



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

***SANDWICH* STRUKTUURIGA KOMPOSIITPANEEL  
HOONE FASSAADIKATTENA**

***SANDWICH* STRUCTURED COMPOSITE PANEL AS  
FACADE CLADDING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Koppel

Üliõpilaskood: 201540MATM

Juhendaja: Jüri Majak, prof

Tallinn 2022

## 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.

23. mai 2022

Autor: Karl Koppel

/ digiallkirjastatud /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

23. mai 2022

Juhendaja: Jüri Majak

/ digiallkirjastatud /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Karl Koppel (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Sandwich struktuuriga komposiitpaneel hoone fassaadikattena“,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Jüri Majak,  
(*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.

---

Karl Koppel

/ digiallkirjastatud /

23. mai 2022

---

<sup>1</sup> 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.

**Mehaanika ja tööstustehnika instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Karl Koppel, 201540MATM  
**Õppekava, peeriala:** MATM02, Tootearendus ja tootmistehnika  
**Juhendaja(d):** Professor, Jüri Majak, 6203265

**Lõputöö teema:**

*Sandwich struktuuriga komposiitpaneel hoone fassaadkattena*  
*Sandwich structured composite panel as facade cladding*

**Lõputöö põhieesmärgid:**

Lua lahendus komposiitmaterjali kinnitamiseks seinale, mis vastaks seatud tugevuspiiridele ja omaks esteetilist välimust.

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Turu uuring ja esimene kontseptsioon	22.02.22
2.	Arvutused ja LEM analüüsid	30.03.22
3.	Arvutuste valideerimine ja katsed	30.04.22
4.	Vormistamine ja esitamine	20.05.22

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 23.05.2022

**Üliõpilane:** Karl Koppel / digiallkirjastatud / 23. mai 2022 a

**Juhendaja:** Jüri Majak / digiallkirjastatud / 23. mai 2022 a

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

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÖNA.....	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
1.1 Ettevõtte tutvustus.....	9
2. ÜLEVAADE SANDWICH TÜÜPI MATERJALIDEST .....	10
2.1 <i>Sandwich</i> struktuuriga komposiitmaterjal .....	10
2.2 Arhitektuurne alumiiniumkomposiit.....	11
2.3 Alumiiniumkomposiit ja teras .....	12
2.4 Tulekindlus.....	13
2.5 Alumiiniumkomposiidi töötlemine .....	14
2.6 Alumiiniumkomposiit materjali taaskasutus.....	15
3. DISAINIPROTSESS .....	17
3.1 Olemasolevad lahendused .....	17
3.2 Kasseti projekteerimine ja valmistamine.....	19
3.3 Patenditaotlus.....	23
4. NUMBRILINE ANALÜÜS .....	27
4.1 Tuulekoormusest tekkivad pinged.....	27
4.2 Kasseti maksimaalne kinnituste samm ja arv .....	29
4.2.1 Profiili telginertsmoment.....	30
4.2.2 Kinnituste samm ja arv .....	31
4.3 Struktuuranalüüs .....	32
4.3.1 LEM analüüs ühe kruviga roovi kohta .....	33
4.3.2 LEM analüüs kahe kruviga roovi kohta.....	35
4.3.3 Alumine profiil.....	38
4.3.4 Kasseti raskusest tingitud koormus .....	39
4.4 Tulemuste valideerimine.....	40
4.5 Soojuspaisumine .....	42
4.6 Koormuste analüüs komposiitmaterjalile.....	43
4.7 Toote omahind.....	46
5. ALUMIINIUMKOMPOSIIT KASSETI KOOSTAMINE .....	47
5.1 Kasseti koostamine.....	47
5.2 Täiendavad võimalused kasseti tugevdamiseks.....	50
KOKKUVÕTE.....	51
SUMMARY .....	52
KASUTATUD KIRJANDUS.....	53
GRAAFILINE OSA .....	55

## EESSÕNA

Antud töö on koostatud Ruukki Products AS tootearenduse raames nimetatud ettevõtte Pärnu fassaaditehases. Ettevõtte soov oli tulla turule fassaadikatete nii nimetatud „*premium*” klassis, kasutades selleks alumiiniumkomposiit materjali. Käesolev töö käsitleb tootearendust, mille käigus luuakse Ruukki olemasolevasse portfooliosse nimetatud materjalist fassaaditoode.

Autor soovib tänada mõistvaid kolleege, kes töö valmimisel abiks olid ja ei teinud teist nägu kui autor tööülesannete kõrval kooli ülesandeid lahendas. Eriline tänu läheb Eliisele, kellega paralleelselt kaks magistritööd valmis ja kes enda lõputöö kõrvalt leidis hetki ka käesoleva töö autorit abistada sõna ja jõuga.

## **LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU**

ACM – alumiinium komposiitmaterjal (aluminium composite material)

ACP – alumiinium komposiitpaneel (aluminium composite panel)

SCP – teras komposiitpaneel (steel composite panel)

PE – polüetüleenist komposiidi südamik

FR – tulepüsiv komposiidi südamik tuleklassiga B1 (fire retardant)

A2 – tulepüsiv komposiidi südamiks tuleklassiga A2

LEM – lõplike elementide meetod

EPDM – etüleenpropüleen-dieenmonomeer kumm

CAM – raaltootmine (computer aided manufacturing)

# 1. SISSEJUHATUS

Ettevõttel Ruukki Construction OY on soov laiendada oma tooteportfelli ja suurendada enda turuosa nõnda nimetatud „*premium*” toodete kategoorias. Täpsemalt käib jutt fassaaditoodetest, mis on tehtud kallimahinnalistest materjalidest ja mida kasutatakse uhkemate hoonete nagu autoesinduste, hotellide ja ärihoonete katmiseks. Üldiselt on selliste hoonete fassaadidel nõudeks kallimate materjalide kasutamine nagu vask või alumiinium või soovitakse suuri siledaid pindu, mida on võimalik saavutada terasele alternatiivseid materjale kasutades. Üheks selliseks materjaliks on *sandwich* struktuuriga alumiiniumkomposiit.

Täna koosneb Ruukki fassaaditoodete portfell põhiliselt terasest valmistatud kassettidest, lamellidest ja disainprofiilidest. Kassetid on neljast küljest painutatud fassaadikatted ja lamellideks nimetatakse kahest paralleelsest küljest painutatud tooteid. Disainprofiilid on õhukeset terasest rullvaltsitud seinakatted. Kahe esimese tootekategooria puhul on kasutusel nii peidetud kui ka nähtava kinnitusega süsteeme, viimane ainult nähtava kinnitusega [1]. Peidetud kinnitus saavutatakse üldiselt spetsiaalset lukusüsteemi kasutades, kus kassettide või lamellide iga järgnev detail peidab ära eelmise detaili kinnitusvahendi. „*Premium*” klassi loetakse üldiselt peidetud kinnitusega kassette, aga on ka erandeid, kus kallimahinnalisem materjal, näiteks vask, on isegi nähtava kinnitusega määratud eelpool nimetatud kõrgemasse klassi.

Käesolevas töös on vaatluse alla võetud *sandwich* struktuuriga alumiiniumkomposiit materjal ja sellest moodustatud fassaadikassett, mis oleks peidetud kinnitusega ja annaks tootele selle „kallihinnalise” tunnetuse. Alumiiniumkomposiit on just see materjal, mis leiab laialdast kasutust eelpool mainitud hoonete nagu autoesindused jne katmisel. Varasemalt on samas ettevõttes loodud üks toode kasutades nimetatud materjali. Ruukki toodetud vertikaalse orientatsiooniga komposiitkassett on laialdaselt kasutusel olnud nii mitmeski hooneprojektiis.

Antud töö põhieesmärgiks on luua lahendus komposiitmaterjali kinnitamiseks seinale, mis vastaks seatud tugevuspiiridele ja omaks esteetilist välimust.

Töö käigus vaadeldakse lähemalt alumiiniumkomposiit materjali ja selle töötlemist. Eraldi vaadeldakse komposiitmaterjali taaskasutust ja ümbertöötlemist. Uuritakse juba turul olevad lahendusi ja võimalikke patente. Disainitakse toode võttes arvesse tootmise võimekust ja tootmisele optimeeritud disaini. Teostatakse tootele numbrilised analüüsid ja räägitakse lahti toote koostamise protsess.



## 1.1 Ettevõtte tutvustus

Ruukki Construction OY on Soome ettevõtte, kes kuulub Rootsi terasetootja SSAB kontserni. Ruukki Construction OY tegeleb põhiliselt katusetoodete ja hoonete „ümbrike“ ( *ing. Building Envelopes*) tootmise ja arendamisega. Hoonete „ümbrike“ all mõeldakse kõiki tooteid, mis moodustavad n-ö ümbriku maja ümber, mis ei ole katus. Nendeks on seinakonstruktsioonid, kandvad katuseelemendid ja fassaadikattesüsteemid. Lisaks katusetoodetele on portfellis valikus ka katuse turvatooted ja vihmaveesüsteemid. Eestis tegutsev üksus Ruukki Products AS tegeleb eelpool mainitud toodete müügi ja katuse ja fassaaditoodete tootmisega. Ruukki visiooniks on: „Tulevikuhoonete ehitamine juba täna“. Ruukki üksustes töötab pea 1500 inimest ja kokku on 11 spetsialiseerunud tehast kümnes Euroopa riigis. 2021. aasta suhteline netokäive ulatus 590 miljoni euroni. [1]



Joonis 1.1 – Ruukki Construction OY logo [1].

Märksõnad: tootearendus, mehaanika, komposiit, magistritöö

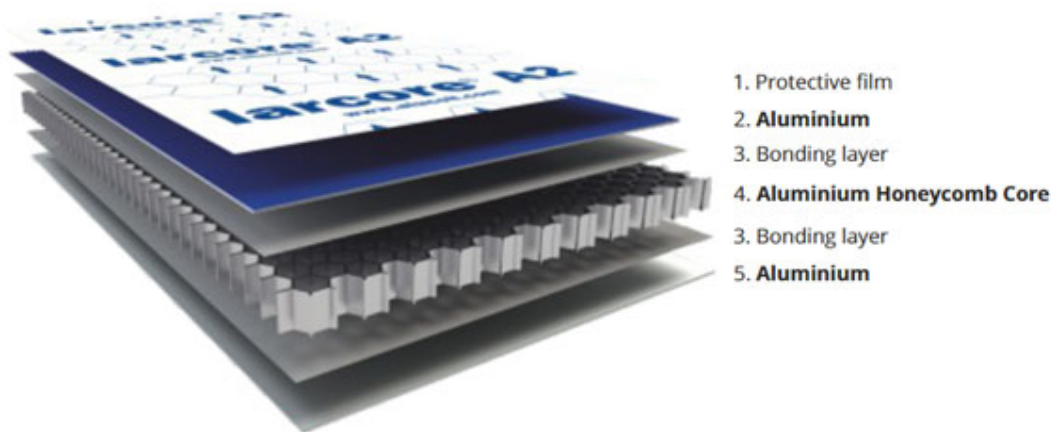
## 2. ÜLEVAADE *SANDWICH* TÜÜPI MATERJALIDEST

Järgnevalt vaadeldakse lähemalt *sandwich* struktuuriga paneelide olemust ja selle erinevaid versioone. Võrreldakse neid teiste metallidega ja räägitakse komposiidi töötlemisest. Lisaks antakse ülevaade nimetud materjali taaskasutamisest.

### 2.1 *Sandwich* struktuuriga komposiitmaterjal

*Sandwich* struktuuriga komposiitpaneel käsitleb endas kahte kihti ühte tüüpi materjali, mis on omavahel ühendatud teist tüüpi materjalist südamikuga. Tüüpiliselt on mõlemad väliskihid õhukesed ja jäigemad ning sisekiht paksem ja pehmem. Väliskihid tagavad paindejäikuse, sisekiht töötab nihkel. Sisekiht on enamasti väga kerge, viies alla ka kogu paneeli kaalu. Kerge kaalu ja heade materjali jäikuse ning tugevusomaduste tõttu on *sandwich* tüüpi konstruktsioonid leidnud laia kasutust erinevates inseneriteaduse valdkondades nagu auto-, lennu- ja laevatööstus, tuulegeneraatorid, päikesepaneelid, ehitus jne [2-5]. *Sandwich* struktuurid leivad rakendust ka äkiliste impulsskoormuste korral, kus on vaja kiiret energia neelamist [2, 3]. Akende ja päikesepaneelide korral on *sandwich* struktuurid tavalisest erinevad, siin on nimelt sisekiht õhuke ja väliskihid paksud. *Sandwich* struktuuri sisekiht võib olla ka sõrestik või kargstruktuur [4], et tagada maksimaalset kaalu kokkuhoidu. *Sandwich* struktuuri väliskihid võivad olla laminaadid, et tagada paremad jäikuse- ja tugevusomadused [5].

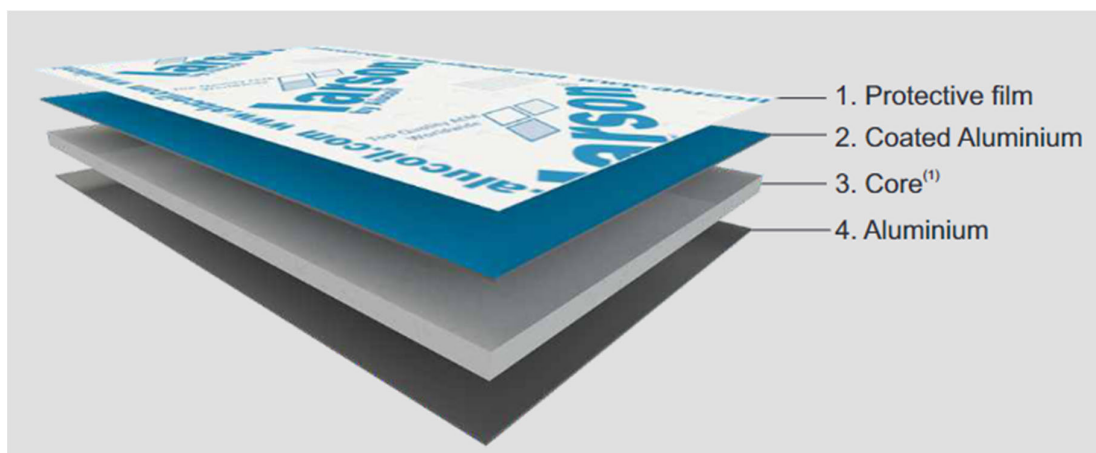
Üheks levinumaks *sandwich* paneeli materjalideks on terase ja plastiku kooslus. Ehituses on levinud seinakonstruktsioonina kasutatav *sandwich* paneel, kus plastikust südamiku asemel on kasutusel mineraalvillaplaat. Antud kooslus parandab kõvasti toote tulepüsivust. Lisaks terasele kasutatakse välimise kihina ka alumiiniumi või mõnedel juhtudel ka vaske või roostevaba terast. Südamikuks võib olla peale plastikute ka vahte või meekärg struktuure. Igal erinev südamik annab ka komposiitmaterjalile erinevad omadused. Näiteks kasutades südamikuna vahtu on tulemuseks hea isolatsiooniga, aga tuleohtlik komposiitpaneel. Mineraalsüdamikuga saavutatakse tulekindlus, aga kannatab materjali kaal võrreldes vahuga. Meekärg südamik annab nii tulekindluse kui ka erakordse jäikuse, küll aga on selle tootmisprotsess keerukam ja kulukam. Kokkuvõtvalt sõltub välise lehe ja südamiku valik selle kasutuselast. [6]



Joonis 2.1. Alumiiniumkomposiit alumiinium meekärg südamikuga [7].

## 2.2 Arhitektuurne alumiiniumkomposiit

Hoonetel kasutatav alumiiniumkomposiit materjal koosneb kahest alumiiniumi lehest ja nende vahele pressitud südamikust. Alumiiniumi sulamiks on AW-5005 ja paksus 0,5 mm. Komposiitmaterjali paksus võib olla 3-6 mm. Nendest enimkasutatav paksus on 4 mm. Üks pool komposiitmaterjalist on reeglina värvitud vastavalt materjalitootja portfooliote ja kaetud kaitsekilega. Värvina kasutatakse fluorosüsini või polüester baasil värve, mis tagavad värvikihi vastupidavuse erinevates keskkondades. Südamiku valikus on erineva tuleklassiga segusid, millest enim kasutatavad on „PE“ ja „FR“ nimetusega segud. Kõrgeima tuleklassiga on olemas „A2“ nimetusega südamik. ACM'i kasutamise kasuks räägivad materjali hea töödeldavus, jäikus, kergus, võime heli isoleerida ja selle pikk eluiga. [7]



Joonis 2.2. Alumiinium komposiitmaterjal fassaadidele [7].

## 2.3 Alumiiniumkomposiit ja teras

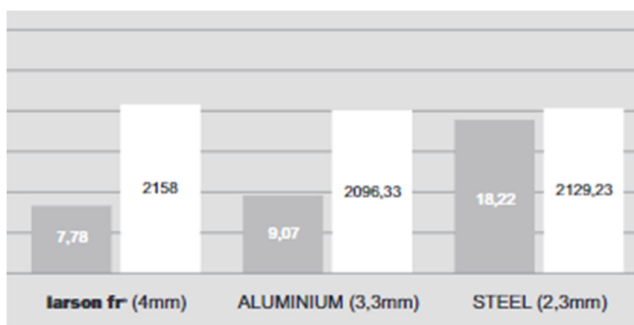
Alumiiniumkomposiidil on mitmeid eeliseid alumiiniumi ja terase ees. Põhilised komposiidi kasuks rääkivad tegurid on selle jäikus, suhteline kergus antud paksuse juures ja töödeldavatus.

Tabel 2.1. Fassaadimaterjalide võrdlus Ruukki portfoolio põhjal [7, 8].

	<b>Teras (DX51D)</b>	<b>Alumiinium (AW-1005)</b>	<b>ACM (A2/FR)</b>
Paksus (mm)	<b>1,2</b>	1,5	4
Mass (kg/m <sup>2</sup> )	9,36	<b>4,05</b>	7,78
Jäikus (kNcm <sup>2</sup> /m)	1111	953	<b>2158</b>
Tulepüsivus klass	<b>A1</b>	<b>A1</b>	A2/B1
Tõmbetugevus (MPa)	<b>500</b>	100	125-140
Voolepiir (MPa)	<b>270</b>	62	80-120
Elastusmoodul (MPa)	<b>210 000</b>	70 000	70 000
Hind	<b>€</b>	€€€	€€€

*\*paksus kirjas väljad toodud parem väärtus*

Allpool on välja toodud alumiiniumi ja terase paksused, mis annavad 4 mm komposiidiga samaväärse jäikuse väärtuse ja võrdlus nende erikaaludes.



Joonis 2.3. ACM'i võrdlus alumiiniumi ja terasega [7].

## 2.4 Tulekindlus

Hoonete tulekindluse klassid on paika pandud standardiga EN 13501-1 [9]. Hooneprojektiga nähakse ette ka selle tuleklass ja kõik seal kasutatavad materjalid peavad olema sertifitseeritud vähemalt projektis määratud tasemele. Alumiinium komposiitmaterjali on saadaval põhiliselt kolme erineva südamikuga, mis tähendab kolm erinevat tuleklassi.

PE südamikuga komposiitmaterjal on äärmiselt tuleohtlik ja aitab tule levikule kaasa. Selle ehe näide oli Suurbritannias 2017. aastal toimunud kõrghoone (Grenfell Tower) tulekahju, kus madalamal korrusel tekkinud põleng sööstis tänu fassaadile kõrgematele korrustele. Selle tõttu kasutatakse peale seda intsidenti kas FR või A2 südamikuga komposiitmaterjale [10].

FR südamikus on 70% ulatuses mineraalaineid ja 30% polümeere. Selline kooslus annab materjali tuleklassiks B1-s1, d0. See tähendab, et materjal on tulepüsiv, eritab suitsu vähesel määral või üldse mitte ega eralda tilkuvaid osi. [7]

A2 südamik on 90% ulatuses mineraalid ja ainult 10% polümeerid. Nimetatud materjali tuleklass on A2-s1, d0. See tähendab, et materjal on mittesüttiv ja sarnaselt FR südamikule eraldab vähesele määral või üldse mitte suitsu ega eralda tilkuvaid osakesi. [7]

Tabel 2.2. Tuleklasside klassifikatsioon [9].

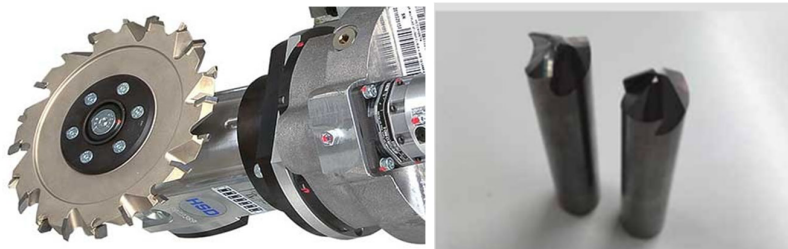
Ranking according European Classification (DIN EN 13501-1) according the building inspection appointment referring to Building Regulation A.				
Building Inspection Appointment	Definition according DIN 4102	European Classification according DIN EN 13501-1		
		Energetic contribution to fire	Production of smoke	Behavior of droplets
Non-flammable	A1	A1		
	A2	A2	s1	d0
Flame-retardant	B1	B, C	S1	d0
		A2, B, C	S2	d0
		A2, B, C	S3	d0
		A2, B, C	S1	d1
		A2, B, C	S1	d2
		A2, B, C	s3	d2
Normal flammable materials	B2	D	s1	d0
			s2	d0
			s3	d0
		E		
		D	s1	d2
			s2	d2
		E	s3	d2
				d2
No performance noted *	B3	F		

## 2.5 Alumiiniumkomposiidi töötlemine

ACM'i töötlemiseks kasutatakse põhiliselt spetsiaalseid CNC freespinke, mille töölauda mõõtmed võivad ulatuda kuni 2000 mm laiusesse ja kuni 10 000 mm pikkusesse. Antud materjali on võimalik töödelda ka käsifreesiga ja seda saab edukalt lõigata ka lehtmaterjali töökeskustega. Tööriistadest kasutatakse ACM'i töötlemiseks erinevad ots- ja sõrmfreese ning ka spetsiaalseid saekettaid.



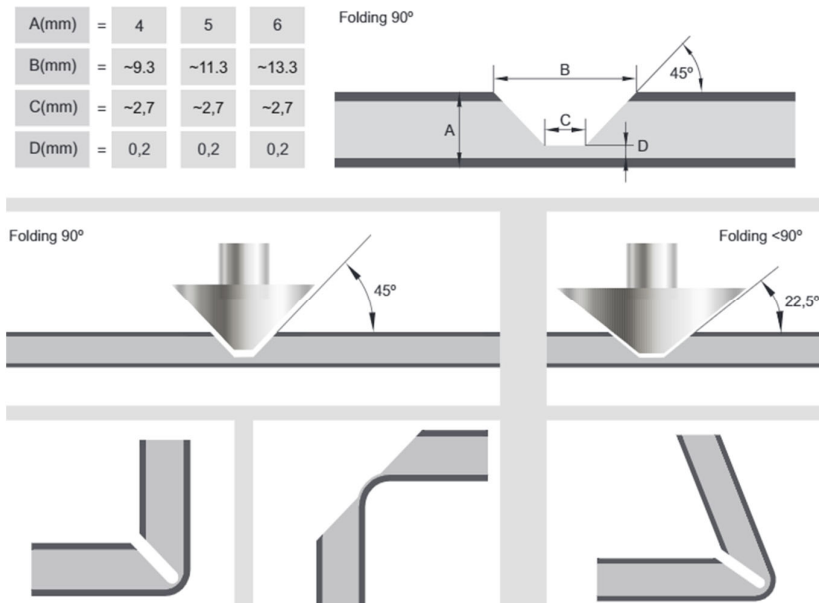
Joonis 2.4. ACM'i vertikaalne töökeskus [11].



Joonis 2.5. ACM'i painutussoonte tegemiseks kasutatav saeketas ja sõrmfreesid [11].

Alumiinium komposiitmaterjali paksusest ja konstruktsioonist tulenevalt, ei ole seda võimalik painutada kasutades levinud lehtmaterjali painutamise meetodeid, kuna selliselt kaasneb oht pinnakatte pragunemisele. ACM'i miinimum painutamise raadius selle vältimiseks on 150 mm [7]. Pragunemist vältiv viis painete tegemiseks on komposiitmaterjali sisse V soonte freesimine. Selliselt painutatakse ära ainult komposiidi välimine alumiiniumi kiht ja tulemuseks on väline painderaadius  $\sim 1$  mm. Teravamate nurkade kui  $90^\circ$  painutamiseks tuleb kasutada kas laiema V nurgaga tööriistu või freesida mitu läbimist. Ka V soonte freesimise puhul on tarvis jälgida miinimum nõudeid, et vältida järjekordselt pinnakatte pragunemist. Materjalitootja

poolt on antud juhised, milline peab olema V soone sügavus selle ära hoidmiseks. Antud töös kasutatava nelja millimeetrise komposiitplaadi puhul on selleks 0,2 mm välimise kihi sisemisest küljest. Lisaks on ära määratletud V soone põhja sügavus, millest tulenevalt paineraadius tekib. Selleks on nelja millimeetrise materjali puhul 2,7 mm.



Joonis 2.6. ACM'i painutamine V soontega [7].

## 2.6 Alumiiniumkomposiit materjali taaskasutus

Alumiiniumkomposiit materjalid on täies ulatuses taaskasutatavad. Tulenevalt materjali kõrgest väärtusest ja võimest seda korduvalt taaskasutada on suur huvi ka selle ümber töötlemisel, mis on kokkuvõttes vähem energianõudlikum kui uue tootmine. Küll aga nõuab see spetsiaalseid masinaid ja protsessi, et see õnnestuks. Komposiidi taaskasutamise protsess koosneb järgmistest etappidest:

- Purustamine
- Jahvatamine
- Jahutamine
- Sõelumine
- Elektrostaatiline eraldamine

Esimeses järgus purustatakse ACM väiksemateks tükkideks. Kuna alumiiniumi ja südamikumaterjali vahel on väga tugev liide ei ole seda kerge üksteisest eraldada. Selle ületamiseks jahvatatakse purustatud ACM peenikeseks pulbriks spetsiaalsete seadmete abil. Jahvatamise protsess genereerib väga palju soojust, mille tulemuseks on põlenud tükid ja kasutatava materjali kadu. Selle vältimiseks on vajalik jahvatatud puru jahutamine kasutades jahutusvett paralleelselt jahvatamise protsessiga. Jahvatatud puru liigub edasi sõelumise faasi, kus eraldatakse suuremad tükid purust ja saadetakse tagasi. Peenike puru liigub edasi elektrostaatiliselt eraldamise, kus südamikumaterjali ja alumiiniumi elektriliste omaduste erinevusega eraldatakse need üksteisest. [12]

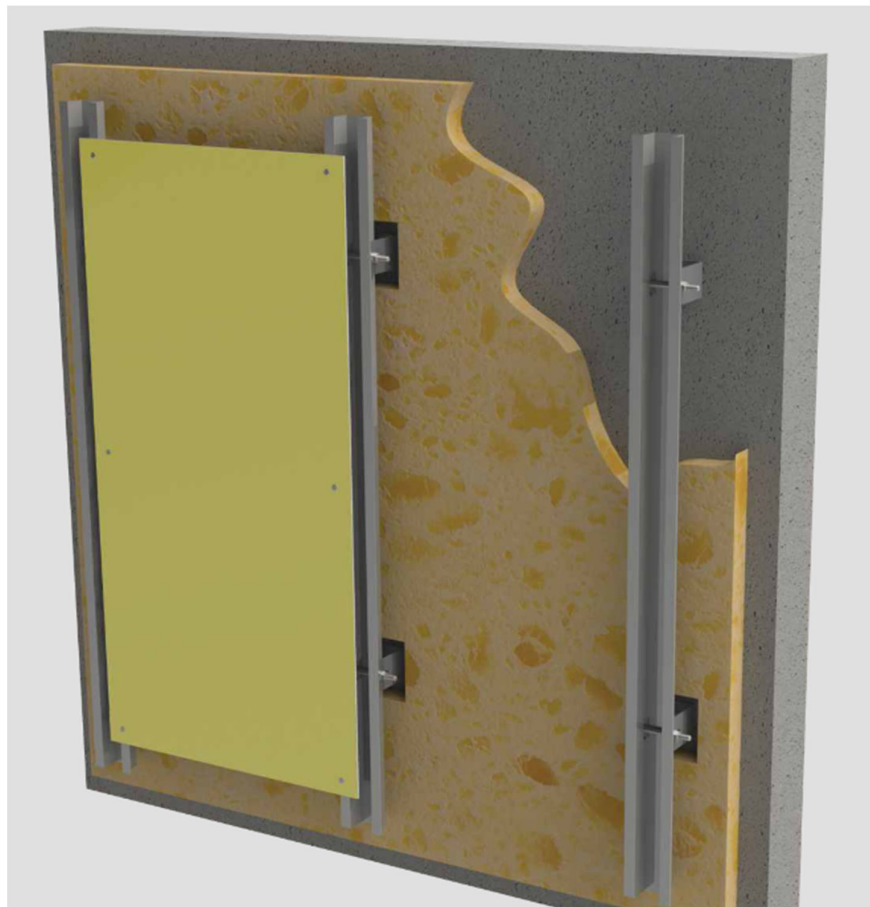


### 3. DISAINIPROTSESS

Disainiprotsessis uuritakse juba turul olevaid lahendusi ja võimalikke patente, mis käsitlevad endas ACM'i kasutamist fassaadidel. Edasi moodustatakse leitud info ja ette antud tingimuste põhjal kassett, mis vastaks seatud tingimustele ja proovitakse tootmist optimeerida nii palju kui võimalik.

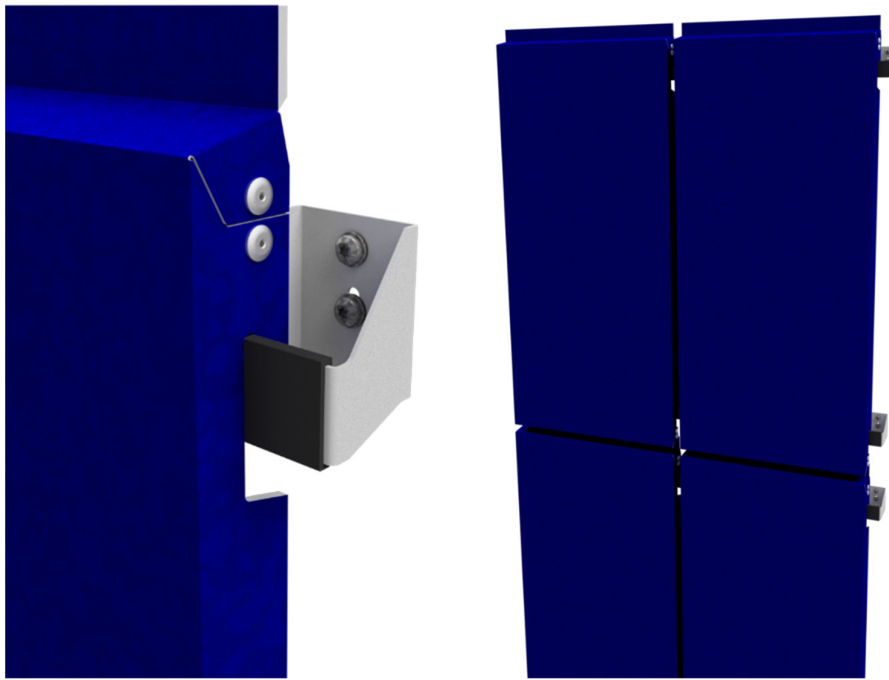
#### 3.1 Olemasolevad lahendused

Alumiiniumkomposiidist fassaadikatete kinnituslahendusi on turul erinevaid. Nende seas on nii riputatavaid lahendusi kui ka erinevate profiilidega kinnitussüsteeme. Kõige lihtsam on mõõtu lõigatud ja eelaugustatud komposiitpaneeli roovitusele kinnitamine. Eelaugustamine on vajalik soojuspaisumisest tingitud liikumiste kompenseerimiseks. Selliselt seina kinnitatavad paneelid sobivad kasutamiseks nii vertikaalselt kui ka horisontaalselt. Lahenduse negatiivne aspekt on nähtav kinnitus.



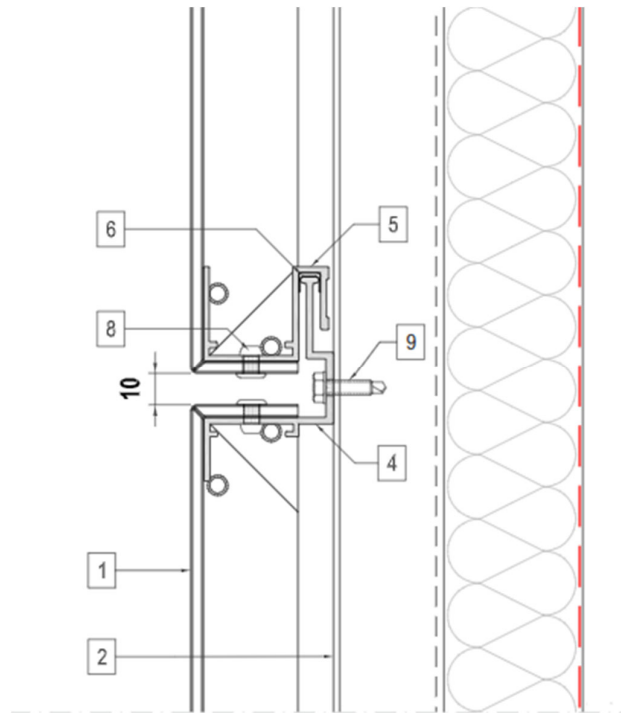
Joonis 3.1. Painutamata ACP kinnitamine alusroovitusele [7].

Teine võimalus ACP materjali seinale kinnitada, mis hõlmaks endas ka peidetud kinnitust on ACM'ist koostatud kassettide riputamine spetsiaalsete kandurite külge. Selline lahendus sobib eelkõige vertikaalse orientatsiooniga paneelidele. Ruukki portfellis on üks selline lahendus saadaval.



Joonis 3.2. Ruukki vertikaalse ACM paneeli kinnituslahendus [13].

Lahendust, mis hõlmaks nii peidetud kinnitust kui ka horisontaalset paigutust on võimalik teostada kasutades selleks spetsiaalseid profile. Turul eksisteeriv lahendus koosneb ACM'ist ja alumiiniumprofiilidest, mis moodustavad lukusüsteemi, kus kassett kinnitatakse ülemisest äärest ja iga järgnev kassett lukustub alumise osaga alumise kassetti peale. Seal juures peidetakse kinnitamiseks kasutatud kinnitusvahend.



Joonis 3.3. Alumiiniumkomposiit ja alumiiniumprofiilid, horisontaalvuuk [7].

## 3.2 Kasseti projekteerimine ja valmistamine

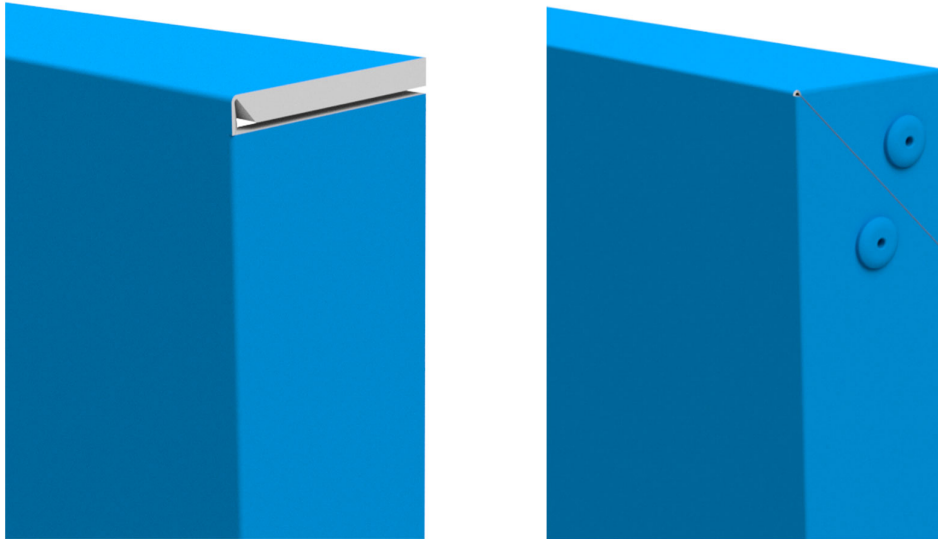
Eesmärk on saavutada peidetud kinnitusega fassaadikate kasutades alumiiniumkomposiit materjali. Selleks moodustatakse paneelist nii nimetatud „kassett“, mis tähendab neljast küljest painutatud fassaaditoodet. Spetsiaalse „lukusüsteemiga“ tagatakse, et kassett püsib seinas ja kinnitused peidetakse iga järgneva kassetiga.

Kuna ACM'i painutamisel kasutatakse V soonte freesimist, siis see tähendab, et kogu painutatud nurk on ainult 0.5 mm paks. Selliselt ei suuda kassett enda kuju hoida, seega on tarvis kasseti nurgad omavahel ära ühendada kasutades neetimist. Neetide eelis on võimalikult väike needi pea võrreldes teiste kinnitusvahenditega, mis omakorda tähendab, et kinnitusvahend ei paista nii palju silma.

Loodava toote horisontaalne vuuk on disainitud 15° nurga alla, et hõlbustada vuuki sattunud vee ära voolamist ja sellega hoida vuugi pind puhtam kui tasapinnalise lahenduse korral. Antud kalle on kasutusel kõikidel Ruukki fassaaditoodetel ja selle tõttu on nimetatud lahendus üle toodud ka siia.

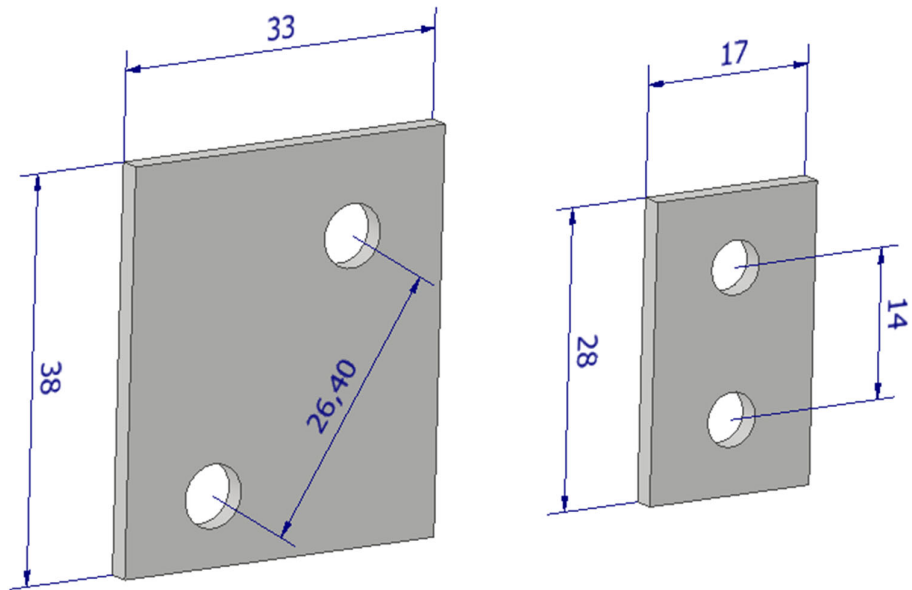
Turul levinud lahendus on 45 kraadi all lõigatud lisakõrv nurgas, mis ühendatakse omavahel 2 mm alumiiniumplaati kasutades. Joonisel 9 on välja toodud ACM'ist moodustatud nurgad selle originaal kujul ja lisakõrva kasutades. Visuaalselt on

eelistatud lisakõrva kasutamine, kuna selliselt ei jää näha komposiitmaterjali südamik ja nurgad on omavahel seotud lisades kassetile tugevust.



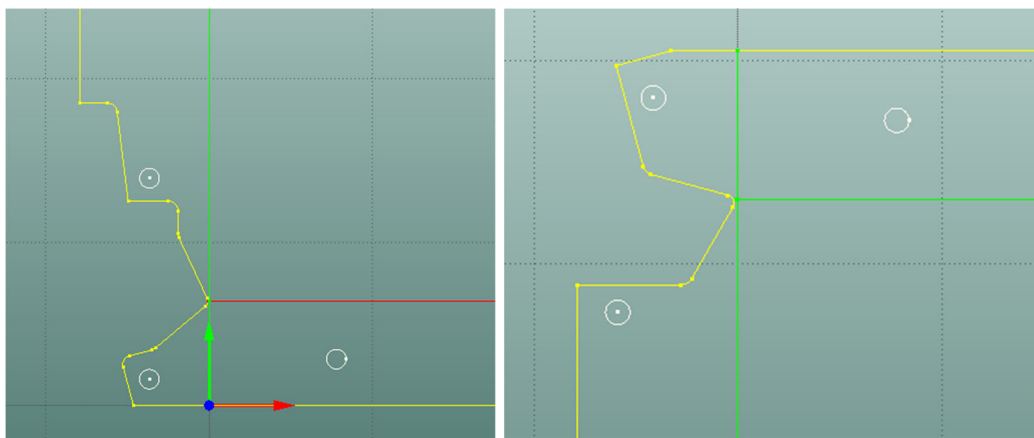
Joonis 3.4. ACM'ist painutatud kasseti nurgalahendused.

Eelpool illustreeritud lahendus kasutab võrdlemisi suurt alumiinium nurgaliiteplaati, et nurka koos hoida. Loodava lahenduse puhul on teostatud nurgaväljalõike kontuuri modifikatsioon, mis võimaldab vähendada nurgaliiteplaadi suurust 2,5 korda saavutades märkimisväärse materjali kokkuhoiu. Lisaks annab saavutatud mõõtudega nurgaliiteplaat võimaluse seda efektiivselt toota kasutades stantsimist. Nimetatud plaadi tootmiseks on vajalikud 2 tööriista, *Round Ø6* ja *Rec 28x17*. Plaati on võimalik välja lüüa 3 löögiga, mis vähendab suuresti tootmiskulusid.



Joonis 3.5. Nurgaliiteplaadi optimeerimise tulemus.

Loodava lahenduse puhul on nurgaväljalõiget veel korrigeeritud selliselt, et pinnalaotuse sirgeid ääri oleks täispikkuses võimalik töödelda saekettaga. See tähendab, et ükski nurga väljalõike kontuuri joon ei tohi ulatuda kaugemale kui kogu pinnalaotuse nii nimetatud *bounding-box*. Nurga enda kontuuri töödeldakse kasutades  $\varnothing 4$  mm sõrmfreesi. CAM programmi liikumiste mugavdamiseks on kontuuri sisenukkades kasutusel R3 siseraadiused.



Joonis 3.6. CNC programmi „XCAM“ väljavõtte kasseti alumisest ja ülemisest nurgast.

Eelpool mainitud tingimusi ja määrdusi arvesse võttes on tulemuseks joonis 12 illustreeritud kassett, mis vastab järgnevatele kriteeriumitele:

- ülemine kalle 15 kraadi

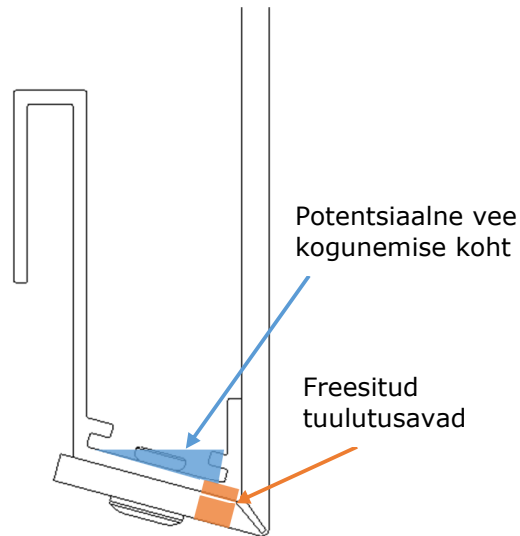
- alumine horisontaalvuugi kalle paralleelne ülemisega
- optimeeritud nurgaliiteplaat
- kontuuri väljalõike optimeerimine saeketta sirgeid lõikeid arvesse võttes



Joonis 3.7. Ruukki ACM kasseti nurgad, ülemine ja alumine.

ACM kinnitatakse alumiiniumprofiili külge neetidega. Neetideks on materjalitootja poolt soovitatud Al/St tõmbeneet läbimõõduga  $\varnothing 4,8$  mm. Needi kere on alumiinium ja tõmmits terasest. Needi pikkus 12 mm on sobilik 6-8 mm materjali koostamiseks. Antud juhul on vajalik koostamise paksus 4mm ACM ja 2mm alumiiniumplaat. Needipea läbimõõt on 9,5 mm. Needitootja soovituslik ava läbimõõt materjalis on  $\varnothing 5,2$  mm [7].

Tulenevalt kasseti alumisest äärest, mis on disainitud olema paralleelne ülemise äärega, tekib kassetti sisse alla negatiivne kalle, mis kogub vett. Vee ära juhtimiseks alumise negatiivse painde nurgast freesitakse komposiidi ja profiili sisse tuulutusavad suurusega 5x15 mm. Tuulutusavad paigutatakse kasseti põhja maksimaalse sammuga 500 mm. See tähendab, et olenevalt kasseti pikkusest sõltub ka tuulutusavade arv ja omavaheline vahe. Tuulutusavad freesitakse kasseti alumisele küljele ja profiilide sisse. Materjalist tulenevalt on ava miinimumkaugus kasseti alumisest paindest 3 mm. Selliselt on tagatud, et painutades ei venitata ava välja, aga samal ajal saab võimalikult suur kogus vett välja voolata.



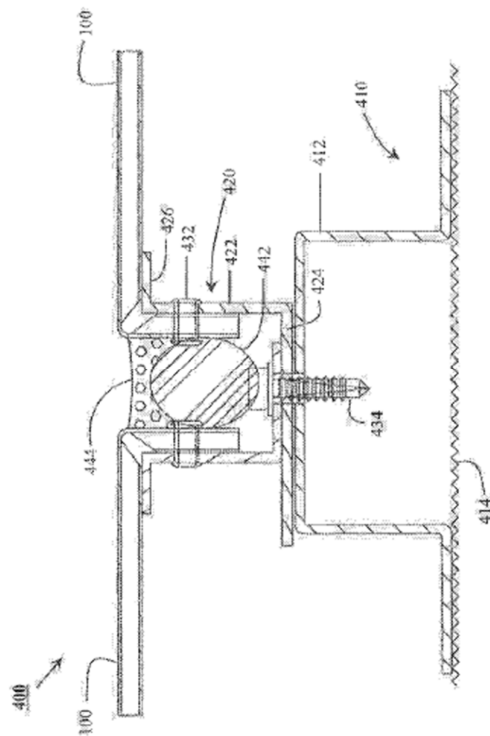
Joonis 3.8. Vee kogunemine kasseti sees ja tuulutussavad.

### 3.3 Patenditaotlus

Loodava toote komposiidi ja alumiiniumprofiilide moodustatud lukusüsteemile on esitatud patenditaotlus, mis käsitleb endas *sandwich*-struktuuriga komposiitpaneeli kasutamist spetsiaalsete alumiiniumprofiilidega [14].

Patenditaotluse läbi minemiseks vaadeldi juba olemasolevaid patente, mis käsitlevad alumiiniumkomposiidi kasutamist fassaadidel või kalde all vuuki kui uudset leiutist. Välja saab tuua kaks kõige lähedasemat patenti, millest esimene käsitleb *sandwich*-struktuuriga komposiitpaneeli kasutamist fassaadidel ja teine metall profiilide kasutamist fassaadikattena, kus on mainitud ka kalde all horistonaalne vuuk.

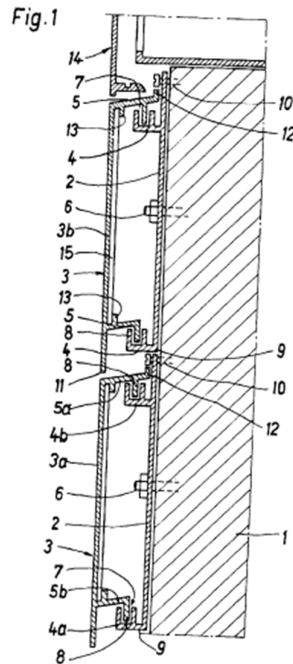
Eelpool nimetatud esimene patent loodi 2018. aastal Suurbritannias ja selle sisu oli terasest komposiitmaterjalist fassaadikate kasutades Z-kujulisi terasest profiile, mis on needitud eelpool nimetatud SCP materjali külge. Lisaks on patendis ära mainitud tihendatud vuugid kasutades tihendusmassi, mis tagab fassaadi veekindluse. Antud juhul ei ole tegemist ventileeritud fassaadiga. Z-kujulised profiilid kinnitatakse terasest roovide külge isepuuriva kruviga. [15]



Joonis 3.9. Komposiitkasseti fikseerimine, horisontaalvuuk [15].

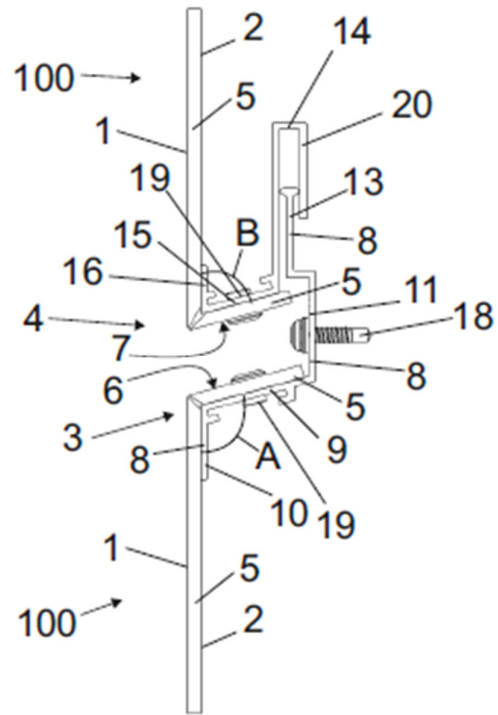
Teine patent on 1965. aastal Prantsusmaalt, mis käsitleb kalde all horisontaalvuugi kasutamist, mille eesmärk on vähendada fassaadi hoolduskulusid [16]. Leiutis ise on metallist või puidust spetsiaalsed profiilid, mis riputatakse seina peale kinnitatavate profiilide külge. Iga järgmine fassaadiprofiil takistab alumise profiili ära tulemist. Sarnasus Ruukki patenditaotlusele oli kalde all horisontaalvuuk, mille pealt vesi saab ära voolata ja hoiab selliselt vuugi pinna puhtama kui horisontaalne vuugi lahendus.





Joonis 3.10. Kalde all horisontaalvuugiga metall profiilist fassaad [16].

Kuna komposiitmaterjali kasutamine fassaadikattena ja kalde all horisontaalvuuk ei olnud enam uued leiutised, sai patenditaotlus esitatud täpsemalt loodava toote luku-süsteemile. Patendi leiutatavaks osaks määrati *sandwich* struktuuriga komposiitpaneeli kasutamine spetsiaalse kinnitusprofiiliga, kus soone taoline avaus nr 20 võtab vastu alumise paneeli ülemise kujundi nr 13 (Joonis 3.11). Selline lahendus võimaldab kassettide lihtsa installatsiooni ja tagab alumise osa fikseerituse teljel, mis on seinaga risti. Vertikaalsuunas liikumine on fikseeritud ülemise profiili kruvidega ja samamoodi on fikseeritud ka horisontaalne seinaga paralleelne liikumine. Küll aga on võimaldatud soojuspaisumisest tingitud horisontaalsed liikumised. Selle jaoks on profiili freesitud ovaalsed avad. Vertikaalne soojuspaisumise varu on võimaldatud profiilide kujuga, kus korrektse horisontaalse vuugi korral on piisav vahe ka ülemise ja alumise profiili vahel. Lisaks on profiilid disainitud selliselt, et nendega oleks võimalik moodustada erineva horisontaalse vuugiga seinu. Profiilid võimaldavad horisontaalvuuke vahemikus 5-20 mm.



Joonis 3.11. Reguleeritava vuugiga alumiiniumkomposiit kasseti patendijoonis [14].

## 4. NUMBRILINE ANALÜÜS

Ruukki uudistoodet on võimalik tellida vastavalt kliendi soovitud mõõtudele. Arvutuste teostamiseks on võetud pikim kassett, mida on võimalik toota 5000 mm pikkusest laolehest. Sellisel juhul on toote pikkuseks  $A = 4900$  mm. Kasseti kõrguseks on valitud  $H = 1000$  mm. Kõrgemate kassettide puhul tuleks arvutused uuesti teha veendumaks toote vastupidavuses koormustele. Arvutused on teostatud kasseti kinnitussüsteemile. Komposiitplaadi arvutuste jaoks ei olnud saada selle jaoks lähteandmeid. Materjali tarnija hoiab neid konfidentsiaalsena ja kõik komposiidiga seotud arvutused teostab ise ja saadab välja ainult raporti arvutustulemustega.

### 4.1 Tuulekoormusest tekkivad pinged

Hoonete fassaadide suurim pingete allikas on tuulekoormus, mis üldiselt ületab fassaadi oma raskusest tekkinud jõu. Tuulekoormusest tingitud suurim jõud tekib hoone nurkades, kus õhu liikumise mõjul hakatakse fassaadi seinast eemale kiskuma. Maksimaalse jõu leidmiseks ühele fassaadikassetile kasutatakse Euroopa tuulekoormuse standardit EN 1991-1-4:2005 [9]. Lähteandmete saamise jaoks vaadeldakse ühte Ruukki hiljutist projekti:

- keskmine tuulekiirus  $v_0 = 23$  m/s;
- õhu tihedus  $\rho = 1,25$  kg/m<sup>3</sup>;
- hoone kõrgus  $Z = 30$  m;
- asukohategur  $C_e(Z) = 2,5$  (vt tabel 2);
- rõhutegur  $C_{pe} = 1,4$  (vt tabel 3);
- varutegur  $[S] = 1,5$ .

Tuulekoormuse arvutamine:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_0^2, \quad (4.1)$$

kus  $q_b$  - tuulekoormus, kN/m<sup>2</sup>,  
 $\rho$  - õhu tihedus, kg/m<sup>3</sup>,  
 $v_0$  - keskmine tuulekiirus, m/s.

$$q_b = 1/2 \rho v_0^2 = 1/2 * 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 23^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 \approx 0,33 \text{ kN/m}^2$$

Tuulerõhk arvutatakse kindlal kõrgusel, eelduseks maastikutüüp III, kõrgus 30 m:  
Asukohategur  $C_e(Z)$  arvutatakse või leitakse tabelis 2.2 olevalt graafikult.

$$q_p = C_e(Z)q_b, \quad (4.2)$$

kus  $q_p$  – tuulerõhk,  $\text{kN/m}^2$ ,  
 $C_e(Z)$  – asukohategur.

$$q_p = C_e(Z)q_b = 2,5 * 0,3 = 0,825 \text{ kN/m}^2$$

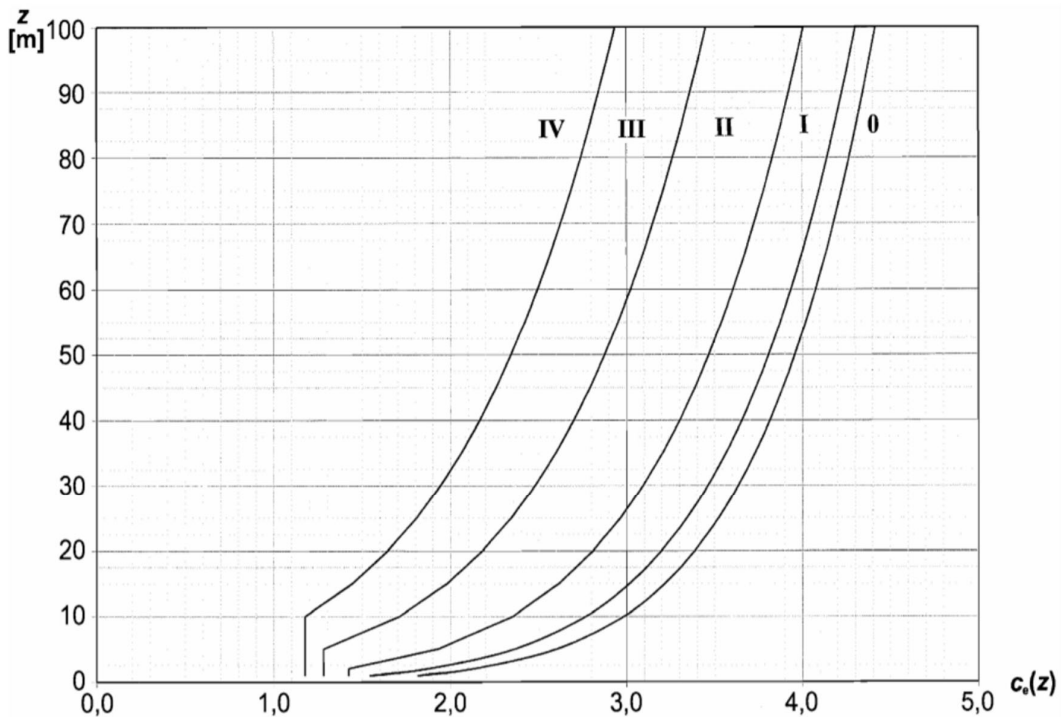
Seinale mõjuv välisrõhk, koefitsendi väärtused (Tabel 2.3):

$$w_e = q_p * C_{pe}, \quad (4.3)$$

kus  $w_e$  – seinale mõjuv välisrõhk, Pa,  
 $C_{pe}$  – rõhutegur.

$$w_e = q_p * C_{pe} = 0,825 * (-1,4) = -1,155 \text{ kN/m}^2 \approx -1,16 \text{ kPa}$$

Tabel 2.2. Asukohategur loetakse graafikult [9].



Tabel 2.3. Ristkülikukujuliste ehitiste vertikaalsete seinte välise rõhu koefitsientide soovituslikud väärtused [9].

Zone	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

## 4.2 Kasseti maksimaalne kinnituste samm ja arv

Alumiinium komposiitmaterjalile on tootja poolt ette antud maksimaalse läbipaine suhtearv  $L/200$  [7]. Võrdluseks saab tuua, et terasest fassaadikatete puhul on soovituslikuks läbipaine suhtearvuks  $L/120$  [17]. Kuna alumiiniumkomposiit on oma olemuselt jäigem, siis selle tõttu on ka lubatud läbipaine väiksem. Sama suhtearvu kasutatakse ka alumiiniumprofiilil, kuhu külge komposiit kinnitub.

$$\delta_{max} = \frac{L}{200'} \quad (4.4)$$

kus  $\delta_{max}$  – detaili maksimaalne läbipaine, mm

$L$  – kinnituste samm, mm

Materjali elastsusmoodul  $E = 70\,000$  MPa [7].

Profiili läbipaine arvutamise valem [18]:

$$\delta = \frac{5\omega L^4}{384EI} \quad (4.5)$$

kus  $\omega$  – joonkoormus, N/m,

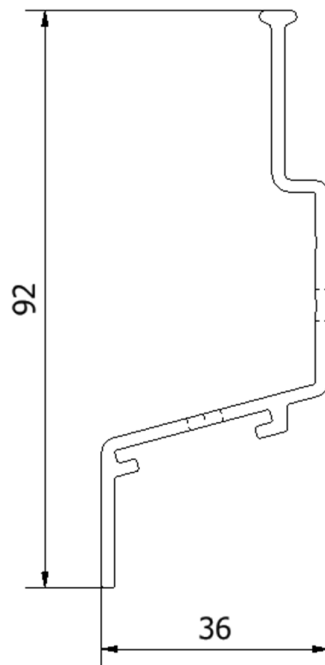
$L$  – kinnituste samm, mm,

$E$  – elastsusmoodul, MPa,

$I$  – ristlõike telginertsmoment,  $\text{mm}^4$ ,

### 4.2.1 Profiili telginertsmoment

Alumiiniumprofiili telginertsmomendi leidmiseks vaadeldakse selle vertikaalset ristlõiget, mis töötab tuulekoormusele. Kuna tegemist on keerulise ristlõikega kasutatakse nimetatud väärtuse leidmiseks AutoCAD tarkvara. Selleks joonistatakse ristlõige AutoCAD'is välja, luuakse regioon („REGION“) ja kasutades „MASSPROP“ käsku saadakse soovitud andmed. Antud vaatluse juures ei arvestata profiilile kinnituvat komposiitplaadiga, mis tugevdab profiili ristlõiget veelgi enam. Küll aga annab selliselt arvutamine suunitluse kinnituskohdade arvu määramiseks.



Joonis 4.1. Alumiiniumprofiili ristlõige.

Profiili ristlõike telginertsmoment CAD programmi põhjal:

$$I_y = 45107 \text{ mm}^4$$

REGIONS	
Area:	277.6600
Perimeter:	274.3680
Bounding box:	X: -22.1144 -- 13.8856 Y: -42.5778 -- 49.4222
Centroid:	X: 0.0000 Y: 0.0000
Moments of inertia:	X: 176068.1307 Y: 45107.0108
Product of inertia:	XY: -58645.2445
Radii of gyration:	X: 25.1816 Y: 12.7457
Principal moments and X-Y directions about centroid:	I: 198490.7472 along [0.9341 -0.3571] J: 22684.3943 along [0.3571 0.9341]

Joonis 4.2. AutoCAD tarkvara ristlõike omaduste väljavõte.

#### 4.2.2 Kinnituste samm ja arv

Eelnevast valemist tuletatakse kasseti kinnituste maksimaalne vahekauguse valem ja arvutatakse tulemus:

$$L_{max} = \sqrt[3]{\frac{384EI}{1000\omega}} = \sqrt[3]{\frac{384 * 70000 * 45107}{1000 * 1600}} = \sim 900 \text{ mm}$$

Saadud tulemusega on võimalik välja arvutada vajalik kinnituskohtade arv võttes aluseks maksimaalse toote pikkuse, mis jagub täpselt selle sammuga. Vajalike kinnituskohtade arv arvutatakse järgmiselt:

$$n = \frac{A}{L_{max}} + 1, \quad (4.6)$$

kus,  $A$  – fassaadikasseti efektiivne pikkus, mm,

$L_{max}$  – maksimaalne kinnituste samm, mm,

+1 – lisakinnitus viimase sammu lõpetuseks.

$$n = \frac{A}{L_{max}} + 1 = \frac{4900}{900} + 1 = 6.44 \approx 7$$

Kuna kasseti pikkus ei jagu täpselt maksimaalse kinnituskohtade arvuga, siis ei ole antud olukorras maksimum koormuse tingimus täidetud. Selle parandamiseks võetakse kasseti pikkuseks kinnituskohtade sammuga korrutatud arv, mis on väiksem kui 4900 mm. Uus pikkuse väärtus on selliselt ( $900 * n_2 \leq 4900$ )  $A_2 = 4500$  mm ja kinnituskohtade arv  $n_2 = 6$ .

### 4.3 Struktuuranalüüs

Veendumaks, et alumiiniumprofiil peab vastu leitud pikkuse ja kinnituskohtade arvu juures arvatud koormusele, teostatakse profiilile tugevusanalüüs. Profiili materjaliks on valitud laialdaselt levinud ekstrudeerimisel kasutatav AW-6060F22 T6 alumiiniumi sulam. Nimetatud materjali omaduste sekka kuuluvad hea korrosioonikindlus, hea pinnakvaliteet ja värvitavus. Mehaanilised omadused antud sulamile on standardi EN755-2 kohaselt  $R_m = 190 \text{ MPa}$  ja  $R_{p0,2} = 150 \text{ MPa}$ . Võttes arvesse fassaadidel kasutatavat varutegurit 1,5 on lubatav pingeprofiilile  $\sigma = 100 \text{ MPa}$  [9].

Profiilile mõjuva jõu arvutamiseks leitakse sellele läbi komposiit osa mõjuv jõud. See leitakse võttes arvesse kasseti uut pikkust ja sellele mõjunud tuulekoormust:

$$w_e = \frac{F_1}{S}, \quad (4.7)$$

kus  $w_e$  – välisrõhk, kPa,

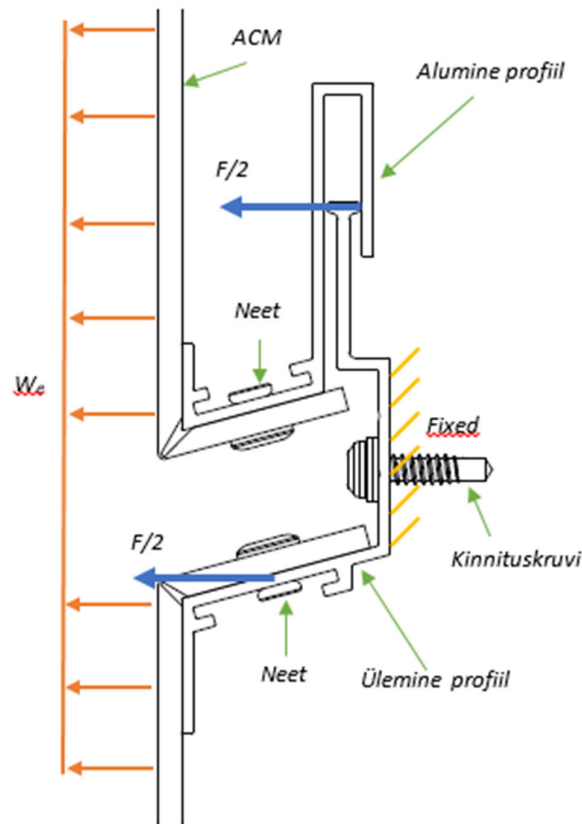
$F_1$  – kassetile mõjuv jõud, N,

$S$  – fassaadi pindala, m<sup>2</sup>.

$$F = w_e * S = 1,16 * 4,5 = 5220 \text{ N}$$

Kuna kassett kinnitub ülemise profiiliga roovidele ja alumine profiil hoiab seda alumise kasseti ülemise profiili küljes, siis mõjub ühele ülemisele profiilile kogu ühte kasseti mõjutav tuulekoormusest tingitud jõud  $F$ . Ühele kinnituskohale mõjuv jõud on seega ( $F_1 = F / n$ )  $F_1 = 870 \text{ N}$ .

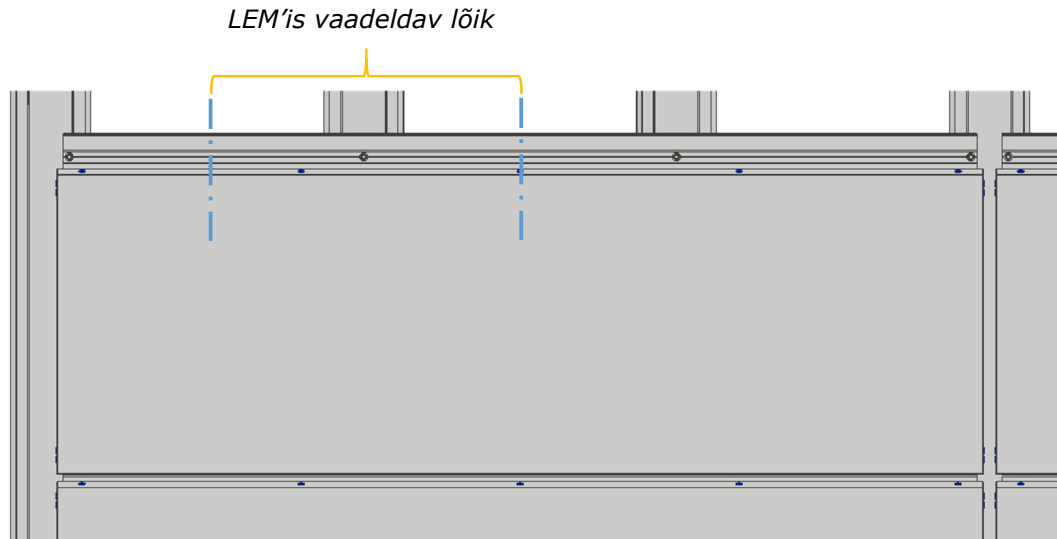




Joonis 4.3. Kassetisüsteemi ülemise profiili ristlõikele mõjuvad jõud.

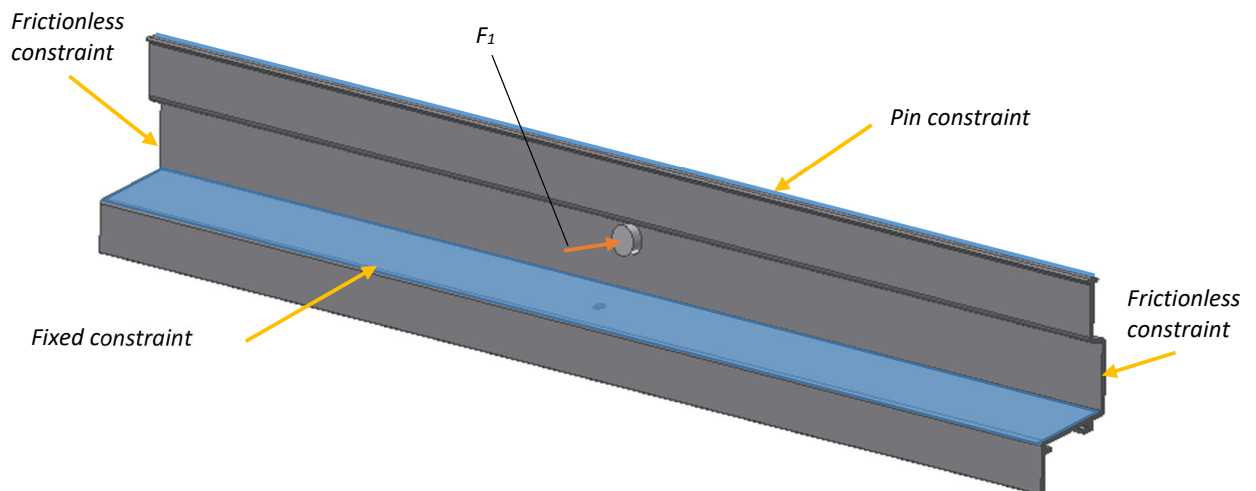
#### 4.3.1 LEM analüüs ühe kruviga roovi kohta

LEM analüüsi tegemiseks kasutatakse *Autodesk Inventor* tarkvara. Analüüsi lihtsustamiseks vaadeldakse ainult ühte lõiku kogu profiili pikkusest. Seda see tõttu kuna paneelile ja seeläbi profiilile mõjub jaotatud koormus. See tähendab, et profiil käitub iga roovi vahelisel alal sarnaselt. Tulenevalt kasutatavast tarkvarast saavutati korrektne tulemus kui lõigu pikkuseks valiti 900 mm ja lõik valiti kahe roovi vahelt järgmise kahe roovi vahele selliselt, et kinnituskoht jääb lõigu keskele. On teada, et sellist sümmeetrilist lõiku on võimalik veel kord poolitada, aga kahjuks käesolev tarkvara ei andnud selliselt adekvaatset tulemust.

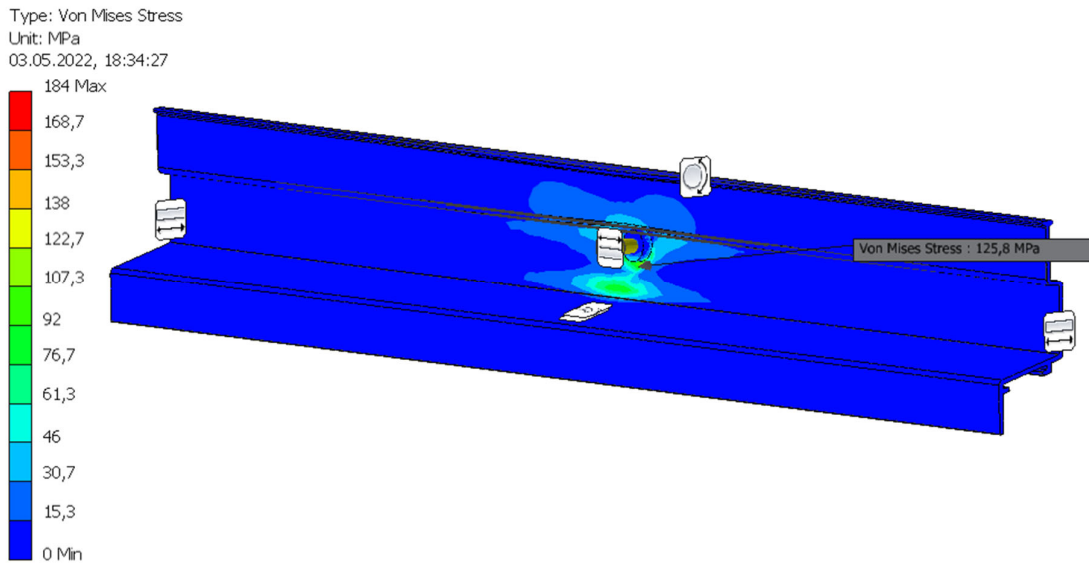


Joonis 4.4. Kasseti tüüpinstallatsiooni kujutis ja vaadeldav profiili lõik.

Korrektse deformatsiooni saavutamiseks antud olukorras fikseeritakse ACM'i külge kinnitav pind ja rakendatakse *pin constraint* profiili ülemisele kokkupuute pinnale. Profiili lõike otsad on piiratud tasapinnaliselt ja jõudu rakendatakse kruivi pea kujutisele suunaga roovi poole. Jõud on eelpool välja arvatud  $F_1 = 870$  N. Profiilile luuakse analüüsi tarbeks võrk kolmnurk elemendi suurusega 5 mm. Ava lähedane ala defineeritakse tihedama võrguga elemendi suurusega 2 mm.



Joonis 4.5. Alumiiniumprofiili LEM analüüsi rajatingimused ühe kinnitusega.

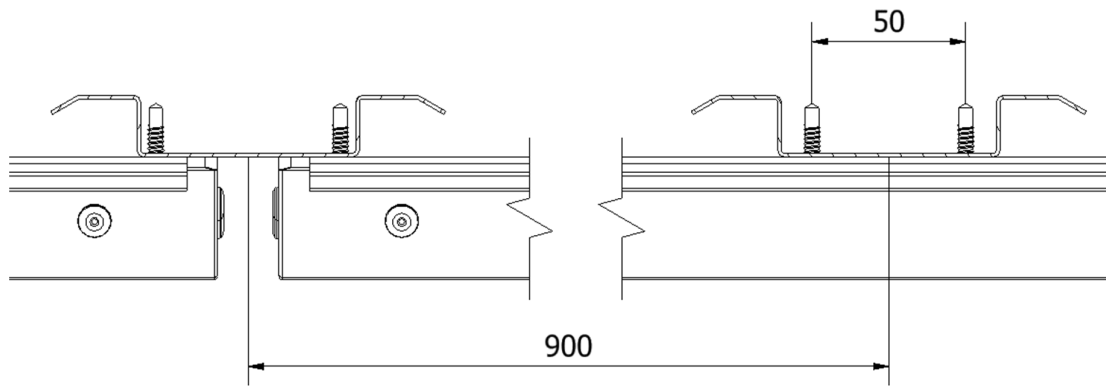


Joonis 4.6. Alumiiniumprofili kruvikoha vastupanu tuulekoormusele.

Saadud tulemus näitab suurimat pinget modelleeritud kruvi pea pinnal, mis tõttu ei saa seda lugeda korrektseks. Vaadeldes profiili pinnal tekkinud pingeid on näha, et maksimaalne tekkinud pinge on 125,8 MPa. Kuna ette antud lubatav pinge oli 100 MPa, siis antud tuulekoormuse puhul selline lahendus ei rahulda seatud tingimusi.

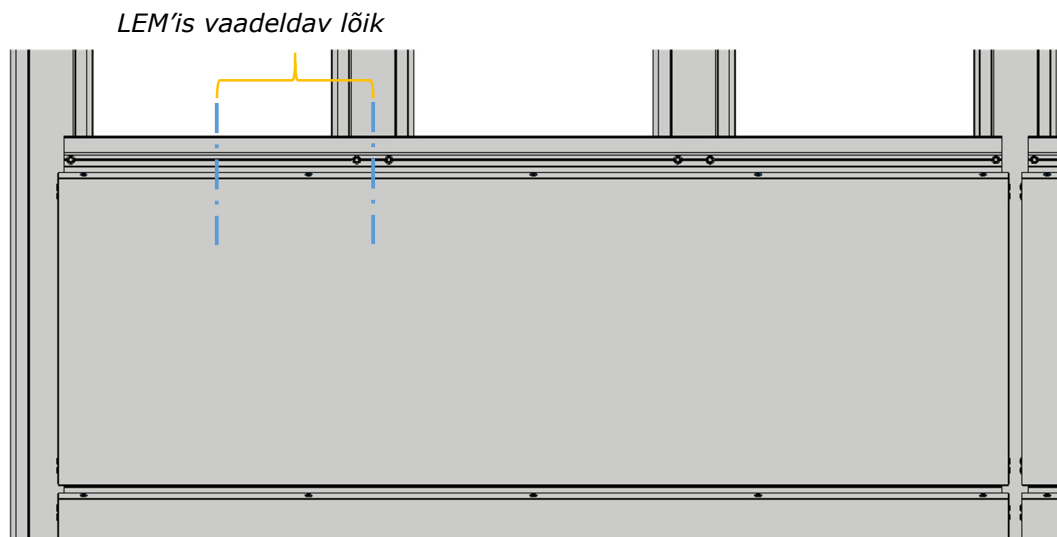
#### 4.3.2 LEM analüüs kahe kruviga roovi kohta

Antud lahenduse suurimad pinged tekivad kruvi piirkonnas ja seda on võimalik vähendada kasutades ühe roovi kohta kahte kruvi. Roovi esipinna laius on 72 mm, kruvide omavaheline kaugus valitakse 50 mm. Selliselt on võimalikult lai ala fikseeritud ja samal ajal jääb paigaldusvaru juhul kui roovid ei ole nominaalsete vahedega paigaldatud.



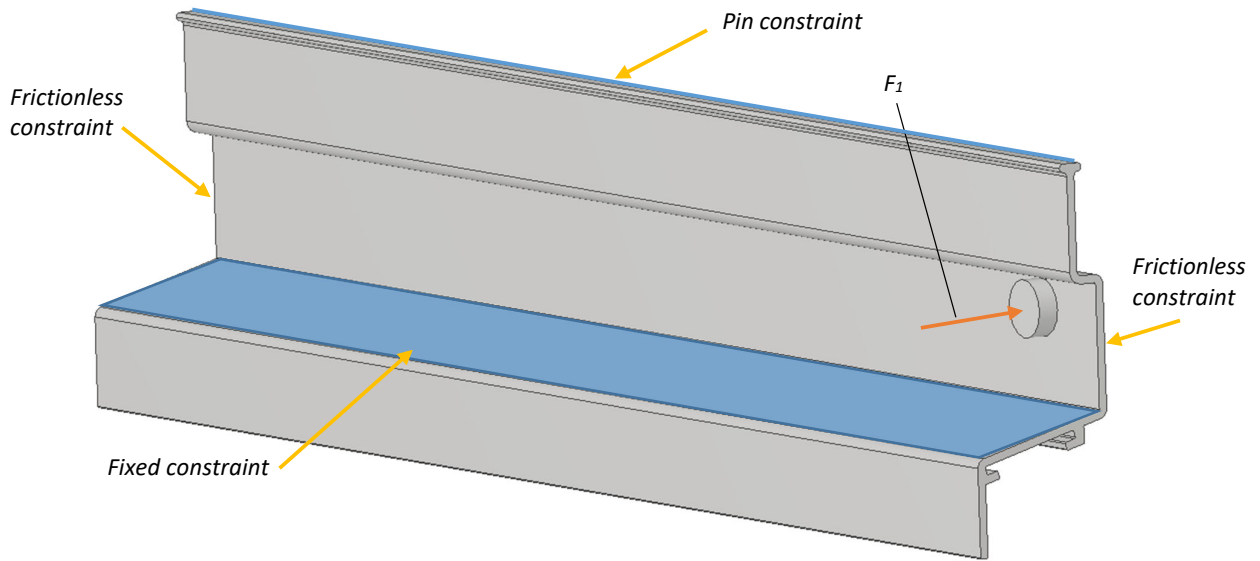
Joonis 4.7. Kasseti ja roovituse horisontaallõige.

Kahe kinnituspunktiga profiilile teostatakse uuesti LEM analüüs. Seekord valitakse analüüsitavaks lõiguks kahe roovi vaheline keskpunkt ja kahe kinnituskoha vaheline keskpunkt. Selliselt on analüüsitava lõigu pikkus 450 mm. Lihtsustus on tehtud eeldusel, et jaotatud koormus mõjutab vaadeldavat lõiku kogu kasseti pikkuses ühte moodi.

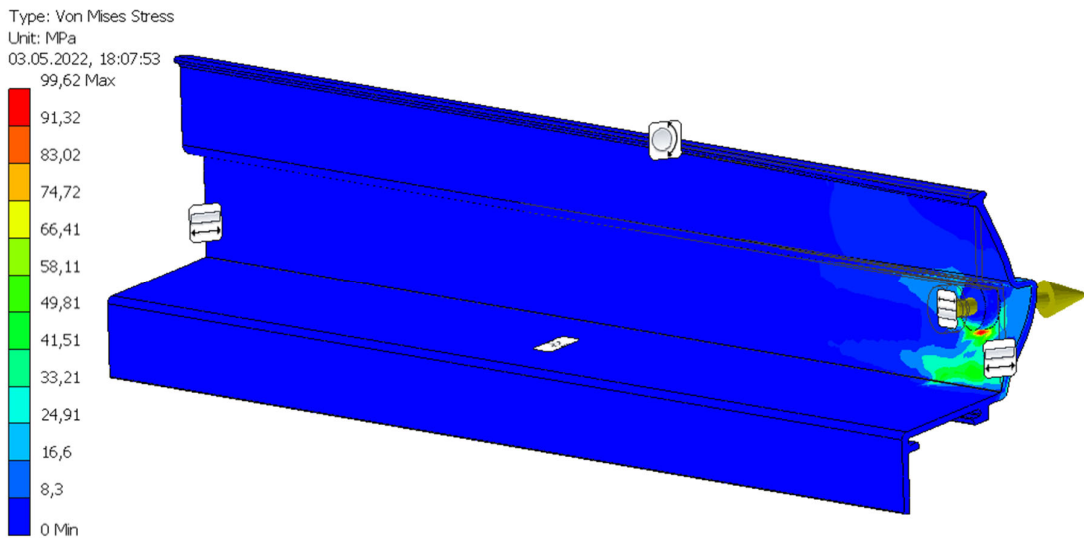


Joonis 4.8. Kasseti tüüpinstallatsiooni kujutis topelt kinnitusega ja vaadeldav profiili lõik.

Sarnaselt eelmisele analüüsile kasutatakse ka seekord profiili kontaktpindade fikseerimist ja jõu rakendamist läbi kruvi kujutise. ACM'i külge kinnituv ala fikseeritakse, profiili ülemisele kontaktpinnale rakendatakse *pin constraint* ja profiili lõigatud otsad on fikseeritud tasapinnaliselt. Jõud jaguneb kahe kruvi korral nende vahel võrdselt seega on rakendatavaks jõuks antud analüüsis  $F_2 = 435$  N. Võrgustiku kolmnurksete elementide suuruseks on 5 mm ja ava lähedane ala tehakse 2 mm suurusteks elementideks.



Joonis 4.9. Alumiiniumprofili LEM analüüsi rajatingimused topelt kinnitusega.

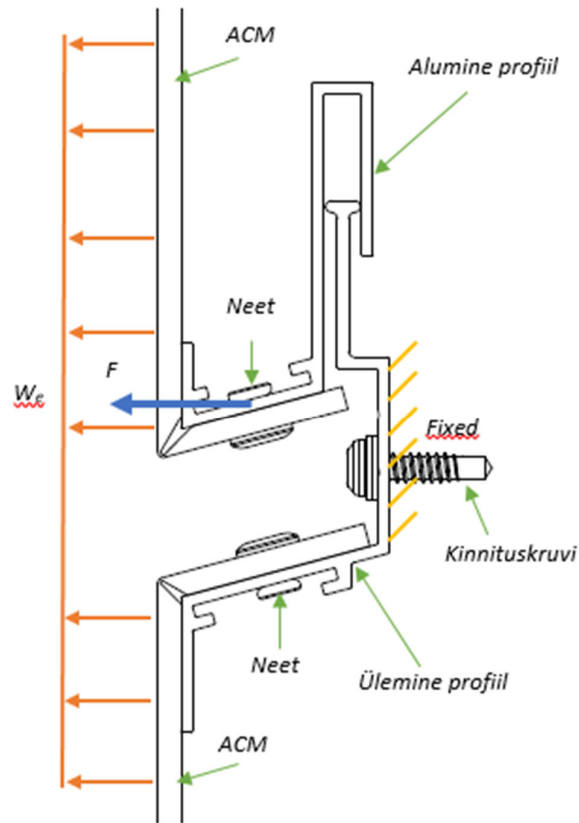


Joonis 4.10. Alumiiniumprofili topelt kruvikoha vastupanu tuulekoormusele.

Kahe kruviga kinnitatud profiili maksimum pinget esitatud koormusega on 99,62 MPa, mis rahuldab esitatud tingimust  $\sigma < 100$  MPa. Selliselt loetakse antud lahendus sobilikuks ja vastupidavaks tuulest tingitud koormustele.

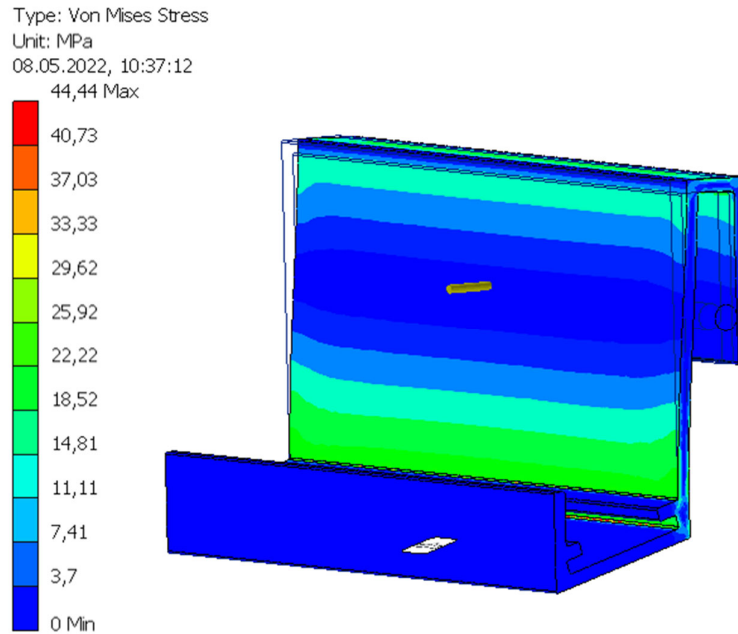
### 4.3.3 Alumine profiil

Sarnaselt ülemisele profiilile teostatakse tugevuskontroll ka alumisele profiilile. Kuna detailil puuduvad kinnitusavad ja jõud on jaotatud kogu profiili pikkuse peale võrdselt teostatakse lihtsustus ja vaatluse alla võetakse ainult 100 mm pikkune jupp. Kuna kassetile mõjub rõhk, siis punktis 6.3 välja arvatud jõud  $F$  jaotub nii ülemise kui alumise profiili vahel võrdselt. Seega on alumist profiili mõjutavaks jõuks  $F/2 = 2610$  N. Võttes vaatluse alla eelpool mainitud 100 mm jupi profiilist, mis on 4500 mm pikk, siis LEM analüüsi tarbeks jaotatakse see jõud pikkuse peale ära  $F_3 = 2610 / 45 = 58$  N.



Joonis 4.11. Kassetisüsteemi alumise profiili ristlõikele mõjuvad jõud.

LEM analüüsis moodustatakse ülemise profiili ülemisest otsast lihtsustatud kujutis, milleks on silinder läbimõõduga 4 mm. Alumise profiili ACM'i külge needitav pind fikseeritakse kasutades *fixed constraint* ja jõud rakendatakse loodud silindri vastu vastupidiselt tuulest tekkinud koormuse suunaga. Tulemuseks on 44,44 MPa, mis rahuldab seatud tingimust antud materjalile  $\sigma < 100$  MPa.



Joonis 4.12. Alumise profiili vastupanu tuulekoormusele.

#### 4.3.4 Kasseti raskusest tingitud koormus

Lisaks tuulekoormusele mõjub alumiinium profiilile ka kogu kasseti enda mass. Selle arvutamiseks on algandmed järgnevad:

- komposiitmaterjali pindala  $S = 4,86 \text{ m}^2$ 
  - kasseti mõõdud  $1 \text{ m} \times 4,5 \text{ m}$
  - pinnalaotuse pindala  $S = 4574 \text{ mm} \times 1062 \text{ mm} = \sim 4,86 \text{ m}^2$
- komposiitmaterjali erikaal  $w = 7,8 \text{ kg/m}^2$
- needi kaal  $m_n = 20 \text{ g}$
- alumiinium profiilide mass:  $0,77 \text{ kg/m} + 0,71 \text{ kg/m}$

Kasseti kogumass on seega:

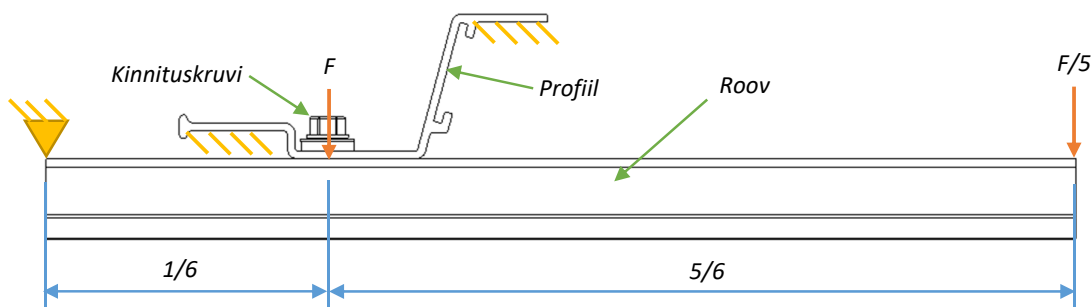
$$m = 4,86 \cdot 7,8 + 4,5 \cdot 1,48 + 18 \cdot 0,02 = \sim 45 \text{ kg}$$

Arvestades, et kasseti kogumass jaotub ühtlaselt kogu profiili peale, siis on iga meetri kohta profiilile koormuseks  $F_m = 45 \text{ N}$ . Selline koormus annab profiilis tekkinud pingeks

1 MPa, mis on tuulekoormusest tingitud koormuse kõrval pea olematu ja seda lihtsustamise eesmärgil käesolevates arvutustes arvesse ei võeta.

## 4.4 Tulemuste valideerimine

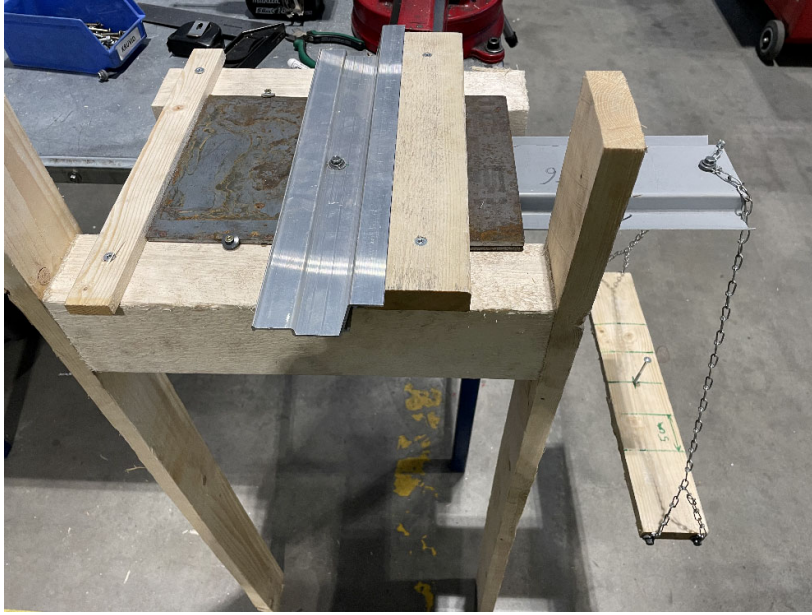
Saadud arvutuslikke tulemusi valideeriti füüsiliste katsetega, et veenduda nende õigsuses. Selleks ehitati rakis kuhu oleks võimalik asetada testitav profiil ja roov mille külge nimetatud profiil kinnitatakse. Roovi näol on tegemist Ruukki standard tootega CA1SS1 [1]. Kinnitusvahendiks on SFS'i EPDM tihendiga isepuuriv fassaadikruvi läbimõõduga  $\varnothing 4.8$  mm ja pikkusega 22 mm. Kruvi seibi suurus on  $\varnothing 14$  mm. [19] Testitav profiil asetati rakisele horisontaalselt selliselt, et seinale kinnitatav pind vaatas alla. Roov kinnitati kruviga läbi profiilis oleva ovaalse ava risti profiiliga. Rakendatava jõu suurendamiseks kasutati ära kangi seadust selliselt, et 1/6 roovi pikkusest jäi kruvist ühele poole ja see ots toetus vastu fikseeritud metallplaati. 5/6 roovi pikkusest ulatus kruvist teisele poole ja sinna otsa kinnitati puulatt kahe ketiga. Puulatile asetati mõõdetud raskused konstruktsiooni koormamiseks.



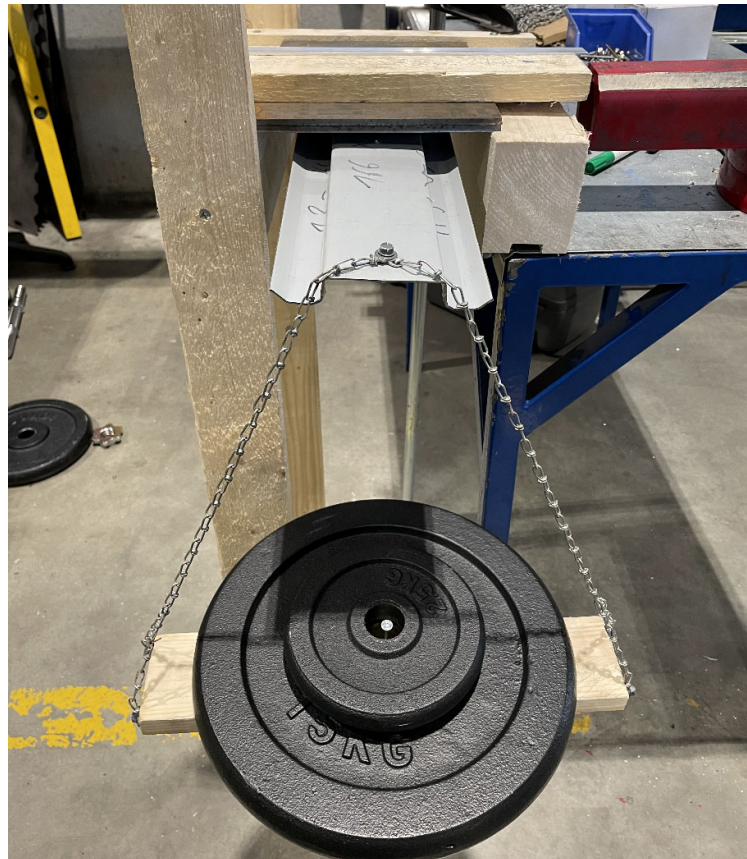
Joonis 4.13. Füüsilise katse põhimõtteskeem.

Katse käigus koormati konstruktsiooni erinevate raskustega. Alustuseks asetati koormuseks arvutuslik tulemus võttes arvesse varutegurit 1.5, milleks oli 17,5 kg. Ketid ja puulati enda kaal on 300 g. Kasutades kangiseadust rakendub selliselt roovi ja profiili liitekohale jõud  $5 \times 17,8$  kg. Teisendades tähendab see 872 N suurust jõudu kruviliite kohale. Esimene katse oli edukas.





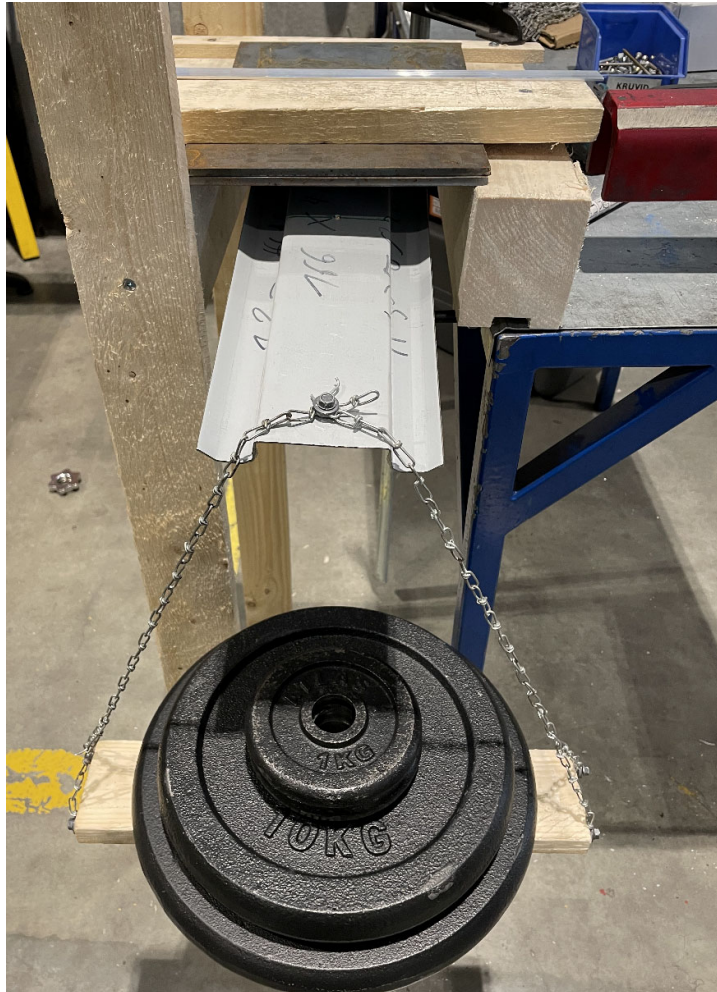
Joonis 4.14. Katserakise ülesehitus.



Joonis 4.15. Esimene koormamine.

Koormamist jätkati arvutuslikult maksimaalse koormusega, milleks on  $870 \text{ N} * 1,5 = 1305 \text{ N} \sim 133 \text{ kg}$ . Konstruksioonist ja saada olevatest raskustest tulenevalt

koormatakse alust raskusega 27 kg. Konstruktsioon pidas vastu lühikese aja. Nõrgimaks lüliks osutus kruvi liide rooviga. Katsete käigus koormamiste tulemusena võib järeldada, et antud lahendus peab ette antud koormustele ootuspäraselt vastu.



Joonis 4.16. Teine koormamine.

## 4.5 Soojuspaisumine

Fassaadikatete ja nende aluskonstruktsioonidega tuleb arvesse võtta ka soojuspaisumisest tingitud liikumisi. Eriti tähtis on seda jälgida alumiinium või alumiiniumkomposiidist materjalide puhul, kus soojuspaisumine on 2 korda suurem kui terasest toodete puhul. Soojuspaisumisest tingitud pikkuse muutust arvutatakse järgmise valemiga:

$$L_2 = \alpha * \Delta T * L_1, \quad (4.8)$$

kus  $L_1$  –algpikkus [m],

$L_2$  – lõpp-pikkus [m],

$\Delta T$  – temperatuuri muut [°C],

$\alpha$  – alumiiniumkomposiidi soojuspaisumise koefitsient, [m/(m°C)].

ACM'i puhul kasutatakse alumiiniumi soojuspaisumise koefitsienti  $\alpha = 2,4 \times 10^{-5}$ . Kuna loodud toote puhul kinnitub komposiit alumiiniumprofiili külge, siis eeldatakse, et tänu soojusülekandele muutuvad nende pikkused sama väärtuse võrra. Probleem võib tekkida alumiiniumprofiili ja sellega risti asetseva roovituse juures. Standard olukorras on terasest roovitus kinnitatud hoone *sandwich*-paneelide külge. Võttes aluseks, et tegemist on ventileeritud fassaadiga, siis otsese päikesekiirguse ja tumeda pinnakatte puhul võib temperatuuri vahe ulatuda erinevate osade vahel kuni  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$  [20]. Seda arvesse võttes on potentsiaalne mõõtude vahe alusroovituse ja fassaadikasseti vahel:

$$L_2 = \alpha * \Delta T * L_1 = 2.4 * 10^{-5} * 80 * 4.5 = 5.4 \text{ mm}$$

Soojuspaisumisest tingitud liikumise kompenseerimiseks freesitakse alumiiniumprofiili kinnitamiseks roovituse külge ovaalsed avad  $5 \times 11$  mm, mis võimaldavad kuni 6 mm profiili pikenemist.

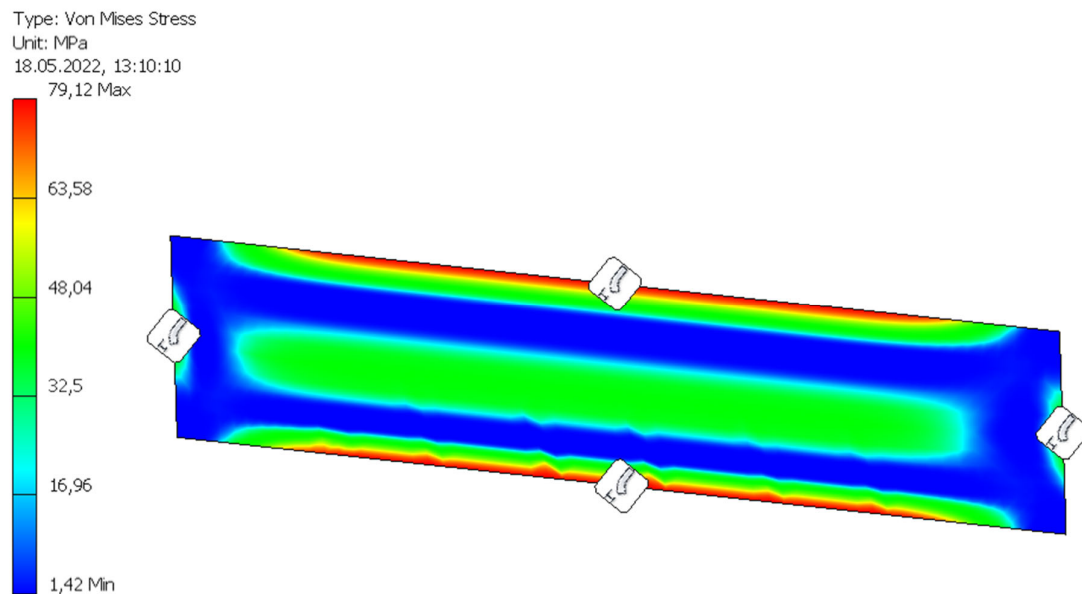
## 4.6 Koormuste analüüs komposiitmaterjalile

Nagu peatüki alguses sai mainitud, siis koormuste analüüsi komposiitmaterjalile teeb materjalitarnija ise kuna materjali omaduste info on konfidentsiaalne ja kaitstud ettevõtte konfidentsiaalsuslepingutega. Analüüsi läbiviimiseks saadeti tarnijale vajalik info tuulekoormuste ja paneeli mõõtude kohta. Vastuseks on raport (joonis 4.17), mis sisaldab infot lisatugevduste vajadusest paneeli keskel ja neetide omavahelisele kaugusele alumiiniumprofiili külge kinnitamiseks. Antud juhul on selleks kaks vertikaalset lisatugevdust, mis liimitakse kasseti sisse. Nende eesmärk on tuulekoormuse all vähendada komposiidi keskmise osa läbipainet ja seeläbi vältida materjali katkemist. Neetide vahekauguseks kasseti pikkuse  $A = 4900$  mm peale on 288 mm.

Architect/Consultant/Client		RUUKI		
Calculation date		22/04/2022		
<b>Panel</b>				
Material	Larson® 405	Length (L)	[mm]	4900
		Height (H)	[mm]	1000
Configuration	40mm edge cassette	Modulation	horizontal	
<b>Wind load</b>				
Value defined by	client	Characteristic load for SLS	[N/m <sup>2</sup> ]	1600
		Security factor		1,5
		Design load for ULS	[N/m <sup>2</sup> ]	2400
<b>SYSTEM ELEMENTS NEEDED</b>				
Intermediate stiffeners number				2
Distance between intermediate stiffeners			[mm]	1633
Distance between cassette edges fixings			[mm]	288

Joonis 4.17. Materjalitarnija komposiidialalüüsi väljavõte.

Lisatugevduse vajaduse saab illustreerida kasutades LEM'i tarkvaras Autodesk Inventor. Selle näitamiseks mudeldatakse lihtne riskülik. Risküliku ääred fikseeritakse ja keskele rakendatakse rõhk  $P = 2400 \text{ Pa}$ . Illustreerimise eesmärgil on materjaliks valitud 4 mm alumiinium. Esimese versioon, mis näitab ära kuidas kasseti esipind käitub, kui ei ole tugevdusi, annab tekkinud maksimaalseks pingeks  $\sigma_1 = 79,12 \text{ MPa}$ .

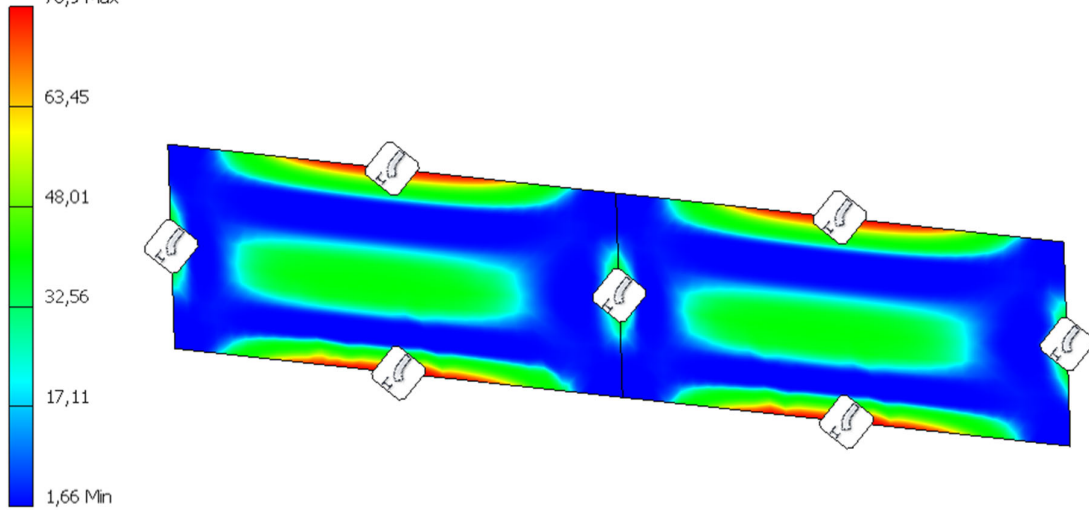


Joonis 4.18. Ilma tugevdusteta kasseti pingete illustatsioon.

Teisel juhul jagatakse risküliku esipind kaheks osaks. Risküliku ääred fikseeritakse ja lisaks fikseeritakse moodustatud vertikaalne joon. Espinnale rakendatakse uuesti rõhk  $P = 2400 \text{ Pa}$ . Analüüsi tulemuseks on maksimaalne pinge  $\sigma_1 = 78,9 \text{ MPa}$ . Saadud väärtus paranes ainult 0,3 % võrra, seega võib öelda, et üks lisatugevdus ei anna loodetud tulemust.



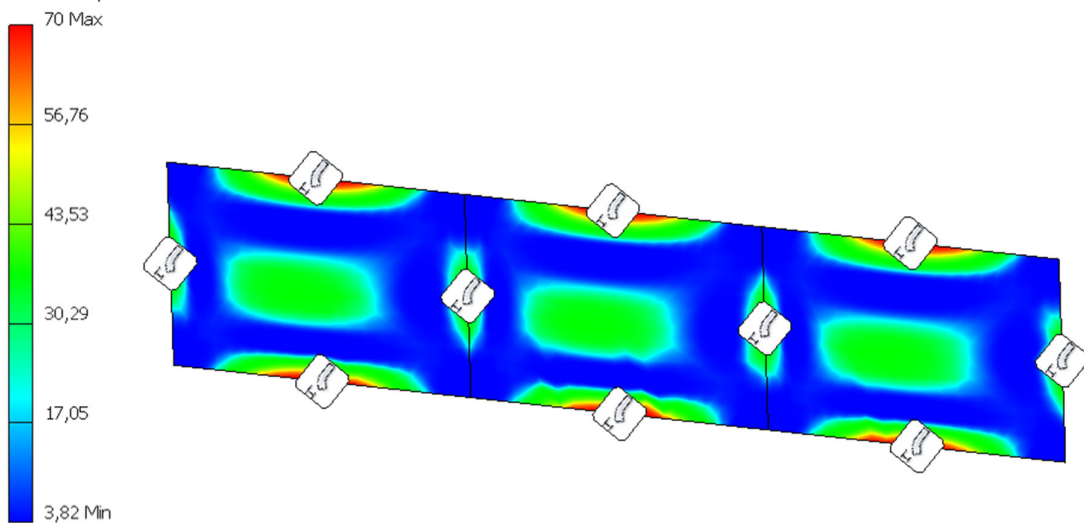
Type: Von Mises Stress  
Unit: MPa  
18.05.2022, 13:09:27  
78,9 Max



Joonis 4.19. Kahe vertikaalse tugevdusega kasseti pingete illustratsioon.

Kolmandal juhul jagatakse ristküliku esipind kolmeks võrdseks osaks. Kõik küljed fikseeritakse ja samamoodi ka moodustatud kaks vertikaalset joont. Esipinnale rakendatakse rõhk  $P = 2400$  Pa. Kolmanda analüüsi tulemuseks on  $\sigma_1 = 70$  MPa. See näitab, et kolme vertikaalse tugevduse kasutamine vähendab paneelis tekkinud pingeid lausa 13% võrra. Sellest tulemusest joonistub välja põhjus, miks materjalitarnija on soovitanud selliste koormuste ja kasseti mõõtude juures kasutada kahte tugevdust.

Type: Von Mises Stress  
Unit: MPa  
18.05.2022, 13:11:09



Joonis 4.20. Kolme vertikaalse tugevdusega kasseti pingete illustratsioon.

## 4.7 Toote omahind

Leidmaks loodud tootele omahinda teostatakse toote parameetreid arvesse võttes tabelarvutus. Tulemuseks on toote hind tüki kohta. Kuna fassaadikatteid müüakse ruutmeetrites teisendatakse tulemus hiljem ruutmeetrisse. Loodud toote mõõtudeks on 1000 x 4500 mm. Olenevalt lehe kasutuse protsendist muutub ka lõpptoote hind ruutmeetri kohta. Tooraine hinnad on seisuga 2021 [7]. Tabelarvutuses võetakse vaatluse alla freesimiseks kulunud aeg, koostamiseks kulunud aeg ja lisaks ka pakkimise aeg. Kasutatud materjalide alla lisatakse alumiiniumkomposiit, alumiiniumprofiilid, alumiiniumist nurgaplaadid ja koostamisel kasutatavad needid.

Tabelarvutus omahinna leidmiseks on järgnev:

Tabel 2.4. Omahinna arvutus.

<b>Töökeskus</b>	<b>Kulu/aeg</b>	<b>Ühiku hind</b>	<b>Kokku</b>
Freesimine	15 min	60 €/h	15 €
Koostamine	8 min	40 €/h	5,33 €
Liimimine	7 min	40 €/h	4,66 €
Pakkimine	5 min	40 €/h	3,34 €
<i>Materjalid</i>			
ACM FR	6,25 m <sup>2</sup>	30 €/m <sup>2</sup>	187,5 €
Needid	40 tk	0,2 €/tk	8 €
Profiilid (1+1)	4,5 m	15 €/m	67,5 €
Nurga plaadid	4 tk	0,05 €/tk	0,2 €
SikaTack Panel system	1.8 m	2,5 €/m	4,5 €
		<b>Kokku</b>	<b>296 €</b>
		<b>/m<sup>2</sup></b>	<b>65,8 €/m<sup>2</sup></b>

Tabelarvutuse tulemusena saadi toote omahinnaks **296 €/tk** või **65,8 €/m<sup>2</sup>**. Võrdluseks võib tuua, et samade mõõtudega vertikaalse toote hind on suurusjärgus **55 €/m<sup>2</sup>**. Kallim hind tuleneb põhiliselt alumiiniumprofiilide kasutamisest horisontaalse lahenduse puhul ja antud mõõtude korral ka lisatugevduste vajadusest.

## 5. ALUMIINIUMKOMPOSIIT KASSETI KOOSTAMINE

Järgnevalt antakse ülevaade disainitud kasseti koostamisest ja sinna juurde kuuluva osade tükitabeli tegemisest. Lisaks räägitakse lisatugevduste liimimisest kasseti tagaküljele.

### 5.1 Kasseti koostamine

Tulenevalt kasseti ehitusest on tarvis see painutada ja koostada. Painutamine teostatakse koostamise laual kasutades spetsiaalseid käsipainutustööriistu. Lühemad osad välja lõigatud komposiidist on võimalik painutada ilma töövahenditeta. Pikemad kui 500 mm pained on lihtsam painutada juba abivahendeid kasutades. Ühtlasi mängib painutusjõus rolli ka painde sügavus. Antud toote puhul on külgede paindesügavus 40 mm, alumise otsa pained kuni 20 mm. Mida sügavam paine, seda vähem jõudu on vaja rakendada painde tegemiseks.



Joonis 5.1. Koostatud näidiskassett.



Joonis 5.2. Koostatud näidiskasseti lähivaade.

Peale painutamist lisatakse tootele needid, mis hoiavad detaile omavahel koos. Neetide kogus sõltub kasseti pikkusest. Materjali tootja soovitus on üks neet iga maksimum 300 mm tagant [7]. Selliselt saab tuletada valemi neetide koguse arvutamiseks. Kuna kogus on täisarv ümardatakse saadud tulemus ja lisatakse üks n-ö lõpetusneet. Sama kogus neete on nii ülemisel kui alumisel profiilil, seega korrutatakse tulemus veel kahega. Paneeli nurkadesse lisatakse neli nurgaliiteplaati, milles igaühes on veel kaks neeti. Kokkuvõttes on neetide arvutamise valem alljärgnev:

$$N_1 \approx L_1/300 + 1, \quad (5.1)$$

$$N = N_1 * 2 + 8, \quad (5.2)$$

kus  $N_1$  – ühe profiili neetide kogus,

$L_1$  – profiili pikkus,

$N$  – neetide koguarv.

+1 – profiili lõpetusneet,

+8 – nurgaliiteplaatide neetide kogus.

Iga tootmistellimuse tarbeks koostatakse kogu tellimuse tükitabel. Allpool on välja toodud ühe kasseti tükitabel. Tellimuse tükitabeli saamiseks korrutatakse tabelis olevad arvud läbi kassetide arvuga. Neetide summad liidetakse eraldi kokku, kui kassetide pikkused erinevad ühe tellimuse sees.



Tabel 5.1. Komposiitkasseti tükitabel.

<b>Detail</b>	<b>Materjal</b>	<b>Kogus</b>
Lõigatud paneel	4 mm ACM	1 tk
Nurgaliiteplaat	2 mm alumiinium	4 tk
Ülemine profiil	2 mm alumiinium	1 tk
Alumine profiil	2 mm alumiinium	1 tk
Needid	AL/ST	N tk

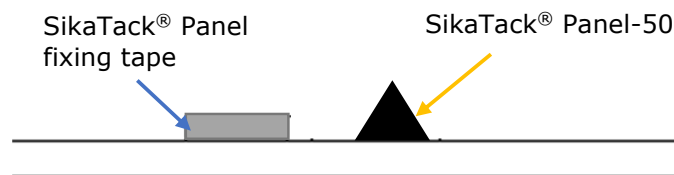


Joonis 5.3. Alumiiniumkomposiit kassetid näidisseinal Ruukki Pärnu fassaaditehases.

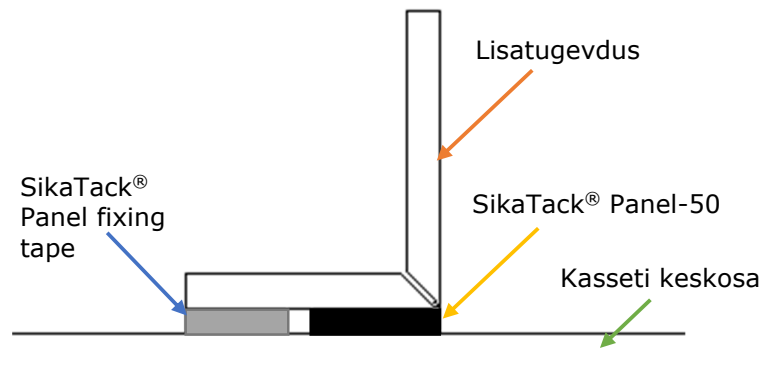
## 5.2 Täiendavad võimalused kasseti tugevdamiseks

Tehtud analüüs ja läbiviidud katsed näitavad, et antud kasseti konfiguratsiooni korral on projekteeritud kasseti tugevus piisav, deformatsioonid ja pinged lubatud piires. Sellegipoolest on ettevõttes vaadeldud ka täiendavaid võimalusi kasseti tugevdamiseks, mida võib minna vaja spetsiifiliste mõõtmetega kassettide või suuremate tuulekoormuste korral. Üks lihtsamini teostatav lahendus on lisatugede liimimine kasseti taha. Järgnevalt kirjeldatakse lühidalt lisatugedega kasseti koostamist, selle detailsem realiseerimine jääb edaspidise uuringu teemaks.

Kasseti mõõtude juures, kus on vajalik lisatugevdus, liimitakse materjalitarnija soovitusel kasseti tagaküljele samast materjalist freesitud ribad. Selleks kasutatakse SikaTack® 3 mm kinnitusteipi, et liimi lõplik paksus jääks kolm millimeetrit. Tulenevalt materjalitootja soovitustest ribad arvule liimitakse need võrdsete vahedega kasseti taha. Liimiriba tõmmatakse tugevduse täies pikkuses kasseti tagaküljele vastavalt liimitootja juhiste. Selleks kasutatakse spetsiaalseid liimimisotsikuid, millest väljub liim kolmnurga kujuliselt laiusel 10 mm ja kõrgusega 8 mm. Tugevduse paigaldamisel surutakse liim laiali ja fikseerimisteip hoiab distantsi ja detaile omavahel koos kuni liim kuivab. Liimi kuivamisega on 24 h. Kuivamise ajaks asetatakse kassett transpordikasti, kus see saab vajaliku aja liikumatult seista. [7, 21]



Joonis 5.4. Fikseerimisteip ja liimiriba kasseti tagaküljel.



Joonis 5.5. Lisatugevduse liimimine kasseti sisse.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli luua fassaadikassett kasutades alumiiniumkomposiit materjali, mis vastaks seatud tugevuspiiridele ja omaks esteetilist väljanägemist.

Eesmärgini jõudmiseks vaadati lähemalt, mida kujutab endast komposiitmaterjal. Selgitati mille poolest erineb alumiiniumkomposiit materjal teistest metallidest, kuidas seda töödeldakse ja toodi välja nimetatud materjali taaskasutuse võimalused. Järgmises osas vaadeldi alumiiniumkomposiidist kasseti koostamist uurides juba turul olemas olevaid lahendusi ja võimalikke patente, mis käsitleksid endas komposiitmaterjali või kalde all horisontaalvuukki. Nendest lähtuvalt ja võttes arvesse ka ettevõtte seadmete tootmisvõimekust ning materjali kasutuse optimeerimist moodustati alumiiniumkomposiit materjalist fassaadikassett spetsiaalsete alumiiniumprofiilide abil. Numbrilise analüüsi tulemusena leiti vajalik kinnituste arv võttes arvesse tuulest tekkivaid koormusi. Moodustatud komposiidi ja alumiiniumprofiilide süsteem valideeriti kasutades lõplike elementide meetodit. Saadud tulemused valideeriti katseliselt. Tootele arvutati omahind, mida võrreldi teise sama klassi tootega. Viimases peatükis käsitleti loodud kasseti koostamist ja täiendavaid viise kasseti tugevdamiseks.

Eelpooltooduga sai töö põhieesmärk saavutatud. On projekteeritud ja valmistatud alumiiniumkomposiit materjalist fassaadikassett, mis vastab etteantud kriteeriumitele. Arvutuslike analüüside tulemusena veenduti toote vastupidavuses erinevates tingimustes. Läbiviidud kulude analüüs näitas, et loodud horisontaalse orientatsiooniga toode on märgatavalt kallim kui vertikaalse süsteemiga komposiitkassett. Põhiline hinnavahe tuleneb kasutatavast profiilide süsteemist horisontaalse paigalduse saavutamiseks võrreldes horisontaalse riputatava süsteemiga.

Fassaadide ehitus on projektipõhine arendamine ja tootmine kuhu sageli ei sobi standardlahendused või on vaja lisaks standardtoodetele ka erilahendusi, siis on võimalik töö käigus loodud toodet edasi arendada või modifitseerida vastavalt projektide vajadustele. Sellised muudatused võivad panna aluse toote järgmisele versioonile, mis sobituks juba standardkujul erinevatesse projektidesse. Lisaks on võimalik vaatluse alla võtta toote omahinna parendamine, et see oleks konkureerivam ka horisontaalsete riputatavate süsteemidega.

## **SUMMARY**

The goal of this Master's thesis was to create a cladding panel using aluminium composite material that would satisfy set strength limits and has an aesthetic outlook.

To achieve the set goal a closer look was taken into composite materials overall. The aluminium composite material was compared to other metals, production possibilities were discussed and also the recyclability of the mentioned material. The next part covered the design process of a panel made out of aluminium composite where the market was researched for existing solutions and possible patents in an effort to find something that would closely resemble the new panel to be created. Taking the research results and also local production possibilities into account the aluminium composite panel was composed using special aluminium profiles. As a result of the numeric analysis a fitting number of fastening locations were found in regards to wind loads. The composed composite panel was validated by applying the finite element analysis. The stresses and strains remains in required limits. Real life tests were conducted to confirm those analyses. Finally, the cost calculation process was performed and the result was compared to other similar products. In the last part of the thesis the assembly of the newly developed panel was covered and additional ways of the panel strengthening were discussed.

With above described work the main goal of the thesis was achieved. An aluminium composite panel has been designed and composed under given constraints (strength limits, hidden fixings and an aesthetic visual appearance). As a result of numeric analyses the strength of the panel was validated in different load conditions. Cost calculations showed that the newly composed product is noticeably higher in cost and this is due to the usage of special aluminium profiles to achieve a horizontal installation as compared to a hanging vertical panel solution.

The construction of a façade is a per project development and production where a quite often standard solutions are not suitable or in addition to those bespoke solutions are required. In latter case it is possible to further develop the product composed in this thesis or to modify it according to the project needs. Such developments can be the basis for the next version of this product that would cover wider class of projects. In addition, it is possible to take a closer look at reducing the cost of the panel so that it would be more competitive with existing hanging vertical solutions.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Ruukki koduleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.ruukki.com](http://www.ruukki.com). [Kasutatud Mai 2022].
- [2] J. Vinson, „Sandwich Structures: Past; Present; and Future; in: Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials,“ Springer Dordrecht, 2005.
- [3] W. Huang, Z. Fan, W. Zhang, J. Liu ja W. Zhou, „Impulsive response of composite sandwich structure with tetrahedral truss core,“ *Compos. Sci. Technol.* 176, 2019.
- [4] H. Eschen, M. Harnisch ja T. Schüppstuhl, „Flexible and automated production of sandwich panels for aircraft interior,“ *Procedia Manuf.* 18, 2018.
- [5] R. Selvaraj, M. Subramani, G. More ja M. Ramamoorthy, „Dynamic responses of laminated composite sandwich beam with double-viscoelastic core layers,“ *Materials Today*, 2021.
- [6] „What is a sandwich panel,“ [Sandwichpanels.org](http://www.sandwichpanels.org), 2010. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.sandwichpanels.org/articles/article\\_whatisasandwich.html](http://www.sandwichpanels.org/articles/article_whatisasandwich.html). [Kasutatud Mai 2022].
- [7] *Alucoil Europe internal documents*, Miranda de Ebro, 2018.
- [8] Ruukki Construction OY, „Facade claddings,“ Rautaruukki Corporation, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ruukki.com/building-envelopes/products/facade-claddings>. [Kasutatud Aprill 2022].
- [9] „Eurocode 1: Part 1-4,“ 2005. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>. [Kasutatud Märts 2021].
- [10] „Guidance, Aluminium composite material cladding,“ [gov.uk](https://www.gov.uk), 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gov.uk/guidance/aluminium-composite-material-cladding>. [Kasutatud Aprill 2022].
- [11] „Casadei Alu Ranger VGroove,“ Casadei Industria, [Võrgumaterjal]. Available: <https://composite.casadei-industria.com/en/composite-panel-processing-machines/alu-ranger-vgroove/>. [Kasutatud April 2021].
- [12] „Aluminum Composite Panel Recycling Process,“ Alumtechbond, September 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://alumtechbond.com/aluminum-composite-panel-recycling-process/>. [Kasutatud Mai 2022].
- [13] *Ruukki Products AS internal documents*, Pärnu, 2020.
- [14] O. Rautaruukki, „Sandwich-structured composite panel“. Soome Patent EP 19 20 9416, 2020.
- [15] L. Fairview Architectural Pty, „A cladding for application to a structure and an assembly of the cladding with the structure“. Suurbritannia Patent GB 2571396, 28 August 2019.
- [16] M. Schierling, „Habillage de facade“. Prantsusmaa Patent FR 1495776, 3 Oktoober 1966.
- [17] I. American Institute of Steel Construction, „Engineering Fundamentals program Courses,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://efcms.engr.utk.edu/ce576-2019-01/hw/Serviceability-Limit-States.pdf>. [Kasutatud Aprill 2022].
- [18] TalTech, Mehaanikainseneri käsiraamat, Tallinn, 2022.
- [19] „SFS tooteinfo,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sfsintec.biz/mo/ee/et/web/homepage.html>. [Kasutatud 2021].

- [20] „Eurocode 1: Part 1-5,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.5.2003.pdf>. [Kasutatud 2022].
- [21] SIKA SERVICES AG, „General guideline SikaTack Panel system version 4,“ 2020.
- [22] M. Alphonse, V. B. Raja, V. Krishna, R. U. Kiran, B. Subbaiah ja L. R. Chandra, „Mechanical behavior of sandwich structures with varying core material,“ 2021.
- [23] N.Ye, W.Zhang, D.Li, W.Huang, W.Xie, X.Huang ja X.Jiang, „Dynamic response and failure of sandwich plates with PVC foam core subjected to impulse,“ 2017.
- [24] G. Imbalzano, S. Linforth, T. Ngo, P. Lee ja P. Tran, „Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs,“ Compos. Struct. 183, 2018.
- [25] J. Zhang, K. Liu, Y. Ye ja Q. Qin, „Low-velocity impact of rectangular multilayer sandwich plates,“ 2019.

## **GRAAFILINE OSA**