48	1,07	0,58
Järelkõlakestus T_{20} [s]	1,73	1,58	1,74	1,71	1,67	1,6	1,45	0,98	0,58
Helienergia keskaeg [ms]	157	131	122	126	129	106	89	61	40
Heli selgus [dB]	-1,1	-1,2	-0,2	0	-1,4	1,3	2,2	5,3	10,5
Kõne selgusarv [%]	26	40	35	32	30	41	47	63	82

Tabel 6

Saadud akustilised andmed kolmandatest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	1,01	1,79	1,53	1,49	1,45	1,42	1,23	0,8	0,37
Järelkõlakestus T_{30} [s]	1,13	1,5	1,76	1,76	1,78	1,65	1,43	0,99	0,61
Järelkõlakestus T_{20} [s]	1,13	1,47	1,61	1,79	1,83	1,58	1,36	0,95	0,62
Helienergia keskaeg [ms]	82	130	121	107	101	96	89	58	36
Heli selgus [dB]	2,6	-0,6	0,5	1,5	1,3	1,8	2	5,3	10,3
Kõne selgusarv [%]	53	32	27	45	50	46	49	66	83

Tabel 7

Saadud akustilised andmed neljandatest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	2,22	1,5	1,57	1,8	1,66	1,42	1,25	0,89	0,61
Järelkõlakestus T_{30} [s]	2,04	1,64	1,81	1,74	1,7	1,6	1,44	1,04	0,63
Järelkõlakestus T_{20} [s]	2,04	1,62	1,89	1,65	1,67	1,59	1,38	1	0,63
Helienergia keskaeg [ms]	151	118	115	142	111	83	83	70	42
Heli selgus [dB]	1,9	-0,3	0	-2,7	0,5	3,1	2,7	3,1	7,2
Kõne selgusarv [%]	255	38	43	27	41	54	49	51	74

5.4.2. Heliallika teine asukoht

Tabel 8

Saadud akustilised andmed esimesest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	2,74	1,26	1,71	1,4	1,42	1,4	1,41	0,84	0,39
Järelkõlakestus T_{30} [s]	3,14	1,84	1,78	1,78	1,71	1,64	1,48	1,02	0,63
Järelkõlakestus T_{20} [s]	3,14	1,8	1,77	1,77	1,7	1,6	1,43	0,93	0,61
Helienergia keskaeg [ms]	181	102	104	83	96	95	84	39	21
Heli selgus [dB]	-0,7	3,4	1,1	2	1,1	0,7	1,7	6,6	11,5
Kõne selgusarv [%]	91	30	47	54	43	48	52	76	90

Tabel 9

Saadud akustilised andmed teisest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	1,22	1,63	1,77	1,84	1,96	1,56	1,43	0,89	0,51
Järelkõlakestus T_{30} [s]	1,49	2,05	1,79	1,75	1,7	1,66	1,49	1,06	0,57
Järelkõlakestus T_{20} [s]	1,49	1,76	1,88	1,75	1,7	1,66	1,45	0,98	0,57
Helienergia keskaeg [ms]	91	133	151	121	111	108	98	51	19
Heli selgus [dB]	3,2	-2	-3,1	-0,1	1,2	0,9	1	5,7	12,3
Kõne selgusarv [%]	46	21	22	41	47	40	41	62	87

Tabel 10

Saadud akustilised andmed kolmandatest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	3,89	1,6	1,38	1,53	1,4	1,3	1,15	0,79	0,4
Järelkõlakestus T_{30} [s]	6,31	1,67	1,77	1,82	1,69	1,62	1,44	1,02	0,62
Järelkõlakestus T_{20} [s]	6,31	1,51	1,91	1,82	1,67	1,57	1,4	0,96	0,62
Helienergia keskaeg [ms]	222	125	112	122	100	91	87	60	39
Heli selgus [dB]	0,1	0,9	0,4	0,3	2,1	2,7	2,6	5,3	10,1
Kõne selgusarv [%]	83	21	40	38	47	50	50	63	82

Tabel 11

Saadud akustilised andmed neljandatest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	0,87	1,63	1,23	1,77	1,75	1,58	1,3	0,91	0,57
Järelkõlakestus T_{30} [s]	0,19	1,68	1,76	1,69	1,67	1,6	1,46	1,06	0,53
Järelkõlakestus T_{20} [s]	0,19	1,49	1,73	1,6	1,66	1,56	1,46	0,99	0,53
Helienergia keskaeg [ms]	61	121	106	141	121	108	93	63	33
Heli selgus [dB]	1,1	0	1,7	-1,1	-0,4	0,1	1,6	4,2	9,4
Kõne selgusarv [%]	90	37	36	22	36	37	41	53	75

5.4.3. Heliallika kolmas asukoht

Tabel 12

Saadud akustilised andmed esimesest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	0,71	1,42	1,69	1,85	1,78	1,35	1,2	0,74	0,04
Järelkõlakestus T_{30} [s]	1,08	1,73	1,72	1,7	1,71	1,65	1,43	0,99	0,57
Järelkõlakestus T_{20} [s]	1,08	1,7	1,67	1,76	1,69	1,62	1,43	0,95	0,55
Helienergia keskaeg [ms]	49	106	90	92	71	85	46	15	6
Heli selgus [dB]	5,1	3,6	2	1,9	4,2	2,9	6	11,6	17,3
Kõne selgusarv [%]	84	45	53	51	66	56	74	91	96

Tabel 13

Saadud akustilised andmed teisest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	2,12	1,96	1,81	1,83	1,63	1,42	1,24	0,81	0,5
Järelkõlakestus T_{30} [s]	2,84	1,54	1,69	1,81	1,74	1,63	1,49	1,06	0,59
Järelkõlakestus T_{20} [s]	2,84	1,54	1,77	1,81	1,71	1,55	1,43	0,99	0,59
Helienergia keskaeg [ms]	158	133	134	111	108	89	81	69	37
Heli selgus [dB]	-0,3	-0,5	-0,5	1,2	0,6	1,8	2,2	4	9
Kõne selgusarv [%]	48	29	19	42	44	51	49	50	76

Tabel 14

Saadud akustilised andmed kolmandatest vastuvõtupunktist(1-ne katse)

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	-	1,64	1,77	1,59	1,65	1,48	1,25	0,9	0,52
Järelkõlakestus T_{30} [s]	-	1,78	1,65	1,65	1,72	1,61	1,48	1,07	0,58
Järelkõlakestus T_{20} [s]	-	1,76	1,54	1,61	1,62	1,58	1,44	1,01	0,58
Helienergia keskaeg [ms]	-	98	105	130	116	94	89	63	36
Heli selgus [dB]	-	4	3,2	-1,6	-0,4	1,4	1,7	4	8,8
Kõne selgusarv [%]	-	57	45	33	36	45	48	60	77

Tabel 15

Saadud akustilised andmed neljandatest vastuvõtupunktist(2-ne katse)

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	2,34	1,56	1,69	1,6	1,74	1,47	1,28	0,91	0,52
Järelkõlakestus T_{30} [s]	2,92	1,78	1,67	1,67	1,72	1,61	1,47	1,04	0,58
Järelkõlakestus T_{20} [s]	2,92	1,74	1,61	1,69	1,66	1,6	1,45	1,02	0,58
Helienergia keskaeg [ms]	155	99	102	132	119	96	87	63	36
Heli selgus [dB]	0,9	3,9	3,5	-1,5	-0,3	1,2	2	3,9	8,5
Kõne selgusarv [%]	192	62	48	32	38	46	49	59	77

Tabel 16

Saadud akustilised andmed neljandatest vastuvõtupunktist

Sagedused [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Varajane järelkõlakestus [s]	1,28	1,24	1,41	1,5	1,73	1,41	1,27	0,9	0,5
Järelkõlakestus T_{30} [s]	0,67	1,76	1,8	1,76	1,79	1,59	1,48	1,09	0,53
Järelkõlakestus T_{20} [s]	0,67	1,71	1,7	1,85	1,8	1,53	1,44	1,04	0,53
Helienergia keskaeg [ms]	118	90	97	117	120	97	91	68	43
Heli selgus [dB]	-1,5	4,5	2,1	0,6	-0,1	1,8	2,1	3,9	8,3
Kõne selgusarv [%]	73	49	51	43	38	49	47	56	72

5.5. TTÜ aula neeldumispindade mõju järelkõlakestusele

Mõõtmised on tehtud tühjas saalis. Seega ei ole arvesse võetud toolide ja inimeste mõju lõplikule järelkõlakestusele. Istekohtadel ja inimestel saalis on omad neeldumispinnad, millised vähendavad järelkõlakestust. Sabeni'i valemi järgi muutub ruumi järelkõlakestus seda väiksemaks, mida suuremaks muutub neeldumispind. Ruumi ruumala on põhimõttelist konstantne arv, kuid ruumi neeldumispinda saab suurendada lisamaterjalidega. Näiteks TTÜ aulas on kasutatud vineerist helipeegeldit lae pinnal, puitribidega kaetud villaplaate seintel ning akustilist krohvi tagaseinal ja lava seinal.

6. TTÜ AULA AKUSTILISTE PARAMEETRITE ANALÜÜS

6.1. Aula helineeldumispind

Üritusel inimesed seisavad saalis või istuvad toolidel. See tähendab, et ruumi helineelduvus suureneb ja järelkõlakestus väheneb. See on näidatud järgmises arvutuskäigus.

Esmalt on leitud ruumi järelkõlakestuse aritmeetilised keskmised, millest on kergesti leitav aula neeldumispind. Järelkõlakestused (T_{30}) on võetud 125, 250, 500, 1000, 2000 Hz sagedustel eeltoodud tabelitest (Tabelid 4 kuni 16).

$$T_{30,kesk.}(125) = \frac{1,66+1,64+1,5+1,64+1,84+2,05+1,67+1,68+1,73+1,54+1,78+1,78+1,76}{13} = 1,71 \text{ [s]}$$

$$T_{30,kesk.}(250) = \frac{1,67++1,8+1,84+1,76+1,81+1,78+1,79+1,77+1,76+1,72+1,69+1,65+1,67}{13} = 1,75 \text{ [s]}$$

$$T_{30,kesk.}(500) = \frac{1,77++1,72+1,76+1,74+1,78++1,75+1,82+1,69+1,7+1,81+1,65+1,67+1,76}{13} = 1,74 \text{ [s]}$$

$$T_{30,kesk.}(1000) = \frac{1,69++1,67+1,78+1,7+1,71+1,7+1,69+1,67+1,71+1,74+1,72+1,72+1,79}{13} = 1,71 \text{ [s]}$$

$$T_{30,kesk.}(2000) = \frac{1,61+1,64+1,65+1,6+1,64+1,66+1,62+1,6+1,65+1,63+1,61+1,61+1,59}{13} = 1,62 \text{ [s]}$$

Standardis EVS:842:2003(tabel 7.1) nõutud järelkõlakestus on 0,8-1,0 sekundit [6].

See nõue kehtib ruumidele kuni 100 kohta [4]. Selles saalis on kohti rohkem. Pealegi ei ole saal ainult konverentside jaoks, vaid on mitmeotstarbeline, seal peab kõlama ka koorilaul. Peale selle on need mõõtmised tehtud ilma toolideta ruumis. Järelkõlakestust ei normeerita sellises olukorras, kus toole ei ole.

Selle mitmeotstarbelise saali soovituslik järelkõlakestus võiks keskmistel helisagedustel olla suurusjärgus 1,2-1,4 s, kui saalis on tühjad toolid [5]. Madalatel sagedustel peaks järelkõlakestuse tõus jääma 40% piiridesse [4].

Järgmiselt on leitavad aula neeldumispinnad Sabine'i valemi järgi:

$$T = \frac{0,16 * V}{A} \Rightarrow A = \frac{0,16 * V}{T} \quad (7)$$

Aula kõrgus on 8,25 meetrit ning pindala on 519 m^2 . Sellest tuleneb, et aula ruumala on:

$$V = 8,25 * 519 = 4281,75 \text{ m}^3$$

$$A(125) = \frac{0,16 * 4281,75}{1,71} \approx 400 [\text{m}^2]$$

$$A(250) = \frac{0,16 * 4281,75}{1,75} \approx 392 [\text{m}^2]$$

$$A(500) = \frac{0,16 * 4281,75}{1,74} \approx 394 [\text{m}^2]$$

$$A(1000) = \frac{0,16 * 4281,75}{1,71} \approx 400 [\text{m}^2]$$

$$A(2000) = \frac{0,16 * 4281,75}{1,62} \approx 422 [\text{m}^2]$$

6.2. Aula järelkõlakestus toolide ja inimestega

Saadud jooniste järgi võimalik toolide arv saalis on 450 ning saab öelda, et kuulajate arv on umbes 450. RYL 243-1(lk.167) annab teada, et tekstiilkattega tooli neeldumispind on $0,3 \text{ m}^2$ ja riidetatud inimese neeldumispind on $0,8 \text{ m}^2$ [2]. Toolide helineeldumispind on leitav valemiga, mis on toodud pealkirjas 1.7.2 valemiga number 6. Selliste andmetega saame leida Sabine'i valemiga, mis on ruumi järelkõlakestused 450 toolidega:

$$T_{tool}(125) = \frac{0,16 * 4281,75}{400 + 450 * 0,3} = 1,28[\text{s}]$$

$$T_{tool}(250) = \frac{0,16 * 4281,75}{392 + 450 * 0,3} = 1,3[s]$$

$$T_{tool}(500) = \frac{0,16 * 4281,75}{394 + 450 * 0,3} = 1,29[s]$$

$$T_{tool}(1000) = \frac{0,16 * 4281,75}{400 + 450 * 0,3} = 1,28[s]$$

$$T_{tool}(2000) = \frac{0,16 * 4281,75}{422 + 450 * 0,3} = 1,23[s]$$

Saadud tulemus on vastuvõetavad

Järgmiselt on leitud kuulajatega aula järelkõlakestused:

$$T_{kuul}(125) = \frac{0,16 * 4281,75}{400 + 450 * 0,8} \approx 0,9[s]$$

$$T_{kuul}(250) = \frac{0,16 * 4281,75}{392 + 450 * 0,8} \approx 0,91[s]$$

$$T_{kuul}(500) = \frac{0,16 * 4281,75}{393,74 + 450 * 0,8} \approx 0,91[s]$$

$$T_{kuul}(1000) = \frac{0,16 * 4281,75}{400 + 450 * 0,8} \approx 0,9[s]$$

$$T_{kuul}(2000) = \frac{0,16 * 4281,75}{422 + 450 * 0,8} \approx 0,88[s]$$

Tulemus vastab nõuetele. Arvutused näitavad, et järelkõlakestus väheneb märgatavalt, kui toolid on paigas ja nende peal istuvad inimesed.

6.3. Aula vaipkate

Sellises punktis on vaadeldud, mis juhtub ruumi järelkõlakestusega põrandakatte muutmisel. Arvutuse teostamiseks on võetud vaipkate helineeldmisteguriga 0,31. Alguseks on arvutatud vaiba pindala, mis hakkab töötama helineeldamisel. Põranda pindalast on välja arvatud toolide pind:

$$A_{vaip} = 519 - 2 * 8,25 * 12,6 = 311,1 \text{ m}^2$$

Mõõdud 8,25 ja 12,6 on võetud toolidega aulas (vt lisa 1) Siis on arvutatud järelkõlakestused erinevatel sagedustel (vt tabelid 4 kuni 15), kui aulas on vaipkatte ja toolid paigal (valem 7):

$$T_{v+t}(125) = \frac{0,16 * 8,25 * 311,1}{400 + 450 * 0,31 + 450 * 0,3} \approx 0,61 \text{ [s]}$$

$$T_{v+t}(250) = \frac{0,16 * 8,25 * 311,1}{392 + 450 * 0,31 + 450 * 0,3} \approx 0,62 \text{ [s]}$$

$$T_{v+t}(500) = \frac{0,16 * 8,25 * 311,1}{394 + 450 * 0,31 + 450 * 0,3} \approx 0,61 \text{ [s]}$$

$$T_{v+t}(1000) = \frac{0,16 * 8,25 * 311,1}{400 + 450 * 0,31 + 450 * 0,3} \approx 0,61 \text{ [s]}$$

$$T_{v+t}(2000) = \frac{0,16 * 8,25 * 311,1}{422 + 450 * 0,31 + 450 * 0,3} \approx 0,59 \text{ [s]}$$

Järelkõlakestus vaipkattega aulas kujuneb liiga lühikeseks. Aula ei vaja põrandal vaipkatet.

6.4. Varajane järelkõlakestus

Arvatakse, et ideaalselt peaks varajane järelkõlakestus olema võrdne ruumi järelkõlakestusega või olema sellest mõnevõrra väiksem.. See arv on 0,8-1,0 [s]. [4] Saadud mõõtmiste järgi saab öelda, et enamikul juhtudel varajane järelkõlakestus ei ole võrdne järelkõlakestusega, kuigi arvude väärtused on väga lähedased. Üldiselt jääb varajane järelkõlakestus väiksemaks kui ruumi järelkõlakestus T30, mis on ootuspärane. Kõrgematel sagedustel on vahed kõige silmapaistvad. Kui varajane järelkõlakestus jääb madalamaks kui järelkõlakestus T30, siis sellega kaasneb heli selgus.

Varajane järelkõlakestus sõltub hoopis rohkem mõõtepunkti asukohast ruumis, kui järelkõlakestus T30. See on tingitud asjaolust, et varajast järelkõlakestust mõjutavad tugevasti esimesed helipeegeldused, mis on igas ruumi punktis erinevad.

6.5. Helienergia keskaeg

Aula helienergia keskaeg enamike sagedustel on nõutud vahemikus 20 kuni 140 miilisekundit. [4] Madalatel sagedustel väärtus on nähtavalt suurem, kui kõrgematel sagedustel. Sagedusel 500 Hz helienergia keskaega keskmine väärtus on umbes 115 ms. Helienergia keskaeg on sõltuvuses ruumi järelkõlakestusest. Kui kõrgetel sagedustel on järelkõlakestus lühem, siis on lühem ka helienergia keskaeg. See tähendab, et enamuse helienergiast jõuab mõõtepunkti kiiresti, soodustades suurt heli selgust. Madalatel sagedustel on helienergiat rohkem ja helienergia keskaeg kujuneb pikemaks, mis soodustab pikema järelkõlakestuse tekkimist ja mahlakamat kõla.

6.6. Heli selgus

Heli selguse soovituslik suurus on keskmiselt -2...+2 dB. Madalatel ja keskmistel sagedustel aula näitajad vastavad nõutule. Kõrgematel sagedustel (8000,16000) heli selguse arv on kõrge, kuid saale iseloomustatakse heli selgusarvuga just keskmistel sagedustel. Heli selgusarv sõltub veelgi enam mõõtepunkti asukohast kui varajane järelkõlakestus EDT. Heli selgusarv on kõrgem heliallika läheduses ja ka rõdu all. Viimasel juhul avaldab mõju madal lagi ning asjaolu, et hilised helipeegeldused ei levi rõdu alla kuigi palju.

Heli selgusarv on oluline parameeter just muusika esitusel. Kui see on kõrge (plussväärtused), siis on ettekandes muusikalised detailid hästi eraldatavad. Kui aga muusika selgusarv on tugevasti miinuspoolel, on muusikalised fraasid ebaselged ja muusikud ütlevad, et helipilt valgub laiali. TTÜ aulas on heli selgusarvul väärtused, mis sobivad mitmeotstarbelisele saalile.

6.7. Kõne selgusarv

Nõutud kõne selgusarv on vähemalt 35-50%, mis väljendatakse ka suhtarvuna 0,35-0,50. [4] Mida suurem on kõne selgusarv, seda suurem on kõnest arusaadavus. Aulas sagedusel 500 Hz on selgusarv umbes 39%. Tavalise inimese kõne sisaldab helisid sagedusvahemikus 100-10000 Hz [2]. Saab öelda, et aulas kujuneb kõnest arusaadavus rahuldavaks. Esiridades on kõne selgusarvu väärtused kõrgemad ja tagaridades madalamad.

Kuna aula kohtade arv on suur, siis kasutatakse kõne edastamiseks helivõimendust. Sellisel juhul määravad kõnest arusaadavuse helivõimendussüsteemi parameetrid. Helivõimendussüsteemi tööks on vajalik suhteliselt lühike järelkõlakestus. Samas ei soodusta lühike järelkõlakestus häid tingimusi muusika esituseks. Aula järelkõlakestus on valitud kompromissina kõne ja muusika esituseks.

6.8. Eeldatav helitugevus

Eeldatava helitugevuse $L_{exp}[dB]$ saab arvutada järgmise valemi abil: [7]

$$L_{exp} = 10 * \log_{10} \left(\frac{RT}{V} \right) + 45, \quad (9)$$

kus $RT(s)$ on järelkõlakestus toolidega saalis;

$V(m^3)$ on ruumi maht.

Arvutuste tegemisel tuleks võtta aluseks järelkõlakestus toolidega saalis. Võib teha arvutused ka kuulajatega saalis, et hinnata, kui palju tulemused muutuvad (muudatus tuleb väike).

Siit on arvutatud helitugevused sagedustel 125-2000 Hz:

$$L_{exp}(125) = 10 * \log_{10} \left(\frac{1,281}{4281,75} \right) + 45 = 9,76 \text{ dB}$$

$$L_{exp}(250) = 10 * \log_{10} \left(\frac{1,3}{4281,75} \right) + 45 = 9,82 \text{ dB}$$

$$L_{exp}(500) = 10 * \log_{10} \left(\frac{1,296}{4281,75} \right) + 45 = 9,81 \text{ dB}$$

$$L_{\text{exp}}(1000) = 10 * \log_{10} \left(\frac{1,282}{4281,75} \right) + 45 = 9,76 \text{ dB}$$

$$L_{\text{exp}}(2000) = 10 * \log_{10} \left(\frac{1,23}{4281,75} \right) + 45 = 9,58 \text{ dB}$$

Helitugevus 10 dB on antud ruumi jaoks sobiv suurus

6.9. Ruumi külgmiste helipeegelduste osakaal

Ruumi akustiliste parameetrite hindamiseks on võimalik arvutada külgmiste peegelduste osakaal L_{ef} selles ruumis. Seda saab ka olemasolevas ruumis mõõta, selleks mõõtmiseks on vaja kaht tüüpi mikrofone: üks ümmarguse suunakarakteristikuga ja teine number kaheksa kujulise karakteristikuga (võtab helipeegeldusi vaid külgedelt). Ruumi külgmiste helipeegelduste osakaal näitab, kui palju tuleb helipeegeldusi külgedelt, võrreldes helipeegeldustega kõikidest suundadest. See on oluline parameeter muusika esitusel, mis iseloomustab heli ruumilisust. TTÜ aula ei ole mitte vaid kõnesaal, vaid mitmeotstarbeline saal, kus esitatakse ka muusikat, seepärast on parameeter L_{ef} (Lateral Energy Fraction) oluline. Heades muusikasaalides on selle väärtus suurusjärgus 0.2 (st et ca 20 % kogu helipeegeldustest tuleb külgsuunast). [4] Seda parameetrit saab arvutada valemi abil [7]:

$$L_{ef} = 0,47 - 0,0085 * L, \quad (10)$$

kus $L(m)$ on ruumi laius.

Valemist näeme, et see parameeter on kõrgem kitsastes ruumides. Kui ruumi laius on suur, väheneb külgmiste peegelduste osakaal ja väheneb ka heli ruumilisus.

TTÜ aula külgmiste peegelduste osakaal on:

$$L_{ef} = 0,47 - 0,0085 * 24 = 0,266 > 0,2$$

Heades muusikasaalides on külgmiste helipeegelduste osakaal vähemalt 20%. Näitaja järgi TTÜ saal heli ruumilisus on hea, sest külgsuunast tuleb ca 27% helipeegeldustest.

6.10. Basside osakaal

Veel on võimalik arvutada mõõtmistulemuste põhjal basside osakaal BR (Bass Ratio), madalate sageduste osakaal võrreldes keskmiste sagedustega. See arvutatakse valemiga [7]:

$$RB = \frac{RT(125) + RT(250)}{RT(500) + RT(1000)}, \quad (11)$$

kus RT on mõõdetud järelkõlakestused sagedustel 125, 250, 500, 1000 Hz.

Järelkõlakestus tuleks võtta keskmistatud suurus toolidega variandi puhul. Kui tulemus jääb alla 1, siis ruum on sobilik kõne jaoks; kui suhe on üle 1, siis on bassihelide osakaal ruumis suur ja see sobib pigem muusika kui kõne edastamise jaoks. [4]

$$RB = \frac{1,281 + 1,3}{1,296 + 1,282} \approx 1,0015$$

Saadud tulemuse baasil võib öelda, et TTÜ aula sobib kõne edastamiseks rohkem kui muusika edastamiseks. Kui ruumis on basside osakaal suur, siis see halvendab kõnest arusaadavust. Teisest küljest ruumi külgmiste helipeegelduste küllalt suur osakaal näitab, et aula heli on ruumiline, mis mõjub hästi muusika esitusele. Läbiviidud mõõtmised ja arvutused kinnitavad suurel määral, et saal täidab hästi mitmeotstarbelist funktsiooni. Loodud tingimused võimaldavad läbi viia kõneüritusi ja esitada muusikat, sh koorilaulu.

KOKKUVÕTTE

Tallinna Tehnikaülikooli aula akustiliste parameetrite mõõtmine ja arvutamine on huvitav töö, mille jooksul ma sain uusi teadmisi minule tundmatus ehitusevaldkonnas. Lõputöö koostamisel oli vaja uurida isegi ruumiakustika parameetrite olemust, ehkki esimeses faasis tekkisid probleemid terminitest ja helitehnika määratlustest arusaamisel. Saadud informatsiooni baasil saab öelda, et ehitiste projekteerimisel, konkreetsemalt aulade kujundamisel tuleb võtta suurel määral arvesse akustikat.

Sellises lõputöös saab tutvuda vajalike akustiliste mõistetega ruumide akustika projekteerimisel ja kontrollimisel. Kõige tähtsamad terminid ja füüsikalised toimingud on välja selgitatud mõõtmistest ja arvutamiskäigust arusaamiseks. Ruumides, kus toimuvad kõne või muusika ettekanded, peavad olema tagatud soovituslikud järelkõlakestuse, heli selguse ning kõne selguse väärtused.

Lõputöös on välja toodud, et järelkõlakestus on olulisim ruumi akustiline parameeter. Kõige silmapaistvamat mõju ruumi akustikale avaldab tema maht, kuju ja kasutatud materjalid. Ruumi mahu ja materjalide osakaal on näha järelkõlakestuse valemist: järelkõlakestus sõltub ruumi mahust ja helineeldumispinnast. Ruumi ristkülikukujuline vorm on kõige lihtsam variant kuulamiseks sobilike tingimuste loomiseks ning kõige mõistlikum valik ehituse seisukohast. Ruumis kasutatavad materjalid mõjutavad akustikat sellest küljest, et sõltuvalt nende helineeldumisteguritest helineeldumispind suureneb või väheneb. Materjali valimisel saab mängida tema pindala, koostise (materjali tüübi) ning pinnastruktuuriga. Materjalide valikul tuleb panna tähele, et helineeldumispindade koguseid ja paigutust saab muuta. Väga oluline ruumi akustilisel projekteerimisel on esinejate ja kuulajate arvu õige prognoos.

Suurelt jaolt ruumi kuju, proportsioonide ja materjalide valik sõltub ruumi funktsioonist. Peab teadma ka heliallikate omadusi. Heliallikate iseloomustamiseks uuritakse nende poolt tekitatud helirõhu tugevust ja spektraalsest koostist.

Üks loomulik heli tunnusjoon on, et ta levib kiirtena nagu valgus. See väide on õige olukorras, kui ruumi mõõtmed on suuremad heli lainepikkusest ning peegeldav tasapind on suurem heli lainepikkusest. Optikas valguslainete paindumine nimetus on difraktsioon, mis esineb ka akustikas. Ehituses kasutatakse erinevate suuruselga helipeegeldeid helipeegelduste soovitud sagedusalas toimimiseks.

TTÜ akustiliste tingimuste mõõtmine ja analüüs näitab, et aula momendiseisuga ei vaja renoveerimist akustilises mõttes, sest eelmise renoveerimise käigus antud lahendused toimivad hästi. Aulat saab kasutada mitmel otstarbel: konverentside läbiviimiseks, koorilaulmiseks, kõnede esitamiseks ning muusika esitamiseks. Mõõtmised ja arvutused näitavad, et soovituslikud akustilised nõuded on täidetud. Töös on samuti antud aula põranda vaipkatte kasutamise analüüs, kuigi saadud tulemused näitavad vaipkatte mittevajalikkust.

SUMMARY

The title of the current graduation thesis is „The Analysis of Acoustical Conditions of Tallinn University of Technology’s Hall“. The initial data for the thesis are gathered from the TTU hall’s architectural and interior architectural solutions. The graduation thesis consists of an introduction, the explanation of the terminology of acoustics, the review of the hall’s acoustical parameters, measurements of the acoustics of the room and the description of these, calculations of the acoustical parameters, and the analysis of acoustical conditions.

The present graduation thesis aims at establishing the hall’s acoustical parameters with acoustical measurements and the analysis of these. Based on the analysis, a decision was made if the hall’s acoustical conditions meet the requirements for music and speech transmission.

The first part of the thesis includes the terminology, equations and their explanations. The main acoustical concepts are sound interpretation, its frequency, pressure and capacity of sound. It is also explained how sound moves and develops in a room. The current thesis explains the purpose of acoustics, how different surfaces reflect sound, how the shape and surface of a room influence acoustics.

The second part of the graduation thesis explains the theory behind the acoustical measurement of a room. In marking a room’s acoustics, the essential indicators are reverberation time, sound intensity, Early Decay Time, center time, sound definition and clarity. Undoubtedly, the most important parameter is reverberation time, which shows the time during which the sound energy level drops to 60 dB after the sound source is turned off. Reverberation time should be more than 1.2 but less than 1.4 seconds for the hall of TTU.

The third part of the thesis describes the measurement conditions, which include walls, ceiling, floors and the materials of these. The author of the thesis took into consideration different calculations and calculated the approximate total absorption of the hall at given frequencies.

After that, the hall's reverberation time was calculated in case of chairs or people being present and carpet covering on the floor. Lastly, the hall's Lateral Energy Fraction, Bass Ratio, and the share of the reflection in the side space were found out. By analysing the results of the measurements and calculations it was concluded that the hall can be used for different purposes. It can be used for performing choral songs and music and giving speeches in most frequencies. The hall of TTU does not need any renovations to fix its acoustics.

VIIDATUD ALLIKATE LOETELU

- [1] R. Reinpuu, Ehitusfüüsika, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2009, p. 52.
- [2] RIL 243-1:2007 - Hoone akustiliste projekteerimine, akustika alused.
- [3] ISO 3382-1:2009 - Acoustics — Measurement of room acoustics parameters Part 1:performance spaces.
- [4] L. Madalik, Interviewee, Akustiliste parameetrite mõõtmine. [Intervjuu]. 22 4 2014.
- [5] A. S. Elmar Eiskop, Akustika ja Helitehnika, Tallinn: Valgus, 1988, p. 238.
- [6] EVS 842:2003 - Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest.
- [7] A. C. Gade, Acoustical survey of eleven European concert halls : a basis for discussion of halls in Denmark, Lyngby: Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, 1989, p. 130.

LISAD

Lisa 1. – TTÜ aula vaade fragment (A.Põime)