



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**TALLINNA KLAVERIVABRIKU KROMAATILISE
KONTSERTKANDLE ANALÜÜS**

**THE ANALYSIS OF THE CHROMATIC CONCERT ZITHER
OF TALLINNA KLAVERIVABRIK**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane Stina Rahnel

Üliõpilaskood 192081MATM

Juhendaja Toivo Tähemaa, teadur

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Stina Rahnel (*autori nimi*)

(sünnikuupäev: 05.04.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tallinna Klaverivabriku kromaatilise kontsertkandle analüüs“,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on teadur Toivo Tähemaa,
(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

26.05.2021 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Mehaanika ja tööstustehnika instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Stina Rahnel 192081MATM
Õppekava, peeriala: MATM Tootearendus ja tootmistehnika
Juhendaja(d): Teadur, Toivo Tähemaa, +372 509 1918

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Tallinna Klaverivabriku kromaatilise kontsertkandle analüüs
(inglise keeles) The Analysis of the Chromatic Concert Zither of Tallinna Klaverivabrik

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Skaneerida kannel ja luua punktipilve abil detailne 3D mudel
2. Projekteerida katse eesmärgil rakis, teostada katsetulemuste abil lihtsustatud tugevusarvutused, et välja selgitada probleemseid kohad
3. Uurida võimalusi kandle disainivigade parandamiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kandle skaneerimine	10.2020
2.	Kandle modelleerimine	04.2021
3.	Rakise projekteerimine	04.2021
4.	Tugevusarvutuste teostamine ja parendamise lahenduste leidmine	05.2021

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "26" mai 2021 a

Üliõpilane: Stina Rahnel ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Toivo Tähemaa ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. KANDLE UURIMINE JA AJALUGU	9
1.1 Kannelde ajalugu Eestis	9
1.2 Ülevaade tallinna klaverivabriku kromaatilise kontsertkandle ajaloost	10
1.3 Kromaatilise kandle valmistamise kirjeldus Klaverivabrikus	12
1.4 Heli tekitamine ja akustika	16
2. KANDLE SKANEERIMINE JA MODELLEERIMINE	19
2.1 Skaneerimise protsess	19
2.2 Kandle modelleerimine ja pöörd-projekteerimine	20
2.2.1 Kandle modelleerimise etapid ja kirjeldus	21
3. KANDLELE MÕJUVAD PINGED JA TUGEVSUSANALÜÜS	24
3.1 Keelepingete mõõtmine	24
3.2 Tugevsusanalüüs	30
3.2.1 Tugevsusanalüüsi tulemused ja järeldused	34
4. KROMAATILISE KONTSERTKANDLE TULEVIK	37
4.1 Komposiitmaterjalid	37
4.1.1 Puit + alumiinium + vaik	37
4.1.2 Süsinikkiud + vaik	40
4.2 Komposiitmaterjalid akustiliste instrumentide ehituses ja disainis	41
5. TÖÖ TULEMUS	45
EDASISED ARENDUSED	46
KOKKUVÕTE	47
SUMMARY	49
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	51
LISAD	53
Lisa 1 Pildid skaneerimise protsessist	54
Lisa 2 Skaneerimise tulemusel saadud punktipilv (10000 punkti)	55
Lisa 3 Atoses määratud avad	56
Lisa 4 Tugevsusanalüüsi tulemused, pinged	57
Lisa 5 Tugevsusanalüüsi tulemused, läbipaine	59
GRAAFILINE OSA	61

EESSÕNA

Magistritöö teema aluseks on võetud käesoleva töö juhendaja, teadur Toivo Tähemaa välja pakutud idee. Ettevalmistused tööga alustamiseks algasid juba 2020.aasta kevadel.

Sooviksin tänada töö juhendajat, Toivo Tähemaad, ning ka Tarmo Velskerit skaneerimise eest ja Martin Eermet tugevusarvutuste alase nõu ja abi eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CAD – *Computer Aided Design* (eesti k raalprojekteerimine)

FEA – *Finite Element Analysis* (eesti k lõplike elementide analüüs)

FEM – *Finite Element Method* (eesti k lõplike elementide meetod)

SISSEJUHATUS

Magistritöö eesmärgiks on uurida ja analüüsida Tallinna Klaverivabrikus toodetud kannelt, teostada lihtsustatud tugevusanalüüs ning analüüsida probleemseid kohti. Töö võiks olla esimeseks sammuks kromaatilise kontsertkandle kui instrumendi edasistel arendustel.

Kromaatilisel kandel on mitmeid erinevaid eelkäijaid, kuid kaasaegne kromaatiline kontsertkannel võeti kasutusele 1953.aastal, mis oli konstrueeritud pillimeister Väino Maala poolt. Klaverivabrikus hakati kandleid tootma 1953.aastal. Kromaatiliste kannelde tootmine oli alati väikesemahuline ja mitmel korral tootmine ka katkestati, kuna klaverite tootmine oli võrreldes kanneldega organisatoorselt lihtsam ning majanduslikult palju kasulikum. Kannelde valmistamiseks puudus täpne, kindlaksmääratud ja kokkulepitud tehnoloogia – kandleid valmistasid erinevad meistrid omal viisil ning tihti kasutati klaverite tootmisest järele jäänud materjale. Klaverivabrik lõpetas kannelde tootmise 1998.aastal seetõttu, et majanduslikult ei olnud nende tootmine kasumlik. Hetkel puudub Eestis kannelde masstootmine; Eesti kromaatilisi kandleid valmistavad Eestis pillimeistrid Rait Pihlap ja Aavo Saarva (kes seda enam ei tee ning on teadaolevalt valmistanud kokku vaid kaks tükki 2005.aasta seisuga) ning Soomes Otto Koistinen ja Venemaal Igor Krašeninnikov. [1] [2]

Tallinna Klaverivabriku poolt umbes 60 aastat tagasi arendatud ja toodetud kanded on mitme põhimõttelise veaga projekteeritud ning need kanded ei ole suurte pingete tõttu väga vastupidavad. Kromaatilised kanded, mis on toodetud Klaverivabriku poolt, on tänaseks päevaks väga erinevates seisukordades. Mitmetel instrumentidel on suurte sisepingete tõttu raamis hakanud tekkima rebendid ja pole seetõttu enam mängukõlblikud. Nii tekkiski idee ja vajadus uurida täpsemalt Klaverivabrikus konstrueeritud kandle ülesehitust ning leida viise kandle parendamiseks.

Töö eesmärgiks on luua CAD mudel, mille abil oleks võimalik toota kandle eri detaile, kasutades CNC freesimise võimalust. Praegusel hetkel valmivad Eestis toodetavad pillid puhtalt šabloonide abil käsitööna. Lisaks teostatakse töö käigus lihtsustatud tugevusarvutused, mille abil uurida ja välja tuua senised kandle põhilised probleemid – esiteks on raami sisse tekkinud suurte sisepingete tõttu rebendid tihvtide kohalt ning teiseks on hakanud pilli kõlalaud läbi painduma. Probleeme analüüsitakse ning välja tuuakse ideid probleemide lahendamiseks.

1. KANDLE UURIMINE JA AJALUGU

Käesolev peatükk annab ülevaate kandle kui instrumendi ajaloost ning tutvustab Tallinna Klaverivabriku kromaatilise kandle kujunemislugu.

1.1 KANNELDE AJALUGU EESTIS

Eesti vanim keelpill on 6-7-keelne kannel (varem 5-keelne), mille esimesed katsetused võivad pärineda lausa paarituhanda aasta tagusest ajast. Keelpillid on muusikainstrumendid, mille heliallikaks on võnkuv pillikeel. Kannel kujunes välja muistsel ajal läänemeresoome- ja baltihõimudel (peale Eesti veel Soomes, Lätis, Leedus) ja levis ka naabruses slaavlastel. Esimene kirjalik teade eesti kandle kohta pärineb 1579.aastast. [3] [4]

Kuigi kandle helitekitamise põhimõte on kõikjal sama, on pilli ehituses täheldatud piirkonniti suuri erinevusi. On leitud pille, kus kõlakarp on õõnestatud näiteks pealt, alt või hoopis külje pealt; samuti on leitud väga erinevast puidust valmistatud kandleid. Eestis kasutati kannelde valmistamiseks reeglina kuuse-, männi-, pärna-, lepa- või kasepuud. Keelte materjalina eelistati enamasti vasktraati, kuid on kasutatud ka lambasoolt või hobusejõhve. Algselt kasutati pilli häälestamiseks puidust keerdpulki (puitvirblid), kuid hiljem asendusid need juba raudvirblitega. [3]

Pikka aega olid Eestis levinud aga diatoonilised kanded, mis seadsid musitseerimisele piirid. Diatoonilise helilaadi olemust on hea kirjeldada klaveriklahvide põhjal, kus diatoonika on see, kui liikuda vaid valgeid klahve mööda. Kromaatilisus seevastu tähendab seda, et musitseerides on võimalus liikuda nii valgeid kui ka mustasid klahve mööda. Diatoonilise helilaadiga instrumendid seavad musitseerimisele tavapäraselt sellised piirangud, et esitada on võimalik vaid teatud helilaadiga muusikapalasisid ning tihti veel ka ainult kindlates helistikes (või on vajalik instrumendi ümberhäälestamine). [5] [6]

19.sajandi lõpu poole hakkasid Eestis ostupillidena levima inglise ja saksa päritolu kromaatilised rahvatsitrid, mis võimaldasid mängida muusikat erinevates helistikes ja

kasutada pooltoone kogu pilli ulatuses. Ehituslikult asetsesid pool- ja täistoonkeeled samal tasandil, mis tegi pillide mängimise väga keeruliseks ning seetõttu ei olnud võimalik pillidel mängida kiiremaid lugusid ning sellised pillid ei saanud ka rahva seas just selle põhjusel eriti populaarseks. [5]

1.2 ÜLEVAADE TALLINNA KLAVERIVABRIKU KROMAATILISE KONTSERTKANDLE AJALOOST

Enne kromaatilise kandle loomist leidis Eestis erinevaid kandleid, mis võimaldasid vaid teatud helistikes mängida. See oli tavaline just rahvamuusika mängimiseks, kuid ei võimaldanud mängida keerulisemaid kromaatilisi käike. Katseid konstrueerida kannelt, millel oleks olnud võimalik mängida kromaatilist helirida tehti mitmeid, kuid need olid pigem juhuslikku laadi. [1] [5]

Sihipärase tegevuse algust kromaatilise kandle konstrueerimiseks võib lugeda selleks, kui kokku hakati kutsuma Eesti Teatri- ja Muusikamuuseumis koosolekuid, et arendada välja eesti rahvuslik rahvapilliorkester. Koosolekud toimusid aastatel 1945-1954 ning sellest võtsid osa Eesti tuntud muusikategelased, orkestrandid, pillimeistrid ja muusikud. Rahvapilliorkestri jaoks sooviti luua ja arendada selline kannel, mis sobiks nii orkestrisse kui sobiks ka soolopilliks. 1953.aastaks oli Väino Maala kavandanud kromaatilise kandle, mida hiljem ka Tallinna Klaverivabrikus tootma hakati. 1954.aasta nõupidamisel, mis toimus selleks, et vastu minna 1955.aasta suve üldlaulupeole, loeti sel momendil kõige väljaarendatumaks kandletüübiks Väino Maala ristuvate keeltega kromaatiline kannel, vaata ka Joonis 1.1. [1]



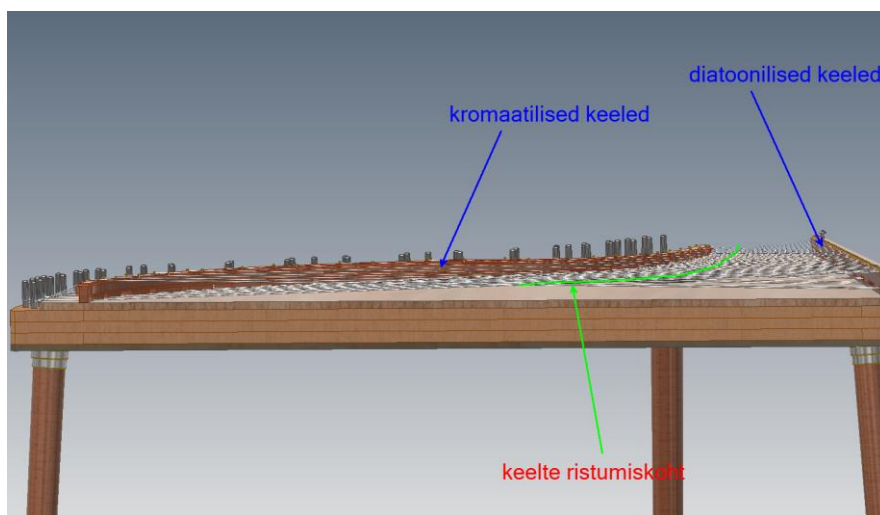
Joonis 1.1 Esimene Väino Maala valmistatud pill

Väino Maala konstrueeritud ning Tallinna Klaverivabrikus toodetud (vaata Joonis 1.2) ristuvate keeltega kromaatileine kannel sobis hästi nii rahvapilliks kui ka kontsertpilliks, omas head kõlakandvust ning sobis erineva repertuaari mängimiseks, kuna võimaldas oma kromaatilisuse tõttu kasutada kõiki, ka mitmemärgilisi helistikke. Pilli nimetatakse kontsertkandleks just seetõttu, et kui varasemad kanded olid rahvapillid ja neil mängiti peamiselt ainult rahvamuusikat, siis kontsertkandlega sai esitada ka palju teisi muusikastiile. Kandle diapsooniks oli neli oktavit, millest madalaima keele kõrguseks oli väikese oktaavi c (c) ehk Do ja kõrgeim oli kolmanda oktaavi a (a^3) ehk La. See ulatus oli paari keele võrra suurem kui endisel sopran- ja altkandlel kokku. [1]



Joonis 1.2 Tallinna Klaverivabriku kaasaegne kromaatileine kontsertkannel [5]

Eestis loodud kromaatilise kandle eripäraks on keelte asetus. Kandlel asetsevad keeled on paigutatud risti nii, et mängija suhtes paremale poole jäävad diatoonilised keeled (nagu klaveri valged klahvid) ja vasakule jäävad kromaatilised keeled (nagu klaveri mustad klahvid). Selline keelte paigutus jätab keskossa, keelte ristumiskohta tasapinna, kus kõik keeled on võrdselt haaratavad ehk mängitavad, vaata Joonis 1.3. Kuigi instrument võimaldab mängida igat stiili muusikat, mängitakse kromaatilisel kandlel enamasti klassikalist ja kaasaegset muusikat ning rahvamuusika ja rahvalik muusika ei ole selle pilli valdajate hulgas eriti populaarne. Objektiivselt võib väita, et kandle mängutehnika on pigem keeruline (võrreldes diatooniliste kanneldega) ning vajab aastatepikkust harjutamist. Seetõttu on välja kujunenud, et kromaatilist kannelt õpitakse muusikakoolis ning erinevalt diatoonilistest kanneldest on iseõppijaid vähe. [5]



Joonis 1.3 Kromaatilise kandle kromaatilised ja diatoonilised keeled ning keelte ristumiskoht

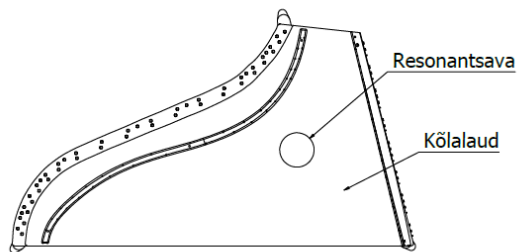
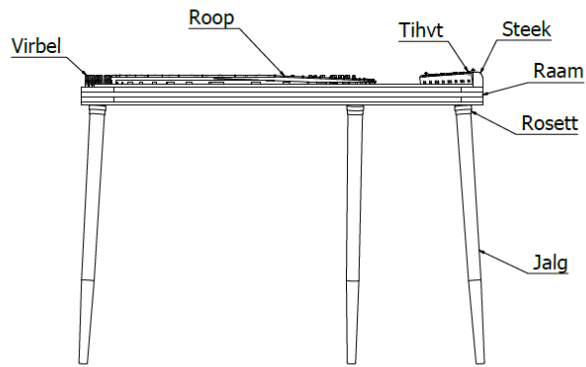
1.3 KROMAATILISE KANDLE VALMISTAMISE KIRJELDUS KLAVERIVABRIKUS

Kromaatilise kandle tootmine Tallinna Klaverivabrikus sai alguse 1953.aastal. Algselt valmistas kandleid Väino Maala ise, kuid kui Maala lahkus, jätkasid tema tööd Alfred Raudsepp ja Johannes (Juhan) Lind. [1]

Kuna tootmine toimus Klaverivabrikus, siis kasutati kannelde tootmiseks tihti klaverite tootmisest üle jäänud materjale. Näiteks oli klaverite tootmise tingimuseks tiheda

kasvuga oksavaba kuuse ehk resonantskuuse olemasolu. Resonantskuusk on kuusk, mis on tiheda puusüüga ehk tekstuuriga ja kasvab Alpide, Arhangelski ja Karjala piirkonnas 700-800 meetri kõrgusel merepinnast. Puidu saagimine ja kuivatamine toimus erilisel viisil, s.t et saagida tuli kindlas suunas nii, et detail jääks äärtest õhem ja keskelt paksem. Kui seesugune materjal jäi üle klaverite tootmisest, kasutati seda kanneldele kõlalaudade valmistamiseks. Kõvast lehtpuidust valmistati kanneldele raamid. Kanneldele keelte paigutamiseks ja pingutamiseks kasutati klaverite virbleid ja keeletraate. [1]

Valmistamise esimeses etapis kuivatati puit 6% niiskussisalduseni, raam valmistati kuivatatud lehtpuidust (tamm või pöök). Raami nurkseotised teostati tappliidesega kasutades tislari- ehk nahaliimi ning raamid lõigati paksusesse paksusmasina abil. Joonis 1.4 on näidatud kandle põhiosade nimetused. Pöögist lõigati lintsaega välja roop ja steek (roop ja steek on samatähenduslikud sõnad, kuid selguse huvides on käesolevas töös viidatud roobile kui keelte all asuvale kõverale detailile ning steegile kui keelte all asuvale sirgele detailile paremas servas, vaata Joonis 1.5) ning freesiti šablooni abil täpsesse mõõtu. Resonantskuuselauast valiti kõlalaua toorikud (nii laeks kui põhjaks) sobiva tekstuuri ja värvitooniga puit. Kõlalaudad liimiti tislariiliimiga kilbiks, mis kalibreeriti paksuses ja lihviti. Peale kaubamärgi liimimist ühendati kõlalaauakilbid liimliitega kandle raami külge. Järgnevalt freesiti tekkinud kandle toorik oma lõplikusse vormi, puuriti kõlalauda resonantsavad ja avad nii virblite kui tihvtide jaoks. Paralleelselt lõigati klaveri keeletraadist kanneldele keeled. Kannelde jalad treiti kasest ning lisati vasest või terasest jalarõngad ja jalgade kinnitusrosetid. [1]



Joonis 1.4 Kromaatilise kontsertkandle põhiosad (v.a keeled)



Joonis 1.5 Pildil vasakul on steek ning paremal roop [2]

Kannel viimistleti peale töötlust seda lihvides ja kolm-neli korda nitrolakiga lakkides. Sarnaselt viimistleti ka kandlejalad. Lõpuks koostati kannel selliselt, et lisati virblid, tihvtid, rosetid ja roop, kannel keelestati ja häälestati ning komplekteeriti koos jalgade ja häälestusvõtmega riidest vutlarisse ja saadeti lattu. [1]

Kromaatilise kandle ülesehitus on selline, et kandlekeeled asetsevad kõlalaua suhtes viltu ja omavahel risti nii, et paremale poole jäävad kõrgemale täistoonid ja vasakule poole pooltoonid. Kandle helidiapasoon on c-st a^3 -ni ning häälestamise aluseks võetakse 22.keel ehk esimese oktavi a (a^1) mähistega keelte poolt (alt) lugedes. Kandle helijärjestus on kromaatiline ning keeli on kandelil kokku 46. Kromaatilise kandle pikkuseks on 95 cm ja laiuks 55 cm. [1]



Joonis 1.6 Tallinna Klaverivabrikus toodetud kromaatiline kontsertkannel (autori foto)

Akustilise instrumendi ehituses on väga tähtsal kohal materjalivalik. Kuigi kandle kõlalauaks kasutati Klaverivabrikus peamiselt resonantskuuske, siis raami puhul kasutati lehtpuitu – nii vahtrat, punast pöökpuud kui jalakat. Vahtrast tehti näiteks kanneldele põhjasid, kuid jalakas oli Väino Maala sõnul kandle raamistiku, eriti virblite kinnitamiseks, parim. [1]

Kandlekeelteks kasutati Klaverivabrikus madalamate registrite puhul (ehk jämedamad keeled) terasest klaverikeeli, mis olid ladudes olemas ning mis olid ka vastupidavad. Peenemaid keeli oli Klaverivabrik sunnitud hankima mujalt ning need olid tihtipeale hapramad ja katkesid tihti. Basskeeltele keriti lisaks vasktraadist mähis. [1]

1.4 HELI TEKITAMINE JA AKUSTIKA

Akustilise instrumendi puhul, nagu seda on käesolevas töös käsitletav kannel, on oluline rääkida akustikast ning heli tekitamise mehhanismist. Kuna helitekitamise mehhanism on akustilistel keelpillidel sarnane, on käesoleva alapeatüki kirjutamisel aluseks võetud kitarrilise akustika ning heli tekitamise mehhanism.

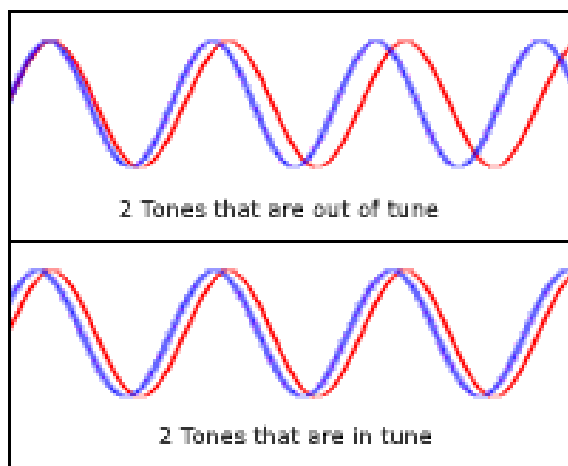
Heli tekitamise mehhanismi võib selgitada järgneva seitsme sammu abil. Järgnevalt kirjeldatakse heli tekitamist lihtsustatult ühe keele kaudu. Erinevused ühe- ja mitmekeelse süsteemi vahel on välja toodud peale heli tekitamise sammude kirjeldamist. [7]

1. Instrumentalist tõmbab kandlel keelt. Keel hakkab vibreerima baassagedusel sõltuvalt keele pingest, pikkusest ja massist. Lisaks sellele vibreerib keel ka kõrgematel sagedustel ehk n (1, 2, 3...) korda baassagedusel. Baassageduste ja kõrgemate sageduste suhe ühe keele tõmbamisel sõltub keele tõmbamise asukohast. Kui keelt tõmmata roobile lähemalt, siis aktiveeruvad kõrgemad sagedused, luues teravama heli, ning tõmmates keelt keele keskelt, aktiveeruvad madalamad sagedused ning kõlab soojem ja täidlasem heli. [7]
2. Keelevibratsioon kandub üle steegile ja roobile. Vibratsiooni kandudes steegile ja roobile mõjub nendele detailidele lisajõud. [7]
3. Steegile ja roobile mõjuv jõud paneb need detailid omakorda liikuma ja vibreerima. [7]
4. Steegis ja roobis tekkinud vibratsioon kandub kandle kõlalauda. Kõlalaud hakkab vibreerima. Erinevad kõlalauad võivad filtreerida erinevaid sagedusi välja või vastupidiselt võimendada mõningaid sagedusi ning see tekitab olukorra, kus kaks eri kannelt tekitavad väga erisugust kõla. Balanss erinevate helisageduste vahel on see, mis annab instrumendile selle iseäraliku tämbri ja karakteri. [7]
5. Kõlalaua vibratsiooni energia kandub üle õhku. Heli kandub instrumendist eemale, kuid ka pilli külgedele ja taha. Kõlalaud on akustilise instrumendi kõige tähtsam detail, kuna sellest sõltub kandle tämber kõige rohkem. Kõlalaua materjal ja selle paksus mängivad tämbri karakteri loomises suurt rolli. [7]

6. Heli kandub üle kandle põhjani läbi õhu ja külgede ning kandle põhi muutub osaks hääletekitamise mehhanismist. [7]
7. Õhk pumbatakse kõlakastist läbi kõlalauas oleva resonantsava ehk kõlaaugu välja. Kõlakast peaks parima kõla tekitamiseks disainitud olema selliselt, et kõlalaud ja põhi töötavad vastastikku ja pumpavad õhu välja, selle asemel, et töötada teineteisele vastu. [7]

Instrumendi eri osade ning õhu vahel toimub pidev energiavahetus. Ülal seitsme sammu abil kirjeldatud süsteemi puhul on tegu lineaarse süsteemiga, kuid reaalsuses on kõikide komponentide vaheline suhe pidev ja seda ei ole võimalik kirjeldada üksikute osade eraldi uurimisega ja on seega mittelineaarne. Paslik on järeldada, et heli tekitamise süsteem on väga kompleksne ning eelnevad punktid ei hooma seda täielikult. Kui tõmmata kandlel ühte keelt, siis resoneerivad ka kõik teised keeled. Kuna akustilise instrumendi ülesehitus on väga kompleksne, siis tavaliselt disainitakse ja arendatakse kõiki osi eraldi, silmas pidades nende konkreetset eesmärki, selle asemel, et disainida kogu instrumenti ühtse osana. [7] Kandle puhul võib aga väita, et instrument on arenenud pigem ühtse terviku instrumendina, kuid keeruline on teada pillimeistrite individuaalset protsessi.

Akustiliste instrumentide puhul on eriti oluline on instrumentide häälestamine ja hääles hoidmine. Häälestamine on protsess, mille käigus sätitakse instrumendi ühte või mitut tooni seni, kuni saavutatakse soovitud kõla. Keelpillide puhul häälestatakse iga keelt üksikult pingutades või lödvemaks lastes, kuni mängitav heli vastab sellele, mis saavutada sooviti. Helikõrgus on heli sagedus, mida inimkõrv on võimeline eristama. Instrumendid tekitavad vibratsioone ning need vibratsioonid tekitavad heli, mida inimesed kuulevad. Vibratsioonid või helilained, mida instrument tekitab, on mõõdetavad hertsides (Hz). Tavaliselt suudavad inimesed tajuda helisid, mis on 20 Hz ja 16000 Hz vahel. Muusikas ja akustikas on kokku lepitud, et esimese oktavi a^1 , on defineeritud 440 Hz-ga ja võetakse tihti ka häälestamisel aluseks, samuti kromaatilise kandle puhul. Joonis 1.7 illustreerib hästi seda, miks lisaks instrumendi üksikult häälede panekule on veelgi olulisem instrument häälede panna koos teiste instrumentidega, et ebakooskõlad ei hakkaks kõrva häirima. [8]



Joonis 1.7 Ülal on kaks tooni, mis ei ole omavahel häälestatud ning all on kaks tooni, mis on omavahel häälestatud [8]

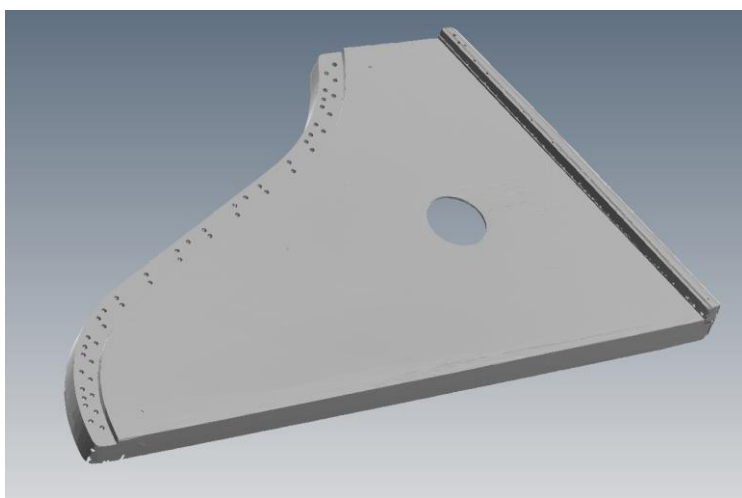
2. KANDLE SKANEERIMINE JA MODELLEERIMINE

Järgnev peatükk kirjeldab kromaatilise kandle skaneerimisprotsessi ning selle modelleerimist CAD tarkvaras Inventor Professional 2021.

2.1 SKANEERIMISE PROTSESS

Selleks, et olemasolevale kandlele oleks võimalik teostada FEM analüüs, oli tarvis luua CAD mudel. Mudeli täpseks ja detailseks loomiseks oli soov skaneerida sisse olemasolev kannel. Kannel skaneeriti sisse Tallinna Tehnikaülikooli *Rapidlab* laboris (U05B-103). Skaneerimist teostas insener Tarmo Velsker.

Skaneerimise protsess sai alguse sellest, et kandle pinnale kleebiti referentspunktid. Referentspunktide olemasolu on tähtis seetõttu, et erinevad punktipilved oskaksid end hiljem omavahel ise ühendada, luues ühtse 3D punktipilve – selleks on vajalik vähemalt kolme punkti olemasolu igal uuel ülesvõttel, vaata Lisa 1 – Pildid skaneerimise protsessist. Skaneerimiseks kasutati 3D skannerit ATOS II 400. Punktipilve töötlus teostati tarkvaras Atos. Punktipilve töötamise järgselt oli väljundiks .stl failid, kuid kuna originaalfail sisaldas väga palju punkte ja oli seega väga suuremahuline, siis otsustas skaneerimise spetsialist väljastada ka kaks väiksema kvaliteediga faili, millest üks sisaldas 10000 ja teine 5000 punkti. Kuna aga kandle modelleerimiseks ei olnud väga kõrge kvaliteet eriti oluline, kuid samas oli soov luua võimalikult täpne mudel, oli mugavam teha tööd 10000-punktise punktipilvega, vaata Joonis 2.1.



Joonis 2.1 10000-punktine punktipilv

Skaneerimise puhul oli tegu fotogrammeetriaga. Fotogrammeetria on tehnoloogia, mille abil on fotode abil võimalik luua 3D kujutisi. 3D skanneril on keskel projektor ja külgedel mustvalged kaamerad. Ühe skaneerimisega on skanner võimeline koguma umbes 1,4 miljonit punkti, kaamera resolutsiooniks on 1392x1040 pikslit. [9] [10]

2.2 KANDLE MODELLEERIMINE JA PÖÖRD- PROJEKTEERIMINE

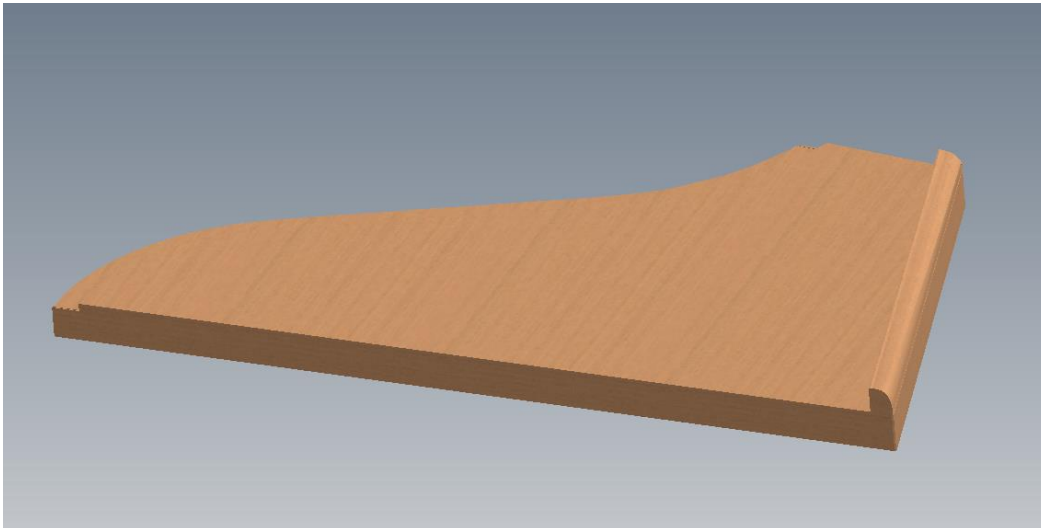
Kandle modelleerimiseks sai aluseks võetud alapeatükis 2.1 kirjeldatud punktipilv, vaata rohkem pilte Lisa 2 Skaneerimise tulemusel saadud punktipilv (10000 punkti). Lisaks punktipilvele oli Atos programmis punktipilve töötamise käigus võimalik määratleda avade tsentripunkte ja luua .igs fail, mis oli võimalik samuti modelleerimiseks viia Inventor keskkonda, et ei oleks vaja avasid otsida ja määratleda ükshaaval. Atoses ettemääratud avade tsentrid on täpsemad kui käsitsi punktipilve põhjal määrates. Vaata Lisa 3 – Atoses määratud avad.

Pöördprojekteerimine on protsess, mille käigus mingi objekt (siinjuhul kannel) võetakse uurimise aluseks, et välja selgitada, kuidas see on loodud ning saada disaini kohta informatsiooni. Pöördprojekteerimise nimi tuleneb sellest, et tuleb töötada tagurpidi selleks, et taastada loodud disain. [11]

Kandle mudeli loomisel tuli läbida mitmeid etappe selleks, et oleks võimalik kokku saada kompleksne ja tõetruu kandle mudel. Keerulisemaks tegi asja veel seegi, et tegemist on puitmaterjalist esemega ning see on toodetud käsitööna. See tähendab, et iga kannel on veidi erinev, lisaks on iseloomulik see, et on väga palju kõveraid ja sujuvaid pindasid ning üleminekuid, mida on palju keerulisem projekteerida kui muid, geomeetriliselt täpseid kujundeid.

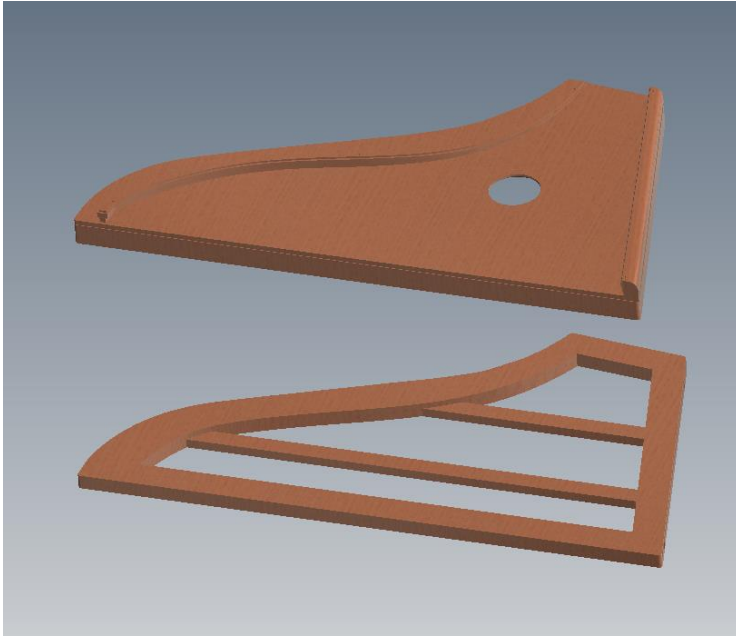
2.2.1 Kandle modelleerimise etapid ja kirjeldus

Alustuseks oli vaja punktipilve abil luua *solid* keha kandlest, vt Joonis 2.2. *Solid* keha eesmärk on modelleerimisel olla aluseks, millega on võimalik vastavas CAD programmis, milleks siinkohal on Inventor, hakata edasi töötama. Kuna *solid* keha on loodud punktipilvele tuginedes, on selle suurus ja kuju juba tegelikkusele vastavad.



Joonis 2.2 Punktipilve abil loodud *solid* keha kandlest

Seejärel oli vaja hakata võrdlema seda mudelit päris kandlega ning hakata uurima, kuidas kannel jaotub erinevateks detailideks ja need nii ka mudelis vastavalt jaotada. Mõõtmisvahenditeks reaalse kandle uurimisel ja mõõtmisel sai kasutatud mõõdulinti ja mehaanilist suplerit. Lisaks oli võimalik olemasolevale kehale lisada avade asukohad (vt Lisa 3 – Atoses määratud avad). *Multibody* kehana modelleerimine annab eelise, et korraga on võimalik luua mitmeid üksteisest sõltuvaid detaile, mida ka hiljem vastavalt vajadusele muuta on võimalik, alles jääb detailide teineteisest sõltuvus ja kui muuta ühe detaili parameetreid, siis muutuvad teised vastavalt vajadusele kaasa. Enne reaalsusele sarnaneva mudeli koostamist on Joonis 2.3 võimalik näha *multibody* keha.



Joonis 2.3 Kandle *multibody* keha

Järgnevalt on võimalik genereerida *multibody*-st üksikud detailid. Lisaks oli tarvis uurida pilte, kirjandust ja olemasolevat kannelt, et luua tõetruu mudel kandlest, mis on nähtav Joonis 2.4.



Joonis 2.4 Lõplik mudel kandlest (pilt on 3D-renderdatud)

Üheks väga ajakulukaks osaks oli kandlekeelte modelleerimine, kuna tegemist on detailidega, mis on loomulikus olekus pehmed ja võtavad oma kuju vastavalt vajadusele. Keeled on pingule tõmmatud ja jooksevad mööda kindlat rada mööda. Oli oluline, et erinevad detailid (virblid, roobiavad, tihvtid) vastaksid reaalsusele, kuid sobiks kokku ka omavahel. Mudeli loomisel on silmas peetud ka seda, et mudelit oleks võimalik kasutada ka detailide valmistamiseks, see tähendab, et silmas on peetud täpsust, detailide omavahelist sobivust, ja võimalusel tootmise lihtsustamist.

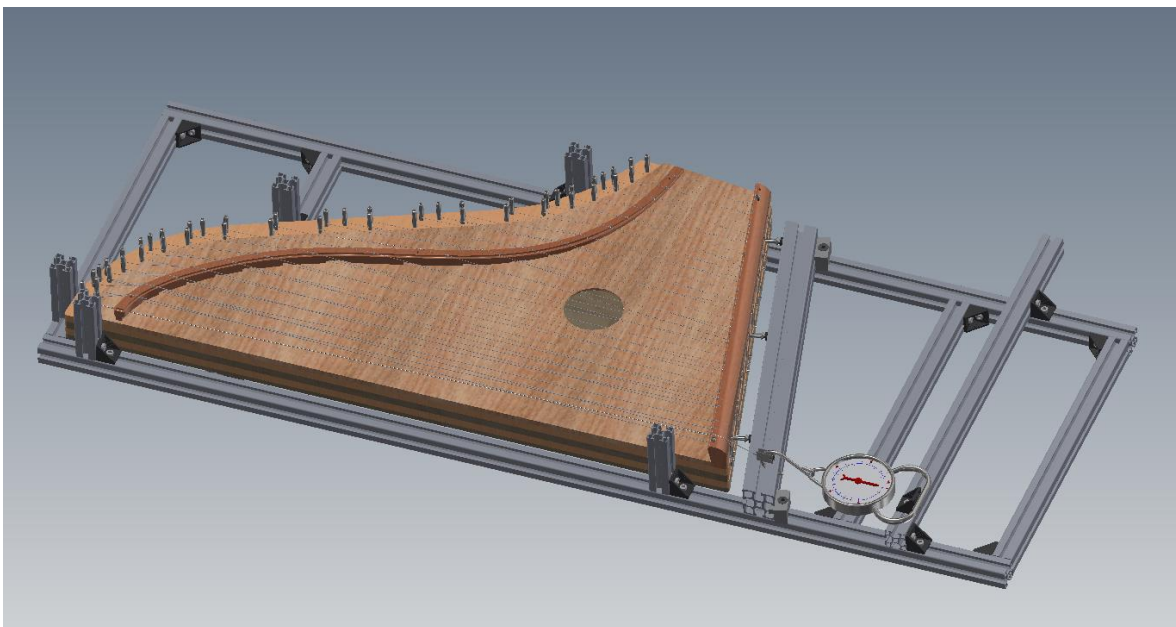
Joonis 2.4 jaoks on kandle lõplikust 3D mudelist teostatud 3D-renderdus, mis on loonud mudelist realistlikuma kujutuse. 3D-renderdus on teostatud Autodesk Fusion 360 programmis.

3. KANDLELE MÕJUVAD PINGED JA TUGEVUSANALÜÜS

Järgnev peatükk kirjeldab kandlele teostatud analüüse. Selleks, et oleks võimalik teha FEM, oli vaja eelnevalt leida kandlele mõjuvad jõud, mida tekitavad kandle peale tõmmatud ja häälestatud keeled. Koormuste mõõtmiseks teostati katse ning loodi mudel rakisest, millega koormuseid mõõta. Tugevusanalüüs viidi läbi Autodesk Inventor Professional 2021 programmis oleva FEA kasutajaliidesega.

3.1 KEELEPINGETE MÕÕTMINE

Keelepingete mõõtmiseks disainis ja modelleeris töö autor rakise, mille abil on hõlpsasti võimalik mõõta kandlele mõjuvaid pingeid, mida tekitavad õigesse helikõrgusesse häälestatud keeled. Joonised on lisatud töö lõppu (vaata Graafilise osa). Joonis 3.1 on toodud pilt kandlest koos rakisega.

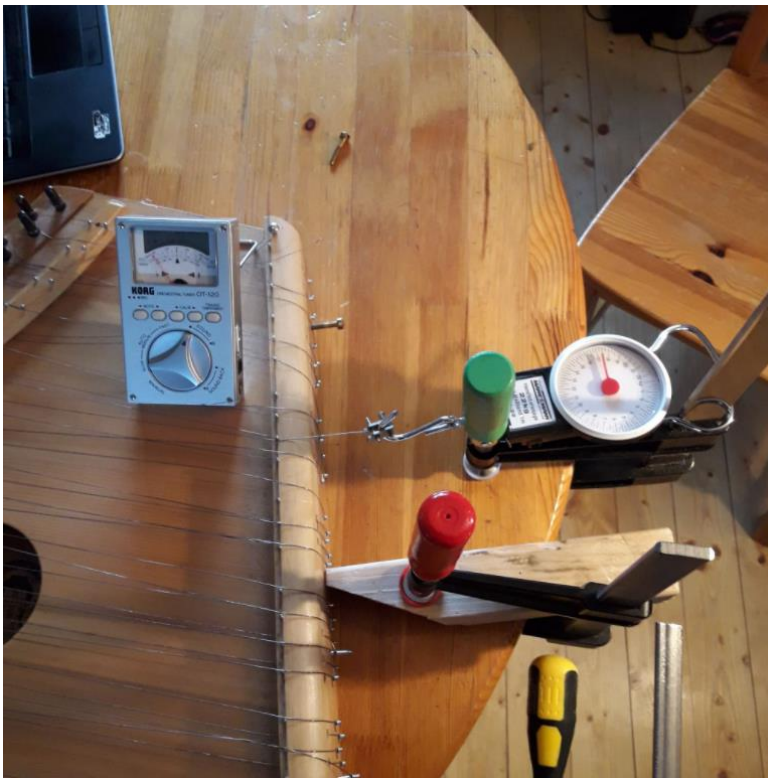


Joonis 3.1 Kannel koos rakisega

Rakise loomisel on arvesse võetud lihtsust, komponentide kättesaadavust ja ka seda, et valmistamine ei oleks keeruline. Rakise valmistamiseks on kasutatud Miniteci

alumiiniumprofiile ja teisi Miniteci ostukomponente. Keelepingete mõõtmiseks kinnitatakse kannel rakisesse, Miniteci profiilist lõigatud osasid saab üksteise suhtes liigutada ning seega on kannelt võimalik rakisesse liikumatult fikseerida. Keelepinge mõõtmiseks võetakse kandlekeel paremast otsast tihvti küljest lahti ning kinnitatakse digitaalse rippkaalu külge, mis samuti pingestatakse. Kui keel on pingestatud, häälestatakse see häälestaja abil õigesse helikõrgusesse ja loetakse kaalult lugem ning saadakse keele poolt tekitatav jõud kilodes. Seejärel teisendatakse jõud Njuutonitesse (N).

Kuna rakise valmistamisega ei jõutud käesoleva töö raames valmis, siis leiti võimalus lahendada esmaste mõõtmistulemuste saamine kättesaadavamate vahenditega. Kiis katseandmete kogumiseks tuli otsus kinnitada kannel pitskruvidega kindlalt puust laua külge ja kasutada olemasolevaid vahendeid, et kinnitada keele parempoolsesse otsa rippkaal (vaata Joonis 3.2).



Joonis 3.2 Katse üles seadmine (autori foto)

Katse viiakse läbi selliselt, et kui kannel on kinnitatud kindlalt oma kohale (vaata Joonis 3.3) ning rippkaal (Joonis 3.4) on kinnitatud kindlalt keele parempoolsesse otsa ja tõmmatud pinge alla, siis hakatakse keelt kandle vasakpoolses küljes oleva virbli abil häälestama. Kui keel on hääles, siis loetakse rippkaalult näit ja saadakse seega teada,

millist pinget tekitab keel pillile. Kasutatud rippkaalu eeliseks on see, et jõudu rakendades ei liigu riputuskonks vedrukaalu kombel, vaid seisab paigal (ilmselt on kaalu sees elektrooniline jõuandur).

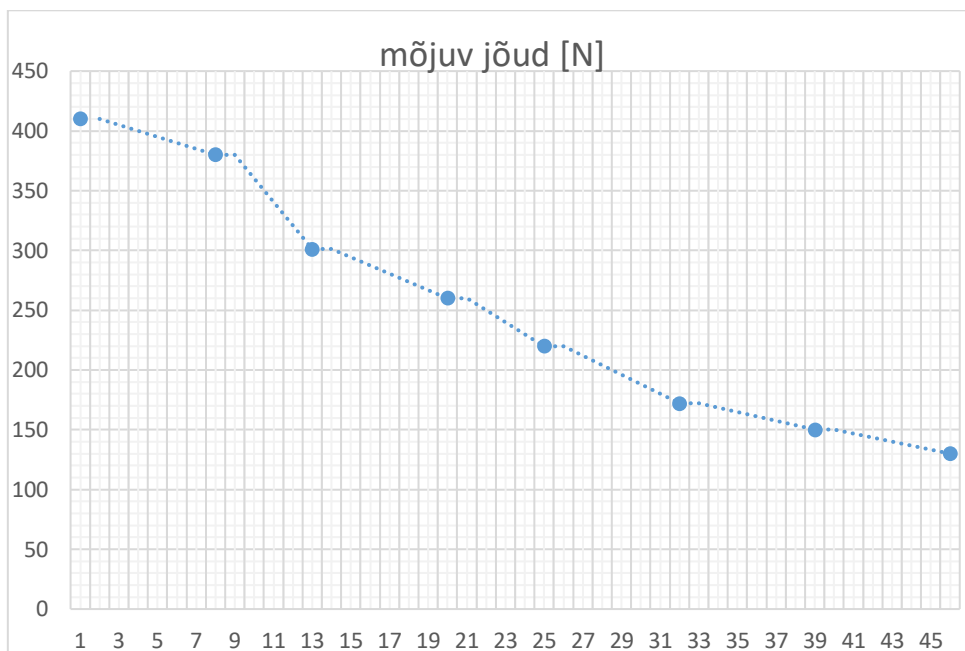


Joonis 3.3 Katse ülesseadmine (autori foto)



Joonis 3.4 Katses kasutatud rippkaal (autori foto)

Katse käigus võeti kaheksa lugemist ühtlaste vahedega ning Excelis graafikut luues, kasutas töö autor käsklust *moving average* ehk lugemite vahepealsed väärtused on leitud keskmise väärtuse abil (vaata Joonis 3.5).



Joonis 3.5 Kandlele mõjuv jõud, mida tekitavad kandlekeeled (x-teljel kandlekeele number, y-teljel kandlele mõjuv jõud)

Tabelis 3.1 on näha mõõtmistulemused, mis on saadud katsetuse tulemusena. Saadud andmete põhjal luuakse tugevusanalüüs. Keeli hakatakse kandlel lugema alates altpoolt mängimisasendi suhtes, keel number 1 on kõige jämedam, aga ka kõige pikem keel.

Tabel 3.1 Katseandmete tabel

Keele number	Tooni nimetus	Teraskeele läbimõõt [mm]	Mähistraadi läbimõõt [mm]	Mõjuv jõud [N]
1	c	0,700	0,300	410
2	cis	0,700	0,250	410
3	d	0,700	0,200	405
4	dis	0,700	0,200	400
5	e	0,650	0,150	395
6	f	0,650	0,150	390

Tabeli 3.1 jätk

7	fis	0,650	0,150	385
8	g	0,875		380
9	gis	0,850		380
10	a	0,800		360
11	ais	0,750		340
12	h	0,700		320
13	c ¹	0,650		301
14	cis ¹	0,650		300
15	d ¹	0,600		295
16	dis ¹	0,600		288
17	e ¹	0,600		280
18	f ¹	0,600		275
19	fis ¹	0,600		268
20	g ¹	0,600		260
21	gis ¹	0,550		260
22	a ¹	0,550		250
23	ais ¹	0,550		240
24	h ¹	0,550		230
25	c ²	0,550		220
26	cis ²	0,550		220
27	d ²	0,500		210
28	dis ²	0,500		205
29	e ²	0,500		195
30	f ²	0,500		190
31	fis ²	0,500		180
32	g ²	0,450		172
33	gis ²	0,450		170

Tabeli 3.1 jätk

34	a ²	0,450		168
35	ais ²	0,400		165
36	h ²	0,400		160
37	c ³	0,400		158
38	cis ³	0,400		154
39	d ³	0,400		150
40	dis ³	0,400		149
41	e ³	0,400		145
42	f ³	0,400		142
43	fis ³	0,350		140
44	g ³	0,350		137
45	gis ³	0,350		135
46	a ³	0,350		130
			Jõudude summa	11517 (N)

Alapeatükis 1.4 on selgitatud instrumentide häälestamise põhimõtet ja selle olulisust. Võib aga juhtuda, et teadmatu pillikasutaja häälestab instrumenti valesti. Järgnevalt on välja arvatud olukord, kui näiteks väikese oktaavi a keelt peaks valesti häälestama ja seda liiga pingule kruvitakse. Aluseks on võetud teadmine, et kannelde puhul on kasutatud klaverikeeli, mille tõmbetugevus on kordades suurem kui tavalisel terasel, 0,8 mm traadi puhul on see minimaalselt 2110 N/mm² ehk MPa [12]. Väikese oktaavi a keele diameeter on 0,8 mm (Tabel 3.1). Keele purunemiseks vaja mineva jõu saab välja arvutada koormuse valemiga, valem 3.1.

Koormus

$$\sigma = \frac{F}{A'} \quad (3.1)$$

kus

σ – tõmbetugevus, MPa,

F – maksimaalne jõud, N,

A – traadi ristlõike pindala, mm².

Keele purunemiseks vajaminev jõud on seega (tuletades valemist 3.1):

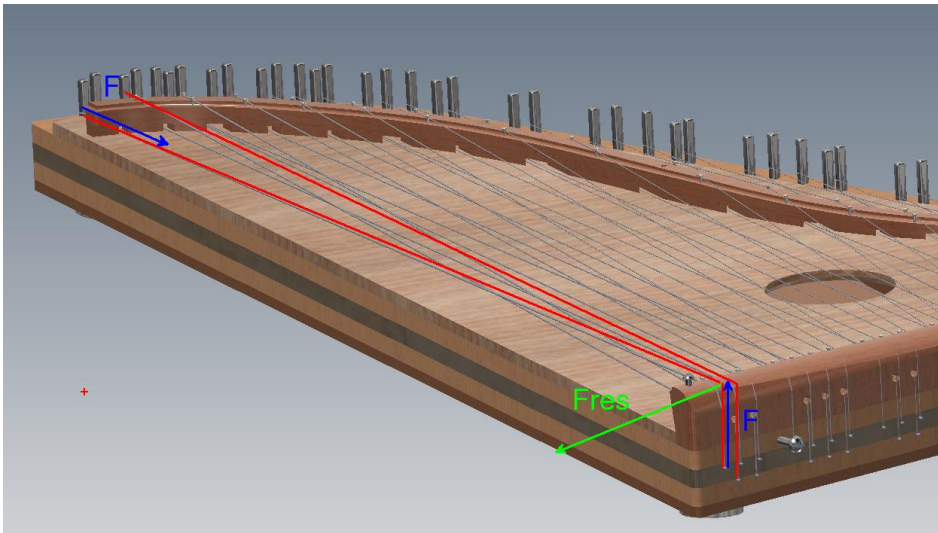
$$F = \sigma \cdot A = \sigma \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 2110 \cdot \frac{\pi 0,8^2}{4} = 1060 \text{ (N)}$$

Kuna väikese oktavi a ehk kümnenda keele normaalne keelepinge õige häälestuse korral on 360 N ja keel puruneks alles siis, kui rakendada sellele 1060 N, siis võib eeldada, et isegi valesti häälestama hakates ei purune keel väga kiiresti, vaid selleks oleks vaja rakendada väga suurt jõudu. Seetõttu on võimalik järeldada, et isegi oskamatu pillikasutaja saab enne sellise pinge tekitamist aru, et midagi on valesti või puuduks lihtsalt vajaminev jõud sellise pinge keelele pealekeeramiseks.

3.2 TUGEVUSANALÜÜS

Tugevusanalüüsi eesmärgiks oli luua lihtsustatud simulatsioon, mille abil oleks võimalik näha põhilisi nõrkuseid kandle eksisteerivas disainis. Teadaolevalt on murekohtadeks kandle disainis esiteks see, et pealmine kõlalaud on kandlekeelte poolt tekitatud pingete tõttu ajapikku n-ö kummi tõmmanud ning kandle steegi poolsesse serva on raami sisse tekkinud rebendid.

Simulatsiooni lihtsustamiseks sai otsustatud, et mõistlik oleks eemaldada roop ja keelte liikumine üle roobi, kuna sellega seoses ei ole ühtegi probleemi esinenud. Joonis 3.6 on näidatud lihtsustatud skeem tugevusanalüüsi teostamiseks.



Joonis 3.6 Lihtsustatud skeem tugevusanalüüsi teostamiseks

Joonis 3.6 on näidatud punase joonega traadi lihtsustatud kuju, mis ühest otsast ehk vasakult poolt kinnitub virbli külge ja paremalt poolt kinnitub tihvti külge. Joonis 3.6 on sinisega märgitud mõlemast traadi otsast mõjuv traadi enda suunaga paralleelne tõmbejõud, mille väärtus on katsetabelis igale keelele vastavalt mõõdetud või välja arvestatud. Steegile toetuvasse nurka mõjub aga resultantjõud, mille saab välja arvutada koosinusteoreemiga, valem 3.2.

Koosinusteoreem

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \times \cos(\alpha), \quad (3.2)$$

kus

a – kolmnurga otsitav külge, mm,

b – kolmnurga teadaolev külge, mm,

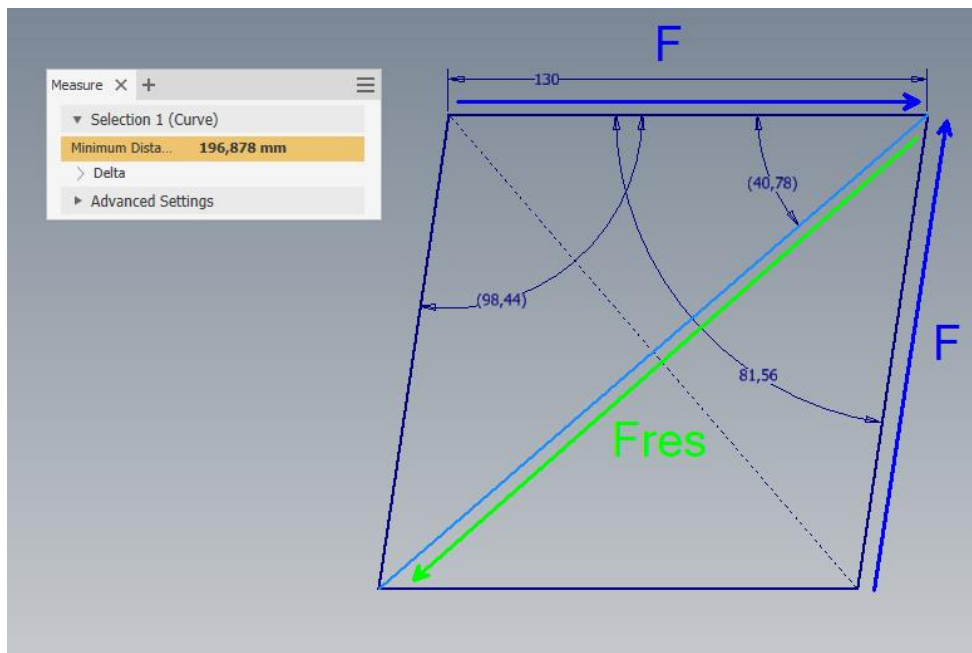
c – kolmnurga teadaolev külge, mm,

α - kolmnurga teadaolevate külgede vaheline nurk, α° .

Selleks, et koosinusteoreemi oleks lihtsam arvutada, kuna seda arvutust oli vaja 46 korda teha vastavalt keelte arvule, sest pea iga keel mõjutas kannelt erineva jõuga ja tekkinud nurk oli samuti veidi erinev, sai loodud Inventoris *sketch*, mida sai vastavalt vajadusele muuta, et resultantjõu väljaarvutamine võimalikult hõlpsaks muuta.

Kui igale keelele mõjus mõlemast otsast jõud, mis on välja toodud tabelis 3.1, siis resultantjõu leidmiseks kasutatud koosinusteoreemi rakendati selliselt, et a – kolmnurga otsitav külge (Joonis 3.7 märgitud roheline noolega), b ja c – kolmnurga teadaolevad küljed (Joonis 3.7 märgitud siniste nooltega), mille väärtuseks on keelele mõjuv

teadaolev jõud. Kui mudelist mõõta nurk, mis *sketchil* on väärtusega $81,56^\circ$, siis α on $98,44^\circ$. Joonis 3.7 on näha viimasele ehk neljakümne kuuendale keelele teostatud arvutus, et leida resultantjõud ning selle leiab *sketchilt* selliselt, et tuleb vaid mõõta rohelise noolega tähistatud joon. *Sketchi* kasutamiseks tuleb seega *sketchile* märkida otsitava keele teadaolevad jõud (Joonis 3.7 130 N) külgedeks ja mõõta steegi juures olev nurk, milleks siinsel juhul on $81,56^\circ$.



Joonis 3.7 *Sketch* resultantjõu leidmiseks

Selleks, et kontrollida, et *sketchi* tulemusi saab uskuda ning et sellisel teel leitav väärtus vastab koosinusteoreemi abil leitud väärtusele, teostatakse kontroll valemi 2.1 põhjal:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \times \cos(\alpha) = 130^2 + 130^2 - 2 \cdot 130 \cdot 130 \times \cos(98,44^\circ)$$

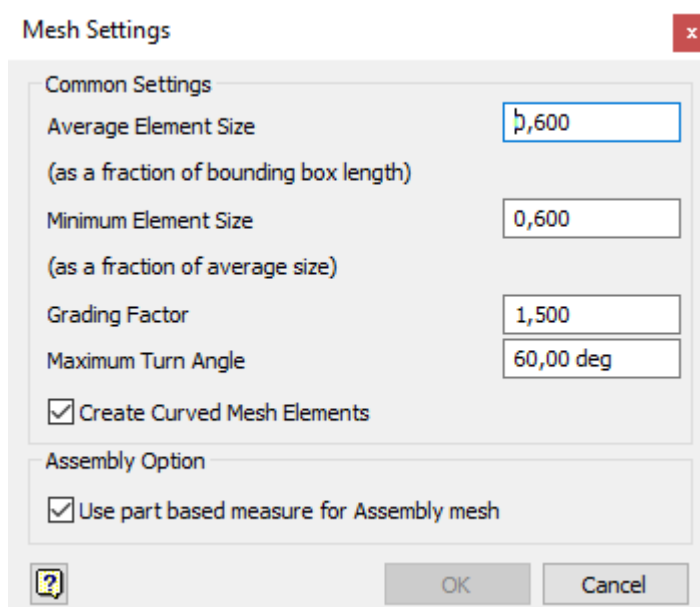
$$a = \sqrt{130^2 + 130^2 - 2 \cdot 130 \cdot 130 \times \cos(98,44^\circ)} = 196,878 \text{ (mm)}$$

Võrreldes *sketchi* tulemust valemi 2.1 põhjal tehtud arvutusega, on tulemus täpselt sama. Seega ei ole oluline arvutada koosinusteoreemi abil ükshaaval välja kõikide keelte resultantjõud, vaid on samaväärselt hea kasutada *sketchi*.

Ineventor Professional 2021 programmis on olemas FEA liides, mis võimaldab luua mudelitele vastavalt kasutaja parameetritele staatilisi analüüse. Esimene probleem seoses tugevusarvutuse loomisega ilmnis seoses materjalikasutusega. Töö autoril on

varasem kogemus staatiliste tugevusanalüüside loomisega metallkonstruktsioonidele, kuid puit on materjalina palju keerulisem. Nimelt on puidu puhul tegu anisotroopse ja ortotroopse materjaliga, mis tähendab seda, et puidukiudude suunast ja sellest, kuidas puu on kasvanud ning kuidas puu on lõigatud, sõltuvad puidu omadused ning puidu mehaanilised omadused on erinevad eri suundades – pikisuunaliselt, radiaalselt ja tangentsiaalselt. [13][14]

Selleks, et simulatsiooni oleks võimalik jooksutada, ja Inventor seda ortotroopse materjaliga ei võimaldanud, oli vajalik luua uued materjalid kandle raamile. Materjalide loomisel muudeti puit isotroopseks materjaliks, kus kõigis suundades on puidul samasugused omadused, kuid arvestati siiski korrektsete mehaaniliste omadustega. Tugevusanalüüsi teostamiseks tehtud *mesh*'i andmed on nähtavad Joonis 3.8.

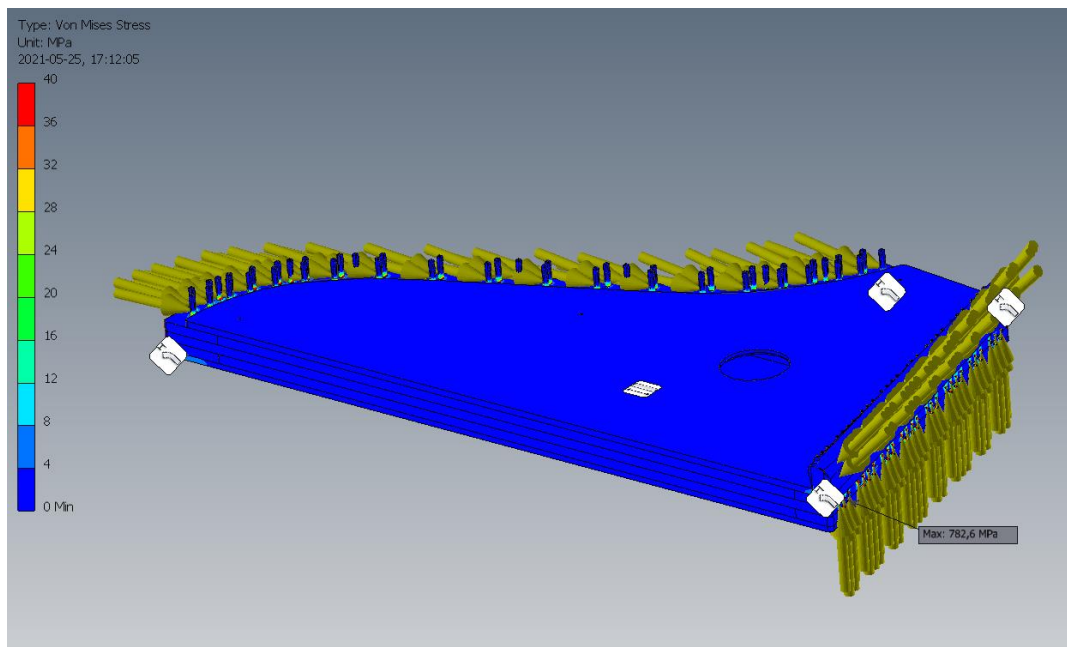


Joonis 3.8 *Mesh*'i seaded tugevusanalüüsi tegemiseks

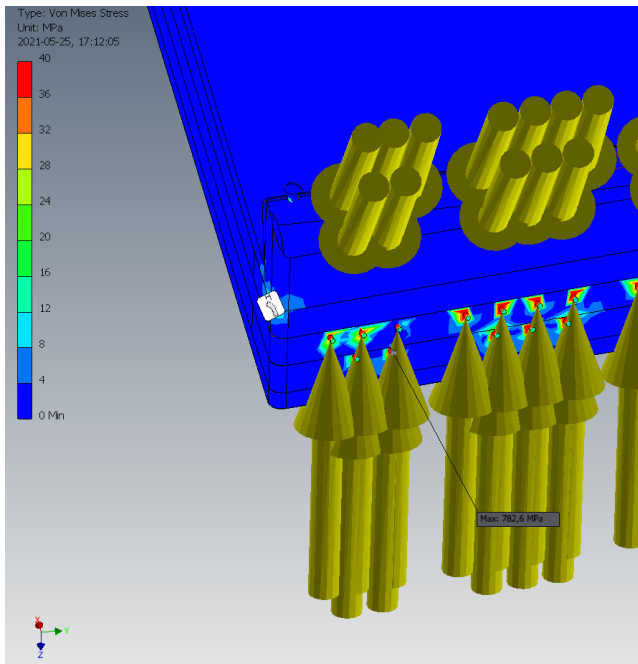
Kandlele on lisatud *frictionless constraint* põhjale ehk ära on võetud võimalus liikuda üles-alla suunas ning veel on lisatud nelja punkti *fixed constraint*, mis ei luba neil punktidel mitte üheski suunas liikuda. Mõte sellise kinnituse taga oli selline seetõttu, et simulatsiooni teostamiseks peab 3D-mudel olema „kinni“, aga samas ka piisavalt lahti, et tulemused seetõttu ei kannataks.

3.2.1 Tugevusanalüüsi tulemused ja järeldused

Tugevusanalüüsi üheks vaadeldavaks väljundiks on pinged, vaata Joonis 3.9. Maksimaalseks pingeks on 782,6 MPa, vaata Joonis 3.10. Rohkem pilte pingete kohta vaata Lisast 4 Tugevusanalüüsi tulemused, pinged. Tulemuste paremaks vaatlemiseks on vasakus servas värviriba, kus sinise värviga on tähistatud vähemohtlikud ja punasega ohtlikumad pinged (vastavalt MPa-dega tähistatud). Manuaalselt on seadistatud, et punase värviga on tähistatud kõik pinged, mis lähenevad juba 40 MPa-le ning seda seetõttu, et puit on väga keeruline materjal, mille vastupidavust on raske hinnata, teadmata selle niiskussisaldust, vanust, kuidas ja kust see täpselt on välja lõigatud. 40 MPa on see väärtus, mille puhul kehvemate omadustega puit peaks juba pingete tõttu kannatama.

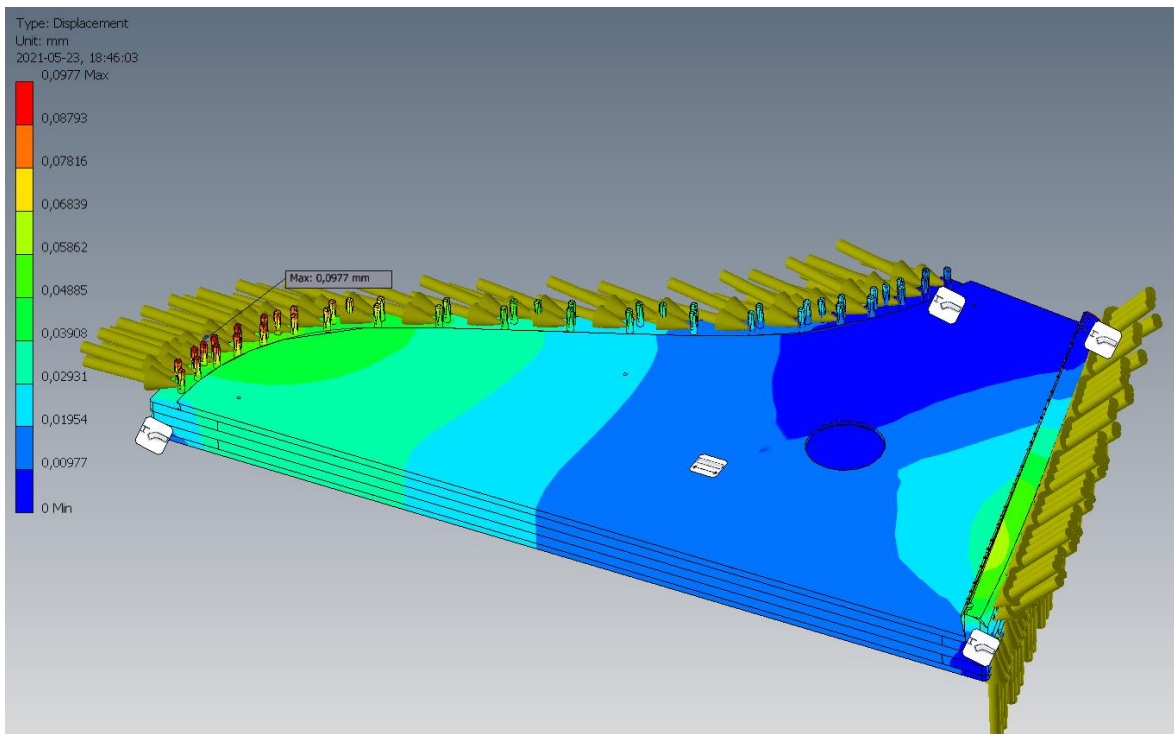


Joonis 3.9 FEM tulemus - pinged



Joonis 3.10 Maksimaalne pinge

Teiseks tugevusanalüüsi vaadeldavaks väljundiks on läbipaine, vaata Joonis 3.11. Rohkem pilte läbipainde kohta vaata Lisast 5 Tugevusanalüüsi tulemused, läbipaine.



Joonis 3.11 FEM tulemus – läbipaine

Saadud tulemusi tuleks vaadelda esiteks sellest vaatenurgast, et tegemist on staatilise analüüsiga. See tähendab, et analüüs ei võta arvesse seda, et pinged mõjuvad instrumendile pidevalt ja nii mitmeidkümneid aastaid järjest, ning lisaks häälestatud keeltele tekivad lisapinged ka kannelt mängides. Joonis 3.10 oleval pingete pildil on näha, kuidas tihvtid kandle paremas servas on kõige suuremate pingete all. Tundub ka tõenäoline, et pikaaegse pideva koormuse all olles on rebenemine loogiline ja just tihvtide juurest on täheldatud Klaverivabriku kannelde puhul rebenemist. Selleks, et olukorda veidikene parandada, on enamus kanneldele lisatud raami peale tihvtide kohale veel kiht materjali (nähtav Joonis 1.5), mille kiud on teistpidi ning võiks aidata seega esialgset rebenemist ära hoida.

Läbipainde pildi (Joonis 3.11) põhjal võiks öelda, et kuigi maksimaalne läbipaine on väga väike (0,0977 mm), siis on selgelt näha, kuidas instrument hakkab painete tagajärjel läbi painduma. Kui arvestada juurde veel seda, et instrumendi eluiga võiks olla väga pikk, maailma vanim töökorras viiul pärineb näiteks 16.sajandi keskpaigast ([15]), siis võiks öelda, et deformatsioon on suur ja muutub aastatega tõenäoliselt suuremaks.

4. KROMAATILISE KONTSERTKANDLE TULEVIK

Kuigi kandleraam võiks vajada täiendavaid ja detailsemaid tugevusarvutusi, tuleks silmas pidada ka seda, et kromaatileine kontsertkannel on enda arenemise loos üsna algstaadiumis ja ei ole seetõttu võrreldav näiteks viuliga, mis tõenäoliselt loodi juba umbes 16.sajandil olemasolevate keelpillide omadusi ühildades. [21] Kromaatileine kontsertkandle loomisajaks võiks lugeda aga 20.sajandi keskpaika. See tähendab, et kandlel ei ole olnud nii palju aega areneda ja läbi pillimeistrite ning instrumentalistide käe läbi täieneda – sellest omakorda võib järeldada, et kandle senine kuju ja ülesehitus vajaks tulevikus täiendamist ja arendamist.

Järgnevas peatükis tuleb juttu erinevatest komposiitmaterjalidest, mis on katsete tulemusel osutunud mehaaniliselt paremaks kui puit, ning ühtlasi antakse ülevaade komposiitmaterjalidest kasutamisest akustiliste instrumentide valmistamise võtmes.

4.1 KOMPOSIITMATERJALID

Järgnevas alapeatükis vaadeldakse erinevaid komposiitmaterjale, millele oleks potentsiaali leida kasutust ka akustiliste instrumentide valmistamisel, kuid eelkõige oleks neist abi kromaatileine kontsertkandle disaini parandamisel.

4.1.1 Puit + alumiinium + vaik

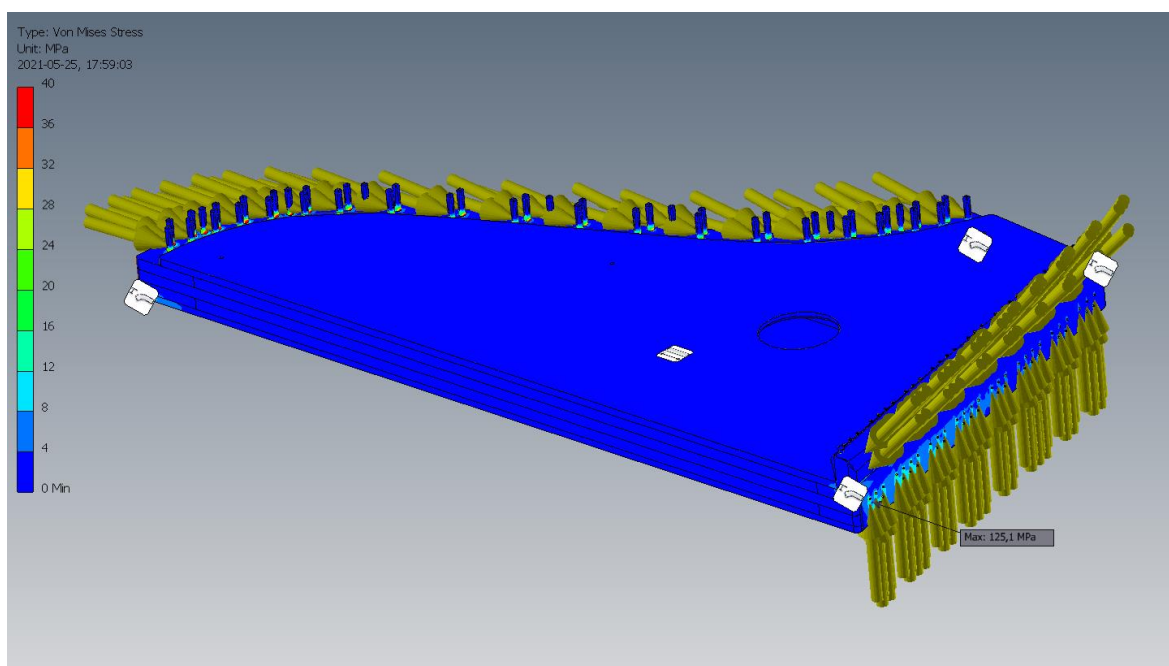
Alumiinium on suhteliselt uus materjal, mis avastati 19.sajandi alguses ja mida hakati puhtal kujul tootma esimest korda 1827.aastal. Sellel ajal oli tootmise protsess veel nii keeruline, et alumiiniumi tööstuslik tootmine ei olnud vaeva väärt. Alles ca 20 aastat peale seda hakati seda materjali rohkem tootma ning alumiinium hakkas rohkem kasutust leidma. [16]

Alumiiniumi kui materjali eelised pilliehituse juures [16]:

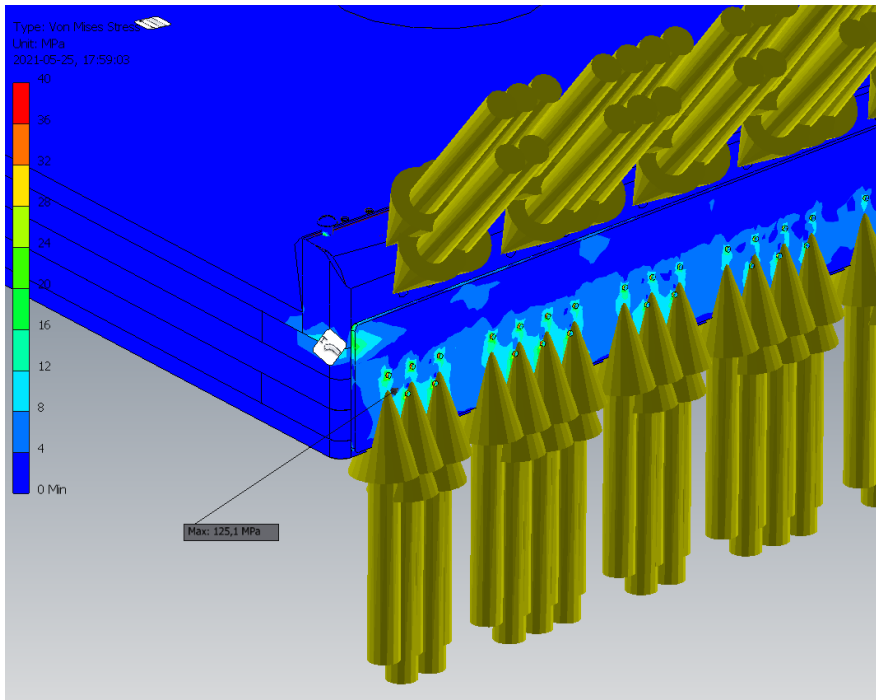
- Tegu on üsna pehme materjaliga, mida on lihtne töödelda ja seega on tihti eelistatud käsitöö puhul kasutada.
- Kui alumiinium puutub kokku hapnikuga, siis selle pealne kiht oksüdeerub ja kaitseb materjali ennast sügavama rooste eest.
- Alumiinium on väga kerge.

Alumiiniumit on võimalik puiduga ühendada, kasutades selleks vastavat liimi või vaiku. Puit peab olema eelnevalt karestatud ning alumiinium peaks olema puhastatud igasugusest õlist ja mustusest, mis tootmise käigus alumiiniumi pinnale sattunud võib olla, kasutades selleks spetsiaalset vahendit. Jälgides neid põhilisi samme, peaks olema võimalik üsna kerge vaevaga liita alumiinium puiduga, et luua struktuurselt tugevam ja stabiilsem materjal. [16][17]

Alumiiniumi ja puidu liitmist kasutades saaks olemasolevat kandle disaini edendada kandle paremast servast, kus tugevusanalüüside käigus selgus, et tihvtide juures on väga suured pinged. Selleks, et kontrollida idee toimimist, sai uuesti simuleeritud 3.peatükis teostatud tugevusanalüüs (jättes kõik parameetrid samaks), kuid selliselt, et kandle paremasse serva on lisatud 2 mm paksune alumiiniumist plaat. Simulatsiooni põhjal võiks järeldada, et sellest on tõesti väga palju kasu, tuues maksimaalse pinge 782,6 MPa pealt alla 125,1 MPa-ni, vaata Joonis 4.1 ja Joonis 4.2.

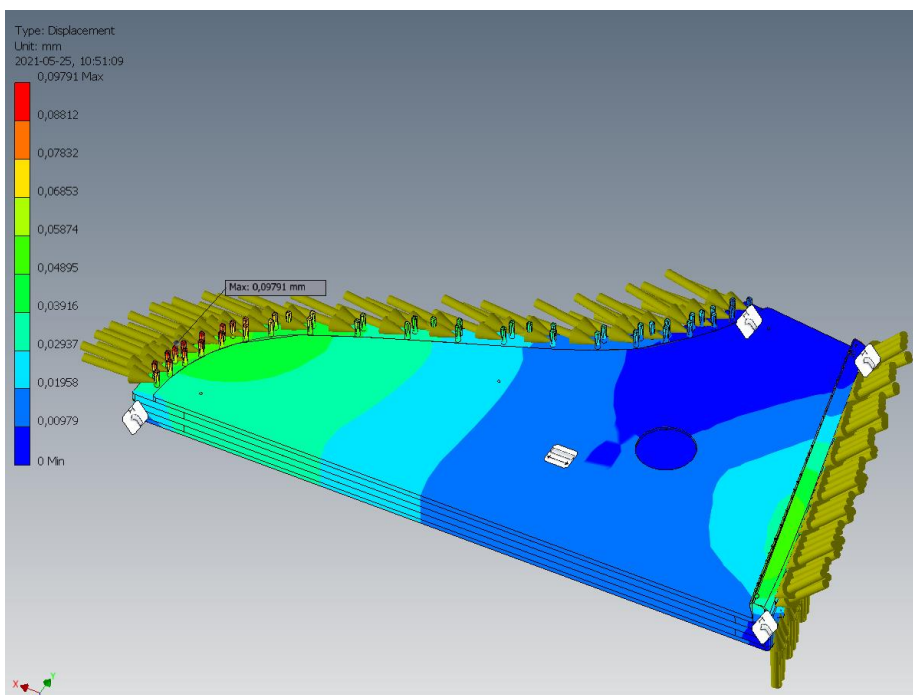


Joonis 4.1 FEM tulemus alumiiniumist plaadiga – pinged



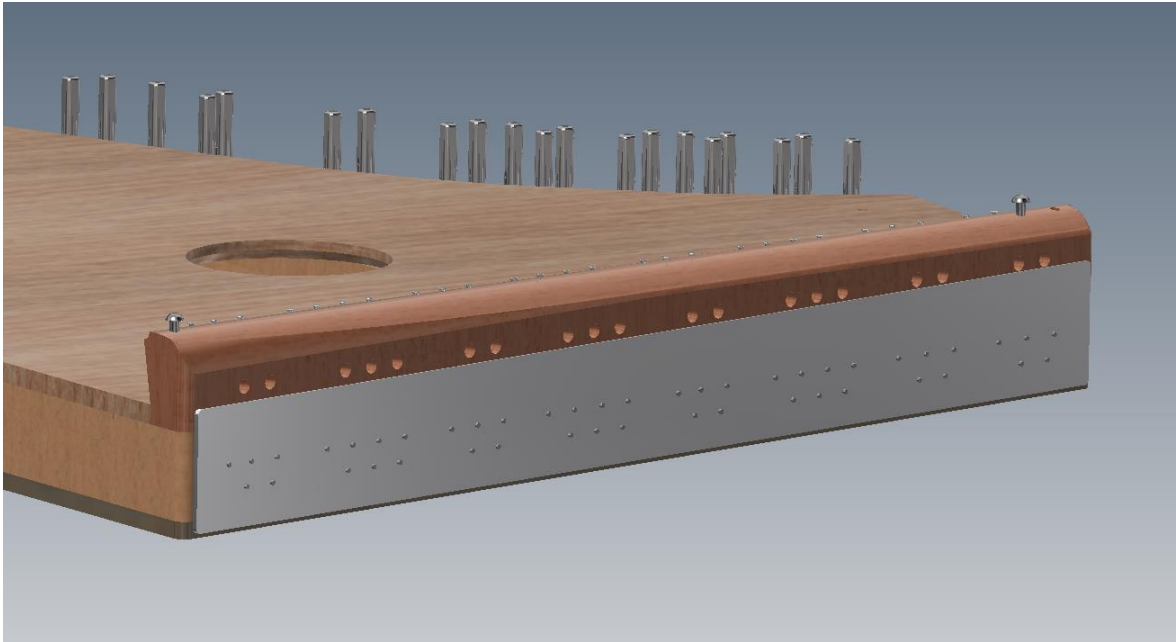
Joonis 4.2 FEM tulemus alumiiniumist plaadiga – maksimaalne pinge

Paslik oleks siinkohal vaadelda ka läbipainet, mis aga 3.peatükis saadud tulemusega võrreldes midagi paremaks ei muutnud. Tasub märkida, et maksimaalse läbipaine pilt ei muutunud ning maksimaalse läbipaine väärtus jäi põhimõtteliselt samaks, vaata Joonis 4.3.



Joonis 4.3 FEM tulemus alumiiniumist plaadiga – läbipaine

Kuigi pingete pilt paranes tunduvalt, siis kindlasti instrumendi disainis ei oleks alumiiniumit päris nii lihtsalt võimalik kasutada nagu seda on tehtud siinkohal tugevusarvutuste simuleerimiseks. Tuleks siiski arvestada, et lisaks pilli mehaanilisele ja akustilisele poolele on instrumentide puhul väga oluline nende välimus ning alumiiniumi lisamine sellise plaadina (vaata Joonis 4.4) ei ole esteetiliselt meeldiv. Siiski aga võib tugevusanalüüsist järeldada, et alumiiniumi inkorporeerimine tundub teoreetiliselt tõhus ja lihtne viis, kuidas olemasoleva disaini ühte murekohta parandada.



Joonis 4.4 Kannel alumiiniumist plaadiga

4.1.2 Süsinikkiud + vaik

Süsinikkiudu tasuks kannelde tulevikku silmas pidades vaadelda kui materjali, mida oleks võimalik kasutada kõlalaua arendamise eesmärgil. Siinkohal tasuks rääkida just süsinikkiudude kasutamisest (mitte klaaskiudude ega kevlari), sest olgugi et süsinikkiud on eelnimetatud variantidest kalleim, sobib ta muusikainstrumendi valmistamiseks oma omaduste poolest kõige paremini. [18][19]

Süsinikkiust valmistatud komposiitmaterjalid on 70% kergemad kui teras, 40% kergemad kui alumiinium ja umbes 15% kergemad kui klaaskiust valmistatud komposiidid. Süsinikkiud on väga kerge, jäik ja tugev. [18]

Süsinikkiudu on võimalik kasutada erinevatel viisidel, kuid instrumentide disainis leiab peamiselt kasutust komposiitmaterjalina, mis on loodud süsinikkiust riide liitmisel vastava vaiguga. Tavaliselt näeb tootmisprotsess lihtsustatult välja selline, et süsinikkiust riie pannakse vastavasse vormi ja seejärel immutatakse/ kallatakse üle vaiguga. Samuti leiab kasutust ka *prepreg* riie, mis immutatakse vaiguga juba riide tootmise käigus. *Prepreg* on süsinikkiu n-ö tippklass, mida kasutatakse muuhulgas ka F1 ja teiste ralliautode kerede tootmiseks. [20]

4.2 KOMPOSIITMATERJALID AKUSTILISTE INSTRUMENTIDE EHTUSES JA DISAINIS

Kuigi käesoleva töö muhul on tegu uurimusega kromaatilises kontsertkandlest, siis komposiitmaterjalide kasutamise vaaternurgast oleks mõistlik vaadelda ka teisi keelpille, eelkõige tšellot. Tšellol on tunduvalt pikem ajalugu ning tegemist on väga populaarse instrumendiga, mis oma tämbri ja suuruse poolest on kandlega sarnane ja on seetõttu heaks aluseks, et vaadelda, kas kandle ehituse ja valmistamise puhul oleks võimalik sarnaseid ideid kasutada.

1976.aastal oli Ovation esimene ettevõtte, kes valmistas süsinikkius kõlalauaga kitarr. Füüsikaseaduste kohaselt tähendab õhem kõlalaud paremat helikvaliteeti. Samas paneb füüsika piiri ette minimaalsele kõlalaua paksusele, sest kõlalaud peab olema piisavalt paks, et sellele saaks kinnitada roobi, mille külge omakorda kinnitatakse pingestatud keeled ja roop ning kõlalaud peavad vastu pidama kitarr mängimisest tingitud pingetele. Kuusest valmistatud kitarr kõlalaua minimaalne paksus võiks olla 3,18 mm kuni 2,79 mm. Ettevõttes Ovation töötavad insenerid disainisid ja ehtasid kõlalaua, mis oli rohkem kui poole õhem kui kuusest valmistatud kõlalaud. Selleks kasutati 1 mm paksust kasest väljalõigatud lehte, mis paigutati *sandwich* meetodil kahe ühesuunalise süsinikkiust NCT301-1 34-700 G150 *prepreg* (tähendab seda, et süsinikkiust kangas on juba eelnevalt vaiguga immutatud ning sedasi on loodud tahke lehtmaterjal) kihi vahele, kihi paksuseks on 0,0127 mm. Kask ja süsinikkiudmaterjalid liidetakse omavahel taas vaiguga ja luuakse materjal, mille kogupaksus on 1,37 mm. Seejärel kõvastub kogu materjal 250°C juures. [22]

Kuigi komposiitmaterjalidest toodetud kitarrid on väga suure sammu astunud oma puidust eelkäijast eemale, siis võib väita, et komposiitkitaridel mängivad kitarristid ja inimesed, kes ostavad komposiitmaterjalist kitarrid, puutuvad ka muusikaliselt kokku eksperimentaalsemate ja innovaatilisemate stiilide ja pillidega. Muusikute jaoks, kes mängivad teisi keelpille (näiteks viiul, vioola, tšello, kontrabass), on need instrumendid sügavalt seotud traditsioonidega ja mängivad suure tõenäosusega klassikalist või klassikalise suunitlusega muusikat ning sellisel juhul on suure tõenäosusega ka instrumentide kõrgeimaks standardiks Stradivariuse pillid. Stradivariuse instrumendid on 17. ja 18. sajandi jooksul valmistatud pillid Stradivari perekonna poolt ning tegemist on väga õrnade ja hinnaliste instrumentidega. Kuid Luis Leguia, kes oli tšellist 44 aastat, on öelnud, et on müünud oma ettevõttes Luis & Clark alates 1990ndate keskpaigast alates üle 1100 süsinikkiust komposiitinstrumenti, millest enim, tšellosid (umbes 700). [22]

Luis Leguia toob välja, et Luis & Clark poolt disainitud ja toodetud süsinikkiust tšellode tugevuseks on stabiilsus mõõtmistes. Leguia räägib, et on näinud kvaliteetseid ja väga hinnalisi tšellosid, mille puhul on kõlalaud koos keelte kinnitamiseks mõeldud roobiga rohkem kui 10 mm läbi vajunud. Läbivajumine on juhtunud keeltepingete tõttu ning aastatepikkuse mängimise tagajärjel. Süsinik, mis on aga palju jäigem, peab pingetele palju paremini vastu ja võimaldab luua instrumendi, mille disain jääb truuks traditsioonidele ning on väga hinnatud rikkaliku helitämbriga. [22]

Järgnevalt on Joonis 4.4 ja Joonis 4.5 võrdlusena toodud vastavalt Stradivariuse tšello ning Luis & Clark poolt loodud tšello. Leguia toob välja selle, et süsinikkiust tšello puhul ei ole vaja kõlakasti külgedele lisada karniise, mis puidust tšello puhul on vajalikud struktuuri tugevdamiseks, kuna need summutavad veidi kõla. Karniiside väljajätmine disainist süsinikkiust tšello puhul aitab kaasa selle kõla parendamisele ning peaks olema ka kasutajale mugavam. [22] [24]



Joonis 4.5 Stradivariuse tšello [23]



Joonis 4.6 Luis & Clark'i poolt loodud tšello [24]

Eelnevalt antud ülevaadet tšellost ja komposiitmaterjalide kasutamisest tšello disainis on oluline vaadelda ka kontsertkandle disaini ja selle tuleviku võtmes. Tšellot on hea võrrelda kandlega seetõttu, et tšello diapasoone sarnaneb kandlele – tšello neljast keelest madalaim on väikese oktaavi c ([25]) ning kandlel samuti. Seetõttu on võimalik mõningasi paralleele luua pilli suuruse või ka kõlalaua paksuse osas. Samas peaks siiski arvesse võtma ka seda, et tšellol on vaid neli (erandkorras ka viis) keelt, kuid

kontsertkandlel on keeli 46. Tšello kõlalaua paksus on umbes 3,9...5,5 mm. Kandle kõlalaua paksus on Klaverivabriku disaini puhul 8 mm.

Tugevusanalüüsi (vaata alapeatükk 3.2.1) tulemusel jõudis töö autor järeldusele, et kandle kõlalaud võib tõesti ajapikku hakata läbi painduma. Võib julgelt eeldada, et kui kandle kõlalaud disainida süsinikkiust, saaks selle paksust tunduvalt vähendada, samal ajal kandle konstruktsiooni jäigemaks muutes. Õhem kõlalaud võiks teoorias tähendada ka paremat tämbrit.

Komposiitmaterjalide kasutamine kandle ehituses võib esile tuua probleemi, et lisaks kallile hinnale muutuks ka kandle välimus. Kuigi kontsertkannel on võrdlemisi noor pill, siis kannel üleüldiselt on eestlaste jaoks olnud väga pika ajalooga pill, mis on leidnud palju kasutust ja on eesti rahvamuusikas ning traditsioonides tähtsal kohal. Seda saaks lahendada aga selliselt, et komposiitmaterjale kasutada kohtades, mis ei ole väliselt nähtav või silma riivav. Üheks variandiks oleks kasutada süsinikkiust materjale kandle sisemuses.

5. TÖÖ TULEMUS

Käesoleva töö esimeseks tulemiks võib lugeda kandle modelleerimist detailsel tasandil. Kandlest on olemas nüüd tõelisusele vastav mudel. Mudelit on võimalik kasutada edaspidi kandle detailide tootmiseks, näiteks kasutades CNC freesimise võimalust. Käsitsi detailide valmistamine nõuaks päris suuri oskusi ja eelteadmisi, kuid CNC freesimist kasutades oleks kandle või selle osade valmistamine lihtsam.

Kandlele sai teostatud lihtsustatud tugevusanalüüsid, mis tõestasid töö alguses püstitatud probleemide olemasolu. Edasi on välja pakutud ideid ja lahendusi, kuidas kandle disaini täiendades või muutes oleks võimalik kannel instrumendina teha töökindlamaks ja paremaks.

EDASISED ARENDUSED

Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks oli luua olemasolevast kandlest mudel, millega teostada edaspidiseid analüüse, mis sai ka teostatud. Lisaks oli soov aga teostada lihtsustatud tugevusanalüüs, mille eesmärk oli leida kandle ülesehituses nõrgad kohad ning analüüsida, mida saaks teha paremini.

Käesolevat tööd saaks edasi arendada selliselt, et võetakse ette põhjalikum ja täpsem tugevusanalüüsi teostamine. Kuna puidule on palju keerulisem teostada tugevusanalüüse selle anisotroopse ja ortotroopse struktuuri tõttu, siis peaks kindlasti eelnevalt läbi mõtlema, kas see ka üldse vajalik on.

Peatükis 4 on välja toodud kandle arendamiseks ideed, sealhulgas ka komposiitmaterjalide kasutamise võimalus. Kindlasti oleks tarvis komposiitmaterjalide võimalusi edasi uurida ning teostada katseid ja analüüse, kas n-ö tehnilike materjalide kasutamine akustilise instrumendi puhul on mõeldav ja tulemuslik.

Lisaks käesolevas töös kõne all olnud teemadele, on kandlemängijate poolt välja tulnud probleem, et suurte keelepõngete tõttu on seda raskem mängida ning mängimine teeb sõrmedele haiget. Keelpillimängijate sõrmed küll harjuvad pillimänguga ära, luues sõrmeotstesse paksema nahakihi, kuid sellegipoolest oleks väiksemate põngete korral pilli parem käsitleda. Lisaks sellele on probleemiks kerkinud veel pilli mass, milleks on umbes 10 kg. Eesti suurima äriideede konkursi Ajujaht 2012 finaali jõudis tiim Hingepillipuu, kes just neid probleeme lahendada on püüdnud. Inspiratsiooni on saanud nii Klaverivabriku kandle disainist, kui ka mujalt.

KOKKUVÕTE

Tallinna Klaverivabrikus toodetud kromaatilised kontsertkanded on arendatud ja toodetud mitme põhimõttelise veaga, millest üheks on pilliraami rebenemine suurte pingete tõttu ja teiseks on pealmise kõlalaua ning üldiselt kogu instrumendi läbi paindumine. Käesolevas töös on olemasolev Klaverivabriku kannel skaneeritud, punktipilve abil on loodud detailne mudel ning mudeliga on teostatud lihtsustatud tugevusanalüüse, et tõestada eelmainitud probleemide olemasolu.

Kontsertkannel pole jõudnud areneda nii nagu paljud teised instrumendid, kuna pill on alles noor ning tegemist on pilliga, mis on välja mõeldud ja arendatud Eestis. Hetkel on Eestis vaid üks peamine ning Soomes üks ja Venemaal üks pillimeister, kes valmistavad Eesti kromaatilisi kandleid, kanded valmivad šabloonide abil käsitööna. Käesolevas töös loodud mudeli põhjal on võimalik kandle osasid toota, kasutades näiteks CNC freesimise võimalust, mis lihtsustab valmistamise protsessi oluliselt.

Magistritöös on teostatud lihtsustatud staatilised tugevusanalüüsid kandle konstruktsioonile. Selgus, et probleemid, milleks olid 1) puidu rebenemine tihtvite juurest ja 2) kõlalaua läbipaindumine, tulid ka simulatsioonidest välja, kuigi simulatsioonides ei saanud arvesse võtta puidu erinevaid omadusi eri suundades ning seda, et instrumendile mõjuvad suured koormused pikaajaliselt.

Magistritöös saavutati püstitatud eesmärgid, milleks olid a) skaneerida kannel ja luua punktipilve abil detailne 3D mudel; b) teostada lihtsustatud tugevusarvutused, et välja selgitada probleemsed kohad; c) uurida võimalusi kandle disainivigade parandamiseks. Esimese peatüki eesmärk on anda ülevaade kannelde ajaloost üldiselt, kontsertkandle ajaloost Klaverivabriku toodanguna ning kandle ehitusest ja heli tekitamise mehhanismist lähemalt. Teine peatükk hõlmab endas ülevaadet skaneerimisest ning selgitab põhjalikumalt kandle modelleerimise protsessi punktipilve abil. Kolmandas peatükis antakse ülevaade teostatud katsest, projekteeritud rakisest ja selle abil tehtud tugevusanalüüsist. Neljandas peatükis uuritakse lähemalt mõningaid komposiitmaterjale ning nende sobivust ja võimalusi kasutamiseks neid kandle ehituslike probleemide lahendamisel. Viiendas peatükis antakse lühiülevaade töös saavutatud eesmärkidest.

Antud töö võiks leida kasutust inimeste poolt, kes on huvitatud kromaatilise kontsertkandle ehitusest ning disainiga seonduvatest probleemidest; samuti neile, kes soovivad instrumenti ise toota või edasi arendada.

SUMMARY

The chromatic concert zither that was produced by Tallinna Klaverivabrik (piano factory) has been developed and produced with several fundamental flaws, one of which is the rupture of the instrument's frame due to high tensions and the other is the bending of the soundboard and the whole instrument in general. In this thesis, the existing zither of Klaverivabrik has been scanned, a detailed model has been created with the help of a point cloud, and simplified strength analyses have been simulated to prove the existence of aforementioned problems.

The concert zither has not developed throughout the years like many other instruments, because the instrument is still young and it is an instrument that has been invented and developed in Estonia. Currently, there is only one main maker of this type of zithers in Estonia, one in Finland and one in Russia, who make Estonian chromatic zithers. The zithers are made by hand, using stencils. Based on the model created in this thesis, it is possible to produce zither and its details using, for example, the CNC milling option, which greatly simplifies the manufacturing process.

In this master's thesis, simplified static strength analyses have been simulated for zither's structure. It turned out that the problems that are 1) tearing of the wood at the place where pins are; and 2) bending of the soundboard also turned out to be true from the simulations, although the simulations could not take into account the different properties of the wood in different directions and the high loads on the instrument during its lifetime.

The goals set were achieved in the master's thesis, which were a) to scan the zither and create a detailed 3D model using a point cloud; b) perform simplified strength calculations to identify problematic areas; c) to examine ways of correcting design errors. The aim of the first chapter was to give an overview of the history of zithers in general, the history of concert zithers as a produce of the Klaverivabrik, and take a closer look at the construction of zithers and the mechanism of sound production. The second chapter provides an overview of scanning and explains the modelling process using a point cloud. The third chapter provides an overview of the test performed, the designed fixture and the strength analysis performed with the results. The fourth chapter examines some of the composite materials and their suitability and possibilities for use in solving construction problems. The fifth chapter gives a brief overview of the goals achieved in the work.

This work could be used by people who are interested in the construction of a chromatic concert zither and problems related to its design; as well as for those who want to produce or further develop the instrument themselves.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] K. Org, „Kromaatilise kandle kujundamise lugu ja selle mänguõpetus Eestis“, [Diplomitöö], Rahvamuusika õppetool, Muusikaosakond, Viljandi Kultuuriakadeemia, Viljandi, Eesti, 2005.
- [2] Guselnik.ru, „Гусли Эстонские «Каннель» 45 струн“. [Online] Loetud aadressil: <https://guselnik.ru/catalog/gusli-mnogostrunnye/kannel-45-strun/> Kasutatud: 23.05.2021
- [3] Kandlekoda.ee, „Ajalugu“. [Online] Loetud aadressil: <https://www.kandlekoda.ee/ajalugu.htm> Kasutatud: 19.05.2021
- [4] Tlu.ee, „Keelpillid“. [Online] Loetud aadressil: <https://www.tlu.ee/opmat/tp/mangudjapillid/keelpillid.html> Kasutatud: 22.05.2021
- [5] P. Karras, „Diatoonilise kandle repertuaari seadmine kromaatilisele kandlele Joosep Kotkase ja Alfred Kuusi repertuaari põhjal“, [Magistritöö], TÜ Viljandi Kultuuriakadeemia, Tallinn-Viljandi, Eesti, 2011.
- [6] C. Onyemachi, „A Contrast Between The Diatonic And The Chromatic“. [Online] Loetud aadressil: <https://www.hearandplay.com/main/contrast-diatonic-chromatic> Kasutatud: 22.05.2021
- [7] M. Roest, „Design of a Composite Guitar“, [Magistritöö], TU Delft, Rotterdam, Belgium, 2016.
- [8] Get-tuned.com, „The Science of Tuning Musical Instruments“. [Online] Loetud aadressil: https://www.get-tuned.com/tuning_science.php Kasutatud: 23.05.2021
- [9] *ATOS Iie and ATOS Iie SO (as of Rev. 01)*, Atos User Information, GOM mbH, Germany, 2008.
- [10] *ATOS v6.1*, Atos User Manual – Software, GOM mbH, Germany, 2008.
- [11] Astromachineworks.com, „What Is Reverse Engineering and How Does It Work?“, 2019. [Online] Loetud aadressil: <https://astromachineworks.com/what-is-reverse-engineering/> Kasutatud: 03.05.2021
- [12] J-witex.co.jp, „Specification for Piano Wire“. [Online] Loetud aadressil: <http://www.j-witex.co.jp/en/products/wire2/piano.html> Kasutatud: 18.05.2021
- [13] Expanduseramics.com, „Quick Answer: Is Wood Isotropic Or Anisotropic?“. [Online] Loetud aadressil: <https://expanduseramics.com/qa/is-wood-isotropic-or-anisotropic.html> Kasutatud: 22.05.2021
- [14] E. Just, „Puitkonstruktsioonid“, Tallinn, 2012. [Online] Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/912e2250-c34c-4fe5-827c-9ec55f2d92b1> Kasutatud: 18.05.2021

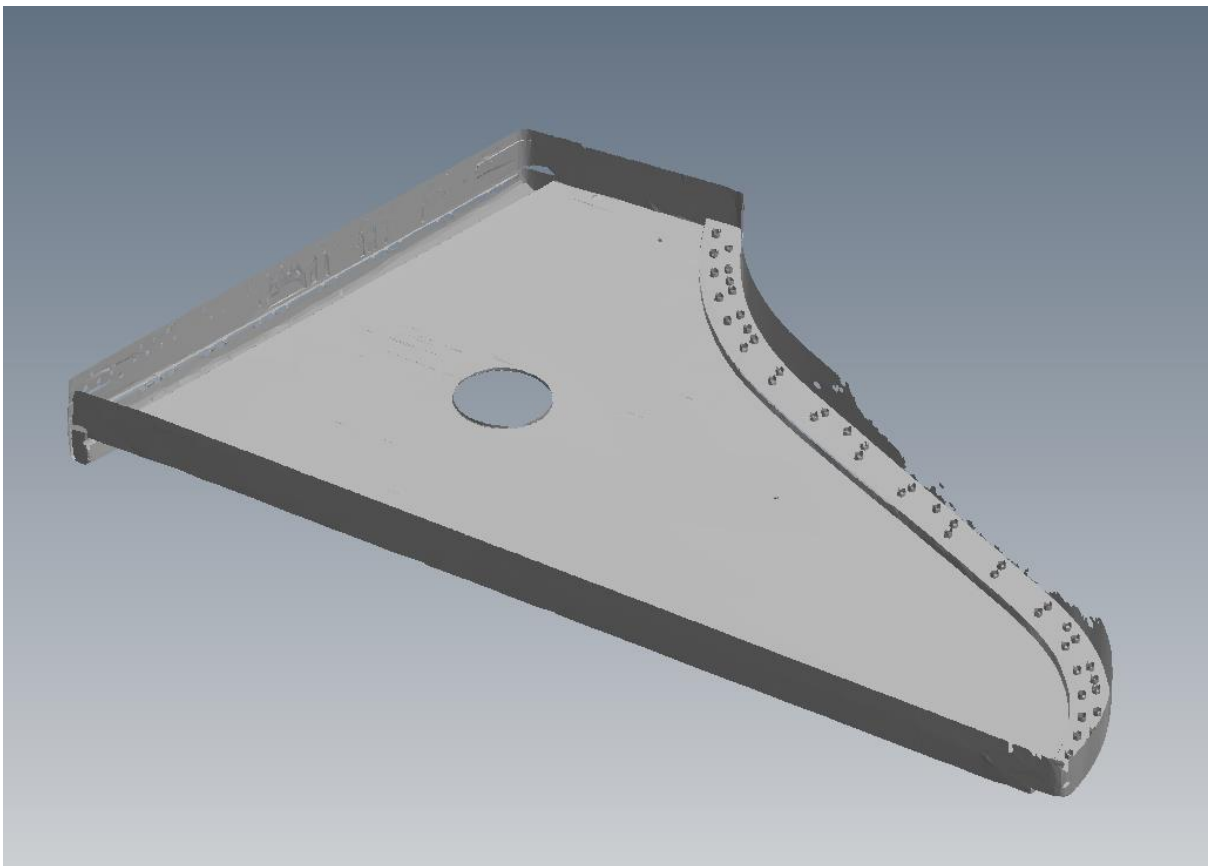
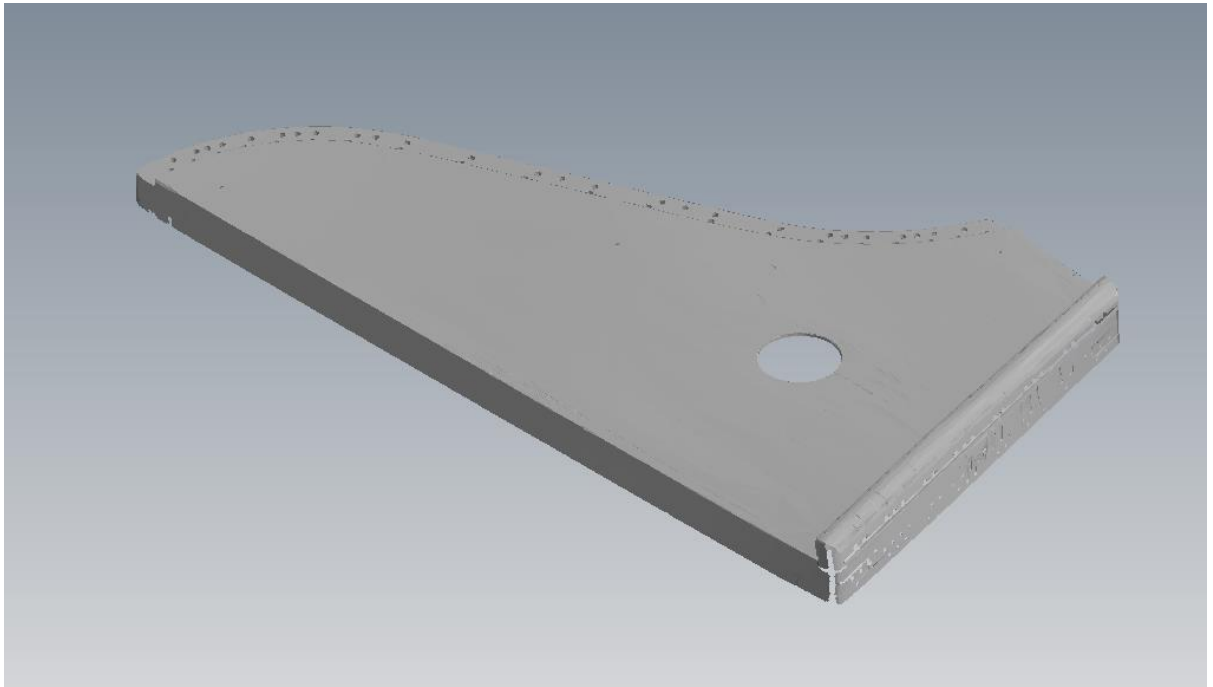
- [15] Openculture.com, „Watch the World’s Oldest Violin in Action: Marco Rizzi Performs Schumann’s Sonata No. 2 on a 1566 Amati Violin”, 2017. [Online] Loetud aadressil: <https://www.openculture.com/2017/07/watch-the-worlds-oldest-violin-in-action-marco-rizzi-performs-schumanns-sonata-no-2-on-a-1566-amati-violin.html> Kasutatud: 22.05.2021
- [16] Resin-expert.com, „Aluminum Glue – Helpful Guide for Aluminum Epoxy and Other Adhesives”, 2020. [Online] Loetud aadressil: <https://resin-expert.com/en/guide/aluminum-glue> Kasutatud: 25.05.2021
- [17] Hunker.com, „How Do I Glue Aluminum to Wood? „. [Online] Loetud aadressil: <https://www.hunker.com/13401660/how-do-i-glue-aluminum-to-wood> Kasutatud: 25.05.2021
- [18] Orbimanufacturing.com, „Carbon Fiber vs. Glass Fiber“. [Online] Loetud aadressil: <https://oribimanufacturing.com/knowledge-base-post/carbon-fiber-101-3> Kasutatud: 24.05.2021
- [19] Tricelcomponents.co.uk, „Carbon Fibre vs Kevlar“. [Online] Loetud aadressil: <https://www.tricelcomposites.co.uk/blog-carbon-fibre-vs-kevlar/> Kasutatud: 25.05.2021
- [20] Dexcraft.com, „Carbon Fiber Composites“, 2020. [Online] Loetud aadressil: <http://www.dexcraft.com/carbon-fiber-composites> Kasutatud: 23.05.2021
- [21] Themusicstudio.ca, „If It Ain’t Baroque: The Violin Through Time“, 2017. [Online] Loetud aadressil: <https://www.themusicstudio.ca/blog/2017/05/if-it-aint-baroque-the-violin-through-time/> Kasutatud: 21.05.2021
- [22] Compositeworld.com, „Acoustical architecture: Making beautiful music“, 2012. [Online] Loetud aadressil: <https://www.compositesworld.com/articles/acoustical-architecture-making-beautiful-music> Kasutatud: 21.05.2021
- [23] Tarisio.com, „The ‘Amaryllis Fleming’ Stradivari cello, 1717“. [Online] Loetud aadressil: <https://tarisio.com/cozio-archive/cozio-carteggio/new/> Kasutatud: 08.05.2021
- [24] Luisandclark.com, „Black Carbon-Fiber Cello“. [Online] Loetud aadressil: <https://luisandclark.com/product/cello/> Kasutatud: 21.05.2021
- [25] VSL.co.at, „Cello – Range“. [Online] Loetud aadressil: <https://www.vsl.co.at/en/Cello/Range> Kasutatud: 22.05.2021
- [26] *Ajujaht 2012 finalistid: Raybike, Pille toidukott, JomyBooks, Hingepillipuu*. 2012. [Online] Loetud aadressil: <https://www.youtube.com/watch?v=ksInZyFbmd0> Kasutatud: 24.05.2021
- [27] M. Haav, „Uut moodi kannel jahib auhinda“, Sakala, Postimees, 2012. [Online] Loetud aadressil: <https://sakala.postimees.ee/699300/uut-moodi-kannel-jahib-auhinda> Kasutatud: 24.05.2021

LISAD

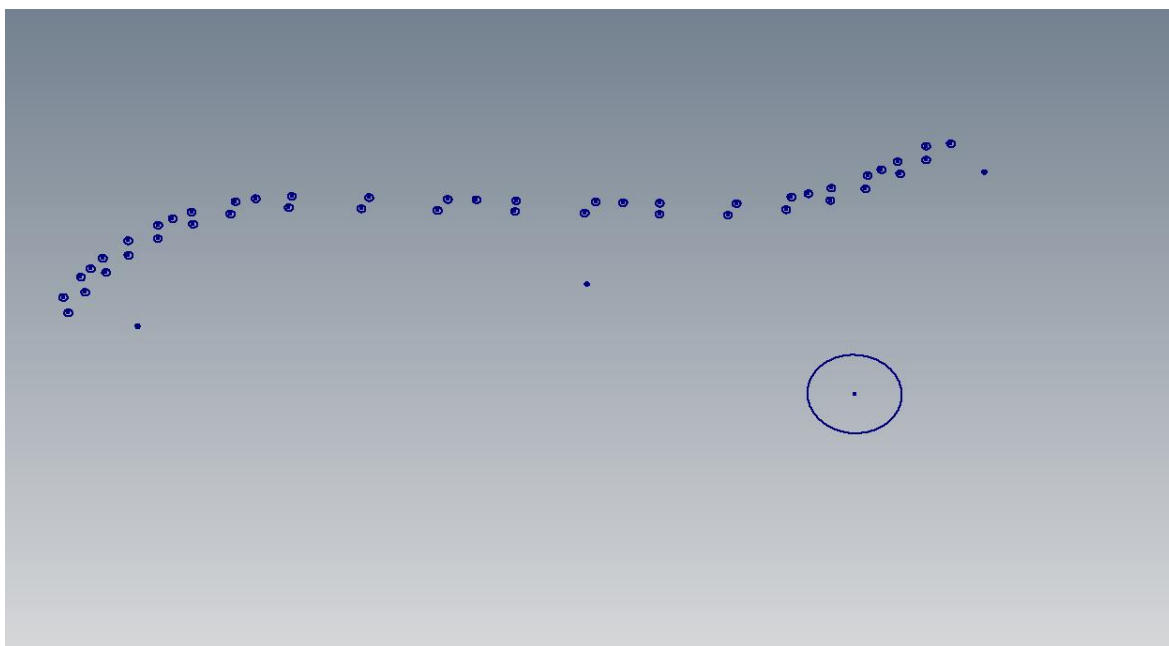
Lisa 1 Pildid skaneerimise protsessist



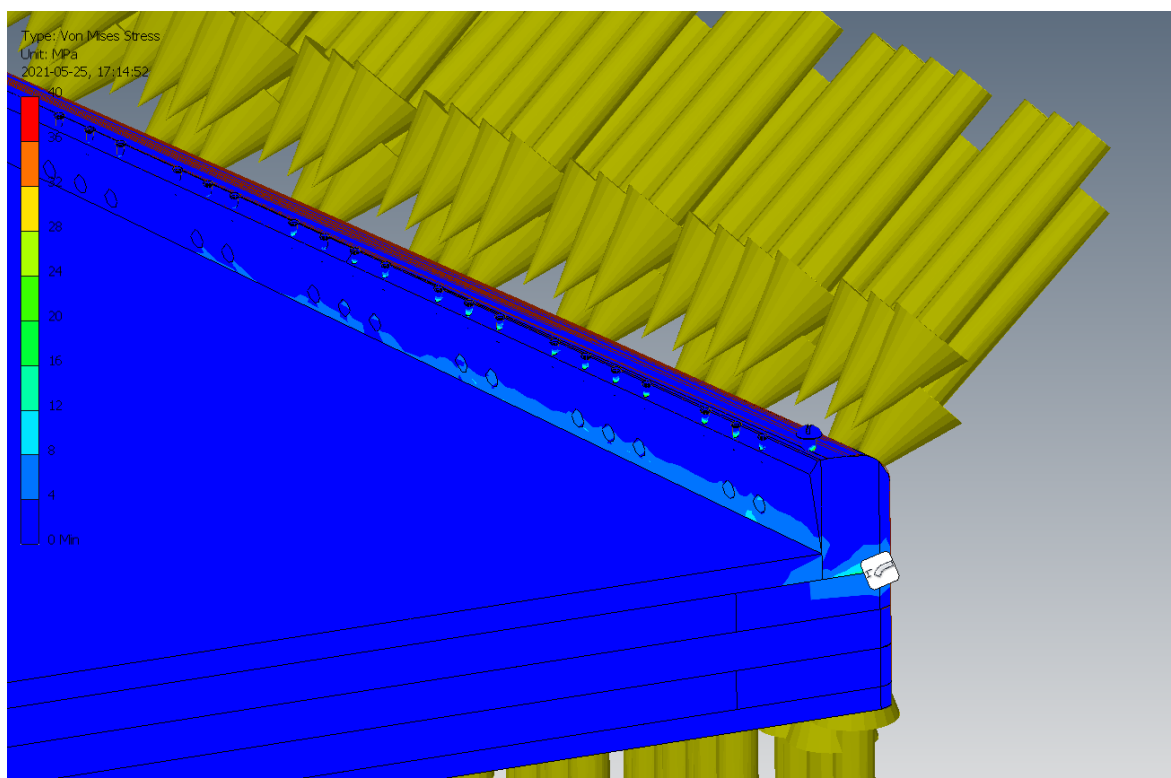
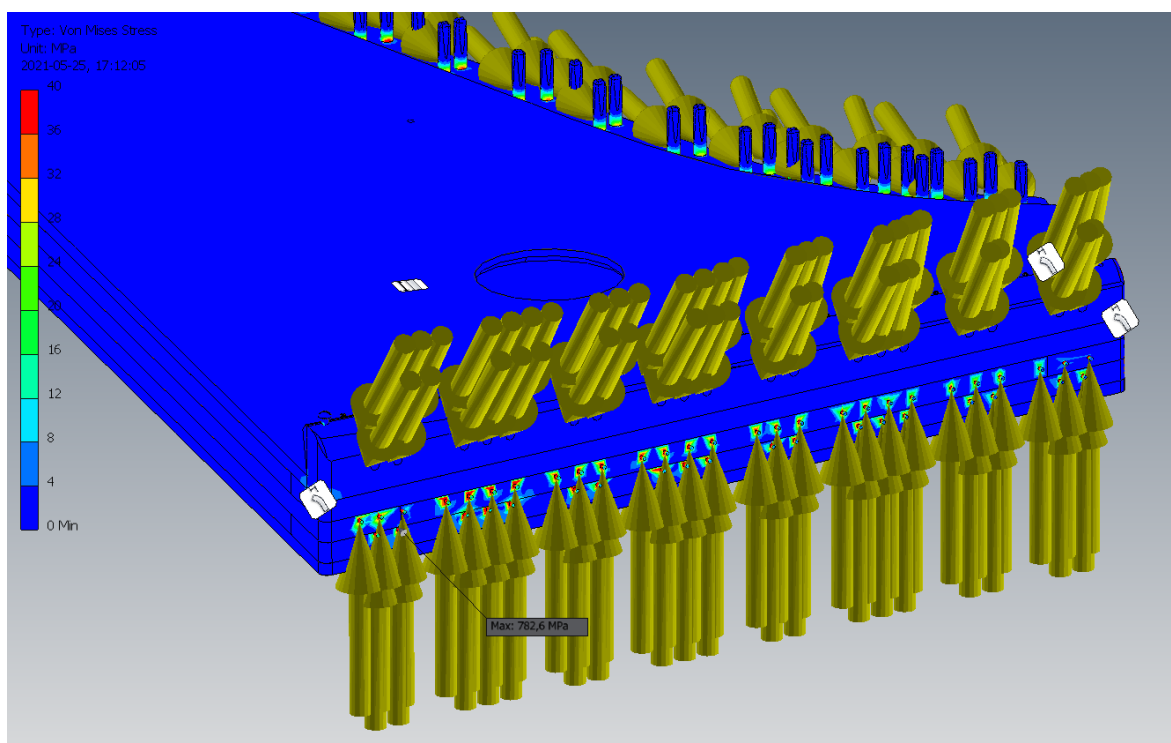
Lisa 2 Skaneerimise tulemusel saadud punktipilv (10000 punkti)

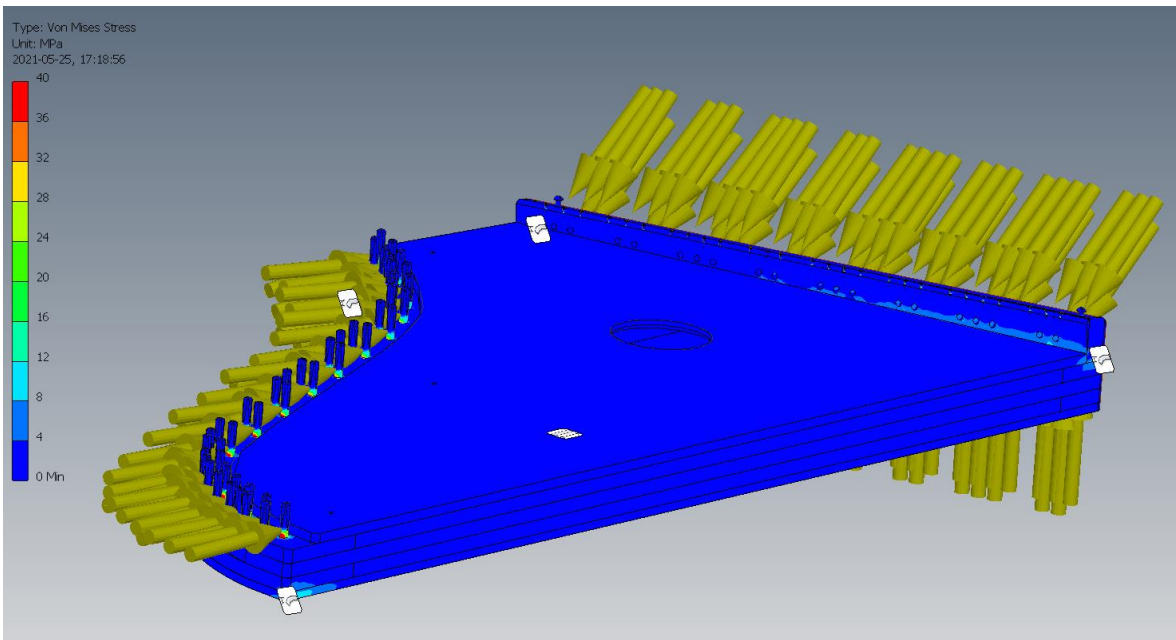
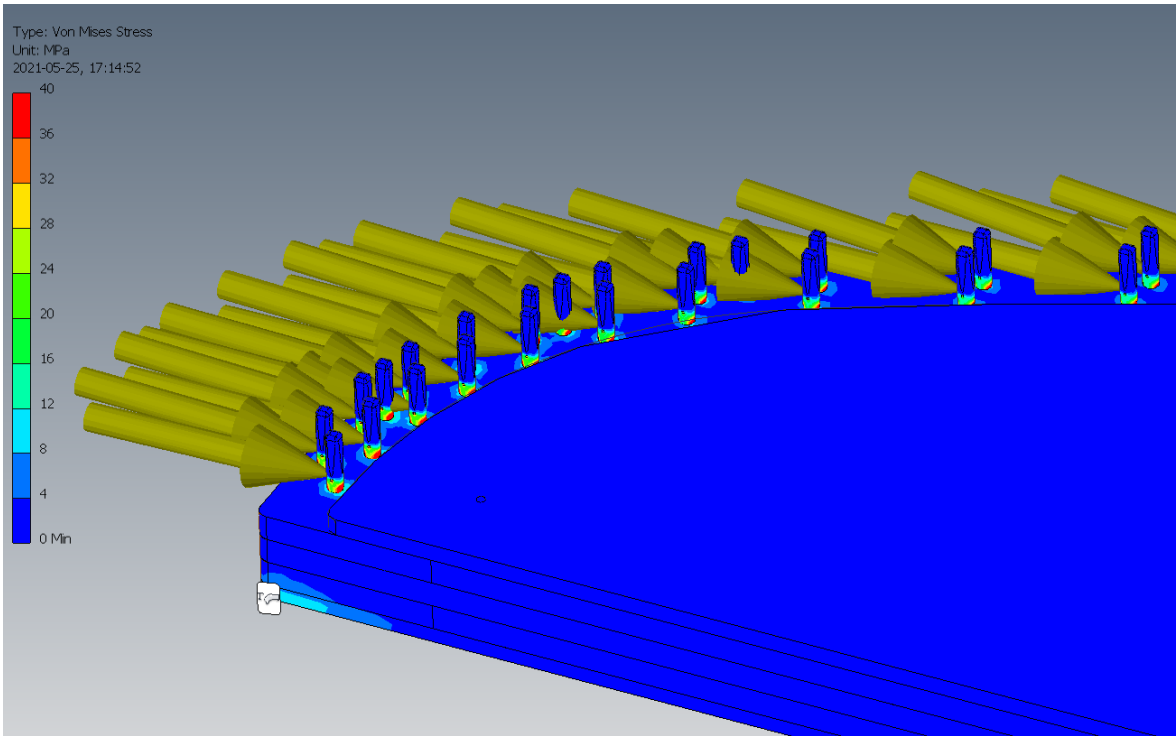


Lisa 3 Atoses määratud avad

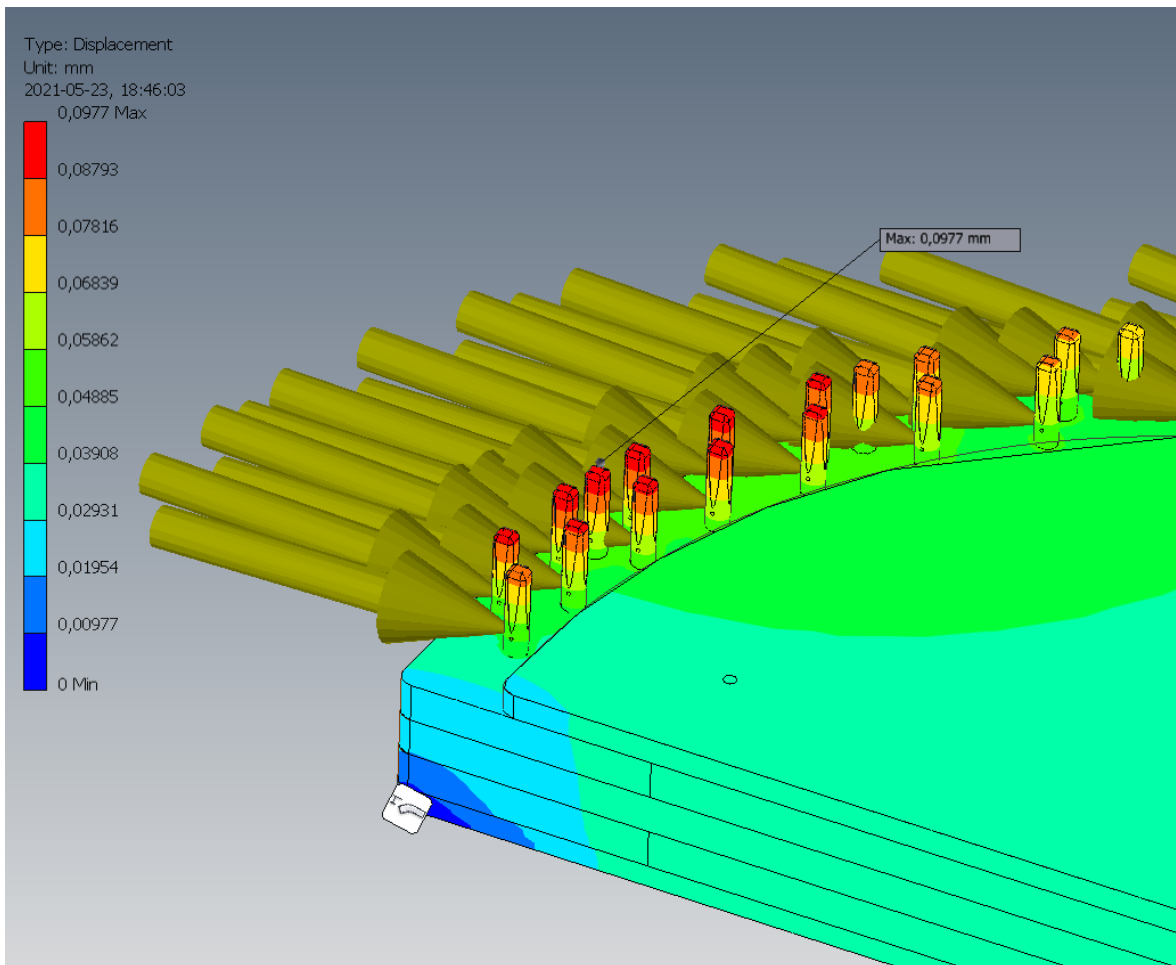
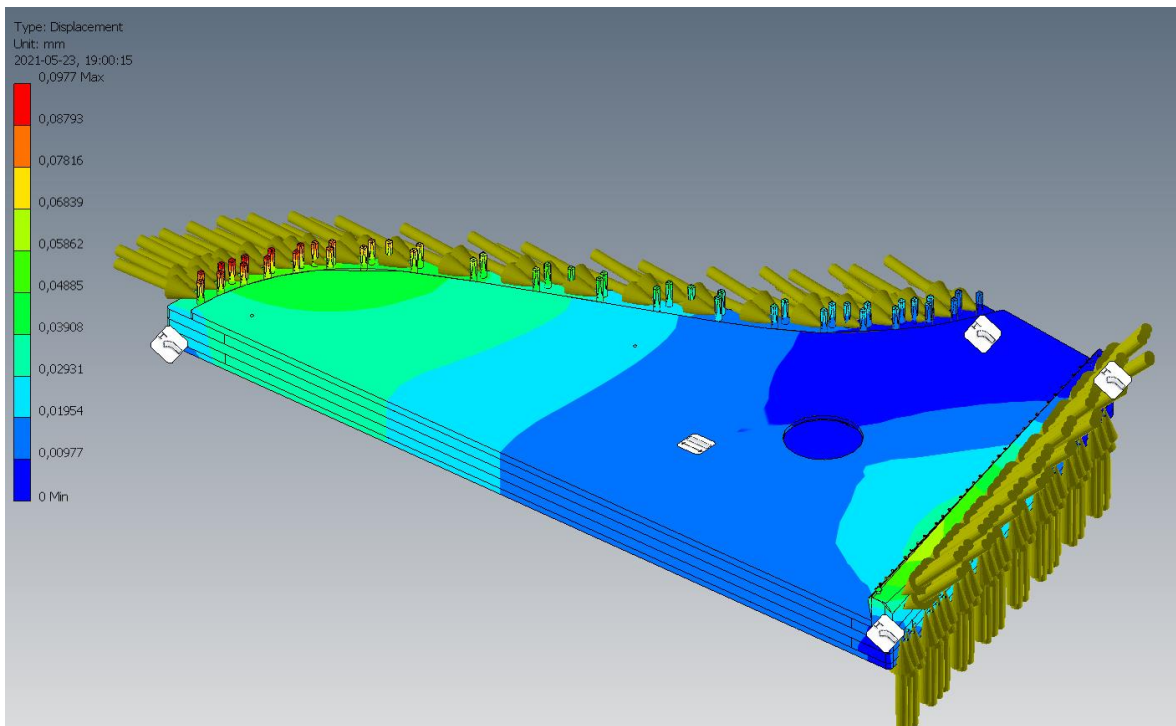


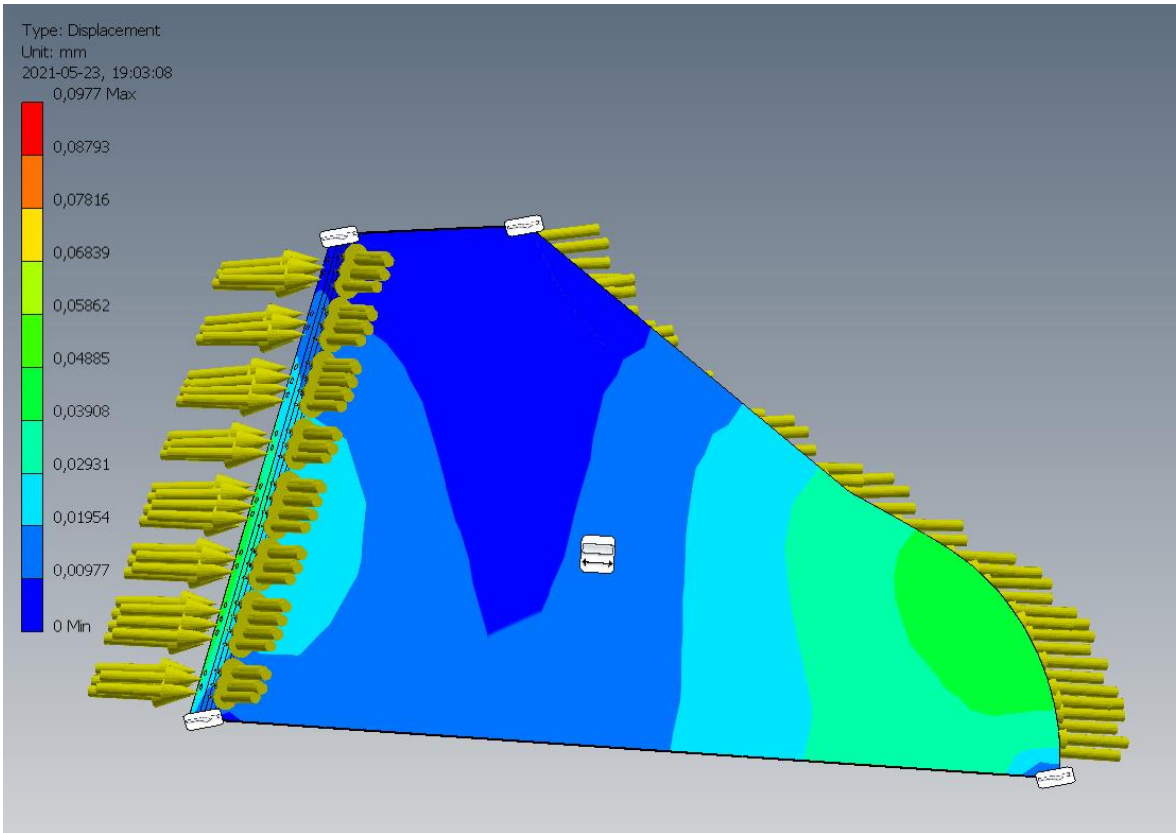
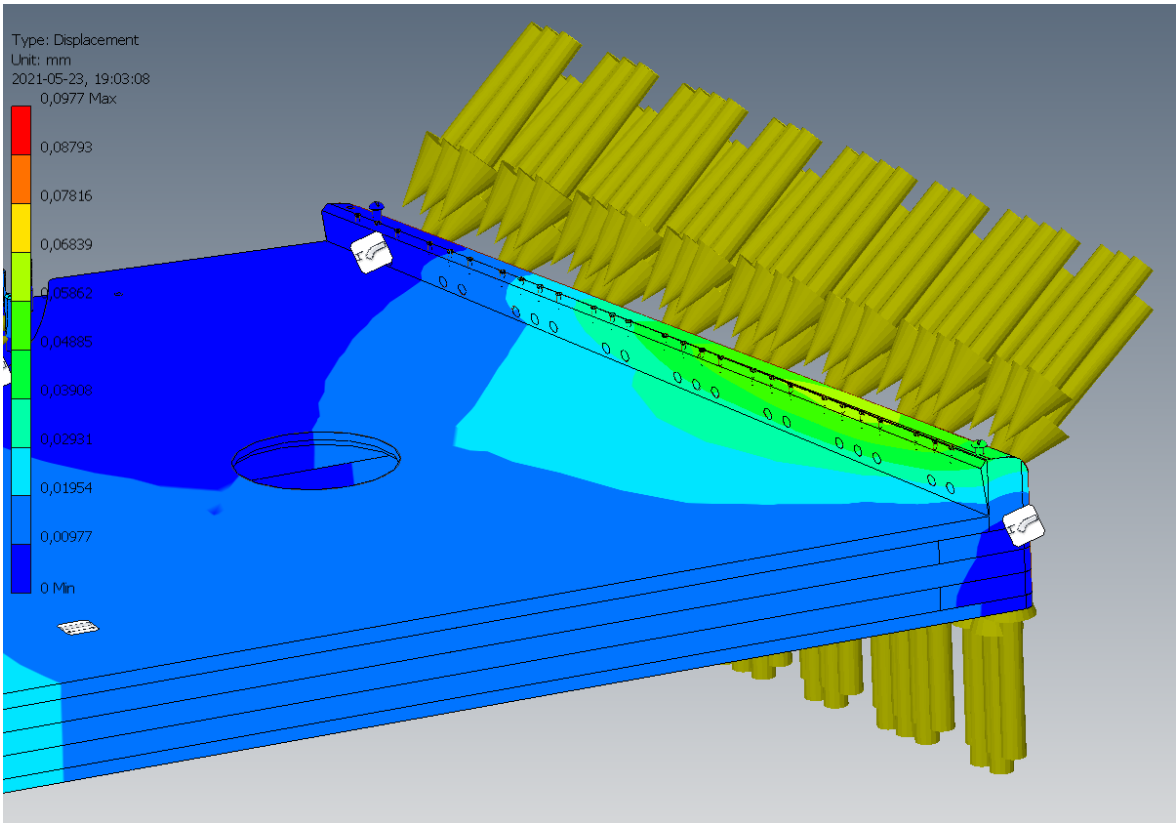
Lisa 4 Tugevusanalüüsi tulemused, pinged



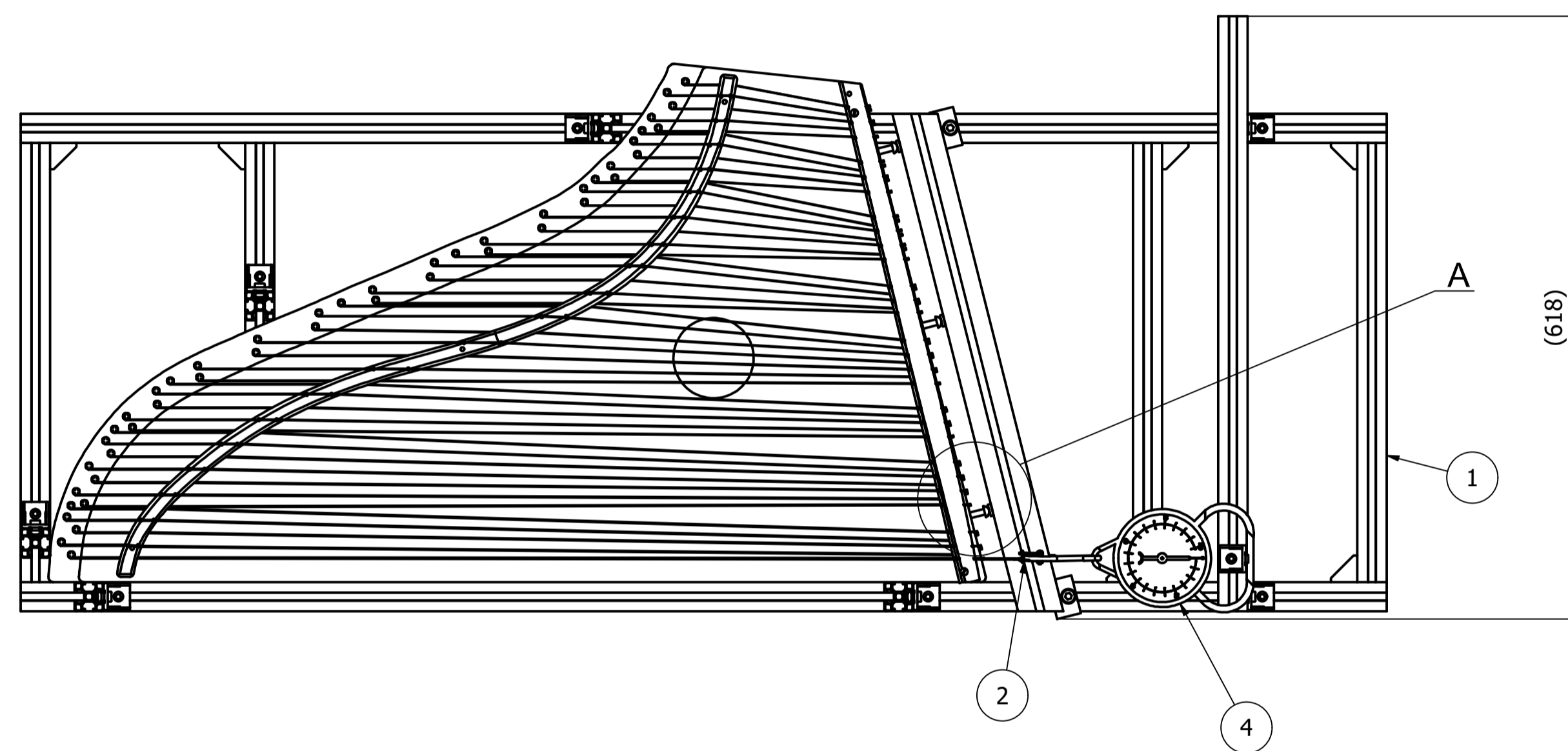
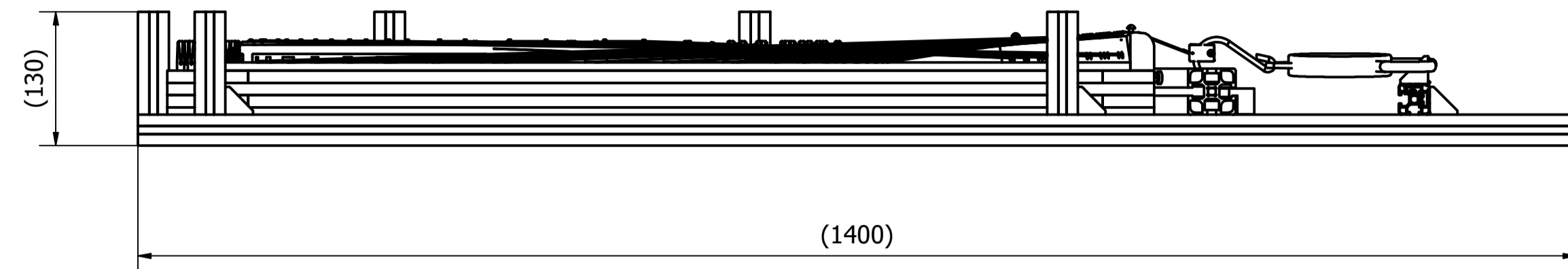


Lisa 5 Tugevusanalüüsi tulemused, läbipaine



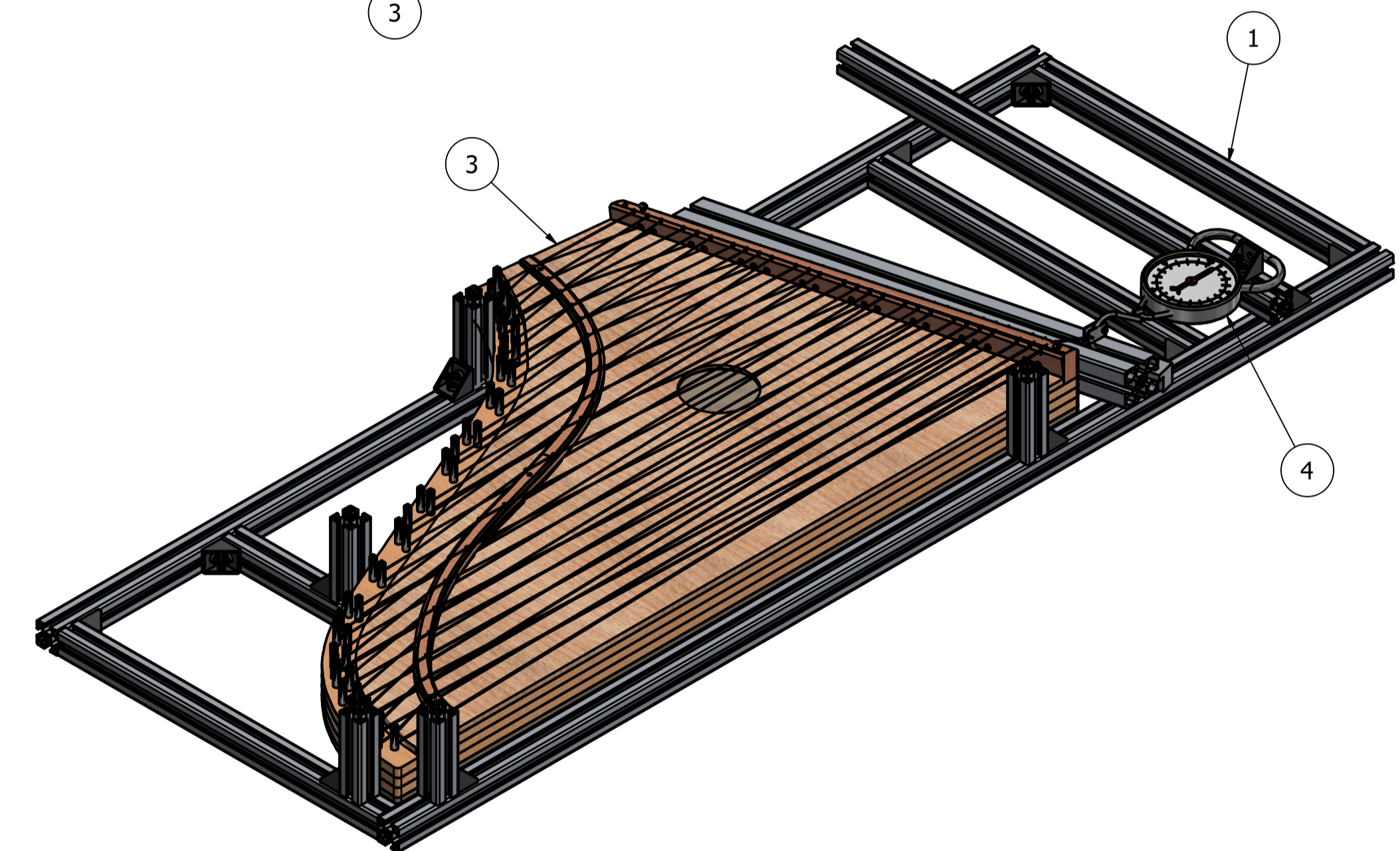
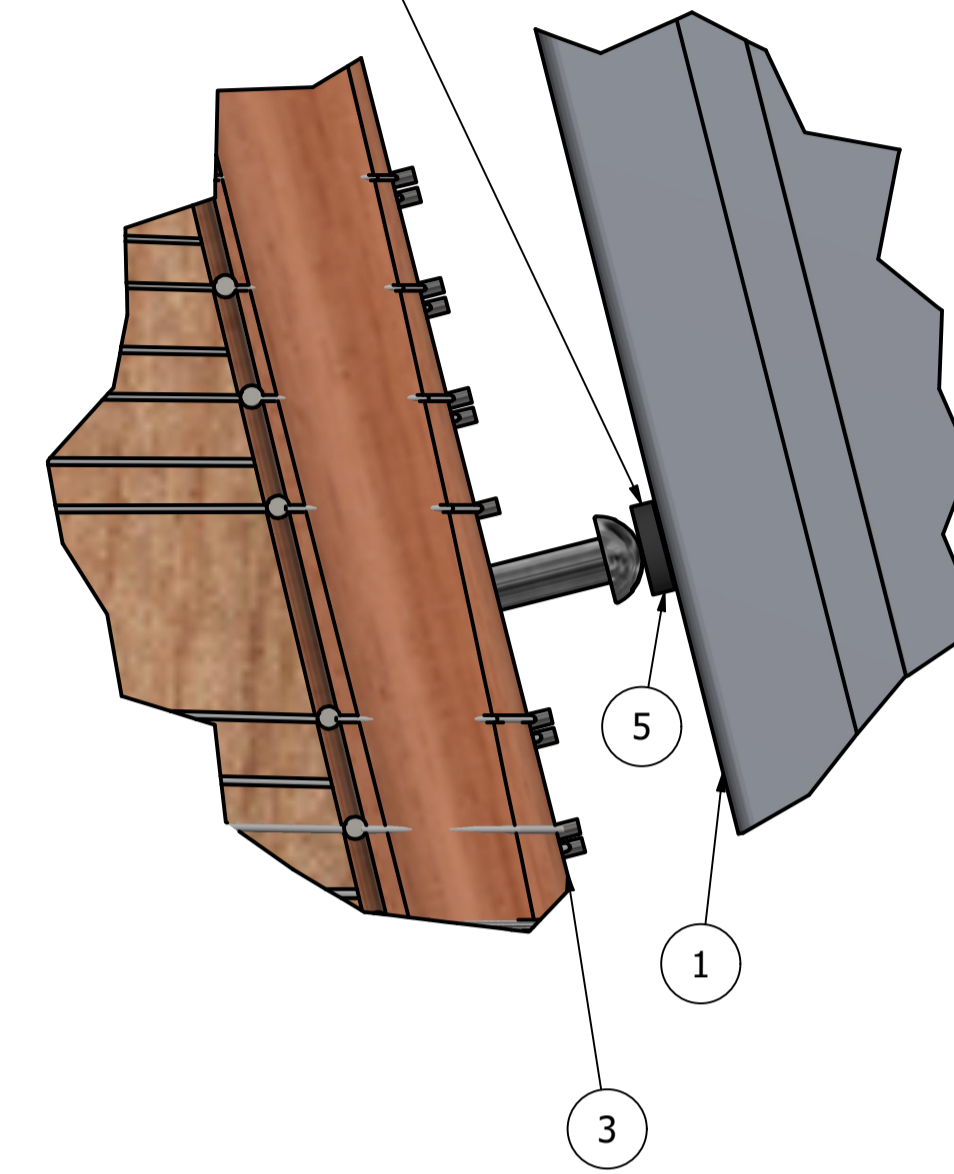


GRAAFILINE OSA



A (1 : 1)

Liimi kummist stopperid kandle küljel olevate kruvide peale



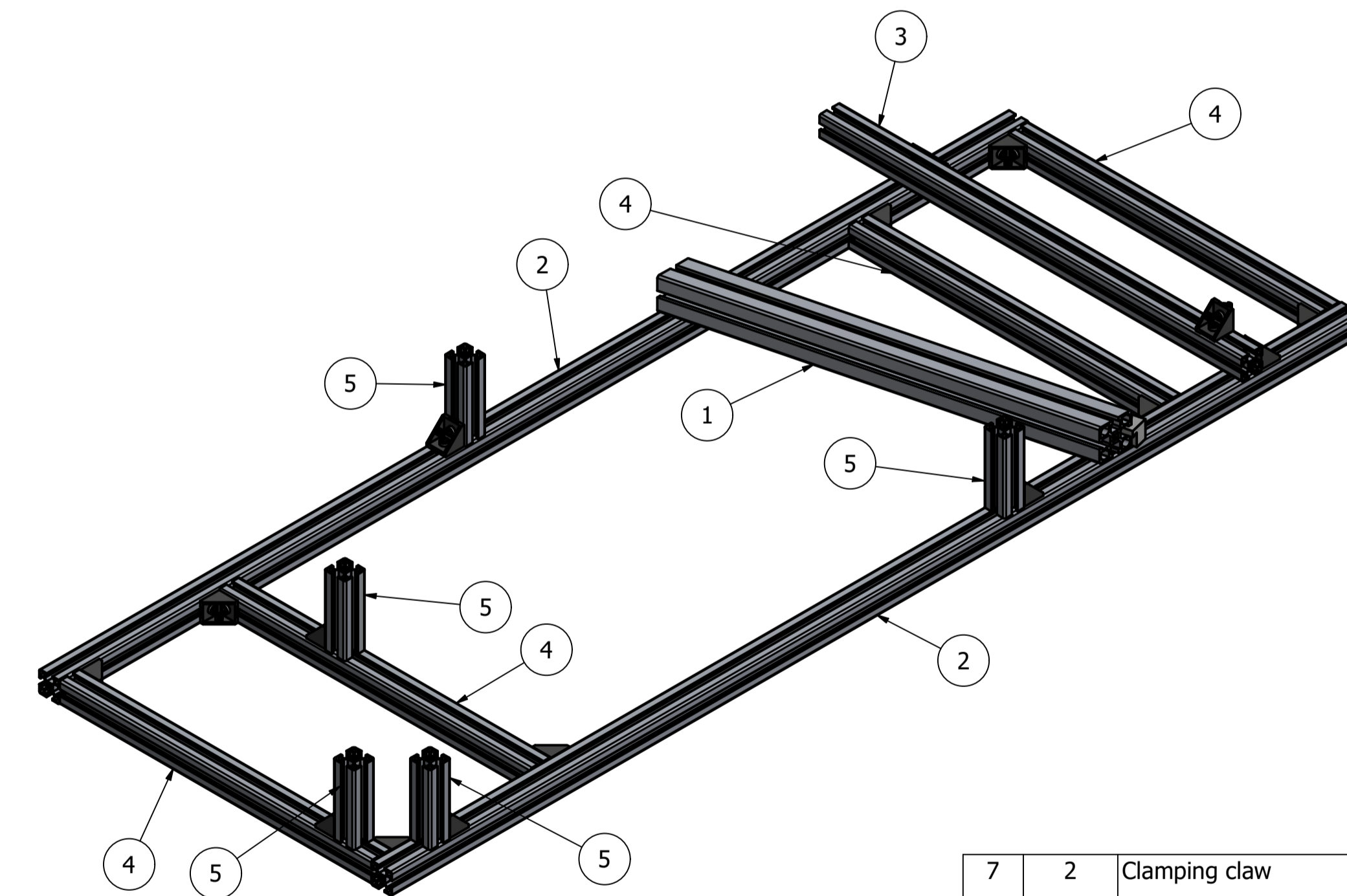
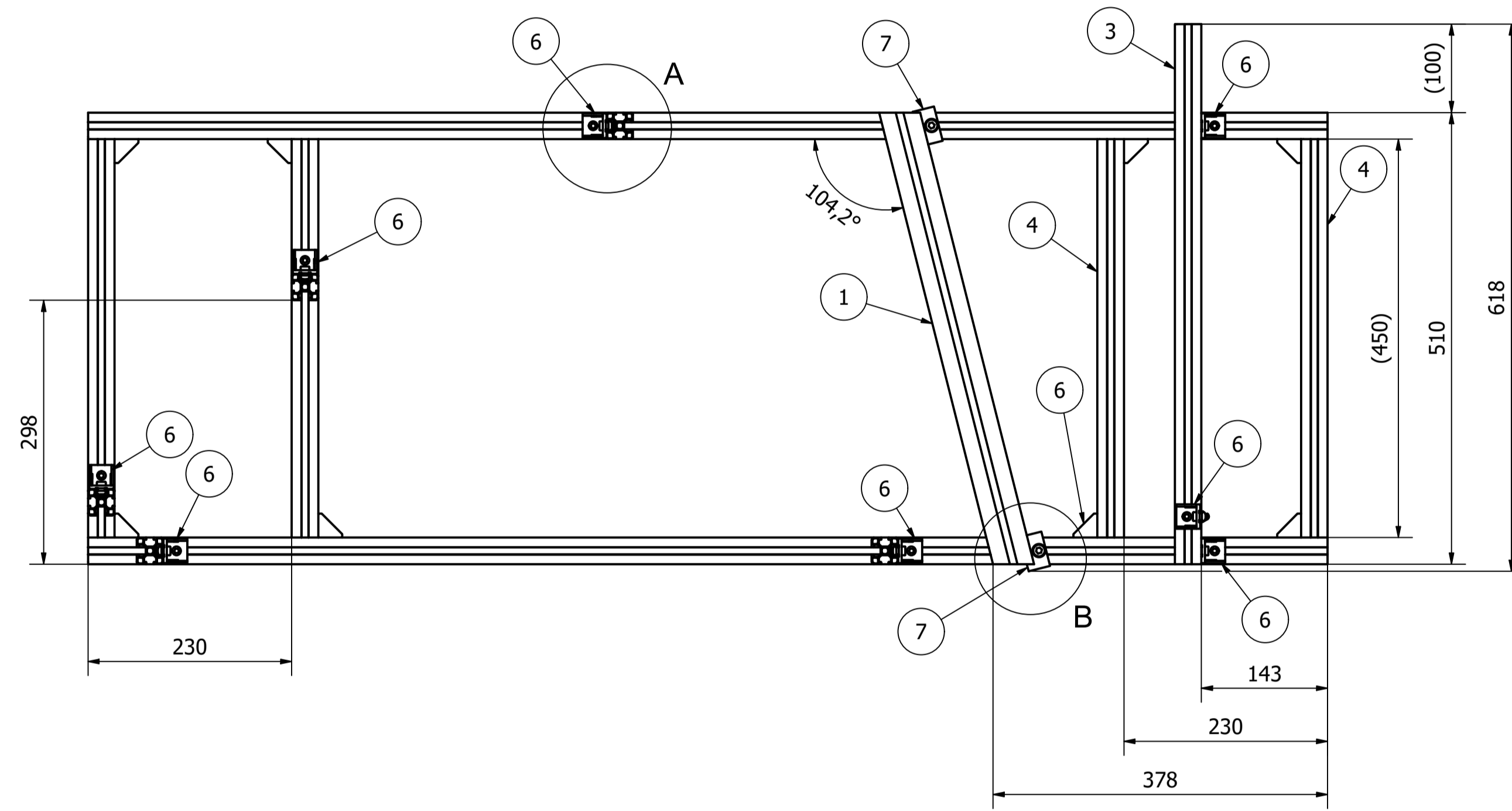
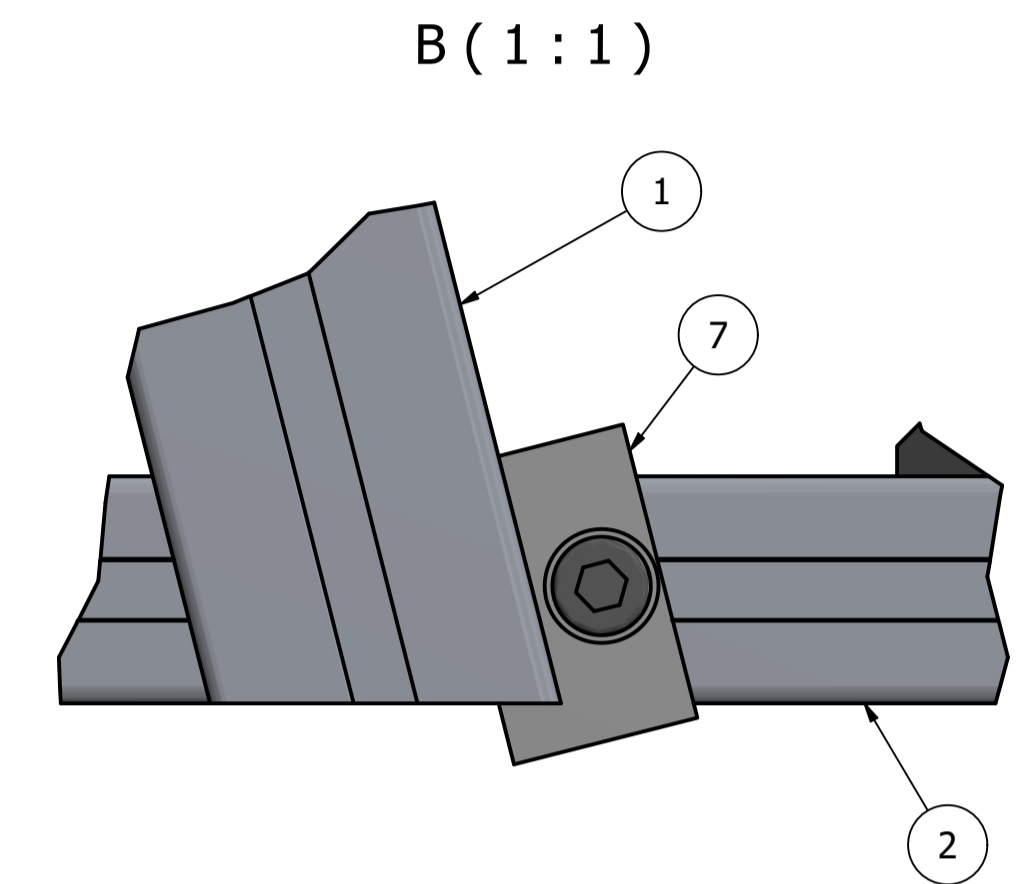
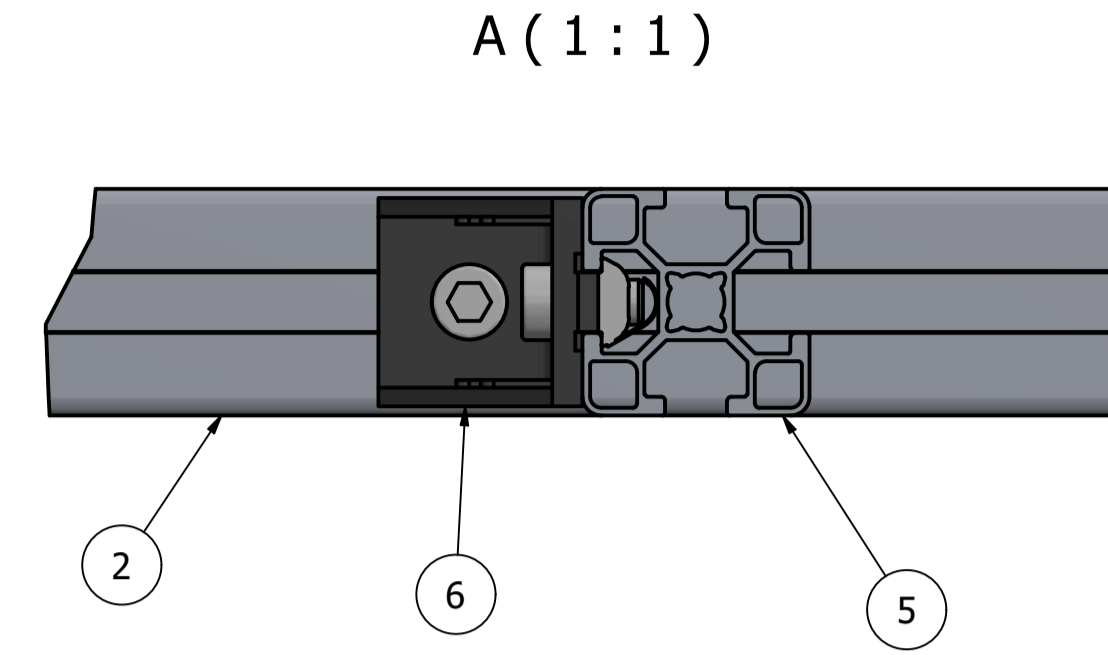
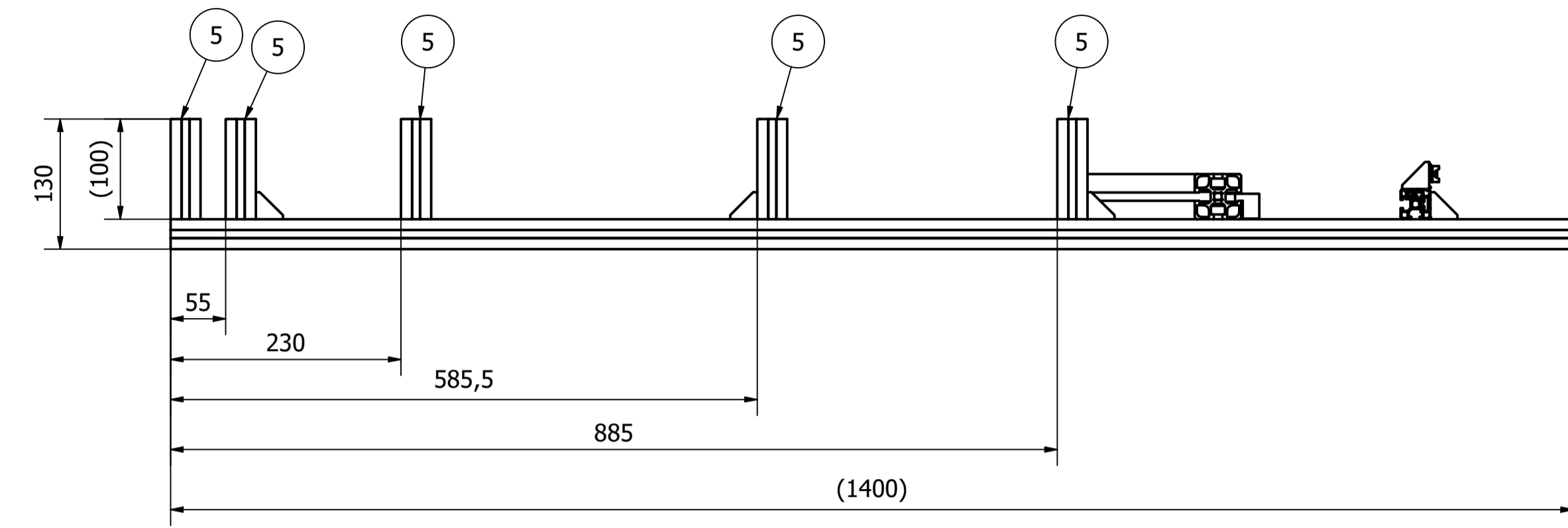
Aseta kannel raami ja kinnita Miniteci komponentidega kindlalt paika. Miniteci komponente liigutada vastavalt vajadusele.

Kogumass: 12 kg

5	3	Kummistopper	Rubber		0,00
4	1	Rippkaal			0,69
3	1	Kromaatiline kannel			6,08
2	1	Traadi kinnitus		Joonis 4	0,01
1	1	Rakis keelepingle määramiseks		Joonis 2	4,83
Pos	Kogus	Nimetus	Materjal	Joonisnumber/ info	Mass (kg)

Mudeli autor	Joonise autor	Joonisnumber	Kõrgem joonis
S. Rahnel	S. Rahnel	Joonis 1	
Kontrollija	A. Hiis	Joonise pealkiri	
Kinnitatud	T. Tähemaa	Kannel koos rakisega	
Projekt	Kandlerakis	Skaala	Revisjon
Kuupäev:	2021-05-15	1 : 5	1
		Leht	Suurus
		1	A1

Kõik tolerantsid vastavalt standardile ISO 2768-mk

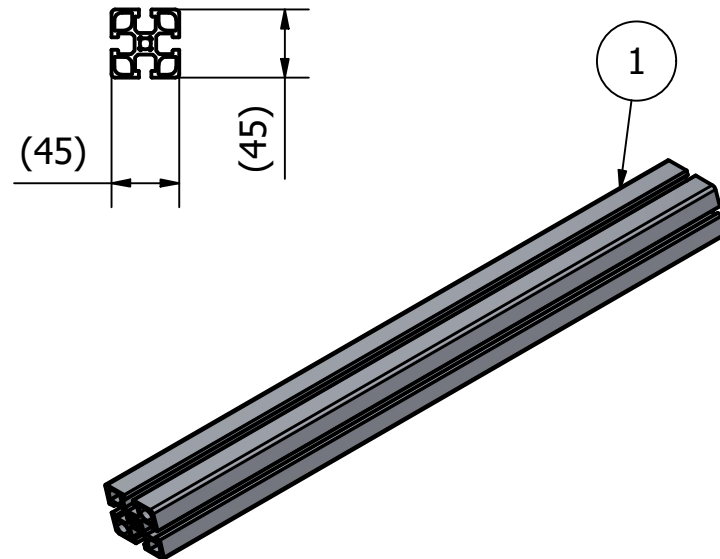
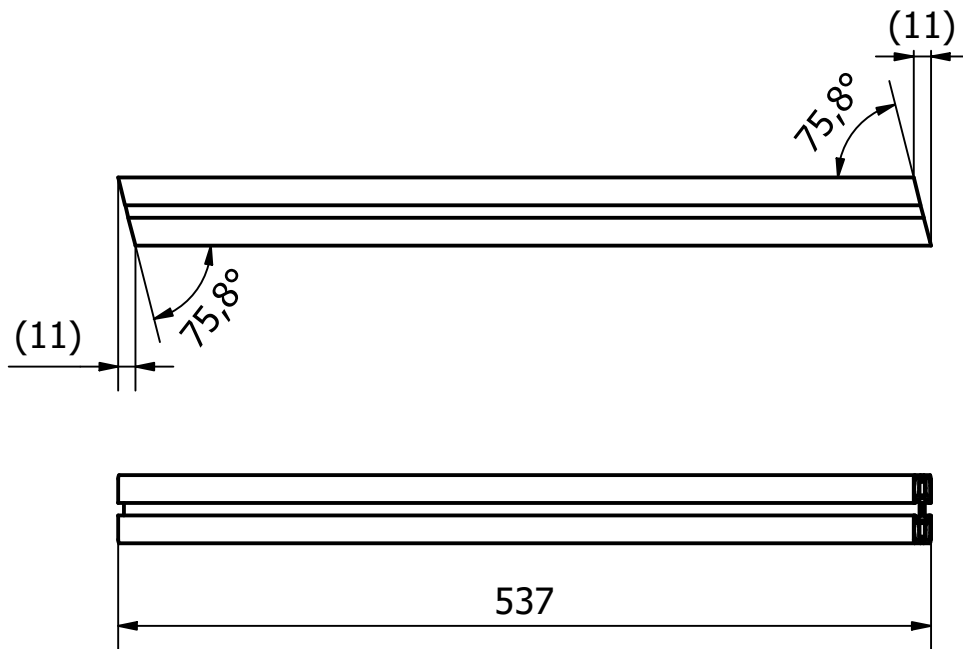


Koogumass: 5 kg

Pos	Kogus	Nimetus	Materjal	Joonisnumber/ info	Mass (kg)
7	2	Clamping claw		part no. 21.1027/0, Minitec	0
6	16	Mounting angle		part no. 21.0905/0, Minitec	0
5	5	Minitec profile 30x30	Aluminum 6063-T66	L=100	0
4	4	Minitec profile 30x30	Aluminum 6063-T66	L=450	0
3	1	Minitec profile 30x30	Aluminum 6063-T66	L=610	0
2	2	Minitec profile 30x30	Aluminum 6063-T66	L=1400	1
1	1	Minitec profile 45x45	Aluminum 6063-T66	Joonis 3	1

	Mudeli autor S. Rahnel	Joonise autor S. Rahnel	Joonisnumber Joonis 2	Kõrgem joonis Joonis 1
	Kontrollija A. Hiis	Kinnitatud T. Tähemaa	Joonise pealkiri Rakis keelepinglete mõõtmiseks	
Projekt Kandlerakis		Skaala 1 : 5	Revisjon	
Kuupäev: 2021-05-10		Leht 1	Suurus A1	

Kõik tolerantsid vastavalt standardile ISO 2768-mk



Kõik tolerantsid vastavalt standardile ISO 2768-mk

1	1	Minitec profile 45x45	L=537,4	Aluminum 6063-T66	1	
Pos	Kogus	Nimetus	Pikkus	Materjal	Mass (kg)	
	Mudeli autor	Joonise autor	Joonisnumber	Kõrgem joonis		
	S. Rahnel	S. Rahnel	Joonis 3	Joonis 2		
Kontrollija	A. Hiis		Joonise pealkiri			
Kinnitatud	T. Tähemaa		Minitec profile 45x45			
			Projekt	Kandlerakis	Skaala	Revisjon
					1 : 5	
			Kuupäev: 2021-05-15	Leht	1	Suurus
					A4	