



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT

# **PÄIKESEPANEELIGA FASSAADIKASSETI ARENDAMINE**

## **DESIGN OF SOLAR PANEL FACADE CASSETTE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Eliise Toom

Üliõpilaskood 203942 MATM

Juhendaja: Kaimo Sonk, vanemlektor

# 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: Eliise Toom

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“23” mai 2022.

Juhendaja: Kaimo Sonk

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Eliise Toom

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Päikesepaneeliga fassaadikasseti arendamine“,

mille juhendaja on Kaimo Sonk,

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.

---

23.02.2022

---

<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 TÖÖSTUSTEHNIIKA INSTITUUT

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Eliise Toom, 203942 MATM  
Õppekava, peeriala: MATM, Tootearendus ja tootmistehnika, tootearendus  
Juhendaja(d): Vanemlektor, Kaimo Sonk, 6203267

### Lõputöö teema:

Päikesepaneeliga fassaadikasseti arendamine  
Design of solar panel facade cassette

### Lõputöö põhieesmärk:

Arendada ja projekteerida päikesepaneeliga fassaadikassett, mis vastaks ettevõtte Ruukki Products AS poolt seatud kriteeriumitele ning väärtustele.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülesande püstitus. Turuanalüüs.	06.03.2022
2.	Toote projekteerimine.	27.03.2022
3.	Insenertehnilised arvutused.	01.05.2022
4.	Magistritöö vormistamine.	20.05.2022

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "23" mai 2022 a

**Üliõpilane:** Eliise Toom ..... "23" mai 2022 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Kaimo Sonk ..... "23" mai 2022 a  
/allkiri/

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

# SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	6
1.1 Ettevõtte tutvustus .....	7
1.2 Ruukki fassaadikattesüsteemid .....	8
1.3 Päikesepaneelide tüübid .....	10
2. TURUANALÜÜS .....	11
3. TOOTE PROJEKTEERIMINE .....	15
3.1 Päikesepaneeli valik .....	15
3.2 Raami projekteerimine .....	20
3.3 Silikoon-liimi valik ning silikoonühenduse ristlõike arvutamine .....	24
3.4 Toote koostamine, installeerimine ja hooldus .....	27
3.4.1 Fassaadikassetti koostamine.....	27
3.4.2 Toote installeerimine .....	28
3.4.3 Fassaadikassettide hooldus .....	34
4. INSENERTEHNILISED ARVUTUSED .....	35
4.1 Soojuspaisumine .....	35
4.2 Tuulekoormus .....	36
4.2.1 Raami painete tugevuskontroll tuulekoormusele.....	40
4.3 Kruvid .....	46
4.4 Päikesepaneeli arvutused.....	51
4.5 Omahinna arvutus .....	55
KOKKUVÕTE .....	56
SUMMARY .....	57
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	58
LISAD .....	61
Lisa 1 BS8800 standard .....	61
GRAAFILINE OSA.....	62

# 1. SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on ettevõttes Ruukki Products AS arendada ning projekteerida päikesepaneeliga fassaadikasset, mis vastaks ettevõtte poolt seatud kriteeriumitele ning väärtustele.

Läbi viimaste aastate on ühiskonnas rohkem rõhku pööratud rohelisele mõtteviisile ja taastuvenergia tarbimisele. Turule on tulnud palju taastuvenergia tootmist võimaldavaid lahendusi. Aktiivne tegevus käib tarbijate mõtteviisi muutmises, millele juhib tähelepanu ka riik. Eesti riik on võtnud prioriteediks täita Euroopa Liidu direktiividest tulenevaid nõudeid vähendada 2030. aastaks kasvuhoonegaaside heitkoguseid 1990. aastaga võrreldes vähemalt 40%, suurendada taastuvenergiaallikate osakaalu energiatarbimises 32%-ni, suurendada energiatõhusust 32,5% ning ühendada omavahel vähemalt 15% EL-i elektrisüsteemidest. [1]

Kogu protsessi on kaasatud ka erasektor, kelle toel on võimalik eesmärke täita. Paljud firmad pakuvad erinevaid ökonoomseid, keskkonnasäästlikke, taastuvenergiat põhinevaid lahendusi, mida täiustatakse pideva tootearendusprotsessi käigus. Olulist rolli mängib kohalikul turul valitsev nõudlus. Toode pakkuva firma seisukohast on oluline jälgida oma tooteportfelli, pakutava toote disaini, insenertehnilist lahendust ja kõige selle seost finantsmajandusliku tulemusega. See aga on äriettevõttele suur väljakutse, millele eelneb pikk tootearendusprotsess ja toodete testimine ning kvaliteedi hindamine. Oluline osa on ka toote omahinna kujundamisel, koostööpartnerite leidmisel, kliendibaasi suurendamisel ning välisurgudele laienemisel.

Jätksuutliku tegevuse tagamiseks tuleb olla kursis nii konkurentide tegevusega, uute toodete turule tulemisega kui ka riiklike eesmärkide ja normatiividega. Lähtuvalt Ruukki Product AS-ist on oluline jälgida ka ehitusmaterjalide tootmises olevat suunda ja arhitektuurilist disaini. Ruukki visiooniks on muuta maailm turvalisemaks, kestlikumaks ning nutikamaks elu- ja tööpaigaks [2]. Lähtuvalt eeltoodust on töö autoril vastutus- tundlik roll Ruukki tooteportfelli täiendamisel päikesepaneeliga fassaadikassetiga.

Antud magistritöö tähelepanukeskmes on projekteerida fassaadikasset, mille abil on võimalik salvestada päikeseenergiat ning mida oleks võimalik sobitada kokku teiste Ruukki tooteportfellis olevate toodetega.

Kriteeriumid arendatavale tootele:

- Peab olema sile pind;
- Peab sobima kokku teiste Ruukki fassaadikassettidega;
- Peab olema visuaalselt esteetiline;
- Peab olema vastupidav erinevatele ilmastikutingimustele;
- Peab olema kergesti puhastatav/hooldatav;
- Piisav energia tootlikkus võrreldes konkurentidega;
- Peab kasutama SSAB GreenCoat Hiarc materjali;
- Peab olema ventileeritud fassaad;
- Toodet peab olema ohutu installeerida ning kasutada.

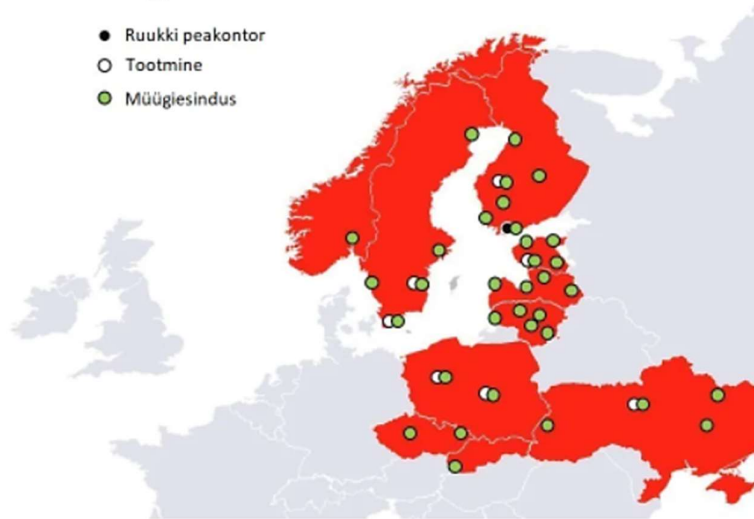
Antud magistritöö põhiosa koosneb kolmest osast. Kõigepealt analüüsitakse, millised tooted on hetkel turul olemas. Järgmisena leitakse etteantud kriteeriumitele sobivad päikesepaneelid ning koostatakse hindamismaatriks neist sobivaima leidmiseks. Vastavalt kriteeriumitele projekteeritakse ka raam ning valitakse sobiv silikoon-liimi ja arvutatakse välja vajalik silikoonühenduse ristlõige. Viimasena on kontrollitud toote käitumine soojuspaisumisest tingitud liikumiste korral ja vastupanu tuulekoormusele, leitud fassaadikasseti kinnitamiseks vajalik kruvide arv, määratud päikesepaneeli hinnanguline tootlikkus ning mõõdetud tootlikkus ja koostatud toote omahinna arvutus.

## **1.1 Ettevõtte tutvustus**

Ettevõtte Ruukki Construction OY tarnib terasepõhiseid ehitustooteid ja -teenuseid katuste ning seinte kestlikuks ehitamiseks. Ruukki tootevalikus on seinakonstruktsioonid, fassaadikattesüsteemid, kandvad katuseelemendid, katuseprofiilid, vihmaveesüsteemid ning katuse turvatooted. Firma on osa SSAB-st ning esindatud kümnes Euroopa riigis. Eestis ligi 30 aastat tegutsevaks üksuseks on Ruukki Products AS. Ruukki Constructioni heaks töötab pea 1500 inimest ning 2021. aasta netokäibeks oli 590 miljonit eurot. [2]

Ruukkis on väga olulisel kohal olla tegus, ületada ootusi ning olla aus – see kõik kajastub ka ettevõtte tegevuses ning töötajate, klientide ning muude sidusrühmade kohtlemisel. Ettevõtte soov on muuta maailma turvalisemaks, kestlikumaks ning nutikamaks elu- ja tööpaigaks. [2]

- Ruukki peakontor
- Tootmine
- Müügiesindus



Sele 1.1 Ruukki Construction erinevate üksuste asukohad [2]

## 1.2 Ruukki fassaadikattesüsteemid

Ruukki fassaadikattesüsteemide tooteportfell koosneb kuuest tooteperest, mis on kirjeldatud allpool toodud tabelis Tabel 1.1. Lisaks standardtoodetele on suureks osaks Ruukki fassaaditootmisest ka eridisainiga või erimaterjalidest toodete valmistamine vastavalt kliendi või arhitekti soovidele.

Tabel 1.1 Ruukki fassaadikattesüsteemid [20]

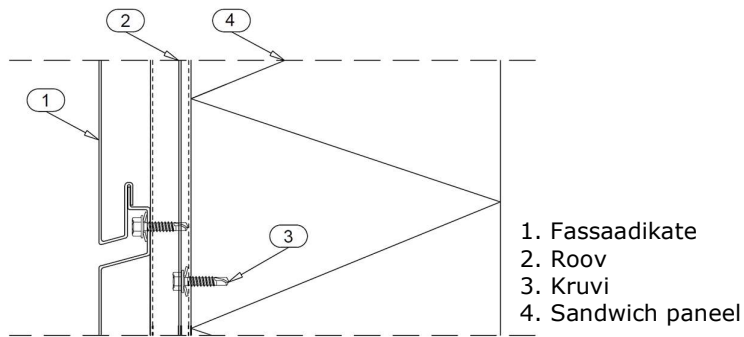
Toode	Kirjeldus
Ruukki® Primo	Alumiiniumkomposiidist valmistatud kassetid. Võimalik luua suuri vuukideta pindu.
Ruukki Liberta® fassaadikassetid	Kõikidest külgedest painutatud metallkassetid.
Fassaadilamellid	Piki kahte külge (horisontaalset või vertikaalset) painutatud metall-lamellid.
Disainprofiilid	Õhukesest metallist valmistatud laineprofiilid.
Trapetsprofiilid	Õhukesest metallist valmistatud trapetsprofiilid.
Perforatsioon & taustavalgustus	Perforeeritud fassaadikatted koos toe- konstruktsiooni ning integreeritud taustavalgussüsteemiga.





Sele 1.2 Liberta Original 102 fassaadikassetid [21]

Enamasti on fassaadikatted kinnitatud spetsiaalsete kruvidega roovidele ehk karkassile, mis on omakorda kinnitatud kruvidega *sandwich* paneelide või teistest materjalidest hoone välisseinte külge.



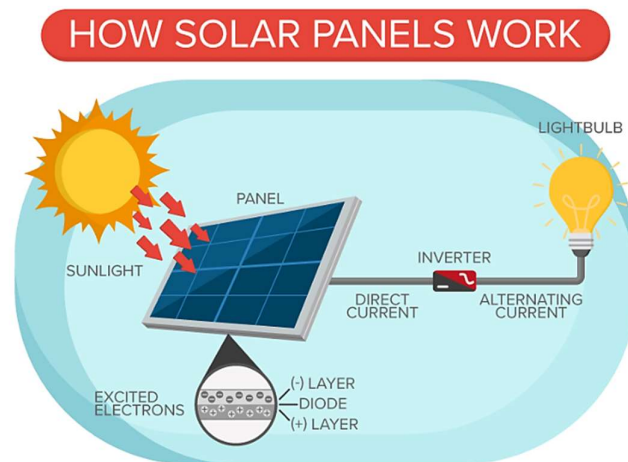
Sele 1.3 Fassaadikassetide installeerimise skeem



Sele 1.4 Ruukki fassaadikassetid Tallinna Filmimuuseumis (vasakul) ja Mariahalleni spordikeskuse seintel (paremal) [3,4]

## 1.3 Päikesepaneelide tüübid

Päikesepaneelid on päikesekiirgust elektrienergiaks muundavate fotogalvaaniliste ehk päikeseelementide kogum. Päikesevalguse langes paneelile muundatakse valgusenergia päikeseelementide abil alalisvooluks, mis omakorda liigub edasi inverterisse, kus see muundatakse vahelduvvooluks. [16,17]



Sele 1.5 Päikesepaneelide tööpõhimõtte skeem [19]

Peamiselt kasutatakse päikesepaneelides kolme liiki päikeseelemente. Esimese põlvkonna monokristallilisest või polükristallilisest ränielemente või teise põlvkonna amorfsest ränist valmistatud kile. [16,17]

Päikesepaneel on võimalik liigitada ka nende ehituslike omaduste järgi. Enim levinumateks on klaas-laminaat ning klaas-klaas tüüpi paneelid. Klaas-laminaat paneel koosneb karastatud klaasist, kahest etüleen-vinüülatsetaat kaitsekihist, mille vahel on fotoelektrilised elemendid ning polüvinüülfluoriidist valmistatud tagumisest kaitsekihist. Klaas-klaas paneelid on ehituselt üsna sarnased klaas-laminaat tüüpi paneelidele, kuid tagumise kaitsekihi asemel on neil kasutusel karastatud klaas, mis suurendab paneeli vastupidavust erinevatele tingimustele. [18]

Võtmesõnad: tootearendus, fassaad, päikesepaneel, magistritöö

## 2. TURUANALÜÜS

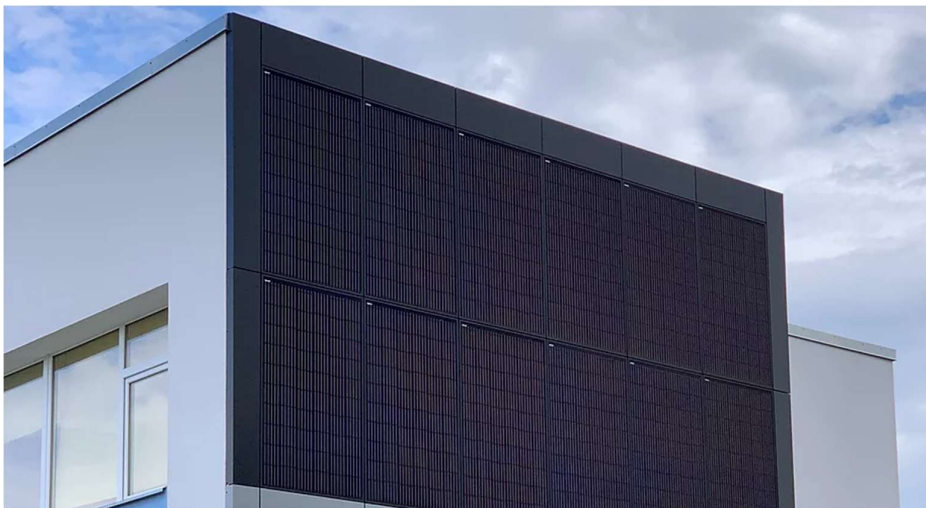
Interneti vahendusel on teostatud turu-uuring, mille eesmärgiks on välja selgitada konkurentide poolt pakutavad samasuguse funktsiooniga tooted. Turuanalüüsi käigus vaadeldi ainult Euroopas asuvate ettevõtete tooteid ning leiti kolm ettevõtet, kelle tooteid alljärgnevalt analüüsitakse.

### Go Vertic energiat tootev fassaad

Eesti ettevõtte ACM Metal OÜ üheks kaubamärgiks on Go Vertic, milleks on fassaadikatteplaat, mis töötab päikesepaneelina. Ühte lahendusse on ühendatud alumiinium komposiitplaat ning päikese-element. Go Vertic päikesepaneelid on kindla kuju ja suurusega ning avade ümbrused on viimistletud komposiitmaterjaliga, nii et sein jääb ühtlane ning esteetiliselt ilus. [5, 6]

Ettevõtte toob oma kodulehel välja alljärgnevad tooteomadused [5]:

- Tootlikkus:  $>190 \text{ W/m}^2$ ;
- Süsteemi kaal:  $16 \text{ kg/m}^2$ ;
- Bs1 – d0 tuleklass;
- A tuleklassiga päikesepaneel;
- Ilmastikukindel fassaad;
- Ventileeritud fassaad;
- Kombineeritav kõigi fassaadikatetega;
- 30 aastane garantii;
- Tasuvusaeg  $\sim 12$  aastat;
- Üks paigaldamine.



Sele 2.1 Go Vertic energiat tootev fassaad [5]

## SolarLab Solar fassaad

Taani ettevõtte SolarLab pakub kliendi soovidele kohandatud päikesepaneele. Lisaks päikesepaneelidele pakuvad nad ka alusroovitus, mille abil on võimalik saavutada erinevaid ruumilisi efekte nagu on toodud ka selel 2.2. Kuna SolarLab on keskendunud igale projektile kohandatud lahenduse pakkumisele, siis on neil valikus mitmete erinevate pinnaviimistluste ning värvidega päikesepaneele. [7]

Ettevõtte toob oma kodulehel välja alljärgnevad tooteomadused [7,8]:

- Tootlikkus: 150-195 W/m<sup>2</sup>;
- Süsteemi kaal: 12-15 kg/m<sup>2</sup>;
- Bs1 – d0 tuleklass;
- Ventileeritud fassaad;
- Hooldusvaba;
- Võimalikud erilahendused (värv, pinnaviimistlus ning tekstuur);
- Erinevad paigaldusvõimalused;
- Lihtne installeerida;
- Projektipõhine tootmine.



Sele 2.2 SolarLab-i fassaad [7,9]

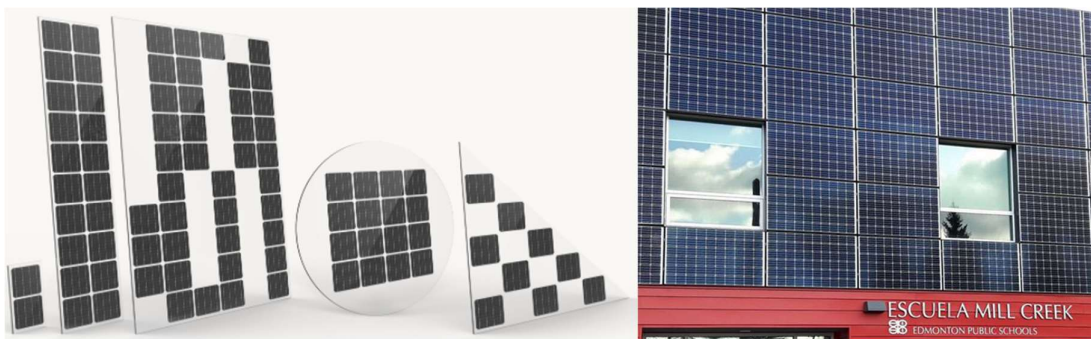
## Metsolar päikesepaneelid seintele

Leedu firma Metsolar pakub eri aplikatsioonidega päikesepaneele nagu näiteks päikesepaneelid katustele, seintele ning tänavavalgustitele. MetSolar-il on lai valik erinevate mõõtude, värvide ning kujudega paneele. Valida saab endale sobivat laiust vahemikus 150 mm – 1700 mm ning pikkust vahemikus 150 mm – 3300 mm. Päikesepaneeli kujuks on võimalik valida kas kolmnurk, ring või ristkülik ning samuti on

võimalik paneelis olevaid päikeseelemente erinevalt paigutada. Ettevõtte portfoolios on kahte tüüpi moodulid: klaas-klaas päikesepaneelid ning klaas-kile päikesepaneelid. [10]

Ettevõtte toob oma kodulehel välja alljärgnevad tooteomadused [10]:

- Tootlikkus: 110-190 W/m<sup>2</sup> (sõltub klaasi värvist);
- Võimalikud erinevad mõõdud;
- Võimalik tellida erineva kujuga paneele;
- Võimalik päikeseelementide erinev paigutus;
- Saadaval kahte tüüpi moodulid: klaas-klaas päikesepaneel ning klaas-kile päikesepaneel.



Sele 2.3 Metsolar päikesepaneelid [10,11]

Koostatud turuanalüüsi tulemused on võetud kokku alljärgnevates tabelites Tabel 2.1 ning Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Konkurentide toodete tehnilised näitajad

Toode	Go Vertic energiat tootev fassaad	SolarLab Solar fassaad	Metsolar päikesepaneelid seintele
<b>Tootlikkus</b>	190 W/m <sup>2</sup>	150-195 W/m <sup>2</sup>	110-190 W/m <sup>2</sup>
<b>Süsteemi kaal</b>	16 kg/m <sup>2</sup>	12-15 kg/m <sup>2</sup>	-
<b>Tuleklass</b>	Bs1-d0	Bs1-d0	-
<b>Ilmastikukindlus</b>	On ilmastikukindel	On ilmastikukindel	On ilmastikukindel
<b>Visuaalne väljanägemine</b>	Hea	Väga hea	Halb
<b>Kergesti puhastatav/ hooldatav</b>	Jah	Jah	-
<b>Võimalikud erilahendused</b>	Ei	Jah	Jah
<b>Garantii</b>	30 aastat	-	-

Tabel 2.2 Konkureerivate toodete eelised ning puudused

<b>Toode</b>	<b>Go Vertic energiat tootev fassaad</b>	<b>SolarLab Solar fassaad</b>	<b>Metsolar päikesepaneelid seintele</b>
<b>Eelised</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Võimalik kombineerida teiste fassaadikatetega;</li> <li>• Hea visuaalne väljanägemine;</li> <li>• Hooldusvaba;</li> <li>• 30 aastat garantiid.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saadaval erinevad värvilahendused, pinnaviimistlused, tekstuurid;</li> <li>• Võimalikud erinevad paigaldusvõimalused;</li> <li>• Hooldusvaba;</li> <li>• Väga hea visuaalne väljanägemine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Võimalus tellida erinevat mõõtu paneele;</li> <li>• Saadaval erineva kuju ja päikeseelementide paigutusega paneelid;</li> <li>• Saadaval kahte tüüpi moodulid: klaas-klaas ja klaas-kile.</li> </ul>
<b>Puudused</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei saa valida erinevate mõõtude ning värvitoonide vahel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Külgvaates jääb seinaroovitus ning paigaldussüsteem paistma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visuaalselt mitte esteetiline;</li> <li>• Puudub paigalduslahendus.</li> </ul>

Võttes aluseks turul konkureerivad tooted ja nende tehnilised näitajad, on töö autoril eesmärgiks päikesepaneeliga fassaadikasseti projekteerimisel saavutada vähemalt 190 W/m<sup>2</sup> tootlikkus, tagada antud toote kombineeritavus teiste fassaadikatetega ning esteetiline väljanägemine. Lisaks on oluline pöörata toote projekteerimisel tähelepanu fassaadikasseti hooldatavusele ja ilmastikukindlusele. Tähtis on luua ka tootele parim paigalduslahendus, mis tagaks visuaalselt ilusa, kasutatud kinnitusvahendeid ja aluskonstruktsiooni peitva väljanägemise.

### 3. TOOTE PROJEKTEERIMINE

Antud peatükis leitakse etteantud kriteeriumitele sobivad päikesepaneelid ning koostatakse hindamismatriks neist sobivaima leidmiseks. Edasi projekteeritakse vastavalt kriteeriumitele raam ning valitakse sobiv silikoon-liim ja arvutatakse välja vajalik silikoonühenduse ristlõige.

#### 3.1 Päikesepaneeli valik

Sobivate päikesepaneelide leidmiseks seati esialgu kaks otsingukriteeriumi, milleks olid:

- Peab olema sile klaaspind;
- Päikesepaneelide tootja peab asuma Euroopas, kuna kaugemalt tarnimine Eestisse ei ole otstarbekas.

Antud kriteeriumitele vastas kolm päikesepaneeli: Solarwatt Vision 60M construct, AXSun AX M-108 ning Solitek Solid Bifacial B.60. Kõikide paneelide tehnilised näitajad on toodud välja alljärgnevas tabelites.

##### **Solarwatt Vision 60M construct päikesepaneel**

Solarwatt Vision 60M construct päikesepaneel on kergesti puhastatav ning hea võimsuse ja erikaaluga. Kuna tegemist on klaas-laminaat päikesepaneeliga, siis ei ole antud toode nii hea vastupidavusega erinevatele ilmastikutingimustele kui on klaas-klaas päikesepaneel. Antud paneeli puuduseks on ka mitte rahuldav visuaalne väljanägemine. Päikesepaneeli tehnilised näitajad on toodud välja tabelis Tabel 3.1 ning pilt seel 3.1.

Tabel 3.1 Solarwatt Vision 60M construct tehnilised näitajad [12]

Võimsus	183 W/m <sup>2</sup>
Toote erikaal	13,9 kg/m <sup>2</sup>
Maksimaalne lubatud tuulekoormus	2400 Pa



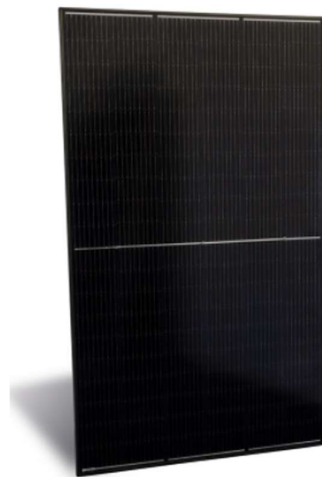
Sele 3.1 Solarwatt Vision 60M construct [12]

### **AXSun AX M-108 päikesepaneel**

AXSun AX M-108 päikesepaneel on kergesti puhastatav ning väga hea võimsuse ja erikaaluga. Kuna antud toote puhul on samuti tegemist klaas-laminaat päikese-paneeliga, siis on vastupidavus erinevatele ilmastikutingimustele rahuldav. Samuti on ka rahuldav paneeli visuaalne väljanägemine. Päikesepaneeli tehnilised näitajad on toodud välja tabelis Tabel 3.2 ning pilt seel 3.2.

Tabel 3.2 AXSun AX M-108 tehnilised näitajad [13]

Võimsus	204 W/m <sup>2</sup>
Toote erikaal	10,3 kg/m <sup>2</sup>
Maksimaalne lubatud tuulekoormus	2400 Pa



Sele 3.2 AXSun AX M-108 [13]



## Solitek Solid Bifacial B.60 päikesepaneel

Solitek Solid Bifacial B.60 päikesepaneel on hea võimsuse ja erikaaluga ning samuti kergesti puhastatav. Kuna tegemist on klaas-klaas päikesepaneeliga, siis on toode väga hea vastupidavusega erinevatele ilmastikutingimustele. Lisaks on toode hea visuaalse väljanägemisega. Päikesepaneeli tehnilised näitajad on toodud välja tabelis Tabel 3.3 ning pilt seel 3.3.

Tabel 3.3 Solitek Solid Bifacial B.60 tehnilised näitajad [15]

Võimsus	187 W/m <sup>2</sup>
Toote erikaal	16 kg/m <sup>2</sup>
Maksimaalne lubatud tuulekoormus	3200 Pa



Sele 3.3 Solitek Solid Bifacial B.60 [14]

Sobivaima päikesepaneeli leidmiseks koostati hindamismaatriks, kuhu on lisatud väljavalitud päikesepaneelid ning hindamiskriteeriumid.

Hindamiskriteeriumiteks on:

- Võimsus (W/m<sup>2</sup>);
- Vastupidavus erinevatele ilmastikuoludele;
- Kergesti puhastatavus/hooldatavus;
- Päikesepaneeli erikaal (kg/m<sup>2</sup>);
- Visuaalne väljanägemine.

Päikesepaneele hinnatakse skaalal ühest viieni, kus 1 on madalaim hinne ning 5 kõrgeim hinne. Lisaks on igale kriteeriumile määratud kaal, mis on antud protsentides. Tabel 3.4 hindamismatriks on toodud välja järgmisel leheküljel.

Hindamismatriksi tulemusena valiti kasutatavaks päikesepaneeliks kõige rohkem punkte saanud paneel - Solitek Solid Bifacial B.60.

Tabel 3.4 Hindamismatriks

Hindamiskriteerium	Kaal	Solarwatt Vision 60M construct		AXSun AX M-108		Solitek Solid Bifacial B.60	
		Hinne	Kaalutud hinne	Hinne	Kaalutud hinne	Hinne	Kaalutud hinne
<b>Võimsus (W/m<sup>2</sup>)</b>	25%	4	1	5	1,25	4	1
<b>Vastupidavus erinevatele ilmastikutingimustele</b>	25%	3	0,75	3	0,75	5	1,25
<b>Kergesti puhastatavus/hooldatavus</b>	15%	5	0,75	4	0,6	5	0,75
<b>Erikaal (kg/m<sup>2</sup>)</b>	15%	4	0,6	5	0,75	3	0,45
<b>Visuaalne väljanägemine</b>	20%	2	0,4	3	0,6	4	0,8
<b>Summa:</b>		<b>3,5</b>		<b>3,95</b>		<b>4,25</b>	
<b>Koht:</b>		<b>3.</b>		<b>2.</b>		<b>1.</b>	

## 3.2 Raami projekteerimine

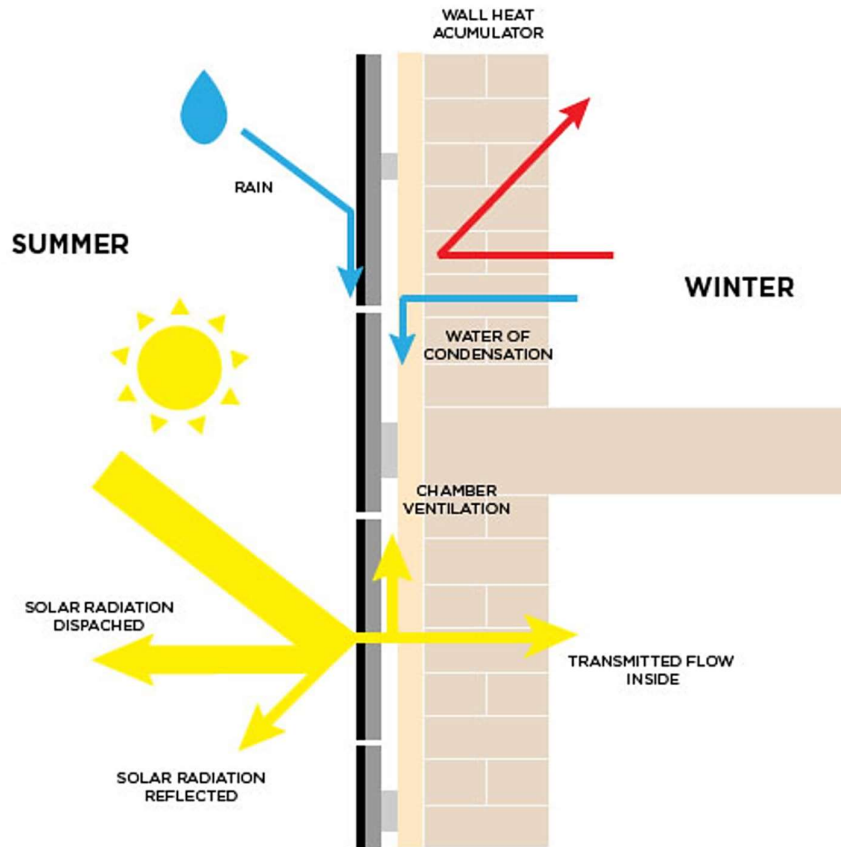
Nõuded raamile:

- Peab kasutama SSAB GreenCoat Hiarc materjali;
- Peab sobituma kokku teise Ruukki tooteportfellis oleva fassaadikassetiga;
- Peab olema ventileeritud fassaad;
- Peab olema vastupidav erinevatele ilmastikutingimustele;
- Peab vastu pidama koormustele;
- Peab olema võimalikult kerge;
- Peab olema kergesti hooldatav.

Kuna Ruukki Products AS kuulub SSAB gruppi on Ruukis standardmaterjalina kasutusel SSAB GreenCoat Hiarc pinnakattega teras. Sellest tulenevalt on ka raami üheks nõudeks antud materjali kasutamine. Raami valmistamisel on kasutusel 1,2 mm paksused teraslehed terasemargiga DX51D, mille mõlemad küljed on kaetud tsingikihi ja kruntvärviga. Eelpool nimetatud kihtidele on lisaks üks külj kaetud värvikihiga. [22]

Kuna päikesepaneeliga fassaadikassetil on fikseeritud mõõt, mis tihtipeale ei jagu täpselt hoonete seinte mõõtudega või ei arvesta ukse ega akende asukohtadega, siis on vajalik, et toode sobituks kokku teiste Ruukki toodetega. Selleks lähtuti raami projekteerimisel Liberta Elegant 500 disainist. Nii on võimalik töös projekteeritavat toodet kombineerida kokku nii Liberta Elegant 500-ga kui ka Liberta Glass-iga.

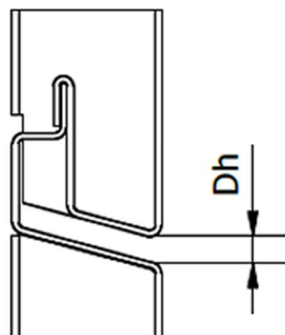
Nõuetest tulenevalt peab olema tegemist ventileeritud fassaadiga, mille eesmärgiks on tagada naturaalne fassaadi tuuldumine ning reguleerida soojuse, õhu ja valguse vahetust. Kuumadel suvekuudel tekitab ventileeritud fassaad "korstna efekti", kus välisseina ja fassaadikassetide vahel surutakse õhku ülespoole ning vähendatakse seeläbi hoone välisseina temperatuuri ja hoitakse hoonet jahedamana. Külmadel kuudel aga vähendatakse selle abil konstruktsioonis olevat niiskust. Skeem ventileeritud fassaadi tööpõhimõttest on toodud välja seel 3.4. [23]



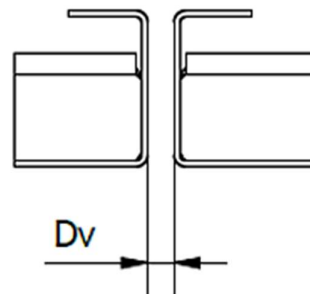
Sele 3.4 Ventileeritud fassaadi tööpõhimõte [23]

Eelnevast tingituna on raam projekteeritud nii, et selle installeerimisel jääb hoone välisseina ning fassaadikassettide vahele õhuvähe. Fassaadikassettide vahele on projekteeritud ka 8 mm-sed vertikaalsed ja horisontaalsed vahed (vertikaalne vuuk  $D_v = 8$  mm ning horisontaalne vuuk  $D_h = 8$  mm), mis lisaks võimaldavad ka tootel soojuspaisumisest tingituna piisavalt paisuda. Vuukide joonised on nähtavad seel 3.5.

### Horisontaalne vuuk



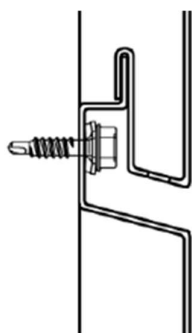
### Vertikaalne vuuk



Sele 3.5 Horisontaalne ning vertikaalne vuuk

Raami ülemisse ossa on tehtud ovaalsed 5x10 mm kinnitusavad kruvidele. Ovaalseid avasid kasutatakse soojuspaisumisest tingitud liikumiste kompenseerimiseks.

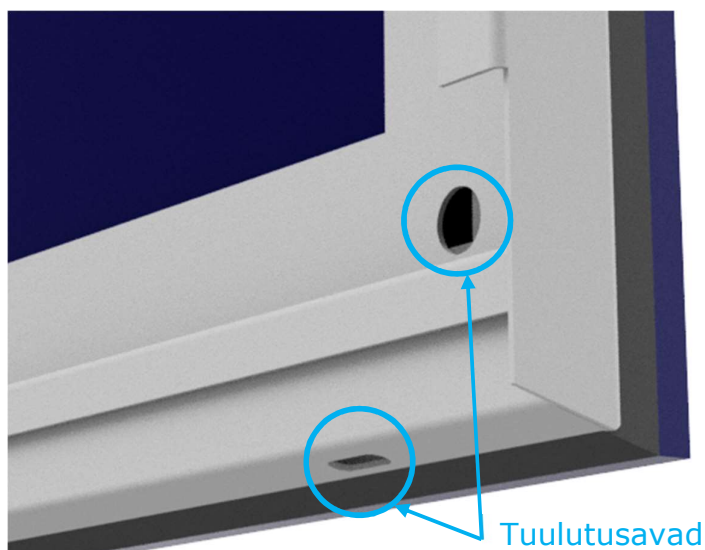
Selleks, et kasseti alumine osa oleks fikseeritud, on kasseti alumises osas avatud tagasipainutus ning kasseti ülemises osas üles suunatud paine. Kassettide installeerimisel moodustavad need kaks painet omavahel luku, mis fikseerib iga uue kasseti alumise osa. See on välja toodud ka alloleval seel 3.6.



Sele 3.6 Kahe kasseti vaheline ühendus

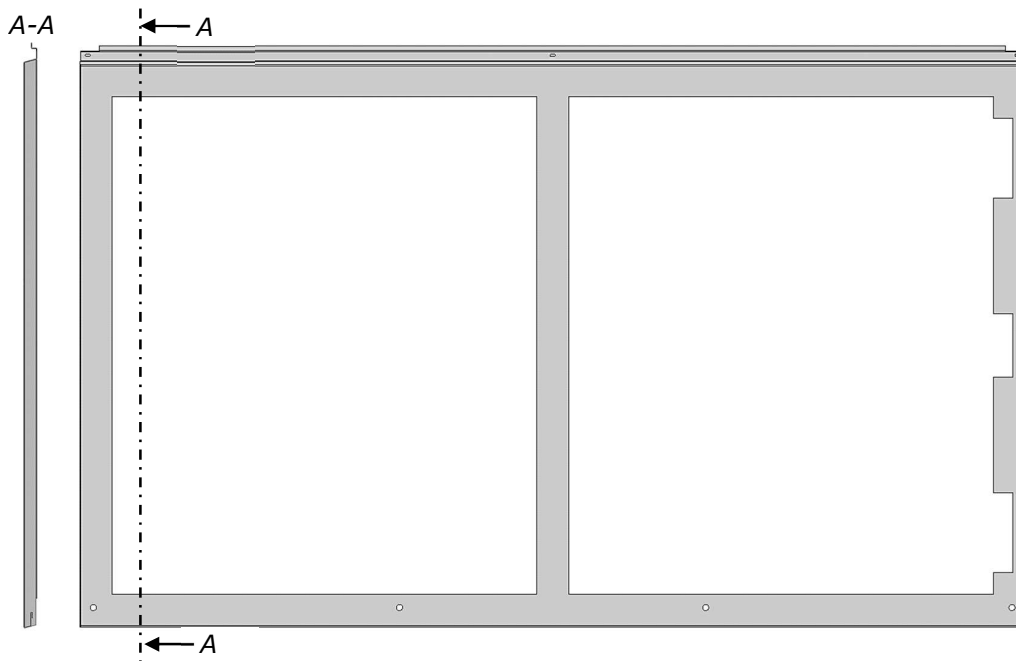
Et külgvaates oleks kasseti küljed visuaalselt ilusad ning et kassett oleks jäigem, on kasseti küljed tagasi painutatud. See on nähtav ka vertikaalse vuugi joonisel sele 3.5.

Vee kogunemise vältimiseks kassettidesse ning kassettidest vee äravoolu tagamiseks on kassetti alaosasse tehtud ovaalsed tuulutusavad. Kuna vesi võib koguneda ka päikesepaneeli ja raami vahele, on raami esipinnale tehtud tuulutusavad, et päikesepaneeli ja raami vahele kogunenud vesi saaks välja voolata. Antud tuulutusavad on näidatud seel 3.7 Lisaks eelnevale on projekteeritud raami ülemine ning alumine osa kalde alla, et tagada hea vee ära voolamine vuugivahest.



Sele 3.7 Tuulutusavad raamis vee väljavooluks

Ühe nõudena on välja toodud, et raam peab olema installeerimise lihtsustamiseks võimalikult kerge. Kuna päikesepaneel liimitakse raami külge ainult mööda raami perimeetrit ning päikesepaneel on piisavalt jäik, siis on raami seesmine osa ebavajalik. Selleks et täita eelpool nimetatud nõue, on ebavajaliku osa eemaldamiseks ning päikesepaneeli küljes olevate karbikute jaoks tehtud raami väljalõiked. Küll aga on jäetud raami keskele 60 mm laiune riba raami keskosa läbipainde vähendamiseks.



Sele 3.8 Raami ristlõige ning eestvaade

Raami tugevuskontroll ning vastupanu kontroll ilmastikutingimustele on toodud välja peatükis „4. Inseneritehnilised arvutused“.

### **Raami tootmine**

Raami valmistamisel kasutatakse lehtmetsalli, millest kõigepealt stantsitakse välja raami toorik. Seejärel painutatakse raami ülemise osa painded. Peale seda painutatakse raami küljed ning viimasena teostatakse raami alumise osa painded.

Raami projekteerides on arvestatud tootmispiirangutega, mis tulenevad ettevõttes Ruukki Products AS kasutatava Prima Power automaatliini võimekusest. Sellest tulenevalt on moodustatava kasseti maksimaalseks lubatud pikkuseks 3800 mm ning laiuseks 1700 mm. Materjali miinimumpaksuseks on 0,5 mm ning maksimumpaksuseks terase korral on 2 mm, roostevaba terase korral 1,5 mm ning alumiiniumi korral 3 mm.

Painutuse miinimumkõrguseks on 5 x lehe paksus, seega kasutades 1,2 mm paksust lehte, on miinimumkõrguseks 6 mm. Lubatud maksimumkõrguseks on 204 mm.

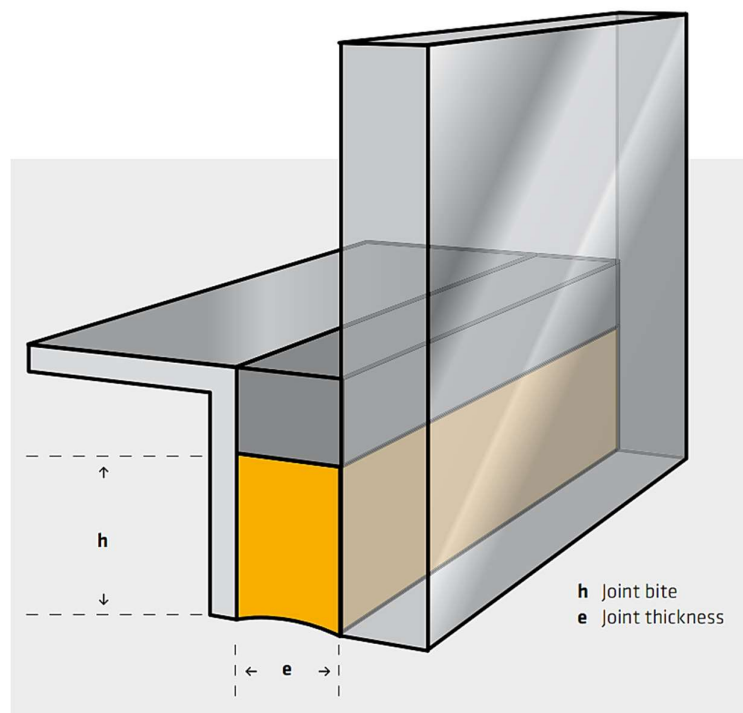
### 3.3 Silikoon-liimi valik ning silikoonühenduse ristlõike arvutamine

Kriteeriumid silikoon-liimile:

- Peab olema UV ja ilmastikukindel
- Peab sobima välitingimustesse
- Peab olema ehituslikuks otstarbeks mõeldud
- Peab võimaldama liimida omavahel klaasi ja terast
- Vastab EOTA ETAG 002 nõuetele (Euroopa tehniline hinnang – *Structural Sealant Glazing Systems*)

Antud kriteeriumitele vastavaks silikooniks leiti Sika poolt toodetav Sikasil® SG-500.

Päikesepaneel liimitakse raami külge mööda raami perimeetrit. Alljärgnevalt arvutatakse välja kahe pinna ühendamiseks vajalik silikoonühenduse ristlõige.



Sele 3.9 Silikoonühenduse ristlõige:

$h$  – silikoonühenduse ristlõike kõrgus,  $e$  - silikoonühenduse ristlõike paksus [24]



Kõik silikoonühenduse ristlõike kõrguse ja paksuse leidmiseks kasutatavad valemid pärinevad Sika poolt loodud fassaadide tihendamise ja liimimise spetsifitseerimise juhendist. [24]

### Silikoonühenduse ristlõike kõrgus

$$h = \frac{G \cdot 9,81}{I_v \cdot \tau_{stat}}, \quad (3.1)$$

kus  $h$  – miinimum silikooni ristlõike kõrgus, mm,  
 $G$  – päikesepaneeli mass, kg,  
 $I_v$  – vertikaalse silikoonühenduse pikkus, mm,  
 $\tau_{stat}$  – Silikoon Sikasil® SG-500 lubatud pinge, N/mm<sup>2</sup>.

Algandmed:

$G = 30$  kg - päikesepaneeli mass  
 $I_v = 1053$  mm - vertikaalse silikoonühenduse pikkus  
 $\tau_{stat} = 0,0105$  N/mm<sup>2</sup> - Silikoon Sikasil® SG-500 lubatud pinge [24]

$$h = \frac{30 \cdot 9,81}{1053 \cdot 0,0105} \approx 27 \text{ mm}$$

### Silikoonühenduse ristlõike paksus

$$e \geq \frac{\Delta l}{\sqrt{2c + c^2}}, \quad (3.2)$$

kus  $e$  - miinimum silikooni ristlõike paksus, mm,  
 $\Delta l$  – kogu pikkuse muut, mm,  
 $c$  – silikooni maksimaalne lubatud pikenemine.

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_v^2 + \Delta l_h^2}, \quad (3.3)$$

kus  $l_v$  - silikoonühenduse vertikaalne pikkus, mm,  
 $l_h$  - silikoonühenduse horisontaalne pikkus, mm.

$$\Delta l_{v,h} = l_{v,h} \cdot [(\alpha_1 \cdot \Delta t) - (\alpha_2 \cdot \Delta t)], \quad (3.4)$$

kus  $\Delta l_{v,h}$  - pikkuse muut, mm,  
 $\alpha_1, \alpha_2$  - joonpaisumistegur, 1/°C,  
 $\Delta t$  - temperatuuri muutus, °C.

Algandmed:

$c = 12,5\% = 0,125$	- silikooni maksimaalne lubatud pikenemine
$\alpha_1 = 11,9 * 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	- süsinikterase joonpaisumistegur
$l_v = 1053 \text{ mm}$	- vertikaalne pikkus
$l_h = 1773 \text{ mm}$	- horisontaalne pikkus
$\alpha_2 = 5,9 * 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	- klaasi joonpaisumistegur

$$\Delta l_v = 1053 * [(11,9 * 10^{-6} * 79,1) - (5,9 * 10^{-6} * 79,1)] \approx 0,5 \text{ mm}$$

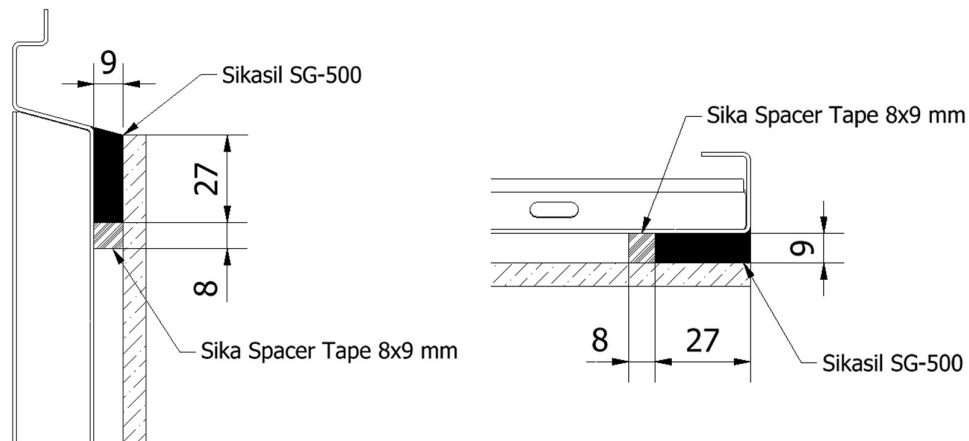
$$\Delta l_h = 1773 * [(11,9 * 10^{-6} * 79,1) - (5,9 * 10^{-6} * 79,1)] \approx 0,85 \text{ mm}$$

$$\Delta l = \sqrt{0,5^2 + 0,85^2} \approx 0,99 \text{ mm}$$

$$e \geq \frac{0,99}{\sqrt{2 * 0,125 + 0,125^2}} \approx 1,92 \text{ mm}$$

Kuna Sika poolt loodud fassaadide tihendamise ja liimimise spetsifitseerimise juhendis on välja toodud, et silikoonühenduse kõrguse ja paksuse suhe peab olema 3:1, siis  $e = 27/3 = 9 \text{ mm}$ .

Silikoonühenduse ristlõige on  $27 \times 9 \text{ mm}$ . Ristlõike joonised on toodud välja alloleval seel 3.10.



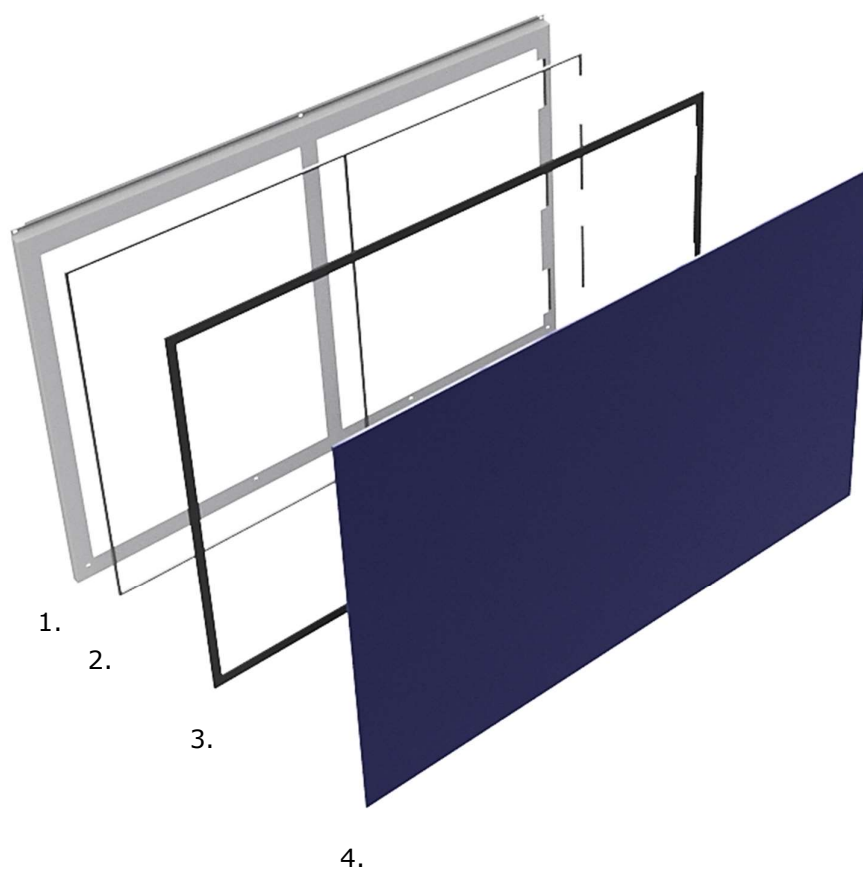
Sele 3.10 Silikoonühenduse ristlõige

## 3.4 Toote koostamine, installeerimine ja hooldus

Järgnevalt vaadeldakse fassaadikasseti koostamist, selle seina installeerimist, installeerimise ning kasutamise ohutust ja kassettide hooldust.

### 3.4.1 Fassaadikassetti koostamine

Ennem toote koostamise alustamist puhastatakse raami ning päikesepaneeli pinnad ning kuivatatakse need täielikult. Päikesepaneeli fikseerimiseks raamil paigaldatakse kõigepealt mööda raami perimeetrit 27 mm kaugusele raami servadest ning raami keskmisele ribile teip - Sika® Spacer Tape, mille ristlõige on 8x9 mm. Seejärel pannakse raami peale paika päikesepaneel. Viimasena täidetakse raami ja päikesepaneeli vahe mööda raami perimeetrit silikooniga Sikasil® SG-500, mille ristlõikeks on 27x9 mm. Kõik toote osad on toodud välja seel 3.11.



Sele 3.11 Toote osad:

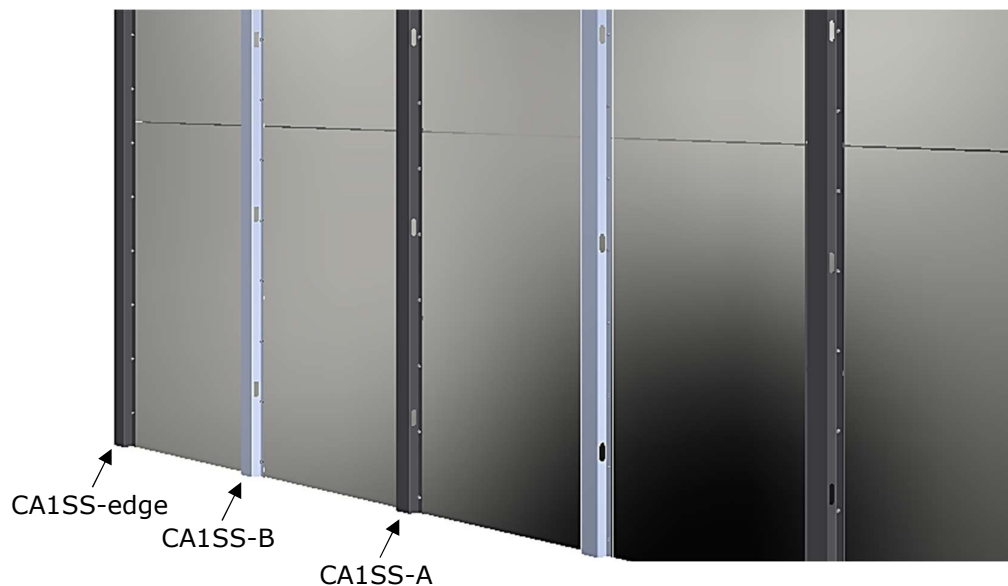
1 – raam, 2 - teip Sika® Spacer Tape, 3 – silikoon Sikasil® SG-500, 4 – päikesepaneel



Sele 3.12 Päikesepaneeliga fassaadikassett

### 3.4.2 Toote installeerimine

Kõigepealt paigaldatakse roovid kruvidega hoone välisseina külge. Seinte nurkades kasutatakse Ruukki standard nurgaroovi CA1SS-edge, mis on valmistatud 1,2 mm-sest terasest. Kahe kasseti vahel paiknevas rooviks on samuti värvitud terasest valmistatud Ruukki standardroov CA1SS-A. Selleks, et kassette oleks võimalik maandada, on iga kasseti keskele jäävaks rooviks 1,2 mm-sest tsingitud terasest valmistatud Ruukki standardroov CA1SS-B. Roovid kinnitatakse seina spetsiaalselt selleks otstarbeks mõeldud SFS-i kruvidega SL2-S-S14-5,5X22. Seinaroovituse pilt on toodud välja seel 3.13.



Sele 3.13 Seinaroovitus

Seejärel hakatakse toodet seina installeerima veergude kaupa, suunaga alt üles. Esimesena paigaldatakse kruvidega roovide külge stardiliist, kuhu veeru kõige alumise kassetti alumine osa kinnitub. See on nähtav ka seel 3.14. Stardiliistuks on Ruukki standard liist CA1SF2, mis on valmistatud 1,2 mm värvitud terasest. Stardiliistud ning kassetid kinnitatakse seina fassaadi jaoks mõeldud SFS-i kruvidega SL2-S-S14-4,8X22.



Sele 3.14 Stardiliistu kinnitamine roovil (vasakul) ja stardiliistu ning kasseti vahelise ühenduse ristlõige (paremal)

Järgmisena paigaldatakse esimene kassett, mis kinnitatakse kruvidega roovide külge (Sele 3.15). Selle peale paigaldatakse kruvidega järgmine kassett. Kahe kassetti vahele jäetakse horisontaalne vuuk  $Dh = 8$  mm (Sele 3.15). Samuti ühendatakse kahe kasseti päikesepaneelid. Jätkatakse kuni esimene veerg on paigas.



Sele 3.15 Esimese kasseti kinnitamine roovide külge (vasakul) ja kahe kasseti vahelise ühenduse ristlõige (paremal)

Peale esimese veeru paigaldamist paigaldatakse samamoodi teine veerg, jättes kahe veeru vahele vertikaalne vuuk  $Dv = 8 \text{ mm}$  (Sele 3.16). Kahe veeru päikesepaneelid ühendatakse omavahel. Tsinkroovid ühendatakse maandusjuhtmega.



Sele 3.16 Järgmise veeru installeerimine ja vertikaalne vuuk kahe veeru vahel

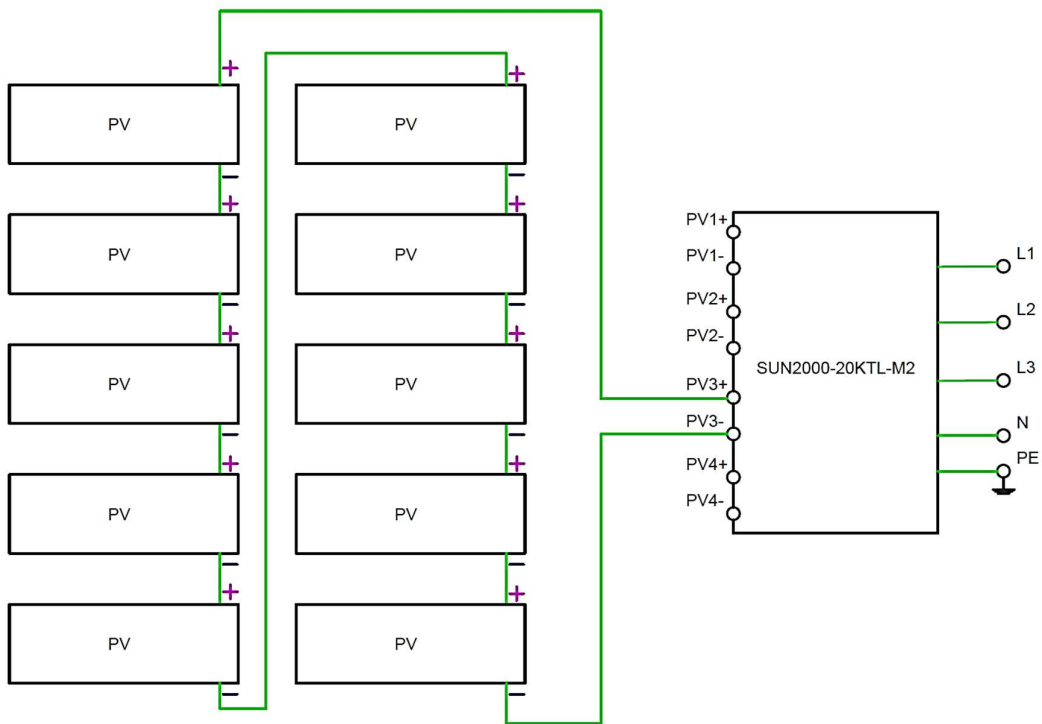
Viimasena ühendatakse päikesepaneelid inverterisse.

Antud töös käsitletaval näidisseinal on tugevusvaruks lisatud juurde üks kruvi. Seega on üks fassaadikassett kinnitatud nelja kruviga nelja roovi külge.

### **Päikesepaneelide ühendamine inverterisse ning maandamine**

Antud töös vaadeldaval näidisseinal on ühendatud kõik kümme päikesepaneeli omavahel jadamisi inverterisse SUN2000-20KTL-M2. Päikesepaneelide ühendusskeem on toodud välja järgmisel leheküljel seel 3.17.

Toote ja roovituse maandamiseks on fassaadikassett ühendatud roostevabast terasest kruviga tsinkroovi külge ning roovid on ühendatud omavahel maandusjuhtmetega.



Sele 3.17 Päikesepaneelide ühendusskeem:

PV – päikesepaneelid, PV1+...PV4+ - inverteri positiivsed sisendid, PV1-...PV1- - inverteri negatiivsed sisendid, L1...L3 – faasid, N – neutraal, PE – maandus

### **Installeerimise ning kasutamise riskianalüüs:**

Üheks päikesepaneeliga fassaadikassetile määratud kriteeriumiks oli toote ohutu installeerimine ja kasutamine. Ohtude ja riskide hindamiseks ning nende maandamiseks koostati riskianalüüs, mis on toodud välja järgmisel leheküljel tabelis 3.5. Riskianalüüs on koostatud lähtudes Briti standardist BS8800:2004. Standardi BS8800 üldine riskimaatriks, tõenäosuste astmed ning tagajärgede raskusastmed on toodud välja lisa Lisa 1.

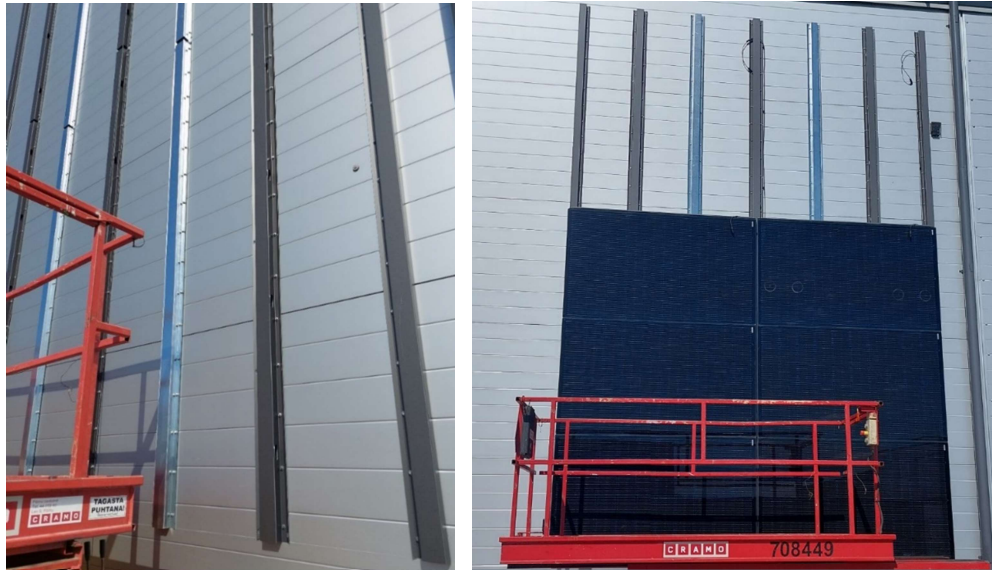
Tabel 3.5 Installeerimise ning kasutamise riskianalüüs

Nr.	Ohutegur	Tõenäosus	Riskitase vastavalt riskimaatriksile BS8800	Riskide haldamine
<b>1. Installeerimine</b>				
1.1	Raami teravad servad-lõikehaavade oht	Tõenäoline	III	Lõikekindlate riidete ning kinnaste kasutamine. Toote tõstmisel vaakumkäepidemete kasutamine.
1.2	Tööriistade/toote jalale kukkumise oht	Võimalik	III	Turvajalanõude kasutamine.
1.3	Rasked tooted - oht vigastuste tekkeks	Tõenäoline	IV	Toodet installeeritakse mitmekesi.
1.4	Toote valesti installeerimine	Võimalik	II	Toote installeerimisjuhend.
1.5	Riietusesemete, juuste takerdumisoht	Tõenäoline	III	Turvariietuse kasutamine, juuksed peavad olema kinni.
1.6	Kõrgemalt kukkuvad osad	Võimalik	IV	Kaitsekiivri kasutamine.
1.7	Elektrilöögi oht	Võimalik	IV	Veenduda, et pistikud ja kaablid on terved. Inverterisse ühendamisel võtta inverter vooluvõrgust välja.
<b>2. Kasutamine</b>				
2.1	Teravad servad-lõikehaavade oht ning riietusesemete ja juuste takerdumisoht	Tõenäoline	III	Toote projekteerimisel vältida teravaid servi kasutajale ligipääsetavates kohtades.
2.2	Elektrilöögi oht	Võimalik	IV	Toode ning alusroovitus on maandatud.
2.3	Toote alla kukkumise oht	Võimalik	IV	Toote installeerimine vastavalt juhendile.

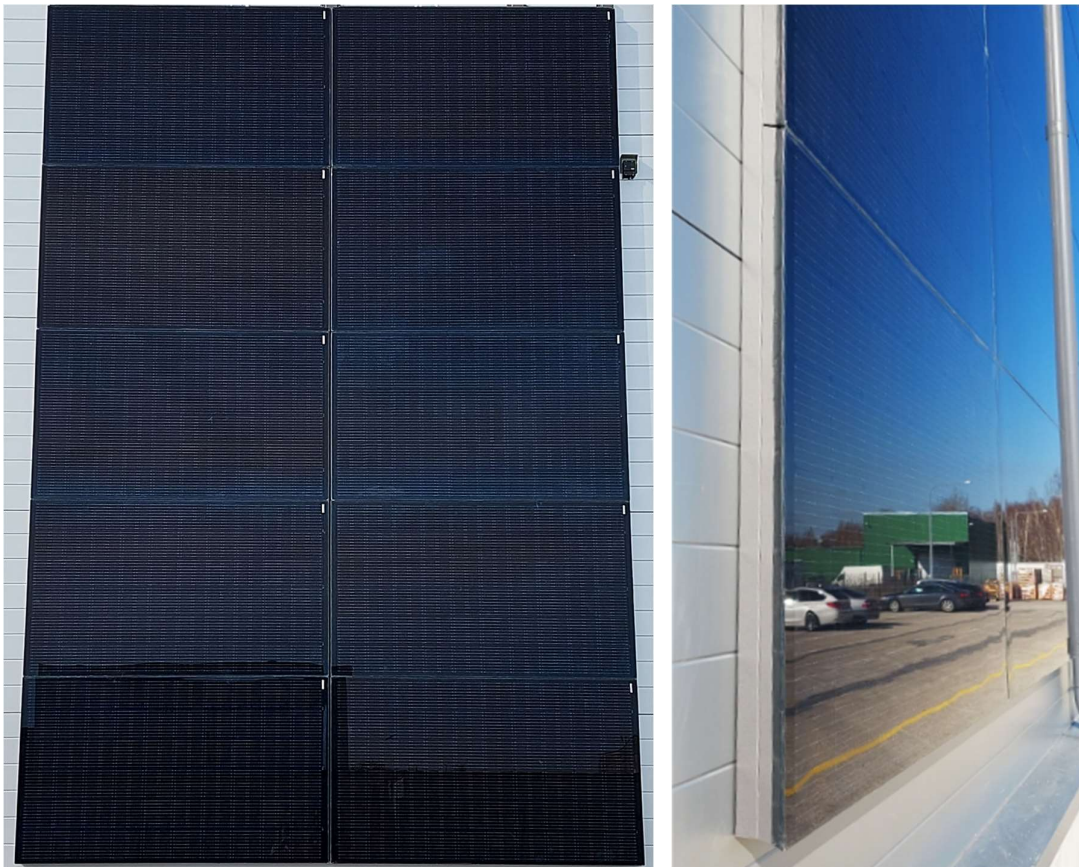
Installeerimise riskianalüüsi tulemusena tuleb rõhku pöörata toote installeerimisel turvavarustuse (lõikekindlad riided ja kindad, turvajalanõud, kaitsekiiver) kandmisele. Kindlasti tuleb ka elektrilöögi ohu maandamiseks veenduda, et enne installeerimist oleksid kõik pistikud ja kaablid terved ja võtta paneelide inverterisse ühendamisel inverter vooluvõrgust välja. Samuti tuleb fassaadikassette installeerida mitmekesi, et vältida ohtlike vigastuste teket. Soovituslik on kasutada ka vaakumkäepidemeid, et kassetti oleks mugavam tõsta ning maandada lõikehaavade tekke riski. Lisaks on vajalik luua tootele installeerimisjuhend, et vältida toote valesti installeerimist.



Kasutamise riskianalüüsi tulemusena selgus, et toote projekteerimisel tuleks vältida teravaid servi kasutajale ligipääsetavates kohtades. Lisaks tuleb veenduda, et toode oleks installeeritud vastavalt juhendile ning et toode ja alusroovitus oleksid maandatud.



Sele 3.18 Seinaroovitus ja toote installeerimine



Sele 3.19 Installeeritud sein

### **3.4.3 Fassaadikassettide hooldus**

Fassaadikassette installeeritakse veergude kaupa, mis ei ole omavahel seotud. See tagab mugava ning lihtsa kassettide hooldamise ning vajadusel kassettide eemaldamise.

Päikesepaneelid on valmistatud isepuhastuvast klaasist, mis on vastupidav ka soolale, liivale ning tolmu. Seega võib väita, et päikesepaneelid on hooldusvabad. Kuna päikesepaneel on ostutoode, siis ettevõtte Ruukki poolt ei ole sellele loodud hooldusjuhendit. Sellest hoolimata tuleks regulaarselt jälgida fassaadikasseti seisukorda ning vajadusel puhastada seda mustusest.

Fassaadikasseti raami tuleb puhastada kord aastas, et vältida selle korrodeerumist. Kui aga on raami pinnakattes näha kahjustusi või roostet, tuleks need koheselt maha lihvida, puhastada pind, kuivatada see ning värvida üle ühe kuni kahe värvikihiga.

## 4. INSENERTEHNILISED ARVUTUSED

Antud peatükis on kontrollitud toote käitumine soojuspaisumisest tingitud liikumiste korral ja vastupanu tuulekoormusele, leitud fassaadikasseti kinnitamiseks vajalik kruvide arv, määratud päikesepaneeli hinnanguline tootlikkus ning reaalne tootlikkus ja koostatud toote omahinna arvutus.

### 4.1 Soojuspaisumine

Pikkuse muutus:

$$\Delta l = \alpha * L * \Delta t, \quad (4.1)$$

kus  $\Delta l$  – pikkuse muutus, mm,  
 $\alpha$  – joonpaisumistegur,  $1/^\circ\text{C}$ ,  
 $L$  – algne pikkus, mm,  
 $\Delta t$  – temperatuuri muutus,  $^\circ\text{C}$ .

$$\Delta t = T_1 - T_0, \quad (4.2)$$

kus  $T_0$  – algtemperatuur,  $^\circ\text{C}$ ,  
 $T_1$  – lõpptemperatuur,  $^\circ\text{C}$ .

Algandmed:

$\alpha_1 = 11,9 * 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	- süsinikterase joonpaisumistegur
$L_1 = 1773 \text{ mm}$	- raami algne pikkus
$\alpha_2 = 5,9 * 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	- klaasi joonpaisumistegur
$L_2 = 1773 \text{ mm}$	- klaasi algne pikkus

Temperatuuri muutus  $\Delta t$  väärtus on saadud võttes arvesse Eesti madalaimat temperatuuri  $T_0 = -43,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ning kõrgemait temperatuuri  $T_1 = 35,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . [25]

$$\Delta t = 35,6 - (-43,5) = 79,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Raami pikkuse muutus:

$$\Delta l_1 = \alpha_1 * L_1 * \Delta t = 11,9 * 10^{-6} * 1773 * 79,1 \approx 1,7 \text{ mm}$$

Päikesepaneeli pikkuse muutus:

$$\Delta l_2 = \alpha_2 * L_2 * \Delta t = 5,9 * 10^{-6} * 1773 * 79,1 \approx 0,9 \text{ mm}$$

Silikoon-liimi Sikasil® SG-500 maksimaalne lubatud pikenemine on 12,5%. Pikkuse 1773 mm puhul venib silikoon deformeerumata kuni  $1773 * 1,125 = 1994,6$  mm-ni, see võimaldab raamil ning päikesepaneelil erinevalt paisuda. [24]

## 4.2 Tuulekoormus

Näidisseina asukohast tulenevalt on antud töös tuulekoormuse arvutamisel arvestatud maastikutüübiks III (Piirkonnad, mis on kaetud ühtlase taimeestiku või hoonestusega või eraldiseisvate takistustega, mille vahekaugus ei ületa 20-kordset takistuse kõrgust). Hoone kõrguseks on arvestatud 10 m.

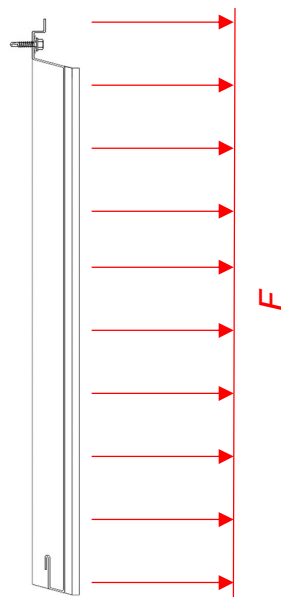
Ekspositsioonitegur  $C_e$  (Z) on leitud seel 4.3 olevalt graafikust.

Suurim tuulekoormus tekib sektoris A, mis on kujutatud seel 4.4 oleval majaplaanil.

Välisrõhutegur on leitud seel 4.4 olevast tabelist, arvestades et fassaadikassetid asuvad tsoonis A.

Kõik tuulekoormuse arvutused põhinevad Ivar Talviku õppematerjalil „Tuulekoormus hoonetele“. [26]

Allpool olevad arvutused kehtivad ainult töös vaadeldava näidisseina kohta. Igat erinevat projekti tuleb vaadelda eraldi.



Sele 4.1 Kassetile mõjuv tuulekoormusest tingitud jõud

Algandmed:

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$	- õhu tihedus
$Z = 10 \text{ m}$	- hoone kõrgus
$C_e(Z) = 1,75$	- ekspositsioonitegur
$C_{pe} = 1,4$	- välisrõhu rõhutegur
$A = 1,773 \text{ m}$	- kassetti laius
$B = 1,053 \text{ m}$	- kassetti kõrgus
$[S] = 1,5$	- varutegur [28]

Keskmise tuulekiiruse määramisel on võetud arvesse suurimat keskmist tuulekiirust Baltikumis, milleks on  $v_0 = 30 \text{ m/s}$ . [27]

Tuule poolt avaldatav rõhk:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_0^2, \quad (4.3)$$

kus  $q_b$  – tuule poolt avaldatav rõhk,  $\text{kN/m}^2$ ,  
 $\rho$  – õhu tihedus,  $\text{kg/m}^3$ ,  
 $v_0$  – keskmine tuulekiirus,  $\text{m/s}$ .

$$q_b = \frac{1}{2} * 1,25 * 30^2 = 562,5 \text{ N/m}^2 = 0,5625 \text{ kN/m}^2$$

Tippkiirusrõhk:

$$q_p(Z) = C_e(Z) q_b, \quad (4.4)$$

kus  $q_p(Z)$  – tippkiirusrõhk,  $\text{kN/m}^2$ ,  
 $q_b$  – tuule poolt avaldatav rõhk  $\text{kN/m}^2$ ,  
 $C_e(Z)$  – ekspositsioonitegur.

$$q_p = 1,75 * 0,5625 \approx 0,984 \text{ kN/m}^2$$

Seinale mõjuv välisrõhk:

$$w_e = q_p * C_{pe}, \quad (4.5)$$

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

$$w_e = 0,984 * 1,4 \approx 1,378 \text{ kN/m}^2 = 1378 \text{ Pa}$$

Maksimaalne lubatud välisrõhk päikesepaneeli moodulile on 3200 Pa (varutegur  $[S] = 1,5$ ) [29]. Fassaadikassettidele mõjuvaks rõhuks on 1378 Pa, mis on väiksem lubatud maksimaalsest rõhust. Seega päikesepaneelid panevad antud koormusele vastu.

Kassetile mõjuv jõud:

$$F = w_e * S, \quad (4.6)$$

kus  $F$  – kassetile mõjuv jõud, N,  
 $S$  – kasseti pindala, m<sup>2</sup>.

$$S = AB \quad (4.7)$$

kus  $A$  – kasseti laius, m,  
 $B$  – kasseti kõrgus, m.

$$F = 1378 * 1,773 * 1,053 \approx 2577 \text{ N}$$

Ekspositsioonitegur maksimaalse tuulerõhu korral:

$$C_e(Z) = \frac{w_e}{q_b * C_{pe}} = \frac{3200}{562,5 * 1,4} \approx 4$$

Kassetile mõjuv jõud maksimaalse tuulerõhu korral:

$$F_{max} = 3200 * 1,773 * 1,053 \approx 5975 \text{ N}$$

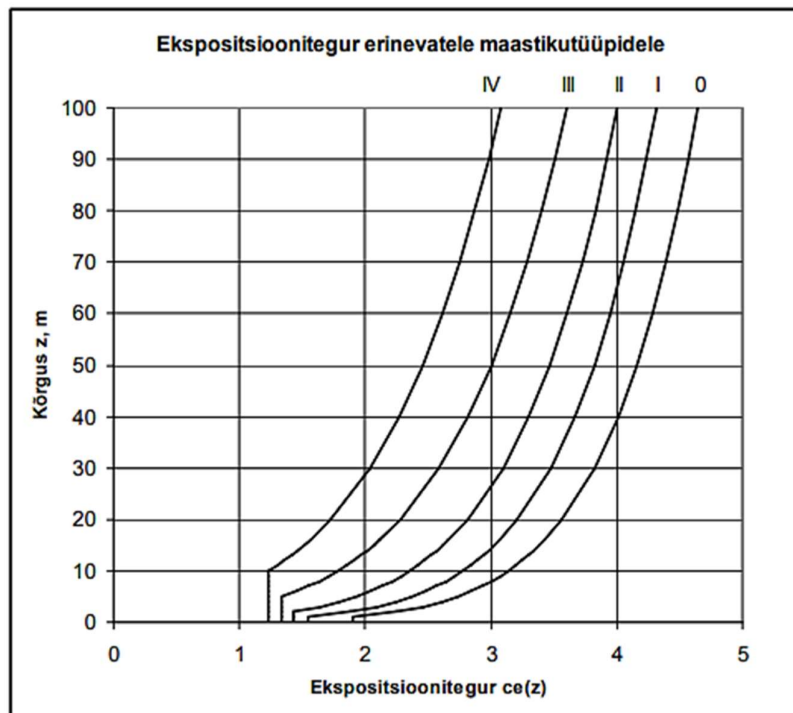
Kuna on teada, et tuulerõhust tulenevalt on maksimaalne ekspositsioonitegur  $C_e(Z) = 4$ , siis selle abil on võimalik vaadelda, millistesse keskkondadesse ning kui kõrgetele hoonetele on võimalik päikesepaneeliga fassaadikassette paigaldada juhul, kui keskmine tuulekiirus  $v_0 = 30 \text{ m/s}$ . Tulemused on esitatud allpool toodud tabelis Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Päikesepaneeliga fassaadikassettide paigaldamiseks sobivad keskkonnad

Maastikutüüp	0	I	II	III	IV
Hoone maksimaalne kõrgus, m	40	65	100	> 100	> 100

Maastikutüüp	$z_0$ m	$z_{min}$ m	$z_{min}$ (ENV) m
0 Meri või kaldapiirkond, mis on avatud merele	0,003	1	
I Järved või tasane horisontaalne maastik ilma olulise taimkatteta ja ilma takistusteta	0,01	1	2
II Maastik madala taimkattega (nagu rohi) ja üksikute takistustega (puud, hooned), mille vaheline kaugus võrdub vähemalt 20-kordse kõrgusega	0,05	2	4
III Maastik, mis on kaetud ühtlase taimkatte või ehitistega või üksikute takistustega, mille vaheline kaugus ei ole suurem 20-kordsest kõrgusest (nagu maa-asulad, äärelinnapiirkond, ühtlaselt metsaga kaetud alad)	0,3	5	8
IV Maastik, kus vähemalt 15% pinnast on kaetud hoonetega, mille keskmine kõrgus ületab 15 m	1,0	10	16

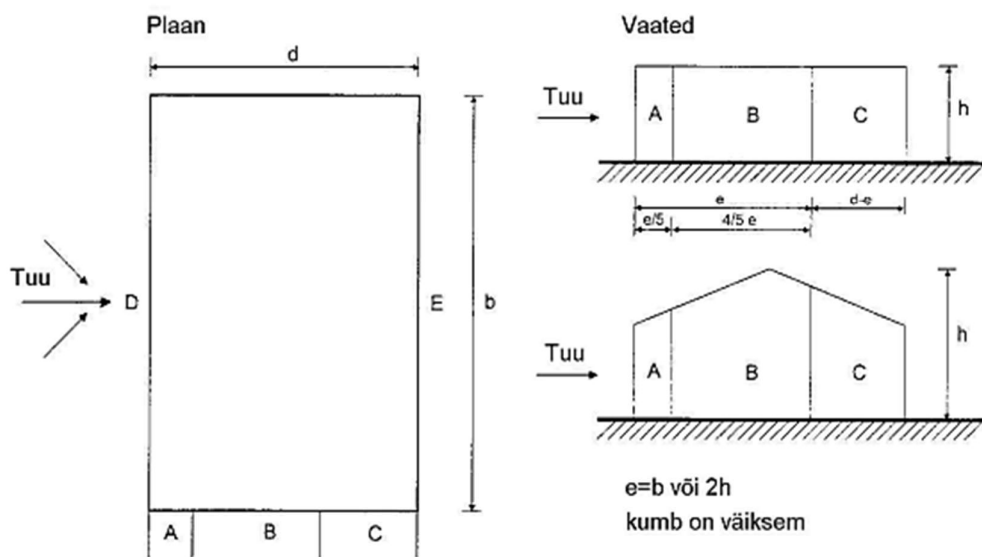
Sele 4.2 Maastikutüübid [26]



Joonis 4.2 – Ekspositsioonitegur  $c_e(z)$ , kui  $c_0 = 1,0$  ja  $k_I = 1,0$

Sele 4.3 Ekspositsioonitegur [26]

Välisrõhutegurid  $c_{pe,10}$  ja  $c_{pe,1}$  tsoonidele A, B, C, D ja E määratakse jooniselt:



Joonis 7.5 Juhised vertikaalsetele seintele

Tabel 7.1 Välisrõhutegurid riskülikulise põhiplaaniga hoonete vertikaalsetele seintele:

h/d	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	-0,5	+0,8	+1,0	-0,7	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,8	+1,0	-0,5	-0,5
< 0,25	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,7	+1,0	-0,3	-0,3

Sele 4.4 Välisrõhutegur [26]

#### 4.2.1 Raami painete tugevuskontroll tuulekoormusele

Fassaadikassetti painete tugevuskontrolliks on koostatud kasseti ülemise osa ning alumise osa lihtsustatud mudelitele LEM analüüs Autodesk Inventor Professional 2022 keskkonnas. Kasseti materjaliks on valitud teras DX51D.

Algandmed:

$\sigma_y = 270$  MPa - terase DX51D voolepiir

[S]=1,5 - varutegur [28]

Lubatud maksimaalne ping:

$$\sigma = \frac{\sigma_y}{[S]} \quad (4.8)$$



kus  $\sigma$  – lubatud maksimaalne pinge, MPa,  
 $\sigma_y$  – materjali voolepiir, MPa,  
[S] – varutegur.

$$\sigma = \frac{270}{1,5} = 180 \text{ MPa}$$

Kassetile mõjuv jõud maksimaalse tuulekoormuse korral:  $F_{\max} = 5975 \text{ N}$

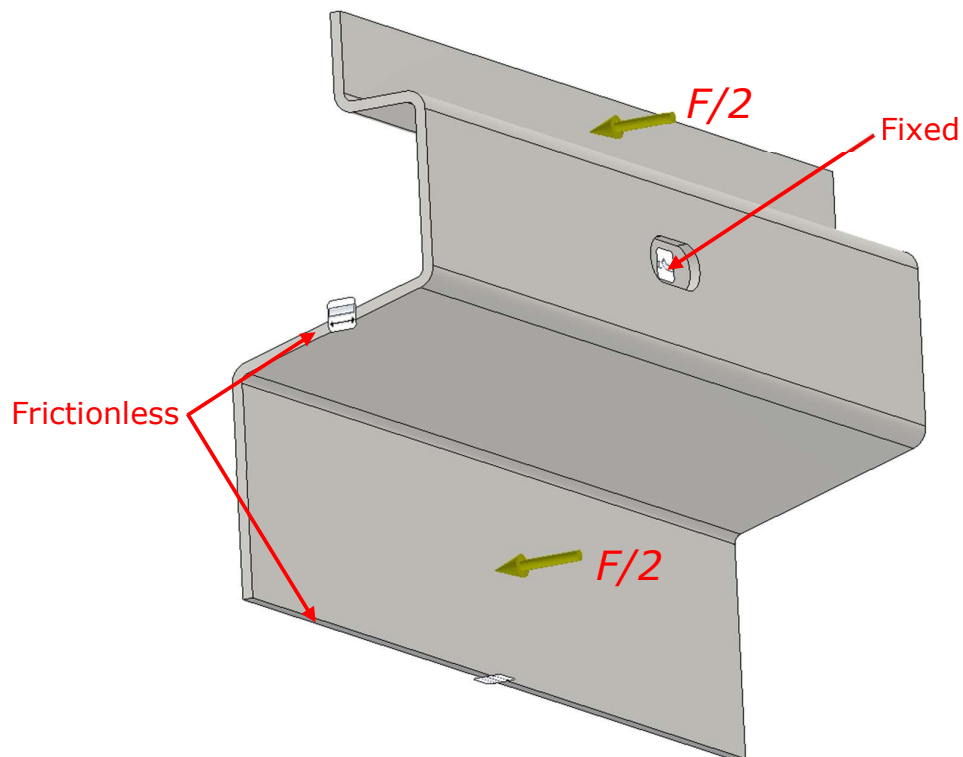
Lihtsustatud mudeli pikkuseks on 100 mm, seega mõjuv jõud:

$$F = 3200 * 0,1 * 1,053 \approx 337 \text{ N}$$

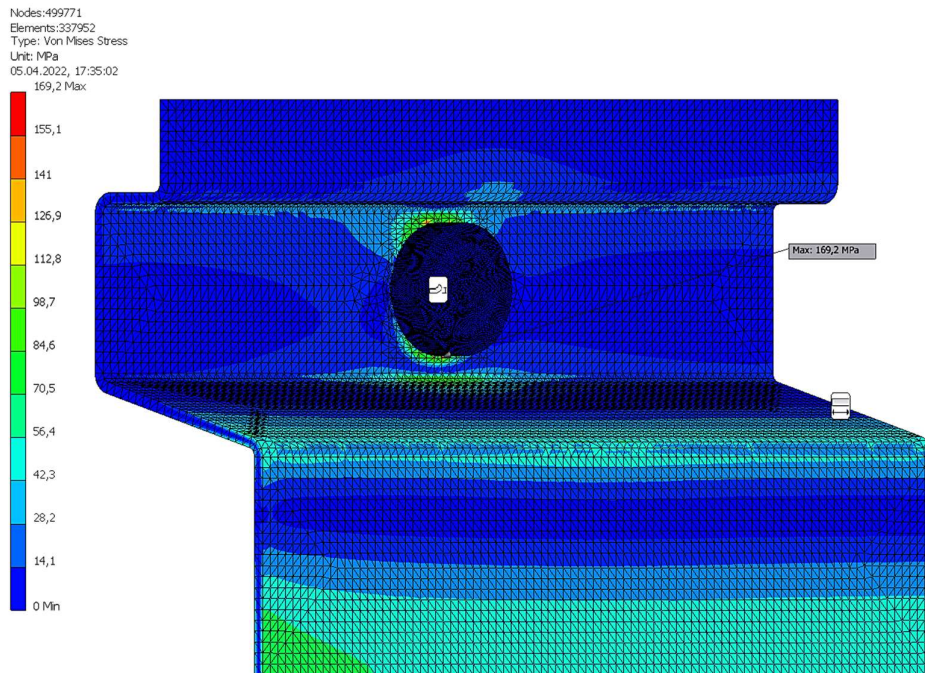
### Raami ülemise osa painete tugevuskontroll

Raami ülemise osa puhul on määratud raami vastas olevale kruvipeale *fixed constraint* ning lihtsustatud mudeli küljele ja alumisele äärele on määratud *frictionless constraint*. Pool jõust  $F/2 = 168,5 \text{ N}$  mõjub kasseti ülemisele paindele ning pool jõust  $F/2 = 168,5 \text{ N}$  kasseti esipinnale. Detaili rajatingimused ning koormamisskeem on toodud välja seel 4.5.

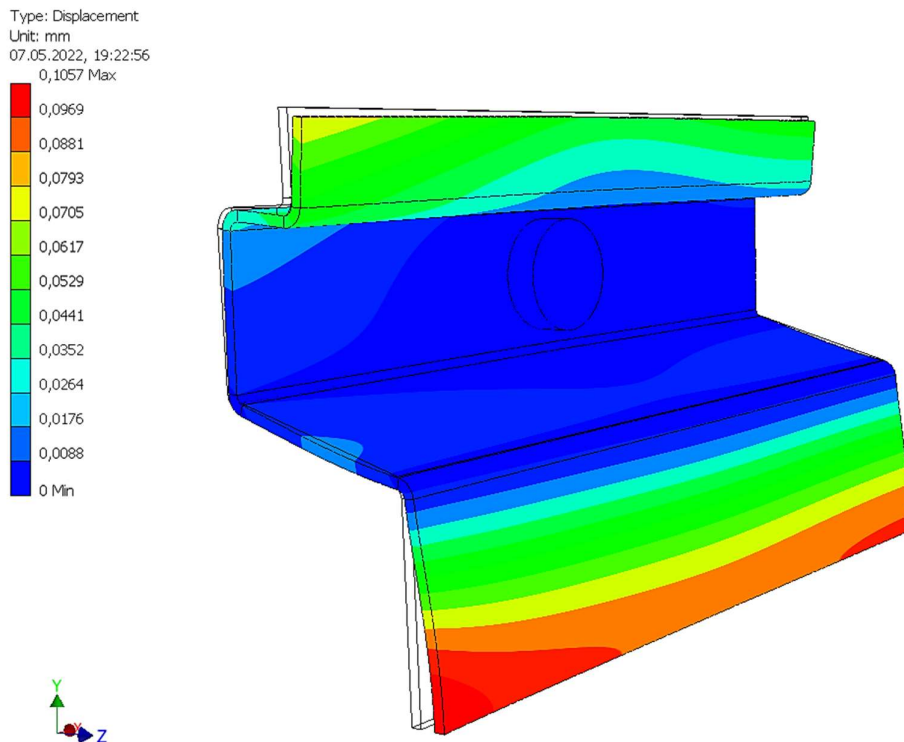
LEM-arvutuses kasutatakse kolmnurkseid plaatelemente suurusega 1 mm.



Sele 4.5 Rajatingimused ja koormamine



Sele 4.6 Tekkinud pinged



Sele 4.7 Läbipaine 0,5 kordse võimendusega

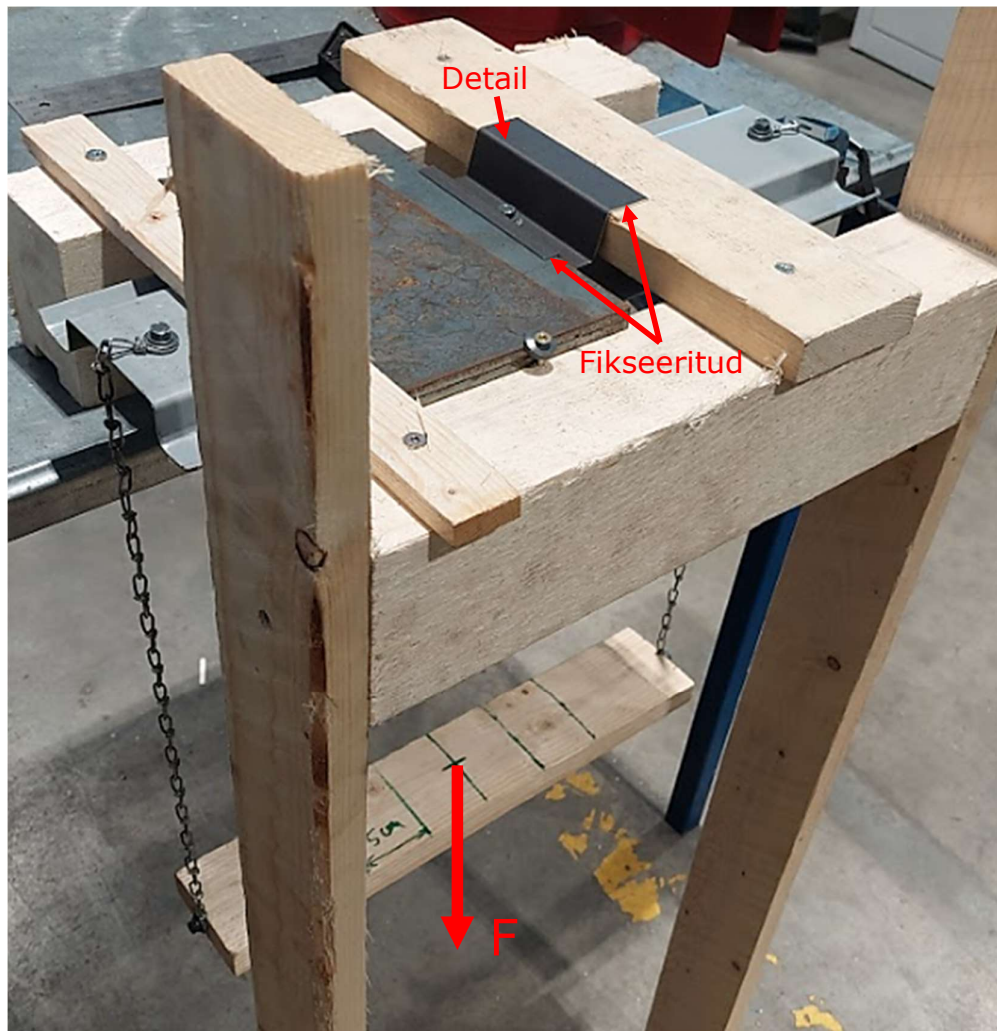
LEM-arvutuse tulemusena selgub, et maksimaalne pinge on 169,2 MPa ning see tekib kruvipea juures (Sele 4.6). Tegemist on pingekontsentraatoriga, realsuses jääb maksimaalne pinge kruvipea juures vahemikku 71-100 MPa. Painetes tekkivad pinged

on  $\sim 80$  MPa. Saadud tulemus on väiksem lubatud maksimaalsest pingest, milleks on  $\sigma = 180$  MPa, seega võib väita, et pained panevad tekkinud koormusele vastu.

Nagu seel 4.7 on näha, hakkavad tuulekoormuse tõttu ülemise ääre ülemine ning alumine paine ette poole painduma. Maksimaalne läbipaine tekib ülemise ääre allosas ning selleks on  $\sim 0,11$  mm.

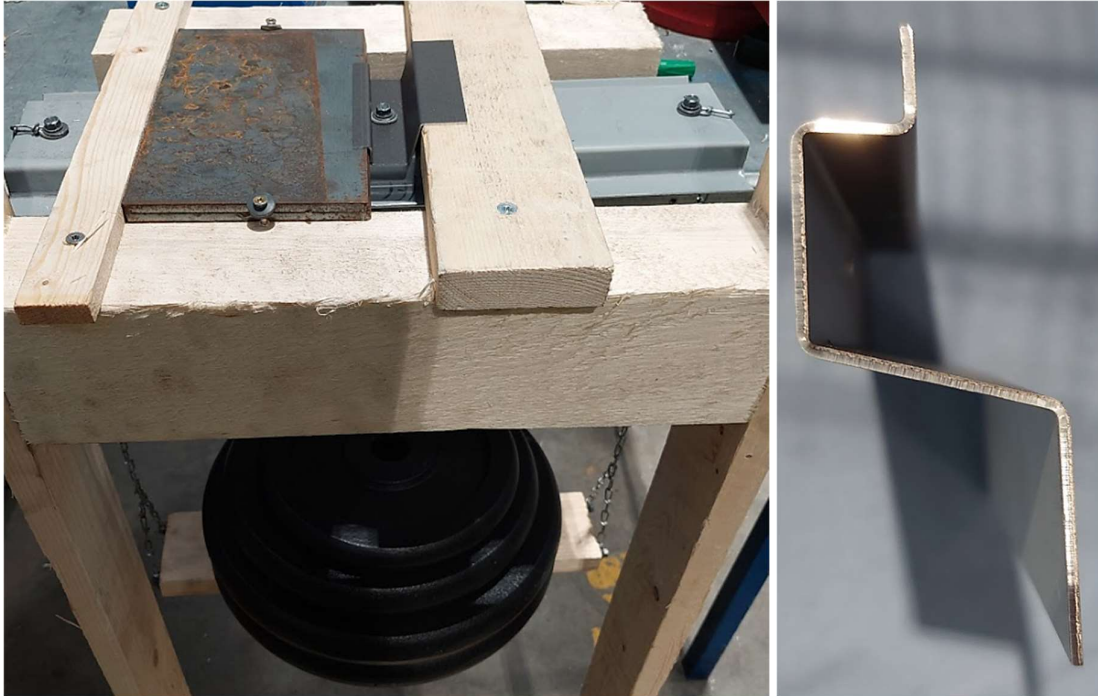
### Raami ülemise osa LEM arvutustulemuste kontroll

Arvutustulemuste kontrolliks teostati raami ülemisele osale test. Testimiseks koostati käesolevate vahenditega rakis. Raami ülemise otsa lihtsustatud detail kinnitati roovi külge ning detaili ülemine ja alumine osa fikseeriti metallplaadi ja puuklotsiga. Jõu rakendamiseks kinnitati roovi mõlemasse otsa kett, mille külge riputati omakorda puulatt. Rakis ning detaili fikseerimine on nähtavad seel 4.8.



Sele 4.8 Rakis ning rajatingimused

Edasi hakati detailile jõudu rakendama, asetades kettide küljes oleva puulati keskele raskusi. Kõigepealt koormati detaili 35 kg ehk 343 N-ga, misjärel ei tuvastatud silmnähtavaid deformatsioone. Seejärel koormati detaili 45 kg ehk 441 N-ga, mille tulemusena ei tuvastatud endiselt silmnähtavaid deformatsioone. Seega võib väita, et LEM analüüsi tulemused on korrektsed. Detaili koormamine ning detail peale koormamist on nähtavad seel 4.9.



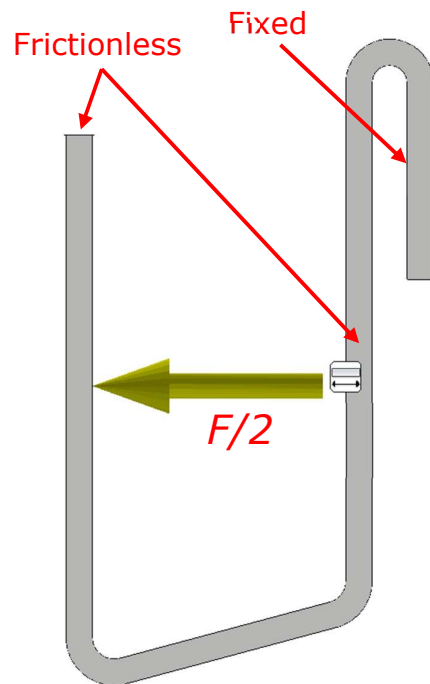
Sele 4.9 Detaili koormamine ning detail peale koormamist

### **Raami alumise osa painete tugevuskontroll**

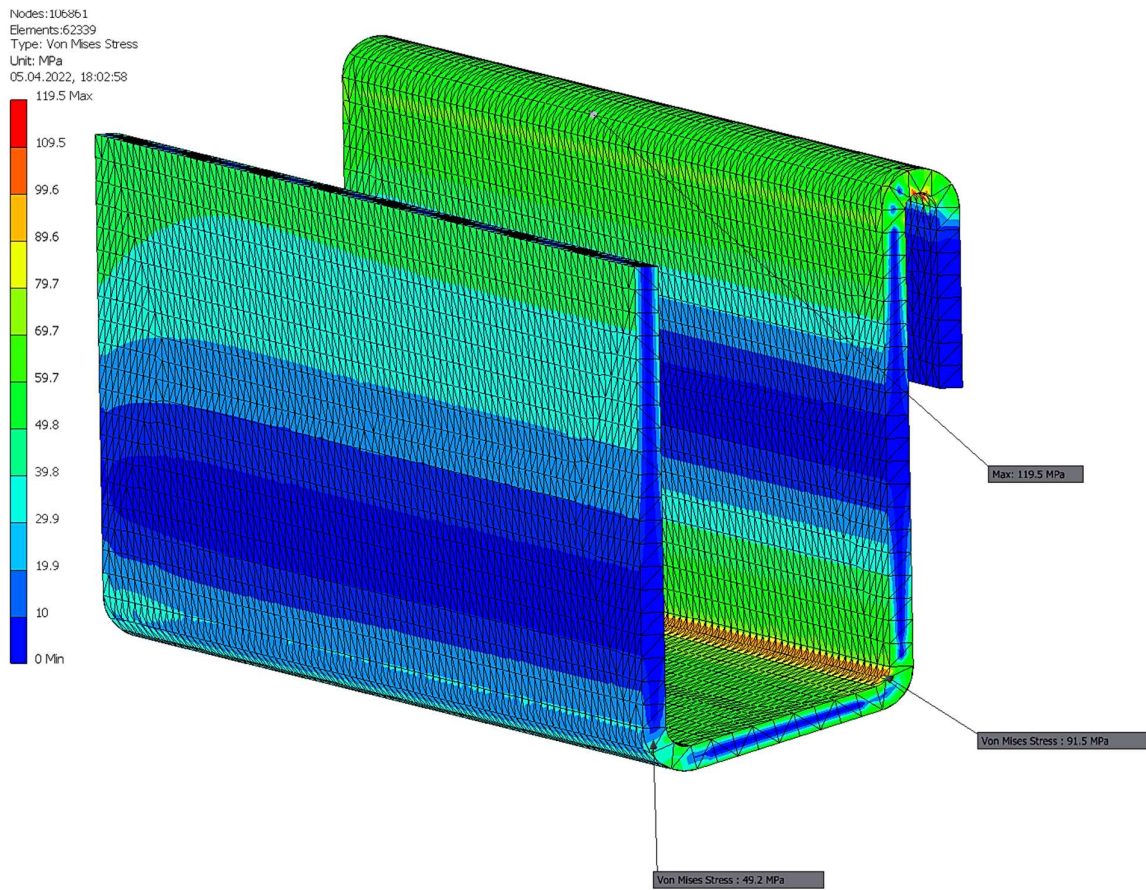
Raami alumise osa puhul on määratud *fixed constraint* HEM painde seesmisele osale, mis toetub vastu teise kasseti ülemist painet. Lihtsustatud mudeli küljele ja eesmisele servale on määratud *frictionless constraint*. Pool jõust  $F/2 = 168,5$  N mõjub kasseti esipinnale. Detaili rajatingimused ning koormamisskeem on toodud välja seel 4.10.

LEM-arvutuses kasutatakse kolmnurkseid plaatelemente suurusega 1 mm.

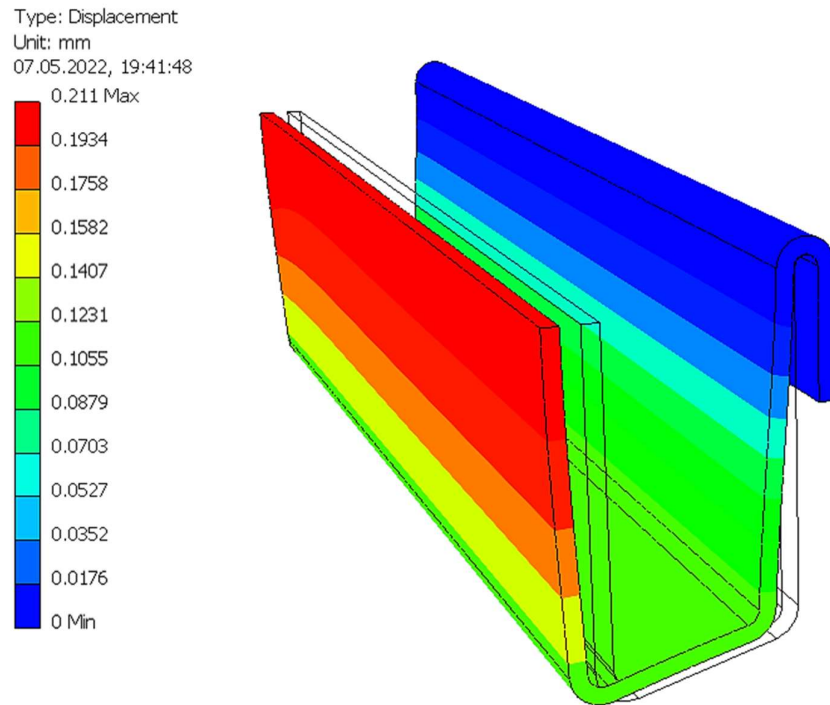




Sele 4.10 Rajatingimused ja koormamine



Sele 4.11 Tekkinud pinged



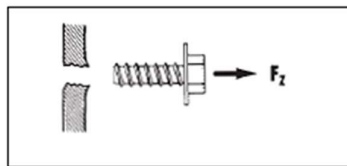
Sele 4.12 Läbipaine 0,5 kordse võimendusega

LEM-arvutuse tulemusena (Sele 4.11) selgub, et maksimaalne pingeline on 119,5 MPa ning see tekib avatud tagasipaindes. Painetes tekkivad pinged on ~50–119,5 MPa. Saadud tulemus on väiksem lubatud maksimaalsest pingest  $\sigma = 180$  MPa, seega painded panevad tekkinud koormusele vastu.

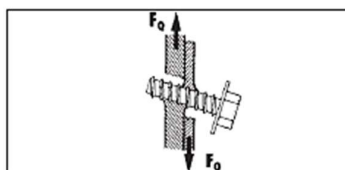
Maksimaalne läbipaine tekib alumise osa esipinnal ning selleks on ~0,22 mm. Nagu on seel 4.12 näha, hakkab tuulekoormuse tõttu alumine osa ette poole painduma.

### 4.3 Kruvid

Kassett kinnitatakse seina SFS-i poolt fassaadi jaoks toodetavate isepuurivate kuuskantkruvidega SL2-S-S14-4,8X22. Kruvi on valmistatud A2 roostevaba terasest, selle läbimõõduks on 4,8 mm ning pikkuseks 22 mm. Kurvi küljes on ka kummiseib läbimõõduga 14 mm.

**Pull-out load  $F_Z$  (N)****Part II (Subconstruction)**

Material	Thickness (mm)	$\bar{x}$	s
St37 (290 N/mm <sup>2</sup> )	2x0,50	636	41
	2x0,63	885	43
	2x1,00	1560	52
	2x1,25	2105	114
Alu (265 N/mm <sup>2</sup> )	2x0,50	467	18
	2x0,80	748	39

**Shear load  $F_Q$  (N)**

Material	Part I	Part II	$\bar{x}$	s
St37 (375 N/mm <sup>2</sup> )	0,63	0,63	1500	120
	0,75	0,50	1650	45
Alu (230 N/mm <sup>2</sup> )	1,00	1,00	1950	88

Sele 4.13 Kruvile lubatud maksimaalsed tõmbe- ja lõikejõud [30]

**Minimaalne lubatud kruvide arv**

Tuulekoormusest tulenevalt on kassetile mõjuv jõud  $F = 2577$  N. Kruvile lubatud maksimaalne tõmbejõud on määratud selel 4.13 tabeli järgi ning selleks on  $F_Z = 2105$  N. [30] Seega piisab kasseti kinnitamiseks kahest kruvist. Sellisel juhul on ühele kruvile mõjuv tõmbejõud:

$$F_Z = 2577/2 = 1288,5 \text{ N}$$

Maksimaalse tuulekoormuse korral on aga kassetile mõjuvaks jõuks  $F = 5975$  N. Sellisel juhul tuleks fassaadikassett kinnitada kolme kruviga. Ühele kruvile mõjuv tõmbejõud on:

$$F_Z = 5975/3 \approx 1992 \text{ N.}$$

Kruvile mõjuv lõikejõud:

$$F_Q = mg, \tag{4.9}$$

kus  $m$  – kasseti mass, kg,  
 $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ .

Algandmed:

- $m_k = 6$  kg - raami mass
- $m_p = 30$  kg - päikesepaneeli mass:
- $m = 1,4$  kg/l - silikoon-liimi erikaal

Liimi kulu:

$$V = (A + B) * 2 * h * e, \quad (4.10)$$

- kus  $V$  – liimi kulu, l,  
 $A$  – kasseti laius, mm,  
 $B$  – kasseti kõrgus, mm,  
 $h$  – miinimum silikooni ristlõike kõrgus, mm,  
 $e$  – miinimum silikooni ristlõike paksus, mm.

$$V = (A + B) * 2 * h * e = (1773 + 1053) * 2 * 27 * 9 = 1373436 \text{ mm}^3 \approx 1,4 \text{ l}$$

Liimi mass:

$$m_l = 1,4 * 1,4 \approx 1,96 \text{ kg}$$

Kruvile mõjuv lõikejõud:

$$F_Q = (30+6+1,96)*9,8 \approx 372 \text{ N}$$

Seel 4.13 välja toodud tabelis on kruvile lubatud lõikejõuks 1650 N, seega tekkinud lõikejõule paneb üks kurvi vastu. Tulenevalt maksimaalsest tuulekoormusest ning kruvile lubatud maksimaalsest tõmbejõust kinnitatakse fassaadikassett seinale kolme kruviga.

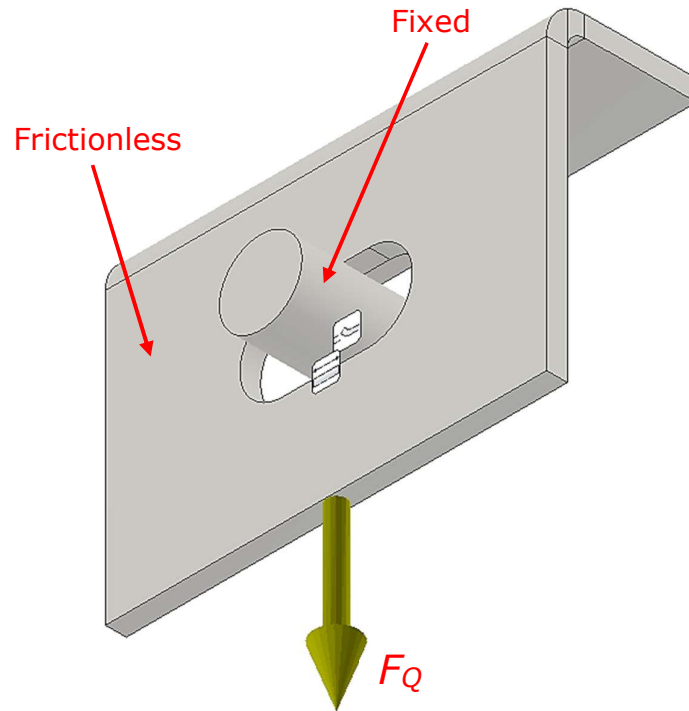
Kolme kruvi kinnituse korral lõikejõud ühele kruvile:

$$F_Q = 372/3 \approx 124 \text{ N}$$

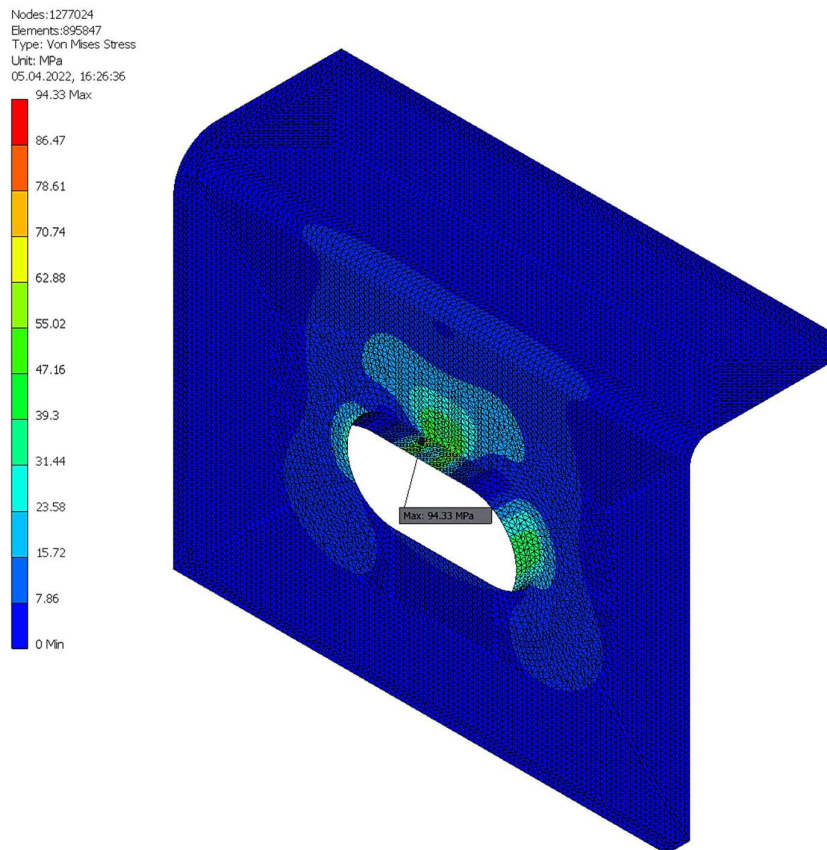
Fassaadikasseti kinnitusavade tugevuskontrolliks on koostatud LEM analüüs Autodesk Inventor Professional 2022 keskkonnas. Kasseti materjaliks on valitud teras DX51D. Kruvi silinderpinnale on määratud *fixed constraint* ning kassetti tagumisele pinnale, mis toetub vastu roovi, on määratud *frictionless constraint*. Jõud mõjub ovaalse ava ülemisele pinnale. Mõjuva jõu suurus on  $F_Q = 124$  N. Detaili rajatingimused ning koormamisskeem on toodud välja seel 4.14.

LEM-arvutuses kasutatakse kolmnurkseid plaatelemente suurusega 0,3 mm.



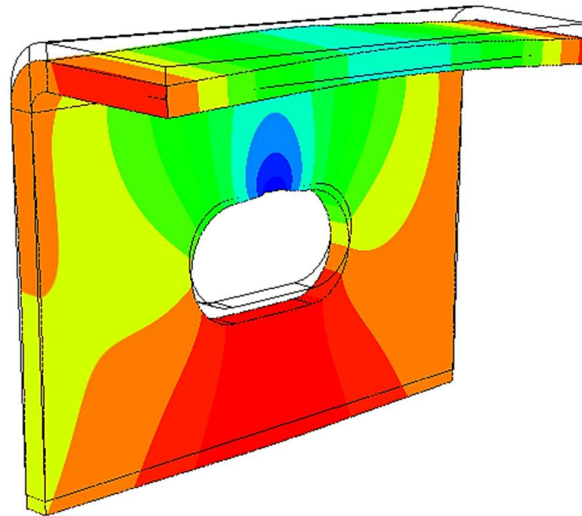
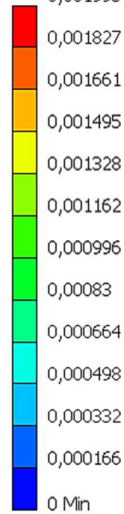


Sele 4.14 Rajatingimused ja koormamine



Sele 4.15 Kinnitusava ümbruses tekkinud pinged

Type: Displacement  
 Unit: mm  
 08.05.2022, 20:14:02  
 0,001993 Max



Sele 4.16 Läbipaine 0,5 kordse võimendusega

LEM-arvutuse tulemusena (Sele 4.15) selgub, et maksimaalne pinge on 94,33 MPa ning see tekib kinnitusava ülemises osas. Tegemist on pingekontsentraatoriga, maksimaalne pinge kinnitusava ülemises osas jääb vahemikku 40-60 MPa. Saadud tulemus on väiksem lubatud maksimaalsest pingest, milleks on  $\sigma = 180$  MPa, seega kinnitusavad panevad tekkinud koormusele vastu.

Nagu seel 4.16 on näha, hakkab kinnitusava alumine äär läbi painduma. Maksimaalne läbipaine on  $\sim 0,002$  mm.

### Kruvi lõikepinge arvutus

Kruvi lõikepinge:

$$\tau = \frac{F_Q}{S}, \quad (4.11)$$

kus  $\tau$  – kruvi lõikepinge, MPa,  
 $F_Q$  – lõikejõud, N,  
 $S$  – kruvi ristlõikepindala, mm<sup>2</sup>.

$$S = 2\pi r, \quad (4.12)$$

kus  $r$  – kruvi silindri raadius, mm.

$r = 2$  mm - kruvi silindri raadius

Kruvi lõikepinge:

$$\tau = \frac{F_Q}{2\pi r} = \frac{124}{2\pi * 2} \approx 9,9 \text{ MPa}$$

Lubatav lõikepinge:

$$\tau_{sall} = \frac{\tau_{sY}}{[S]}, \quad (4.13)$$

kus  $\tau_{sall}$  – lubatav lõikepinge, MPa,

$\tau_{sY}$  – voolepiir lõikel, MPa,

[S] – varutegur.

Terase voolepiir lõikel:

$$\tau_{sY} = 0,6 * R_e, \quad (4.14)$$

kus  $R_e$  - Roostevaba terase voolepiir, MPa.

$R_e = 230 \text{ MPa}$  - roostevaba terase voolepiir

[S] = 1,5 - varutegur

Lubatav lõikepinge:

$$\tau_{sall} = \frac{0,6 * 230}{1,5} = 92 \text{ MPa}$$

Kuna  $\tau < \tau_{sall}$ , siis kruvi peab antud lõikejõule vastu.

## 4.4 Päikesepaneeli arvutused

Päikesepaneeli andmed põhinevad päikesepaneeli tehnilisel spetsifikatsioonil [29] ning inverteri andmed inverteri tehnilisel spetsifikatsioonil [31].

Näidisseinal on kümme jadamisi ühendatud paneeli, mis paiknevad maja lõunapoolsel küljel.

Algandmed:

$V_s = 200 \text{ V}$  - inverteri käivituspinge

$V_w = 160 - 950 \text{ V}$  - inverteri tööpinge

$V_{mpp} = 33,79 \text{ V}$  - päikesepaneeli maksimaalne pinge

$P_I = 350 \text{ W}$  - päikesepaneeli võimsus

Inverteri käivitamiseks vajalik paneelide arv:

$$n = \frac{V_s}{V_{mpp}}, \quad (4.15)$$

kus  $n$  – paneelide arv,

$V_s$  – inverteri käivituspinge, V,

$V_{mpp}$  – päikesepaneeli maksimaalne pinge, V.

$$n = V_s / V_{mpp} = 200 / 33,79 \approx 6 \text{ paneeli}$$

Kümne paneeli tööpinge:

$$V_w = 10 * V_{mpp} = 10 * 33,79 = 337,9 \text{ V}$$

Päikesepaneelide koguvõimsus:

$$P = 10 * P_1 = 10 * 350 = 3500 \text{ W} = 3,5 \text{ kW}$$

### Päikesepaneelide hinnanguline tootlikkus

Päikesepaneelide tootlikkus näidisseinale on arvatud kasutades „EU Science Hub“ kalkulaatorit. Kalkulaatorisse sisestatud andmed on nähtavad seel 4.17.

Kalkulaatorisse sisestatud andmed:

Address: Turba 15, Pärnu

Slope: 90° (paigaldatud seinale)

Azimuth: 0° (sein paikneb lõuna suunas)

**PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV**

Solar radiation database\* PVGIS-SARAH2

PV technology\* Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]\* 3.5

System loss [%]\* 15

**Fixed mounting options**

Mounting position\* Building integrated

Slope [°]\* 90

Azimuth [°]\* 0

PV electricity price

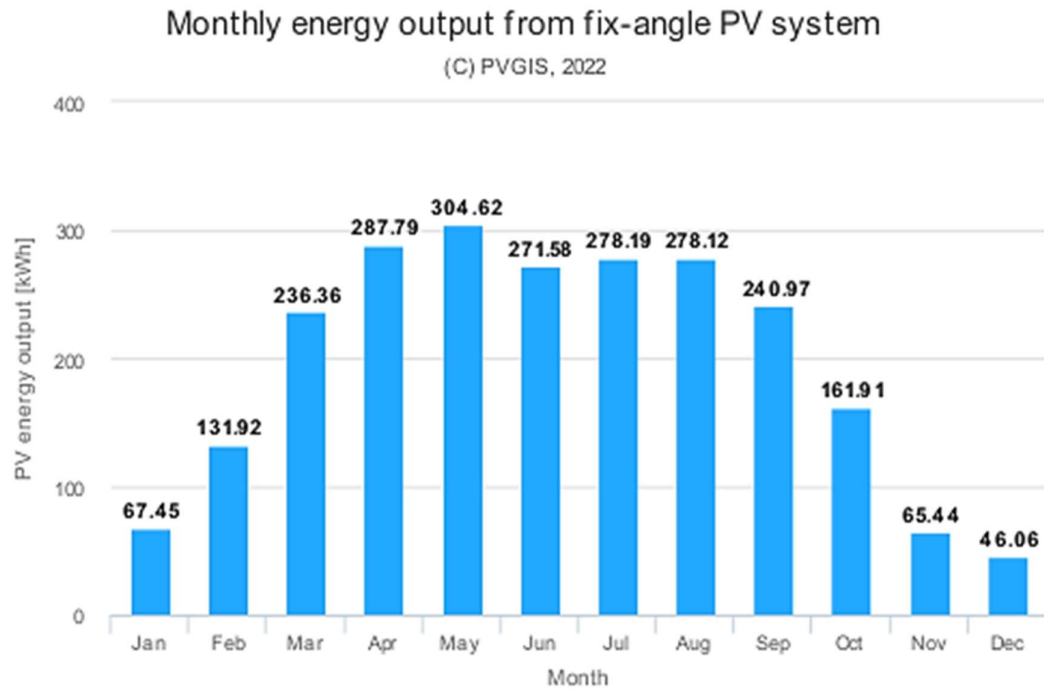
PV system cost (your currency)

Interest [%/year]

Lifetime [years]

Sele 4.17 Kalkulaatorisse sisestatud andmed [33]

Keskmine aasta tootlikkus näidisseinal on 2370,39 kWh. Keskmine päevane tootlikkus 2022 aprillis on 9,6 kWh ning mais 9,8 kWh. Kalkulaatorist saadud igakuise tootlikkuse graafik on toodud välja seel 4.18. [33]



Sele 4.18 Keskmine päikesepaneelide tootlikkus kuude lõikes [33]

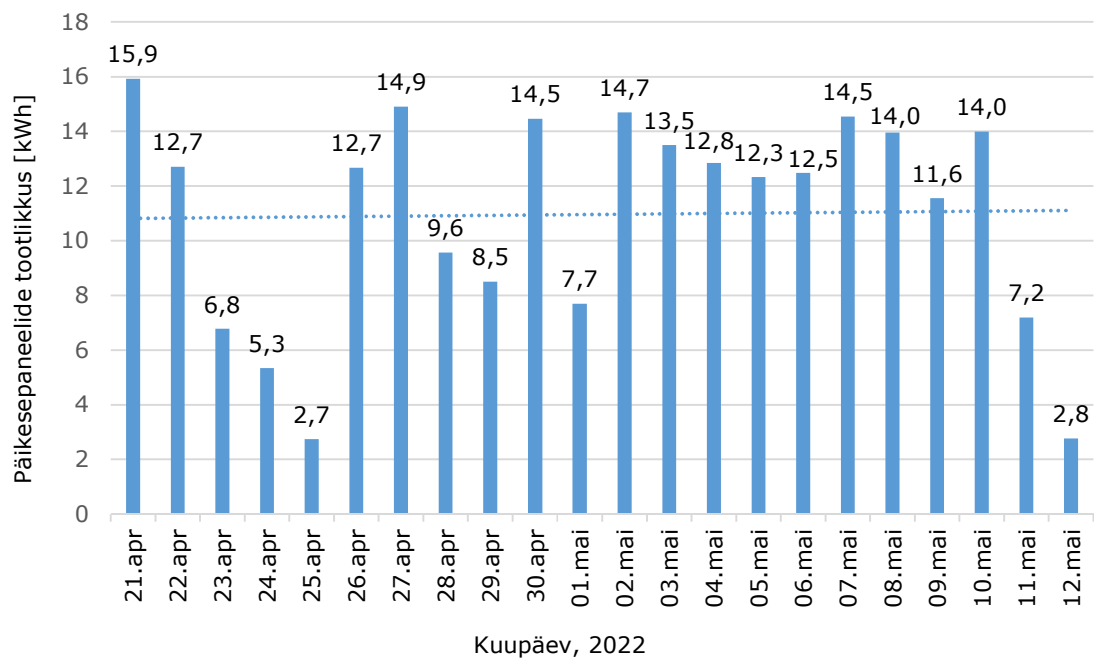
Kui aga fassaad oleks  $45^{\circ}$  nurga all, siis oleks keskmine aasta tootlikkus näidisseinal 3205,25 kWh. Seega oleksid  $45^{\circ}$  nurga all olevad kassetid ~35% tootlikumad kui vertikaalsed kassetid.

#### **Päikesepaneelide reaalne tootlikkus**

Päikesepaneelidele teostati reaalsed mõõtmised kolme nädala jooksul (21.04.2022-12.05.2022). Mõõtmistulemused on toodud välja allpool oleval seel 4.20.

Kolme nädala keskmiseks päevaseks tootlikkuseks oli 11 kWh, mis on ~11% suurem hinnangulisest tulemusest. Selle põhjuseks võib olla, et reaalsed kaod on väiksemad kui kalkulaatorisse sisestatud väärtus. Võib väita, et saadud tulemus ületas ootusi.

### Päikesepaneelide päevane tootlikkus



Sele 4.20 Päikesepaneelide päevane tootlikkus



Sele 4.19 Päikesepaneelid seinal tootlikkuse mõõtmiseks

## 4.5 Omahinna arvutus

Toote omahinna arvutamiseks on koostatud arvutustabel Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Omahinna arvutus

	Ühiku hind		Kogus		Kokku	
<b>Tooraine</b>	16	€/m <sup>2</sup>	2,84	m <sup>2</sup>	<b>45,44</b>	<b>€/tk</b>
<b>Päikesepaneel</b>	143,5	€/tk	1	tk	<b>143,5</b>	<b>€/tk</b>
<b>Stantsimine</b>	60	€/h	0,033	h	<b>2</b>	<b>€/tk</b>
<b>Painutamine</b>	40	€/h	0,05	h	<b>2</b>	<b>€/tk</b>
<b>Pakkimine</b>	40	€/h	0,20	h	8,17	€
			24	tk	<b>0,34</b>	<b>€/tk</b>
<b>Transport allhankesse</b>	1	€/km	200	km	200	€
			24	tk	<b>8,33</b>	<b>€/tk</b>
<b>Liimimine (töö + materjal)</b>	50,6	€/m <sup>2</sup>	1,87	m <sup>2</sup>	<b>94,62</b>	<b>€/tk</b>
<b>Kokku 1 tk omahind:</b>					<b>297</b>	<b>€</b>

Hinnaarvutuse tulemusena saadi ühe päikesepaneeliga fassaadikasseti omahinnaks ~300 €.

## KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö eesmärgiks oli ettevõttes Ruukki Products AS arendada ning projekteerida päikesepaneeliga fassaadikassett, mis vastaks ettevõtte poolt seatud kriteeriumitele ning väärtustele.

Antud töö põhiosa koosneb kolmest peatükist. Esimesena teostati turuanalüüs, kus vaadeldi, millised tooted on hetkel turul olemas, mis on nende tehnilised näitajad ning mis on nende eelisteks ja puudusteks.

Teises peatükis teostati päikesepaneeli valik, kus leiti kolm erinevat seatud kriteeriumitele vastavat päikesepaneeli. Nende seast valiti hindamismaatriksi abil välja sobivaim paneel, milleks oli Solitek Solid Bifacial B.60. Seejärel projekteeriti raam, mis sobituks kokku teiste Ruukki toodetega ning oleks vastupidav erinevatele ilmastikutingimustele ja koormustele. Viimasena valiti sobiv silikoon-liim ja arvatati välja vajalik silikoonühenduse ristlõige.

Kolmandas peatükis kontrolliti arvutuslikult toote käitumist soojuspaisumisest tingitud liikumiste korral. Arvutati välja tekkiv tuulekoormus ning kontrolliti lõplike elementide meetodi abil raami ülemise ja alumise osa vastupanu tuulekoormusele. Lisaks valideeriti raami ülemise osa LEM arvutuse tulemust katse abil. Edasi arvutati välja fassaadikasseti kinnitamiseks vajalik kruvide arv ja valideeriti kinnitusavade vastupanu raskusjõule, kasutades lõplike elementide meetodit. Järgnevalt määrati päikesepaneeli hinnanguline tootlikkus ja mõõdeti välja reaalne tootlikkus, milleks oli keskmiselt 11 kWh päevas. Saadud tulemus oli ~11% kõrgem hinnangulisest tulemusest, mis oli oodatust kõrgem. Selle põhjuseks võib olla, et reaalsed kaod olid väiksemad kui hinnangulises tulemuses kasutatud väärtus. Viimasena arvutati välja ühe päikesepaneeliga fassaadikasseti omahind. Antud peatükis koostatud arvutuste tulemusena selgus, et projekteeritav toode paneb tekkinud koormustele ja erinevatele ilmastikutingimustele vastu.

Magistritöö tulemusena on arendatud ja projekteeritud päikesepaneeliga fassaadikassett, mis täidab püstitatud kriteeriumeid ja eesmärki.



## **SUMMARY**

The Master's thesis goal was to develop and design a solar panel facade cassette that would meet the criteria and values set by the company Ruukki Products AS.

The main part of this thesis consists of three chapters. The first chapter was a market analysis of which products are currently on the market, what are their technical parameters, advantages and disadvantages.

In the second chapter, three different solar panels which met the criteria were found. Among them, the most suitable panel, Solitek Solid Bifacial B.60 was chosen by using the evaluation matrix. Secondly, the frame that would fit together with other Ruukki products and would be resistant to different weather conditions and loads was designed. Lastly, most suitable silicone was selected. Thirdly, the required cross-section of the silicone joint was calculated.

Chapter three focused on verifying the behavior of the product computationally in case of movements caused by thermal expansion. The resulting wind load was calculated and the resistance of the upper and lower parts of the frame to the wind load was checked by using the finite elements method. In addition the result of the FEM calculation of the upper part of the frame was validated by experiment. Next, the number of screws required for fixing the facade cassette was calculated and the fastening holes resistance to weight load was validated by using the FEM. Furthermore, the estimated productivity of the solar panel was determined and the real productivity was measured. The measured productivity was ~11 kWh per day, which was ~11% higher than the estimated result. The reason behind it might be that there were actually smaller losses than the losses value used in the estimation calculation. After that, the net cost of a facade cassette was calculated. As a result of the calculations made in this chapter, it turned out that the designed product is resistant to the incurred loads and to different weather conditions.

The result of this Master's thesis is a solar panel facade cassette, which fulfills the given criteria and goal.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Energiapoliitika üldpõhimõtted. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/et/sheet/68/energiapoliitika-uldpoimotted>. [Kasutatud 9.04.2022].
2. Teave Ruukkist. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ruukki.com/est/teave-ruukkist/ettevete/ettevete>. [Kasutatud 10.04.2022].
3. Filmimuseum Tallinnas. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/projektid/reference-details/film-museum-tallinn>. [Kasutatud 10.04.2022].
4. Mariahalleni spordikeskus. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/projektid/reference-details/mariahalleni-spordikeskus>. [Kasutatud 10.04.2022].
5. Go Vertic energiat tootev fassaad. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://et.govertic.com/tehnoloogia>. [Kasutatud 12.04.2022].
6. Go Vertic päikesepaneelid hoone seinal. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://et.govertic.com/about>. [Kasutatud 12.04.2022].
7. SolarLab-i fassaad. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://solarlab.dk/solar-facade-solutions/>. [Kasutatud 12.04.2022].
8. SolarLab-i fassaadi disainimise juhend. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://solarlab.dk/wpcontent/uploads/20211125\\_SolarLab.dk\\_2D-design-guide.pdf](https://solarlab.dk/wpcontent/uploads/20211125_SolarLab.dk_2D-design-guide.pdf). [Kasutatud 12.04.2022].
9. Copenhagen International School. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://solarlab.dk/references-and-inspiration/new-build-cis-campus-covered-with-custom-solar-facade/>. [Kasutatud 12.04.2022].
10. Metsolar päikesepaneelid. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://metsolar.eu/customization-options/>. [Kasutatud 12.04.2022].
11. BIPV facade renovation Project for school in Canada. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://metsolar.eu/solar-architecture/bipv-facade-renovation-project-for-educational-building/>. [Kasutatud 12.04.2022].

12. Vision 60M Construct päikesepaneel. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://www.solarwatt.com/solutions/our-products/product-overview/panels?source=solarwatt.com&medium=Website&referrer=solarwatt.com/solutions/our-products/product-overview>. [Kasutatud 02.04.2022].
13. AXSun AX M-108 päikesepaneel. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://www.axsun.de/solarmodule/premium-black-design>. [Kasutatud 02.04.2022].
14. Solitek Blackstar B.60 365W päikesepaneel. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://www.solitek.eu/en/products/Blackstar-B60-365w>. [Kasutatud 02.04.2022].
15. Solitek Solid Bifacial B.60 355W päikesepaneel. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://www.solitek.eu/en/products/solid-bifacial-355W>. [Kasutatud 02.04.2022].
16. K. Alto, „PV paneelide elektrienergia tootlus inverteeri aladimensioneerimise korral“, [Bakalaureusetöö], Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2020. [Võrgumaterial]. Saadaval: [https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/6146/Kenneth\\_Alto\\_BA2020\\_TT\\_t%C3%A4istekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/6146/Kenneth_Alto_BA2020_TT_t%C3%A4istekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Kasutatud: 04.04.2022].
17. Sharma, S., Jain, K. K., Sharma, A., „Solar cells: In research and applications – A review“, 2015
18. K. Loite, „PV paneelide ja akupanga süsteemi tasuvusanalüüs eramule“, [Bakalaureusetöö], Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2019. [Võrgumaterial]. Saadaval: [https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/5166/Kristjan\\_Loite\\_2019BA\\_TT\\_T%C3%A4istekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/5166/Kristjan_Loite_2019BA_TT_T%C3%A4istekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Kasutatud: 04.04.2022].
19. Kuidas päikesepaneelid töötavad. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://medium.com/the-pingo-blog/how-solar-panels-work-c6f93feeabab>. [Kasutatud 04.04.2022].
20. Ruukki fassaadikattesüsteemid. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/tooted/fassaadikattesüsteemid>. [Kasutatud 04.04.2022].
21. Fassaadikassett Liberta Original 102. [Võrgumaterial]. Saadaval: <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/tooted/fassaadikattesüsteemid/liberta/fassaadikattes%C3%BCsteemide-detailid---fassaadikassetid/liberta-original-102>. [Kasutatud 04.04.2022].

22. Ruukki värvkattega teras. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/tooted/fassaadikattesysteemid/materjalid/v%3%a4rvkattega-teras#v%3%a4rvkattega-teras>. [Kasutatud 04.04.2022].
23. Ventileeritud fassaadi põhimõte. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://stonesizepanels.com/ventilated-facade>. [Kasutatud 04.04.2022].
24. Sika fassaadide tihendamise ja liimimise spetsifitseerimise juhend. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://industry.sika.com/content/dam/dms/global-industry/I/BRO-Facade-Systems-Specification-Guide-en.pdf>. [Kasutatud 25.04.2022].
25. Eesti kliimarekordid. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/rekordid/ohutemperatuur>. [Kasutatud 07.03.2022].
26. Tuulekoormus õppehoonetele. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://airsill.planet.ee/ttu/Projekteerimise\\_Alused/Tuulekoormus\\_2008.pdf](http://airsill.planet.ee/ttu/Projekteerimise_Alused/Tuulekoormus_2008.pdf). [Kasutatud 07.03.2022].
27. European wind map for Basic wind speed. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.researchgate.net/figure/European-wind-map-for-basic-wind-speed\\_fig2\\_331467023](https://www.researchgate.net/figure/European-wind-map-for-basic-wind-speed_fig2_331467023). [Kasutatud 07.03.2022].
28. EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>. [Kasutatud 08.03.2022].
29. Solitek Solid Bifacial B.60 350W päikesepaneeli tehnilised näitajad. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.solitek.eu/storage/app/media/apie/SOLID\\_Bifacial%20B.60%20350W.pdf](https://www.solitek.eu/storage/app/media/apie/SOLID_Bifacial%20B.60%20350W.pdf). [Kasutatud 07.03.2022].
30. SFS internal documents, Switzerland, 2004
31. Inverter Sun2000-12/15/17/20KTL-M2 tehnilised näitajad. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Ffeu%2Fdatasheet%2FSUN2000-12-20KTL-M2.pdf>. [Kasutatud 10.03.2022].
32. Ruukki internal documents, Finland, 2019
33. EU Science Hub kalkulaator. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/). [Kasutatud 10.03.2022]

## LISAD

### Lisa 1 BS8800 standard

Tõenäosus Tagajärg	Väga ebatõenäoline L (0% ... 30%)	Võimalik K (30% ... 70%)	Tõenäoline P (70% ... 100%)
Kerge (töö saab jätkuda kohe peale esmaabi andmist)	Vähene risk <b>I</b>	Vastuvõetav risk <b>II</b>	Keskmine risk <b>III</b>
Ohtlik (tervisekahjustusest paranemine võtab aega, kuid see on võimalik. Pikemaajalisel töötamisel võimalik püsiv tervisekahjustus)	Vastuvõetav risk <b>II</b>	Keskmine risk <b>III</b>	Suur risk <b>IV</b>
Väga tõsine (tervisekahjustusest paranemine täiel määral väga raske. Võimalik puue või invaliidsus. Surm)	Keskmine risk <b>III</b>	Suur risk <b>IV</b>	Väga suur risk <b>V</b>

**Vähene risk (I tase)** – erilisi abinõusid ei vajata.

**Vastuvõetav risk (II tase)** – üldjuhul lisaabinõude rakendamine ei ole vajalik, kuid oluline on pidev ohutusabinõude teadmine ja täitmine ning töökoha üldine korrashoid, samuti tuleb need arvesse võtta töötervishoiu ja tööohutuse tegevuskava koostamisel.

**Keskmine risk (III tase)** – tuleb planeerida meetmed sõltuvalt ohuteguri võimalikust kahjulikkusest.

**Suur risk (IV tase)** – nimetatud ohud nõuavad kiiret abinõude rakendamist. Väga suur risk (V tase) – riski vähendamine on vältimatu. Töid ei tohi jätkata ega alustada enne, kui risk on kõrvaldatud või vähendatud. Kui vähendamiseks vajalikke abinõusid ei saa rakendada vahendite puudumise tõttu on töö ohtuallas keelatud.

## **GRAAFILINE OSA**