

Priit Kangur

**LAMBAVILLAST AKUSTILISED SEINAPANEELID**

Loodussõbraliku paneeli “Merekivi sümbioos” disainimise teekond ja arendus

Magistritöö

Juhendaja:  
Argo Tamm, MA

Tallinn 2023

## Autorideklaratsioon

Kinnitan, et:

1. käesolev magistritöö on minu isikliku töö tulemus, seda ei ole kellegi teise poolt varem (kaitsmisele) esitatud;
2. kõik magistritöö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd (teosed), olulised seisukohad ja mistahes muudest allikatest pärinevad andmed on magistritöös nõuetekohaselt viidatud;
3. luban Eesti Kunstiakadeemial avaldada oma magistritöö repositooriumis, kus see muutub üldsusele kättesaadavaks interneti vahendusel.

Ülaltoodust lähtudes selgitan, et:

- käesoleva magistritöö koostamise ja selle sisalduvate ja/või kirjeldatud teoste loomisega seotud isiklikud autoriõigused kuuluvad minule kui magistritöö autorile ja magistritööga varalisi õigusi käsutatakse vastavalt Eesti Kunstiakadeemias kehtivale korrale;
- kuivõrd repositooriumis avaldatud magistritööga on võimalik tutvuda piiramatul isikute ringil, eeldan, et minu magistritööga tutvuja järgib seadusi, muid õigusakte ja häid tavasid heas usus, ausalt ja teiste isikute õigusi austavalt ning hoolivalt.

Keelatud on käesoleva magistritöö ja selles sisalduvate ja/või kirjeldatud teoste kopeerimine, plagieerimine ning mistahes muu autoriõigusi rikkuv kasutamine.

---

*(kuupäev)*

Priit Kangur

---

*(magistritöö autori nimi ja allkiri)*

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele:

---

*(kuupäev)*

---

*(magistritöö juhendaja allkiri, akadeemiline või teaduskraad)*

SISUKORD	
SISSEJUHATUS	4
1. Eeltöö ja sisendi loomine.	5
1.1. Idee ja suuna otsimine.	5
1.2. Lähteülesande süntees	7
1.3. Uurimismeetodid	9
1.4. Ringmajandus mudel	13
2. Ruumiakustika	14
2.1. Heli	15
2.2. Järelokõla aeg	16
2.3. Helide peegeldumine	17
2.4. Heli neeldumine	18
2.5. Helineelde klassid	20
2.6. Heli hajuti	21
2.7. Heli testimine	22
2.8. Akustika mõju inimesele	23
2.9. Akustika parandamise võtted interjööris	24
3. Lambavilla akustiline komposiitmaterjal.	27
3.1. Lambavill	27
3.2. Lambavilla akustilised omadused	32
3.3. Biopolümeer PLA	37
3.4. Biolagunevus ja keskkonnamõju.	39
3.5. Tulekindlus ja testid komposiitmaterjaliga.	41
4. Akustiliste paneelide konkurendid.	43
4.1. Stockholmi mööblimessi analüüs	43
4.2. Konkurendid	45
5. Disain ja prototüüpimine	48
5.1. Ettevõtte ja sisearhitektide vajaduste analüüs.	48
5.2. Paneeli disain	50
5.3. Paneeli konstruktsioon	54
5.4. Prototüübi valmistamine	58
5.5. Paneeli edasiarendus.	64
KOKKUVÕTE	65
SUMMARY	67
KASUTATUD KIRJANDUS	69

## SISSEJUHATUS

Käesolevas magistritöös „Lambavillast akustilised seinapaneelid“ disainisin kaja hajutava ja summutava akustilise paneelisüsteemi ettevõttele Thermory. Eesmärgiks oli luua loodussõbralik ribiline helisummutussüsteem. Paneeli luues tuginesin ringmajandusmudelile ja kasutasin summutusmati materjaliks looduslikku materjali, mis on alternatiiviks praegusele sünteetilisest kiust valikule. Villamatina kasutasin komposiitmaterjali, kus lambavillale on juurde segatud biopolümeeri PLA, et villamatt püsiks tihedalt koos. Nii lambavill kui bioplastik on mõlemad looduslikest allikatest ning biolagunevad. Lisaks mõtlesin läbi süsteemi, et paneelide komponente oleks võimalik eraldada peale elutsükli lõppemist ning paneeli materjale saaks hiljem ümber töödelda uueks matiks või sarnase materjali sisaldusega tooteks. Viisin projekti kooskõlla ÜRO jätkusuutliku arengukavaga.

Disainiprotsessis lähtusin ettevõtte- ja kasutajakesksest lähenemisest. Turul puuduvad ribilised kajasummutuspaneelid, millel oleks piisavalt paks villamatt. Seetõttu on sisearhitektid sunnitud ise paneele leiutama ja kombineerima, mistõttu ei saa nad olla kindlad, et paneelid päriselt ka summutavad nii nagu oleks päriselt vaja. Selle lahenduseks lõin akustilise täislahendus süsteemi, mis koosneb heli hajutist ja summutajast.

Antud matil on hulganisti lisaväärtust peale dekoratiivsele esteetikale. See ei kogu tolmu, mis on suureks abiks tolmuallergikutele, lisaks puhastab see õhku kuni 30 aastat erinevatest kahjulikest komponentidest. Villal on ka tuld summutav efekt: see ei sula tulekahju korral, mis on vastupidine sünteetilise kiuga mattidega. Viisin läbi katse, et näha kas villamatil säilib tule summutamise võimekus, kui sisse on segatud bioplastik.

Et teha endale selgeks nii villa kui ruumiakustika maailm, viisin läbi erinevaid intervjuusid oma ala spetsialistidega. Turuolukorrast ja klientide tõelistest vajadustest aru saamiseks, viisin läbi poolstruktureeritud intervjuusid sisearhitektidega.

Lõputöö käigus uurin, mis on kaja ja miks see on probleem. Tõin välja põhilised teadmised ja graafikud, mida peab teadma helipaneeli disainimisel ja ruumiakustika mõistmiseks. Uurisin välja komposiitmaterjali tähtsamad omadused ja koostise detailid, mõistmaks komposiitmaterjali karakterit ja olulisust.

Tuginedes lõputöö informatiivsele uuringule, disainisin helisummutuspaneeli ja teostasın prototüübiga konstruktsiooni katse Thermory tehases. Prototüübi ehitamisega sain kontrollida teooriat praktikaga.

# 1. Eeltöö ja sisendi loomine.

## 1.1. Idee ja suuna otsimine.

Algne idee sai alguse Eesti kunstiakadeemias läbitud tööstusdisaini kursusel, kus lähteülesandeks saime teha toote kontseptsiooni kasutades Thermory puitmaterjali. Ettevõtte oli huvitatud olemasolevate toodete hulka uue toote tekitamisest või täiesti uue tooteperekonna leidmisest.

Kõigepealt tutvusime termotöödeldud materjaliga ja külastasime Thermory tootmisüksusi. Peale selle algasid tõsised ajurünnakud ja probleemide otsingud, mille kaudu otsisime projekti tegevuse suundasid (vt foto1). Kui tudengid jaotati gruppideks, siis minu meeskonna algseteks märksõnadeks sai valitud mini privaad kapselruumid, õhukvaliteet, müraprobleemid ja liigutatavad seinasüsteemid. Kursuse käigus nihkus fookus müraprobleemidele, mistõttu tegime ettepaneku mürasummutuspaneelide kontseptsiooni loomiseks.

Kursuse lõppedes jätkasin mürasummutuspaneelide idee edasiviimist ning lõputöö käigus võtsin sihi disainida ja arendada paneelid päris tooteks.



Foto 1. Ajurünnakud ja probleemide otsimine.

Peale lõputöö alustamist hakkasin kaardistama oma tegevuskava. Kuna ma ei olnud teadlik sihtgrupi vajadustest ega ruumiakustika maailma iseärasustest, siis tuli just need teemad korralikult ja sügavalt läbi uurida. Samamoodi ei olnud ma alguses teadlik, mis materjalist mürasummutusmatti võiks antud paneelis kasutada.

Kuna mu isiklik minevik on tugevalt põimunud loodusega, siis soovisin oma lõputöös tuua läbi disaini keskkonnateadlikkust ja loodussõbralikkust. Suurtes ettevõtetes on tihtipeale raske viia sisse rohepööret, sest looduslike materjalidega võrreldes on sünteetilised tunduvalt soodsamad. Samas näen, et disaineri kohus on näha võimalusi uute nurkade alt ja tutvustada ettevõttele jätkusuutlikku süsteemi, mitte ainult selle olulisusest loodusele vaid ka läbi selle võimalikust kasumlikkusest ettevõtte.

Ma märkasin üpris kiirelt, et töö mille ma olin endale formuleerinud on tihedalt seotud minu isikliku mineviku ja kogemustega. Minu lapsepõlves oli looduslähedusel väga suur koht ning mu maailmast ei puudunud ka erinevad loomad. Mu ema kasvas lambaid, ning lapsepõlves sain jälgida täisprotsessi talle sünnist kuni sokkide kudumiseni, mida sai omakorda auklikuks kantud ja siis läbi nõelumise uuesti kasutada. Looduse lähedus ning selle tunnetus on aja jooksul muutunud mitte ainult rohkelt looduses viibimiseks (vt foto 2) vaid ka disainerina teadlikult jätkusuutliku lähenemisega navigeerimiseks.



Foto 2. Lammas Rootsi (Tamm, 2022)

Teine oluline teema on helide maailm. Kuigi ma ei ole helide süsteemi nii sügavalt varem uurinud kui antud lõputöös, on see mänginud mu elus väga olulist rolli. Müra ja kaja on mu teel olnud pidevaks ületuskiviks. Kuna mul on kerge diagnoosimata ATH, siis sellest tulenevalt kogen ma keskmisest inimesest tundlikumalt keskkonnast tekkinud helisid ja ärritajaid. Tean omast kogemustest, kuidas juba väike kaja võib tähelepanu ära kallutada ja produktiivsust langetada.

## 1.2. Lähteülesande süntees

Antud magistritöö on koostööprojekt Thermory-ga. Antud ettevõtte on tegutsenud üle 20 aasta ja on saanud maailma suurimaks termopuidu tootjaks, mille 2022 aasta käive oli üle 87 miljoni euro (Themory; Inforegister i.a). Thermory tegeleb peamiselt termopuidu tootmise ja töötlemisega, nende all olev Auroom saunade ja nende tarvikute valmistamisega.

Magistritöö alguses sain ettevõttega läbirääkides projektile tugevad ja üpris kitsad raamid, mille sisse pidin ära mahutama oma lõputöö. Thermory soovis peale idee kontseptsiooni ka päris toodet, mis on algusest lõpuni läbimõeldud. Ülesannete hulka kuulus ka vajalike materjalide analüüsimine. Thermory ei soovinud luua tootmisüksust, mis hakkaks helisummutusmatte tootma või liigselt töötleva, nende poolt on puitdetailide valmistamine ja paneelide komplekteerimine. See tähendas, et pidin leidma valitud materjalile koostööpartneri, kellelt saaks vajaminevaid paneeli matte tellida. Tingimuseks seati veel see, et mattide tootjal peab olema piisav tootmisvõimekus, et saaks hakata suurtes kogustes matte tellima niipea kui paneel on valmis ja turunduskampaania Thermory poolt valmis tehtud.

Thermory andis mulle disainis üpris vähe võimalusi: nad ei soovinud keerulisi artistlikke paneelilahendusi. Paneelide visuaalne keel pidi minema kokku nende praeguse identideediga, mis tähendab triibuline/ribiline. Samamoodi seletati lahti, et Thermory sihtgrupp on sisearhitektid ja fokuseeritakse suuri hanke projekte. Nad soovivad niinimetatud aluse toodet, mida saab euroalustega kaubaautodesse laadida. Lattu ette tootmist ei toimu ning tootmine algab peale tellimuse kinnitamist.

Kuna Thermory ettevõttes tekib erinevaid profiili tootmisjääke, siis on nad huvitatud nende võimalikust rakendamisest. Lõputöö käigus loon konstruktsiooni lahenduse, mida saaks lihtsalt ja kiirelt toota ilma suurte kuludeta, et pakkuda konkurentsivõimelist hinda. Tööülesandeks oli ka paneeli prototüüp Thermory Loo tehases valmis ehitada.

Kuna üks olulisemaid osasid helipaneelide valmistamisel ning arendamisel on aru saada selle peamistest funktsioonidest ehk heli summutusvõimest ja selle käitumisest, pidin selgeks tegema ruumiakustika maailma. Mu teadmised olid selles valdkonnast pinnapealsed, mis tähendas suurt tööd ja vajalike inimeste leidmist, kes oskaks seda mulle selgitada.

## **Materjali valimine lõputööks**

Algselt kaardistasime koos Thermoryga erinevad teadaolevad materjalid, mis võiks paneeli summutusmatiks sobida. Laual olid: Cewood tsementpuidkiud, Fulda vildid, BAUX vilt, akustiline aukudega paber, tuuletõkkeplaat, MDF plaat, aukudega MDF, fassaadikangad, IWS kangas, Forzez puitkiudplaat, Woola pakend, klaasvill, kivivill jms.

Arutledes Thermory-ga jäid alguses välja perforeeritud plaadid, sest need summutavad pigem madalheli kui ülejäänut spektrit, ning nende tootmine ei ole soodne. Kui panna plaadile veel ribid peale siis jääb funktsionaalne võimekus veel väiksemaks.

Tuuletõkkeplaat ja MDF jäid ka välja, nende madala helisummutuse tõttu. Tsementplaadid ei tundunud eetilised oma CO<sub>2</sub> jalajälje tõttu, kuigi nendel oli hea tulekindlus. Tellitud katseplaat oli pudisev, mis ettevõttele ei meeldinud.

Üheks varjandiks oli sünteetilisest kiust PET vildid nagu BAX, kuid nende hilisem jätkusuutlik ringmajandamine ei ole parim, sest neisse on lisatud erinevaid kemikaale, et tekitada tulekindlust. Sellest tulenevalt ei saa nendest enam joogipudeleid toota ning ehitusprügisse sattudes ei ole need loodusõbralikud.

Erinevad akustilised kangad osutusid hoopis pigem dekoratiivseteks kangasteks, millel ei ole head akustilist mürasummutust. Klaasvill ja kivivill on heade akustiliste omadustega, kuid see on ainus nende eelis. Samamoodi ei ole nende CO<sub>2</sub> jalajälg loodusõbralik.

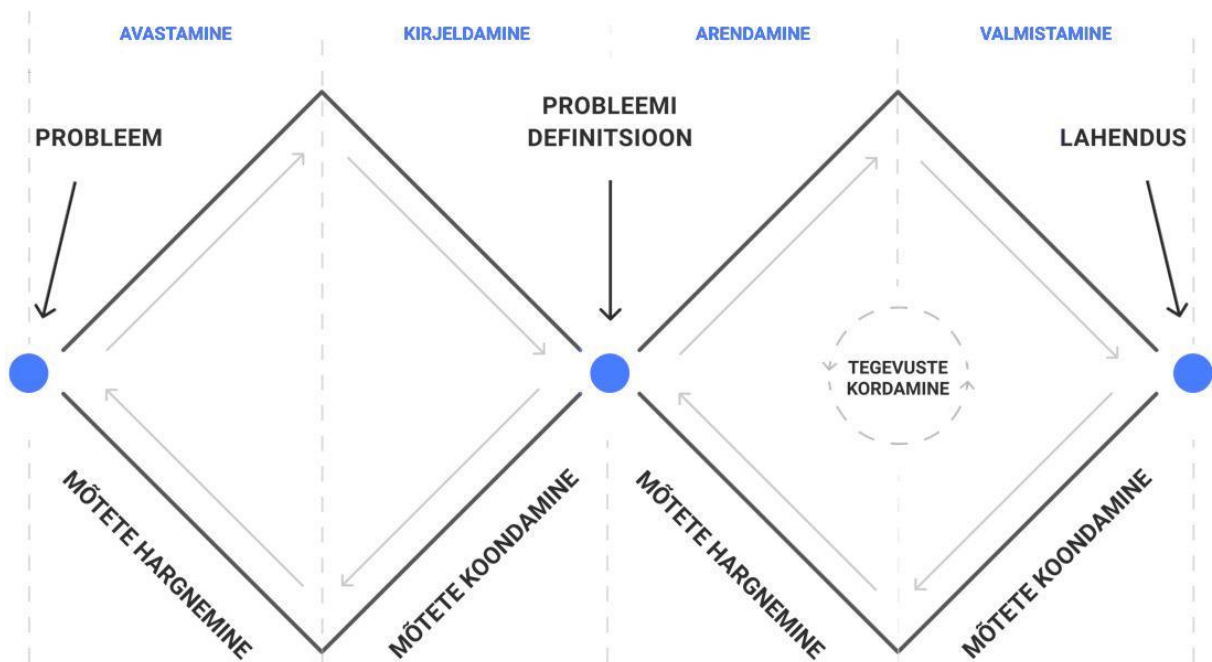
Minule meeldis kõige rohkem lambavill, kuid selle kohta tuli teha sügavam uuring, kui hea on lambavill akustiliselt ja kas Eestis on ettevõtet, kellel on vajaminev tootmisvõimekus paneelide valmistamiseks.



### 1.3. Uurimismeetodid

#### Topeltteemant.

Antud magistritöö disainiprotsess põhineb topeltteemanti süsteemil (vt joonis 1), mille raamistik töötati välja Briti Disaininõukoja poolt. See kujutab endast selget ja põhjalikku visuaalset disainiprotsessi. Antud meetodist lähtudes saab jagada disainiprotsessi kaheks "teemantiks". See ei ole alati lineaarne protsess, nagu joonisel on näha. Erinevate põhiprobleemide kohta rohkem teada saades võib see viia algusesse tagasi. Väga varajases etapis ideede tegemine ja testimine võib olla osa avastamisest. (Framework..., 2019)



Joonis 1. Disainiprotsess topeltteemant (Kokk ja Laanejärv, 2020).

Disainiprotsessi alguspunktiks on probleem, kus saan ettevõttelt sisendi ja raamid disaini protsessi teostamiseks.

**Avastamine.** Esimene teemanti pool aitab inimestel mõista, mitte lihtsalt oletada, milles probleem seisneb (Framework..., 2019). Antud osasse kuuluvad intervjuud nii eriala spetsialistidega kui sisearhitektidega. Samamoodi uurimistöö läbi erialase kirjanduse.

**Kirjeldamine.** Avastamisfaasist kogutud ülevaade aitab väljakutset teistmoodi määratleda (Framework..., 2019). Selles osas hakkavad kitsendama materjalivalikuid läbi analüüsi ja selekteerimise. Olen selgeks teinud, mis on ruumiakustika, reaalsed probleemid ja vajadused ning saadud infot põhjal saan kinnitatud, et mida ma hakkavad lahendama ja kellele.

**Arendamine.** Teine teemant julgustab inimesi andma selgelt määratletud probleemide erinevaid vastuseid, otsides inspiratsiooni mujalt ja tehes koostööd paljude erinevate inimestega (Framework..., 2019). Antud sektoris moodustan esimesest teemandist saadud materjali põhjal ideekavandid ja materjalivalikud. Leian vajaminevate komponentide tootjad ja teen ettevalmistusi katsetuste jaoks. Teen ajurünnakuid erinevate disainilahenduste loomiseks.

**Valmistamine.** Valmistamine hõlmab erinevate lahenduste väikesemahulist katsetamist, mittetoimivate lahenduste tagasilükkamist ja toimivate lahenduste täiustamist (Framework..., 2019). Selles osas hakkab tegema füüsilisi katsetusi. Saan testida materjale ja töötada välja konstruktsioonilahendused. Läbi katsetuste ja prototüüpimise jõuan lahenduseni.

### **Kasutajakeskne- ja ettevõttesekne disain.**

Lähenedes disainimõtlemise hoiakutest leidsin, et lähtun nii kasutaja- kui ettevõtteseksest disaini mudelist. (vt joonis 2). Hoian mõlemat poolt probleemi lahendamise keskmis ja analüüsid võimalusi, leian kesktee. Mulle on väga oluline, et tulemus looks kasutajale reaalselt kasu. Ettevõtte poolt peab tulemus olema majanduslikult kuluefektiivne ja jätkusuutlik. Oluliseks on, et akustilises paneelis kasutatavad materjalid oleksid toodetavad suurtes mahtudes, et projekt ei takerduks allhanke tarneahela tootmisvõimekuse taha.

Antud projektis näen võimalust kaasata ideede tagasidestamise protsessi nii ettevõtet Thermory, kelle all tegutsen, kui ka sisearhitekte.



Joonis 2. Kasutaja- ja tootjakeskne hübriid mudel.

## Sihtgrupi kaardistamine

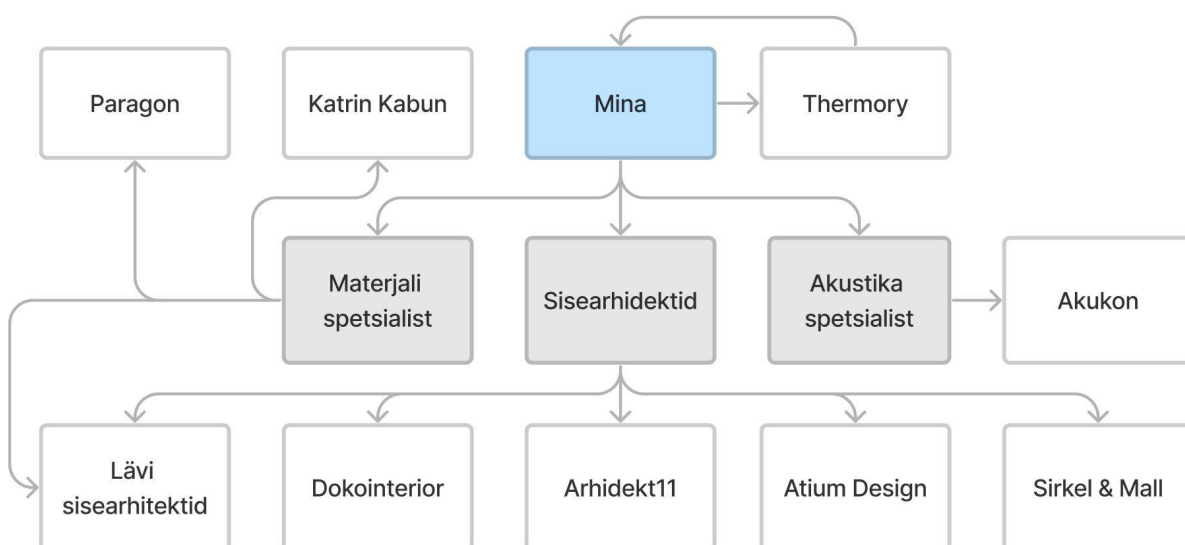
Sihtgrupi kaardimiseks arutasin teemat otse Thermory esindajatega. Ettevõttele on hästi teada, kes nende toodangut ostab ja milline strateegia on kõige kasulikum. Thermory sõnul on neile kõige sobilikum strateegia see, kui alles peale tellimuse kinnitamist hakatakse tootma kaupa ehk lattu ette toomist ei toimu. Samasugust lähenemist soovivad nad ka lõputöö käigus loodavalt paneelilt.

Thermory oli klientuuri osas väga selge ja kindel. Nad fokuseerivad tähelepanu peamiselt sisearhitektidele, kelle käsutuses on suured projektid. Valikutesse langevad riigi avalikud hooned ja suured erakapitalil tuginevad hoonekompleksid. Ühel või teisel viisil käib paneelide hankimine läbi sisearhitektide.

## Intervjuud ja sisendi selgitamine

Intervjuusid läbi viies oli mul mitmeid eesmärke. Soovisin aru saada läbi spetsialistide kogemuste, kuidas reaalses elus asjad käivad. Minu soov oli teha poolstruktureeritud intervjuud, kus lisaks põhiküsimustele ma proovisin inimesed jutustama panna detailidest ja olulistest tahkudest, mida ma enne ettevalmistust ei osanud ette näha. Intervjuude pikkused olid keskmiselt ühe tunni ringis ning olid väga edukad ja informatiivsed. Antud vorm sobis ka seetõttu, et inimesed muutusid avatumaks ja unustasid kiirelt formaalsused, mille tõttu räägiti ka asjadest, mis muidu intervjuudes väga ei ütleks.

Et saada piisavalt sisendit, jagasin ma otsitavad spetsialisti valdkonnad peamiselt kolme põhikategooriasse: akustika spetsialist, materjali spetsialist ja sisearhitektid (vt joonis 3).



Joonis 3. Intervjuude skeem.

Esimeseks ja üheks olulisemaks nurgakiviks oli akustika spetsialist, kes oskaks valdkonda lahti seletada ja annaks ettekujutuse ruumiakustika olulisusest ja selle erinevatest tahkudest.

Selleks ma valisin Gerda Kaasiku, kes on akustikainsener. Ta on töötanud üle 15 aasta Akukonis. Ettevõtte tegeleb erinevate müra, vibratsiooni ja ruumi akustika hindamise ning mõõtmistega. Gerda on ettevõttes vanemkonsultant ruumiakustika ja ehitusakustika ekspertiisi/projekteerimises. Antud alal on ta ka lektor Eesti Kunstiakadeemias. (Kaljumäe, 2023)

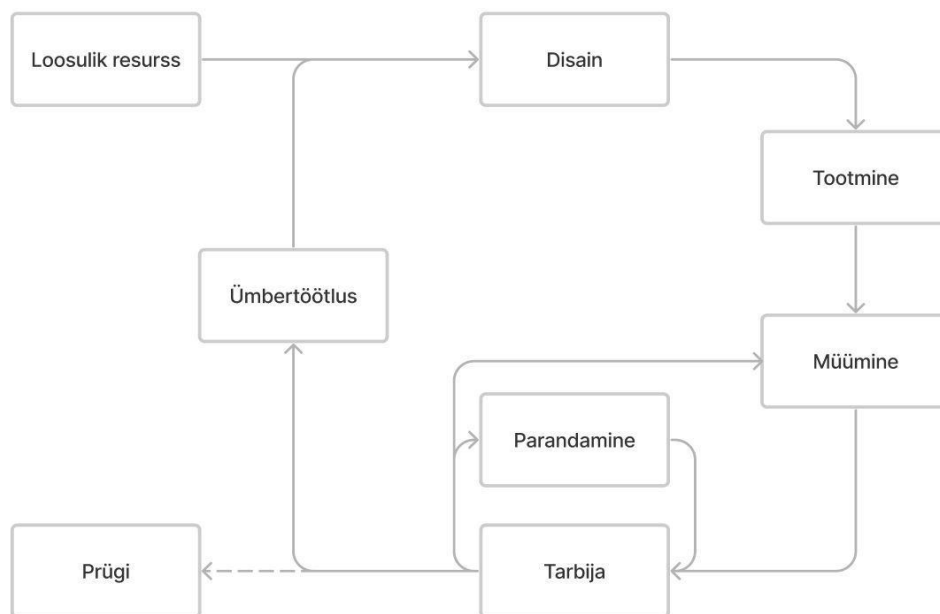
Teiseks valdkonnaks oli materjali spetsialist. Kuna lõputöö käigus kujunes materjaliks lambavill, siis Eestis üheks tugevamaks selle valdkonnast spetsialistik on Katrin Kabun. Ta on FutinDesign omanik, Woola kaasasutaja, tekstiilidisainer ja Eesti Kunstiakadeemia doktorant. Katrinil on laialdased teadmised lambavilla töötlemisest ja sellega seotud heliakustika uurimisest. Teemat arutlesin ka ettevõttega Paragon (Paragon Sleep), kes tegeleb lambavilla töötlemise tootmisega. Sealne kontaktisik on Innar Susi. Lisaks sain palju lisainfot lambavilla kaasamisest ka FlexWooli asutajalt Rasmus Kabunilt.

Kolmas väga oluline valdkond, kellega intervjuusid tegin oli sisearhitektid. Kuna nemad on antud paneelide ostjad ehk Thermory kliendid. Nemad teavad kogemustest, millised valikud on mõistlikud ja oskavad oma valikuid reaalelu probleemide ja näidetega lahti seletada. Intervjuusid tehes kaasasin ma esindajad oma disainiprotsessi, arutledes paneelide ideed ja tehes iga intervjuuga tagasisidest saadud muudatusi.

Intervjuud tegin järgmiste sisearhitektidega: Hanneloore Kääramees (Arhitekt11), Kristi Prinzmänn (Dokointerior), Johanna-Lisete Alling (Atium Design), Kadri Aare (Sirkel & Mall) ja Rasmus Kabun (Lävi sisearhitektid)

## 1.4. Ringmajandusmudel

Ringmajandus (*circular economy*) on tootmise ja tarbimise mudel, mille eesmärk on praegune lineaarne mudel „võta-tee-raiska“ uuesti määratleda. See hõlmab toodete ja materjalide taaskasutamist, parandamist, taastootmist ja ringlussevõttu – seda kõike eesmärgiga pikendada nende elutsüklit ja vähendada üldiseid jäätmeid (vt joonis 4). See algab disainietapis, kus toodetele lisatakse väärtust (nt muutes need lihtsalt lahtivõetavaks, vähendades materjalisisaldust või suurendades jälgitavust), võimaldades neil võimalikult kaua süsteemi sees ringelda. See on ennetav meede, mis rõhutab kogu jäätmete vähendamise ja maailma piiratud ressursside haldamise tegevuskava. (Lowe, 2021)



Joonis 4. Ringmajandusmudel.

Lisaks on antud lähenemine kooskõlas ÜRO jätkusuutliku arengukava (SDG) punktiga 12. “Kaitsta ja taastada maismaa ökosüsteeme ning propageerida nende säästvat kasutamist” (Riigikantselei, i.a.)

Antud lähenemine aitab toodet tarbimisel võimalikult kaua säilitada. Materjalidel on tugev potentsiaal peale kasutust uuesti turule suunamiseks või hilisemas etapis übertöötluseks. Kuigi ringmajandusüsteemi eesmärk on vähendada prügi ja suunata see uuele ringile, siis see on vahepeal paratamatus, et see satub ehitusprügisse. Loon paneeli, mis loodusesse sattudes ei eraldaks toksilisi aineid ega kahjustaks looduskeskkonda.

## 2. Ruumiakustika

Antud peatükis toon ma välja olulisema, et mõista akustika olemust ja saada aru selle toimimisest. Akustika on ulatuslik ja kompleksne valdkond, mis hõlmab mitmesuguseid erialasid, nagu kõnekommunikatsioon, psühholoogia, masinaehitus, füüsika, okeanograafia, meditsiin, füsioloogia, arhitektuur, elektroonika, muusika ja kunst (Foley, 2022).

Helipaneelide väljatöötamisel peab mõistma keskkonda, kuhu need paigutuvad.

Väga fundamentaalsel tasandil võib akustilise keskkonna jagada kolmeks elemendiks: allikas, heli tee ja vastuvõtja. Heli allikas on heli tekitaja: näiteks inimene, koer, viiul jne. Tee (teekond) on vahend, mille kaudu heli edasi kandub – see võib olla õhk või hoone struktuur. Vastuvõtja võib olla kuulaja või mikrofoni. Kui heli allikat peetakse ebasoovitavaks, on disaini eesmärk vähendada selle heli võimet jõuda vastuvõtjani. Seda saab saavutada manipuleerides keskkonda või teed, et heli summutada või blokeerida. Kui heli allikat peetakse soovitatavaks, on disaini eesmärk säilitada selle selgus, et see oleks selgelt vastu võetud ja keskkond seda ei moonutaks ega halvendaks. (Adams 2016 :8)

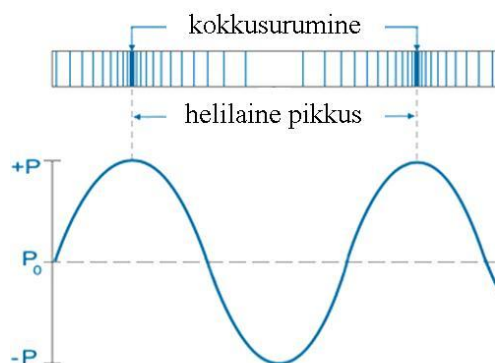
Üks suuremaid vigu, mida vahepeal akustikaga tegeledes tehakse, on see, et ei tehta vahet heli neeldumisel ja heli isoleerimisel (Nugis, 2022). Heli isoleerimisel püütakse helilaine blokeerida, et see ei jõuaks teisele poole seinale. Antud magistris töös keskendun heli neeldumisele ja sellest tulenevalt järelkaja eemaldamisele.

Ruumid, kus kajab ning iga väiksem heli muutub segavaks lärmiks, vajab heli neelavaid materjale või matid. Sellised ruumid on tavaliselt suured ja avatud, kus on palju siledat ja kõva pinda. Kasutades sellistes ruumides helineelavaid materjale, saab muuta järelkaja pikkust ja ruumi heli kvaliteeti. (Nugis, 2022)

Helilainete leviku takistamiseks on tulemuslikumad paksemad matid. Oluline on, et matid ei oleks tihedalt üksteise või seinale vastas. Mattide taga olev õhuvähe annab parema summutuse tulemuse. (Nugis, 2022)

## 2.1. Heli

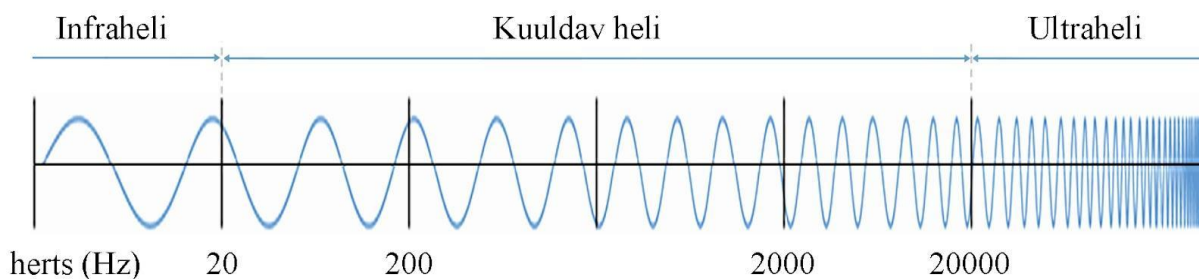
Heli on mehaaniline laine, mis koosneb rõhu edasi-tagasi kõikumistest keskkonnas, mille kaudu see liigub edasi (vt joonis 5). Helilaine levib läbi elastse keskkonna (õhk, vesi, tahke aine jms), kus esinevad molekulaarsed osakesed, mille vahel saab toimuda mehaaniline interaktsioon. (Amendolare, 2022)



Joonis 5. Heli kokkusurumine (Goodwin, 2019)

Heli on transversaalne laine, mis tähendab, et selle vibratsioonid liiguvad edasi külgsuunas, mitte piki helilaine liikumissuunda. Helilaine võnkumised on perioodilised, korduvad regulaarselt kindla sagedusega. Sagedus määrab heli kõrguse, see tähendab kõrgemad sagedused vastavad kõrgemale helile. (Amendolare, 2022)

Helisageduse mõõtühikuks on Herts (Hz), mis väljendab tsüklite arvu ajaühikus. Rõhu muutuse suurus loob amplituudi (tajume helitugevusena), mida väljendatakse logaritmilise detsibelli (dB) skaala abil. (Adams 2016 :8)



Joonis 6. Erinevate heli lainepikkuste graafik hertsides

Normaalse kuulmisega inimene tajub õhus levivaid helisid sagedusega 20 – 20 000 Hz (väikelapsed kuni 40 kHz). Taju piiridest kõrgemat sagedust üle 20 kHz nimetatakse ultraheliks ja madalamat sagedust alla 20 Hz infraheliks, ning nende vahele jäävat ala akustiliseks heliks (vt joonis 6). Helid, mida kuuleme, on tavaliselt paljude erinevate amplituudidega sageduste kompleksne segu, mis aja jooksul muutuvad. Õhus olev helilaine levib normaalsel niiskusel ja temperatuuril õhus kiirusega 343 m/s (Rinde, i.a).

Heli kiirus on niiskes õhus suurem, kuna niiske õhu tihedus on väiksem kui kuival õhul (Brennan, 2018).

## 2.2. Järelkõla aeg

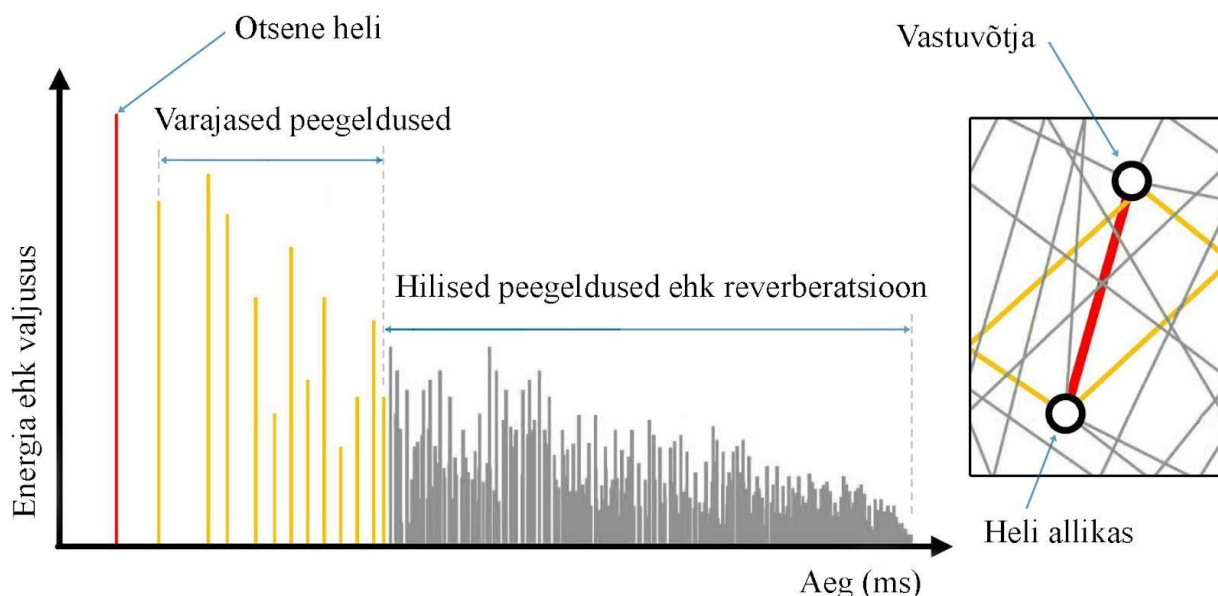
Järelkõla aeg sõltub ruumi mahu ja neeldumisala vahelisest suhtest. Mida suurem on ruum, seda pikem on järelkõlaaeg. Eriti oluliseks muutub see, kui ruumid on kahekordsed või avatud lahendusega. Teisest küljest väheneb järelkõla, mida suurem on ruumi ekvivalentne neeldumisala. Järelkõla kestus (tähis  $T$  või  $RT$ , ingl k sõnadest *reverberation time*) on ruumiakustika tuntuim tunnussuurus. (Berg, 2021)

Alloleval joonisel 7. on paremal näha ruumi kujutist, mis selgitab erinevate lainete kohalejõudmist keskkonnas ning vasakul impulssheli reageeringu graafikut, mida saab jagada peamiselt kolmeks osaks: otsene heli, varajased peegeldused ja hilised peegeldused. (Pelzer, 2014)

**Otsene heli:** See on helilaine, mis jõuab kuulajani kõigepealt. Ruumis jõuab see kohale 10 ms jooksul, see on ilma peegelduseta. (Möller, 2011)

**Varajased peegeldused:** Helilaine, mis jõuab 50-80 ms jooksul. Need varajased peegeldused on olulised heli värvikuse ja ruumilise tunnetuse jaoks. Varajaste peegelduste kõige tähtsam ülesanne on otsese heli toetus ja heli selguse tagamine. (Möller, 2011)

**Hilised peegeldused:** Umbes 80 ms pärast suureneb peegelduse tihedus kiiresti, moodustades järelkaja ehk reverberatsiooni. Varajane energia laguneb kiiresti ja hiline energia sumhub. (Möller, 2011)



Joonis 7. Impulssheli reageeringu graafik (Pelzer, 2014)



## 2.3. Helide peegeldumine

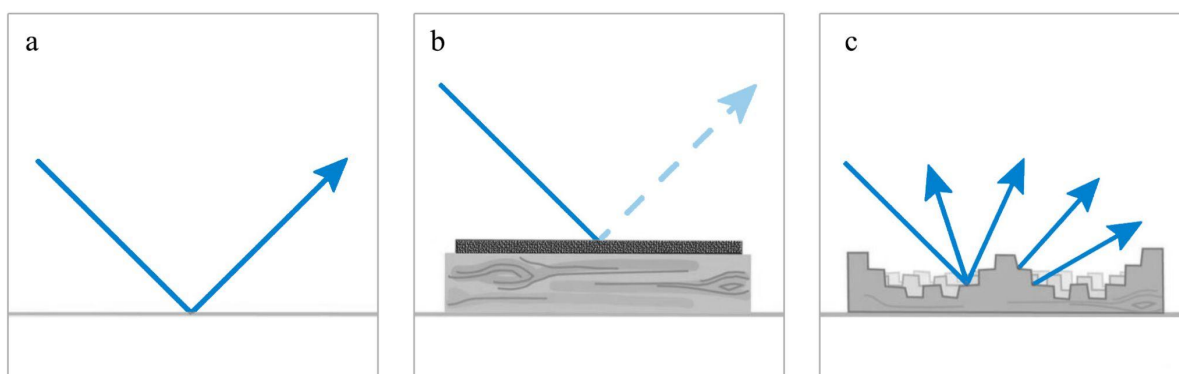
Ruumiakustika hõlmab otsese ja peegeldunud heli uurimist ja analüüsimist. Sobiv akustika on hädavajalik kõigis ruumides, kus heli edastatakse kuulajani. Ruumiakustika kujundamise kriteeriumid on ideaalis seatud vastavalt ruumi kasutusotstarbele. Näiteks muusikastuudiotest on soovitatav kasutada rohkem summutavaid pindu kui kontorites või elutubades, kus me ei ole keskendunud eelkõige parima muusikaelamuse saavutamisele. (Hortvik, 2020)

Peamine erinevus sise- ja välis heli levimise vahel on peegeldunud heli tasemes. Loomulikult tekitab sisekeskkond rohkem peegeldavat heli kui väliskeskkond, sest helilained põrkuvad tagasi ruumi seintelt ja seal kasutatavate seadmetelt. Heli peegeldumise viis sõltub ruumi kujust ja kasutatud materjalide struktuurist. (Hortvik, 2020)

Helilaine põrkumisel pinnaga energia kas peegeldub, neeldub või hajub (vt joonis 8). Otseste peegelduste puhul on langemisnurk võrdne peegeldumisnurgaga, seega tekivad selliselt peegelduvad helilained tavaliselt suhteliselt siledatel pindadel, näiteks seintelt. Kui helilaine aga tabab ebatasast pinda, peegeldub heli edasi hajusalt. Sel juhul killustub peegeldus paljudeks madalama intensiivsusega peegeldusteks, mis hajuvad lainurga all ja loovad ühtlasema helivälja. (Hortvik, 2020)

Helilained peegelduvad ruumi kõigilt sobivatelt pindadelt, seepärast kasutatakse summutamiseks absorbeerivaid materjale, et vähendada peegeldunud heli mõju kuuldavale helile. Kui heli ei summutata, põrkab see ruumis edasi-tagasi kuni heli energia on vaibunud. Kõvade seintega ruumis võib selline põrkamine kesta häirivalt kaua. (Hortvik, 2020)

Kõige parema kuulmise kogemuse jaoks on tulemus kombinatsioonist heli summutajast ja hajutist. (Acoustic Geometry, 2021)

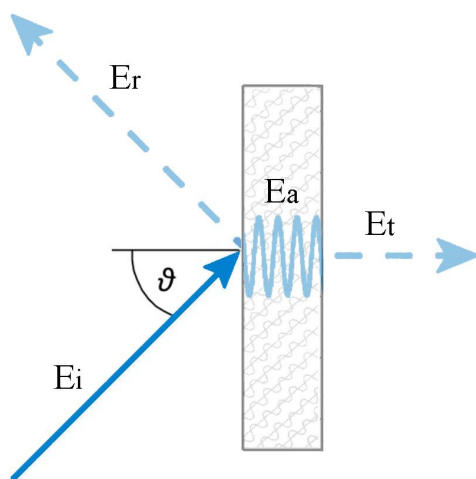


Joonis 8. Heli peegeldumine siledalt pinnalt (a), absorbeerivalt pinnalt (b) ja difuusserilt ehk hajutilt (c) (Hortvik, 2020).

## 2.4. Heli neeldumine

Kõik materjalid neelavad, peegeldavad ja edastavad heli omal viisil. Nii nagu keskkonna materiaalne koostis loob visuaalse identiteedi, võib see moodustada ka kõlalise identiteedi. Heli neelavaid materjale kasutatakse tavaliselt keskkonnaga manipuleerimiseks, kas müraallika vaigistamiseks või heli vastuvõtu parandamiseks. Kooskõlas materjaliga mõjutab heli ka vorm. Pinna skaalal võib tekstuuri keerukus põhjustada heli hajutatumat peegeldust, samas kui tasane monoliitne pind peegeldub peegeldavalt. See interaktsioon sõltub ka heli lainepikkusest. (Adams 2016 : 10)

Akustiline neeldumine on nähtus, mille käigus akustiline energia muundatakse soojusenergiaks. Akustiline neeldumine on seega energia hajumise nähtus. (González, 2019)



Kui helilaine jõuab ühele pinnale  $E_i$  (incident energy), peegeldub osa selle energiast samasse poolruumi kust see tuleb  $E_r$  (reflected energy). Snelli seaduse kohaselt on  $E_i$  ja  $E_r$  nurgad langemise pinnaga  $\vartheta$  võrdsed (vt joonis 9). (González, 2019)

Peegeldumata energiat väljendatakse tavaliselt kahe liikme summana: edastatud energia  $E_t$  ja neeldunud energia  $E_a$ . Esimene on osa energiast, mis läbib pinda ja tekitab teisel pool seina akustilise laine, teine on osa langevast energiast, mis hajub pinnal.

Joonis 9. Heli peegeldumine ja sumbumine (Swami, 2015)

Heli neelduvuse hindamiseks kasutatakse helineeldetegurit ehk helineeldekoefitsenti ( $\alpha$ ), see on materjalisse sisenenud heliintensiivsuse ja langeva heliintensiivsuse suhe. Helineeldetegurit arvutatakse järgmise valemiga. (Kaasik, 2014)

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Neeldunud energia intensiivsuse valem on järgmine:  $E_a = \alpha / E_i$  (González, 2019).

Kõikide materjalide helineelavust saab mõõta helineeldekonfidentsiga ( $\alpha$ ), mis on neeldunud heli osa või protsent skaalal vahemikus 0,0 (peegeldav) kuni 1,0 (täielikult). absorbeeriv. Neeldumise jõudlus varieerub oluliselt kuuldavate sageduste vahemikus ja testid mõõdetakse tavaliselt 18 erineval 1/3-oktaaviribal sagedustel 100 Hz kuni 5000 Hz. Neid andmeid kasutatakse seejärel materjalide klassifitseerimiseks. (NRC Rating... 2020)

Ühe numbriga märgitud helineelde koefitsient on kasulik üldistuste tegemiseks, kuid keeruliste andmete esitamisel võib tekkida seal puudusi. Näiteks võib esineda juhtumeid, kus üks oktaaviriba on väga neelav, kuid teised mitte. Nende andmete ühtlustamine keskmiseks võib anda eksitava ülevaate selle kohta, kuidas materjal tegelikult summutab. Alati on soovitatav tutvuda laboratoorsete testide aruannetega ja arvestada helineelde koefitsienti sagedusvahemikuga. (Adams 2016 :16)

Mõne materjali puhul võivad katse aruanded näidata neeldumistegurit, mis on suurem kui 1. Tegelikult ei ole see võimalik, et materjal neelab rohkem kui 100%. Selle anomaalia peamiseks põhjuseks on materjali paksus ja servad, mida materjali pindala arvutamisel ei arvestata. Näiteks paneeli, mille mõõtmed on 1200 mm x 600 mm x 100 mm, on mõõtmisprotseduuris märgitud pindalaks 0,72 m<sup>2</sup>, mis võtab arvesse ainult pealtvaate pindala. Kui aga servad arvestada ruumi tegeliku pindalaga, on see 1,08 m<sup>2</sup>. (Adams 2016 lk16)

Müra vähendamise koefitsient (NRC) on ASTM C423-s määratletud arvuline ühik, mis on



keskmine tulem neeldumistegurite sagedustel 250, 500, 1000 ja 2000 Hz. Keskmine tulemus ümardatakse 0,05 lähima kordseni (NRC Rating..., 2020).

125 Hz	1.00	0.14	0.02
250 Hz	1.00	0.27	0.02
500 Hz	1.00	0.7	0.03
1000 Hz	1.00	0.8	0.04
2000 Hz	1.00	1.00	0.05
4000 Hz	1.00	1.00	0.07
<b>NRC</b>	<b>1.00</b>	<b>0.70</b>	<b>0.05</b>

Kuigi tavaliselt on välja toodud sagedus 125-4000 Hz siis NRC arvutamine toimub 4 mõõtetulemuse keskmisena. Joonisel 10 on välja tood avatud akna, helisummutus mati ja kiviseina NRC. Arvutustes 0.70 NRC reitinguga akustiline matt tähendab, et 70% ruumis olevast helist neeldub, ülejäänud 30% aga peegeldub.

Joonis 10. NRC arvutamine (NRC Ratings of..., i.a)

## 2.5. Helineelde klassid

Helineeldeklassid on määratletud standardis EVS-EN ISO 11654, mis liigitab materjali helineeldumise tõhususe järgi viide erinevasse klassi A - E (Adams 2016 lk16).

Antud graafik ja klasside jaotus on üks olulisemaid infoallikaid sisearhitektidele ja akustikutele. Selle järgi saavad nad teada nii üldise akustilise võimekuse kui ka erinevate sageduste efektiivsuse. Vahepeal on vajalik ruumis summutada kindla sagedusega heli, kuid tavaolukordades otsitakse ühtlase summutusega akustilist summutusmatti. (Kaasik, 2023)

Alloleval joonisel 11. mõõdab  $\alpha_s$  sagedusest sõltuvat helineeldumist kajaruumis, seda kasutatakse praktilise helineeldumisteguri  $\alpha_p$  mõõtmiseks (Peroni, i.a).

$\alpha_p$  on praktiline akustilise neeldumistegur ja see on sagedusega seotud.

$\alpha_s$  mõõdab sagedusest sõltuvat helineelduvust kajaruumis, seda kasutatakse praktilise helineeldumisteguri  $\alpha_p$  mõõtmiseks.

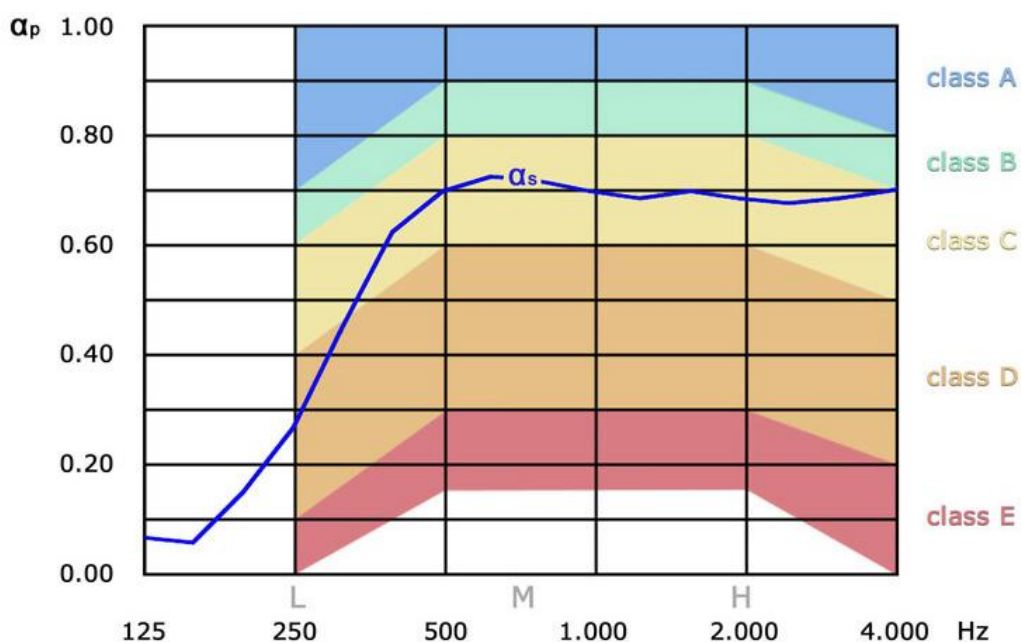
$\alpha_w$  mõõdab kaalutud helineeldumist olenemata sagedusest klassidega A (maksimaalne neeldumine) kuni F (peegeldus), millele on omistatud ka järgmised sulgudes olevad näitajad:

L - materjal on efektiivne madalsagedusalas, nt.  $\alpha_w = 0,60$  (L)

M - materjal on efektiivne kesksagedusalas, nt.  $\alpha_w = 0,70$  (M)

H - materjal on tõhus kõrgsagedusalas, nt.  $\alpha_w = 0,85$  (H)

Võimalikud on kombinatsioonid, nt.  $\alpha_w = 0,70$  (MH) või  $\alpha_w = 0,60$  (LM). (Peroni..., i.a)



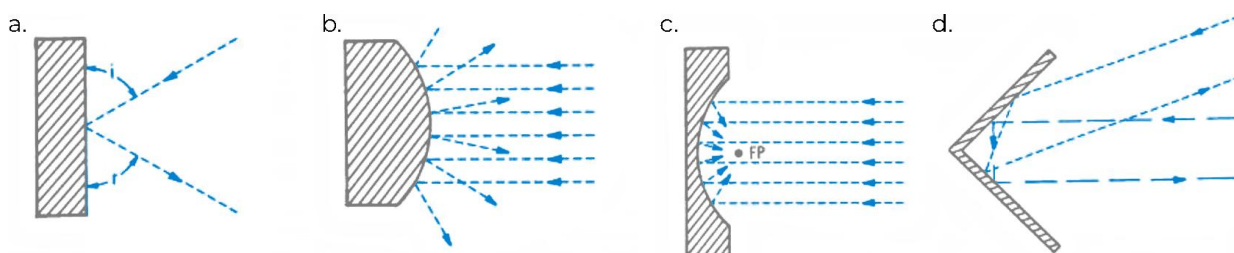
Joonis 11. Praktiline helineelde konfitsenti klassid (Peroni, i.a)

## 2.6. Heli hajuti

Poorsed materjalid neelavad efektiivselt heli, neid nimetatakse helisummutajateks, kuid heli hajuti ehk difuuseri ülesanne on teistsugune. Paneel võimaldab helil peegelduda ning see purustab peegelduse tänu millele ei teki selget kaja. Difuusorid hajutavad nendeni jõudnud helilained mitmesse suunda, mis muudab heli ühtlasemaks (vt joonis 12). Tulemuseks on heli vähenenud kontsentratsioon, mis hajutab kaja. (Foley, 2022)

Helilaineid muudetakse paljudeks väiksemateks helisagedusteks, millel on palju vähem energiat kui esialgsel lainel. Seejärel neelduvad ja hajuvad üksikud sagedused nii, et inimesed ei kuule enam algseid helisid. See vähendab heli intensiivsust mis tahes punktis ja raskendab allika asukoha leidmist. (Mcgill, 2022)

Helihajuteid kasutatakse paljudes kohtades, kus võib esineda soovimatut müra või järelkaja. Neid kasutatakse ka müratundlike inimeste kaitsmiseks, kes kannatavad kuulmislanguse tõttu vanuse või ülemäärase mürataseme tõttu. Hajuti ja neelduja on mõlemad vahendid ruumi akustika juhtimiseks, kuid teevad seda väga erineval viisil. (Mcgill, 2022)



Joonis 12. Heli peegeldused: tasaselt- (a), kumeralt (b), nõgusalt (c) ja nurga peegelduselt (d) (Swami, 2015)

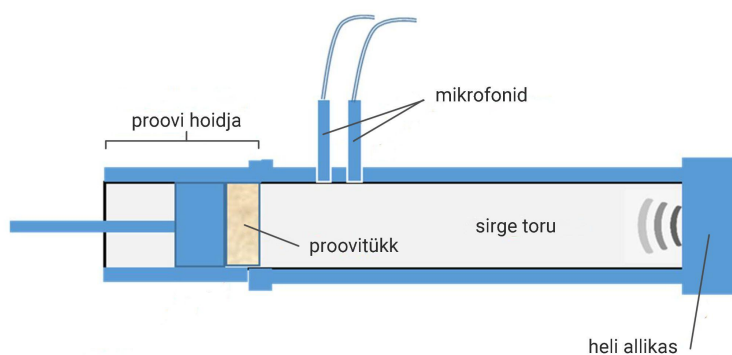
Antud profiilide juures on oluline, et heli saaks peegeldudes jaguneda erinevatesse suundadesse. Sileda pinna korral peegeldub heli sama nurga all tagasi, kust heli tuleb, kuid vastupidisesse suunda. Nii kumera kui nõgusa pinnaga toimib heli hajutus hästi. Nõgusal pinnal tekib fookuspunkt (FP), kuid selle juures peab jälgima, et inimene ei asuks fookuspunktis, sest seal on koondunud ehk võimendatud heli. Samas fookuspunktist kaugemal olev heli hajub siiski laiali nagu kumeral pinnal, lihtsalt vastupidises suunas. Tuleks vältida 45 kraadist nurka kõrvuti, sest see toimib kui helkur. Olenevalt ruumi asukohast peegeldub heli sinu juurde tagasi.

## 2.7. Heli testimine

Ruumi järelkaja tuvastamiseks on palju meetodeid. Kasutades spetsiaalseid instrumente (12 tahuka kujulist kõlarit ja helituvastus seadet) saab väga hea tulemuse, kuid need on kallid ja suured, mistõttu ei ole otstarbekas neid igas ruumis kasutada. Lihtsam moodus, mida kasutatakse heli tekitamiseks on puidust plaksutaja, lõhkev õhupall või stardipüstol. Oluline on, et helitekitaja oleks piisavalt intensiivne, mis eralduks taustamürast. (Huang jt 2010)

Suurte paneelide helineelde koefitsienti testitakse spetsiaalse kajaruumiga. Ruumil on pikk järelkõlaaeg tänu tugevalt heli peegeldavatele sisepindadele. Kambri seinad on konstrueeritud nii, et need tagaksid heliisolatsiooni välistest müraallikatest. Proovid paigaldatakse kambri põrandale, seinale või lakke. Neeldumiskoeffitsiendid võivad oluliselt muutuda sõltuvalt materjali paigaldamise viisist, materjali mõõtmetest ja materjali jaotumisest ruumis. Ideaaljuhul tuleks materjale mõõta viisil, mis on kõige paremini kooskõlas nende põhilise paigaldamise viisiga. Ruumi asetatakse 12 tahuline kõlar ja helituvastus mikrofon. (Baker, 2023)

Helisummutus paneeli materjali saab testida impedantstoru (*Kundt tube*) sees (vt joonis 13). Kuhu asetatakse materjaliproovid, näiteks mürasummutusmati tükk. Toru diameeter võib olla erinev, näiteks 24mm. Toru sees tekitatakse kõlari abil helilaine, mis seejärel peegeldub toru vastasotsas olevas materjali proovis. Ülekandefunktsiooni meetod kasutab kahte statsionaarset mikrofoni asendit toru sees. Kui võrrelda mõlemas mikrofoni tehtud mõõtmisi saab valemide kasutades arvutada neeldumiskoeffitsiente ja impedantsi sagedusvahemikku lühikese mõõtmisega. Toru mõõtmised sobivad prototüüpide loomiseks ja väikeste materjali proovide mõõtmiseks. (Urdepilleta jt, 2022)



Joonis. 13. Impedantstoru joonis (Urdepilleta jt, 2022).

## 2.8. Akustika mõju inimesele

Tänapäeval veedame me umbes 80% siseruumides. See on inimkonna ajaloos uus nähtus ning inimkõrv pole sellega veel kohanenud. Me ei saa kõrvu sulgeda ilma füüsiliste vahenditeta, kuulmisaparaat töötab nii päeval kui öösel. Müraga täidetud ruumis peab aju kogu aeg eristama informatsiooni taustamürast, mida inimesel võib vaja minna ja mida ta ei taha kuulda. Sellisel moel on aju pidevalt koormatud ja kui see päevast päeva kordub, tekivad kuulmisprobleemid, peavalu, närvilisus jms. Halb akustika kurnab aju ja stressis olles ei pruugi inimene ise sellest arugi saada, mis seda põhjustab. (Parijõgi, 2016)

Mürarikas keskkonnas kipuvad inimesed tahtmatult oma vokaalset pingutust suurendama, et olla kuuldaval taustamürast. Seda nimetatakse Lombardi efektiks ja seda saab omal nahal kogeda igas valjuhäälses restoranis või baaris. Kajakõne vähendamine aitab vältida olukordi, kus tekib Lombardi efekt. Heli peegeldused võivad muuta kõne arusaamatuks, raskendada helide asukoha leidmist ja muuta muusika mudaseks. Samas kui peegeldusi ei ole piisavalt, võib ruum tunduda liiga kuiv, vaikne või surnud, seega tuleb saavutada õrn tasakaal. (Shirley jt, 2022)

Reverberatsioon mõjutab kõne arusaadavust kahel viisil: see tõstab üldist taustamüra taset ja hilinenud peegeldused põhjustavad keele moonutamist või hägustumist. Heli neelavaid materjale kasutatakse ruumides, kus kõne arusaadavus on oluline: kohtusaalid, loengusaalid, avalikud ruumid jms. (Adams 2016: 13)

Ruumiakustika muutmise heaks näiteks oli Tartu ülikooli kliinikumi kõnekeskuse ruum. Seal töötas koos kümnekond inimest, vanemad proud, kellest igaüks rääkis telefoniga. Nad kurtsid, et olid õhtuks täiesti läbi ning pidevalt pea valutab. Peale seda, kui seal tehti akustika korda, kirjeldasid töötajad, et ruum on vaikne ning peaaegu ei märkagi, et teised inimesed on ruumis ning eelnevad probleemid on kadunud. Nad ei osanud varem halva akustika pärast protestida, sest ei osanud arvata, et selles oli probleem. (Parijõgi, 2016)

Omadest kogemustest saan rääkida, et segavad helid või isegi soovimatu muusika võib killustada kiirelt keskendumist ja viia produktiivsust madalaks. Isiklikult olen minevikus mõnedes olukordades kasutanud isegi mürasummutavaid kõrvaklappe, et parandada keskendumist. Enne lõputööga alustamist ma ei pööranud palju tähelepanu kaja olulisusele, ma olin pigem fokusseeritud müra tekitajatele ja heli kvaliteedile, kuid nüüd ma näen, et see on salajane "vaenlane", mida me ei pruugi isegi märgata, kui seda ei teadvusta, mis see siiski mõjutab meid pidevalt ja tugevalt.

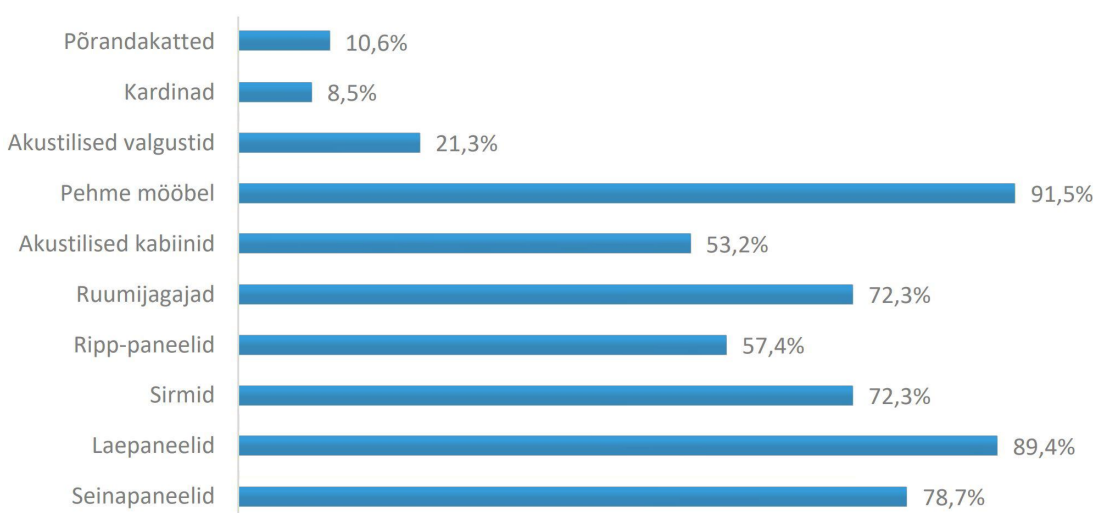
## 2.9. Akustika parandamise võtted interjööris

Tänapäeval tunnetavad inimesed rohkem, et kaja on probleem: ka tavalised inimesed on aru saanud, et ei ole vaja ainult valguslahendust, vaid ka akustikale peab ruumi disainides tähelepanu pöörama (Kääramees, 2023). Ruumiakustika parandamiseks on mitmeid võimalusi, sealhulgas heli neelavate materjalide kasutamine, nagu vaibad, kardinaid, akustilised paneelid jne (Alling, 2023).

Läbiviidud kvantitatiivse küsimustiku põhjal, milles Anna-Liisa Hanni uuris 48 erineva sisearhitekti käest akustika summutamise kasutamise vahendeid, tuli välja, et kasutatakse erinevaid võtteid (Joonis 14). Kuigi töö oli fokuseeritud avatud kontori akustikale, andis see hea ülevaate ka laiemalt. Peaaegu kõik 91,5% sisearhitektid on ruumi akustilistes lahendustes kasutanud pehmet mööblit. Järgmistel kohtadel olid laepaneelid 89,4% ja seinapaneelid 78,7%. (Hanni, 2020)

Ma viisin oma magistr töö kvalitatiivse uuringu raames läbi poolstruktureeritud intervjuusid sisearhitektidega, mille tulemused kinnitasid antud graafikut, ning andsid hea võimaluse Hanni tööd võrrelda ja tuua välja põhjused, miks oli kvantitatiivne tulemus just selline.

Pehmemööbel on üks hea akustiline võte! Need sisearhitektid, kes ei tegele avaliku ruumiga ja on keskendumud eramutele ja eraklientidele, ei kasuta spetsiaalseid lae ja seina akustilisi summuteid. Mööbel, vaip ja kardinaid teevad oma töö efektiivselt ära. See on põhjus, miks me ei näe tavalistes elamutes palju mürasummutuspaneele. Ruumide kubatuuriga hakkab aga pilt muutuma ja kajaprobleemid kasvavad äkiliselt. (Alling 2023; Aare 2023; Kabun 2023a)



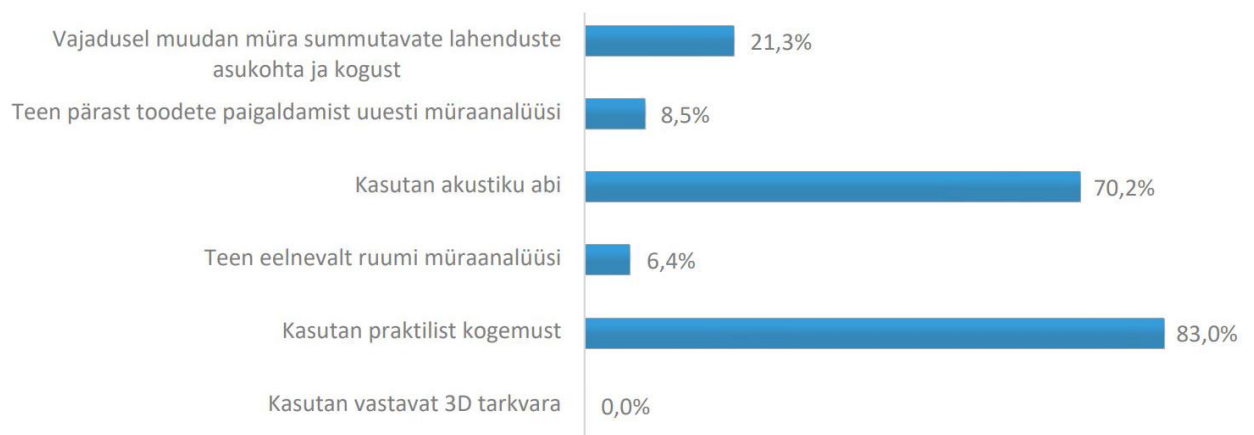
Joonis 14. Akustika parandamise võtete kasutatavus interjööris. (Hanni, 2020)



Uuringust selgus, et sisearhitektid kasutavad lihtsamate ruumide akustikalahenduste jaoks oma praktilisi kogemusi. Ruumi akustilisi arvutusi sisearhitektid ei tee, sest see on keerukas ja ajamahukas. Praktiliste kogemustega on tekkinud piisavad teadmised, kuidas luua toimiv lahendus. Tavaolukordades ei teostata akustilisi mõõtmisi enne ega peale helisummutavate paneelide lisamist. Inimese kõrv on üpris hea indikaator, millega kuuleb kohe ära, kas tulemus on suurepärase, hea või halb. Kui mingil põhjusel ei ole akustiline lahendus andnud piisavat tulemust, lisatakse paneele juurde. Kui ruum on keerukam, siis kaasatakse professionaalne akustik, kes annab sisearhitektidele infot, kui palju ja mis paksusega matte peaks kasutama. Üldiselt annavad akustikud soovitusi, et mitu protsenti laest või seinast peaks villamatiga kaetud olema (Alling, 2023; Kabun, 2023a).

Analüüsid oma kogutud infot Hanni uuringuga selgub, et saime väga sarnased tulemused. Hanni toob välja (vt joonis 15), et sisearhitektid tuginevad helisummutavate lahenduste väljatöötamisel oma praktilisele kogemusele (83%), mõningal määral kasutatakse ka akustiku abi (70,2%). Lahenduse efektiivsuse kontrollimiseks teeb 6,4% vastanutest eelnevalt ruumi müraanalüüsi. Peale akustilise lahenduse paigaldamist teeb neist 8,5% müraanalüüsi ning 21,3% korrigeerib vajadusel lahenduses paneelide kogust ning paigutust. (Hanni 2020)

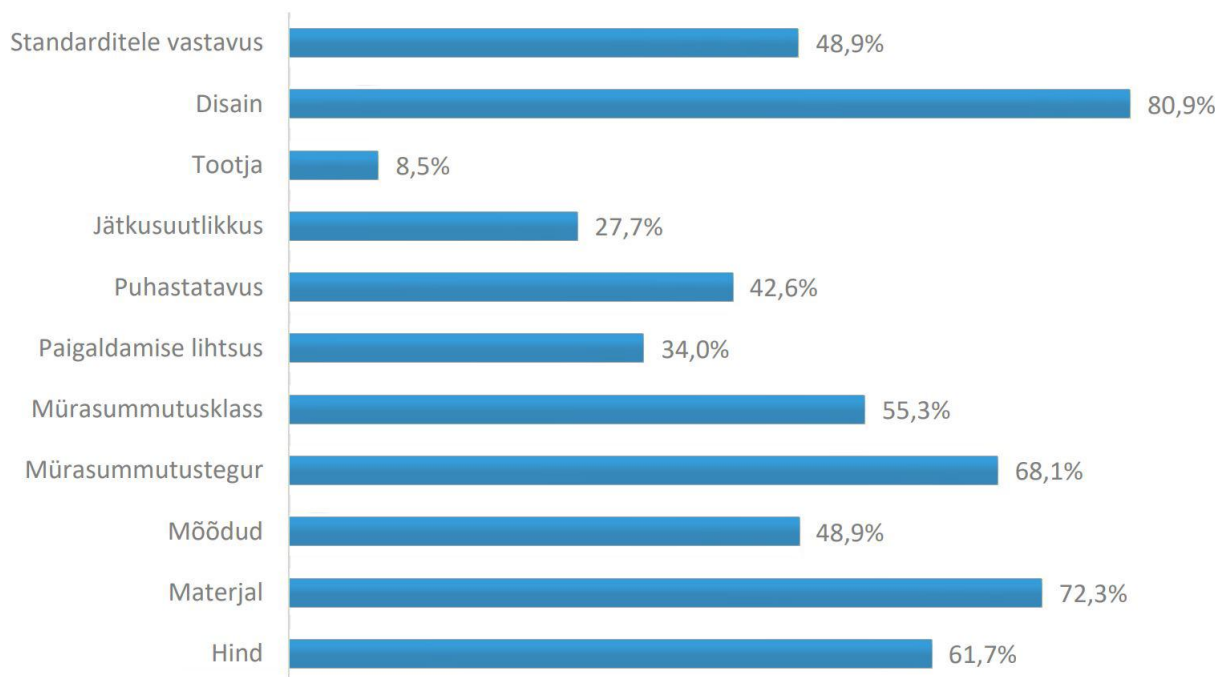
Kuna iga projekt on erinev, siis sisearhitekt teeb analüüsi, kas on vaja kaasata töösese ka akustik. Intervjuudest selgus siiski, et kõik on akustikut mingis projektis kasutanud, kuid teda kaasatakse harva. Põhiliselt vaid keerulisemates projektides.



Joonis 15. Helisummutava lahenduse valimine. (Hanni, 2020)

Kvantitatiivses uuringus selgus Anna-Liisa Hannil, et kõige olulisemaks kriteeriumiks on disain (vt joonis 16)(Hanni 2020). See tuli välja ka minu uuringutest, et visuaalne välimus on üks olulisematest teguritest paneeli valimisel. Paneel peab sobima esteetiliselt antud ruumilahendusse. Sisearhitektidelt saadud info kohaselt on väga olulisel kohal reaalne funktsionaalsus ehk akustiline mürasummutus. Kuna sisearhitektid toetuvad oma töös suures osas kogemustele, siis tuleb mängu materjali olulisus. Nad on teadlikud, et vill summutab efektiivselt kaja, ning seda peaks olema vähemalt 30-50 mm mõjusaks toimimiseks. Antud juhul ei ole oluline, millise villaga on tegu, kas sünteetilise või looduslikuga, kõik töötab. Seda kinnitab ka Hanni graafik, kus materjal on lausa teisel kohal 72,3%, mis käib käsikäes mürasummutusteguriga 68,1% (Hanni 2020).

Intervjuude tuli välja ka hinna olulisus, mis on Hannil neljandal kohal. Kõik muidugi oleneb projektist. Viimasel ajal on projektidesse hakanud liikuma ka kallimaid paneele, kus hind ei ole enam nii määrav - olulisem on pigem disain ja reaalne võimekus (Kääramees 2023). Jätkusuutlikkusele väga suurt rõhku tavaliselt ei panda, kuid siiski on maailm üha tugevamalt võtnud sihi loodussõbalikumasse suunda ja antud kriteerium võib olla oluline näitaja paneelide valikul (Kääramees; Aare; Prinzmann 2023).



Joonis 16. helisummutuspaneelide valikute kriteeriumid. (Hanni, 2020)

### 3. Lambavilla akustiline komposiitmaterjal.

Antud projektis ma kasutasin helisummutavas matis naturaalsel lambavilla. Et muuta kohev lambavill kontrollitud vormiga paneeliks oli vaja seda töödelda. Paneel peab olema piisavalt tihe, et akustilised omadused oleksid head. Naturaalsele villale oli vaja lisada sideainet 35%, et takistada paneelis villakiudude tagasivetrumist. Antud peatükis seletan lahti komposiitmaterjali peakomponendid ja selle olulisemad omadused.

Energiatarbimise ja keskkonnamõjude vähendamise nõuded on paljudes sektorites looduslike kiududega tugevdatud komposiitide väljatöötamise peamised tõuketegurid. Võrreldes sünteetilise kiuga on looduslikel kiududel mitmeid eeliseid eelkõige biolagunevuse osas. (Allafi jt, 2022)

#### 3.1. Lambavill

Lambavill on läbi inimkonna üks olulisemaid looduslikke kiude, mille kasutamise esimesed pärinevad ajast 10 000 eKr. Villa on tavaliselt kasutatud rõivatekstiilide, vaipade ja interjööri dekoori tootmiseks. (Wool Notes, 2020)

Villa saadakse pügamise teel (vt foto 3), mille käigus ei tapeta lammast ära. Läbi aegade on lambaid aretatud, et neil kasvataks rohkelt villa, mille tõttu on villa pügamine aastas 1-2 korda, lamba tervise huvides vajalik (Baista, 2022).

Ühelt lambad saab aastas 1,5 – 6 kg villa (Boncamper 2000: 142). Ajaga on muutunud lammaste pidamise funktsioon. Vill ei ole enam lammaste kasvatamise peamine eesmärk ning sellest on saanud liha kõrval jääkprodukt, millele otsitakse pidevalt uusi kasutusvõimalusi. (Matsin, 2022)

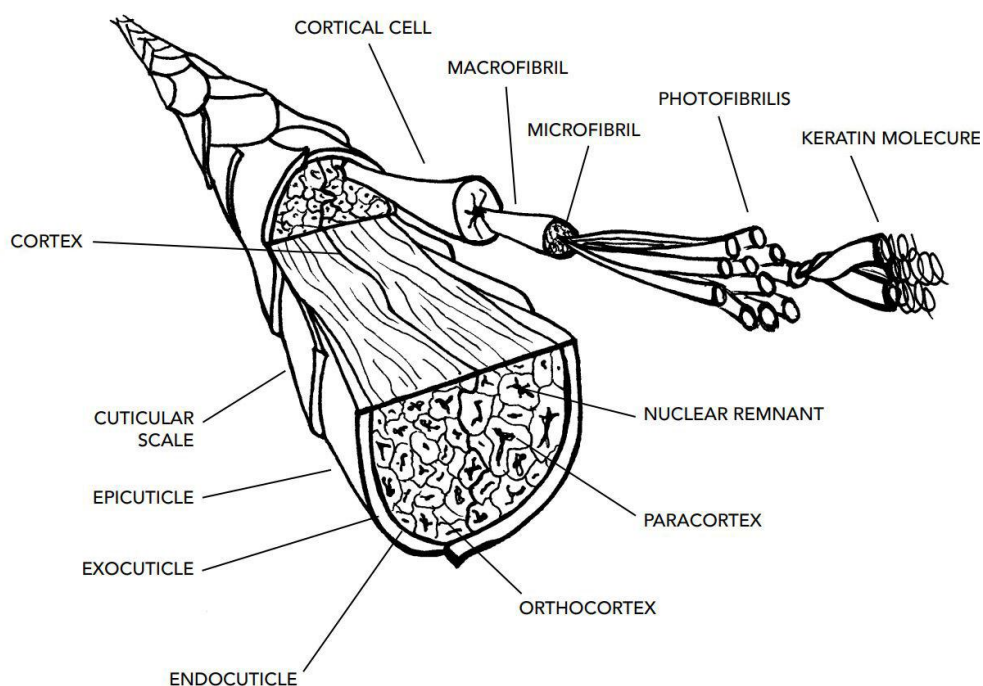
Eestis maetakse maha või põletatakse aastas umbes 153 tonni lambavilla (Upcycling..., 2020).



Foto 3. Poolenisti pügatud lammas (Rosa, 2016)

Vill on üks mitmekülgsemaid looduslikke kiude, selle hämmastavad omadused on hästi tuntud (The Anatomy of a Wool... 2020). Antud materjal on täielikult biolagunev ja seda saab nimetada oma funktsionaalsete omaduste poolest isegi looduslikuks *high-tech* (kõrgtehnoloogiliseks) kiuks. Villakiu heade omaduste mitmekesisust ei ole suudetud veel tehiskiududega järgi tekitada. (Kabun 2022: 22)

Vill on tekstiilkiududest kõige keerulisema ehitusega (vt joonis 17.). Villa kasvades tekivad erinevad kiu kihid, mille ehitus elementideks on kolme liiki villarakud. Kõige välimises villakiu osas on kutiikula (kattekiht ehk soomuskiht), mis koosneb omakorda vähemalt neljast kihist. Kutiiikula on väga õhuke, mis koosneb sarvestunud rakkude soomustest. Soomuselise pinna all paikneb koorkiht ehk korteks, mille moodustavad pärisrakud. Korteks koosneb parakorteksist ja ortokorteksist ning see annab kiule põhilise massi. Säsi- ehk südamikurakud moodustavad medulla. Kui vaadelda mikroskoobi all villakiu ristlõikepinda siis eristuvad kõik kolm kihti: südamik, koorkiht ja väliskiht. (Boncamper 2000: 133)



Joonis 17. Lambavilla kiu bioloogiline struktuur (Kinney, 2014)

### **Villakiu keemiline koostis**

lambavill koosneb peamiselt keratiinist. Villakius on keskmiselt: 50% süsinikku, 20-25% hapnikku, 16-17% lämmastikku, 7% vesinikku ja 3-4% väävlit. Villakiu molekulide ehitus ei ole keemiliselt ega molekulide suuruse poolest ühtlane ehk homogeenne. See mõjutab mitmeid kiuomadusi, nt hügroskoopsust. Villakiu omaduste kohta ei saa seetõttu esitada üheselt mõistetavaid arvvaartusi, vaid need väljendatakse teatavate keskmiste väärtustena või vahemikuna. (Boncamper 2000 :134)

Villamolekul on nn polüpeptiidi molekul, mille valem on üldkujul:



Valemis on R-ga tähistatud aminohapperühmad. (Boncamper 2000: 134)

### **Villa omadused**

Lambavill on looduslikest tsellulooskiududest kergem. Villa tihedus on  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . Kiu niiskussisaldus kiu tihedust eriti ei mõjuta, sest niiskust imades vill tursub umbes samavõrra kui selle kogumass suureneb. Võrreldes polüakrüülnitriil kiuga on lambavill siiski raskem. (Boncamper 2000: 135)

### **Hügroskoopsus**

Lambavill on üks hügrokoopsemaid tekstiilikiude. Selle juures on oluline teada, et vill imab, säilitab ning vabastab niiskust, kuid samal ajal selle termilised omadused ei muutu. See muudab villa ideaalseks kasutamiseks kohtades, kus niiskus võib olla probleemiks. Villa konditsiooniline niiskus on 14-19%. EL direktiivi 96/74/EÜ järgi on kammitud lambavilla konditsiooniline niiskus 18,25%. Villakiu niiskussisaldus mõjutab mitmeid villa omadusi nagu jäikust, tugevust, elastsust jms. Kui ruumi õhuniiskus tõuseb 100%-ni, võib vill imada endasse lausa 33% niiskust, samal ajal ei tundu lambavill katsudes märjana. Villakiu kütikulas ehk pinnakihis on väikesed mikropoorid, mis teeb kiust õhku läbilaskva. Pooride väiksuse tõttu ei mahu sealt läbi otsene vesi, kuid veeaur mahub sealt läbi. Niiskuse aeglaselt imendumisel ja vabastamisel osaleb lambavill ruumi õhuniiskuse tasakaalustamises. (Boncamper 2000: 137)

### **Ruumi õhu puhastatavus**

Lambavill parandab oluliselt siseõhu kvaliteeti, absorbeerides kiiresti saasteained nagu formaldehüüdid, vääveldioksiid ja lämmastikoksiid, mida tuntakse lenduvate orgaaniliste ühenditena ehk VOC. Lenduvad orgaanilised ühendid võivad eralduda paljudest tavalistest majapidamistarvetest, nagu puhastus- ja desinfektsioonivahendid, õhuvärskendajad, printerid ja isegi kodusisustus. Vill neutraliseerib õhus olevad saasteained võrreldes sünteetiliste kiududega ning ei eralda neid uuesti isegi kuumutamisel. Lambavill võib jätkata õhu puhastamist isegi kuni 30 aastat, aidates ära hoida nn haige hoone sündroomi. (MacNeil, 2015)

Erinevalt lambavillale ei pruugi paljud turul olevad materjalid tervislikult mõjuda. Näiteks mineraalvill on tõhus heli neelaja ja odav, kuid selle kiud võivad kopsudesse ladestudes põhjustada ärritust. Samuti võivad erinevad polüüretaanvahud ärritada hingamisteid (Asdrubali, 2012).

### **Päikesevalguse taluvus**

Lambavillale ei mõju päikesevalgusest tulenevad ultraviolettkiired hästi. UV valgus lõhub villa disulfiididemeid ning hapnikuga reageerimisel omakorda villa molekulahelaid. Antud protssi käigus muutub vill rabedamaks ja tugevus väheneb. Võrreldes puuvillaga talub vill päikesevalgust paremini. (Boncamper 2000: 136)

### **Staatiline elekter**

Elektrijuhtivusvõime on villal väike. See tekitab probleeme kui ruumi suhteline õhuniiskus on väga madal. Lambavilla hõõrdumisel võib tekkida staatiline elekter, mis on villa töötlemisel ja kasutamisel pigem ebaneeldiv nähtus. Seetõttu püütakse tekstiilitööstuses hoida õhk niiskena. Elektriseeruvuse vältimiseks saab loputamisel lisada vette pehmendusainet. (Boncamper 2000: 137)

### **Bakteritele ja hallitusele vastupidavus**

Vill on väga vastupidav hallituse toimele ja bakteritele. Kestev soojus ja liigniiskus võib siiski soodustada hallituse tekkimist. Võrreldes taimsete kiududega on hallituse põhjustatud lagunemisprotsess villal tunduvalt aeglasem. Mikroorganismide kahjulikku mõju võib tekkida siiski pigem kinnistes ruumides, kui õhk ei liigu. (Boncamper 2000: 136)

## Kahjurputukad

Lambavill on vastuvõtlik kahjurputukatele nagu mardikad ja riidekoi vastsed, kes kasutavad villas sisalduvat keratiini toiduks (Kabun 2023b). Nukkumiseks vajavad koi vastsed suurt niiskust, umbes 80%, vastasel juhul ei jätka nad oma arengut (The Brown... 2017).

Kui me räägime siseruumide koi probleemidest siis see on pigem mineviku nähtus. Tänapäeval on siseruumide õhuniiskus üpris madal, mis on koidele talumatu keskkond. Vanal ajal oli interjööri sisekliima teine, kui praegu. Majapidamises tehti süüa pliidil, kus puudus vee auru äratõmme, mis tekitas kõrge õhuniiskuse. (Kabun 2023a) Lisaks ei tule koid sisse kui õhk liigub, nad eelistavad vaikset ja pimedat keskkonda (Kabun 2023b). Riidekoid ei suuda kuigi kaugemale lennata, seega on ebatõenäoline, et nad satuvad kodusesse läbi avatud akende, kuid see on võimalik. Enamasti tekivad nad koju vanaaegselt villatekilt või taaskasutuspoest pärit kampsunilt. (Saner, 2019)

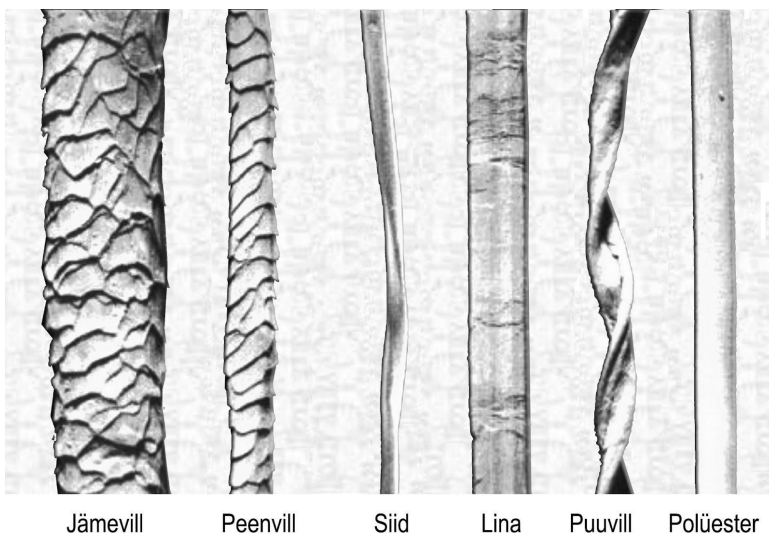
Kahjurputukate kahjustuste vältimiseks on võimalik kasutada putukamürki, mis muudab villas sisalduva keratiini keemiliselt selliseks, et see ei ole enam söödav vastsete ja mardikatele. Tänapäeval kasutatakse selleks töötlusained nt Eulan ja Mitin, mis ei muuda lambavilla omadusi oluliselt. (Boncamper 2000 : 136)

Kui soovida villale kemikaalivaba kahjurikaitset siis on võimalik kasutada plasmakat. Lambavill läbib masinat, milles tekib suure energiaga plasmaväli. Elektronid ja ioonid interakteeruvad villaga ja muudavad villakiu molekulaarstruktuuri. Pärast seda töötlemist ei ole villakiud enam söödavad keratiini söövatele putukatele, nagu koid või vaibamardikad. (Wool... i.a.)

Kui komposiitmaterjali sisse panna näiteks lavendliõisi, siis see hoiab eemale igasugused kahjurid kaasa arvatud koid. Lisaks tekitab see kerget meeldivat aroomi, mis on rahustava toimega, ning muudab ruumi olustikku paremaks. (Prinzmann, 2023)

## 3.2. Lambavilla akustilised omadused

Lambavillal on väga hea helineelduvus, materjalina üks tõhusamaid akustilisi ehitusmaterjale, mille kiudude looduslik säbrulisus ja mikro-poorid tagavad optimaalse helisummutusvõime (vt joonis 18). on näha erinevaid kiudusid, millel on näha, et polüestri pind on sile, kuid lambavillal on säbruline pind, mis aitab akustika summutamisele kaasa. (Sanders jt, 2021)



Joonis 18. (Sanders jt, 2021)

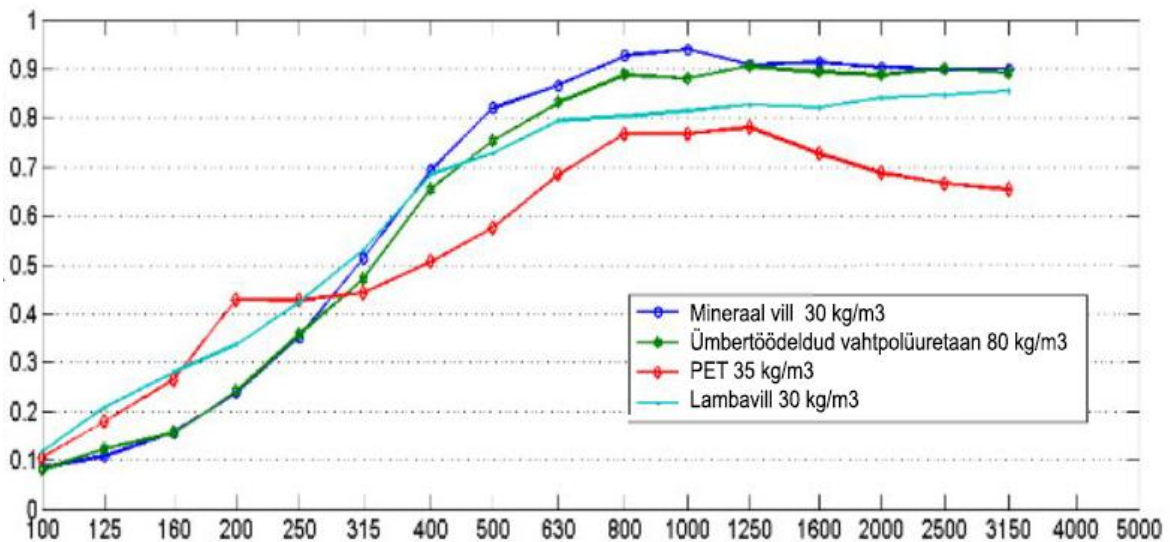
Vill on poorne materjal, kus helilained põhjustavad õhuosakeste võnkumist kiu poorides. Õhuosakeste viskoosne hõõrdumine muudab helienergia soojuseks. Materjali helineelduvuse tegur sõltub materjali paksusest, poorsusest, helilaine sagedusest, langemisnurgast ning õhuvahest seina ja villa vahel. (Eiskop jt 1988: 66)

Lambavilla valides on võimalik helisummutust veel tõsta, kui kasutada "surnud villa". See saadakse tapamajast, kui vill pügatakse maha peale lamba eluringi lõpetamist. Lamba surmaga lähevad villa karvad seest õõnsaks, mis muudab akustika võimekust veel paremaks kui tavalisel villal. (Susi, 2023)

Surnud villa idee tundub esialgu üpris brutaalne ja külmavärinaid tekitav lahendus. Kuid kui hakata sügavamalt mõtlema, ei erine see materjali saamine kuigi naha hankimisest. Nahast tehakse erinevaid esemeid, mis on loomulikult meie ümber (Nahast rahakott, kingad, seljakott, tagi, kindad, aksessuaarid jms).



Valencia polütehnilise ülikooli läbi viidud katsetes lambavilla, mineraalvilla, taaskasutatud polüuretaanvahuga (poroloon) on näha lambavilla head efektiivsust akustilise materjalina (vt joonis 19). Kõik proovid olid 40 mm paksused. Madalsagedus vahemikus oli PET-i ja lambavilla väärtused kõrgemad kui mineraalvillal ja ümbertöödeldud poroloonil. (Rey 2017)



Joonis 19. Erinevate summutavate materjalide helineelde võrdlus (Rey, 2017)

Lambavill on konkurentsivõimeline materjal akustika kohapealt, mis on sobilik helisummutuspaneelide tegemiseks. Antud graafikul on näha tihedust 30kg/m<sup>3</sup>, kuid tiheduse suurendamisega kasvab akustilise summutuse võimekus.

## Villa värv ja toonimine

Villa värvus on akustilistes paneelides väga oluline, sest tegu on visuaalse omadusega. Värvuselt soovib Thermory musta või tumehalli villamatti.

Enamus lambatõugudelt saab valget villa, mis varieerub valgest kollakas- ja hallikasvalgeni välja. Värvipigment on villakiu südamikus ja korteks rakkudes. Värvus tuleneb tõu geneetilisest iseärasustest. Esineb ka tumeda villaga lambaid: musti, halle ja pruune. Tumedat lambavilla on väga raske pleegitada. (Boncamper 2000)

Eestis tekib üha rohkem musta värvi villaga lambaid nagu näiteks Jakobi tõug, neilt saab naturaalselt musta villa (Matsin 2022). Internetist leiab erinevaid lehekülgesid, kus Eestist saab osta nii musta värvi islandi tõugu tallesid kui villa (vt foto 3)(Islandi lammas i.a.).



Foto 3. Eestis kasvanud Islandi tõugu musta villaga lammas (Islandi lammas, i.a.)

## Villa värvimine

Villapolümeerid on polaarsed ja ehitus väga amorfne, mis tuleb villa värvimisele kasuks. Värvimiseks sobivad hästi happelised, aktiiv- ja metallkompleks värvid. (Boncamper 2000, :135)

Villa saab värvida samamoodi nagu teisi loomseid kiude, näiteks värvitakse mohääri, kaameli karvu, angoorat ja kašmiiri. Põhjus on selles, et iga loomne kiud koosneb valkudest. (Boncamper 2000, :136)

Erinevad värvained ja kemikaalid võivad villaga võrreldes luua tselluloosiga sidemeid mitmel viisil. Valgukiudude värvimiseks kasutatakse aga palju viise ja värvaineid. (Muntasir i.a.)

Kõik loomsed kiudained on väga tundlikud leelise või kõrge pH suhtes. Seetõttu tuleks villa värvimisel täielikult vältida soodat, mis on puuvilla värvimise oluline osa. Äädikhape, sidrunhape või valge äädikas on osa enamikust villa värvimise retseptidest. Villa värvimine nõuab soojust. Seda saab teha, kas värvivanni kuumutamise või värvi aurutamise teel. (Muntasir i.a.)

Materjali kokkutõmbumise ja ebaühtlase värvimise vältimiseks tuleb kasutada piisavalt suurt vanni. Sujuvaks ja ühtlaseks värvimiseks on soovitatav kasutada vanni, milles värvimismaterjal saab vees kergesti ja vabalt liikuda. (Muntasir i.a.)

Võrreldes teiste tekstiilidega, peab villa värvimisel värvianuma valimisel olema ettevaatlikum. Soovitatav on kasutada roostevaba terast, mis ei reageeri protsessis ühegi kemikaaliga. Üheks lahenduseks on veel emailkattega vann. Email kihil võib aja jooksul tekkida kildumist, neid kohti on lihtne parandada kuumuskindla emailvärviga. Alumiinium anumaid ei saa kasutada, kuna alumiinium reageerib happega, mis on villa värvimisel abikemikaal. Kuid aurutamise ajal saab kasutada alumiinium materjali. (Muntasir i.a.)

## **Värvimistehnikad**

Villa värvimiseks on peamiselt kolm meetodit: Keetmine, aurutamine ja külm värvimine.

**Keetmine** - Kõige levinum meetod hõlmab villakiudude keetmist värvainetega täidetud vees. Seda meetodit kasutatakse sageli looduslike värvainete puhul, kuna see võimaldab värvil rohkem aega villa kiududesse imenduda.

**Aurutamine** - Aurutamise meetodis kasutatakse aurutit, et värvained saaksid villa kiududesse tungida. Aurutit kasutatakse selleks, et avada villa kiudude poorid, võimaldades värvainetel paremini tungida ja villa intensiivsemalt värvida.

**Külm värvimine** - Külm värvimine hõlmab villakiudude kastmist värvainetesse ilma kuumtöötlemiseta. Kuigi selle nimetus on külmvärvimine vajab see siiski 50C soojust. See meetod võimaldab villal säilitada oma loomulikku tekstuuri ja värvitooni, kuid võib nõuda rohkem aega ja vaeva, et saavutada soovitud värvitulemus. (Kate 2012)

## **Looduslikud värvained**

Enamikke looduslikke värvaineid saab kergesti kanda valgukiududele. Mõned looduslikud värvid võivad vajada peitsi (vaske, maarjajääd, pliidi, rauda jms), kuid peab ettevaatlik olema, sest nimõnedgi abiained on sünteetiliste värvainetega võrreldes mürgisemad. (Muntasir i.a.)

Looduslikult värvained seovad end villaga üldiselt nõrgemini kui sünteetilised. Erinevaid värvi andvaid looduslikke materjale saab otse loodusest korjata või osta toidupest nagu pähkel, kurkum, naistepuna, tamm, kohv, sõnajalg, luuderohi jms. (Martinez-Azaro 2021)

Mõned metallid, nagu kroom ja tina, on äärmiselt mürgised. Isegi vase ja raua peitsid võivad väärkasutamisel olla ohtlikud, sest aja jooksul võivad need organismi koguneda ja põhjustada kahjulikke tagajärgi. Maarjajää on peitsiainetest kõige populaarsem ja kõige vähem toksiline, kuid see on ärritaja ja võib allaneelamisel olla kahjulik

## **Sünteetilised värvid.**

Sünteetilistest värvainetest on kiureaktiivsed värvid kõige vastupidavamad. Need värvained moodustavad kiu molekuliga kovalentse sideme. Kovalentsed sidemed on siis, kui kaks aatomit molekulis jagavad elektroni, umbes nagu käest kinni hoidmine. Antud värvitüüpi kasutatakse imikute riiete ja keemiale tundlike inimeste jaoks, kuna pärast põhjalikku loputamist ja pesemist on see väga püsiv. (Muntasir i.a.)

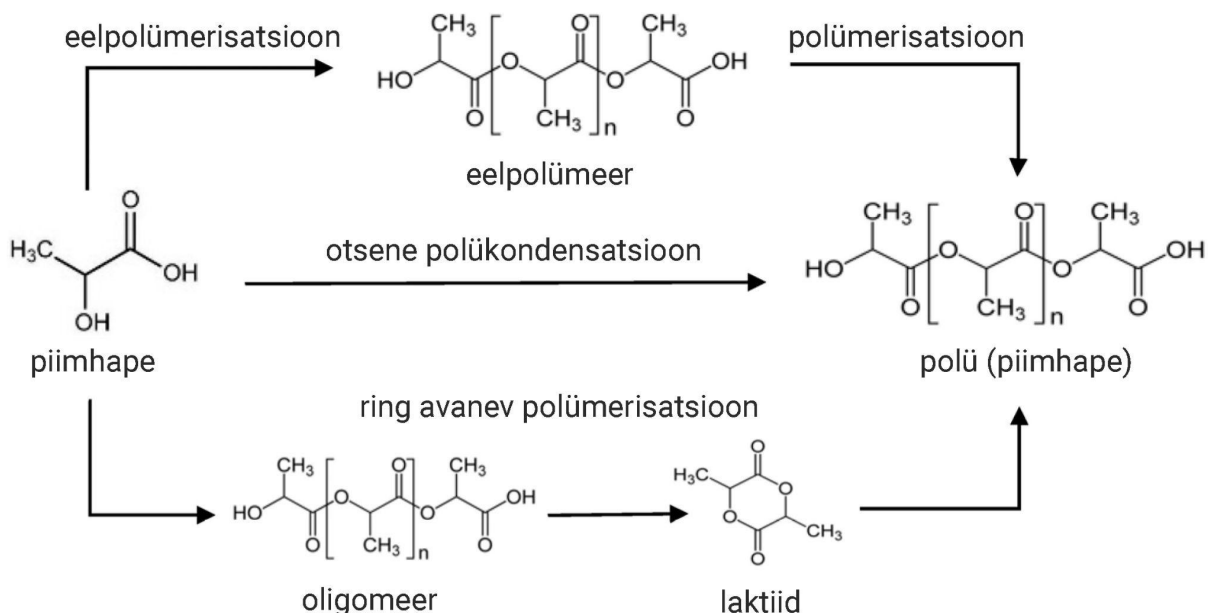
Happevärvid on teine valkude jaoks mõeldud sünteetiliste värvainete klass. Happevärvid seovad happelises keskkonnas ning õigel temperatuuril värvi valgukiududega. Värvide kinnitumise hõlbustamiseks on peale kuumuse vaja äädikat või sidrun- / äädikhapet. Happelised värvained moodustavad kiuga vesiniksidemeid, mis ei ole nii tugevad kui kovalentsed sidemed, kuid pestes neutraalses keskkonnas ja jahedas kuni sooja temperatuurivahemikus siiski väga kiiresti. Kuid oluline on vältida kõrget PH-taset, mis võib villa kahjustada. (Muntasir i.a.)

### 3.3. Biopolümeer PLA

Vill on vetruv materjal kokku surumisel. Et teha püsivates mõõtmetes paneeli kokkusurumise teel on vaja lisada sideainet, mis kinnitaks villakiud üksteise külge. Kuna lambavill on looduslik materjal ei ole soovitatav sideaineks kasutada sünteetilist materjali.

Biopolümeer PLA ehk polüpiimhape (*polylactic acid*) on taimne plastmaterjal, mille toorainena kasutatakse maisi-, manioki-, suhkruroo- või suhkrupeedimassist kääritatud taimset tärklisi. Materjalina on PLA termoplastne alifaatne polüester ehk erinevalt enamikust plastidest ei toodeta PLA-d fossiilkütuse abil nafta destilleerimise ja polümerisatsiooni teel, küll aga vaatamata tooraine erinevusele saab PLA-d toota samade seadmete abil nagu naftakeemia plasti. (O'Connell 2023)

PLA-d saab toota kahel erineval viisil: kondenseerides piimhappe laktiidiks ja seejärel kasutades polümerisatsiooni protsessi või kasutades kondensatsiooni protsessi otse piimhappega. Esimene meetod on tavalisem ja hõlmab molekulide sidumist erinevate katalüsaatorite ja soojuse lisamisega (Vt joonis 20). (Daoud jt 2016)



Joonis 20. PLA tootmisprotsess (Daoud jt 2016).

PLA on klassifitseeritud termoplastseks polüestriks (erinevalt termoreaktiivsest) ning nimetus on seotud selle plastmaterjali reaktsiooniga kuumusele. Termoplastilised materjalid muutuvad sulamistemperatuuril vedelaks (PLA puhul 150-160 kraadi Celsiuse järgi). Termoplastiliste materjalide peamine eelis seisneb selles, et neid saab kuumutada sulamistemperatuurini, seejärel jahutada ja uuesti kuumutada ilma olulise kvaliteedi langemiseta. Eelnevalt vormitud termoplasti saab kergesti uuesti vormida ning seejärel taaskasutada. Termoreaktiivseid plaste saab aga kuumutada ainult üks kord (tavaliselt survevalu protsessi ajal). Esimene kuumutamine põhjustab termoreaktiivsete materjalide keemilist muutumist, mis ei ole tagasipööratav (sarnaselt 2-osalise epoksiidiga). Kui proovida termoreaktiivset plastmaterjali teist korda kõrge temperatuurini kuumutada, läheb see lihtsalt põlema, kuid PLA on korduvalt sulatatav. (Rogers 2015)

Kuigi biopolümeeril on madal sulamistemperatuur ei ole selle veel nii palju rakendusi kui näteks sünteetilisel polüetüleentereftalaadil (PET). Tänu madala sulamistemperatuurile on PLA tootmine tunduvalt energiatõhusam. Analüüsi kohaselt kulub PLA tootmiseks 65% vähem energiat kui tavaplasti puhul.

### 3.4. Biolagunevus ja keskkonnamõju.

Ringmajadusmudelile ja loodusliku paneeli loomise juures on oluline jälgida süsiniku ehk CO<sub>2</sub> jalajälge. Samas on oluline jälgida mõju loodusele ja kui keerukas on komposiitmaterjali komposteerumine elutee lõppemisel.

Avalikes hoones ja suurarendustes on tihtipeale roheline mõtteviis väga oluline. Ärihooned tahavad kvalifitseeruda LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) või BREEAM (*Building Research Establishment's Environmental Assessment Method*) sertifikaadile. Sertifikaat on oluline mitmel põhjusel. Suured investeerimis ettevõtted tahavad, et investeeritavas arendus on roheliste sertifikaatidega kaetud. Sest maailm on muutunud olukorda, kus see on tugev müügiargument, selle läbi on võimalik lihtsamalt saada investorite raha arendusse. Väga tugevalt on tunda IT firmade soovi, et töökeskkond või hoone oleks looduse ja jätkusuutlikkuse kohapealt läbimõeldud, sest see mängib rolli ettevõtte hea maine kujunduse juures. (Kääramees 2023)

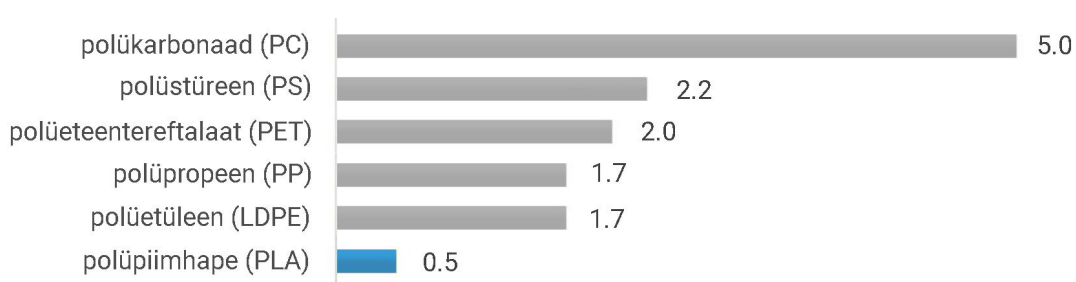
Investoritele väga meeldib, kui arendusele saab jutustada suuremat lugu, üheks selliseks elemendiks on just loodusõbralik lähenemine. Suuremates uusarendustes on hakanud üha tugevamalt esile kerkima roheteema käsitlus, kuigi see ei ole veel nii tugevalt Eesti jõudnud on tugevamat lainet oodata juba mõne aasta jooksul, millele loodetavasti tuleb ka riiklikult tugevamad nõuded, nagu Skandinaaviamaades on juba olemas. Norras läks ehitusmaastik puhtamaks, kui tulid riiklikult sisse sertifikaatide nõuded, nagu EPD (*Environmental Product Declaration*) ja BREEAM. Ehitusplatsil peab olema isegi prügisoteerimine ehitajate poolt korraldatud. Kui EPD dokumentatsiooni nõue tuleb projekti siis tuleb hea kaup lauale ehk kasutada saab kvaliteetsemaid ja jätkusuutlikult läbimõeldud tooteid. (Prinzmann 2023)

*Gradel to gradel* (hällist-hällini) läbimõeldus on toodetes oluline. Kui toode on end teeninud näiteks 10-15 aastat ja eluring hakkab lõppema siis võiks ettenägelikult teada, mis saab tootest, kui keskkonnakahjulik on selle hävitamine või kas ettevõtte on nõus toote tagasi võtma, et see saaks uuesti ringlusesse minna. (Kääramees 2023)

## Komposiitmaterjali CO2 ekvivalent

PLA (polüpiimhape) on nii biopõhine kui ka biolagunev. Selle kasutamine aitab vähendada süsiniku jalajälge ja seda saab utiliseerida erinevatel viisidel, nii taaskasutamisel kui tööstuslikul komposteerimisel. PLA tootmisel on süsinikdioksiidi heitkogus 75% väiksem kui PET tootmisel ning 1 kg PLA saamiseks on vaja vaid 1,6 kg taimset biomassi. Muud tüüpi bioplastid vajavad sama koguse lõpptoote saamiseks kuni kolm korda rohkem toorainet. (Bioplastics... 2020)

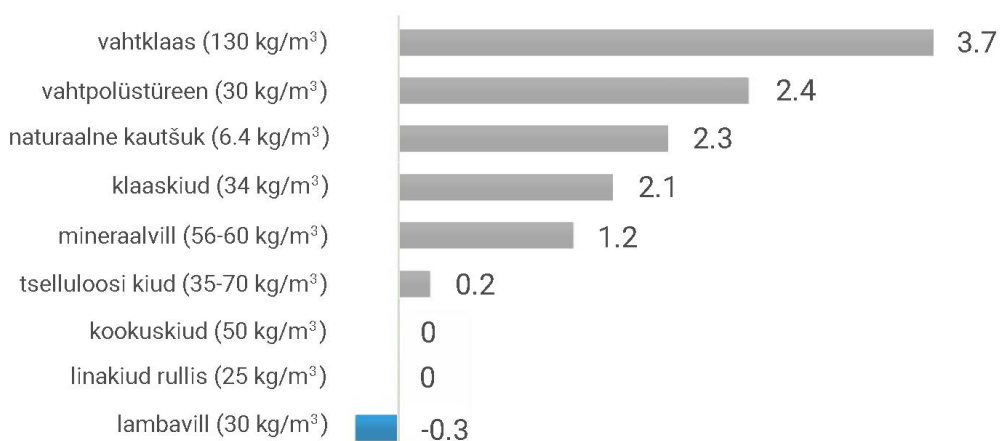
Jooniselt 21 on näha PLA CO2 jalajälge võrreldes teiste plastikutega .



Joonis 21. Termoplastide CO2 ekvivalent kg kohta (Atkinson, 2017)

## Komposiitmaterjali CO2 ekvivalent

Lambavilla kasutus aitab võidelda kliima soojenemisega. Villa kasutamise jalajälge peetakse süsinik neutraalseks või lausa süsinikku vähendavaks (vt joonis 22). Protsess selle selgitamiseks on lihtne. Villa toodavad lambad ning nad söövad rohtu (mis püüab kinni õhus olevat CO2) ja muudavad selle villaks, mis sisaldab 51% süsinikku. (Parsons 2021)



Joonis 22. Poorsete materjalide CO2 ekvivalent (Zach jt, 2012)



### 3.5 Tulekindlus ja testid komposiitmaterjaliga.

Viies läbi intervjuusid sisearhitektidega tuli esile tulekindluse olulisus. Kuigi tulekindlus on kõige olulisem maja kandekonstruktsiooni juures on siiski ka viimistlusmaterjalidel ja ka seinakivatel helisummutuspaneelidel oma roll tule tõkestamisel tulekahju korral.

#### **Puidu muutmise leegikindlaks**

Üks loodusõbralikumaid mooduseid leegikindluse loomiseks on tekitada puidule leegikindel kattekiht, mille arendas välja Thomas Kolibaba, Ph.D. Puit tuleb kasta vesilahusesse, mis sisaldab positiivselt laetud polümeeri polüetüleenimiini (PEI), monomeeri hüdroksüetüülmetakrülaatfosfaati (HMP) ja fotoinitsiaatorit, mida tuntakse TPO nime all. Pinnal oleva kihi kõvendamiseks tuleb seda mõneks minutiks ultravioletvalgusega (UV) valgustada. See muudab TPO negatiivselt laetud polümeeriks, mis seejärel moodustab polüelektrolüüdi kompleksi PEI-ga. Saadud kate on läbipaistev ja vaid mõne mikromeetri paksune, mis ei muuda puidu välimust. Sellisel moodusel väheneb tulekahju korral puidust eralduv soojus ja pinnakihi moodustub kiirelt söe kiht, mis kaitseb puitu ja takistab tule levikut, suitsu tekkimist vähendab see 56%. Antud kiht on lisaks veekindel ja vastupidav seenhaigustele. (Acs 2022)

#### **Lambavilla tulekindlus**

Lambavilla põlemine on proteiin kiududele iseloomulik ehk süttib raskelt ning leegi eemaldumisel kustub (Boncamper 2000 :138). Vill on tekstiilikiudude seas tulekindlaimad materjalid (McNeil 2015). Villa tulekindluse indeksi arv ehk LOI on 25. Villakiud sisaldavad suures koguses lämmastikku ja väävlit, mis on looduslikud tuletõkke vahendid. (Kabun 2013)

Põlemisjärgiks on hõlpsasti katki muljutav söestunud kera. Põletusproovi abil saab villa hõlpsasti eristada polüakrüülnitriilkiust või muudest sünteetikiududest. Lahustuvuskatse abil saab villa eristada ka muudest kiududest. (Boncamper 2000 :138)

Villa süttimistemperatuuriks on 570–600°C. Polüester sulab temperatuuril 252–292 °C ja nailon veelgi madalamal temperatuuril 160–260 °C erinevalt nendest materjalidest ei sula vill kunagi, mis tähendab, et see ei kleepu naha külge nagu paljud tavalised sünteetilised materjalid. (Luxe wool 2020)

### Tuletest komposiitmaterjaliga

Ma kasutasin tule testi läbiviimiseks propaan põletit (Kemper Ø45), mida kasutab Eesti Kunstiakadeemia ehte- ja sepakunsti osakond metalli sulatamiseks. Antud katses tahtsin näha materjali käitumist kõrges kuumuses, mis imiteerib reaalset tulekahjut.

Läbiviidud katses suunasin põleti otse komposiitmaterjali proovitüki keskele (vt foto 4). Kõrge kuumuse hoidmisel otse proovitükil oli näha materjali aeglast põlemist, kus paari sekundi jooksul tõmbus villa kreatiin erinevates piirkondades väikesteks mustadeks kogumiteks kokku. Kuumuse joa hoidmisel mustad osad suurenesid mati põlemise tõttu ja hakkas tekkima füüsiline auk.

Põleti eemaldamisel kustus leek 5 sekundi jooksul iseenesest, märgatavalt kiire vähenemisega. Põleti leegi eemaldamise hetkel oli näha matist tekkivat kerget valget värvi suitsu leegi sumbumise hetkel, mis hajus kiirelt. Katsudes materjali ei ilmnenud kleepuvat/sulavat materjali. Põlemisjääk on rabe ja pudenev tükkideks (vt foto 5).

Test oli edukas ja ei vaja tulekindlamaks muutmiseks lisatöötlust.

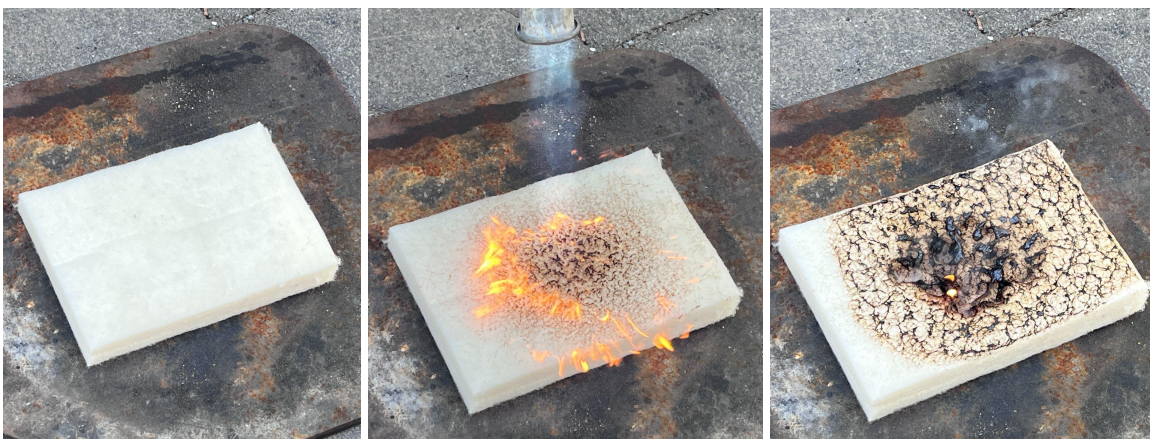


Foto 4. Tuletest komposiitmaterjaliga.

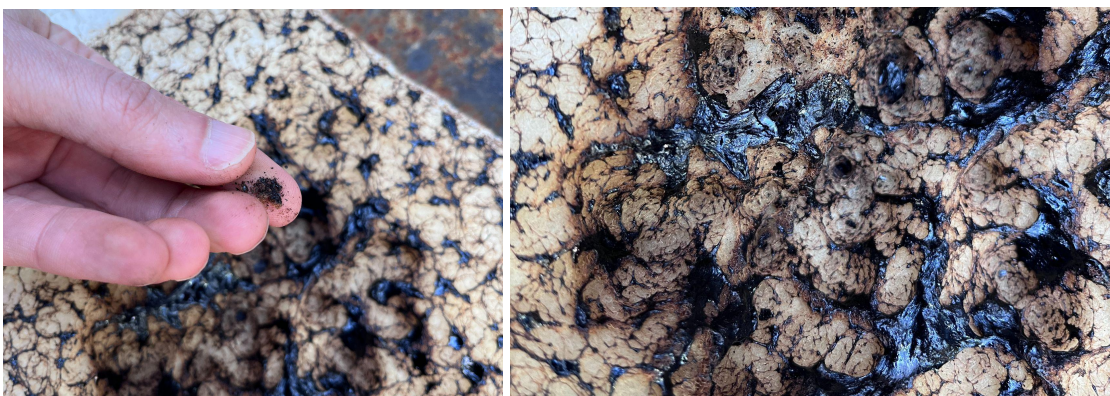


Foto 5. Tuletesti jääkide analüüsimine

## 4. Akustiliste paneelide konkurendid.

Antud peatükis toon välja ribilised ja lambavillast helisummutuspaneelide tootjad ning analüüsin Stocholmi messil nähtud paneele.

### 4.1. Stockholmi mööblimessi analüüs

Lõputöö raames käisin Stockholmi mööblimessil kaardistamas ja tutvumas erinevate akustikaga tegelevate ettevõtetega. Kuna mess oli lõputöö algusjärgus siis eesmärk oli saada pigem põgus ülevaade ning arusaam mis turul toimub. Sain ka hea võimaluse paneelidega tegelevate ettevõtetega otse kohapeal suhtlemiseks.

Antud mess on maailma suurim Skandinaavia disaini platvorm, kus on osalejaid enam kui sajast riigist (Stockholm furniture..., i.a).

Tutvusin ning analüüsid firmasid, kes tegelesid mürasummutus paneelidega. Erinevate ettevõtete lähenemist akustika probleemidele leidsin, et saan neid jagada peamiselt kolme rühma. Valmistasin ka kerged fotokollaažid illustreerimaks nähtut.

**Pressitud komposiitplaat** - Esimeseks grupiks liigitasin erinevad plaadid või paneelid, mis olid vormi pressitud mustriga või lõigatud kujundusega, mida sai omavahel kokku sobitada (vt foto 7). Materjalidena oli näiteks õhukesed kuuse puiduribad, mis olid betooniga kokku segatud, need olid minimaalse kujunduse või muustriliselt pressitud paneelideks. Selles kategoorias esinesid ettevõtted BAUX ja Troldekt.

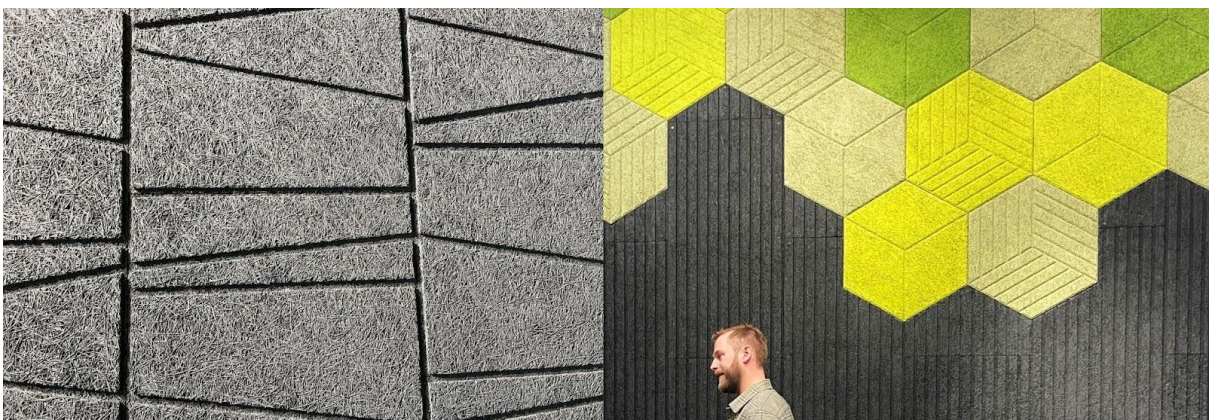


Foto 7. Stockholmi mööblimessil helisummutus paneelid.

**Vilt ja tekstiil** - Teine levinud akustika paneelide variant oli viltpaneelid, mis olid erinevate vormilõigetega kihilised või ühekordsed (vt foto 8). Oli näha ka lainelise nn merelaine kujundusega pikkasid plaate kui ka erinevate välivormiga mängimist nagu kuusnurgad või ringid. Selle kategooria näideteks võin esile tuua: Lanab Group, Narbutas ja Kateha. Samasse kategooriasse liigitasin ka “vaiba” paneelid, kus pind oli kohevama tekstiiliga.



Foto 8. Stockholmi mööblimessil helisummutus paneelid.

**Ribipaneelid** - Kolmandaks variandiks olid pikad nn triipudega kujundus, kus oli kasutatud enamasti puiduimmitatsiooni või vineeri (vt foto 9). Heli hajutamiseks oli loodud vahed või ümarikud perforeeritud augud. Paneelide taga oli paigaldatud sünteetiline vilt . Viltmaterjal oli profiili külge enamasti klammerdatud klambritega.

Seinakinnitusteks oli kasutatud kolme erinevat varianti: lihtsalt läbivad kruvid, seinale liimimist või metallklambritega versiooni.



Foto 9. Stockholmi mööblimessil helisummutus paneelid.

## 4.2. Konkurendid

Eestis toodetakse ja müüakse erinevaid helisummutuspaneele. Ma ei too lõputöös välja kogu helisummutuspaneelide spektrit, keskendun antud alapunkti all vaid visuaalselt ribilistele akustilistele lahendustele ja erandnäitena ühele lambavilla paneelile.

Enamus konkurente, kes kasutab ribilisi lahendusi pakuvad MDF plaadist välja lõigatud ribisid, mis on kaetud kas puiduspooni või sünteetilise puiduimitatsiooniga. Ribide materjaliks kasutatakse ka vähesel määral vineeri ja täispuitu (vt foto 10). Ribide ristlõige on kas ruut või ristkülik.

Paneeli ribide taga kasutatakse 8-12mm polüester (PET) vildist matti. Mõned tootjad kasutavad ka lihtsalt akustilist musta paberit ehk kangast, mis laseb õhku ja heli läbi (vt foto 11). Paber ise ei summuta heli, kuid kui tekitada taha õhuvähe suudab see summutada kergelt mõningaid sagedusi. Kui paneeli taha paigaldada ehitaja poolt villamatid, saab kasutada paneele mürasummutuspinnana. Samamoodi on PET vildiga mattidega, et need hakkaks võimekamalt müra summuta, peab taha lisama villamatid.

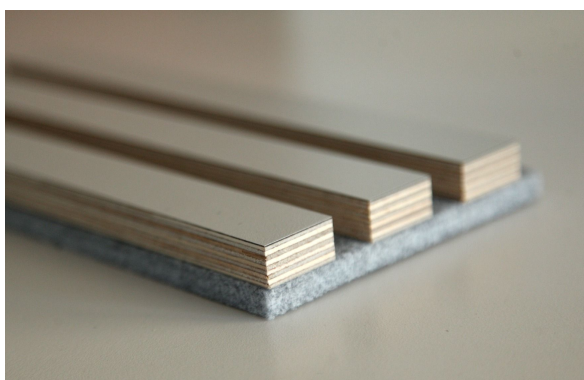


Foto 10. Vineerist ribid (Homer i.a)



Foto 11. Ribiline paneel (IWS i.a)

Eestist leiduvate konkurentide seast leiab erinevaid firmasid, toon mõned tuntumad ettevõtted eraldi välja. Paneelide visuaalne väljanägemine on neilt sarnane, erinevus tuleneb peamiselt paneeli mõõtudest ja ribide värvusest. Visuaalne keel on põhimõtteliselt sama, mis on näha eelmisel leheküljel fotol 11.

### **Linear seeria seinapaneelid.**

Ettevõtte IWS reklaamib oma paneeli: "Innovaatilised täispuidust seinapaneelid". Peal olev puit on naturaalne ja alusmatt tulekindel polüester(PET). Paneelide (linear 27B) laius on 605 mm paksus 37 mm (mati paksus 12 mm). Ettevõttel on ka akustilise kanga versioon, mille kanga paksus on 0.3mm ning valmistatud polüestrist. Seda on kasutatud ka näiteks Eesti Kunstiakadeemia seintel. Antud materjal koos õhugahega taga (45mm) ja ilma puitribidetta on helineelde võimekus 0,25 (H) ehk liigitub klassi E. (IWS, i.a)

### **Akustiline ribipaneel Homer.**

Ettevõtte Homer reklaamib enda tooteid keskkonnasõbralikuna. Ribid on kas vineerist või MDF-ist, mis omakorda lamineeritud. Paneeli all on taaskasutatud plastikust polüestervilt. Paneelide mõõdud on 2420x605x23mm (Ehomeer, i.a)

### **Akustiline seinapaneel Lameli Nature**

Ettevõtte Moonavoori paneelid on suurusega 300 x 26 x 2750 cm. Helisummutus osa on 8 mm vilt. Peal olevad ribad on MDF plaadist, mis on naturaalse puiduspooniga kaetud. Antud paneelide ribad on pakutud ka värvitud kujul (valge, tumehall ja must). (Monavor, i.a)

### **Akustiline ribipaneel Graphite Ash**

Paneeli mõõdud: 600 x 2400 x 22 mm Akustilise mati materjal on must 10 mm vilt (PET). Ribid on MDF plaadist (musta värvi), mis on spoonitud naturaalse puiduga. Neil on tootevalikus ka plastik- kui metall laminaati. (Walldesign, i.a)

### **VAGA ribilised seinapaneelid**

Antud paneelidel on helisummutus matiks vilt (PET). Paneelide mõõtmed on 2420x605x23mm. Ribid on MDF (must) ja peal tamme imitatsiooniga laminaat. naturaalne spoon. Puidust aluspinnale võib paneeli kinnitada otse kruvidega. Kiviseina puhul mugavamaks paigaldamiseks kasutada puitroovitust. (Plaatdetail, i.a)

### **Turul olevate ribiliste mattide analüüs.**

Sarnase üldkujundusega (ribilised) helipaneele, milles oleme kokkuleppinud Thermoryga on Eesti turul mitmeid. Päris puiduga lahendusi on väga vähe. Peamiselt on ribad MDF plaadist, mis on spoonitud või lamineeritud puidu imitatsiooniga. Alusmastiks on kasutatud läbivalt umbes 10 mm polüesterkiu matti ehk vilti. Pealmised ribad on alusmati külge tagant klammerdatud. Seinale kinnitamise moodus on kas kleepimine liimiga või kruvimine läbi mati.

### **Lambavilla helisummutusmatid Eestis.**

Lambavillast matid ei ole Eestis väga levinud. Puitribilistel paneelidel need puuduvad. Eestis tegutseb ettevõtte Flexiwool, kes teeb kontorisirme ja väikseid seinapaneele (foto 12). Paneelid on suurusega 23x23. Paneelidel on ääred termotöötusega tugevamalt pressitud ja mõndadel esineb ka muster. (Flexiwool, i.a)



*Foto 12. Flexiwooli helisummutusmatid (Flexiwool i.a).*

## 5. Disain ja prototüüpimine

Antud peatükis selgitan lahti nii kliendi ehk Thermory ja ettevõtte klientide ehk sisearhitektide soovid ja vajadused. Lähtuvalt lõputöö käigus saadud informatsioonile loon helisummutuspaneeli prototüübi. Selgitan lahti paneeli konstruktsiooni lahenduse, disaini ning süsteemi, kuidas seda seinale paigaldada.

### 5.1. Ettevõtte ja sisearhitektide vajaduste analüüs.

#### Kliendi soovid

Toote visuaal ja struktuur on tugevalt seotud Thermory soovide ja paneeli funktsiooniga. Kuna ettevõtte andis kitsad raamid, millest ei soovitud üle astuda, pidin navigeerima piiridest tulenevate võimaluste sees.

Esimeseks reegliks oli see, et paneel pidi tulema triibuline ehk piki paneeli jooksevad profiilid. Ettevõtte soov oli kasutada tootevalikus olemasolevaid profiile. Hea lahenduse korral oli aktsepteeritav profiili muutmise pikkisaagimise teel või olemasolevate freeside kasutamine, vastavalt ettevõtte võimekusele. Fassaadpinnal (esiplaanil) olemasolevate profiilide kasutus Thermory tehastes tähendaks soodsamat tootmist ja olemasolevate tellimustega paralleelselt käitlemist.

Mürasummutusmati nõue oli, et see töötaks, ei maksaks liigselt palju ja seda oleks võimalik juba praegu tellida suurtes mahtudes, eelistavalt Eestist. Antud lõputöö raames pidin leidma minu välja pakutud mati tootmiseks tehase, millel on piisav tootmisvõimekus summutuspaneelide tegemiseks. Sellega kaasnes ka läbirääkimisprotsess.

Paneeli tootmine ehk kokkuladumine peab olema lihtne, mis ei kulutaks liigset ajaressurssi. Paneeli konstruktsioon peab olema võimalikult lihtsalt teostatav, et oleks võimalik kiiresti ja kuluefektiivselt toota. Selle tõttu langes välja keeruka struktuuriga kokku laotavate paneelide variandid.

Klient soovis, et ma teostaks prototüüpimise protsessi Thermory Loo tehases.



## Sisearhitektide vajadused

Suurtel ning kõrgetel, maast laeni ulatuvatel helisummutuspaneelidel on vaja tihtipeale lisakaitset, et kaitsta paneeli füüsiliste vigastuste eest. Villaplaati ei saa avalikus ruumis lihtsalt seinale panna, sest inimesed lähevad pihta ja millegagi peab seda kaitsma. Üheks heaks mooduseks on puitribid, mis täidavad ka dekoratiivset rolli ja sellel on hetkel turul suur nõudlus. (Kääramees 2023)

Turul ei ole väga suurt valikut ribilistel paneelidel. Ribide profiilid on kas ruudud või ristkülikud. See oleks väga tervitatav, kui sisearhitektid saavad erineva fasaadprofiili näol valikuvõimalust juurde. (Kääramees; Prinzmann 2023)

Hetkel saadavad ribilised akustilised paneelid omavad pigem dekoratiivset eesmärki, mida saab nimetada viimistlusmaterjaliks. Õhukse (8-10 mm) matiga paneele saab kasutada olukordades, kus on vaja kerget heli peegeldust hajutada, kuid helisummutusvõime on neil tagasihoidlik. Kui ribisele paneelile lisada paksemad villapaneelid, siis üldjuhul on arvestatud, et ribide võrra väheneb summutusvõime pindala. (Kääramees 2023)

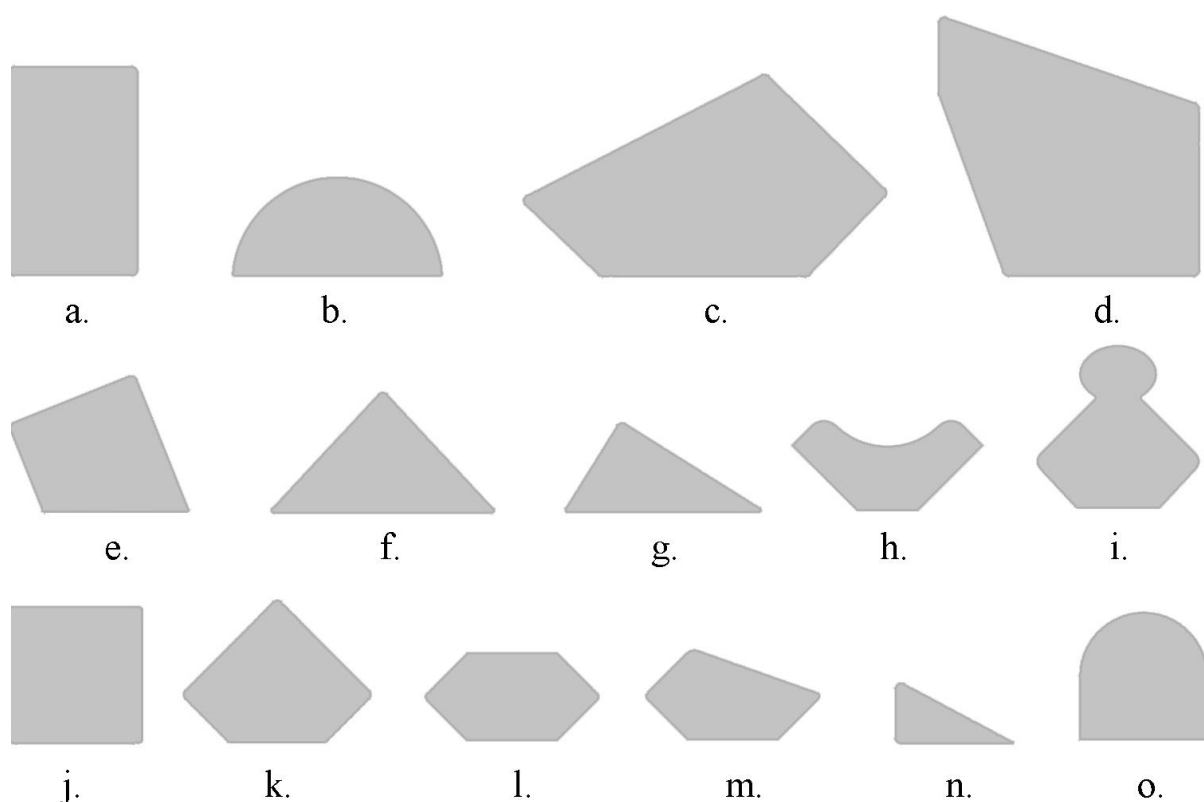
Praegu ei ole turul lahendusi, millel oleks ribiliste lahenduste taga toekam summutuspaneel. Paneeli ribide taga on kas õhuke sünteetiline vilt või kangas. Paneel võiks olla võimalikult õhuke, kuid sisearhitektid on teadlikud, et akustilise võimekuse saavutamiseks peab tegema paksuse pealt ohverduse. Nendele paneelidele peab ehitaja ise lisama villaplaadid, et need hakkaks heli summutama, kuid kuna ei ole teada, kuidas selline kombinatsioon tegelikult heli summutab, peab käituma sisetunde või kogemuste najalt. Kui oleks paneelid, millel on toekam (paksem) summutusplaat juba olemas ning oleks teada reaalse helineelde koefitsient, siis selline lahendus oleks suureks abiks sisearhitektidele. (Prinzmann 2023)

Paneeli ise kokku kombineerides võib helisummutusvõimekus oleneda suuresti ehitajast või töölisest, kuna erinevates etappides võib keegi järeleandmisi teha. Eesti turu tagasisidest on sellised olukordi, kus sisearhitekt määrab ära, milline helisummutusvilla materjal ja sertifikaat peab olemas olema, kuid ehitaja ostab hoopis odavamalt materjali ilma sertifikaadita, mis sarnaneb nõutud materjalile. Sertifikaadi küsib hoopis nõutud tootjalt, mille esitab siis odavamalt materjali pähe. Hiljem on suur segadus, sest kuigi helineelde sertifikaat ning materjali maht on justkui olemas, ei ole helisummutus see, mis peaks. (Prinzmann; Padu 2023)

Hetkel on turul kõige loodussõbralikum helisummutuspaneel ümbertöödeldud PET, kui turule tuleks tõeliselt loodussõbralik paneel, oleks see oluline argument, paneelide valimisel (Kääramees; Prinzmann; Aare; Alling 2023).

## 5.2. Paneeli disain

Fassaadliistude leidmiseks kasutasin erinevate profiilide lahendusi, mis on näha joonisel 23. Antud profiilid valisin välja Thermory tütarettevõtte Auroomi kataloogist. Valmiskujul liistud on kujutised a, h, i, ja j. Ülejäänud profiilid vajavad kas ühte või mitut lihtsamt pikkikiudu lõiget. Kuna puitprofiilidel esineb vahepeal servades defekte, mille tõttu sorteeritakse need praaki, siis antud juhul saab neid problemaatilise defektse osa ära saagimisel kasutada uuema profiili tegemiseks.



Joonis 23. Erinevad profiilid ristlõikes.

Profiilide lahendusi sai arutatud kliendiga, kes andis omapoolse hinnangu. Me jõudsime kokkuleppele, et mitmed lahendused lähevad reaalselt tootmisse. Lõputöö raames toon täpsemalt välja ühe lahenduse (profiil c.) antud profiilidest. Antud profiil on valikust üks parimatest, võttes aluseks heli hajutamise võimekust ja uudset põnevat kuju. Antud profiil sai minule isiklikult kõige südamelähedasemaks ja see tekitas tugevaid positiivseid emotsioone ka kliendile. Profiilile c andsin nimetuse Merekivi.

### Profilil "Merekivi" lahendus

Profili kuju loomisel sain inspiratsiooni looduses esinevatest Läänemere kivirahnudest, vt foto 13. Kuna paneel on planeeritud loodussõbralik ja ringmajandusele vastav, siis on ribi visuaalne lahendus kooskõlas sisu-välimuse ühildumisega. Lisaks on lahendus sobilik esindama Eestis disainitud eset, sest see läheb hästi kokku meie kultuuri looduslähedusega, millega oleme tuntud ka väljaspool riigipiire. Antud loodusmotiivi käsitus sobib oma orgaanilise vormiga hästi skandinaavia disaini maailma.



Foto 13. Käsmu rändrahn (Tooming i.a.)

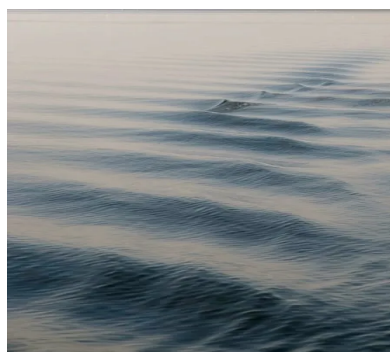
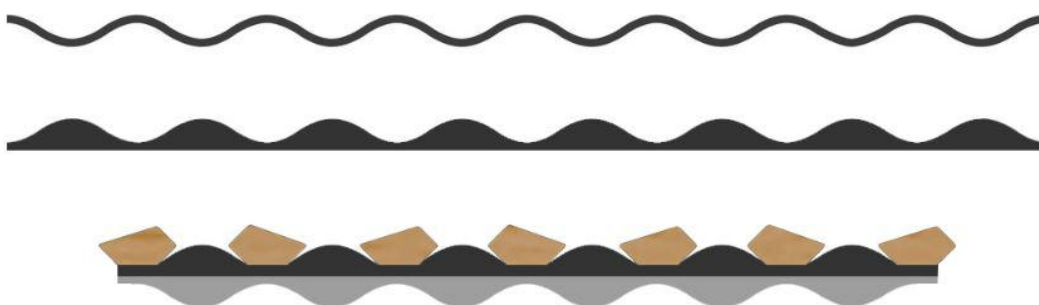


Foto 14. Saaremaa merelained (Klementi 2010)

### Villamati visuaalne geometria

Lambavilla mati laineline ristlõige on inspireeritud Läänemere merelainetest (vt foto 14). Mis loob visuaalse mängulise koosluse, kus merelained hoiavad merekive turvaliselt oma süles ja lained asuvad kivide vahel. Lainete tugev mänglemine loob visuaalselt karge põhjamaa kliima tunnetuse. Antud joonisel 24 on näha merelainetest tuleneva esteetika ristlõiget. Alguses tõmbasin ma lainelise joone, mis imiteerib lainetava mere pinda. Sellele järgnevalt tuleb peegeldus allapoole, mis kombineeritult kujutab reaalse mati ristlõiget. Lainete lohkudesse asetsevad profiili küljed vahelduvalt ühele ja teisele poole. Kogu paneelile panin nimetuse "Merekivi sümbioos"

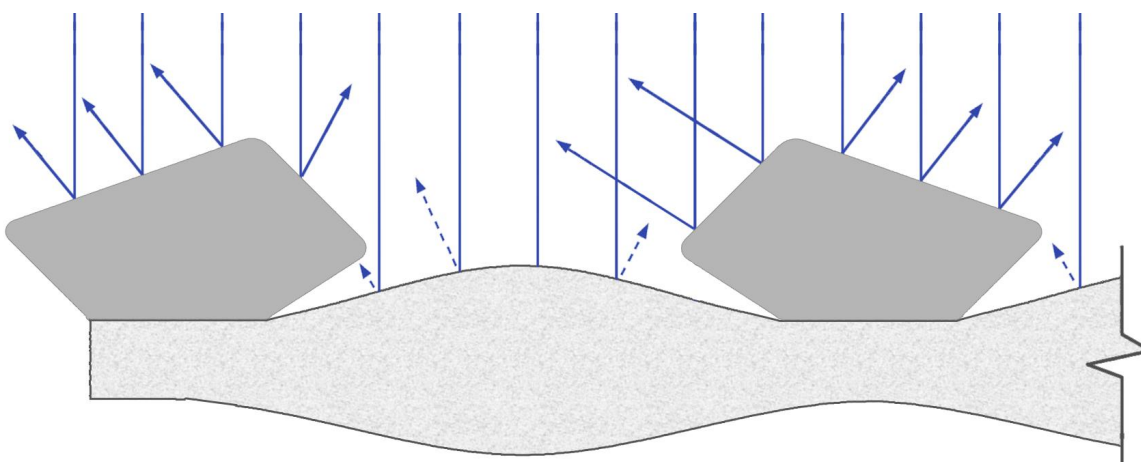


Joonis 24. Merelainetest inspireeritud helisummutusmati ristlõige.

## Heli sumbumine ja hajutamine

Villamatt on tihedusega  $50\text{kg/m}^3$ :see on suurim villa tihedus, mida on võimalik Eestis toota ilma kõrgsurve kuumpressita. Antud paneeli lahendusega, mis ma disainisin, tõuseb tihedus aga veel suuremaks, sest paneeli ette tulevad pikiribid, mis ühendamisel suruvad ribide alla jäävad osad 60mm pealt 15mm peale kokku. Puidust profiili äärtest avatud osas laieneb mati paksus 45mm peale, mis loob juhitud varieeruva tiheduse matis. Antud varieeruvus on hea, sest erineva tihedusega matt summutab heli erinevalt: tihedam pigem kõrgheli ning hõredam osa rohkem kesk- ja madalheli. Vahepeal kasutatakse helisummutusmattides erineva tihedusega kihte, et summutada suuremat helispektrit. Minu lahendus imiteerib sarnast käsitlust. Lisaks loob mati kumeruse pind peegelduvale helile parema hajutuse.

Heli hajutite eesmärk on tekitada olukord, kus helilaine ei pörku pinnalt samasse suunda. Merekivi profiilil on efektiivne helihajutus, mis tuleneb erinevate kallakute koosmõjust, mis suunab heli erinevatesse suundadesse (vt joonis 25). Profiili all olevad õnarused suurendavad villamati paljastuvat osa ja profiili külgedel on helil suurem tõenäosus peegelduda villamatti, kus see sumbub.

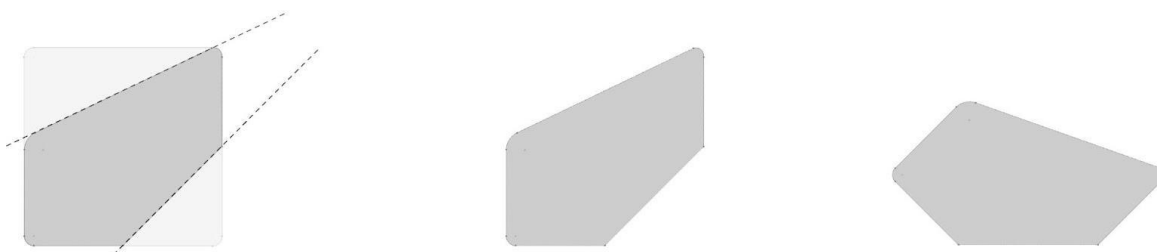


joonis 25. Heli peegeldumine mati pinnal.

Antud võttega lahendasin veel ühe suure probleemi, milleks on täispaneeli paksus. Kuna villa pind ei ole avatud osas paralleelne profiili aluspinnaga, siis on paneel võrreldes sirge paneeli kasutusega kompaktsem. Antud lahendusega on villamati kokkuhoitud paksus 67%, kui võtta arvesse laiemas osas olevat läbimõõtu 45mm ja paneeli reaalsel paksuse kadu 15mm.

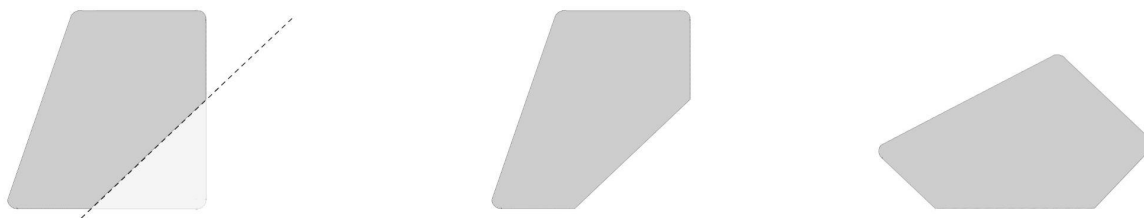
### Profili loomine algsest profiilist

Profili loomisel kasutasin alguses Thermory ristlõikes 21x21mm liistu, millel on lisatud kaks pikkikiudu lõiget. Joonisel 26. on näha ära lõigatud osad, kus parem diagonaalne osa asetub vastu paneeli.



Joonis 26. Uue kuju valmistamine kasutades 21x21mm profiili.

Teise võimalusega, kasutan Thermory tootevalikus juba olemasolevat C42 liistu, mis on mõõtmetelt eelmisest palju suurem, 42x42mm, ning annab jämedama ribilise struktuuri. Antud profiilil on üks viltune lõige eelnevalt olemas (vt joonis 27). Antud profiil ei ole viimastel aastatel müügis kasutust leidnud. Ümberdisainimine looks profiilile värskendust ja võimaluse paneeli peal müüki naasmiseks.



Joonis 27. Uue kuju valmistamine kasutades 42x42mm C42 profiili.

Mõlemad profiilid saab nimetada Merekivi perekonda. Kus 600mm laiuse paneeli peale mahub väiksemaid 12 tk ja suuremaid 6tk. Väikest profiilile andsin nime "Väike merekivi", mida saab kasutada kui sisearhidektidel peaks vaja minema visuaalselt tihedat ribilist paneeli.

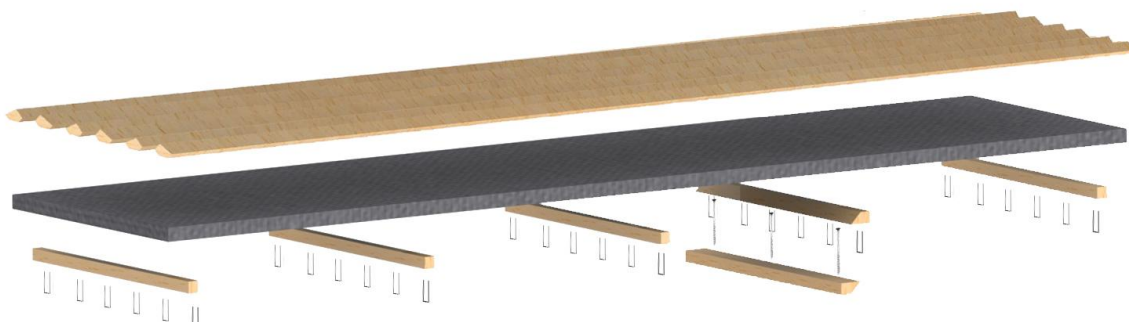
## 5.3. Paneeli konstruktsioon

### Paneeli materjal.

Materjalidest üks peamiseks komponendiks on puit, mida toodab Thermory. Puiduliikidest on ettevõttel olemas mänd, saar, haab, must lepp, magnoolia, punane seeder ja kuusk. Lisaks pakub ettevõtte puidule erinevas astmes termotöötlust, mis muudab puidu kindlamaks nii kahjurite kui ilmastiku vastu. Paneeli termotöötlus annab puidule tumeda jume. Antud seinapaneel on kergelt eksklusiivse välimusega, millest tingituna võib kasutada paneelis termosaaht. Lisaks saan profiilides kasutada tootmisjääke. Paneeli taga olev puit on väga lühikese pikkusega 600 mm, sellise sobiliku pikkuses jääke on Thermoryl palju. Enamus jääkide paksus on 20 mm, mis on ideaalne paneeli ristipuudeks valmistamiseks. Mürasummutusmatiks kasutan villakomposiitmaterjali. Eelistav värvikoloriit on tumehall.

### Konstruktsioon

Paneeli konstruktsioon on lahtivõetult näha joonisel 28. Paneeli mõõtmed on 2400x605 mm ning paksus 67 mm, mis koosneb erinevatest kihtidest. Profiil liistu paksus on 32 mm, kokkupressitud vill 15 mm (ribide vahel 45 mm) ja ristipuud õhuvahe jaoks 20mm. Paneelide pikkuse ja laiuse määrasime Thermoryga analüüsidest kauba aluste ja autode suuruseid, et oleks võimalikult kuluefektiivne paneele transportida ka globaalsel skaalal, kuna Thermoryl on eksport väga suures osas.



Joonis 28. paneeli konstruktsioon

Paneel on klammerdatud kokku klambritega, mida ei ole visuaalselt näha, kui see asetub seinale nagu sihtotstarbeliselt on mõeldud. Paneeli all on 20 mm paksusega ristiladid, mis tagavad toe ja valiku õhuvahe seina vastas. 45 kraadise nurgaga seinakinnitus on ülevalt teine latt. Montaaži osa tutvustan lähemalt peatükis "5.4. Prototüübi valmistamine".

## Seinakinnitus

Seinakinnitussüsteeme analüüsid leidsin erinevaid võimalusi, mida saaks projektis rakendada. Toon välja meetodid, mis sai projekti jaoks valitud ja millised läbi analüüsi välja jäetud.

Uurides erinevaid paigaldusvõimalusi, analüüsid konkurentide lahendusi ning intervjuuerides sisearhitekte leidsin, et kasutatakse peamiselt kolme helisummutuspaneeli viisi: liimimine, eest läbikruvimine või siinide kasutamine. Antud olukorras nägin, et liimimine, mis on kõige levinum versioon, ma välistan. Esiteks on paneel suur ja raske (8kg), teiseks on ringmajandusliku lähenemise puhul pindade jäädavalt kokku liimimine halb idee. Otsisin võimalusi, kuidas konstruktsiooniliselt saaks lahendada seinakinnitussüsteemi. Teine võimalus on paneelist lihtsalt läbi kruvimine. antud meetodi hea pool on lihtsus ja soodsus. Halvaks pooleks on nähtavad kruvipead. Turul kasutatakse väga palju musta värvi kruvisid, kui helisummutusmatt on tumedat värvi. Sellegipoolest jäävad need näha ja võivad hakata häirima. Praegu leitavad ribiliste paneelide matid on üldiselt väga õhukesed (8-10mm), kuid kui kasutada paksemat matti ei suuda kruvipea all olev pingetihedus moodustada piisavat kandepinda, mis põhjustab kruvi pea sukeldumise mati sisse.

Seinapaigalduse jaoks jätsin välja igasugused metallraamsüsteemid, sest need tekitavad lisakulu ja ettevõtte peaks sisse ostma suures koguses lisadetaile. Sain ülesande leida kuluefektiivsem lahendus.

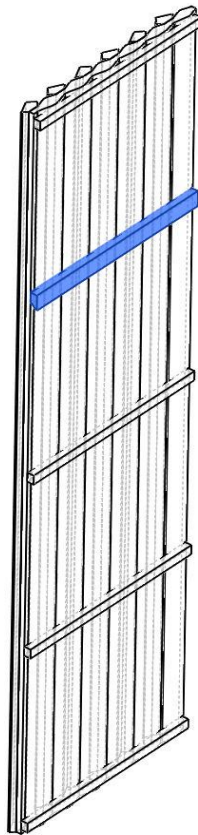
Kõige paremini sobis projekti seinale tõstetav süsteem. Antud lahendust on kasutatud palju mööblitööstustes seinale kinnitavate kappide puhul. Ära tõstetavate süsteemide juures on peamiselt kaks erinevat võimalust, metallist z-kandurid, mis käivad üksteise sisse ja puidust konstruktsioon (vt foto 15). Metallkandurid jäid valikust välja, sest kandurite tellimine tekitab lisakulu ja need ei tekita piisavat suurt õhuvahet paneeli taha.

Parima lahendusena jäi puidust kandur. Antud tehnikaga on mul ka isiklikud kogemused. Kui ma õppisin tiseriks, sai loodud mitmeid kapisüsteeme, kus kasutasin sellist kinnitussüsteemi. Olin üllatunud, kui efektiivne ja tugev võib puidust kandur mööblieset seinale hoides olla, seejuures varjates ära kinnitusliidese.



Foto 15. Kandur (Jackson 2020)

Puidust viltuste lattide kasutus on traditsiooniline ja töökindel võte tiserite seas. Selleks tuleb lõigata latt pikikiudu 45 kraadi alla ning üks kinnitub seinale mineva toote külge ja vastaspool seina külge. Selline lahendus tekitab disainitud paneeli taha õhuvähe vastavalt lati paksusele, mis on just eesmärk, mida soovisin saavutada. See on väga soodne ja lihtne süsteem. Arutledes lahendust Thermory-ga, meeldis neile süsteem väga oma nutika ja kuluefektiivse meetodi poolest. Lisaks annab puidust riputussüsteemi loomine võimaluse kasutada tootmisjääke ja ettevõtte ei pea sisse ostma lisafurnituure (sisse ostetavad manused).

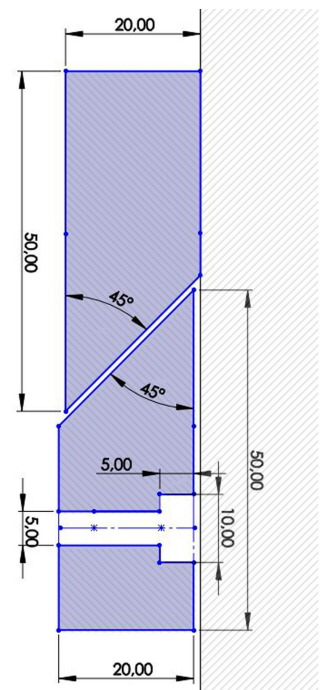


Joonis 29. Seinakinnituse koht

Paremal pool (joonis 30). on näidatud seinakinnituslati ristlõige, kuhu on ettepuuritud kaheastmeline kruvi ava, et kruvi pea ei jääks paneeli segama. Joonisest paremale jääb paneeli osa ja vasakule sein. Latt kinnitub seinale 3 kruviga.

Paneeli kinnituskohaks on ülevalt teine ristipuu (vt joonis 29). Asukoha määramise ma lahendasin uurides jõuõlgade liikumist ja analüüsid kapisüsteemides sarnaseid olevaid lahendusi. Kui seinakinnitus oleks paneeli üleval ääres, siis selle paigaldamisel oleks vaja redelit ja jõuõla tõttu saaks alumist osa seinast lahti liigutada. Kuid ülemises kolmandikus olev kinnitus fikseerib paneeli tugevalt, ilma et seda saaks ülevalt ega alt ette liigutada. Paneel surub raskusega 45 kraadisesse pesasse turvaliselt kinni. Vajadusel võib fikseerida kinnitussüsteemi kruviga, mis takistaks paneeli üles tõstmist.

Seina vastaspool, kuhu peale paneel tõstetakse, kinnitub seinale kruvidega, kasutades laserloodi saab lihtsa vaevaga sirge ja professionaalse paigalduse ilma suurema pingutuseta.

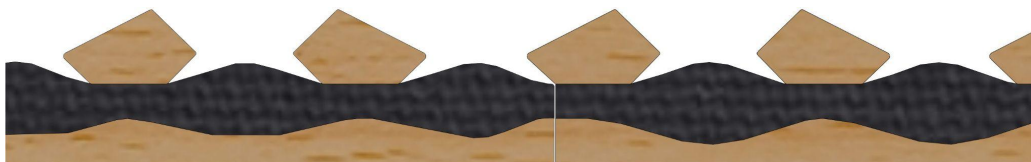


Joonis 30. Kinnituse läbilõige



## Moodul süsteem

Paneel on mõeldud külgede pealt omavahel kokku käima. Lahenduse juures on arvestatud, et iga järgmise paneeli serv läheb profiili servani, kattes profiiliga ülemineku joone ära. Joonisel 31 on kujutatud kahe külgmise paneeli kokkupuute kohta, mis läheb sujuvalt üheks suuremaks paneeliks.



Joonis 31. Paneelide kokkupuute koht

Kuigi paneel ise on 605 mm lai, saab seda jätkata samasuguste paneelidega nii palju kui klient soovib. Paneeli serva saab lõpetada üksiku ribiliitega, et ei jääks musta üksikut vildi serva (vt joonis 32.). Servaliistu saab kinnitada külje pealt alumiste ristipuude külge peitkruvidega üldpaneeli külge.

Paneelimõõtmeid sai arutletud sisearhitektiga ja nad andsid tagasisideks, et see on väga hea pikkusega (2400 mm). Paraku ulatuva mõnikord ruumide laed kõrgemaks (näiteks 3000 mm), mis tähendab, et tekib vajadus kõrgemate paneelide järgi. Arutledes teemat Thermory-ga, saime kokkuleppele, et hetkel teeme standardpikkuse 2400 mm, kuid alati jätame võimaluse eritellimusena teha pikemaid paneele. Läbirääkimisel lambavilla mati tehasega saavad nad teha matte laiuselt maksimaalselt 6000 mm.



Joonis 32. Paneelide kokku liitmine

## 5.4. Prototüübi valmistamine

### Villapaneelide tumedaks toonimine.

Päris paneelides on planeeritud kasutada naturaalselt musta lambavilla. Kuid minimaalse tellimise koguse tõttu (6 tonni), oli võimalik prototüübi jaoks hankida vaid heleda värviga lambavilla. Et muuta prototüübi jaoks villamatt tumedaks, võtsin kasutusele külmtoonimise tehnika. Külmvärvimise meetodi valisin seeltõttu, et komposiitmaterjal sisaldab biobolümeeri PLA, mis hakkab kergelt deformeeruma juba 60C juures, mille tõttu traditsiooniline villa värvimine keetmise meetodil ei saanud kasutada.

Toonimise läbiviimisel kasutasin DYLON villa värvi. Toonimiseks tuleb vesi soojendada 50C juurde ning lisada 50g värvile 250g soola. Antud kogus on mõeldud 250g villa värvimiseks. Katses määrasin värvi ja soola koguse vastavalt 6g villale, mille kaal oli katseklotsil. Vee koguse määrasin silma järgi, et see kataks katseklotsi värvilahusega. Peale 45 minutit vees leotamist, loputasin paneelitüki külma veega lahtisest värvilahusest puhtaks. Läbiviidud katses (vt foto 16) on näha peale toonimist villamati värvi erinevust. Katseklotsi toon on tumehall, mis vastas oodatud tulemusele. Proovisin värvilahust muuta ka äädikaga happelisemaks, mida tihti peale kasutatakse villa värvimisel, kuid tulemus ei erinenud toonilt tavalise vee kasutamisest.



Foto 16. Värvitud ja värvimata vill.

## Merekivi profiilide valmistamine

Erikujulise profiili valmistamiseks olin planeerinud kasutada C42 liistu. Profiilid olid Thermory tehases laos olemas, millele tuli sobiliku tooriku saamiseks vaid liist õigesse pikkusesse saagida (2400mm).

Profiilide valmistamisel kasutasin C42 olemasolevat profiili, millele tegin pikilõikega sobiva kuju (vt foto 17). Tööstuslikul viisil tootmise jaoks oleks vaja ehitada rakis või tellida vastava kujuline profiil. Kuid prototüüpimise jaoks piisas saepingi kerge ümber ehitamisega. Lisades enne ja pärast saeketast laiuse paksendused, et saada saeketast 44 kraadise nurga alla seadistada. Saeketta tagumise paksenduse esimese serva lõikasin nurga alla, et saagimisel väikse puidu väändumisel korral saaks profiil suunata õigesse lausesse tagasi.



Foto 17. Merekivi profiili valmistamine.

## Paneeli montaaž

Profilide kinnitamiseks kasutasin 50mm klambreid. Et klambrid ei jääks nähtavale poolele, tuli kogu klammerdamissüsteem teostada paneeli tagumisel poolel, mis tähendas, et paneeli fassaadpind (esindus pool) oli suunatud laua poole (vt foto 18). Prototüübi tegemisel kasutasin vaheklotse, et saavutada ühtlased vahed mööda paneeli pinda. Päris tootmises on kõige ratsionaalsem teha rakis-šabloon, kuhu saab laduda kõik profiilid sisse enne klammerdamist, see tagab hea toetuspinna ja täpsed vahed kõikide ribide vahel.

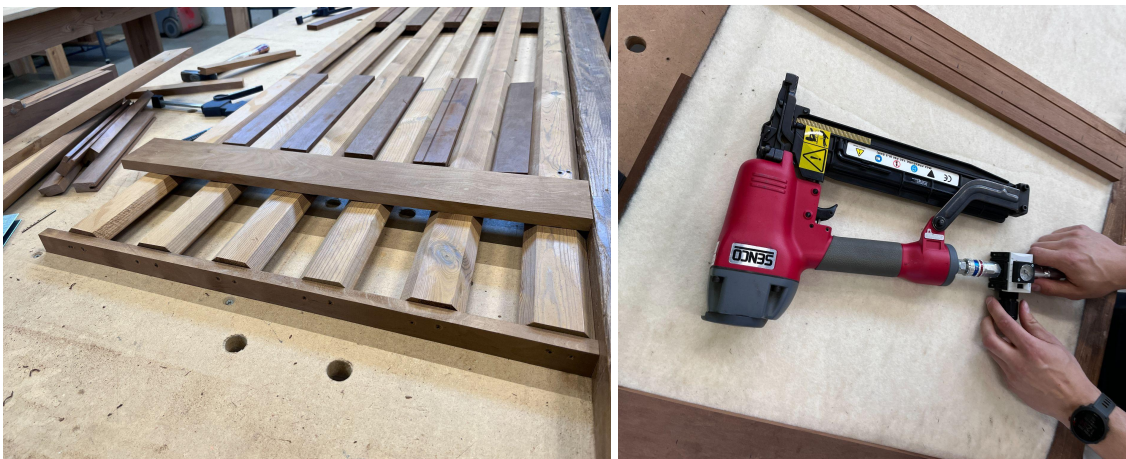
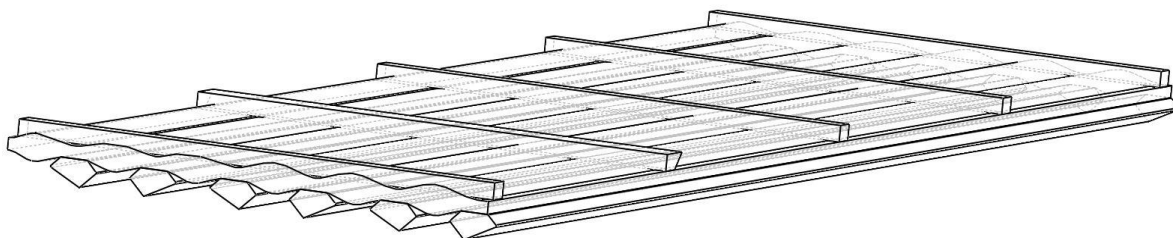


Foto 18. Ribide asetamine klammerdamise jaoks ja klambripüss.

Paneeli konstruktsiooni stabiilseks muutmiseks lisasin 4 ristlati paksusega 20 mm ning ühe 45 kraadise seinakinnitus lati (vt joonis 33). Antud latid tekitavad ka vajamineva õhuvahe paneeli taga, mis suurendab akustilise mati helisummutusvõimekust. Klambrid lasin läbi ristlati ribide külge, mille tulemusel jäi villamatt kahe puitdetaili vahele. Äärtes olevale matile lasin iga ristlati vahele lisaks klambrid, mis hoiavad matti visuaalset sirgena. Vill pidas klambrit hästi kinni ja ma ei pidanud lisama kangast või plaati villa ning klambri pea vahele.



Joonis 33. Paneeli ruumiline konstruktsioon.

Prototüüpimise käigus katsetasin nii erineva paksusega summutusmatte kui profile. Katses selgus, et kui kasutada õhukest 5 mm paksust villamatti, ilmneb mitmeid probleeme. Villamatt jäi piki paneeli laineline, mis ei olnud esteetiline (vt foto 19). Ristlattice asukohad olid ribide vahelt näha, kuna see surus villamati üles ja vahekohtades oli villamatt madalamal ehk lohkus. Proovides klammerdada vahekohtades matti ribide külge, parandas see natuke olukorda, kuid mitte märgatavalt.

Paksema matiga ehk 60 mm paksusega ei ilmnenud antud probleemi (vt foto 20). Matt oli visuaalselt lainjas risti paneelil (ribide vahel) nii nagu olin varem planeerinud. Analüüsesid olukorda, märkas, et paksem matt hoiab oma vormi tunduvalt paremini ja koormus villa moonandumisele on hajutatud.



Foto 19. Laineline 5mm villamatt



Foto 20. 60mm paksune villamatt ilma pikki laineteta

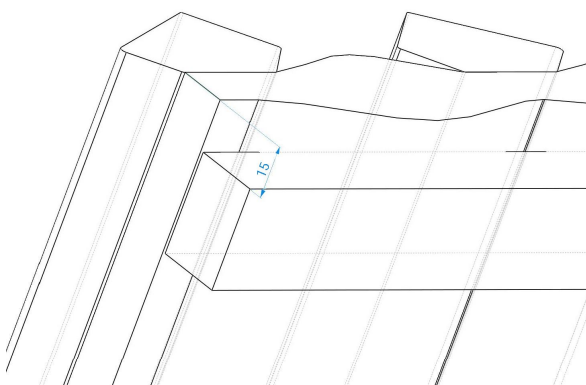
Katsetades 30 mm paksust villamatti kandilise profiiliga jäi samuti hea tulemus, kuid esinesid mõningad probleemid. Paneelil oli kerge lainetust pikkikiudu, kuid mitte väga märgatav. Sellest suurem probleem tekkis villamatiga, millele peab tähelepanu pöörama.

Villamatid  $50 \text{ kg/m}^3$  ei ole jäigalt kõvad, neid saab seinale püsti panna ilma, et need longu vajuks, kuid kui natuke suuremat raskust avaldada siis vajub siiski kokku ja tekitab nn volditud joone. Kui villamatte ei tõsteta hoolikalt võib tekkida volt, mis rikub mati esteetilise välimuse. Katsetades lootsin, et kokkusurutult vastu paneeli kaob häiriv joon ära, kuid eksperimendi käigus selgus, et volt säilib ja läheb veel tugevamaks (vt foto 21).



Foto 21. Voldid mati sees.

Otsades olevad ristipuid paigutasin 15 mm kaugusele servast (vt Joonis 34), mille tulemusel varjas vill otsa taga oleva ristipuu ära ja villa lainetus jäi vaid fassaadpinna. Fotol 22 on näha lainetust ribide vahel ning sirget alumist äärt. Vajutades villa ribi kokku, on näha klammerdatud kohtades olevat villa paksust paneeli sees.



Joonis 34. Otsas oleva ristipuu kaugus



Foto 22. Paneelis olev villamatti lainetus.

### Seinakinnituse katsetus.

Paneeli taga asub seinä kinnitussüsteem (vt foto 23). See koosneb kahest viltusest ristipuust. Üks kinnitub paneeli taha ja teine kruvidega seinä külge. Paneeli saab tõsta lihtsalt seinale, mis fikseerib paneeli tugevalt omale kohale ja muudab paigaldamise väga lihtsaks ja kiireks.



Foto 23. Seinä kinnitussüsteemi katsetus.

Katse läbiviimisel selgus, et paneel hoiab end üleval tugevalt ja kindlalt (vt foto 24.). Paneeli saab nihutada vaid suure jõu avaldamisel, suunates paneeli ülesse. Kuid paneeli tõmmates enda poole näiteks altpoolt ei andnud tulemust selle seinast nihutamiseks.

Näen, et katse oli edukas ja sarnast viltust kandurit ei ole paneeli alumisse osasse lisaks vaja.

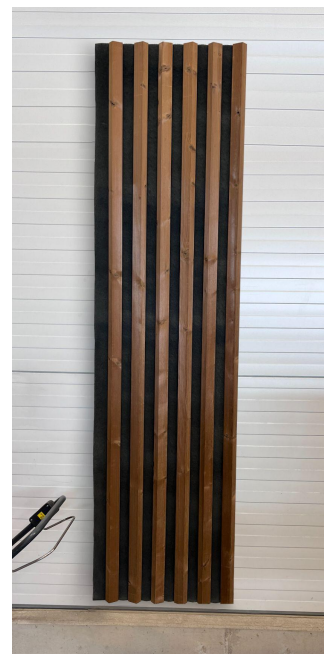


Foto 24. Paneeli katsetus seinäl

## 5.5. Paneeli edasiarendus.

Lõputöös sai suur töö tehtud, kuid sellega ei lõppe antud projekt. Peale kaitsmist jätkan ma paneelide arendust. Lõputöös tõi välja ühe paneeli lahenduse, kuid koostöös Thermoryga loon paneelide perekonna, erinevate varjatsioonidega.

Planeeritud on laboratoorsed helitestid TalTechi helilaboris, kasutades toruga helineelde koefitsienti määramist. Suve lõpus või augustis lähevad paneelid testimisse TalTechi helilabori spetsiaalsesse kajaruumi, kus mõõdetakse terve paneeli reaalne helineelde koefitsient. Selle läbi saab paneel sertifitseeritud tulemuse ja annab võimaluse võrrelda erinevate ribiprofiilide heli summutust.

Veel on vaja teha kokkulepped ettevõtjatega ringmajandusmudeli käima lükkamiseks. Paneel on loodusõbralik ja teoorias töötab villa komposiidi taaskasutus hästi, kuid ei soovi, et need ehitusprügiga prügimäele satuvad. Komposiitmaterjali teisele ringile võtmise osas olen arutanud teemat Thermoryga, kes on natuke skeptiline, kas nad saavad teha kogumispunkti, sest nad ise villa ei valmista, vaid ostavad seda sisse. Villavabrikuga Paragon rääkides öeldi, et teoorias on komposiitmaterjali ümbertöötlemine võimalik. Kui paneel puhastada puidust ja muudest komponentidest, siis saab see segistisse panna ja uus taaskasutatud materjaliga paneel pressida. Nad ei ole varem ümbertöödeldnud vanu paneele tootnud ning seda peab katsetama ja täpsema süsteemi paika panema. Samas paneeli materjal on täpselt sama, mida kasutab Woola oma mulli pakendite tegemisel. On võimalik, et nad saaksid kasutada vanade paneelide villa materjali. Paneeli sees olev PLA on korduvalt üles sulatatav.



## KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöö eesmärgiks oli disainida ribiline helisummutuspaneel ettevõttele Thermory.

Et saada piisav sisend ja algteadmised lahenduse loomiseks, viisin läbi poolstruktureeritud intervjuud nii sisearhitektide, materjalispetsialistide kui ka akustikuga. Valitud intervjuude vorm oli tulemusrikas ja ands rohkesti infot, mida sain edukalt kasutada paneeli arenduses. Töö lahendus arvestab mitmeid sisearhitektide poolt välja toodud hetkel turul olevate paneelide puudusi nagu loodusöbralikkus, paneeli paksuse- efektiivsuse suhe ja vähene profiilide valik.

Protsessi käigus disainisin profiili "Merekivi" ja paneeli "Merekivi sümbioos", mahutades selle edukalt Thermory etteantud kriteeriumitesse. Elegantse looduslähedase vormiga profiil on tugev värskendus Eesti turul olevate ribiliste paneelide seas. Praegused pakutavad paneelid on vaid profiililt neljakandilised ning sisearhitektidel on selle tõttu väga väike valikuvõimalus. Lisaks on uuenduslikel ribidel parem helihajutus võimekus võrreldes nelja kandilise profiiliga.

Läbi profiili kuju ja villamati füüsilistele omadustele suutsin ära lahendada mati paksuse probleemi. Sisearhitektid tõid välja, et mida õhem on paneel, seda parem, kuid vaid paks villamatt suudab heli tulemusrikkalt summutada. Paneeli konstruktsioonil on lisaks matile vaja taha õhuvahet ning ette ribisid, mis suurendavad märgatavalt paneeli paksust. Näiteks 45 mm paksuse villamatiga paneel oleks tavaolukorras kokku 97 mm, kuid minu paneelil saavutab sama tulemuse vaid 67 mm. Lisaks ei ole turul piisava mati paksusega ribilisi paneele, mida sisearhitektid vajaksid. Antud lahendusega saan pakkuda täislahendusega toodet, millel ei ole veel pakkujaid. Paneel tuleb turule koos mõõdetud helineelde koefitsientiga (peale kaitsmist), millega aitan sisearhitektidel parandada ruumi akustika lahenduste väljatöötamist.

Üks olulisi probleeme, millele magistritöös keskendusin, on loodussöbraliku paneeli loomine, mida on võimalik ringmajanduslikult käidelda. Isegi prügilasse või loodusesse sattumisel ei eralda paneel lagunemisel toksilisi aineid. See on tugev alternatiiv praegustele valikule, mis on üles ehitatud sünteetilise materjali peale. Lambavilla kasutamine on igati tänuväärne lähenemine, sest see vähendab maailmas CO<sub>2</sub> jalajälge. Iga aasta visatakse ainuüksi Eestis ära 153 tonni lambavilla, sest sellele ei ole piisavat rakendust.

Lõputöö käigus omandasin head teadmised ruumiakustika maailmas navigeerimiseks ning tunnen ennast antud valdkonna teemasid käsitledes kindlalt. Lisaks tegin selgeks

komposiitmaterjali komponendid ja nende iseärasused. Nii biopolümeer PLA kui lambavill on valdkonnad, milles on mul nüüd olemas laialdased teadmised, mida saan kasutada ka järgmistes projektides. Mind üllatas tugevalt villa heade omaduste rohkus, mistõttu on mul hea meel, et analüüsisin antud valdkonna läbi.

Teostasin komposiitmaterjaliga tuletesti. Selgus, et materjalil säilib tuld summutav efekt isegi siis, kui see on segatud biopolümeeriga.

Isiklikult üheks suureks väärtuseks lõputöö protsessis oli päris toote loomine, kus tootja annab kitsad navigeerimise võimalused ning disainimisel pean arvestama tootmise kuluefektiivuse, võimekuse ja materjali kättesaadavusega. Lisaks olin kohustatud pidama läbirääkimisi erinevate tootjatega, et luua hanke tingimused ja eritellimusel villapaneelide tootmine ettevõttele Thermory. Magistritöö andis mulle hindamatu kogemuse, kuidas disainerina arvestada nii tootja, tarbija kui keskkonna vajadusi.

Lõputöö kirjutamine andis mulle rohkelt inspiratsiooni ja ideid, kuidas saan antud teadmisi kasutada juba järgmistes disainiprojektides. Lisaks, on mul võimekus käsitletud teemasid selgitada ja jagada ka teistele huvilistele.

Käesolev töö on täitnud edukalt eesmärgi.

Lõputöö tegemise jooksul olid mulle abiks väga palju inimesi, keda soovin tänada. Peamised inimesed, kes olid nõus oma aega ja energiat eraldama minu eduka lõputöö teostamisele olid järgmised: Argo Tamm, Triin Jerlei, Mariann Hendrikson, Hannes Tarn, Siim Saarend, Innar Susi, Gerda Kaasik, Hanneloore Kääramees, Johanna-Lisete Alling, Kadri Aare, Rasmus Kabun, Katrin Kabun, Kristi Prinzmann ja Johanna-Lisete Alling. Enne lõputöö alustamist osalesid eelprojektis tööstusdisaini alal tudengid: Teele Kumm, Piibe Tomp, Natalja Gumennik, Oscar Goedert, Laura Hermann, Julette Courtiois ja Baptiste Amsaleg. Eelprojekti juhendajateks oli Mihkel Güsson ja Tuukka Halonen.

## SUMMARY

The aim of this master's thesis was to design a ribbed sound-absorbing panel for the company Thermory.

To gather sufficient input and initial knowledge for creating a solution, I conducted semi-structured interviews with interior architects, material specialists, and acousticians. The chosen interview format proved fruitful, providing abundant information that I successfully utilized in the development of the panel. The solution takes into account several shortcomings of currently available panels in the market, as highlighted by interior architects, such as environmental friendliness, the thickness-effectiveness ratio of the panel, and limited profile options.

During the process, I designed the "Merekivi" profile and the "Merekivi Symbiosis" panel, successfully meeting Thermory's specified criteria. The elegantly natural form of the profile presents a strong refreshment among the ribbed panels available in the Estonian market. Existing offerings only feature square profiles, severely limiting the choices for interior architects. Additionally, the innovative ribs offer superior sound diffusion capabilities compared to the square profiles.

Through the shape of the profile and the physical properties of the wool mat, I managed to solve the issue of mat thickness. Interior architects emphasized that thinner panels are preferable, but only a thick wool mat can effectively attenuate sound. In addition to the mat, the panel's construction requires a gap at the back and ribs at the front, significantly increasing its thickness. For example, a panel with a 45 mm thick wool mat would normally have a total thickness of 97 mm, whereas my panel achieves the same result with only 67 mm. Furthermore, there are currently no ribbed panels available on the market with a sufficient mat thickness, which is in demand among interior architects. With this solution, I can offer a complete product that has no competitors. The panel will be introduced to the market with a measured sound absorption coefficient (after treatment), assisting interior architects in developing acoustic solutions for their spaces.

Creating an environmentally friendly panel that can be effectively recycled was one of the significant challenges I focused on in this master's thesis. Even if the panel ends up in a landfill or in nature, it does not release toxic substances during degradation. This provides a strong alternative to the current options that rely on synthetic materials. The use of wool insulation is highly commendable as it reduces the CO<sub>2</sub> footprint. In Estonia alone, 153 tons of wool insulation are discarded annually due to the lack of proper applications.

Throughout the thesis, I gained valuable knowledge in navigating the world of room acoustics and feel confident in addressing topics within this field. I also familiarized myself with the components and peculiarities of the composite material, both the biopolymer PLA and wool. These are now areas in which I possess extensive knowledge that I can utilize in future projects. I was pleasantly surprised by the numerous positive qualities of wool, and I am glad I thoroughly analyzed this field.

I conducted a fire test on the composite material, which revealed that the material maintains its fire-retardant effect even when mixed with biopolymer.

Personally, one of the significant values in the thesis process was creating a tangible product, where the manufacturer provides limited navigational possibilities, and I had to consider cost-effectiveness, production capability, and material availability in the design process. Additionally, I had to negotiate with various manufacturers to establish procurement conditions and produce custom wool panel orders for Thermory. The master's thesis provided me with invaluable experience in considering the needs of both the manufacturer, consumer, and the environment as a designer.

The process of writing the thesis has provided me with inspiration and ideas on how to apply this knowledge in future design projects. Furthermore, I have the ability to explain and share the topics covered with other interested individuals.

This work has successfully achieved its objective.

I would like to thank many people who helped me during the completion of my thesis. The main people who agreed to devote their time and energy to the completion of my successful thesis were the following: Argo Tamm, Triin Jerlei, Mariann Hendrikson, Hannes Tarn, Siim Saarend, Innar Susi, Gerda Kaasik, Hanneloore Kääramees, Johanna-Lisete Alling, Kadri Aare, Rasmus Kabun, Katrin Kabun, Kristi Prinzmann and Johanna-Lisete Alling. Before starting the thesis, students in industrial design participated in the preliminary project: Teele Kumm, Piibe Tomp, Natalja Gumennik, Oscar Goedert, Laura Hermann, Julette Courtiois and Baptiste Amsaleg. The supervisors of the preliminary project were Mihkel Güsson and Tuukka Halonen.

## KASUTATUD KIRJANDUS

Aare, K. (01.04.2023). Helisummutuspaneelid sisearhitektide maailmas. P. Kangur. [helisalvestis]. Tallinn.

Acs. (2022). Making wooden construction materials fire-resistant with an eco-friendly coating. [www]  
<https://www.acs.org/pressroom/newsreleases/2022/march/making-wooden-construction-materials-fire-resistant-with-eco-friendly-coating-video.html> (17.04.23).

Adams, T. (2016). Sound Materials: A Compendium of Sound Absorbing Materials for Architecture and Design Paperback.

Alling, J. (20.03.2023). Helisummutuspaneelid sisearhitektide maailmas. P. Kangur. [helisalvestis]. Tallinn.

Amendolare, N. (2022). What are Sound Waves? [www]  
<https://study.com/academy/lesson/what-are-sound-waves-definition-types-uses.html> (01.04.23).

Asdrubali, F., Schiavoni, S., Horoshenkov, K. (2012). „A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications,” Building Acoustics

Atkinson, D. (2017). PLABioplastics. [www]  
<https://www.bio.org/sites/default/files/legacy/bioorg/docs/0230PM-Derek%20Atkinson.pdf> (14.04.23).

Baker, I. (2023). How to Reduce Reverberation and Echo with Sound Absorption. [www]  
<https://www.soundproofingstore.co.uk/how-to-reduce-echo-with-sound-absorption> (16.04.23).

Boncamper, I. (2000). Tekstiilkiud: Käsiraamat. Tallinn : Eesti Rõiva- ja Tekstiililiit

Brennan, C. (2018). Does Cold Air Cause Latex Helium-Filled Balloons to Deflate? [www]  
<https://sciencing.com/cold-air-cause-latex-heliumfilled-balloons-deflate-13390.html> (27.04.23).

Ehomeer. (i.a) Akustiline ribipaneel homer valge, helehall vilt. [www]  
<https://www.ehomeer.ee/et/soojustus/tehniline-isolatsioon/akustika/akustiline-ribipaneel-homer-valge-helehall-vilt.html#additional> (17.04.23).

Eiskop, I., Sillart, A. (1988). Akustika ja helitehnika. Tallinn: Valgus.

Foley, D. (2022). Sound Diffuser VS Absorber. [www] <https://www.acousticfields.com/sound-diffuser-vs-absorber/> (17.03.23).

Framework... (2019). Framework for Innovation. [www] <https://www.designcouncil.org.uk/our-work/skills-learning/tools-frameworks/framework-for-innovation-design-councils-evolved-double-diamond/> (17.04.23).

González,E. (2019). [www] <https://www.intechopen.com/chapters/65699> (17.04.23).

Goodwin, A. (2019). Refreshing on the Basics of Noise and Hearing Conservation <https://ohsonline.com/articles/2019/02/01/refreshing-on-the-basics-of-noise-and-hearing-conservation.aspx> (18.03.23).

Hanni, A. (2020). Helineelavate toodete valikut võimaldava digiplatvormi prototüübi väljatöötamine avatud kontori kontekstis. Eesti Kunstiakadeemia. [Magistriitöö]. Tallinn

Hortvik, D. Basic principles of room acoustics. (2020). [www] <https://www.ekustik.eu/tips-and-tricks-blog/basics-of-room-acoustics> (17.04.23).

Huang., Jonathan, S., Nicholas, J., Bryan, M., Bissera, V. (2010). Estimating Room Impulse Responses from Recorded Balloon Pop. [www] [https://ccrma.stanford.edu/~njb/research/AES129\\_Balloon\\_Slides.pdf](https://ccrma.stanford.edu/~njb/research/AES129_Balloon_Slides.pdf) (17.04.23).

Islandi lammas. (i.a). The Ultimate List of Natural dyes (for fabric & yarn). [www] <http://www.islandilammas.ee/myygiks> (23.04.23).

IWS. (i.a). Innovaatilised täispuidust ripplaed & seinte viimistluselemendid. [www] <https://iws.ee/> (17.04.23).

Jackson 2020 [www] <https://www.thehandymansdaughter.com/how-to-make-a-french-cleat/> (17.04.23).

K, Kabun. „Lambavill: struktuur ja omadused,“Traditsiooniline lambakasvatus Eesti ja Soome rannikualadel ning saartel. Tallinn. AS Rebellis, 2013.

Kaasik, G. (02.04.2023). Ruumiakustika olemus ja helisummutuspaneelid. P. Kangur. [Käsikiri]. Tallinn.

Kaasik, G. Eesti kontserdisaalide ruumiakustilised mõõtmised ja arvutuslik analüüs. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool. 2014

Kabun, K. (05.04.2023b). Lambavilla kasutus helisummutuspaneelides. P. Kangur. [Käsikiri]. Tallinn.

Kabun, K. (2022). Arhailiselt high-tech. Lambavilla teadmistepõhine rakendamine. Tallinn: Eesti Kunstiakadeemia Tekstiilidisaini osakond

Kabun, R. (12.04.2023a). Helisummutuspaneelid sisearhitektide maailmas. P. Kangur. [helisalvestis]. Tallinn.

Kaljumäe, K. (2023). Akustikainsener Gerda paneb majad hästi kõlama. [www] <https://inseneeriapuu.ee/isikulugu/akustikainsener-gerda-paneb-majad-hasti-kolama> (11.05.23).

Kate. (2012). i would like to find a cold method of dye suitable for fine wool fabric. [www] <http://www.pburch.net/dyeing/dyeblog/C1224992486/E20120118105057/index.html> (17.04.23).

Kääramees, H. (14.03.2023). Helisummutuspaneelid sisearhitektide maailmas. P. Kangur. [helisalvestis]. Tallinn.

Kinney, T. (2014). wool : master's design thesis [www] <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/25060/mds2014-kinney.pdf?sequence=2> (17.04.23).

Klementi, K. (2010). NAGU MERELAINE... [www] [https://www.timetrap.ee/2010/09/2675/img\\_3417/](https://www.timetrap.ee/2010/09/2675/img_3417/) (17.04.23).

Kokk, H., Laanejärv, M. (2020). Kuidas muudab disain toote ja teenuse majanduslikult tasuvaks? [www] (17.04.23). <https://ajakiri.muuseum.ee/kuidas-muudab-disain-toote-ja-teenuse-majanduslikult-tasuvaks/>

Lowe, E. (2021). manufacturing a circular economy [www] <https://www.makeuk.org/insights/blogs/manufacturing-a-circular-economy> (17.04.23).

Martinez-Azaro, V. (2021). The Ultimate List of Natural dyes (for fabric & yarn). [www] <https://lcreativemama.com/the-ultimate-list-of-natural-dyes/> (03.04.23).

Matsin, A. (2022). Villavebruar 1 osa. [www] <https://www.youtube.com/watch?v=xve5Dr3GZn8> (24.03.23).

Mcgill, Aj. (2022). Best Types of Sound Diffusers and How They Work. [www] <https://quietliving.co.uk/sound-diffusers/> (17.04.23).

McNeil, S. (2015). The Removal of Indoor Air Contaminants by Wool Textiles. [www] [https://www.researchgate.net/publication/353757473\\_The\\_Removal\\_of\\_Indoor\\_Air\\_Contaminants\\_by\\_Wool\\_Textiles](https://www.researchgate.net/publication/353757473_The_Removal_of_Indoor_Air_Contaminants_by_Wool_Textiles) (17.04.23).

Monavor. (i.a). Akustiline seinapaneel Lameli Sonoma. [www] <https://moonavor.ee/est/tooted/seinapaneelid/lameli-akustilised-paneelid/akustiline-seinapaneel-lameli-sonoma/> (17.04.23).

NRC Ratings of... (i.a). Everything to Know About NRC Ratings. [www] <https://www.secondskinaudio.com/acoustics/what-is-nrc-rating/> (17.04.23).

NRC Rating... (2020). NRC Rating 101 – Understanding the Noise Reduction Coefficient. [www] <https://www.acousticalsurfaces.com/blog/acoustics-education/nrc-rating-101/> (17.04.23).

Nugis, T. (2022). Nõuanded ruumi akustika probleemide lahendamiseks kangastega. [www] <https://www.inkodu.ee/nouanded-ruumi-akustika-probleemide-lahendamiseks-kangastega/9762> (20.04.23).

O'Connell, J. (2023). PLA Plastic/Material – The Ultimate Guide. [www] <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/> (17.04.23).

Padu, A. (12.03.2023). Helipaneelide kasutus ehitustes. [helisalvestis]. Tallinn.

Parsons, S. (2021). Super low carbon. [www] <https://www.woolnz.com/insights/post.php?s=super-low-carbon> (17.04.23).

Peroni. (i.a). Acoustic absorption - ISO 11654. [www] [https://www.peroni.com/lang\\_UK/scheda.php?id=57893](https://www.peroni.com/lang_UK/scheda.php?id=57893) (17.04.23).

Plaatdetail. (i.a). [www] <https://plaatdetail.ee/> (29.04.23).

Poly(Lactic Acid). (2023). [www] <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/3/133/htm> (17.04.23).



Prinzmann, K. (17.04.2023). Helisummutuspaneelid sisearhitektide maailmas. P. Kangur. [helisalvestis]. Tallinn.

Rey, R., Uris, A., Candelas, P. (2017). Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications. [www] [https://www.researchgate.net/publication/320915773\\_Characterization\\_of\\_Sheep\\_Wool\\_as\\_a\\_Sustainable\\_Material\\_for\\_Acoustic\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/320915773_Characterization_of_Sheep_Wool_as_a_Sustainable_Material_for_Acoustic_Applications) (17.04.23).

Riigikantselei. (i.a). [www] <https://www.riigikantselei.ee/valitsuse-too-planeerimine-ja-korraldamine/valitsuse-too-toetamine/saastev-areng> (02.05.23).

Rinde, A. (i.a). Multimeedium, helid, helisalvestus. Tallinna Ülikooli informaatika instituut. [www] [http://www.cs.tlu.ee/~rinde/mm\\_materjal/pdf/mm\\_audio.pdf](http://www.cs.tlu.ee/~rinde/mm_materjal/pdf/mm_audio.pdf) (17.04.23).

Rogers, T. (2015). Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA) [www] <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-poly-lactic-acid-pla-prototypes> (17.04.23).

Rosa, N. (2016) A Tosquia. [www] <http://serradaestrela.info/serra-da-estrela/a-tosquia> (17.04.23).

Shirley, N., Artese P., Coudriet, G. (2022). Sound matters in the workplace: the open office meets acoustical paradise [www] <https://www.nv5.com/news/home-vs-office-the-noise-factor/> (11.05.23).

Stockholm furniture... (i.a). Stockholm Furniture Fair, 2023. [www] [https://www.stockholmfurniturefair.se/?sc\\_lang=en](https://www.stockholmfurniturefair.se/?sc_lang=en) (10.03.23).

Susi, I. (14.03.2023). Lambavilla tootmine ettevõttes. P. Kangur. [Käsikiri]. Tallinn.

Swami, R. (2015). Behavior of sound in enclosed spaces. [www] <https://pt.slideshare.net/narasimhaswamy/behavior-of-sound-in-enclosed-spaces-55355717/5> (17.04.23).

Tamm, L. (2022). Kohaliku lambavilla kasutamine elamusrõiva disainiprotsessis kampsunite kollektsiooni näitel. Lõputöö. Kõrgem Kunstikool Pallas.

The Anatomy of a Wool... (2020). The Anatomy of a Wool Fibre. [www] <https://mountainmerino.com/blogs/news/the-anatomy-of-wool> (17.04.23).

Themory. (i.a) [www]  
[https://thermory.com/et/?gad=1&gclid=Cj0KCQjwu-KiBhCsARIsAPztUF1pchP5rsJKjfetwEfoLVBz-bldsoUwq3i75f28R6WguHVvYIWwsS3MaAkH9EALw\\_wcB](https://thermory.com/et/?gad=1&gclid=Cj0KCQjwu-KiBhCsARIsAPztUF1pchP5rsJKjfetwEfoLVBz-bldsoUwq3i75f28R6WguHVvYIWwsS3MaAkH9EALw_wcB) (17.04.23).

Tooming, H. (i.a). Eesti rändrahnud ja kivikülvid. [www]  
[http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti\\_r%C3%A4ndrahnud\\_ja\\_kivik%C3%BClvid](http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_r%C3%A4ndrahnud_ja_kivik%C3%BClvid) (17.04.23).

Urdanpilleta, M. Leceta, I., Guerrero, P., Cuba, K. (2022). Sustainable Sheep Wool/Soy Protein Biocomposites for Sound Absorption. [www]  
<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/23/5231> (17.04.23).

Walldesign. (i.a). Akustiline ribipaneel Graphite. [www]  
<https://www.walldesign.ee/et/products/akustiline-ribipaneel-graphite-ash-2558-600-x-2400-mm> (17.04.23).

Wool Notes. (2020). 02 Wool Notes. [www]  
[https://iwto.org/wp-content/uploads/2020/04/IWTO\\_Wool-Notes-Web-min.pdf](https://iwto.org/wp-content/uploads/2020/04/IWTO_Wool-Notes-Web-min.pdf) (17.04.23).

Wool... (i.a). Wool protection. [www]  
<https://www.isolena.com/en/know-how/wool-protection.html> (17.04.23).

Zacha, J., Korjenic, A., Petránek, V., Hroudová, J., Bednar, T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. [www]  
<http://www.friendlygruppen.se/isolenmarknad/sheepWoolInsulation.pdf> (17.04.23).