



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

TERASEST KATUSESÕRESTIKE OPTIMAALSUSE VÕRDLUS ERINEVATE SILLETE KORRAL

COMPARISON OF STEEL ROOF TRUSS SHAPES CONSIDERING DIFFERENT SPANS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Laura Olonen

Üliõpilaskood: 165236EAEI

Juhendaja: Ragnar Pabort, lektor

Tartu 2021

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.

"....." 2021.

Autor: Laura Olonen

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021.

Juhendaja: Ragnar Pabort

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Laura Olonen) (sünnikuupäev: 18.05.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral“, mille juhendaja on Ragnar Pabort,

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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkirjastatud digitaalselt)

_____ 2021. a (kuupäev)

Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Laura Olonen, 162536EAEI
Õppekava, peaariala: EAEI02/12Tartu Ehististe projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja: lektor Ragnar Pabort

Lõputöö teema:

Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral
Comparison of steel roof truss shapes considering different spans

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Terasfermi kõrguse muutmise mõju uurimine erinevate sillete puhul kolme enamlevinud fermi kujutüübi näitel
2. Arvutatud fermide maksumuse võrdlus arvestades terase kulu, tulepüsivusnõudeid ja montaažikuluseid

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülesande püstitus, töö eesmärgi seadmine	09.02.2021
2.	Asjassepuutuva taustainfoga tutvumine	22.02.2021
3.	Koormuste ja sisejõudude arvutamine, konstruktsioonide võrdlus	29.04.2021
4.	Maksumust puudutava info saamine	19.05.2021
5.	Seletuskirja koostamine ja jooniste vormistamine	06.08.2021

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." august 2021.a

Üliõpilane: Laura Olonen

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Ragnar Pabort

/ allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Aime Ruus

/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	13
1 TEOORIA	14
1.1 Varasemad uurimused	14
1.2 Sõrestike arvutuspõhimõtted	15
1.3 Sõlmede arvutuspõhimõtted	16
1.4 Hoone tutvustus	16
1.5 Arvutusmeetodi kirjeldus	17
1.6 Tulepüsivusnõuete ülevaade	18
1.7 Võrreldavate konstruktsioonide kirjeldus	19
1.8 Kandevkonstruktsioonides kasutatavad materjalid	21
2 KOORMUSED	22
2.1 Piirseisundid, koormuskombinatsioonid ja osavarutegurid	22
2.2 Alaliskoormused	24
2.2.1 Omakaalukoormused	25
2.3 Muutuvkoormused	27
2.3.1 Lumekoormus	28
2.3.2 Tuulekoormus	29
2.4 Koormuskombinatsioonid	38
2.4.1 Kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid	38
2.4.2 Kasutuspiirseisundi koormuskombinatsioonid	39
2.4.3 Tulekahjuolukorra koormuskombinatsioon	39
3 KATUSEKANDJATE DIMENSIONEERIMINE	40
3.1 Konstruktsiooni kirjeldus	40
3.2 Fermile mõjuvad koormused	40
3.2.1 Ülemise vöö kandevõime kontroll	41
3.2.2 Alumise vöö kandevõime kontroll	47
3.2.3 Võrguvarida V-03 kandevõime kontroll	51
3.2.4 Võrguvarida V-13 kandevõime kontroll	52
3.2.5 Terasfermide läbipainete arvutus	55
4 TULEMUSTE ANALÜÜS	57
4.1 Arvutustulemused 12 m sildega	57
4.2 Arvutustulemused 24 m sildega	58
4.3 Arvutustulemused 30 m sildega	60
4.4 Mõju hoone maksumusele	62

4.4.1 Hoone maksumuse võrdlus 12 m sildel	62
4.4.2 Hoone maksumuse võrdlus 24 m sildel	63
4.4.3 Hoone maksumuse võrdlus 30 m sildel	64
KOKKUVÕTE	66
SUMMARY	68
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	69
LISAD	70
GRAAFILINE OSA.....	82

EESSÕNA

Magistritöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Lõputöö teema on valitud koostöös praktiseeriva ehitusinseneriga, kes tegeleb igapäevaselt ehituskonstruksioonide projekteerimisega. Lõputöö uurib kolme enamlevinud terassõrestiku kuju näitel, kas ja kuidas mõjutavad sõrestiku kõrgus ning fermi sille terase kogust. Selline ülesandepüstitus on oluline kokkuhoidlikuma materjalide kasutuse tagamiseks ning on eriti aktuaalne kõrgemaks muutuvate terase hindadega ning üldise suunaga ehituses materjalidega võimalikult säästlikult ümber käia.

Terassõrestike kande- ja kasutuspiirseisundi arvutamise eeskirjadena on kasutatud Eestis kehtivat standardit EVS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015 „Eurokodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks“ ning K. Looritsa raamatut „Teraskonstruksioonide arvutus Eurokodeks 3 järgi“.

Lõputöös vajalike arvutuste teostamiseks ning konstruktsioonis mõjuvate jõudude leidmiseks on kasutatud arvutusprogrammi *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017* ja *PTC Mathcad Express Prime 7.0.0.0'i*. Joonised on tehtud tarkvaraga *Autodesk AutoCAD LT 2022*, tulemuste analüüsiks on kasutatud programmi *Microsoft Excel*.

Töö autor tänab juhendaja Ragnar Pabortit operatiivse koostöö ja abi eest magistritöö koostamisel. Samuti tänab autor teisi erialaste teadmiste jagamisega töö valmimisele abiks olnud inimesi.

Võtmesõnad: katusekandjad, terasferm, optimeerimine, maksumus, magistritöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

A – ristlõike pindala, (mm^2)

A_v – ristlõike lõikepindala (mm^2)

a_w – abisuurus paindekandevõime leidmisel

B – materjali paksus, mm

b - mõõt tuule sihis või kahekordse h väärtusega ehk koormustsooni mõõt; silde pikkus

b – ristlõike laius

b_0 – vöövarda ristlõike laius, (mm)

b_1 – koormustsooni mõõt 12 m sildel

b_2 – koormustsooni mõõt 24 m sildel

b_3 – koormustsooni mõõt 30 m sildel

b_i – ülemise võrguvarda ristlõike laius, (mm)

b_j – alumise võrguvarda ristlõike laius, (mm)

C_e – avatustegur

C_{my} – ekvivalentse konstantse momendi tegur

C_t – soojustegur

c_0 – pinnavormitegur = 1,0

c_e – ekspositsioonitegur

c_{pe} – välisõhu rõhutegur

c_r – maapinna karedustegur

d - on vastavalt külgešina mõõt; hoone pikkus

E – terase elastsusmoodul, $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$

e - võrdne väärtusega b ehk koormustsooni mõõt

f_u – terase tõmbetugevus

f_y – terase voolavuspiir, tugevusklassiga S355 terase puhul $f_y = 355\text{ N/mm}^2$

f_y – terase voolavuspiir

g – ülekateta liites vaba lõigu pikkus

h - hoone kõrgus

h - hoone kõrgus parapetita

h - ristlõike kõrgus

h_0 - vöövarda ristlõike kõrgus, (mm)

h_i - ülemise võrguvarda ristlõike kõrgus, (mm)

h_j - alumise võrguvarda ristlõike kõrgus, (mm)

h_p - parapeti kõrgus

h_w - ristlõike seina kõrgus, mis leitakse valemiga $h_w = h - (2t_f + r)$

G_k - alaliskoormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m

g_{kl} - normatiiven katuslae omakaal

g_{klf} - normatiivne katuslae omakaal 1 fermi kohta

g_{pvf} - normatiivne päikesepaneelide omakaal 1 fermi kohta

g_{ripf} - normatiivne riputuskoormus 1 fermi kohta

i - inertsiraadius

i - brutoristlõike inertsiraadius arvatava telje suhtes (mm)

I_v - turbulentsi intensiivsus

$I_v(z)$ - Turbulentsi intensiivsuseks kõrgusel z nimetatakse turbulentsi standardhälbe ja tuulekiiruse keskvaartusega jagatist

k_1 - turbulentsitegur, vastavalt rahvuslikule lisale Eestis $k_1 = 1,0$

k_r - karedusmõõdule z_0 vastav maastikutüübi tegur

k_{yy} - koosmõjutegur

k_{yy} - koosmõjutegur

L - hoone sille, silde pikkus

L_{cr} - nõtkepikkus vaadeldavas tasapinnas, (mm)

M_h - paindemoment tala otsas

$M_{N,y,Rd}$ - vähendatud paindekandevõime

$M_{ply,Rd}$ - Ristlõike arvutuslik paindekandevõime

M_s - paindemoment tala keskosas

$M_{y,Ed}$ – ja maksimaalne paindemoment (kNm)

$M_{y,Rd}$ – arvutuslik paindekandevõime y-y telje suhtes (kNm)

$M_{N,y,Rd}$ – ristlõike arvutuslik paindekandevõime, kus on arvestatud pikijõu N_{Ed} vähendavat mõju

N_{Ed} – vardale mõjuv maksimaalne survejõud (kN)

$N_{Ed,1}$ – y-y telje suhtes mõjuv maksimaalne survejõud (kN)

N_{Rd} – arvutuslik normaaljõukandevõime (kN)

P – eelpinge koormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m

r – ristlõike raadius

s – katusele mõjuv normatiivne lumekoormus

s_k – lumekoormuse normsuurus maapinnal

s_f – normatiivne lumekoormus 1 fermi kohta

s_k – lume normkoormus maapinnal, kN/m²

SLS (serviceability limit state) – kasutuspiir seisund

q_b – keskmine tuule baaskiirusrõhk (kN/m²)

$q_p(z)$ – tippkiirusrõhk

$q_p(z_e)$ – arvutuskõrgusele z_e vastav tippkiirusrõhk (kN/m²)

$Q_{k,1}$ – domineeriva muutuvkoormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m

$Q_{k,i}$ – muu muutuvkoormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m

t – ristlõike seina paksus

t_0 – vöövarda ristlõike seina paksus, (mm)

t_i – ülemise võrguvarda ristlõike seina paksus, (mm)

t_j – alumise võrguvarda ristlõike seina paksus, (mm)

t_w – ristlõike seinapaksus

ULS (ultimate limit state) – kandepiir seisund

v_b – tuule baaskiirus (m/s), vastavalt rahvuslikule lisale Eestis $v_b = 21$ m/s

V_{Ed} – vardas mõjuv arvutuslik põikjõud (kN)

$v_m(z)$ – keskmine tuulekiirus maapinnast kõrgusel z

$V_{pl,Rd}$ – ristlõike plastne põikjõukandevõime (kN)

w_e – välispindadele mõjuv tuulerõhk

w_{ef} – Tuulekoormus tsoonidele 1 fermi kohta

w_{max} – maksimaalne lubatud läbipaine

W_{pl} – vastupanumoment y -telje ümber

W_{ply} – ristlõike plastne vastupanumoment, (mm^3)

$z_{0,II}$ – karedusmõõt maastikutüüp II korral, $z_{0,II} = 0,05$ m

z_0 – karedusmõõt, m

$\Psi_{0,i}$ – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur.

Ψ_0 – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur

α_s – abisuurus ekvivalente konstantse momendi C_{my} leidmiseks

γ_G – alaliskoormuste osavarutegur

$\gamma_{G.inf}$ – alaliskoormuse soodsa mõju osavarutegur, mida kasutatakse juhul, kui alaliskoormus mõjub soodsalt

$\gamma_{G.sup}$ – alaliskoormuse ebasoodsa mõju osavarutegur, mida kasutatakse juhul, kui konstruktsioonile mõjub ainult alaliskoormus

γ_{M0} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M0} = 1,0$

γ_{M1} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M1} = 1,0$

γ_P – eelpinge osavarutegur

γ_Q – muutuvkoormuse osavarutegur

$\bar{\lambda}$ – varda tingsaledus.

λ_{0v} – ülekatte suurus

μ_1 – lumekoormuse kujutegur

σ_v – turbulentsi standardhälve, mis määratakse avaldisega $\sigma_v = k_r v_b k_1$

χ_y – nõtketegur paindenõtkel

γ – materjali mahukaal, kN/m^3

ϕ – nõtketeguri χ leidmiseks vajalik abisuurus

n – abisuurus paindekandevõime leidmisel

z – kõrgus maapinnast, m

ψ – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur

α – nõtkekõverale vastav hälbetegur. Külmpainutatud toruprofiili nõtkekõver terase tugevusklassi S355 korral on „c“ ning sellele vastav hälbetegur on $\alpha = 0,49$

ε – terase tugevusklassi arvestav tegur

η – tugevusklassiga S355 terase voolavuspiirile $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ vastav tegur, $\eta = 1,2$, kui $f_y \leq 460 \text{ N/mm}^2$

ρ – õhu tihedus (kg/m^3), $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

SISSEJUHATUS

Antud lõputöö eesmärgiks oli leida optimaalne fermi kuju ja kõrgus terase kulu seisukohast erinevate sillete korral, arvestades Eesti Vabariigis kehtivaid norme ja ehitusstandardeid. Teema valik tulenes soovist uurida terassõrestikke kui levinud konstruktsioonitüüpi suuri avatud sildeid vajavates hoonetes ning leida materjali kulust otstarbekaimad lahendused. Materjali kokkuhoid on päevakohane nii tõusvaid terasmaterjali hindu arvestades kui ka soovist tarbitavaid ressursse võimalikult keskkonna- ja energiasäästlikult kasutada.

Töö sisuks oli võrrelda kolme erinevat enamlevinud katusefermi tüüpi erinevate sillete ning fermi kõrguste korral ning nende faktorite mõju hoone maksumusele arvestades terase kulu, tuletõkkenõuete olemasolu ja montaažikulusid. Töös arvutatakse läbi erinevad hoone silded pikkustega 12 m, 24 m ja 30 m. Fermi kõrgused, mida võrreldakse, on L/8, L/10 ja L/12, kus L tähistab silde pikkust.

Arvutusi ei viida läbi lähtudes konkreetsest hoonest, vaid kujuteldavast hoonest, mis asub Eesti tavalises lumekoormuse piirkonnas. Arvutustulemuste võrreldavuseks jäävad kõikide katusekandjate kujude korral samadeks karkassi samm (6 m), katuse kalle (1/40 ehk 4 m peale 100 mm), hoone asukoht tuule- ja lumekoormuse arvestamiseks (Tartu linna ääres) ning katuse kihid (T130 profiilplekk, vajalikud soojustuse kihid ning 2x SBS kate).

Töö tegemisel kasutati konstruktsioonide maksimaalsete sisejõudude leidmiseks arvutusprogrammi *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020* ning arvutuste tegemiseks *PTC Mathcad Express Prime 7.0.0.0*. Arvutustulemused on esitatud kuvatõmmistena lisades. Arvutustulemuste võrdlemiseks kasutati tarkvara *Microsoft Excel*, jooniste tegemiseks *Autodesk AutoCAD LT 2022*.

Magistritöö on jaotatud viieks põhiosaks. Esimeses osas, peatükis 1., on antud ülevaade varasemalt tehtud töödest, tutvustatud sõrestike arvutuspõhimõtteid, hoone ülesehitust, arvutusmeetodeid ja tulepüsivusnõudeid. 2. peatükis on esitatud ülevaade mõjuvatest koormustest, sh nii omakaalu- kui ka tuule- ja lumekoormused ning kasutatud koormuskombinatsioonid. 3. peatükis esitatakse terassõrestike arvutus. 4. peatükis on esitatud tulemuste analüüs, kus on võrreldud eri kuju ja kõrgustega fermide masse sõrestiku kaupa ning maksumusi hoone kaupa.

1 TEOORIA

1.1 Varasemad uurimused

Varasemad uurimused on keskendunud eri materjalidest katusekandjate võrdlusele, nagu näiteks liimpuittalade või spregeltalade võrdlusele terassõrestikega maksumuse osas. Allpool vaadeldavas tabelis on ära toodud varem tehtud tööd autori, ilmumisaasta ja ülevaatega töö sisust.

Tabel 1.1 Varasemalt tehtud lõputööd

Ilmumisaasta, haldusüksus, autor	Lõputöö pealkiri	Ülevaade lõputöö sisust
2021, Taltech Tartu kolledž, Andrus Jaakson	Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel	5 teraskonstruktsiooni ja 3 liimpuitkonstruktsiooni maksumuste võrdlus. Sildeava pikkuseks oli 21,45 m.
2020, Taltech Tartu Kolledž, Erki Vellama	Teenindus- ja büroohoone kandekonstruktsioonide dimensioneerimine	Võrreldakse katusekandjatena spregeltala ja terasfermi maksumusi. Silde pikkuseks oli 13,5 m.
2020, Taltech Virumaa kolledž, Alla Borisova	Teraskonstruktsiooni tulepüsivuse arvutus ja konstruktsioonide võrdlus tootmishoone näitel	Võrreldakse kahe erineva tulepüsivusnõuete saavutamise viisi maksumust terastala ja terasposti näitel.
2018, Taltech, Tambet Toomla	Terasfermide majanduslik analüüs Maru Metall AS baasil	Majanduslikult optimaalsema sildega fermi leidmine enimtellitud fermide hulgast. Võrreldud sillete hulgas 10, 12, 14, 16, 20, 22 ja 24 m fermid.
2017, Taltech Tartu kolledž, Kristin Kartsep	Terasest ja liimpuidust kandekarkasside arvutus Nõo Konsumi näitel	Võrreldakse spregeltala ja liimpuittala ning terasfermi ja terastala maksumusi katusekandjatena vastavalt silletel 17,5 ja 9 m.
2015, Taltech Tartu kolledž, Madis Tamela	Laohoone terasest katusefermide projekteerimine ja tootejoonised	Koostatud projekt terasest katusefermidele koos tootejoonistega.

2013, Eesti Maaülikool, Rainer Vidder	Ärihoonele lisakorruse ehitamise optimaalseima lahenduse leidmine näitel	Võrreldakse eri tüüpe konstruktsioone, näiteks puitferme, liimpuitraame, terasferme ja terastalasisid/raame rekonstrueeritava hoone tugevdamisel.
---	--	--

Tootmisspetsiifika osas on tehtud mitmeid uurimusi Taltechi Mehaanika ja tööstustehnika instituudis tootmistehnika õppetoolis näiteks Maru Metall AS tootmise näitel. Täpsema tasuvuse osas tuleb arvestada terase muutuvaid hindasid ning tootmisprotsesside suuremat automatiseerimist. Sellest tulenevalt on antud lõputöös lähtunud sõlmede tugevdamise variandist ristlõigete suurendamise asemel.

Vastavalt esitatud Tabel 1.1, on varasemalt küll uuritud eri kandekonstruktsioone ning nende maksumusi, kuid terasfermide optimaalsust pole varasemalt Eestis sellisel kujul uuritud.

1.2 Sõrestike arvutuspõhimõtted

Sõrestikuks loetakse konstruktsioone, mis koosnevad vöödest ning võrguvarrastest ehk diagonaalidest ja postidest. Valdavalt konstrueeritakse sõrestikke nii, et võrguvarrad on koormatud vaid tõmbe- ja survejõududega. Sõrestike varraste normaaljõudude leidmisel võib lähtuda eeldusest, et vardad on omavahel ühendatud liigendkinnitusega. Sellest lähtuvalt on koostatud ka arvutuskeemid, kus liigendid on kõikidel võrguvarrastel mõlemas otsas. Seejuures käsitletakse vööd jätkuvalt, mis toetub liigendiliselt sõrestiku sõlmedes. Kandevarra profiilplekk paigaldatakse katusele malekorras, et tagada koormuse jaotus fermidele ühtlaselt. Kui profiilplekk on ülemise vöö külge kinnitatud nõuetekohaselt, ei ole vöö külgsuunaline ehk sõrestiku ristsandis väljanõtkumine võimalik. Terasfermi sõrestike varrasteks kasutatakse tavapäraselt nelikantprofiile, mis on omavahel ühendatud keevisliidetega. Nende seinapaksus peab soovituslikult olema vähemalt 3 mm ja mitte rohkem kui 25 mm. Esimene piirang tuleneb sellest, et nõnda lihtsustub sõlmede arvutus ning teine piirang sellest, et sellest suurema seinapaksuse puhul muutub kihtmurdumise oht oluliselt suuremaks. [1] Täpsemad skeemid võrreldavatest sõrestikest on esitatud peatükis 2.7.

1.3 Sõlmede arvutuspõhimõtted

Sõrestike koostamisel on sõlmede puhul lähtunud K. Looritsa raamatus „Teraskonstruksioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi“ esitatud suunistest ning standardist EVS-EN 1993-1-8:2005+NA:2006 „Eurokoodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-8: Liidete projekteerimine“. Nende suuniste järgimiseks peavad täidetud olema mõned arvutuseeldused, näiteks peavad kõik vardad kuuluma 1. või 2. ristlõikeklassi. Samuti peavad vöö- ja võrguvarraste vahelised nurgad θ_i olema vähemalt 30°, et oleks võimalik tagada kvaliteetseid keeviseid. Täpsed nurgad sõlmede vahel on esitatud antud magistritöö graafilises osas. Ülekattega sõlmes peab ülekatte suurus olema vähemalt 25%. Erinevate seinapaksusega varraste puhul peab ülekattega sõlmes väiksema seinapaksusega varras paiknema pealpool. Võrguvarraste eri laiuse puhul peab kitsam varras paiknema laiema peal. Neid tingimusi on võetud fermide koostamisel arvesse, kuid eraldi ei ole sõlmede arvutusi mahu kompaktsena hoidmise eesmärgil välja toodud. [1] [2]

1.4 Hoone tutvustus

Võrreldava ehitise näol on tegemist lihtsa vormiga risttahukakujulise hoonega, mille pikkuseks on 60 m ning mis koosneb 6 m sammuga karkassist. Hoone võrreldavad silded on 12 m, 24 m ja 30 m. Sillete sellised suurused said valitud samuti tulenevalt võimalusest kihtpaneeli 6 m sammuga paigaldada ning sellest, et kõik mainitud silded on küllalt levinud ka reaalse hoonete puhul. Hoone kõrguseks kõikide fermi kõrguste puhul on 10 m – see tagab samasugused tuulekoormused ning sellest tulenevalt uurimistulemuste parema võrreldavuse. Kõikide sillete puhul võrreldakse 3 tüüpi ferme. 30 m silde puhul arvestatakse, et terasferm on kahes tükis, kuna terasetootjad eelistavad ka 24 m ferme toota ühes tükis lihtsama montaaži tõttu. Magistritöös arvutatakse fermid läbi erinevate kõrgustega fermi keskkohast: L/8, L/10 ja L/12, kus L tähistab silde pikkust. Kõik fermid on kahekaldelised ning fermi hari asub sildepikkuse keskel.

Hoone ehituskonstruksioonid

Magistritöö põhiülesandeks on terrassõrestike maksumuse võrdlus katusekandjatena. Arvestatakse, et hoone karkass asub 6 m sammuga, mis on levinud samm kihtpaneelidest ehitamisel. Kihtpaneelidest seinad on levinud variant lao- või tööstushoonete jaoks, mille puhul on olulised suured silded. Samuti kasutatakse suuri sildeid näiteks kaubanduspindade, spordihoonete või muu taolise puhul.

Katuslagi

Kõikide võrreldavate fermi kujude ja eri sillete puhul kasutatakse tulemuste paremaks võrreldavuseks sama tüüpi katuslage. Katuslagi on projekteeritakse kandvale profiilplekile, sellest tulenevalt arvestatakse koormust katusefermidele lauskoormusena. Katusekatteks arvestatakse 2x SBS bituumenrullmaterjal. Katuslae täpsemad materjalid on ära toodud

Tabel 2.3, loetletuna välispinnast [3]. Katuse kalle on 1/40 ning kalde tipp asub hoone silde keskel, sellest tulenevalt ka fermide keskpunktis.

Muud konstruktsioonid

Antud töös ei täpsustata eraldi välispiirdeid, võimalikke siseseinu, põrandaid ega vahelagesid, kuna nende hooneosade eripärad ei mängi rolli antud töö teema püstituses ega lahenduses.

1.5 Arvutusmeetodi kirjeldus

Töö eesmärk on võrrelda erikujuliste ja erinevate kõrgustega terassõrestikke eri sillete puhul kasutatud terase koguse poolest ning seda, kas ja kuidas mõjutab nende maksumust erinevate tulepüsivusnõuete olemasolu.

Töös leitakse hoonele mõjuvad peamised koormused: omakaal katuslaest, tuulekoormus vastavalt maastikutüübile ja lumekoormus vastavalt piirkonnale, kus hoone asub. Koormustele vastavalt koostatakse koormuskombinatsioonid kande- ja kasutuspiirteisundis ning neile leitakse osavarutegurid ja kombinatsioonitegurid EVS-EN 1991-1-1:2002 Eurokoodeks 1 järgi. [4]

Koormusskeem ja 2D arvutusmodel koostatakse programmiga *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017* programmiga. Sealt leitakse maksimaalsed mõjuvad sisejõud, mis on esitatud kuvatõmmistena töö lisades. Dimensioneerimisarvutused tehakse ühe fermi näitel arvutusprogrammis *PTC Mathcad Express Prime 7.0.0.0* vastavalt Eurokoodeks 3-le. [5] Ülejäänud fermid arvutatakse aja otstarbe kasutamise huvides programmis *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017*. Arvutusulemusi võrreldakse programmis *Microsoft Excel*.

1.6 Tulepüsivusnõuete ülevaade

Lõputöö tulemuseks oleva maksumusanalüüsi üks oluline võrreldav aspekt on tulepüsivusnõuete mõju erinevate fermi kujude maksumusele. Selleks võrreldakse katusekonstruktsioonide maksumust hoone puhul, millel pole nõudeid kandekonstruktsiooni püsivusele, ning hoonete puhul, millel on kandekonstruktsioonide püsivusnõudeks R30 ja R60. Need nõuded sätestavad, et hoone konstruktsioon ei tohi kaotada kandevõimet vastavalt siis 30 ja 60 minuti jooksul.

Tulepüsivusnõuded Eesti Vabariigis

Lähtuvalt Riigi Teataja avaldatud määrusest „Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded“ jagatakse hooned tuleohutusest lähtuvalt 3 tuleohutusklassi: TP3, kus hoone kandekonstruktsiooni tulepüsivus ei ole määratud, kui see ei mõjuta tuletõkkesektsioonide tulepüsivust ning TP2 ja TP1, kus hoone kandekonstruktsioon ei tohi ettenähtud aja jooksul tulekahjus variseda, kusjuures TP1 juhul üldjuhul hoone kandekonstruktsioon tulekahjus ei varise. Tuleohutuse klassi määravad määruse lisas 1 nimetatud hoone kasutusviis, ruumide kasutusotstarve, korruste arv ja pindala, hoone kõrgus, tuletõkkesektsiooni pindala, kasutajate arv, eripõlemiskoormus ja hoones toimuva tegevuse tuleohtlikkus. [6]

Teraskonstruktsioonide tulepüsivus

Teraskonstruktsioonide tulepüsivust arvestatakse konstruktsioonelementide kriitilise temperatuuri saavutamisele kuuluva ajaga, st ajaga, mis kulub teraselemendil temperatuuri saavutamiseks, pärast mida teras kaotab arvestatava osa oma kandevõimest. Temperatuuri tõustes terase tugevus väheneb ja deformeeruvus kasvab. Antud töös on kasutatud tulekahjumudelisi temperatuuri hindamiseks nominaalset temperatuuri-aja graafikut. Kasutatud on standardtulekahju ehk tselluloosi tüüpi tulekahju. Tuleb arvestada, et hoonete erinevate kasutusotstarvete puhul võib olla vajalik teistsugusest tulekahjumudelitest lähtumine.

Võimalikud viisid teraselementide kaitseks

Teraselemendi kriitilise temperatuuri saavutamist on võimalik edasi lükata elementi tuletõkkevõõpadega või tuletõkkeplaatidega kattes. Need variandid kaitsevad terast liiga kiire kuumenemise eest. Antud töös on arvestatud tulepüsivusnõuete mõju terase hinnale juhul, kus tulepüsivuse saavutamiseks kasutatakse tuletõkkevõõpa, mis kantakse terasele juba tehases, kus ferm toodetakse. Tulekaitsevõõp ehk tulekaitsevärvi paisub kuumuse mõjul poorseks ning on seetõttu hea soojusisolaator. Tulekaitsevärvi kasutamisel on määravaks nii varda profiil kui ka see, mitmest küljest elementi tule eest kaitsta tuleb.

Võrreldavate teraskonstruktsioonide tulepüsivuse tagamise viisiks on arvestatud tuletõkkevärviga katmisega, mis on tavapärane viis teraskonstruktsioonide tulepüsivusnõuete täitmiseks. Tulekahju käigus temperatuuri muutuse ennustamiseks ja kriitilise temperatuuri määramiseks on kasutatud programmi *Autodesk Robot Structure Analysis*. Tuletõkkevõõba peale kandmine on otstarbekas juhul, kui teraselemendi kriitiline temperatuur on üle 500° C, kuna alla selle on värviga raske tagada terase vajalikku kaitstust kuumenemise eest. Elemendi kriitilist temperatuuri mõjutab nii varda ristlõige kui ka see, kui koormatud varras on.

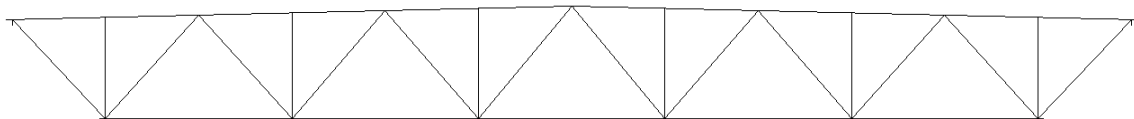
1.7 Võrreldavate konstruktsioonide kirjeldus

Katusefermide osas võrdleme kolme tüüpset kuju:

- tõmmatud ja surutud diagonaalidega ja surutud postidega fermi (nähtav joonistelt 2.1 ja 2.2);
- ainult diagonaalidega fermi, kusjuures diagonaalid on nii surutud kui ka tõmmatud diagonaale (esitatud joonistel 2.3 ja 2.4);
- ainult tõmmatud diagonaalidega ja surutud postidega fermi (esitatud joonisel 2.5).

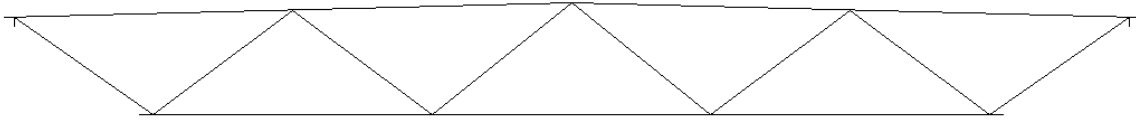


Joonis 1.1 Surutud ja tõmmatud diagonaalidega ja postidega ferm

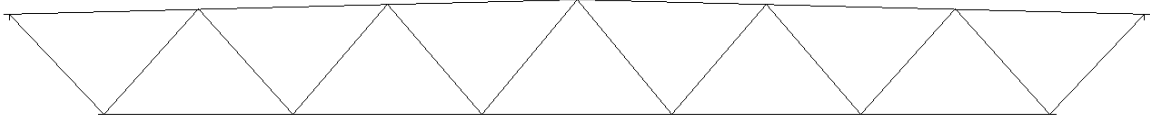


Joonis 1.2 Surutud ja tõmmatud diagonaalidega ja postidega ferm

Joonisel 2.1 esitatud fermi arvutati sillete 12 m ja 24 m puhul, joonisel 2.2 esitatud fermi kuju arvutati sillete 24 m ja 30 m puhul.

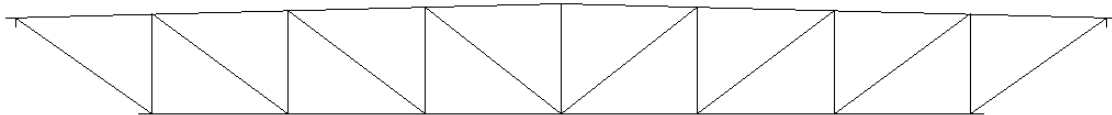


Joonis 1.3 Ainult diagonaalidega ferm, nn kolme „mooduliga“



Joonis 1.4 Ainult diagonaalidega ferm, nn viie „mooduliga“

Joonisel 2.3 esitatud fermi arvutati sillete 12 m ja 24 m puhul, joonisel 2.4 esitatud fermi kuju arvutati sillete 24 m ja 30 m puhul.



Joonis 1.5 Ainult tõmmatud diagonaalidega ja postidega ferm

Joonisel 2.5 esitatud fermi arvutati nii 12 m, 24 m kui ka 30 m sillete puhul. Kahel esimesel fermi tüübil arvutati läbi fermi kujud kahes erinevas variandis, sest suuremate sillete (24 m ja 30 m) puhul oli märgata küllalt suured erinevused fermide massides, millest on täpsem ülevaade esitatud peatükis 5.

Võrreldakse kolme erineva sildega ferme: 12 m, 24 m ja 30 m. 12 ja 24 m silde puhul on tegemist ühes tükis fermiga, 30 m silde puhul arvestatakse, et ferm on kahes tükis ehk keskel jätkuga. See tuleneb terasetootjate eelistusest monteerida ka võimalikult pikki sildeid võimalusel ühes tükis – see tähendab vähem platsikulusid, sh vähem tõsteid elementide osas, nii transpordivahendilt maha, kui ka maas monteerimist või veel keerukamat õhus kokku monteerimist.

1.8 Kandevkonstruktsioonides kasutatavad materjalid

Hoone fermid projekteeritakse terasest tugevusklassiga S355. Kasutatud materjalide karakteristikud on terase puhul ära toodud Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Teras S355J2 karakteristikud [5]

Terase klass	Voolavuspiir $f_y / \text{N/mm}^2$	Tõmbetugevus $f_u / \text{N/mm}^2$	Elastsusmoodul $E / \text{N/mm}^2$
S355	355	510	210 000

Sõrestikud arvutatakse kasutatakse nelikanttorusid, seejuures nii ruut- kui ka ristkülikristlõikega torusid. Nelikanttorude puhul arvestatakse, et tegemist oleks ristlõigetega, mis on ka Eestis levinud. Selleks tehti valikud K. Looritsa raamatus „Teraskonstruktsioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi“ esitatud enamlevinud ristlõigete tabelleid arvestades. [1]

Erinevad nelikanttorud seotakse omavahel keevisliidetega. Nende arvutamisel on lähtutud K. Looritsa raamatust „Teraskonstruktsioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi“ esitatud suunistest ning standardist EVS-EN 1993-1-8:2005+NA:2006 „Eurokoodeks 3: Teraskonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-8: Liidete projekteerimine“. Täpsem informatsioon nende kohta on leitav antud töö jaotisest 4.2.5.

2 KOORMUSED

2.1 Piirseisundid, koormuskombinatsioonid ja osavarutegurid

Katusesõrestike dimensioneerimiseks on vajalik teada konstruktsioonis mõjuvaid sisejõudusid, nende leidmiseks on vaja kõigepealt määrata konstruktsioonile mõjuvad koormused ning seejärel koostada vajalikud koormuskombinatsioonid. Katusesõrestikele mõjuvate koormuste arvestamisel lähtutakse koormuste normväärtustest. Vajalike dimensioneerimisarvutuste tegemiseks leitakse katusele mõjuvad alalis- ja muutuvkoormused. Muutuvkoormusteks on lumekoormused vastavalt piirkonnale, milleks antud töös on Tartu lähiümbrus ning tuulekoormused vastavalt maastikutüübile. Koormuste väärtuste kombineerimisega leitakse kande- ja kasutuspiirseisundite kriitilised koormusjuhtumid ehk koormusjuhtumid, mille puhul mõjuvad koormused tekitavad konstruktsioonile suurimad mõjuvad sisejõud ning suurimad läbipained.

Konstruktsioonid dimensioneeritakse vastavalt kandepiirseisundi koormuskombinatsioonidele. Kandepiirseisund on konstruktsiooni varisemisele eelnev seisund, mis on seotud konstruktsiooni kui terviku või selle osa tasakaalu kaotusega või purunemisega ning millega kaasneb oht inimestele ja ehitise sisustusele. Kandepiirseisundi koormuskombinatsioonides võetakse alaliskoormuste osavaruteguriks $\gamma_G = 1,2$ ja muutuvkoormuste osavaruteguriks $\gamma_Q = 1,5$. Konstruktsiooni kontrollil alaliskoormuse soodsast mõjust rakendatakse osavarutegurit $\gamma_{G.inf} = 1,0$. Mitme samaaegselt mõjuva muutuvkoormuse puhul eristatakse domineerivat muutuvkoormust ja muid muutuvkoormuseid. Mittedomineerivale muutuvkoormusele rakendatakse kombinatsioonitegurit ψ_0 . Alaliste ja ajutiste arvutusolukordade koormuskombinatsioonide kandepiirseisundis (ULS – *ultimate limit state*) leitakse standardi EVS-EN 1990:2002+NA:2002 kohaselt valemiga 3.1 [4]

Alalise või ajutise olukorra koormuskombinatsioon on esitatud valemiga (2.1) [4]

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_0 Q_{k,i} \quad (2.1)$$

kus γ_G – alaliskoormuse osavarutegur;

G_k – alaliskoormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m;

- γ_P – eelpinge osavarutegur;
 P – eelpinge koormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m;
 γ_Q – muutuvkoormuse osavarutegur;
 $Q_{k,1}$ - domineeriva muutuvkoormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m;
 $Q_{k,i}$ - muu muutuvkoormuse väärtus, kN, kN/m², kN/m;
 $\Psi_{0,i}$ - muutuvkoormuse kombinatsioonitegur.

Kasutuspiiriseisund käsitleb konstruktsiooni või selle elementide töötamist normaalsetes tingimustes, inimeste mugavust ja ehitise välimust (suur läbipaine, ulatuslik pragunemine) silmas pidades. Kasutuspiiriseisundite puhul tuleks eristada taastuvat ja taastumatut kasutuspiiriseisundit. Taastumatute kasutuspiiriseisundite leidmiseks kasutatakse kasutuspiiriseisundi normkombinatsiooni. Kasutuspiiriseisundite kombinatsioonides on kõikide koormuskombinatsioonide osavarutegurid $\gamma_G = 1,0$ ja $\gamma_Q = 1,0$. Normkombinatsioonide mittedomineerivaid muutuvkoormusi vähendatakse kombinatsiooniteguriga Ψ_0 . Normkombinatsioonid kasutuspiiriseisundis (SLS – *serviceability limit state*) leitakse EVS-EN 1990:2002 kohaselt valemiga (2.2) [4]

Normkombinatsioon kasutuspiiriseisundis [4]

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.2)$$

Töös kasutatud osavarutegurid on kokku võetud Tabel 2.1. Kombinatsioonitegurite väärtused on toodud Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Osavarutegurite väärtused [4]

Koormuse liik	Osavaruteguri tähis	Osavaruteguri väärtus
Alalised koormused kandepiiriseisundis (ebasoodne mõju)	$\gamma_{G.sup}$	1,20
Alalised koormused kandepiiriseisundis (soodne mõju)	$\gamma_{G.inf}$	1,00
Ainult alalised koormused kandepiiriseisundis (ebasoodne mõju)	$\gamma_{Gj.sup}$	1,35
Muutuvkoormused kandepiiriseisundis (ebasoodne mõju)	γ_Q	1,50

Tabel 3.1 jätk

Koormuse liik	Osavaruteguri tähis	Osavaruteguri väärtus
Muutuvkoormused kandepiirseisundis (soodne mõju)	γ_Q	0,00
Alalised koormused normatiivses kasutuspiirseisundis	γ_G	1,0
Muutuvad koormused normatiivses kasutuspiirseisundis	γ_Q	1,0

Tabel 2.2 Kombinatsiooniteguri ψ väärtused [4]

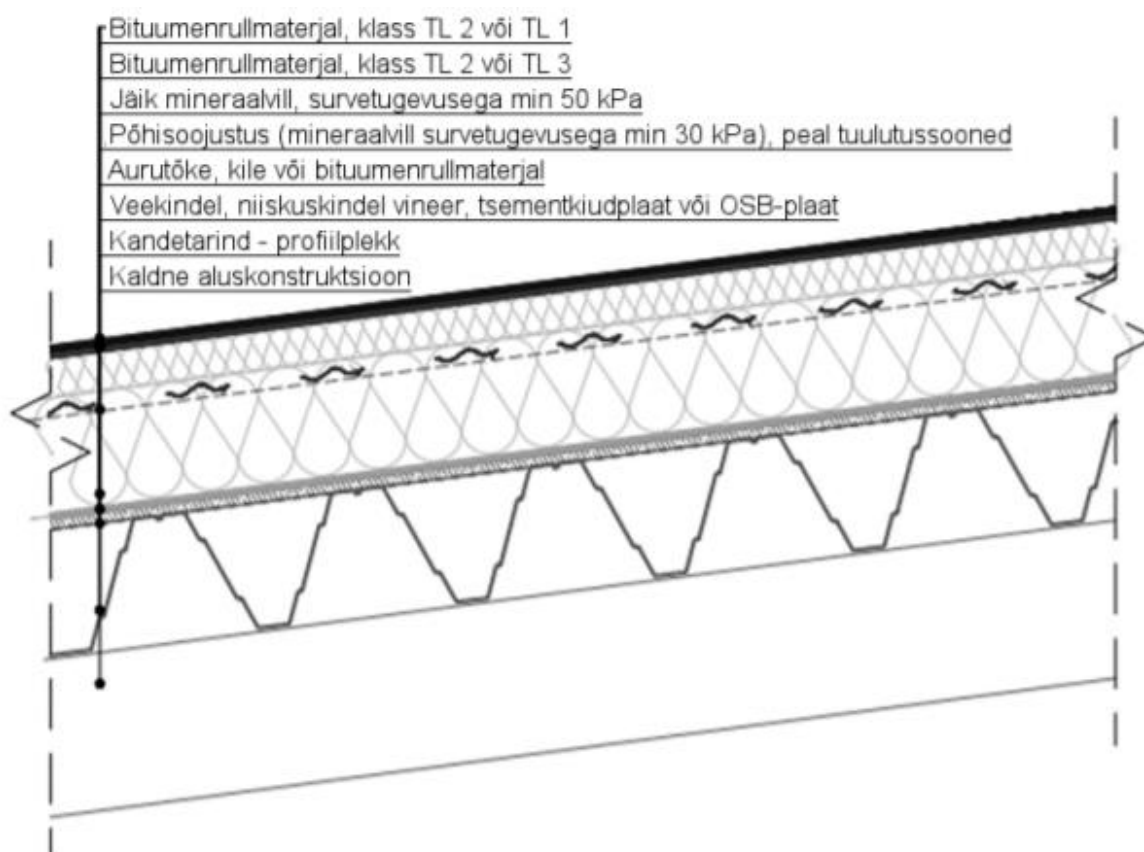
Koormuse liik	Kombinatsiooniteguri ψ_0 väärtus
Lumekoormus	0,5
Tuulekoormus	0,6

2.2 Alaliskoormused

Antud ülesandepüstituses on lähtutud kaasaegsest tüüpsest katuselahendusest. Sellest tulenevalt kuuluvad alaliskoormuste hulka katuslae enda kaal ehk omakaalu koormus, fermi ülemise vöö külge kinnitatud riputuskoormus kommunikatsioonidest (nagu näiteks ventilatsioon, jahutus või muu) ning koormus katusele paigaldatud päikesepaneelidest koos nendele vajaliku ballastiga. Nende koormustega arvestamine tagab, et lõputöös saadud tulemused on adekvaatsed ka tulevikus, sest aina levinumaks muutub päikesepaneelide kui taastuenergia tootvate elementide paigaldamine suurtele hoone pindadele. Vanemate hoonete puhul aga ei pruugi olla nende paigaldamise võimalusega hoonete projekteerimisel arvestatud.

2.2.1 Omakaalukoormused

Koormus katuslae konstruktsioonist on leitud lähtudes standardist EVS 920-5:2015 KATUSEEHITUSREEGLID Osa 5: Lamekatused lk 75 joonis A.7. Katuse kihid on nähtavad Joonis 2.1. [3]



Joonis 2.1 Bituumenrullmaterjaliga katus profiiplekist aluskonstruktsioonil [3]

Normatiivne omakaalukoormus g_k leitakse valemiga (2.3):

$$g_k = \left(\frac{B}{1000} \right) * \gamma \quad (2.3)$$

kus B – materjali paksus, mm;

γ – materjali mahukaal, kN/m³.

Katuse materjalid välispinnast loetuna on esitatud

Tabel 2.3:

Tabel 2.3 Lamekatuse materjalide loetelu.

Kihi nimetus	Kihi paksus, m	Mahukaal γ , kN/m ³	Normatiivne pinnakoormus, kN/m ²
2x SBS bituumenrullmaterjal	-	0,05	0,100
30 mm jäik mineraalvillplaat	0,03	1,25	0,038
150 mm jäik tuulutussoontega mineraalvillplaat	0,15	0,70	0,105
Aurutöke	-	-	-
20 mm jäik mineraalvillplaat	0,02	1,25	0,025
0,8 mm kandev profiilplekk T130-75L-930	-	0,10	0,100
		Kokku	0,368

Normatiivne katuslae omakaal g_{kl} :

$$g_{kl} = 0,368 \text{ kN/m}^2$$

Katuslae konstruktsioonis kasutatav profiilplekk tagab nõuetekohasel kinnitamisel koormuste jaotumise fermi ülemisele vööle ühtlase lauskoormusena. Kuna kandevprofiilplekk paigaldatakse katusele malekorras ja hoone karkass on 6 m sammuga ning töös arvutatav ferm paikneb hoone keskel, tuleb ühe fermi koormusalaks 6 m.

Normatiivne katuslae omakaal 1 fermi kohta g_{klf} , kui koormusala on 6 m:

$$g_{klf} = 0,368 * 6 = 2,21 \text{ kN/m}^2$$

Päikesepaneelide koormus

Kuna katuse pindala on piisavalt suur päikesepaneelide paigalduse võimaldamiseks ning nende paigaldamine on muutumas aina levinumaks, arvestatakse ka selle variandiga.

Lähteandmeteks on võetud *BISOL Duplex Series* paneelid massiga 20 kg (mõõtmetega 1770 x 1050 mm) ning nende aluseks *BISOL Alpine TRIANGLE* raamid [7] [8]. Nende

juurde tuleb arvestada ka vajaliku ballasti massi, mis teeb süsteemi kaaluks 0.2 kN/m^2 aluse kohta [9]. Arvestades paneelide mõõte, tuleb koormus paneelidest koos aluse ja vajaliku ballastiga ligikaudu $0,4 \text{ kN/m}^2$.

Normatiivne päikesepaneelide omakaal 1 fermi kohta g_{pvf} , kui koormusala on 6 m:

$$g_{pvf} = 0,4 * 6 = 2,40 \text{ kN/m}^2$$

Riputuskoormus

Lisaks arvestatakse katusefermidele tehnosüsteemidest ja kommunikatsioonidest põhjustatud riputuskoormus $0,3 \text{ kN/m}^2$.

Normatiivne riputuskoormus 1 fermi kohta g_{ripf} , kui koormusala on 6 m:

$$g_{ripf} = 0,3 * 6 = 1,80 \text{ kN/m}^2$$

Sellega on leitud kõik alaliskoormuste hulka kuuluvad koormused.

2.3 Muutuvkoormused

Muutuvkoormuseks loetakse koormust, mis erinevalt alaliskoormusest ei mõju kogu konstruktsiooni eluea vältel ning mille suurus võib ajas olulisel määral muutuda. Muutuvkoormustena käsitletakse üldjuhul vahelagedele mõjuvat kasuskoormust, katusele mõjuvat lumekoormust, samuti tuulekoormust ja ilmastikust sõltuvat temperatuurikoormust ning liikuvate transpordiseadmete koormust (EVS-EN 1990:2002+NA:2002) [4]. Antud töös on muutuvkoormusteks arvestatud katusele mõjuv lumekoormus ning tuulekoormus. Kasuskoormuse, liikuvate transpordiseadmete, ega temperatuurikoormuste määramist käesolevas töös käsitletud ei ole, kuna need ei mõju antud töös võrreldud konstruktsioonidele.

2.3.1 Lumekoormus

Lumekoormus loetakse mõjuvaks katuse horisontaalprojektsioonile jaotatuna vertikaalkoormusena ning selle määramisel tuleb arvestada katuse kuju ja kallet, samuti lume võimalikku paiknemist katusel standardi EVS-EN 1991-1-3:2006+NA:2006 alusel [10]. Lumekoormuse normsuurus maapinnal s_k määratakse lumekoormuse kaardilt Joonis 2.2.



Joonis 2.2 Lume normkoormus s_k maapinnal kN/m^2 [10]

Antud hoone asukohaks on valitud Tartu lähiumbrus, kus lume normkoormus maapinnal on $s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$.

Lumekoormuse normsuurus katusele määratakse valemiga (2.4)

$$s = \mu_1 * C_e * C_t * s_k \quad (2.4)$$

kus μ_1 – lumekoormuse kujutegur

C_e – avatustegur

C_t – soojustegur

s_k – lume normkoormus maapinnal, kN/m^2

Katuse lumekoormuse kujutegur sõltub katuse kujust ja see määratakse tabeli 3.4 abil vastavalt katuse kaldenurgale α . Projekteeritav hoone on lamekatusega katuse kaldenurgaga $\alpha = 1,2^\circ$. Vastavalt Tabel 2.4 on katuse, mille kaldenurk on väiksem kui 30° , lumekoormuse kujuteguri väärtuseks $\mu_1 = 0,8$. [10]

Tabel 2.4 Lumekoormuse kujutegurid (EVS-EN 1991-1-3:2006+NA:2006 Tabel 5.2) [10]

Katuse kaldenurk α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 * (60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 * (60 - \alpha)/30$	1,6	--

Vastavalt EVS-EN 1991-1-3:2006 [10] Eesti standardi rahvuslikule lisale on avatustegur $C_e = 1,0$ ja soojustegur $C_t = 1,0$.

Valemiga 3.4 leitakse katusele mõjuv normatiivne lumekoormus:

$$s = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 1,5 = 1,2 \text{ kN/m}^2$$

Kuna hoone katusele arvestatud päikesepaneelid paigaldatakse suhteliselt lauge nurga alla ning päikesepaneelide raamistik on küllalt hõre, võimaldamaks lund kuhjaval tuulel sealt vahelt läbi puhuda, ei ole vaja arvestada lumekoti tekke võimalusega.

Normatiivne lumekoormus 1 fermi kohta s_f , kui koormusala on 6 m:

$$s_f = 1,2 * 6 = 7,2 \text{ kN/m}^2$$

2.3.2 Tuulekoormus

Tuulekoormuse näol on tegemist ajas muutuva koormusega, mis mõjub rõhuna suletud piiretega ehitiste välispinnale. See koormus loetakse üldjuhul mõjuvaks risti konstruktsiooni või piirdeelemendi pinnaga ning esitatakse lihtsustatult konstruktsioonile mõjuvate jõudude kombinatsioonina, millel on ekvivalente mõju turbulentsse tuule äärmusliku jõuga. Tuulekoormuse arvestamiseks tuleb leida tippkiirusrõhk, mille kaudu arvestatakse tuulekoormust piiretele. Pinna poole suunatud rõhk ehk tuule surve loetakse positiivseks ning pinnast eemale suunatud rõhk ehk tuule

imemine negatiivseks. Tuulekoormuse leidmisel on lähtutud standardist EVS-EN 1991-1-4:2005+NA:2007 „Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus“ toodud valemite ja arvutuseeskirjadest [11].

Tuulekoormuse määramiseks konstruktsioonidele ja konstruktsioonielementidele võetakse arvesse välispindadel mõjuv tuulerõhk, mis on leitud valemiga (2.5)

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} \quad (2.5)$$

kus $q_p(z_e)$ – arvutuskõrgusele z_e vastav tippkiirusrõhk (kN/m²);

c_{pe} – välisõhu rõhutegur.

Tippkiirusrõhk on arvutatud valemiga (2.6)

$$q_p(z) = c_e(z) * q_b \quad (2.6)$$

kus c_e – ekspositsioonitegur;

q_b – keskmine tuule baaskiirusrõhk (kN/m²).

Keskmine tuule baaskiirusrõhk on arvutatud valemiga (2.7)

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 \quad (2.7)$$

kus ρ – õhu tihedus (kg/m³), $\rho = 1,25$ kg/m³

v_b – tuule baaskiirus (m/s), vastavalt rahvuslikule lisale Eestis $v_b = 21$ m/s.

Seega keskmine tuule baaskiirus vastavalt valemile (2.7):

$$q_b = \frac{1}{2} * 1,25 * 21^2 = 276 \text{ N/m}^2 = 0,276 \text{ kN/m}^2$$

Ekspositsioonitegur c_e on arvutatud valemiga (2.8)

$$c_e = c_r^2(z) * c_0^2 * [1 + 7 * I_v(z)] \quad (2.8)$$

kus c_r – maapinna karedustegur;

c_0 – pinnavormitegur = 1,0;

I_v – turbulentsi intensiivsus.

Maapinna karedustegur $c_r(z)$ arvestab sõltuvalt hoone kõrgusest maapinnast keskmise tuulekiiruse muutumist ehitise juures ning see on arvutatud valemiga (2.9)

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.9)$$

kus k_r – karedusmõõdule z_0 vastav maastikutüübi tegur;

z – kõrgus maapinnast, m;

z_0 – karedusmõõt, m.

Karedusmõõt z_0 sõltub hoone asukohast ja maastikutüübist, kuhu hoone on kavandatud ning see määratakse Tabel 2.5 abil. Käesolevas magistritöös võrreldav hoone asub maastikutüübil III, millele vastab karedusmõõt $z_0 = 0,3$ m ning minimaalne kõrgus $z_{min} = 5$ m.

Tabel 2.5. Maastikutüübid ja maastiku parameetrid (EVS-EN 1991-1-4:2005+NA:2007, Tabel 4.1). [11]

Maastikutüüp		z_0 m	z_{min} 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
II	Maastik madala taimkattega (nagu rohi) ja üksikute takistustega (puud, hooned), mille vaheline kaugus võrdub vähemalt 20-kordse kõrgusega	0,05	2
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
IV	Maastik, kus vähemalt 15 % pinnast on kaetud hoonetega, mille keskmine kõrgus ületab 15 m	1,0	10

Maastikutüübi tegur k_r on arvutatud valemiga (2.10)

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}, \quad (2.10)$$

kus z_0 – karedusmõõt, m;

$z_{0,II}$ – karedusmõõt maastikutüüp II korral, $z_{0,II} = 0,05$ m.

Maastikutüübi k_r väärtus vastavalt valemile (2.10)

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,215$$

Maastiku parameetritest ja projekteeritava hoone kõrgusest maapinnast 10 m tulenevalt on vastavalt valemile (2.9) maapinna karedustegur c_r :

$$c_r(z) = 0,215 * \ln\left(\frac{10}{0,3}\right) = 0,754$$

Turbulentsi intensiivsuseks $I_v(z)$ kõrgusel z nimetatakse turbulentsi standardhälbe ja tuulekiiruse keskväärtusega jagatist ning see on arvatud valemiga (2.11)

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.11)$$

kus σ_v – turbulentsi standardhälve, mis määratakse avaldisega $\sigma_v = k_r v_b k_1$;

$v_m(z)$ – keskmine tuulekiirus maapinnast kõrgusel z , mis määratakse avaldisega $v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b$;

k_1 – turbulentsitegur, vastavalt rahvuslikule lisale Eestis $k_1 = 1,0$;

c_0 – pinnavormitegur = 1,0;

z – kõrgus maapinnast, m;

z_0 – karedusmõõt, m.

Turbulentsi intensiivsus $I_v(z)$ vastavalt valemile (2.11):

$$I_v(z) = \frac{1,0}{1,0 * \ln\left(\frac{10}{0,3}\right)} = 0,285$$

Eelnevate arvutuste tulemusena on ekspositsiooniteguri c_e väärtus vastavalt valemile (2.8):

$$c_e = 0,754^2 * 1,0^2 * [1 + 7 * 0,285] = 1,703$$

Tippkiirusrõhk q_p vastavalt valemile (2.6)

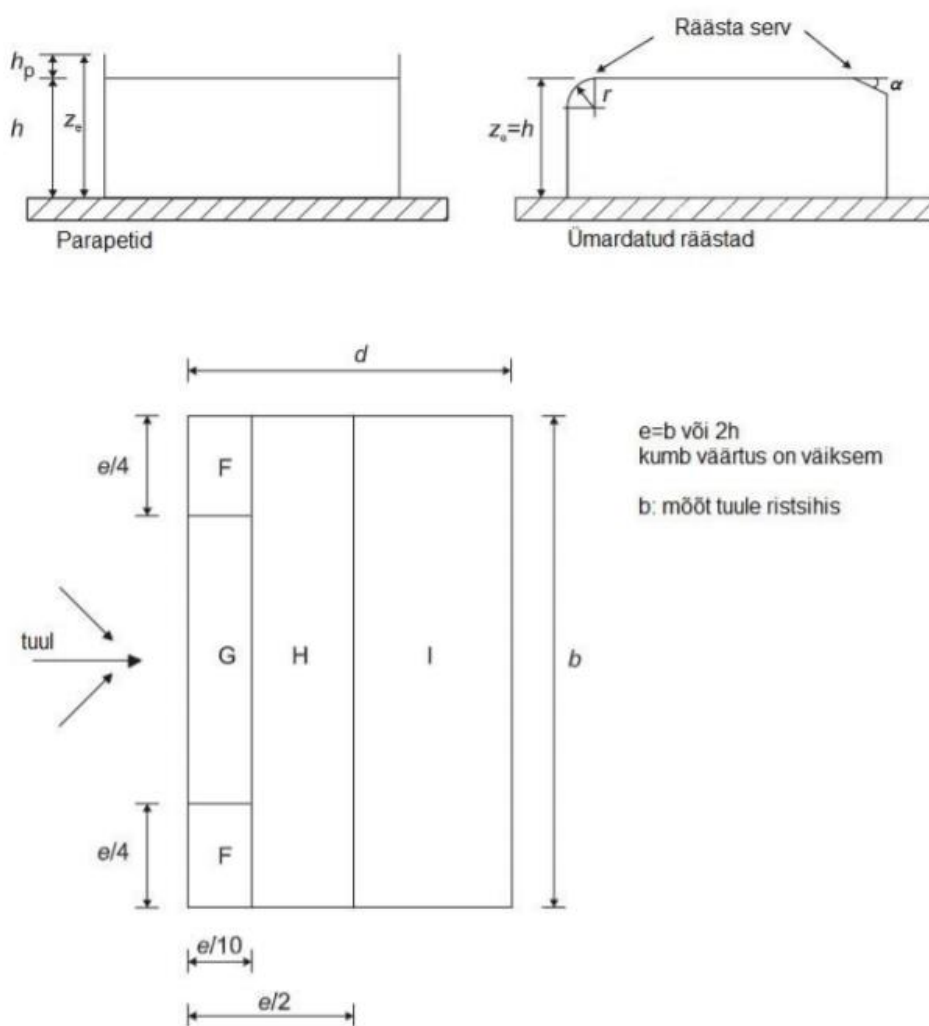
$$q_p = 1,703 * 0,276 = 0,470 \text{ kN/m}^2$$

Tuulekoormus seintele

Seintelt fermile mõjuv tuulekoormus on sõltuvalt karkassi üldisest jäikuskeemist kas tühine või olematu. Kuna antud töö metoodikas keskendutakse erinevate fermi kujude võrdlemisele, siis seda siinkohal ei arvestata.

Tuulekoormus katusele

Tuulekoormust katusele arvestatakse eri tsoonide kaupa, kusjuures tsoonide suurused sõltuvad katuse geometriast. Töös käsitletataval hoonetel on parapetiga lamekatatus. Parapeti kõrgus on 300 mm. Lamekatuse koormustsoonide suurused olenevad pikkustest e ja d , kus d on vastavalt külgseina mõõt ning e on võrdne väärtusega b (kus b on mõõt tuule sihis) või kahekordse h väärtusega (kus h on hoone kõrgus) olenevalt sellest, kumb suurus on väiksem. Mõõdud ja tähised on nähtavad Joonis 2.3.



Joonis 2.3 Lamekatuse koormustsoonid ja arvutuskõrgused [[11] joonis 7.6]

Parapetiga lamekatuse välisrõhutegurid määratakse vastavalt standardis EVS-EN 1991-1-4:2005 esitatud tabeli 7.2 suhte h_p / h põhjal (kus h_p – parapeti kõrgus ning h – hoone kõrgus parapetita) [11]. Parapetiga lamekatuse tuulerõhutegurid on toodud

Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Parapetiga lamekatuse tuulerõhutegurid [11]

Tsoon	F	G	H	I
h_p / h	c_{pe}	c_{pe}	c_{pe}	c_{pe}
0,025	-1,6	-1,1	0,7	$\pm 0,2$
0,05	-1,4	-0,9	0,7	$\pm 0,2$
0,10	-1,2	-0,8	0,7	$\pm 0,2$

Tuulekoormus katusele hoone küljelt (0°, 180°)

Hoone kõrgus parapetita $h = 10 - 0,3 = 9,7$ m

Parapeti kõrgus $h_p = 0,3$ m

Koormustsooni mõõt $e = 2 * h = 2 * 10 = 20$ m

$$e = b = 60 \text{ m}$$

Määravaks saab väiksem mõõt ehk $e = 2 * h = 2 * 10 = 20$ m.

Suhe $h_p / h = 0,3/9,7 = 0,031$

Kuna suhe h_p / h jääb tabelis kahe suuruse vahele, interpoleeritakse välisrõhutegurid, mis on toodud Tabel 2.7.

Tabel 2.7

Tsoon	F	G	H	I
h_p / h	c_{pe}	c_{pe}	c_{pe}	c_{pe}
0,031	-1,55	-1,05	-0,7	$\pm 0,2$

Välispindadele mõjuv tuulerõhk w_e erinevatele tsoonidele arvutatakse valemiga (2.5)

$$\text{Tsoon F: } w_e = 0,472 * (-1,55) = -0,732 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Tsoon G: } w_e = 0,472 * (-1,05) = -0,496 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Tsoon H: } w_e = 0,472 * (-0,7) = -0,330 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Tsoon I: } w_e = 0,472 * (\pm 0,2) = \pm 0,094 \text{ kN/m}^2$$

Tuulekoormus tsoonidele 1 fermi kohta:

$$\text{Tsoon G: } w_{ef} = -0,496 * 6 = -2,98 \text{ kN/m}^2$$

Tsoon H: $w_{ef} = -0,330 * 6 = -1,98 \text{ kN/m}^2$

Tsoon I: $w_{ef} = \pm 0,094 * 6 = \pm 0,57 \text{ kN/m}^2$

Järgnevalt on esitatud tabel 3.8 joonistest, mis kirjeldavad koormusjaotust katusele 1 m² kohta olukorras, kus tuul puhub hoone küljelt.

Tabel 2.8 Tuulekoormuse koormusjaotus katuse 1 m² kohta tuulega hoone küljelt

Sille 12 m	Sille 24 m	Sille 30 m
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 33%;"> <p>-0,732 kN/m² F</p> <p style="text-align: center;">5000</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>-0,496 -0,330 +0,094 kN/m² kN/m² kN/m²</p> <p style="text-align: center;">G H I</p> <p style="text-align: center;">2000 2000</p> <p style="text-align: center;">10000</p> <p style="text-align: center;">12000</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>-0,732 kN/m² F</p> <p style="text-align: center;">5000</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 33%;"> <p>-0,732 kN/m² F</p> <p style="text-align: center;">5000</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>-0,496 -0,330 +0,094 kN/m² kN/m² kN/m²</p> <p style="text-align: center;">G H I</p> <p style="text-align: center;">8000 14000</p> <p style="text-align: center;">2000</p> <p style="text-align: center;">24000</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>-0,732 kN/m² F</p> <p style="text-align: center;">5000</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 33%;"> <p>-0,732 kN/m² F</p> <p style="text-align: center;">5000</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>-0,496 -0,330 +0,094 kN/m² kN/m² kN/m²</p> <p style="text-align: center;">G H I</p> <p style="text-align: center;">8000 20000</p> <p style="text-align: center;">2000</p> <p style="text-align: center;">30000</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>-0,732 kN/m² F</p> <p style="text-align: center;">5000</p> </div> </div>

Tuulekoormus katusele hoone otsast (90°)

Kõigepealt määratakse koormustsooni suurused.

Koormustsooni mõõt $e = 2 * h = 2 * 10 = 20 \text{ m}$

$b_1 = 12 \text{ m} < 2 * h = 20 \text{ m} \rightarrow e = 12 \text{ m}$

$$b_2 = 24 \text{ m} > 2 * h = 20 \text{ m} \rightarrow e = 20 \text{ m}$$

$$b_3 = 30 \text{ m} > 2 * h = 20 \text{ m} \rightarrow e = 20 \text{ m}$$

Tabel 2.9 Tsooni pikkuse määramine vastavalt hoone sildele

Hoone pikkus d	60 m	60 m	60 m
Silde pikkus b	12 m	24 m	30 m
Hoone kõrgus h	10 m	10 m	10 m
Koormustsooni mõõt $e = b$	12 m	24 m	30 m
Koormustsooni mõõt $e = 2 * h$	20 m	20 m	20 m
Tsooni määramine h_p/h	0,031	0,031	0,031

Koormustsoonide puhul saab sildel 12 m määravaks mõõt $e = b = 12 \text{ m}$ ja sillete 24 m ja 30 m puhul $e = 2 * h = 20 \text{ m}$.

Seejärel määratakse välisrõhutegureid määravad suurused.

Hoone kõrgus parapetita $h = 10 - 0,3 = 9,7 \text{ m}$

Parapeti kõrgus $h_p = 0,3 \text{ m}$

Suhe $h_p / h = 0,3/9,7 = 0,031$

Kuna suhe h_p / h jääb tabelis kahe suuruse vahele, interpoleeritakse välisrõhutegurid, mis on toodud Tabel 2.10.

Tabel 2.10

Tsoon	F	G	H	I
h/d	c_{pe}	c_{pe}	c_{pe}	c_{pe}
0,031	-1,55	-1,05	-0,7	$\pm 0,2$

Välispindadele mõjuv tuulerõhk w_e erinevatele tsoonidele arvutatakse valemiga (2.5)

Tsoon F: $w_e = 0,472 * (-1,55) = -0,732 \text{ kN/m}^2$

Tsoon G: $w_e = 0,472 * (-1,05) = -0,496 \text{ kN/m}^2$

Tsoon H: $w_e = 0,472 * (-0,7) = -0,330 \text{ kN/m}^2$

Tsoon I: $w_e = 0,472 * (\pm 0,2) = \pm 0,094 \text{ kN/m}^2$

Tuulekoormus tsoonidele 1 fermi kohta:

Tsoon G: $w_{ef} = -0,496 * 6 = -2,98 \text{ kN/m}^2$

Tsoon H: $w_{ef} = -0,330 * 6 = -1,98 \text{ kN/m}^2$

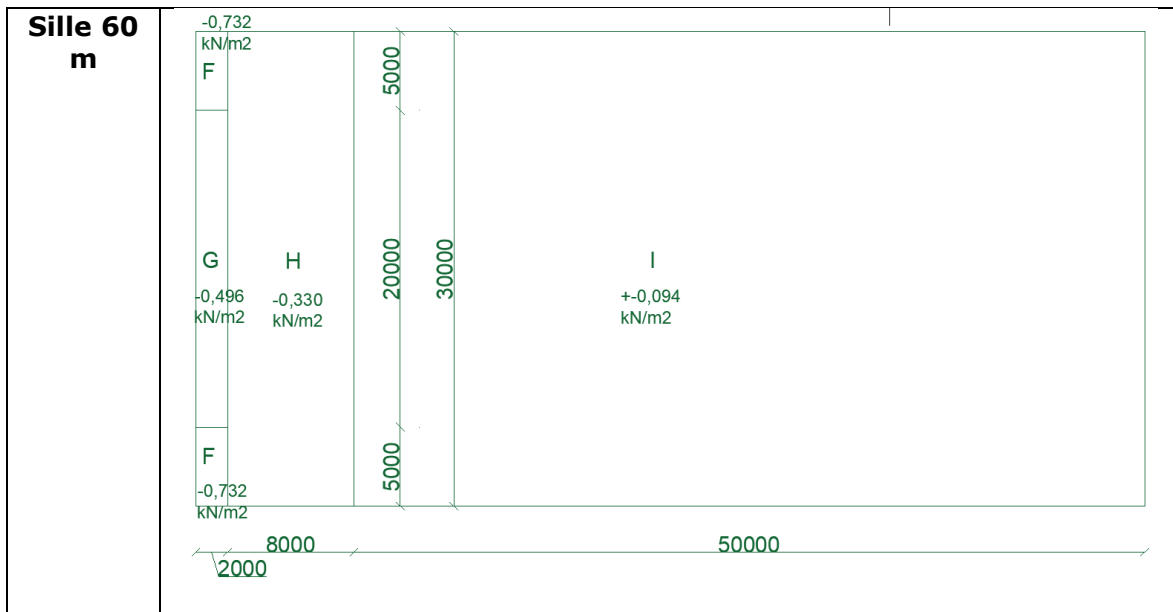
Tsoon I: $w_{ef} = \pm 0,094 * 6 = \pm 0,57 \text{ kN/m}^2$

Kuna arvutatav ferm paikneb kõikidel juhtudel 60 m pikkuse hoones keskel ning koormustsoonide pikkused on selle tuule suuna puhul samad, lihtsustub veidi tuule koormuse arvestamine.

Järgnevalt on esitatud tabel 3.11 joonistest, mis kirjeldavad koormusjaotust katusele 1 m² kohta olukorras, kus tuul puhub hoone otsast.

Tabel 2.11 Tuulekoormuse koormusjaotus katuse 1 m² kohta tuulega hoone küljelt

<p>Sille 12 m</p>	
<p>Sille 24 m</p>	



2.4 Koormuskombinatsioonid

Koormuskombinatsioone kasutatakse konstruktsiooni kandevõime kontrollimiseks erinevate koormusolukordade puhul. Seejuures eristatakse kandepiirseisundi, kasutuspiirseisundi ja tulekahjuolukorra koormuskombinatsioone. Koormuskombinatsioonide kaudu leitakse kontrollitavale konstruktsioonile ebasoodsaim koormusolukord, see tähendab olukord, kus konstruktsioonile mõjuvad sisejõud on suurimad. Seejärel kasutatakse selle kaudu leitud sisejõude konstruktsiooni dimensioneerimiseks. Suurimate sisejõududega kombinatsioonidest saab leida ka konstruktsiooni suurimad läbipained.

2.4.1 Kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid

Koormuskombinatsioonide puhul arvestatakse vaid suurimaid sisejõude tekitavaid kombinatsioone. Kombinatsioone, nagu näiteks tõstev tuul koos lumekoormusega ei

arvestata, sest selliselt mõjuvad jõud hakkavad teineteist tasakaalustama. Järgnevalt on esitatud arvutusele tulnud kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid.

1. ULS:

$$\gamma_{G,sup} * (omakaal + riputus + päikesepaneelid)$$

2. ULS:

$$\gamma_{G,sup} * (omakaal + riputus + päikesepaneelid) + \gamma_Q * (lumi + \varphi_{0,tuul} * tuul_{suruv})$$

3. ULS:

$$\gamma_{G,sup} * (omakaal + riputus + päikesepaneelid) + \gamma_Q * (\varphi_{0,lumi} * lumi + tuul_{suruv})$$

4. ULS:

$$\gamma_{G,inf} * (omakaal) + \gamma_Q * (tuul_{tõstev})$$

2.4.2 Kasutuspiirseisundi koormuskombinatsioonid

Kasutuspiirseisundi puhul arvestatakse kombinatsioone, mis tekitavad suurimaid sisejõude. Kombinatsioone, nagu näiteks domineeriv suruv tuulekoormus, ei arvestata, sest selle suurus jääb väiksemaks võrreldavast domineerivast lumekoormusest ning sellest tulenevalt ei ole selle eraldi kontrollimine vajalik.

1. SLS:

$$(omakaal + riputus + päikesepaneelid)$$

2. SLS:

$$(omakaal + riputus + päikesepaneelid) + (\varphi_{1,lumi} * lumi + \varphi_{2,tuul} * tuul_{suruv})$$

3. SLS:

$$(omakaal) + (\varphi_{1,tuul} * tuul_{tõstev})$$

2.4.3 Tulekahjuolukorra koormuskombinatsioon

Tulekahjuolukorra koormuskombinatsioonis arvestatakse muutuvkoormusena vaid lumekoormust, sest on selge, et selle tekitatud jõud on suuremad, kui tuulekoormuse tekitatud võimalikud sisejõud.

1. FIRE: $(omakaal) + (\varphi_{1,lumi} * lumi)$

3 KATUSEKANDJATE DIMENSIONEERIMINE

3.1 Konstruktsiooni kirjeldus

Sõrestiku konstrueerimisel on arvesse võetud mitmeid faktoreid. Algandmeteks oli kõikide fermide puhul varraste ja vööde tsentrid kujutavate joonskeemid. Sõltuvalt sildest ulatuvad ülemine ja alumine vöö üle äärmiste diagonaalide otsade kas 100 või 150 mm pikkuselt, vastavalt siis 12 m sildega fermidel ning 24 ja 30 m sildega fermidel. Suurematel silletel on üle ulatuv osa suurem sõrestike varraste suuremate ristlõigete tõttu. See tagab dimensioneerimisel, et kasutatavate ristlõigete puhul saavad vardad kinnituda vööde peale, mis omakorda lihtsustab *Autodesk Robot Structural Analysis* programmiga sõlmede arvutust. Seejuures on arvestatud, et fermi ülemise vöö ja äärmiste diagonaalide juurde paigaldatakse ka toepostid, mis antud magistritöös on arvestatud 150 mm pikkuseks. See võimaldab ferme postide peale toetuma panna. Fermide puhul on arvutuskeemis liigendid arvestatud kõikide vöovarraste mõlemasse otsa. Kui sõrestiku sille on suurem kui 30 m, on vajalik arvestada liigend ka fermi keskele, seda nii ülemise kui alumise vöö puhul.

Antud peatükis esitatakse arvutused ühe fermi enimkoormatud varraste kohta. Selleks fermiks on 24 m sildega tõmmatud diagonaalidega ja postidega ferm.

3.2 Fermile mõjuvad koormused

Võrguvarraste osas esitatakse magistritöös fermi ülemise vöö, alumise vöö, enimkoormatud diagonaali ja enimkoormatud posti kandevõime kontroll. Sellise kandeskeemiga terassõrestiku puhul on postid surutud ning diagonaalid tõmmatud. Maksimaalsed sisejõud tekkisid fermides domineeriva lumekoormusega kombinatsiooni ehk 2. *ULS* kombinatsiooni korral.

Fermi vardas mõjuv paindemoment lõigu keskel: $M_{Ed.s} = 7,66 \text{ kN} * m$

Fermi vardas mõjuv paindemoment lõigu äärtes: $M_{Ed.1} = -16,88 \text{ kN} * m$

$$M_{Ed.2} = -10,75 \text{ kN} * m$$

Fermi vardas mõjuv maksimaalne pikijõud: $N_{Ed} = 461,20 \text{ kN}$

Fermi vardas mõjuv maksimaalne põikjõud: $V_{Ed} = 34,06 \text{ kN}$

3.2.1 Ülemise vöö kandevõime kontroll

Ristlõike parameetrid

Ristlõikeks on valitud 150x150x5 nelikanttoru. [1]

Ristlõike pindala	$A = 2836 \text{ mm}^2$
Ristlõike laius	$b = 150 \text{ mm}$
Ristlõike kõrgus	$h = 150 \text{ mm}$
Ristlõike seinapaksus	$t = 5 \text{ mm}$
Ristlõike raadius	$r = 10 \text{ mm}$
Vastupanumoment y-telje ümber	$W_{pl} = 153,0 \text{ cm}^3$
Inertsiraadius	$i = 58,9 \text{ mm}$

Vastavalt EVS-EN 1993-1-1 lisa BB võetakse sõrestiku tasapinnas geomeetriliseks pikkuseks sõlmede vahekaugus ja nõtketeguriks 0,9. Varda pikkus $L=3001 \text{ mm}$.

$$L_{cr} = 0,9 * L = 0,9 * 3001 = 2700,9 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Ristlõikeklassi kontroll

Ristlõikeklassi määramine on vajalik veendumiseks, et arvutuspõhimõtteid võib antud ristlõigete puhul rakendada. Ristlõikeklass sõltub ristlõike geomeetriast ja materjali voolavuspiirist. Varda puhul määratakse eraldi surutud ja painutatud ristlõikeklassid.

Tugevusklassi mõju arvestav tegur ε arvutatakse järgnevalt:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814 \quad (3.2)$$

kus f_y – on tugevusklassiga S355 terase voolavuspiir $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Varda painutatud seinaristlõikeklassi määramine:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{150 - 3 * 5}{5} = 27 < 72\varepsilon = 58,58 \quad (3.3)$$

Sellest selgub, et varda painutatud seinaristlõike klass on 1.

Varda surutud seina ristlõikeklassi määramine:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{150 - 3 * 5}{5} = 27 > 33\varepsilon = 26,85 \quad (3.4)$$

Sellest selgub, et varda surutud seina ristlõikeklass ei ole 1.

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{150 - 3 * 5}{5} = 27 > 38\varepsilon = 30,92 \quad (3.5)$$

Sellest selgub, et varda surutud seina ristlõikeklass on 2, millest jäeldub, et kogu profiili ristlõikeklass on 2.

Varda kandevõimeurve ja painde koosmõjul

Ülemise vöö puhul kontrollitakse nõtkumist vaid y-telje sihis, sest z-telje sihis hoiab nõtkumise ära nõuetekohaselt kinnitatud profiilplekk. Kõigepealt teostataksegi stabiilsuskontroll:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rd}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.6)$$

kus $N_{Ed}, M_{y,Ed}$ – y-y telje suhtes mõjuv maksimaalne survejõud ja maksimaalne paindemoment (kN) (kNm);

N_{Rd} – arvutuslik normaaljõukandevõime (kN);

$M_{y,Rd}$ – arvutuslik paindekandevõime y-y telje suhtes (kNm);

k_{yy} – koosmõjutegur;

χ_y – nõtketegur paindenõtkel.

Ristlõike arvutuslik survekandevõime:

$$N_{Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.7)$$

kus A – ristlõike pindala, (mm²);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm²);

γ_{M1} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M1} = 1,0$.

Sellest tulenevalt on ristlõike arvutuslik survekandevõime vastavalt valemile (4.7):

$$N_{Rd} = \frac{28,36 * 10^2 * 355}{1,0} = 1006,8 \text{ kN}$$

Ristlõike arvutuslik paindekandevõime:

$$M_{ply,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.8)$$

kus W_{ply} – ristlõike plastne vastupanumoment, (mm^3);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm^2);

γ_{M0} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M0} = 1,0$.

Sellest tulenevalt on ristlõike arvutuslik paindekandevõime vastavalt valemile (4.8):

$$M_{ply,Rd} = \frac{153,0 * 10^3 * 355}{1,0} = 54,3 \text{ kN}$$

Surutud varda tingsaledusele $\bar{\lambda}$ vastav nõtketegur χ on arvatud valemiga

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (3.9)$$

kus ϕ – nõtketeguri χ leidmiseks vajalik abisuurus;

$\bar{\lambda}$ – varda tingsaledus.

Arvutuseks vajalik abisuurus ϕ on leitud valemiga

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (3.10)$$

kus α – nõtkekõverale vastav hälbetegur. Külmpainutatud toruprofiili nõtkekõver terase tugevusklassi S355 korral on „c“ ning sellele vastav hälbetegur on $\alpha = 0,49$;

$\bar{\lambda}$ – varda tingsaledus.

Varda tingsaledus $\bar{\lambda}$ on leitud valemiga

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{\pi * i} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (3.11)$$

kus L_{cr} – nõtkepikkus vaadeldavas tasapinnas, (mm);

i – brutoristlõike inertsiraadius arvatava telje suhtes (mm);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm²);

E – terase elastsusmoodul, $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$

Valemitest (3.9), (3.10) ja (3.11) tulenevalt on vajalikud leitavad suurused järgmised:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{2700,9}{\pi * 58,9} \sqrt{\frac{355}{210000}} = 0,6$$

$$\varphi = 0,5[1 + 0,49(0,6 - 0,2) + 0,6^2] = 0,778$$

Nõtketegur on sellest tulenevalt:

$$\chi = \frac{1}{0,778 + \sqrt{0,778^2 - 0,6^2}} = 0,785 \leq 1,0$$

Koosmõjutegur k_{yy} on leitud vastavalt valemile

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rd}} \right] \leq C_{my} \left(1 + 0,8 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rd}} \right) \quad (3.12)$$

kus C_{my} – ekvivalentse konstantse momendi tegur;

$\bar{\lambda}$ – varda tingsaledus;

N_{Ed} – vardale mõjuv maksimaalne survejõud (kN);

χ_y – nõtketegur paindenõtkel;

N_{Rd} – arvutuslik normaaljõukandevõime (kN);

Ekvivalentse konstantse momendi tegur on leitud vastavalt valemile

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 * \alpha_s \geq 0,4 \quad (3.13)$$

kus abisuurus α_s leitakse

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} \quad (3.14)$$

kus M_s – paindemoment tala keskosas;

M_h – paindemoment tala otsas.

Järgnevalt leitakse vajalikud suurused vastavalt valemitele (4.12), (4.13), (4.14):

$$\alpha_s = \frac{7,66}{-10,75} = -0,71$$

Järelikult on vastavalt EVS-EN 1993-1-1 tabelile B.3 tuleb ekvivalentse konstantse momendi suuruseks

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 * (-0,71) = 0,668 \geq 0,4$$

Sellele järgnevalt on võimalik leida koosmõjutegur k_{yy} valemi (4.14) järgi:

$$\begin{aligned} k_{yy} &= 1,568 \left[1 + (0,6 - 0,2) * \frac{461,20}{0,785 * 1006,8} \right] = 0,827 \leq \\ &\leq C_{my} \left(1 + 0,8 * \frac{461,20}{0,785 * 1006,8} \right) = 0,983 \end{aligned}$$

Järelikult arvestatakse $k_{yy} = 0,827$.

Varda stabiilsustingimused vastavalt valemile (4.6) on sellisel juhul:

$$\frac{461,20}{0,785 * 1006,8} + 0,827 * \frac{16,88}{54,3} = 0,841 \leq 1,0$$

Selle tingimuse täitmisel on varda stabiilsus surve ja painde koosmõjul tagatud.

Ristlõike plastse põikjõukandevõime kontroll

Arvutuslik põikjõud peab rahuldama tingimust

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad (3.15)$$

kus V_{Ed} – vardas mõjuv arvutuslik põikjõud (kN);

$V_{pl,Rd}$ – ristlõike plastne põikjõukandevõime (kN).

Ristlõike plastne põikjõukandevõime on arvatud valemiga

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (3.16)$$

kus A_v – ristlõike lõikepindala (mm^2);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm^2);

γ_{M0} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M0} = 1,0$.

Ristlõikepindala konstantse seinapaksusega nelikanttorul, kui koormus mõjub kõrguse sihis, on arvatud valemiga

$$A_v = \frac{A}{2} \quad (3.17)$$

kus A – ristlõike pindala (mm^2).

Põikjõukandevõime arvutus toimub valemitega (4.17) ja (4.16):

$$A_v = \frac{2836}{2} = 1418 \text{ mm}^2$$
$$V_{pl,Rd} = \frac{1418 \cdot \frac{355}{\sqrt{3}}}{1,0} = 290,63 \geq V_{Ed} = 34,06 \text{ kN}$$

Millest lähtuvalt on kandevõime tagatud.

Varda seina nihkestabiilsuse kontroll

Põikjõu mõjul võib õhuke sein välja mõlkuda. Selle vältimiseks peab olema järgnev täidetud tingimus

$$\frac{h_w}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon \quad (3.18)$$

kus h_w – ristlõike seina kõrgus, mis leitakse valemiga $h_w = h - (2t_f + r)$

t_w – ristlõike seinapaksus

η – tugevusklassiga S355 terase voolavuspiirile $f_y = 355 \text{ N}/\text{mm}^2$ vastav tegur, $\eta = 1,2$, kui $f_y \leq 460 \text{ N}/\text{mm}^2$.

ε – tegur, mis arvutatakse vastavalt valemile (3.2)

Tingimuse (4.18) kontroll:

$$\frac{150}{5} = 27 < \frac{72}{1,2} \cdot 0,813 = 48,82$$

Järelikult ei ole tala nihkestabiilsust tarvilik kontrollida.

3.2.2 Alumise vöö kandevõime kontroll

Ristlõike parameetrid

Ristlõikeks on valitud 90x90x4 nelikanttoru. [1]

Ristlõike pindala	$A = 1335 \text{ mm}^2$
Ristlõike laius	$b = 90 \text{ mm}$
Ristlõike kõrgus	$h = 90 \text{ mm}$
Ristlõike seina paksus	$t = 4 \text{ mm}$
Ristlõike raadius	$r = 8 \text{ mm}$
Vastupanumoment y-telje ümber	$W_{pl} = 42,58 \text{ cm}^3$
Inertsiraadius	$i = 34,8 \text{ mm}$

Fermis mõjuvad jõud

Fermi vardas mõjuv paindemoment lõigu keskel: $M_{Ed} = 0,46 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Fermi vardas mõjuv maksimaalne pikijõud: $N_{Ed} = -442,47 \text{ kN}$

Terasfermi alumise vöö kandevõimes veendumiseks kontrollitakse paindemomendi ja tõmbejõu koosmõju. Vahel võib domineeriva tõstva tuule korral alumine vöö survesse minna ning sellest tulenevalt olla vajalik lisakontroll nõtkekandevõimele – antud magistriöös seda juhtumit ei esinenud ning sellest tulenevalt ei tehta ka seda kontrolli.

Ristlõikeklassi kontroll

Ristlõikeklassi määramine on vajalik veendumiseks, et arvutuspõhimõtteid võib antud ristlõigete puhul rakendada. Ristlõikeklass sõltub ristlõike geomeetriast ja materjali voolavuspiirist. Varda puhul määratakse eraldi surutud ja painutatud ristlõikeklassid.

Tugevusklassi mõju arvestav tegur ε arvutatakse järgnevalt:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814 \quad (3.2)$$

kus f_y – on tugevusklassiga S355 terase voolavuspiir $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Varda painutatud seina ristlõikeklassi määramine:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{90 - 4 * 5}{4} = 19,5 < 72\varepsilon = 58,58 \quad (3.3)$$

Varda surutud seina ristlõikeklassi määramine:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{90 - 4 * 5}{4} = 19,5 < 33\varepsilon = 26,85 \quad (3.4)$$

Kogu profiili ristlõikeklass on 1.

Kandevõime kontroll

Kuna ristlõikes mõjub pikijõud (tõmme) koos paindemomendiga, tuleb kontrollida vöö kandevõimet tõmbele ning tõmbe ja pikijõu koosmõjule.

Tõmmatud ristlõike kandevõime peab vastama tingimusele:

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} \quad (3.19)$$

kus $N_{pl,Rd}$ – ristlõike arvutuslik paindekandevõime;

Tõmmatud varda kandevõime:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.20)$$

kus A – ristlõike pindala, (mm^2);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm²);

γ_{M0} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M0} = 1,0$.

Lähtuvalt valemist (4.20) on ristlõike kandevõime

$$N_{pl,Rd} = \frac{13,35 * 10^2 * 355}{1,0} = 473,93 \text{ kN}$$

See vastab tingimusele (4.19), kus

$$N_{Ed} = 442,47 \leq N_{pl,Rd} = 473,93$$

Mis tähendab, et kandevõime on tagatud.

Varda kandevõime pikijõu ja paindemomendi koosmõjul

Pikijõu ja paindemomendi koosmõju ei pea arvestama, kui ristlõikes mõjuvad jõud vastavad järgmistele tingimustele:

$$N_{Ed} \leq 0,25 * N_{pl,Rd} \quad (3.21)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 * h * t * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.22)$$

kus $N_{pl,Rd}$ – ristlõike arvutuslik paindekandevõime;

h – ristlõike kõrgus, (mm);

t – ristlõike seina paksus, (mm);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm²).

Järgnevalt kontrollitakse nendele tingimustele vastamist. Tingimuste (4.21) ja (4.22) osas

$$442,47 > 0,25 * 473,93 = 118,48$$

$$442,47 > \frac{0,5 * 90 * 4 * 355}{1,0} = 63,9$$

Fermi alumine vöö ei vasta nendele tingimustele ning seetõttu tuleb painde- ja pikijõu mõju koos arvestada.

Koosmõju puhul peab kandevõime ristlõikeklassis 1 tingimusele (4.23):

$$M_{N,y,Rd} \geq M_{Ed} \quad (3.23)$$

kus $M_{N,y,Rd}$ – ristlõike arvutuslik paindekandevõime, kus on arvestatud pikijõu N_{Ed} vähendavat mõju.

Kandevõimes veendumiseks arvutatakse ristlõike arvutuslik paindekandevõime vastavalt valemile (3.8):

$$M_{ply,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.8)$$

kus W_{ply} – ristlõike plastne vastupanumoment, (mm³);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm²);

γ_{M0} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M0} = 1,0$.

Arvutatakse abisuurused:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (3.24)$$

$$a_w = \frac{A - 2 * b * t}{A} \quad (3.25)$$

Misjärel arvutatakse vähendatud paindekandevõime:

$$M_{N,y,Rd} = M_{ply,Rd} * \frac{1 - n}{1 - 0,5 * a_w} \quad (3.26)$$

Abisuurused n ja a_w on vastavalt valemitele (3.24) ja (3.25)

$$n = \frac{442,47}{473,93} = 0,934$$

$$a_w = \frac{13,35 * 10^2 - 2 * 90 * 4}{1335} = 0,461$$

Sellest tulenevalt on arvutuslik paindekandevõime valemi (3.8) järgi:

$$M_{ply,Rd} = \frac{42,58 * 10^3 * 355}{1,0} = 15,12$$

Vähendatud paindekandevõime on valemi (4.26) järgi:

$$M_{N,y,Rd} = 15,12 * \frac{1 - 0,934}{1 - 0,5 * 0,461} = 1,30 \text{ kN} * \text{m}$$

Nendest arvutustest tulenevalt on alumise vöö kandevõime tagatud, sest see vastab ka tingimusele (4.23)

$$M_{N,y,Rd} = 1,30 \geq M_{Ed} = 0,46$$

3.2.3 Võrguvarda V-03 kandevõime kontroll

Näidisenä lahendatakse läbi varras V-03 pikkusega $L=4040$ mm. Vardas mõjub tõmbejõud $N_{Ed} = 298,41$ kN. Varda ristlõikeks on ruutristlõige 60x60x4.

Ristlõikeks on valitud 60x60x4 nelikanttoru. [1]

Ristlõike pindala	$A = 855 \text{ mm}^2$
Ristlõike laius	$b = 60 \text{ mm}$
Ristlõike kõrgus	$h = 60 \text{ mm}$
Ristlõike seina paksus	$t = 4 \text{ mm}$
Ristlõike raadius	$r = 8 \text{ mm}$
Vastupanumoment y-telje ümber	$W_{pl} = 17,64 \text{ cm}^3$
Inertsiraadius	$i = 2,26 \text{ mm}$

Ristlõikeklassi kontroll ei ole tõmmatud elemendi puhul vajalik.

Tõmmatud ristlõike kandevõime peab vastama tingimusele:

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} \tag{4.19}$$

kus $N_{pl,Rd}$ – ristlõike arvutuslik paindekandevõime;

Tõmmatud varda kandevõime leitakse valemiga (4.46):

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \tag{4.20}$$

kus A – ristlõike pindala, (mm^2);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm^2);

γ_{M0} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M0} = 1,0$.

Valemist (4.46) lähtuvalt on varda V-03 kandevõime

$$N_{pl,Rd} = \frac{8,55 * 10^2 * 355}{1,0} = 303,53 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 298,41 \text{ kN}$$

Sellest lähtuvalt saab väita, et diagonaali kandevõime on tagatud.

3.2.4 Võrguvarda V-13 kandevõime kontroll

Näidisenä lahendatakse läbi varras V-13 pikkusega $L=2780$ mm. Vardas mõjub survejõud $N_{Ed} = 199,49 \text{ kN}$. Kontrollima varda surve- ja nõtkekandevõimet. Varda ristlõikeks on ruustristlõige $90 \times 90 \times 4$.

Ristlõikeks on valitud $90 \times 90 \times 4$ nelikanttoru. [1]

Ristlõike pindala	$A = 1335 \text{ mm}^2$
Ristlõike laius	$b = 90 \text{ mm}$
Ristlõike kõrgus	$h = 90 \text{ mm}$
Ristlõike seina paksus	$t = 4 \text{ mm}$
Ristlõike raadius	$r = 8 \text{ mm}$
Vastupanumoment y-telje ümber	$W_{pl} = 42,58 \text{ cm}^3$
Inertsiraadius	$i = 34,8 \text{ mm}$

Ristlõikeklassi määramine on vajalik veendumiseks, et arvutuspõhimõtteid võib antud ristlõigete puhul rakendada. Ristlõikeklass sõltub ristlõike geometriast ja materjali voolavuspiirist. Varda puhul määratakse eraldi surutud ja painutatud ristlõikeklassid.

Tugevusklassi mõju arvestav tegur ε arvutatakse järgnevalt:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814 \quad (3.2)$$

kus f_y – on tugevusklassiga S355 terase voolavuspiir $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Varda painutatud seina ristlõikeklassi määramine:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{90 - 4 * 5}{4} = 19,5 < 72\varepsilon = 58,58 \quad (3.3)$$

Varda surutud seina ristlõikeklassi määramine:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 3 * t}{t} = \frac{90 - 4 * 5}{4} = 19,5 < 33\varepsilon = 26,85 \quad (3.4)$$

Kogu profiili ristlõikeklass on 1.

Varda nõtkekandevõime

Tsentriselt surutud varda nõtkekandevõime peab vastama tingimusele (4.27) [5]:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (3.27)$$

kus $N_{b,Rd}$ – ristlõike arvutuslik paindekandevõime.

Ristlõike arvutuslik paindekandevõime $N_{b,Rd}$ arvutatakse ristlõikeklass 1 puhul valemiga (4.28) [5]

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.28)$$

kus χ – nõtketegur;

A – ristlõike pindala, (mm^2);

f_y – terase voolavuspiir, (N/mm^2);

γ_{M1} – materjali osavarutegur, $\gamma_{M1} = 1,0$.

Antud varda puhul arvutatakse nõtkekandevõimet nii y-telje kui ka z-telje suunas.

Y-telje sihilisel nõtkumisel on kriitiline pikkus, kui varda pikkus $L = 2780 \text{ mm}$ ja nõtketegur $\mu = 1,0$:

$$L_{cr,y} = 0,9 * L = 0,9 * 2780 = 2502 \text{ mm}$$

Z-telje sihilisel nõtkumisel on kriitiline pikkus, kui varda pikkus $L = 2780 \text{ mm}$ ja nõtketegur $\mu = 1,0$:

$$L_{cr,z} = 1,0 * L = 1,0 * 2780 = 2780 \text{ mm}$$

Nõtketeguri leidmiseks vajalik abisuurus ϕ arvutatakse valemiga (3.10) ja tingsaledus valemiga (3.11):

$$\bar{\lambda}_y = \frac{2502}{\pi * 34,8} \sqrt{\frac{355}{210000}} = 0,941$$

$$\varphi_y = 0,5[1 + 0,49(0,941 - 0,2) + 0,941^2] = 1,124$$

Y- telje väärtused üleval, all z-telje väärtused.

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2780}{\pi * 34,8} \sqrt{\frac{355}{210000}} = 1,045$$

$$\varphi_z = 0,5[1 + 0,49(1,045 - 0,2) + 1,045^2] = 1,254$$

Nõtketegur leitakse vastavalt valemile (3.9):

$$\chi_y = \frac{1}{1,124 + \sqrt{1,124^2 - 0,941^2}} = 0,575 \leq 1,0$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,254 + \sqrt{1,254^2 - 1,045^2}} = 0,514 \leq 1,0$$

Sellest tulenevalt on varda arvutuslik kandevõime vastavalt valemile (3.29)

$$N_{b,Rd} = \frac{0,514 * 13,35 * 10^2 * 355}{1,0} = 243,60 \text{ kN} > N_{Ed} = 199,49 \text{ kN}$$

Sellega on tingimus (3.30) täidetud ning varda kandevõime tagatud.

3.2.5 Terasfermide läbipainete arvutus

Terasfermi vertikaalsete läbipainete arvutused on tehtud programmiga *Robot Autodesk Structural Analysis Professional 2017*. Läbipainete maksimaalseks lubatud väärtuseks on arvestatud standardi EVS-EN 1993-1-1 järgi valemiga (4.29) [4]:

$$w_{max} = \frac{L}{200} \quad (4.29)$$

kus w_{max} – maksimaalne lubatud läbipaine

L – fermi sille

Sellest tulenevalt on arvutatud sillete puhul lubatud läbipainete suurused esitatud tabelis (4.1):

Tabel 3.1 Lubatud maksimaalsed läbipaanded erinevatel silletel

Sille	Lubatud läbipaine
12 m	$w_{max} = \frac{L}{200} = \frac{12000}{200} = 60 \text{ mm}$
24 m	$w_{max} = \frac{L}{200} = \frac{24000}{200} = 120 \text{ mm}$
30 m	$w_{max} = \frac{L}{200} = \frac{30000}{200} = 150 \text{ mm}$

Järgnevalt on tabelis (4.2) esitatud fermidel esinenud läbipaanded:

Tabel 3.2 Läbipaanded eri silletel

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Läbipaine (cm)	Max lubatud läbipaine (cm)
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	12	3,9	6
	l/10		4,8	
	l/12		5,4	
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	12	3	6
	l/10		3,8	
	l/12		4,5	
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	12	3,7	6
	l/10		4,7	
	l/12		5,9	
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	24 (3 moodulit)	9,1	12
	l/10		10	
	l/12		11,2	
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	24 (3 moodulit)	7,4	12
	l/10		7,6	
	l/12		9,5	

Tabel 4.2 jätk

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Läbipaine (cm)	Max lubatud läbipaine (cm)
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	24 (5 moodulit)	7,6	12
	l/10		9,5	
	l/12		11,7	
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	24 (5 moodulit)	6,8	12
	l/10		8,3	
	l/12		10,2	
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	24	7,9	12
	l/10		10,1	
	l/12		11,7	
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	30	9,7	15
	l/10		12	
	l/12		13,1	
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	30	8,2	15
	l/10		11	
	l/12		12,4	
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	30	9,6	15
	l/10		12	
	l/12		14,3	

Sellest on näha, et kõikide fermide läbipained vastavad nõuetele.

4 TULEMUSTE ANALÜÜS

Antud töö eesmärgiks oli võrrelda erinevate sillete puhul eri kujuga terasferme kolmel erineval fermi kõrgusel. Võrreldi fermide maksumust arvestades nii terase kulu kui ka tulepüsivusnõuete mõju fermi maksumusele. Tulepüsivusnõuete ülevaade on esitatud antud magistritöö peatükis 2.6. Käesolevas peatükis esitatakse kokkuvõtte võrreldud fermide masside kohta ning selle kohta, kuidas mõjutavad eri fermid katusekandjate kogumaksumust, arvestades, et hoone on lõputöö lähteülesandele vastavalt 60 m pikk ning et karkass paikneb 6 m sammuga. Esitatud tabelites on ülevaade arvutustulemustest. Sinine taustavärv lahtiril tähendab, et tegu on selle silde ja tulepüsivusnõude puhul kõige optimaalsema fermiga. Tühi ja sidekriipsuga tähistatud lahter tulepüsivusnõude kohal tähendab tabelitel 5.1 kuni 5.4, et nende fermide puhul tulenõudele vastamiseks ei olnud tarvilik ühtki sõrestiku varrast liialt madala kriitilise temperatuuri tõttu välja vahetada.

4.1 Arvutustulemused 12 m sildega

Fermide kõrgused 12 m sillete puhul on järgnevad: $12/8=1,5$ m, $12/10=1,2$ m, $12/12=1$ m. Tabelis 5.1 on esitatud 12 m sildega fermide terase kogus (kg), läbipaine (cm) ning fermide masside protsentuaalne erinevus ühe fermi kohta. Nähtav on ka fermi pindala (m^2), mis on vajalik hilisemaks tulepüsivusmaksumuse arvutamiseks.

12 m silde korral oli kõige väiksema massiga ja sellest tulenevalt ka väikseima terase kuluga ferm postide ja diagonaalidega ferm, mille keskosa kõrguseks oli $1/8$ ehk $12/8=1,5$ m. Terase massi vahe sama tüüpi fermiga kõrgusel $1/10$ oli 14,7% ning sildel $1/12$ 20,2%. Ainult diagonaalidega fermid olid kõige kergema posti ja diagonaalidega fermist 32,2% kuni 55,4% raskemad, kusjuures diagonaalidega fermid olid seda raskemad, mida madalamad need olid. Postide ja diagonaalidega fermi võrdlus vaid tõmmatud diagonaalidega fermiga võrreldes oli 5,4% ja 6,6% vastavalt $1/8$ ja $1/10$ puhul. Tõmmatud diagonaalidega fermi mass kõrgusega $1/12$ oli 15,1% suurem kõige kergemast ehk postide ja diagonaalidega fermist kõrgusel $1/8$.

Tulepüsivusnõuete korral muutub vaid kõige kergema ehk $1/8$ postide ja diagonaalidega fermi mass. See muudatus tuleneb vajadusest kasutada kõrgema kriitilise temperatuuriga ristlõiget, ning selle tõttu on uueks kõige väiksema massiga

fermiks tõmmatud diagonaalidega ferm kõrgusega l/8. Sellega üsna sarnase massiga on sama tüübi l/10 kõrgusega ferm (1,1% raskem) ning postide ja diagonaalidega l/8 ferm (1,5% raskem). Ka tulepüsivusnõuete puhul oli kõige raskemaks fermi tüübiks ainult diagonaalidega ferm, kusjuures massi vahe kergeima fermiga oli 25,4% kuni 47,4%.

Tabel 4.1 12 m sildega fermid

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ilma tulenõudeta			Tulenõudega			Terase massi vahe kergeima fermiga (%)	Terase massi vahe kergeima fermiga (%)
			Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)	Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)		
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	12	258	11,41	3,9	276	10,85	4	-	1,5
	l/10		296	11,51	4,8				14,7	8,8
	l/12		310	11,21	5,4				20,2	14,0
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	12	341	11,3	3				32,2	25,4
	l/10		382	11,34	3,8				48,1	40,4
	l/12		401	11,25	4,5				55,4	47,4
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	12	272	10,73	3,7				5,4	-
	l/10		275	10,21	4,7				6,6	1,1
	l/12		297	10,83	5,9				15,1	9,2

4.2 Arvutustulemused 24 m sildega

Fermide kõrgused 24 m sillete puhul on järgnevad: $24/8=3$ m, $24/10=2,4$ m, $24/12=2$ m. Tabelites 5.2 ja 5.3 on esitatud 24 m sildega fermide terase kogus (kg), läbipaine (cm) ning fermide masside protsentuaalne erinevus ühe fermi kohta. Nähtav on ka fermi pindala (m²), mis on vajalik hilisemaks tulepüsivusmaksumuse arvutamiseks.

24 m silde puhul võrreldi postide ja diagonaalidega fermi ning ainult diagonaalidega fermi puhul eri arvu võrguvarrastega variante. See tuleneb peatükis 5.3 esitatud suhteliselt suurtest erinevustest eri fermitüüpide masside vahel ning juhendaja soovitusel võrrelda enamate võrguvarraste mõju fermi massile. Tabelites 5.2 ja 5.3 nimetatud „moodulid“ tähistavad siinkohal seda, mitmeks osaks võrguvarraste diagonaalid fermi alumise vöö jagavad, näiteks „3 mooduliga“ ferm jagab alumise vöö mõtteliselt kolmeks osaks ning „5 mooduliga“ vastavalt viieks osaks. Fermide joonised on nähtavad antud magistritöö lisade hulgas. Käesolevas töös esitatakse ülevaade mõlemast variandist ning nende erinevustest.

24 m silde korral oli kõige väiksema massiga ja sellest tulenevalt ka väikseima terase kuluga tõmmatud diagonaalide ja postidega ferm, mille kõrgus oli l/8 ehk 3 m. Sarnase massiga, vastavalt vaid 2,1% ja 5,6% raskemad olid sama tüübi fermid kõrgustega l/10

ja l/12. Kergeim postide ja diagonaalidega ferm oli 5,4% raskem kergeimast tõmmatud diagonaalidega fermist ning selle kõrguseks oli l/8. Selle tüübi ferm kõrgusega l/10 oli 7,5% raskem ning l/12 ferm 29,5% 24 m silde kõige kergemast fermist. Ainult diagonaalidega fermi massi erinevused kergeimast fermist olid fermi kõrguste l/8, l/10 ja l/12 puhul vastavalt 25,7%, 58,2% ja 69%.

Väga suured protsentuaalsed erinevused diagonaalidega fermi vähemate võrguvarrastega variandil lasevad oletada, et tõenäoliselt ei ole tegu kõige optimaalsema fermi kujuga selle tüübi jaoks, ehk tasuks muuta näiteks võrguvarraste asetust veel tihedamaks, ning uurida, kas ja kuidas see sõrestiku massi mõjutab. Ainult diagonaalidega fermide optimaalsuse täpsem uurimine ei olnud antud lõputöö teemaks ning sellel põhjusel siinkohal sellesse rohkem süvitsi ei minda.

Rohkemate moodulitega fermi puhul erinesid tulemused vähem eri fermitüüpide vahel, näiteks postide ja diagonaalidega fermi mass, mille kõrguseks oli l/8, erines kõige kergema fermi massist alla 1%. Sama tüübi sõrestikud kõrgustega l/10 ja l/12 erinesid vastavalt 4,7% ja 6,8%. Ainult diagonaalidega fermi puhul vähenes masside erinevus oluliselt, nimelt olid need erinevused kergeimast fermist fermi kõrguste l/8, l/10 ja l/12 puhul vastavalt 8,6%, 17,4% ja 23,9%, mis on suhteliselt suured erinevused võrreldes sama fermi tüübi vähemate võrguvarraste arvuga variante.

Tulepüsisvusnõuete korral muutub väiksema moodulite arvuga variantidel ainult diagonaalidega l/8 fermi mass (19,4% raskemaks sama tüübi tulepüsisvusnõudeta variandist) ning ainult tõmmatud diagonaalide l/12 fermi mass 0,6% raskemaks sama tüübi tulepüsisvusnõudeta variandiga võrreldes. Kõige kergemaks fermi tüübiks oli nii kolme kui viie mooduli korral ainult tõmmatud diagonaalidega ferm. Viie mooduli korral oli postide ja diagonaalidega fermi puhul optimaalseimaks kõrguseks l/8, mis oli 4,7% raskem selle silde kergeimast tulepüsisvusnõuet täitvast fermist.

Tabel 4.2 24 m sildega vähemate võrguvarrastega fermid

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ilma tulenõudeta			Tulenõudega			Terase massi vahe kergeima fermiga (%)	Terase massi vahe kergeima fermiga (%)
			Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)	Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)		
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	24 (3 moodulit)	1126	35,12	9,1	-	-	-	5,4	5,4
	l/10		1148	35,3	10				7,5	7,5
	l/12		1383	29,49	11,2				29,5	29,5
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	24 (3 moodulit)	1342	38,18	7,4	1602	37,87	6,8	25,7	50,0
	l/10		1690	38,44	7,6				58,2	58,2
	l/12		1805	39,63	9,5				69,0	69,0
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	24	1068	34,07	7,9	-	-	-	-	-
	l/10		1090	32,98	10,1				2,1	2,1
	l/12		1128	33,18	11,7				1193	33,18

Tabel 4.3 24 m sildega enamate võrguvarrastega fermid

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ilma tulenõudeta			Tulenõudega			Terase massi vahe kersema fermiga (%)	Terase massi vahe kersema fermiga (%)
			Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)	Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)		
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	24 (5 moodulit)	1077	38,11	7,6	1180	38,03	7,2	0,8	10,5
	l/10		1118	34,03	9,5				4,7	4,7
	l/12		1141	34,31	11,7				6,8	6,8
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	24 (5 moodulit)	1160	35,38	6,8	1380	38,08	6,2	8,6	29,2
	l/10		1254	34,66	8,3	1470	35,09	7	17,4	37,6
	l/12		1323	37,46	10,2	1370	35,44	9,4	23,9	28,3
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	24	Sellel fermi tüübil pole rohkemate moodulitega arvestatud						-	-
	l/10									
	l/12									

Tabeli 5.3 masside erinevuse protsendid postide ja diagonaalide ning ainult diagonaalidega fermi puhul on saadud võrreldes tabeli 5.2 kõige kergeima fermi ehk ainult tõmmatud diagonaalidega kõrgusega l/8 fermi massiga.

4.3 Arvutustulemused 30 m sildega

Fermide kõrgused 30 m sillete puhul on järgnevad: $30/8=3,75$ m, $30/10=3$ m, $30/12=2,5$ m. Tabelis 5.4 on esitatud 30 m sildega fermide terase kogus (kg), läbipaine (cm) ning fermide masside protsentuaalne erinevus ühe fermi kohta. Nähtav on ka fermi pindala (m²), mis on vajalik hilisemaks tulepüsivusmaksimumuse arvutamiseks.

30 m sildega fermi puhul on kõige väiksema massiga postide ja diagonaalidega ferm, mille kõrguseks on l/8. Sellest järgmine ferm on sama tüüpi, kuid kõrgusega l/10, ning see on esimesest 6,8% raskem. Massilt järgmine on ainult tõmmatud diagonaalide ja postidega ferm, mis on 8,5% raskem kerseimast. Nii postide ja diagonaalidega kui ka ainult tõmmatud diagonaalidega ja postidega fermil on kõrguse l/12 puhul oluliselt suurem mass, vastavalt 24,1% ja 21,5% suurem selle silde kerseimast fermist. Ainult diagonaalidega fermi puhul oli kerseim l/10 kõrgusega ferm, kusjuures selle mass oli 18,0% suurem kerseimast fermist ning l/8 ja l/12 fermide massid olid vastavalt 23,2% ja 33,3% raskemad sama silde kerseimast ehk l/8 postide ja diagonaalidega fermist.

30 m silde puhul arvutati postide ja diagonaalidega ferm ning ainult diagonaalidega ferm läbi ka vähemate varraste arvuga ehk nn kolme mooduliga, kuid need tulemused tulid väga olulisel määral suuremad rohkemate varraste arvuga fermidest, näiteks postide ja diagonaalidega fermide puhul oli kerseim ferm 28,8% raskem rohkemate

võrguvarrastega kergeimast fermist, ning raskeim 44,1% suurema massiga. Ainult diagonaalidega fermi puhul oli fermide massi vahed kergeimaga vahemikus 58,1% ja 88,0% vahel. Sellised suured erinevused illustreerivad hästi, kuivõrd olulised on (eriti suurte sillete puhul) fermi vöödel võimalikult lühikesed võrguvarraste vahekaugused. Kuna realistlikult on väga ebaotstarbekas selliseid sildeid niivõrd väheste võrguvarraste arvuga lahendada, ei ole ka antud töös pikemalt peatunud selliste fermide tulemuste erinevusele ning selle mõjule hoone katusekandjate maksumusele.

Tulepüsisvusunõuete korral 30 m sildega fermide arvestuses ei olnud kriitilise temperatuuri sobivuse saavutamiseks vajalik ühtki elementi muuta postide ja diagonaalidega fermitüübi puhul, sest kõikide varraste kriitilised temperatuurid olid sobilikud tuletõkkevõõbaga katmiseks.

Muuta oli vaja ainult diagonaalidega fermide ning ainult tõmmatud diagonaalidega fermide osasid ristlõikeid, mis mõjutasid ka fermi massi. Ainult diagonaalidega fermi massid muutusid vastavalt fermi kõrgustele l/8, l/10 ja l/12 46,7%, 40,6% ja 57,4% raskemaks. Ainult tõmmatud diagonaalidega ja postidega fermi puhul muutusid massid fermi kõrguste l/8, l/10 ja l/12 kohta vastavalt 20,0%, 39,7% ja 34,7%. Mõlema fermi tüübi puhul on sel juhul tegu küllaltki suure massi kasvuga.

Tabel 4.4 30 m fermid

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ilma tulenõudeta			Tulenõudega			Terase massi vahe kergeima fermiga (%)	Terase massi vahe kergeima fermiga (%)
			Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)	Terase kogus (kg)	Fermi pindala (m ²)	Läbipaine (cm)		
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	30	1593	51,47	9,7	-	-	-	-	
	l/10		1701	40,81	12					
	l/12		1977	39,67	13,1					
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	30	1962	53,73	8,2	2337	53,64	7,7	23,2	46,7
	l/10		1879	50,81	11	2240	51,94	10,3	18,0	40,6
	l/12		2123	56,2	12,4	2507	55,19	11,5	33,3	57,4
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	30	1891	48,5	9,6	1911	48,48	9,5	18,7	20,0
	l/10		1728	53,44	12	2225	52,92	10,5	8,5	39,7
	l/12		1935	50,19	14,3	2146	48,99	13,3	21,5	34,7

4.4 Mõju hoone maksumusele

Hoone maksumuse arvestamiseks kasutati terasferme tootvate ettevõtete hinnapakumisi 2021. aasta I ja II kvartalist. Võrreldud on katusekandurite komplekti hinda lõputöö ülesandepüstituses täpsustatud hoone osas ehk 60 m pika ning 6 m karkassisammuga hoone puhul. Suuremate mõõtmetega hoonete puhul võivad hinnavad erid sõrestikutüüpide vahel tulla veel suuremad. Eraldi arvestati teraskonstruktsiooni valmistamise hinda (1,7€/kg), tuletõkkevõõbaga katmise hinda R30 nõude puhul (17 €/ m²), tuletõkkevõõba hinda R60 nõude puhul (35 €/m²), montaaži hinda, kui ferm on ühes tükis (0,33 €/kg) ning juhul, kui ferm on kahes tükis (0,36 €/kg). Tuletõkkevõõba hinna juurde on arvestatud ka kaitsev värvikiht tuletõkkevõõba peal, kuna võõp ise on küllalt rabe ning võib kergelt kokkupuudetel kahjustatud saada.

Kahes tükis oleva fermi puhul tuleneb montaaži hinna vahe vajadusest teha rohkem tõsteid fermi osade platsile tarnimisel ja sellest tulenevast pikaajsemast tõstemasinate kulust ning samuti vajadusest mitme kraana järele montaaži ajal.

Hindade osas on oluline arvesse võtta, et viimasel aastal ning eriti viimase poole aasta jooksul lõputöö kirjutamise hetkest on mitmed ehitusmaterjalid, eriti teras, teinud ootamatuid hinnatõuse, on antud ühikhinnad esitatud eesmärgiga anda ülevaade, millised hindade suurusjärgud teatud ajahetkel olid. Kuna terase hind oli lõputöö kirjutamise ajal eriti kõikuv, ongi osad arvutustulemused esitatud erinevuse protsentide kujul parema võrreldavuse tagamiseks.

4.4.1 Hoone maksumuse võrdlus 12 m sildel

Ilma tulepüsisvõõudeta on kõige soodsam fermi kuju postide ja diagonaalidega 1/8 kõrgusega ferm. Hinnalt järgmine on 5,4% ehk antud juhul hoone kohta ligi 300€ kallim. Antud juhul on soodsaima ja kalleima katusekandjate komplekti hinnavahe 2902,9€ ehk ligi 3000€. Tulepüsisvõõudega on soodsaim ferm ainult tõmmatud diagonaalide ja postidega ferm kõrgusega 1/10, kuid sellel on küllaltki väiksed hinnaerinevused sama tüübi 1/8 fermiga (0,4% R30 puhul ja 1,3% R60 puhul) ning ka postide ja diagonaalidega fermi 1/8 kõrguse fermiga (1,8% R30 puhul ja 2,7% R60 puhul). Teistel fermi kõrgustel ja kujudel olid juba suuremad erinevused hoone hinnas, mis on vaadeldavad tabelist 5.5. R30 hoone puhul on hinnavahe kalleimaga 2734,6€ ning R60 hoone puhul 2921,8€.

Tabel 4.5 12 m fermidega katusekandurite komplekti hind

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ühe TP3 komplekti hind	Ühe R30 komplekti hind	Ühe R60 komplekti hind	Hindade vahe TP3 hoonel (%)	Hindade vahe R30 hoonel (%)	Hindade vahe R60 hoonel (%)
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	12	5237,4	7447,3	9400,3	-	1,8	2,7
	l/10		6008,8	7965,5	10037,3	14,7	8,8	9,6
	l/12		6293	8198,7	10216,5	20,2	12,0	11,6
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	12	6922,3	8843,3	10877,3	32,2	20,8	18,8
	l/10		7754,6	9682,4	11723,6	48,1	32,3	28,0
	l/12		8140,3	10052,8	12077,8	55,4	37,4	31,9
Ainult tõmmatud diagonaalidega	l/8	12	5521,6	7345,7	9277,1	5,4	0,4	1,3
	l/10		5582,5	7318,2	9156	6,6	-	-
	l/12		6029,1	7870,2	9819,6	15,1	7,5	7,2

4.4.2 Hoone maksumuse võrdlus 24 m silde

24 m silde puhul esitatakse taas arvutustulemused kahes variandis kahe fermi tüübi puhul, postide ja diagonaalidega ning ainult diagonaalidega fermi puhul. Pärast 30 m fermi puhul avastatud suhteliselt suurt massi kasvu võrreldes ainult tõmmatud diagonaalidega fermiga, arutati lõputöö juhendaja soovitusel need fermid läbi ka enamate varrastega, st olukorras, kus fermi „mooduleid“ (siinkohal ühest võrguvarraste grupist moodustuv kolmnurkkonstruktsioon) oleks alumiselt vöölt lugedes 3 asemel 5, ning saadi sellest tulenevalt arvestatavalt ökonoomsemad tulemused. Sellest tulenevalt otsustati parema võrreldavuse huvides ka 24 m fermid enamate varrastega läbi arvutada, ning esitada tööd mõlemad variandid, et erisus paremini välja tuleks.

24 m sildega fermidel tuli kõige optimaalsemaks lahenduseks kõikides tulepüsivusklassides ainult tõmmatud diagonaalidega ferm kõrgusega l/8. Väga lähedaste tulemustega (kallim vaid 2,1% TP3 puhul, 1,0% R30 puhul ning 0,2% R60 puhul) oli sama tüübi ferm kõrgusega l/10. Ligi 200 kilogrammi raskemad tulid kõikide tulepüsivusklasside puhul postide ja diagonaalidega ferm, millal oli rohkem „mooduleid“. Teistel fermi kõrgustel ja kujudel olid juba suuremad erinevused hoone hinnas, mis on vaadeldavad tabelitest 5.6 ja 5.7. 24 m silde puhul oli soodsaima ja kalleima katusekandjate komplekti hinnavahe 5176,5€, kui võrrelda soodsaimat fermide kuju viie mooduliga fermide kõige kallima variandiga, milleks on ainult diagonaalidega l/12 ferm. Kolme mooduliga variandi puhul tuleb hinnavahe veel suurem, 14951,1€ hoone kohta. See omakorda kinnitab seisukohta, et ainult diagonaalidega fermi puhul on eriti oluline hoida ülemise vöö puhul võrguvarrad võimalikult sagedase sammuga.

Tabel 4.6 24 m fermidega katusekandurite komplekti hind vähemate võrguvarrastega

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ühe TP3 komplekti hind	Ühe R30 komplekti hind	Ühe R60 komplekti hind	Hindade vahe TP3 hoonel (%)	Hindade vahe R30 hoonel (%)	Hindade vahe R60 hoonel (%)
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	24 (3 moodulit)	22857,8	28828,2	35149,8	5,4	4,9	4,6
	l/10		23304,4	29305,4	35659,4	7,5	6,7	6,1
	l/12		28074,9	33088,2	38396,4	29,5	20,4	14,3
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	24 (3 moodulit)	27242,6	38958,5	45775,1	25,7	41,8	36,2
	l/10		34307	40841,8	47761	58,2	48,7	42,1
	l/12		36641,5	43378,6	50512	69,0	57,9	50,3
Ainult tõmmatud diagonaalidega	l/8	24	21680,4	27472,3	33604,9	-	-	-
	l/10		22127	27733,6	33670	2,1	1,0	0,2
	l/12		22898,4	29858,5	35830,9	5,6	8,7	6,6

Tabel 4.7 24 m fermidega katusekandurite komplekti hind enamate võrguvarrastega

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ühe TP3 komplekti hind	Ühe R30 komplekti hind	Ühe R60 komplekti hind	Hindade vahe TP3 hoonel (%)	Hindade vahe R30 hoonel (%)	Hindade vahe R60 hoonel (%)
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	24 (5 moodulit)	21863,1	30419,1	37264,5	0,8	10,7	10,9
	l/10		22695,4	28480,5	34605,9	4,7	3,7	3,0
	l/12		23162,3	28995	35170,8	6,8	5,5	4,7
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	24 (5 moodulit)	23548	34487,6	41342	8,6	25,5	23,0
	l/10		25456,2	35806,3	42122,5	17,4	30,3	25,3
	l/12		26856,9	33835,8	40215	23,9	23,2	19,7
Ainult tõmmatud diagonaalidega	l/8	24	Sellel fermi tüübil pole rohkemate moodulitega arvestatud			-		
	l/10							
	l/12							

Tabeli 5.7 hindade erinevuse protsendid on saadud võrreldes tabeli 5.6 kõige kergema fermi ehk ainult tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega ja kõrgusega l/8 fermi massiga.

4.4.3 Hoone maksumuse võrdlus 30 m sildel

30 m silde puhul on selgelt eristatav, et kõige optimaalsem fermi kuju on nii TP3, R30 kui ka R60 nõuete puhul postide ja nii tõmmatud kui ka surutud diagonaalidega ferm. TP3 klassi hoone optimaalseim lahendus on ferm kõrgusega l/8, millest hinnavahe järgi järgmine on sama tüübi ferm kõrgusega l/10 (mis on 6,8% ehk 2224,8€ kallim) ning sellest järgmine on ainult tõmmatud diagonaalidega ferm kõrgusega l/10, mis erineb odavaimast hinnast 8,5% ehk on 2781€ kallim. R30 tulepüsisvusunõudega on samuti

otstarbekaim postide ja diagonaalidega ferm kõrgusega l/8, sellest erineb hinnavahega 1% sama tüübi ferm kõrgusega l/10. Sellest järgmine optimaalsem on ainult tõmmatud diagonaalidega ja postidega ferm, mis on soodsaimast variandist 13,2% ehk 5469,2€ kallim. R60 nõude puhul on terase kulult otstarbekaim kasutada postide ja diagonaalidega fermi kõrgusega l/10, sellest järgmised on 3,1% võrra kallim sama tüübi l/8 ferm ning sama tüübi l/12 ferm, mis on 10,7% kallim. Teistel fermi kõrgustel ja kujudel olid juba suuremad erinevused hoone hinnas, mis on vaadeldavad tabelist 5.8.

Tabel 4.8 30 m fermidega katusekandurite komplekti hind maksumus

Fermi tüüp	Fermi kõrgus	Sille	Ühe TP3 komplekti hind	Ühe R30 komplekti hind	Ühe R60 komplekti hind	Hindade vahe TP3 hoone (%)	Hindade vahe R30 hoone (%)	Hindade vahe R60 hoone (%)
Postide ja diagonaalidega ferm	l/8	30	32815,8	41565,7	50830,3	-	-	3,1
	l/10		35040,6	41978,3	49324,1	6,8	1,0	-
	l/12		40726,2	47470,1	54610,7	24,1	14,2	10,7
Ainult diagonaalidega ferm	l/8	30	40417,2	56559,9	66215,1	23,2	36,1	34,2
	l/10		38707,4	54301,8	63651	18,0	30,6	29,0
	l/12		43733,8	60274,4	70208,6	33,3	45,0	42,3
Ainult tõmmatud diagonaalidega ferm	l/8	30	38954,6	47034,9	55761,3	18,7	13,2	13,1
	l/10		35596,8	54163,9	63689,5	8,5	30,3	29,1
	l/12		39861	51892,1	60710,3	21,5	24,8	23,1

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli leida optimaalne fermi kuju ja kõrgus terase kulu seisukohast ning uurida, kas tulepüsivusnõuete olemasolu mõjutab ratsionaalseima fermi kuju. Töös võrreldi kolme erinevat fermi kuju kolmel eri kõrgusel kolme erineva silde korral, nimelt 12 m, 24 m ja 30 m sillete ning L/8, L/10 ning L/12 korral, kus L tähistab silde pikkust. Võrreldavateks fermi kujudeks olid tõmmatud ja surutud diagonaalidega ning postidega ferm, ainult tõmmatud ja surutud diagonaalidega ferm ning ainult tõmmatud diagonaalide ning surutud postidega ferm. Töös võrreldi kolme erineva tuleohutusklassiga hoonet, TP3 klass, ehk hoone, mille kandekonstruktsiooni tulepüsivus ei ole määratud, kui see ei mõjuta tuletõkkesektsioonide tulepüsivust, ning TP2 klassis R30 ja R60 ohutusklasse, kus kummaski peab kandekonstruktsioon püsti püsima vastavalt 30 või 60 minutit.

Uurimistöö tulemused olid järgnevad: 12 m silde puhul oli TP3 klassis kõige ökonoomsem variant postide ja diagonaalidega ferm, mille kõrguseks oli L/8. Sama silde puhul oli nii R30 kui ka R60 nõudel optimaalseim ainult tõmmatud diagonaalidega ja surutud postidega ferm, mille kõrguseks oli L/10. 24 m silde puhul oli nii tulepüsivusnõudeta kui ka nõudega variandil kõige väiksema terase kulu ning üleüldiselt soodsaim ainult tõmmatud diagonaalidega ning surutud postidega ferm, mille kõrguseks oli L/8. 30 m silde puhul oli TP3 klassis kõige optimaalsem nii tõmmatud kui ka surutud diagonaalide ja surutud postidega ferm, mille kõrguseks oli L/8. R30 nõude puhul oli kõige soodsam sama tüübi ferm kõrgusega L/8 ning R60 nõude puhul sama tüübi ferm kõrgusega L/10.

Üldiselt selgus tööst, et suurema vööde vahega fermid on ökonoomsemad väiksemate vööde vahedega fermidest. Tavapäraselt on hoonetes fermi alune vaba ruum piiratud ning sellest tulenevalt üritatakse hoone kõrgust võimalikult optimaalselt kasutada, st jätta fermi alla võimalikult palju vaba ruumi, mis on eriti vajalik näiteks laohoonete puhul. Suurte vööde vahedega fermi optimaalsus tuleneb vöödes tekkivatest väiksematest pikijõududest, mida võib lihtsustatuna vaadata jõupaari momendina. Vaadeldes fermi lihttalana ja arvutades lihttala momendi valemiga $M = q * L/8$, saab pikijõu fermid leida jagades selle vööde vahekaugusega $M/t = F$ (kus M on momendi suurus, q on mõjuv lasukoormus, L on silde pikkus, t võrguvarraste vahekaugus ja F mõjuv pikijõud). Oluline faktor ülemise vöö saledamaks muutmisel on ka tihedam võrguvarraste asetuse, mis annab eriti suured erinevused ainult diagonaalidega fermide puhul.

Käesolevas magistritöös saadud arvutustulemusi on võimalik kindlasti veel edasi arendada, eriti näiteks uurimisel, kas fermi kõrgused $L/7$ või enam annaksid veel optimaalsemaid tulemusi või siis tegeleda vaid diagonaalidega fermi optimaalseima kuju leidmisega. Kuna vööde vahedega $L/12$ fermid ei osutunud parimaks lahenduseks ühelgi sildel ega kujul, tuleks nende edasisel uurimisel kaaluda näiteks tihedamat võrguvarraste asetust. Tihedam võrguvarraste asetust võib anda veel paremaid tulemusi aga ka $L/8$ ning $L/10$ kõrgusega fermide puhul. Samuti võib erinevaid tulemusi saada teistsuguste ristlõigete kasutamisel, kuna antud töös lähtuti ristlõigetest, mis on Eestis enamlevinud ning olid ära toodud K. Looritsa raamatus „Teraskonstruktsioonide arvutus Eurokoodeksi järgi“. Ristlõigete saadavus võib aga muutuda nii paremuse kui halvemuse poole, eriti seoses Covid-19 pandeemiaga, mis mõjutab kogu maailmast tootmist ning tarneid. Kuna kohati oli hinnavahe erinevate fermide ning tulepüsivusklasside puhul küllaltki väike, tasuks antud teemat edasi uurida näiteks arvestades saadaolevaks mitmekülgsemaid ristlõikeid, arvestades siiski ka reaalsel turuseisu.

Lõputöös püstitatud ülesanded said lahendatud. Üliõpilane ise hindab tehtud tööd informatiivseks, arendatavaks ja aktuaalseks, sest materjali kokkuhoid on päevakohane nii tõusvaid terasmaterjali hindu arvestades kui ka soovist tarbitavaid ressursse võimalikult keskkonna- ja energiasäästlikult kasutada.

SUMMARY

The objective of this Master's thesis was to find the optimal shape and height of a steel truss considering the quantity of steel and whether or not the fire resistance requirements have effect on the amount of steel needed and the eventual cost of the building. Three different shapes of steel trusses on three different heights of the truss were calculated on three different spans, 12 meters, 24 meters and 30 meters. The height of the trusses was $L/8$, $L/10$ and $L/12$, in which L is the span of the building. The compared shapes of trusses were firstly a truss with both diagonals and posts, in which the diagonals worked for both compression and tension and the posts for compression. The second shape of the truss was one with only diagonals and the third one with diagonals and posts, in which the diagonals worked only for tension and the posts for compression, as posts do. Three different fire resistance requirements were also considered, firstly TP3, which does not impose any load-bearing requirements on the trusses, and then secondly and thirdly R30 and R60, which mean that the construction has to remain load-bearing until respectively 30 minutes and 60 minutes.

The results of the thesis concluded that for a span of 12 meters the optimal solution is a truss with both compression and tension diagonals and posts with the height of $L/8$. For the trusses with fire resistance requirements was a truss with the height of $L/8$ and only tension diagonals and posts the best fit. For the span of 24 meters was the best truss the one with only tension diagonals and posts. This was the case for both TP3, R30 and R60 requirements. For the span of 30 meters the most optimal truss shape was the one with posts and both compression and tension diagonals. The height of the truss was $L/8$. For the fire resistance requirement R30 was the best type the same shape with the same height, but for the requirement R60 was the best type the same shape with the height of $L/10$.

The conclusions of this thesis can definitely be expanded upon, especially the topic of the truss with only diagonals, since it proved to be considerably less efficient material-use-wise than the other two shapes of trusses. There can also be some changes in the results if different sections of the bars are considered, since in this thesis the used bars were those most common in Estonia, according to K. Loorits' book "Teraskonstruktsioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi". All in all, the thesis fulfilled its objective. The student considers their work informative and relevant in regard to today's trends in the building industry and environmental goals.

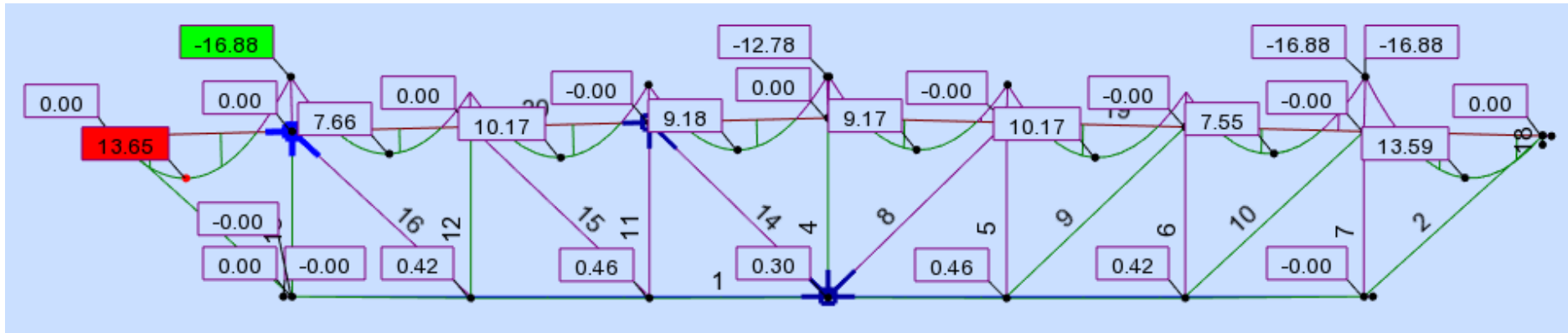
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] K. Loorits, Teraskonstruksioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi, Tallinn: Printon Trükikoda, 2008.
- [2] Eesti Standardikeskus, „Eurokoodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-8: Liidete projekteerimine. EVS-EN 1993-1-8:2005/AC:2009,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2009.
- [3] Eesti Standardikeskus, „EVS 920-5:2015. Katuseehitusreeglid. Osa 5. Lamekatused,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2015.
- [4] Eesti Standardikeskus, „Eurokoodeks. Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused. EVS-EN 1990:2002+NA:2002,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2003.
- [5] Eesti Standardikeskus, „Eurokoodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks EVS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2015.
- [6] Riigi Teataja väljaandja, „Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded,“ 22 February 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/123022021013>. [Kasutatud 5 August 2021].
- [7] BISOL Group, „BISOL Premium series,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bisol.com/premium>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [8] BISOL Group, „BISOL Flat roofs,“ BISOL Group, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bisol.com/flat-roofs>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [9] BISOL Group, „BISOL EasyTool,“ BISOL Group, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bisol.com/easytool>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [10] Eesti Standardikeskus, „Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2016.
- [11] Eesti Standardikeskus, „Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Tuulekoormus. EVS-EN 1991-1-4:2005+NA:2007,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2007.
- [12] Eesti Standardikeskus, „Eurokoodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-8: Liidete projekteerimine. EVS-EN 1993-1-8:2005+NA:2006,“ 8 detsember 2006. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1993-1-8-2005+na-2006>.
- [13] Isover Saint-Gobain, „Isover OL-P,“ Isover Saint-Gobain, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.isover.ee/tooted/isover-ol-p>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [14] Isover Saint-Gobain, „Isover OL-TOP,“ Isover Saint-Gobain, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.isover.ee/tooted/isover-ol-top>. [Kasutatud 5 mai 2021].
- [15] Rautaruukki, „Ruukki Load-Bearing Sheet T130M-75L-930,“ Rautaruukki, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ruukki.com/building-envelopes/products/roof-structure/load-bearing-sheets/load-bearing-sheets-detail/load-bearing-sheet-t130m-75l-930#properties>. [Kasutatud 2 mai 2021].

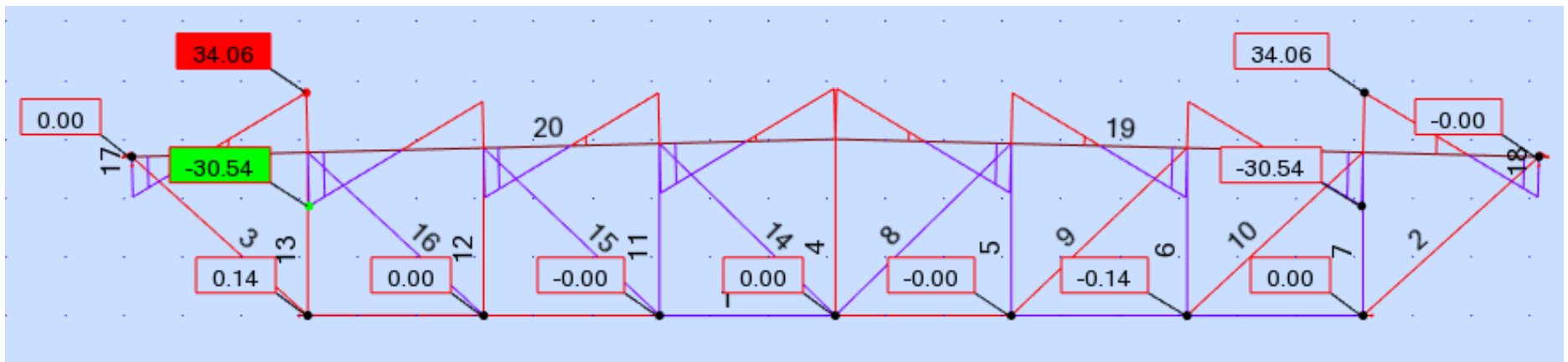
LISAD

LISA 1. ARVUTUSNÄITE FERMI SISEJÕUD

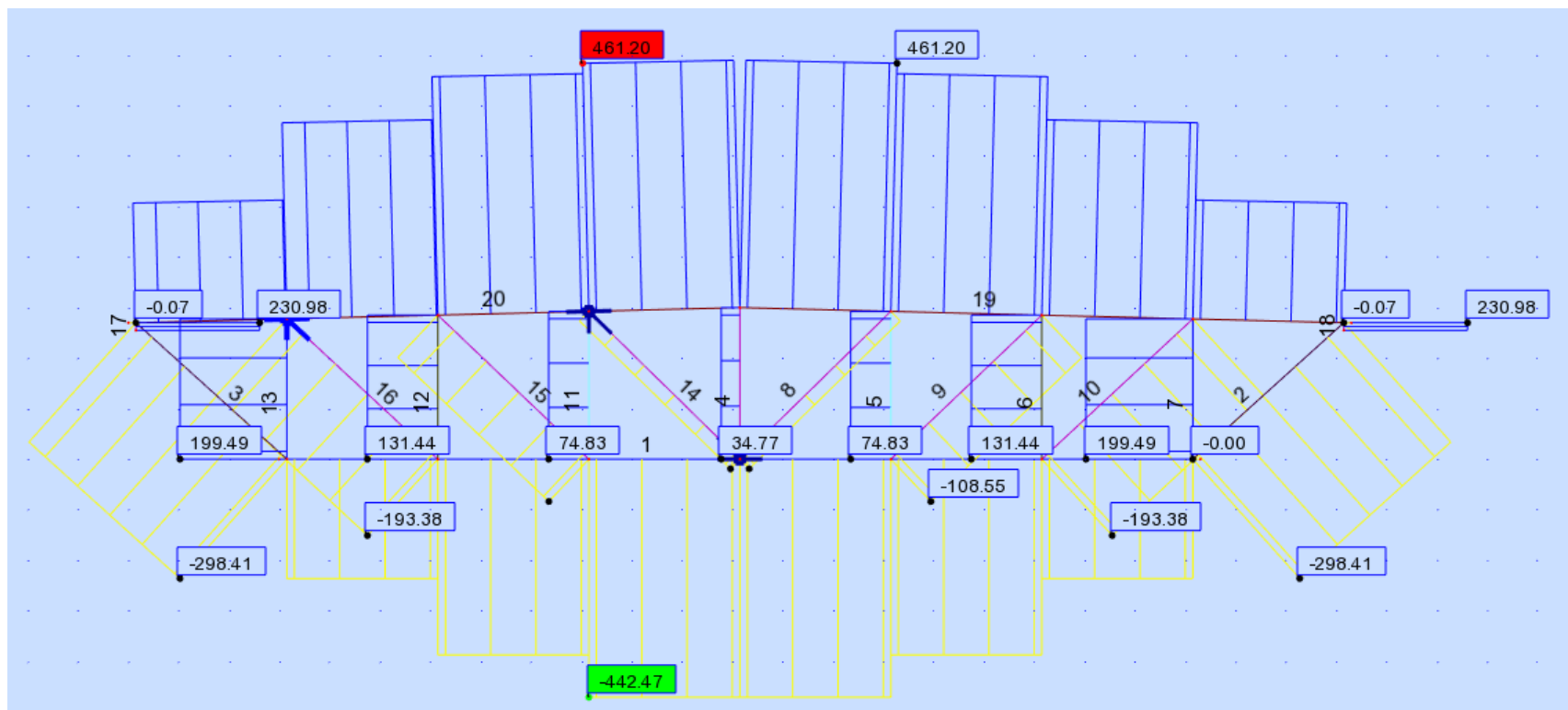
L1.1 24 m sildega 1/8 kõrgusega tõmmatud diagonaalidega fermi paindemomendi epüür.



L1.2 24 m sildega 1/8 kõrgusega tõmmatud diagonaalidega fermi põikjõu epüür.

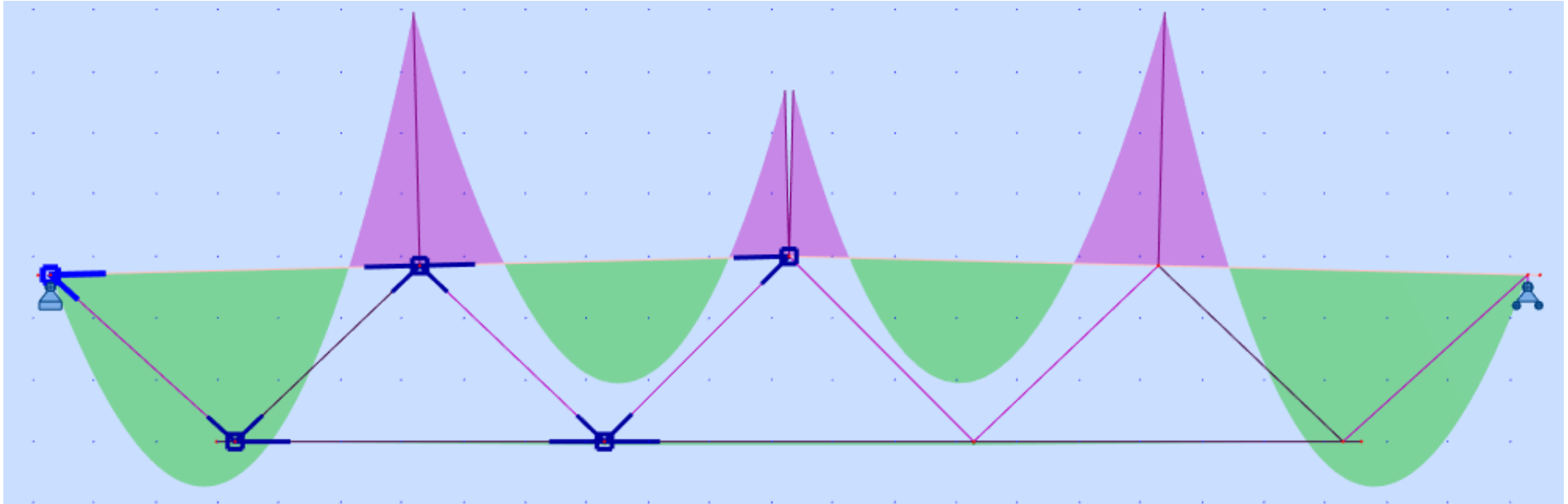


L1.3 24 m sildega 1/8 kõrgusega tõmmatud diagonaalidega fermi pikijõu epüür.

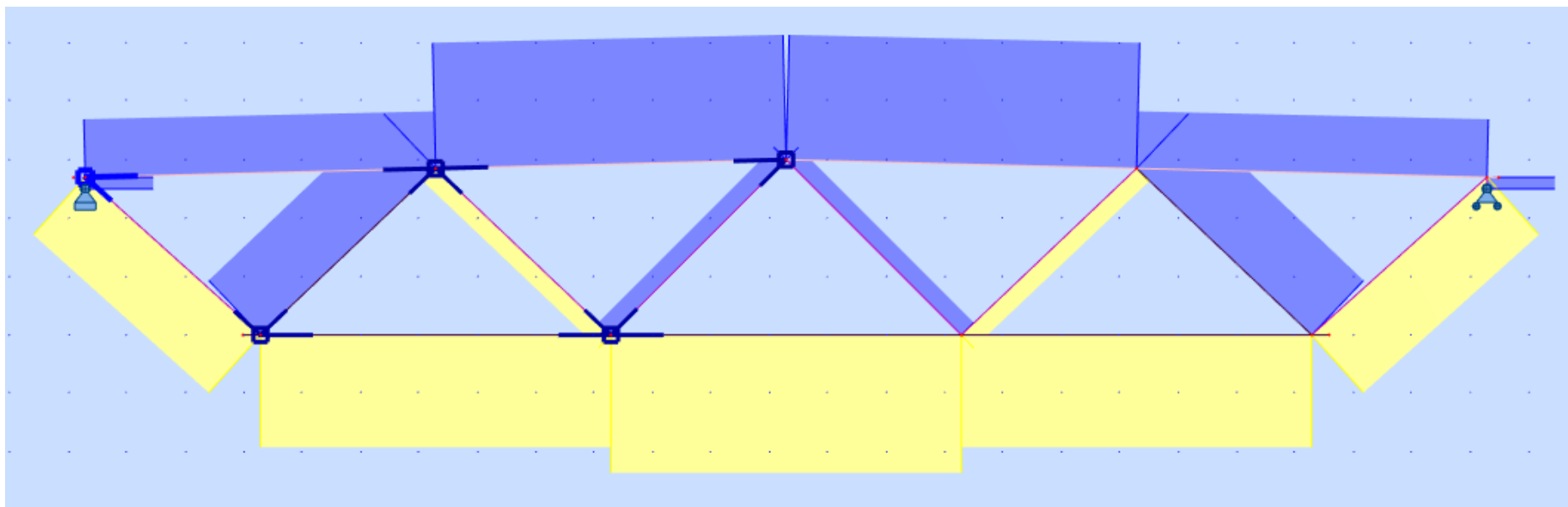


LISA 2. AINULT DIAGONAALIDEGA FERMI SISEJÕUD

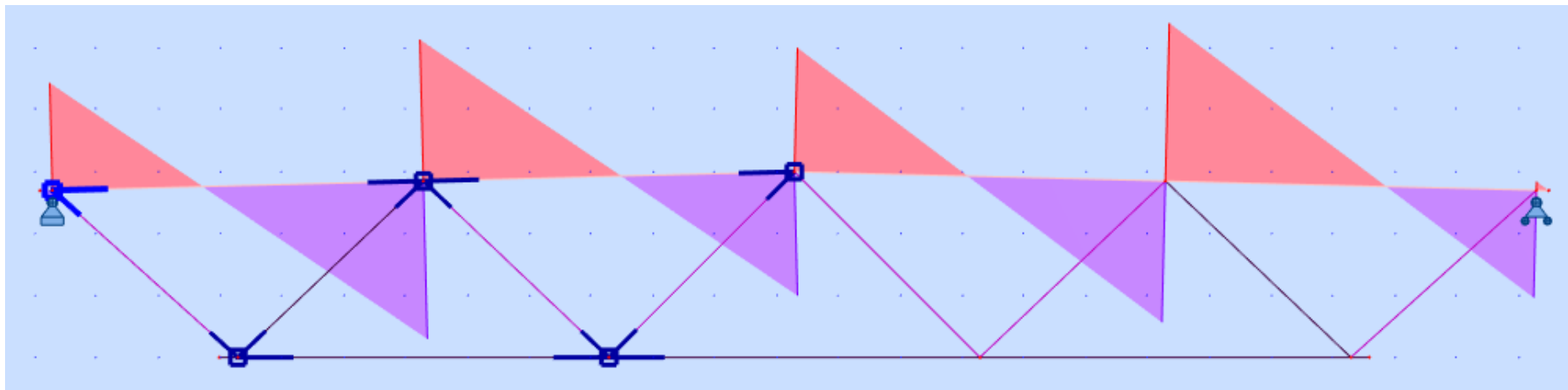
L2.1 Ainult diagonaalidega fermi paindemomendi epüüri üldkuju.



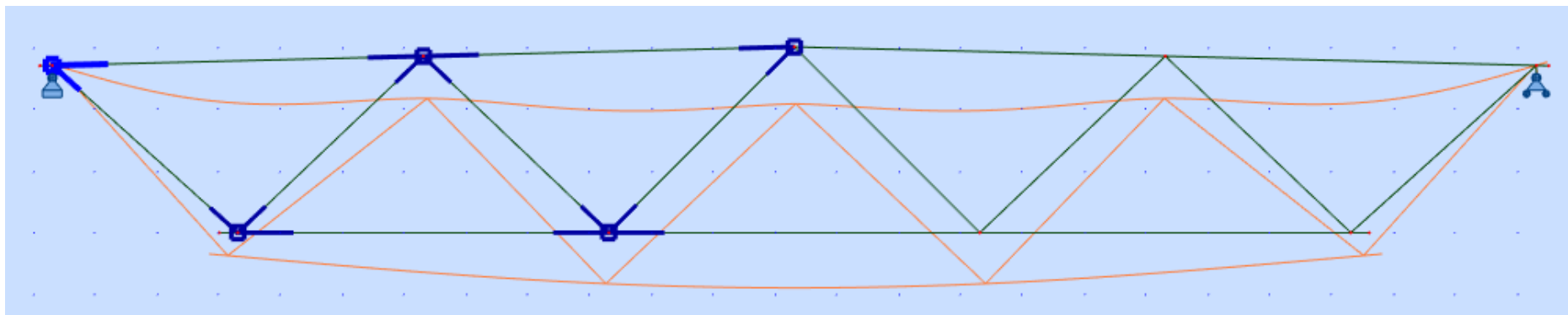
L2.2 Ainult diagonaalidega fermi pikijõu epüüri üldkuju. Sinise värviga tähistatud survejõud, kollasega tõmbejõud.



L2.3 Ainult diagonaalidega fermi põikjõu epüüri üldkuju.

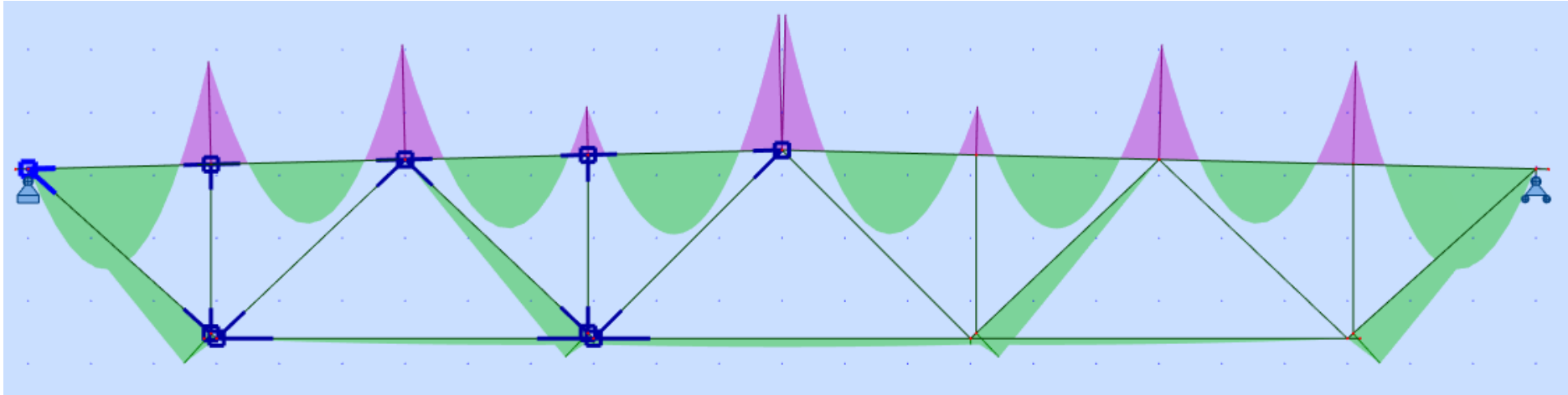


L2.4 Ainult diagonaalidega fermi läbipainde üldkuju.

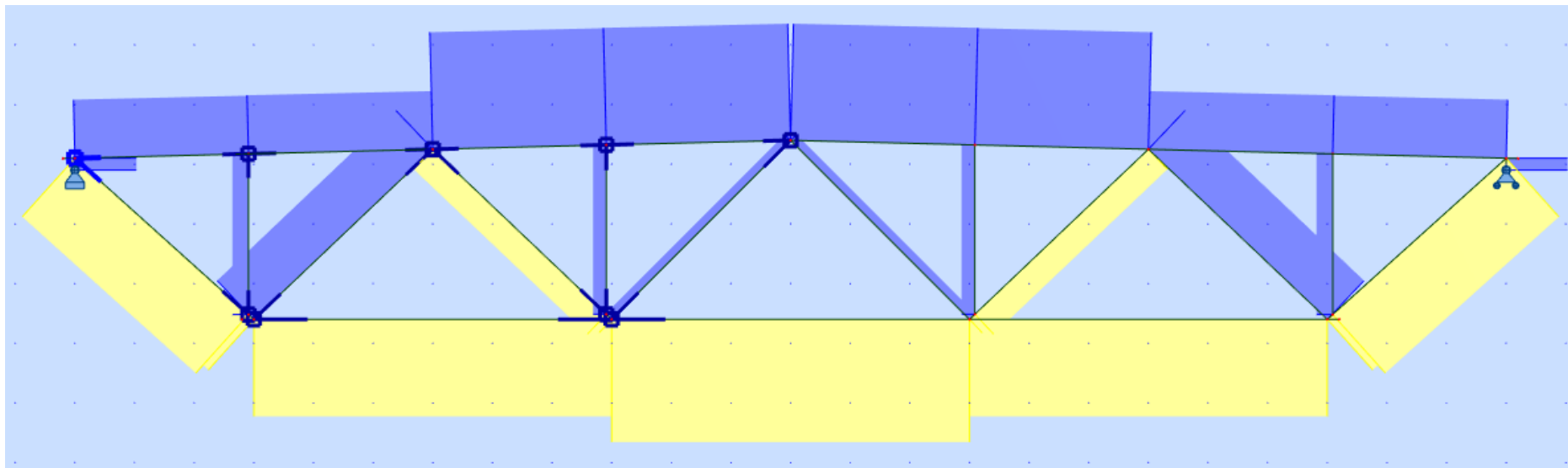


LISA 3. DIAGONAALIDE JA POSTIDEGA FERMI SISEJÕUD

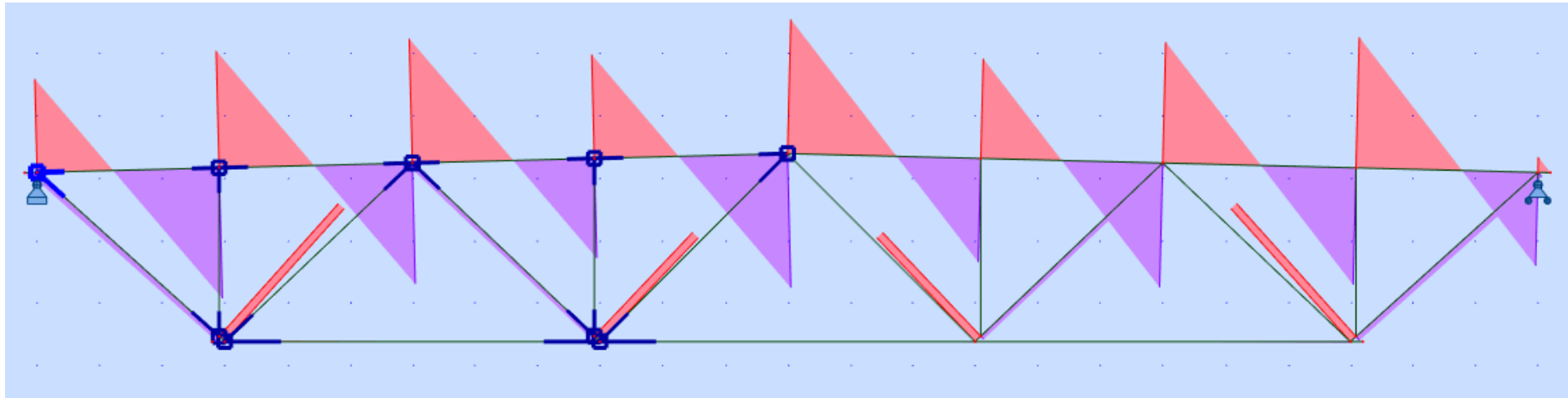
L3.1 Diagonaalide ja postidega fermi paindemomendi epüüri üldkuju.



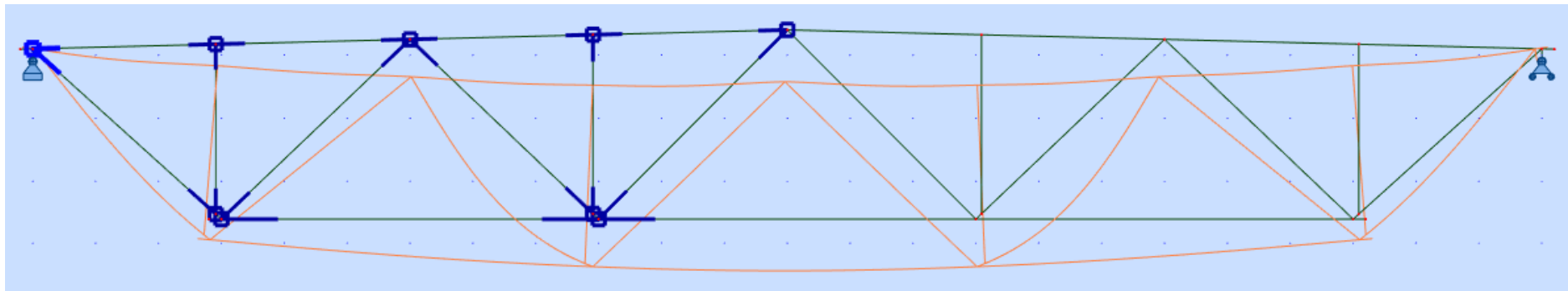
L3.2 Diagonaalide ja postidega fermi paindemomendi epüüri üldkuju. Sinise värviga tähistatud survejõud, kollasega tõmbejõud.



L3.3 Diagonaalide ja postidega fermi paindemomendi epüüri üldkuju.

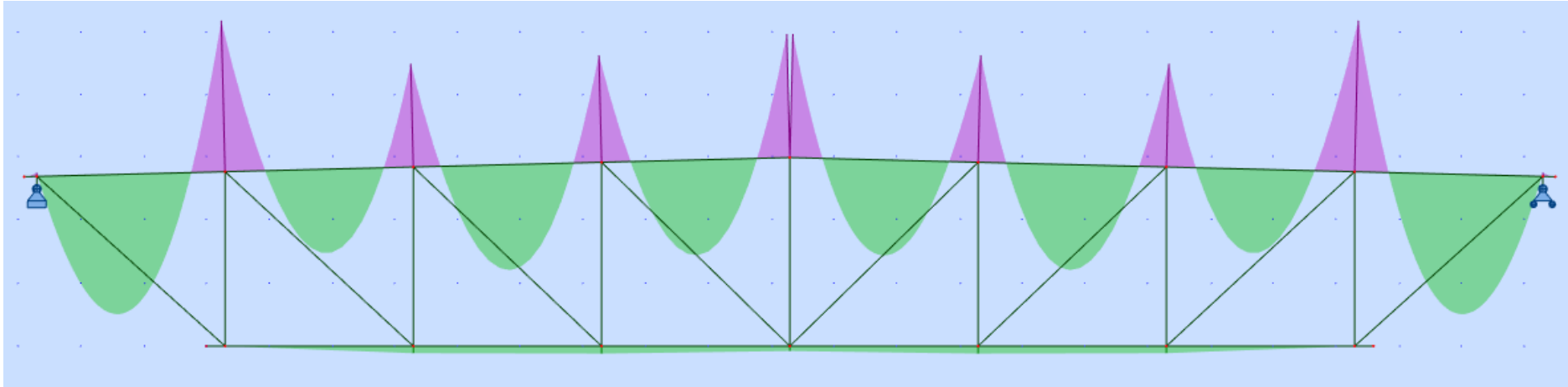


L3.4 Diagonaalide ja postidega fermi paindemomendi epüüri üldkuju.

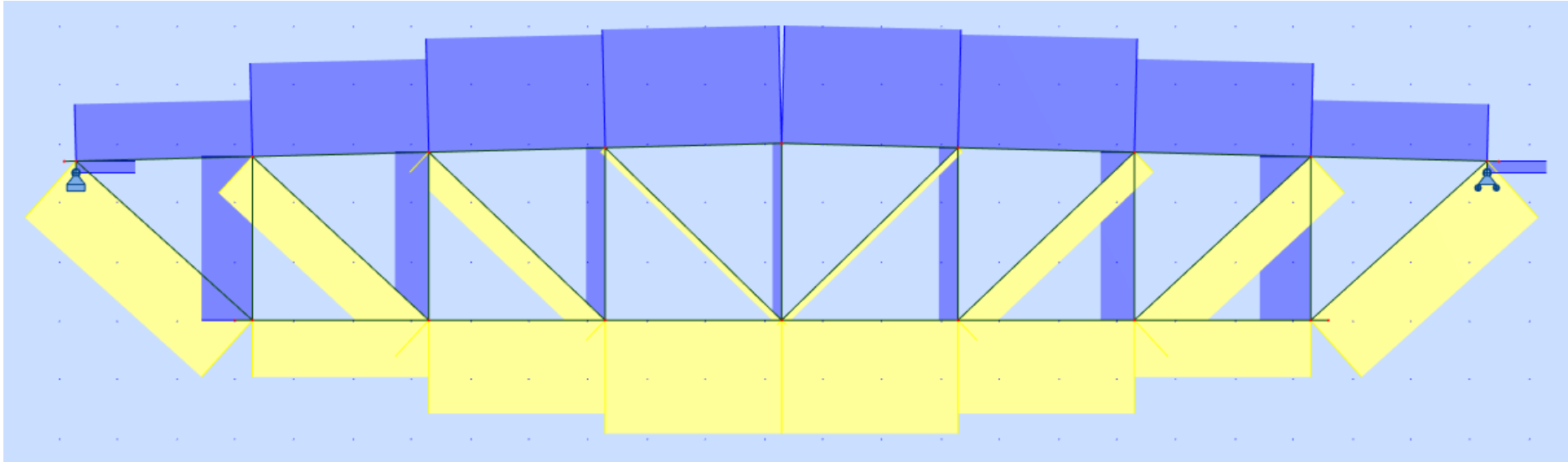


LISA 4. AINULT TÕMMATUD DIAGONAALIDE JA SURUTUD POSTIDEGA FERMI SISEJÕUD

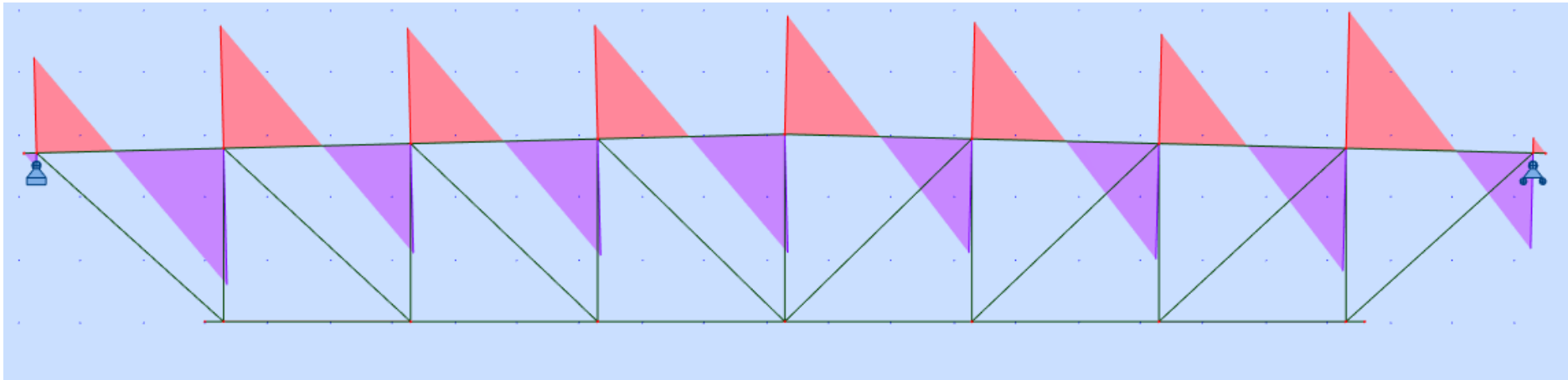
L4.1 Ainult tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega fermi paindemomendi epüüri üldkuju.



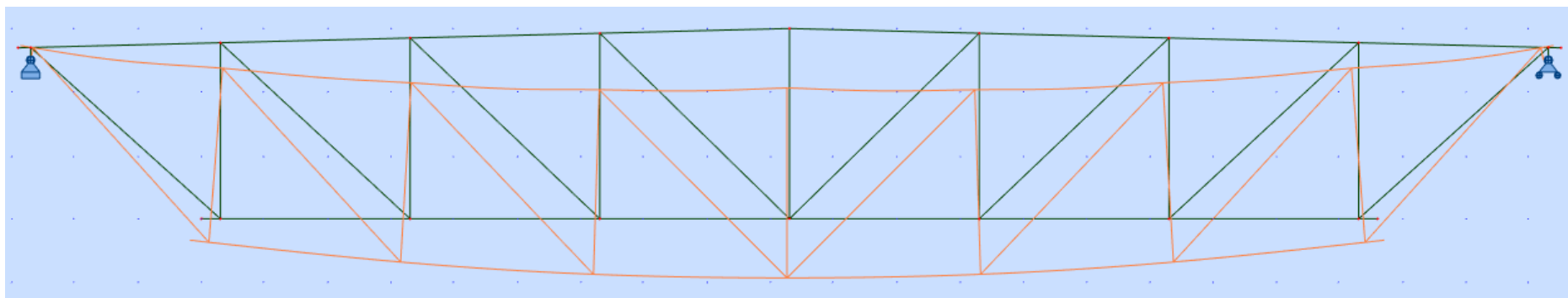
L4.2 Ainult tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega fermi pikijõu epüüri üldkuju. Sinisega tähistatud survejõud, kollasega tõmbejõud.



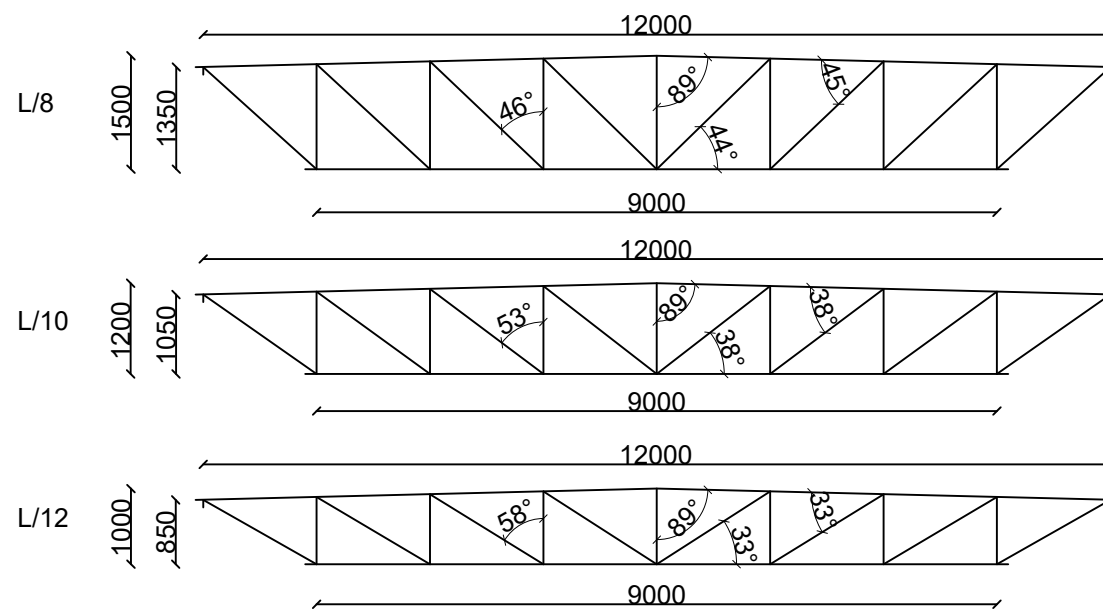
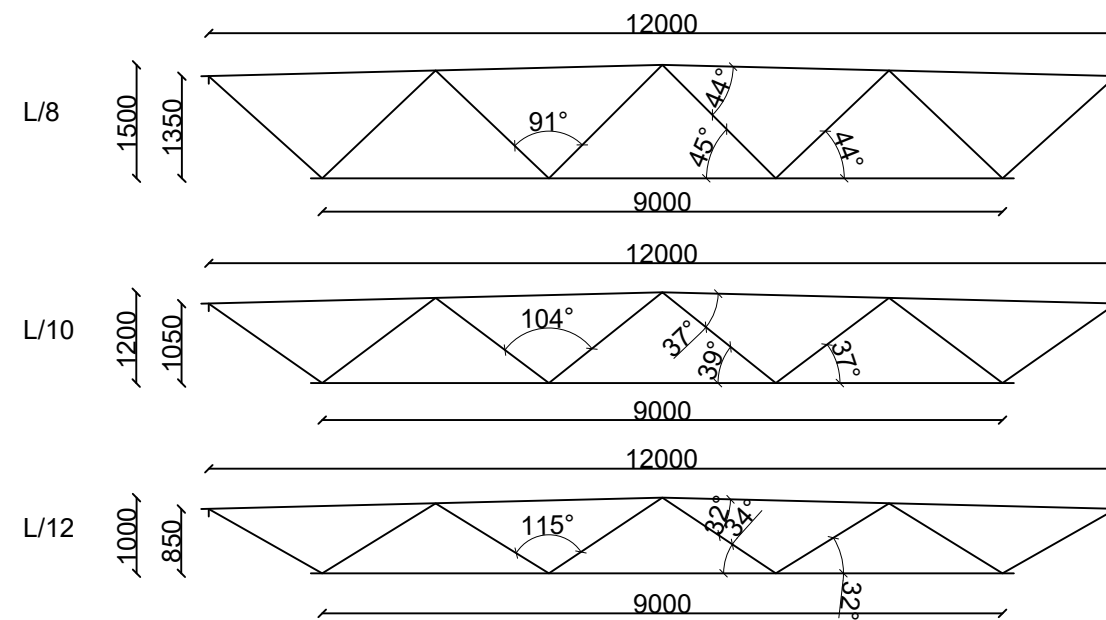
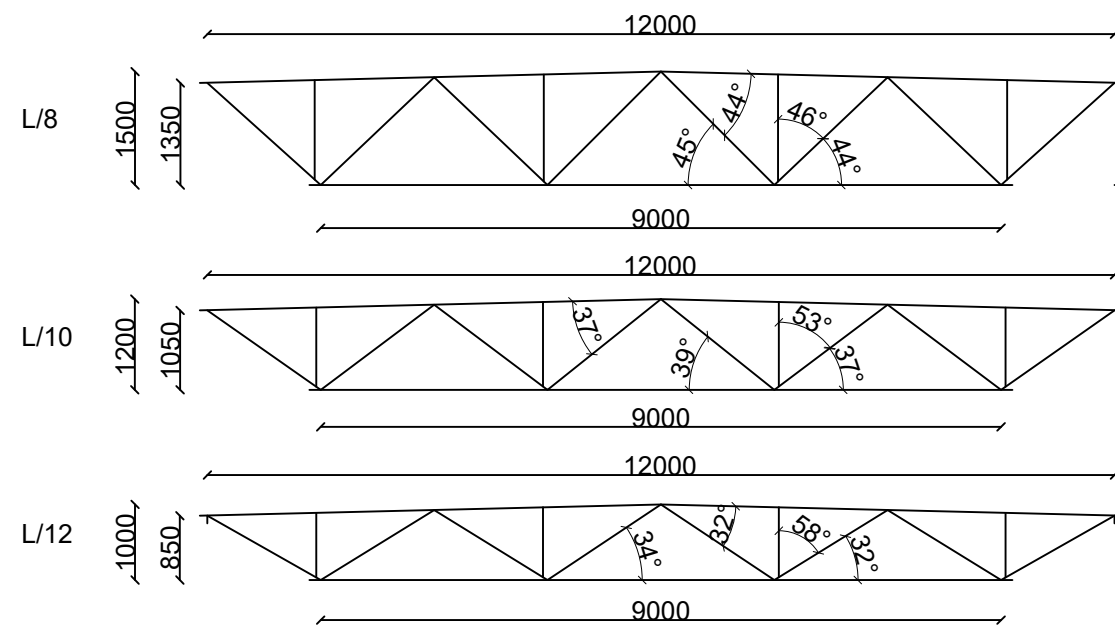
L4.3 Ainult tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega fermi põikjõu epüüri üldkuju.



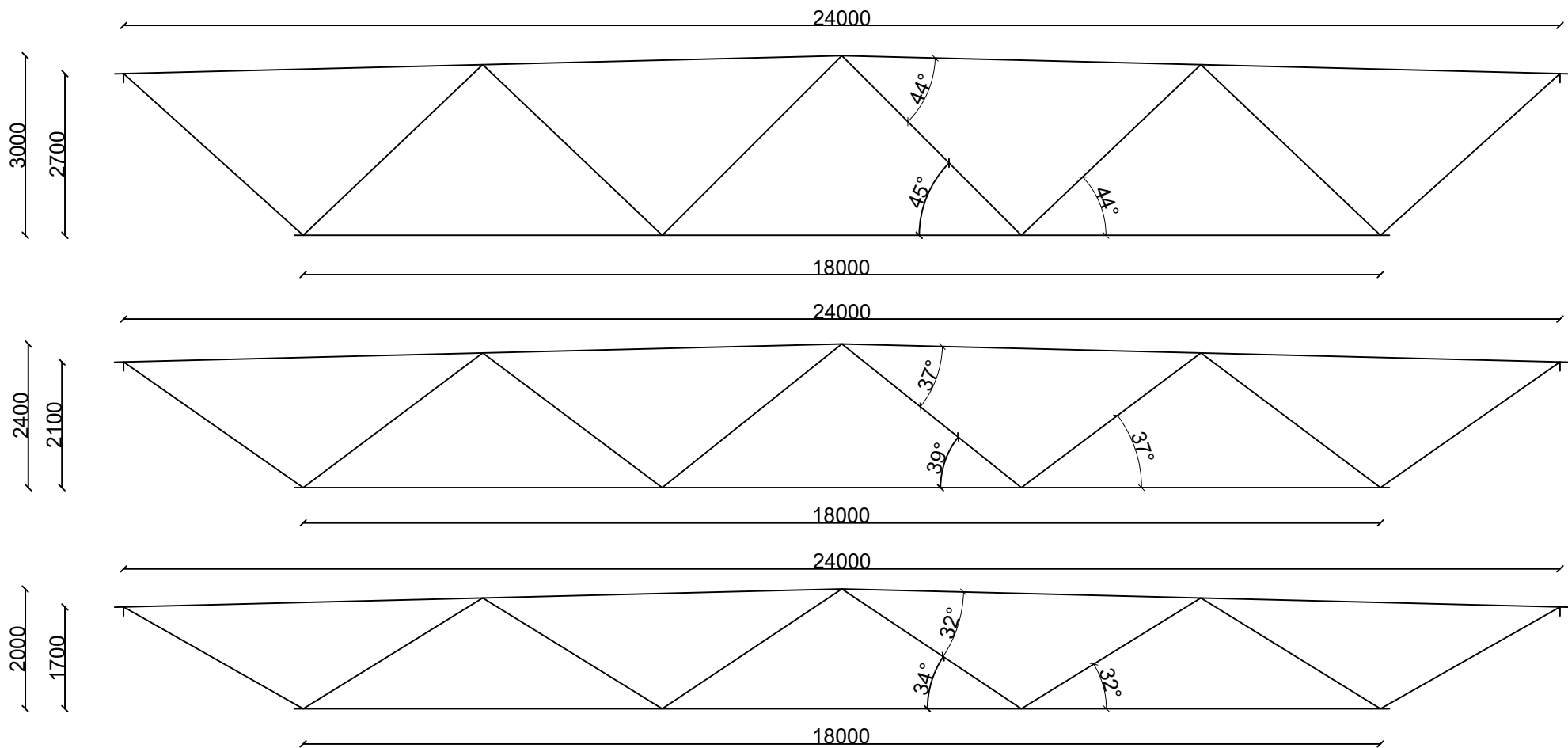
L4.4 Ainult tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega fermi läbipainde üldkuju.



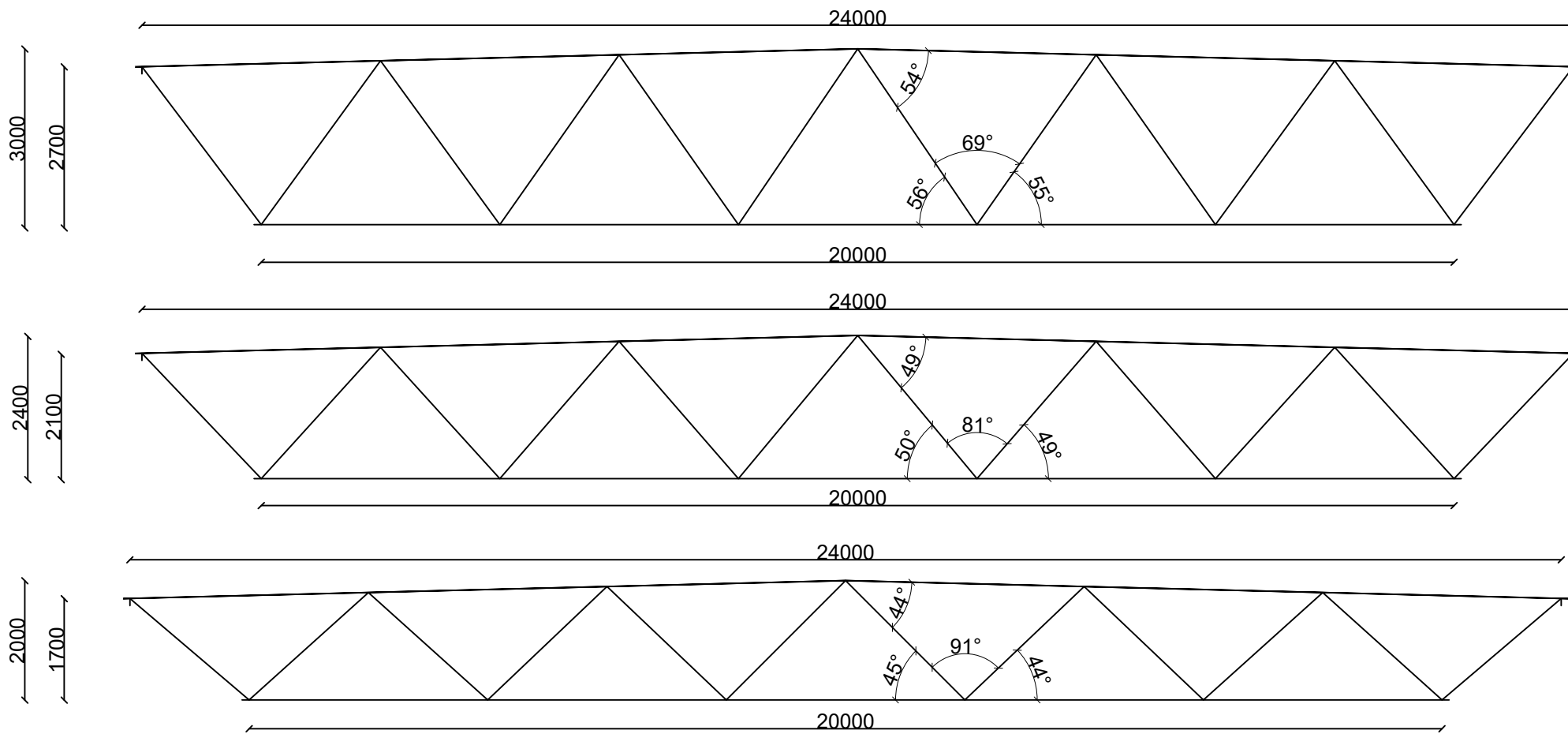
GRAAFILINE OSA




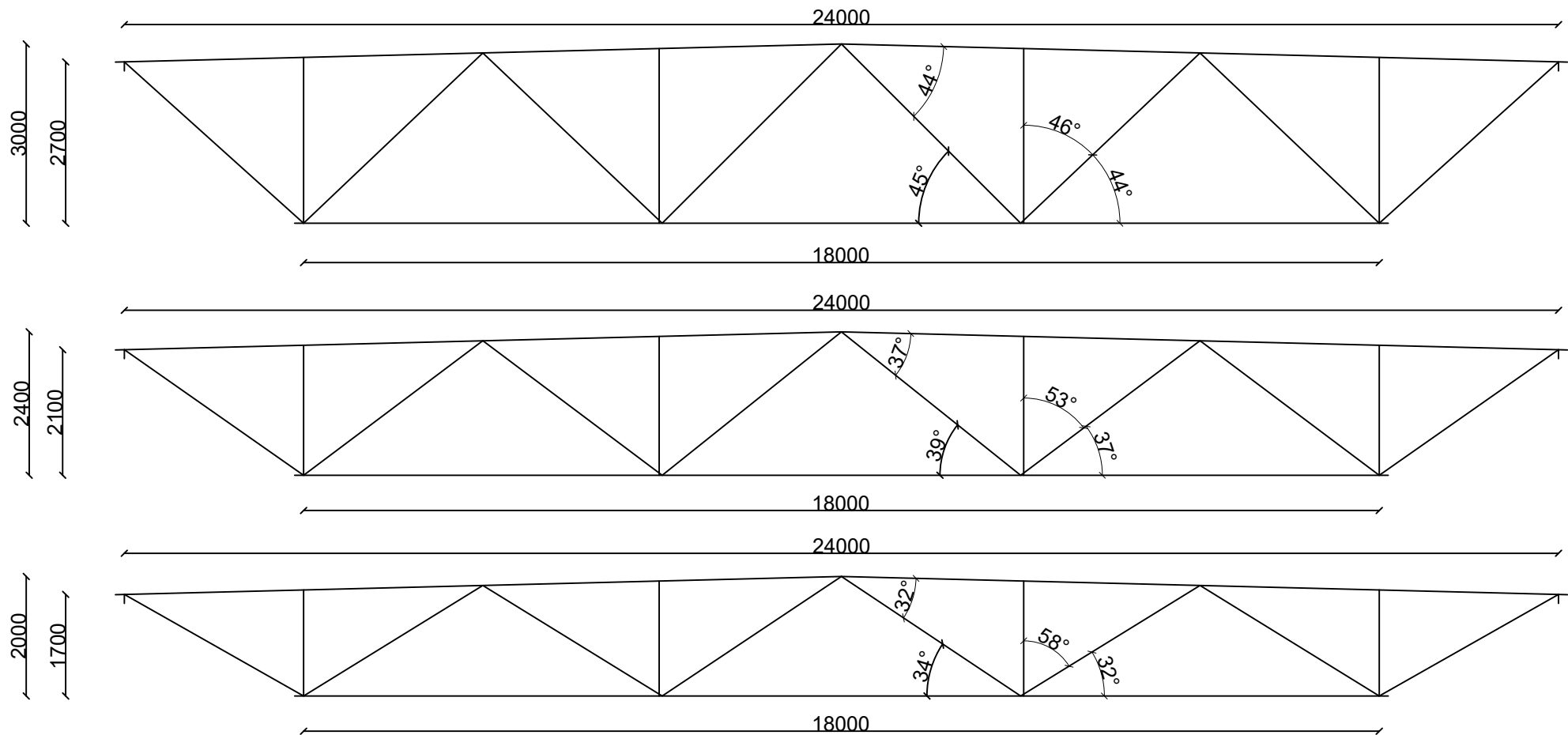
 Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev 10.08.2021
Juhendaja	Ragnar Pabort	
Tartu kolledž		Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral




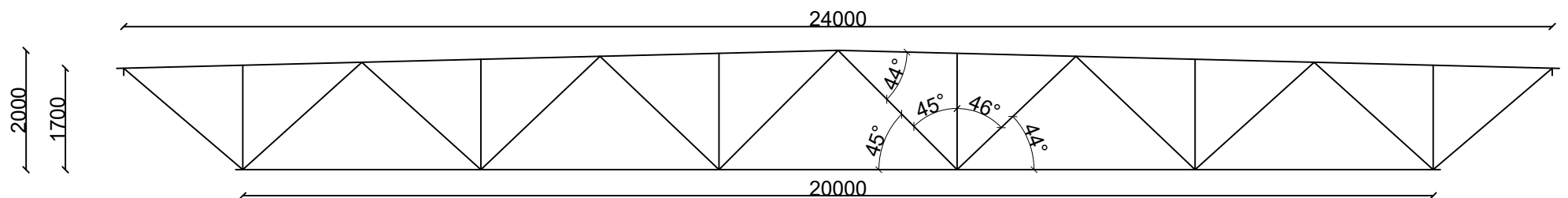
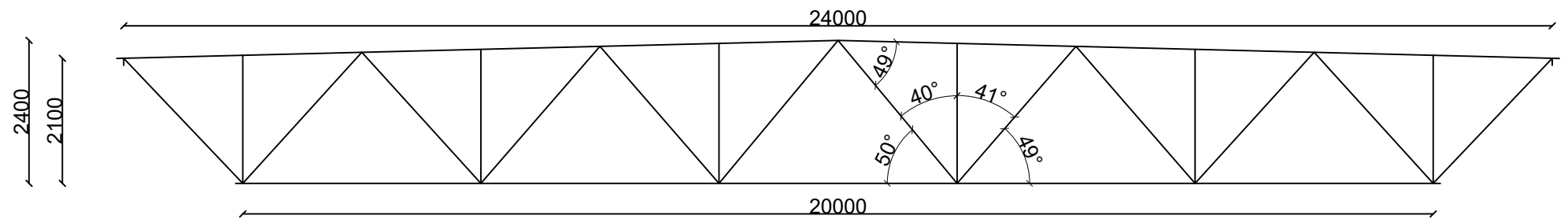
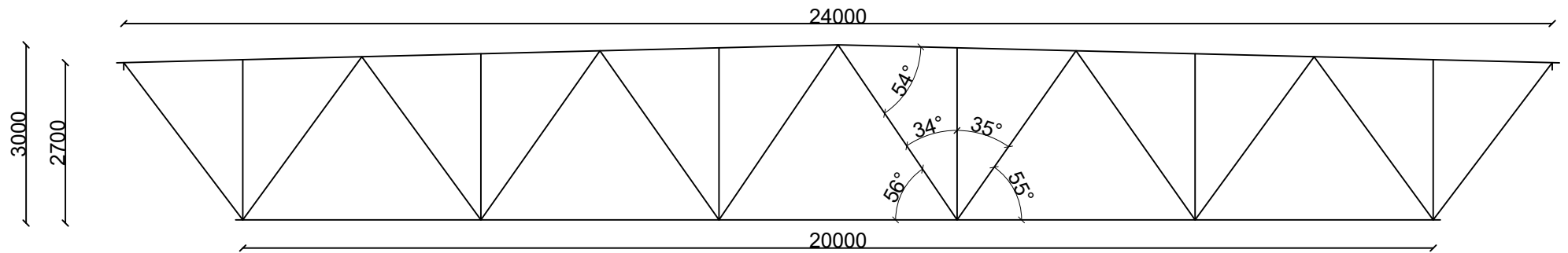
		Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021	24 m sildega ainult diagonaalidega fermid, 3 moodulit	
Juhendaja	Ragnar Pabort				
Tartu kolledž				Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral	




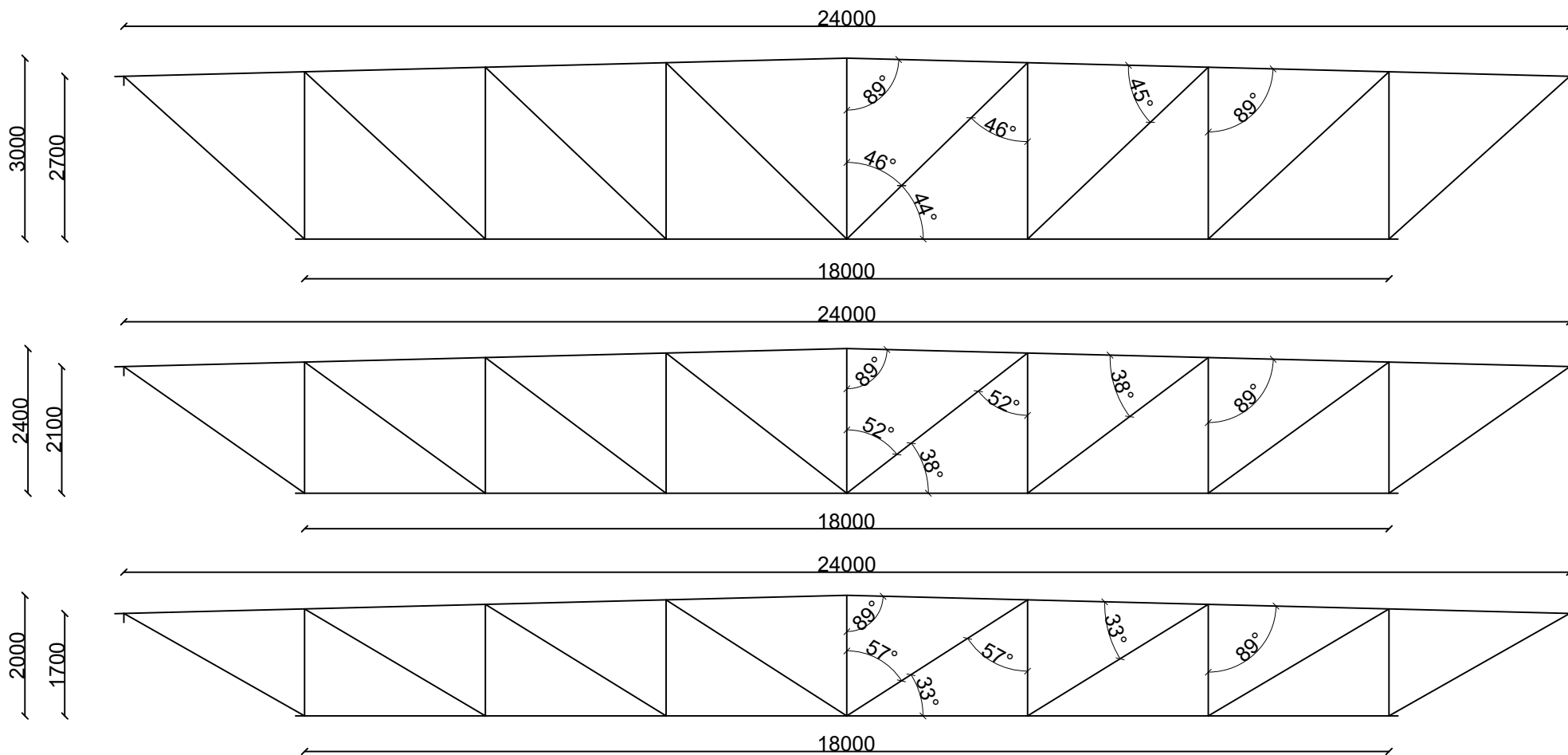
		Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021	24 m ainult diagonaalidega fermid, 5 moodulit	
Juhendaja	Ragnar Pabort				
Tartu kolledž				Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral	




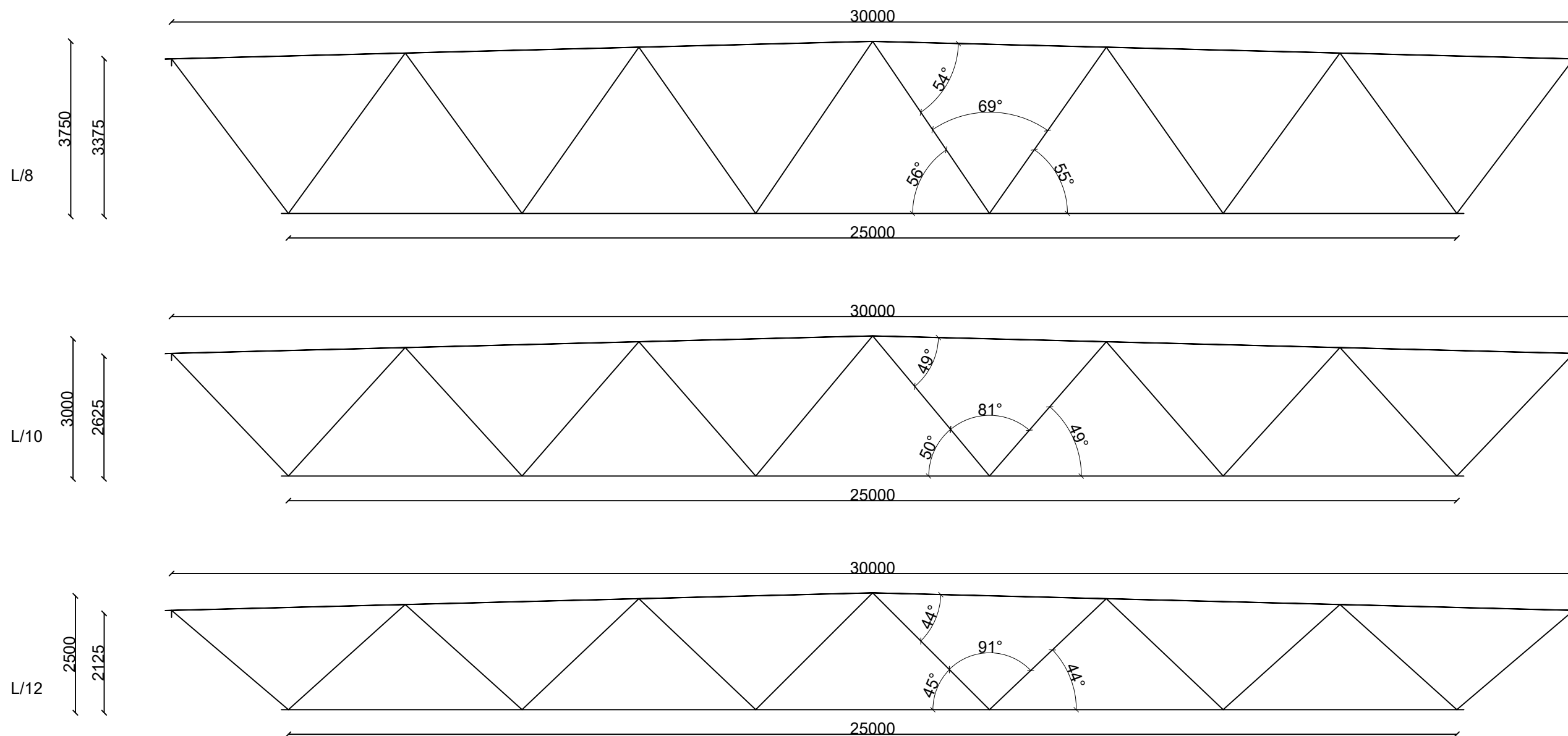
		Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021	24 m sildega postide ja diagonaalidega fermid, 3 moodulit	
Juhendaja	Ragnar Pabort				
Tartu kolledž				Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral	



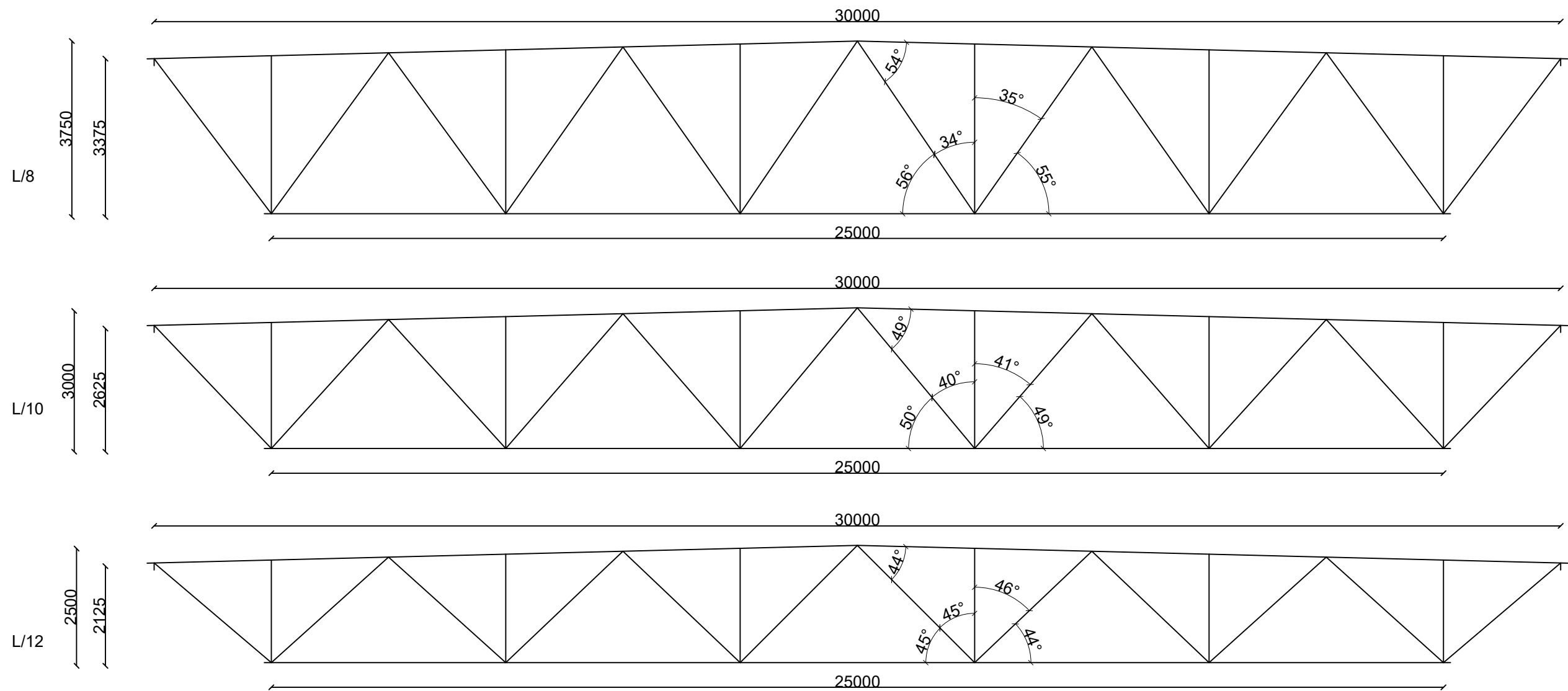
		Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021	24 m sildega postide ja diagonaalidega fermid, 5 moodulit	
Juhendaja	Ragnar Pabort				
Tartu kolledž				Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral	



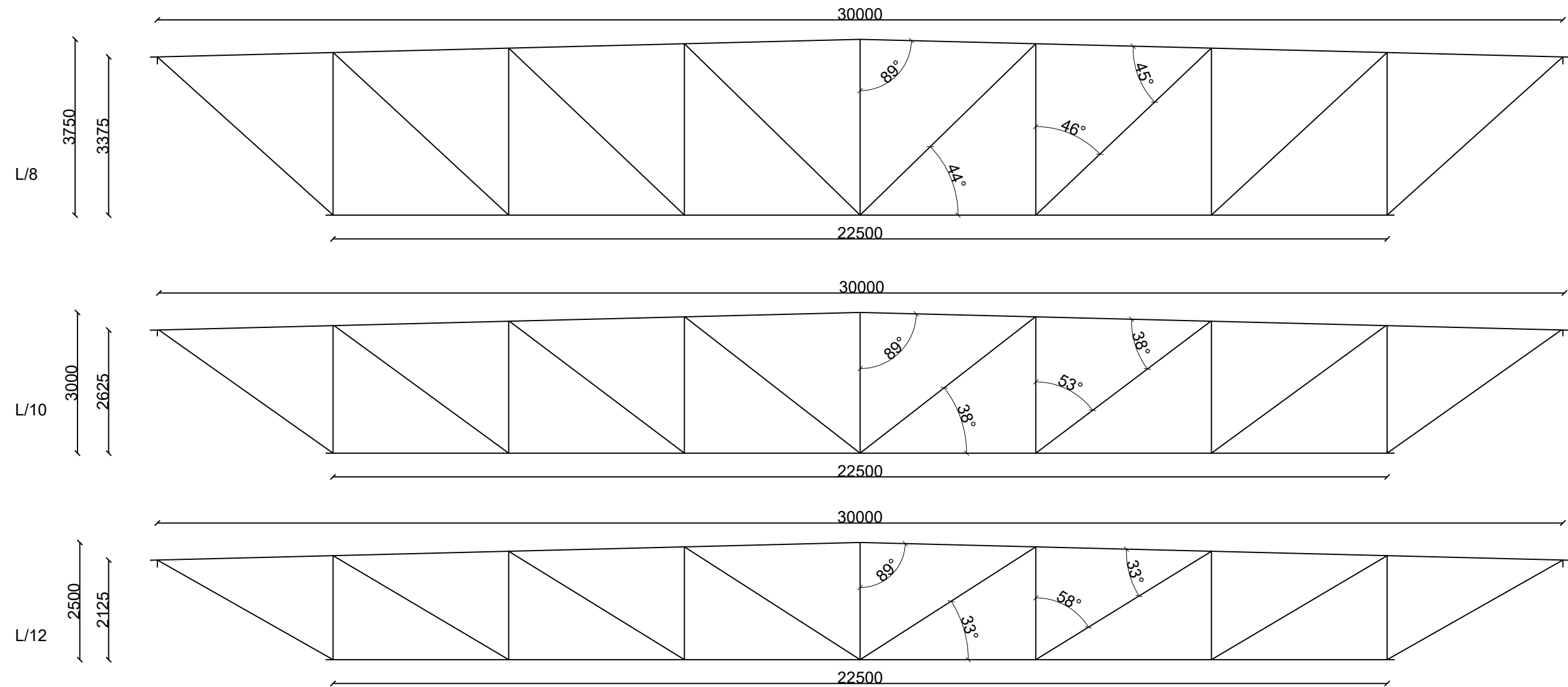
		Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021	24 m sildega tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega fermid	
Juhendaja	Ragnar Pabort				
Tartu kolledž				Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral	




TAL TECH Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021
Juhendaja	Ragnar Pabort	30 m sildega ainult diagonaalidega fermid	
Tartu kolledž		Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral	



TAL TECH		Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021	30 m sildega postide ja diagonaalidega fermid
Juhendaja	Ragnar Pabort			
Tartu kolledž				Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral



 Taltech Inseneriteaduskond		Magistritöö	
Koostaja	Laura Olonen	Kuupäev	10.08.2021
Juhendaja	Ragnar Pabort		
Tartu kolledž			30 m sildega tõmmatud diagonaalide ja surutud postidega fermid Terasest katusesõrestike optimaalsuse võrdlus erinevate sillete korral