



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**ERINEVATE TERASEST JA LIIMPUIDUST
KANDEKONSTRUKTSIOONIDE DIMENSIONEERIMINE JA
MAKSUMUSE VÕRDLEMINE KANEPI COOP KAUPLUSE
NÄITEL**

**DESIGNING DIFFERENT STEEL AND GLULAM LOAD-BEARING
STRUCTURES AND COMPARING COSTS IN EXAMPLE OF KANEPI
COOP STORE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andrus Jaakson

Üliõpilaskood: 165131EAEI

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.

„24“ mai 2021

Autor:

/allkiri/

Töö vastab magistritöö esitatud nõuetele

„.....“ 202....

Juhendaja:

/allkiri/

Kaitsmisele lubatud

„.....“ 202....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/nimi ja allkiri/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Andrus Jaakson

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel, 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.

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andrus Jaakson, 165131EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI02/12Tartu – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine spetsialiseerumisega ehitiste projekteerimine ja arhitektuur

Juhendaja: lektor Ragnar Pabort, tel +372 5340 1460

Lõputöö teema:

Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel

Designing different steel and glulam load-bearing structures and comparing costs in example of Kanepi Coop store

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Dimensioneerida erinevad liimpuidust ning terasest kandekonstruktsioonid
2. Võrrelda kandekonstruktsioonide tootmise maksumusi ning leida hoone jaoks ökonoomsem

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr.	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Koormuste leidmine, arvutusskeemide koostamine, sisejõudude leidmine	31.03.2021
2.	Konstruktsioonide dimensioneerimine, maksumuse arvutamine	30.04.2021
3.	Vormistamine, jooniste tegemine	14.05.2021

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** „24“ mai 2021.a

Üliõpilane: Andrus Jaakson „....“ mai 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Ragnar Pabort „....“ mai 2021.a
/allkiri/

Programmijuht: Aime Ruus „....“ mai 2021.a
/allkiri/

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1 HOONE ÜLEVAADE	8
1.1 Kandestruktsiooni tööpõhimõte	8
1.2 Kandestruktsioonides kasutatavad materjalid	8
2 ARVUTUSMEETODID	10
3 KOORMUSED	11
3.1 Kandepiirteisus	11
3.2 Kasutuspiirteisus	12
3.3 Omakaalukoormus	13
3.4 Lumekoormus	13
3.5 Tuulekoormus	15
3.5.1 Tuulekoormus seintele	17
3.5.2 Tuulekoormus katustele	19
3.6 Koormuskombinatsioonid	20
4 ARVUTUSSKEEMID	22
5 KANDEKONSTRUKTSIOONI DIMENSIONEERIMINE	25
5.1 Teraspostid	26
5.2 Terasferm sõrestikupostidega	35
5.2.1 Ülemise vöö dimensioneerimine	35
5.2.2 Alumise vöö dimensioneerimine	38
5.2.3 Enim koormatud surutud diagonaali dimensioneerimine	40
5.2.4 Võrguvarraste 70x70x3, 50x50x4 ja alumise vöö sõlme kontroll (ülekateta K sõlm)	42
5.2.5 Võrguvarraste 70x70x3, 50x50x3 ja ülemise vöö 140x140x6 sõlme kontroll (ülekateta, tugevdamist vajav K)	49
5.2.6 Terasfermi läbipaine	52
5.3 Terasferm sõrestikupostideta	53
5.4 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega	53
5.5 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta	54

5.6	Terasraam	54
5.6.1	Raami postide nõtkepikkuse tegurite leidmine.....	54
5.6.2	Raami riivide nõtkepikkuse tegurite leidmine	56
5.7	Liimpuidust talad terasest tõmbiga	58
5.8	Sprengeltalad	58
5.9	Puidust raamkonstruktsioon.....	60
5.9.1	Posti ja riivi paindejäiga nurgasõlme dimensioneerimine	61
5.9.2	Posti ja riivi nõtkepikkuse tegurite leidmine	66
6	TULEMUSTE ANALÜÜS	69
6.1	Teraskonstruktsioonide materjali kulu	69
6.2	Puitkonstruktsioonide materjali kulu	70
6.3	Kandekonstruktsioonide maksumuse analüüs.....	71
6.4	Võrdlus varem koostatud magistritöö tulemustega	72
7	KOKKUVÕTE.....	73
8	SUMMARY	74
9	KASUTATUD KIRJANDUS.....	75
	LISAD	77
	Lisa 1 Terasferm sõrestikupostidega, sisejõud	78
	Lisa 2 Terasferm sõrestikupostideta, sisejõud	80
	Lisa 3 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega, sisejõud	82
	Lisa 4 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta, sisejõud.....	84
	Lisa 5 Liimpuidust talad terasest tõmbiga, sisejõud	86
	Lisa 6 Sprengeltalad, sisejõud	88
	Lisa 7 Puidust raamkonstruktsioon, sisejõud	90
	Lisa 8 Terasest raamkonstruktsioon	94
	Lisa 9 Terasposti paindemomendid.....	98
	Lisa 10 Katusekonstruktsioonide maksimaalsed läbipainded kasutuspiiriseisundis ...	99
	Lisa 11 Toereaktsioonid kandeveerprofiilplekist	104
	GRAAFILINE OSA.....	105

SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö teemaks on erinevate liimpuidust ja terasest kandekonstruktsioonide maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel. Magistritöö eesmärk on välja selgitada põhiline kandekonstruktsioon, mille tootmine on Kanepi Coop kaupluse ehitamiseks kõige odavam. Tegemist on praktilise ülesandega, kuna Põlva Tarbijate Ühistu soov on, et hoone saaks püstitatud võimalikult väikeste kuludega. Kandekonstruktsioonid on projekteeritud võimalikult optimaalselt, lähtudes Eesti Vabariigis kehtivatest standarditest ning arhitektuursetest ja konstruktiivsetest nõuetest.

Magistritöö põhiosa jaotub kuueks:

- 1) Hoone ülevaade, kus tutvustatakse hoonet, selle kasutusotstarvet, kandekonstruktsiooni tööpõhimõtet ning kandekonstruktsioonides kasutatavaid materjale.
- 2) Arvutusmeetodid, kus tutvustatakse kandekonstruktsiooni dimensioneerimise meetodeid.
- 3) Koormused, kus leitakse kandekonstruktsioonile mõjuvad omakaalu-, lume- ja tuulekoormused.
- 4) Arvutusskeemid, kus tutvustatakse erinevate konstruktsioonilahenduste arvutusskeeme.
- 5) Kandekonstruktsioonide dimensioneerimine
- 6) Kandekonstruktsioonide maksumuse analüüs, kus võetakse kokku tulemused ning leitakse kõige ökonoomsem tulemus antud hoone jaoks.

Kandekonstruktsioonile mõjuvad koormused on võetud toereaktsioonidena programmist *Poimu*, kuna katusekandjatele jaotatakse koormus jätkuvtala skeemiga töötava kandeprofiilplekiga, ning kandekonstruktsiooni sisejõud on leitud programmiga *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020* ning need on esitatud lõputöö lisas. Arvutused on tehtud programmiga *Mathcad Prime 2.0* ning need on esitatud põhiosas. Programmiga *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020* tehtud arvutuste tulemused on esitatud tabelina.

Võtmesõnad: Teraskonstruktsioonid, liimpuitkonstruktsioonid, võrdlemine, maksumus, magistritöö.

1 HOONE ÜLEVAADE

Kanepi Coop kauplus on üldplaanis ristikülikukujuline ning planeeritud monteeritavatest elementidest. Hoone mõõtmed on 33,4 x 28,9 m, hoone kõrgus on 7,78 m. Hoonel on 15 kraadise kaldega viilkatus. Hoone on projekteeritud ühekorruselisena. Põhilise kandevkonstruktsiooni sildeava on 21,45 m. Kandevkonstruktsiooni samm on 5,6 m. Hoone kasutusviis on IV (kaubandushoone) ning tulepüsivusklass TP3. Kandevkonstruktsioonile tulepüsivusnõudeid ei esitata. [1]

1.1 Kandevkonstruktsiooni tööpõhimõte

Projekteerimisel on lähtutud arhitektuursest eelprojektist. Katusele mõjuvad koormused võetakse vastu kandeprofiilplekiga ning jaotatakse katusekonstruktsioonide vahel. Katusekonstruktsioonid jaotavad koormused postide kaudu vundamentidesse. Hoone jäikus on tagatud kandva profiilplekiga, mis töötab jäikusdiafragmana ja horisontaal- ning diagonaalsidemetega. Kandeprofiilpleki jäikusdiafragmana töötamise eelduseks on kandeprofiili piisav kinnitus katusekandjate ning horisontaalsidemetega. Jäikussüsteem võtab vastu vertikaalsed koormused ning need suunatakse vundamenti.

1.2 Kandevkonstruktsioonides kasutatavad materjalid

Projekteerimisel kasutatakse terast tugevusklassiga S355 ning lamell-liimpuitu tugevusklassiga GL28h.

Terase omadused [4]:

- Voolavuspiir $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
- Tõmbetugevus (sõltub terase paksusest) $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$
- Elastsusmoodul $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

Lamell-liimpuidu omadused [5]:

- Paindetugevus $f_{m,k} = 28 \text{ N/mm}^2$
- Survetugevus pikikiudu $f_{c,0,k} = 28 \text{ N/mm}^2$
- Survetugevus ristikiudu $f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$
- Nihketugevus $f_{v,g,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$
- Elastsusmoodul $E_{0,05} = 10\,500 \text{ N/mm}^2$

2 ARVUTUSMEETODID

Käesolevas magistritöös dimensioneeritakse hoone peamised kandekonstruktsioonid:

- 1) Katusekonstruktsioonid (nii teras- kui ka puitkonstruktsioonid). Terasfermide puhul kontrollitakse ka fermi sõlmede kandevõimet
- 2) Teraspostid

Tarinditele leitakse järgmised mõjuvad koormused: omakaal, lumekoormus ning tuulekoormus. Koormuste leidmisel arvestatakse hoone geograafilist asukohta, mis mõjutab lume- ja tuulekoormusi. Sisejõudude leidmiseks koostatakse koormustest koormuskombinatsioonid kande- ja kasutuspiirseisundis. Piirseisundite osavarutegurid ning kombinatsioonitegurid leitakse vastavalt kehtivale standardile.

Kandeprofiilplekk dimensioneeritakse programmiga *Poimu* ning leitakse koormused kõige rohkem koormatud katusekonstruktsioonile. Programmi sisestatakse koormuste arvutuste tulemused ning dimensioneeritakse kandeprofiilplekk. Toereaktsioonid võetakse *Poimu*-st, kuna kandeprofiilplekk jaotab koormuse konstruktsioonidele jätkuvtala skeemi kohaselt, mistõttu jaotub teisele ja eelviimasele kandurile suurem koormus kui lihttala skeemi järgi koormates. Programmiga *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020* koostatakse koormuskombinatsioonid, leitakse maksimaalsed sisejõud ning dimensioneeritakse kandekonstruktsioonid. Lisaks sellele on mõned arvutused tehtud programmiga *Mathcad Prime 2.0*.

3 KOORMUSED

Hoone projekteerimisel tuleb lähtuda normkoormustest, mis on leitud vastavalt arhitektursele lahendusele ning kehtivatele standarditele. Omakaalukoormus arvutatakse lähtudes hoone arhitektuurist, lumekoormus leitakse vastavalt hoone geograafilisele paiknemisele ning tuulekoormus arvutatakse hoone osadele, lähtudes maastikutüübist ning hoone kõrgusest. Neid koormusi kombineerides saab leida kande- ja kasutuspiirseisundeid.

3.1 Kandepiirseisund

Olukord, mis eelneb konstruktsiooni purunemisele või stabiilsuse kaotusele. Kandepiirseisundi alaliskoormuse osavaruteguri väärtuseks võetakse $\gamma_G = 1,2$ ja muutuvkoormuse osavaruteguri väärtuseks $\gamma_Q = 1,5$. Alaliskoormuse soodsa mõju korral kasutatakse osavaruteguri väärtust $\gamma_{G,inf} = 1,0$. Kui samaaegselt mõjuvad mitmed koormused, siis eristatakse domineerivat muutuvkoormust ning muud muutuvkoormust. Koormuskombinatsioonides esitatakse domineerivad ja muud muutuvkoormused, rakendades kombinatsioonitegureid ψ_0 , ψ_1 ja ψ_2 . [2]

Koormuskombinatsioon alaliste või ajutiste arvutusolukordade jaoks [2, lk 43, valem 6.10):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.1)$$

kus

γ_G – alaliskoormuse osavarutegur;

G – alaliskoormuse normväärtus kN, kN/m või kN/m²;

γ_P – eelpingestusjõu osavarutegur;

P – eelpingestusjõu normväärtus kN, kN/m või kN/m²;

γ_Q – muutuvkoormuse osavarutegur;

Q – muutuvkoormuse normväärtus kN, kN/m või kN/m²;

ψ_0 – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur.

Tabel 3.1. Käesolevas töös kasutatud osavarutegurid kandepiirseisundis [2]

Koormuse liik	Osavaruteguri tähis	Osavaruteguri väärtus
Alalised koormused kandepiirseisundis (ebasoodne mõju)	$\gamma_{G,sup}$	1,2
Alalised koormused kandepiirseisundis (soodne mõju)	$\gamma_{G,inf}$	1,0
Muutuvkoormused kandepiirseisundis	γ_Q	1,5

3.2 Kasutuspiirseisund

Piirseisund, mille puhul peavad hoone normaalse kasutamise tingimused olema täidetud. Hoone välimus peab olema vastuvõetav, hoone deformatsioonid ei tohi takistada sihtotstarbelist kasutamist ning kahjustada mittekandvaid elemente. Kasutuspiirseisund võib olla taastuv või taastumatu sõltuvalt sellest, kas koormuse põhjustatud tagajärjed jäävad alles või kaovad. Taastumatute kasutuspiirseisundite puhul kasutatakse normkombinatsiooni ning taastuvate kasutuspiirseisundite puhul kasutatakse tavakombinatsiooni. Kõikides kasutuspiirseisundi kombinatsioonides kasutatakse koormuste normatiivseid väärtusi. [2]

Kasutuspiirseisundi normkombinatsioon [2, lk 45, valem 6.14b]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.2)$$

Tabel 3.2. Käesolevas töös kasutatud kombinatsioonitegurid [2]

Koormuse liik	ψ_0
Lumekoormus	0,5
Tuulekoormus	0,6

3.3 Omakaalukoormus

Omakaaluks loetakse konstruktsioonide omakaalu, nendele kinnitatud seadmete kaalu ning samuti pinnase kaalu [3]. Hoone konstruktsioonidele mõjuv omakaalukoormus arvutatakse lähtudes eelprojektis kirjeldatud tarinditüüpidele.

Tabel 3.3. Katuslae omakaalukoormused [1], [16], [8], [17], [18], [19], [20], [21]

Materjal	Paksus, mm	Mahukaal, kN/m ³	Normkoormus, kN/m ²
Classic profiilplekk	0,6	-	0,062
Terasroov, samm 300 mm	0,5	78,5	0,020
Distantssliist 50x50 mm, samm 600 mm	-	6	0,025
Veeauru difusiooni läbilaskev aluskate 0,2 mm	-	-	0,002
Mineraalvill soojustus, termoroovid 150 mm, samm 600	150	0,7	0,136
Aurutõke (SBS kate) TL2			0,04
Jäik mineraalvillaplaat (OL-TOP) 70 mm	70	1,25	0,088
		Kokku	0,373

Lisaks arvestatakse omakaalu hulka ka päikesepaneelide kaal koos nende kinnituskonstruktsioonidega. Kuigi esialgu pole projektis päikesepaneele ette nähtud, siis pole välistatud, et tulevikus neid paigaldada soovitakse. Seega lisandub katusele päikesepaneelide koormus 0,4 kN/m². Lisaks sellele arvestatakse katusele riputuskoormus 0,1 kN/m² kommunikatsioonide ja tehnosüsteemide kinnitamiseks. Kogukoormus kandevprofiilplekile on seega 0,873 kN/m².

3.4 Lumekoormus

Lumekoormus on muutuvkoormus ning selle määramisel on arvestatud katuse kujuga ning samuti lume võimaliku paiknemisega nii tuulise kui ka tuulevaikse ilmaga. Lumekoormuse hulka arvestatakse ka lume sees või all olev vesi või jäide. Lumekoormuse all ei käsitleta kõrgemalt kukkuvat lume löökkoormust, jääkoormust ning lumest tekkivat horisontaalkoormust. Lumekoormuse normsuurus maapinnal s_k määratakse lumekoormuse kaardilt vastavalt ehitise geograafilisele asukohale. [6]

Katuse lumekoormuse normsuurus leitakse valemiga [6, lk 18, valem 5.1]:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (3.3)$$

kus

- μ_i - Lumekoormuse kujutegur vastavalt katuse kaldenurgale
- C_e - Avatustegur, 1,0
- C_t - Soojustegur, 1,0
- s_k - Lumekoormuse normsuurus maapinnal

Kuna katuse kaldenurk $\alpha = 15^\circ$, siis $\mu_1 = 0,8$. [6, tabel 5.2]

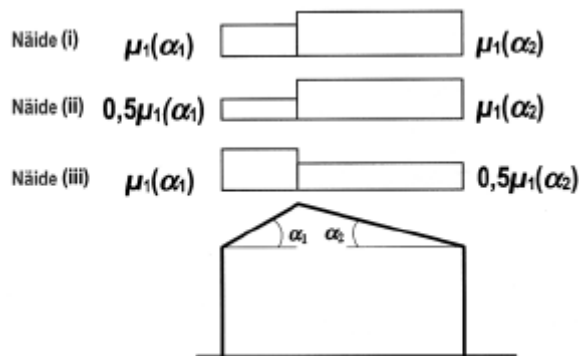
Hoone asub Kanepis, Põlvamaal, seega lumekoormuse normsuurus maapinnal on $s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$. [6, joonis NA.4.1]

Katuse lumekoormuse normsuurus vastavalt valemile (3.3):

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

Kahekaldelisel katusel käsitletakse lumekoormust kolmel erineval variandil [6]:

- 1) kui koormus on kõikjal ühtlane
- 2) kui koormus ühel pool katust on pool katuse teise poole lumekoormusest ja vastupidi.



Joonis 3.1. Viilkatuse lumekoormuse kujutegurid [6]

Lumekoormuse arvutamisel eeldatakse, et päikesepaneelid paigaldatakse suhteliselt madala nurga alla ja need ei põhjusta lume kuhjumist, kuid lume kuhjumine on võimalik madalamal asuvatele katuseosadele. Arvestades lume puistemahukaaluks 2 kN/m^3 [6] peab takistus katuse pinnast olema vähemalt $(1,2 \text{ kN/m}^2)/(2 \text{ kN/m}^3) = 0,6 \text{ m}$ kõrgem, et saaks tekkida lume kuhjumine.

3.5 Tuulekoormus

Tuulekoormus on muutuvkoormus. Tuulekoormus esitatakse hoonele staatiliste rõhkude või jõudude kombinatsioonina. Tuulekoormus näidatakse mõjuvana risti konstruktsiooni pinda. Tuulekoormuse suurus sõltub hoone kõrgusest ja tuule kiirusest, mis omakorda sõltub maastikutüübist. [7] Antud juhul on hoone projekteerimise piirkonnas maastikutüübiks III (Maastik, mis on kaetud ühtlase taimkatte või ehitistega või üksikute takistustega, mille vahekaugus ei ole suurem 20 kordsest kõrgusest). Antud juhul leitakse tuule välisrõhk piiretele. Tuule siserõhku ei võeta arvesse, kuna tavaolukorras arvestatakse ukсед ja aknad suletuks. Kui lisatakse päikesepaneelid, siis muutub katuse pind nii-öelda „karedamaks“ ja peaks kindlasti arvestama ka tuule hõõrdega pinnale. See aga mõjutab jäikussidemeid, kuna koormus liigub nendesse (antud töös ei kajastata nende arvutust).

Konstruktsiooni välispiiretele mõjuv tuulerõhk leitakse valemiga [7, lk 24, valem 5.1]:

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe} \quad (3.4)$$

kus $q_p(z_e)$ on kiirusrõhk N/m^2

z_e - arvutuskõrgus, m

c_{pe} - välisrõhutegur

Tuule kiirusrõhk arvutatakse valemiga [7, lk 23, valem 4.8]:

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] * \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) \quad (3.5)$$

kus

z - Hoone arvutuskõrgus, m

I_v - Turbulentsi intensiivsus

ρ - Õhu tihedus. Soovituslik väärtus $1,25 \text{ kg/m}^3$

v_m - Keskmine tuulekiirus m/s

Turbulentsi intensiivsus arvutatakse valemiga [7, lk 22, valem 4.7]:

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.6)$$

kus

- k_1 - Turbulentsitegur. Soovituslik väärtus on 1,0
- c_0 - Pinnavormitegur. Väärtus 1,0 [7, lk 19, valem 4.3]
- z_0 - Karedusmõõt. Väärtus 0,3 [7, tabel 4.1]

Keskmine tuulekiirus leitakse valemiga [7, lk 19, valem 4.3]:

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (3.7)$$

kus

- c_r - Karedustegur
- v_b - Tuule baaskiirus

Karedustegur leitakse valemiga [7, lk 19, valem 4.4]:

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.8)$$

kus

- k_r - Maastikutüübitegur

Maastikutüübitegur leitakse valemiga [7, lk 20, valem 4.5]:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (3.9)$$

kus

- $z_{0,II}$ - 0,05 m (maastikutüüp II)

Tuule baaskiirus arvutatakse valemiga [7, lk 18, valem 4.1]:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (3.10)$$

kus

- c_{dir} - Suunategur. Soovituslik väärtus 1,0
- c_{season} - Aastaajategur. Soovituslik väärtus 1,0
- $v_{b,0}$ - Tuule põhiline baaskiiruse väärtus. Eestis 21 m/s

Tuule baaskiirus vastavalt valemile (3.10):

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} = 1 * 1 * 21 = 21 \frac{m}{s}$$

Maastikutüübitegur vastavalt valemile (3.9):

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 * \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,2154$$

Karedustegur vastavalt valemile (3.8):

$$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0,2154 * \ln \left(\frac{7,78}{0,3} \right) = 0,7012$$

Keskmine tuulekiirus vastavalt valemile (3.7):

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b = 0,7012 * 1 * 21 = 14,7252 \text{ m/s}$$

Turbulentsi intensiivsustegur vastavalt valemile (3.6):

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) * \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} = \frac{1}{1 * \ln \left(\frac{7,78}{0,3} \right)} = 0,3072$$

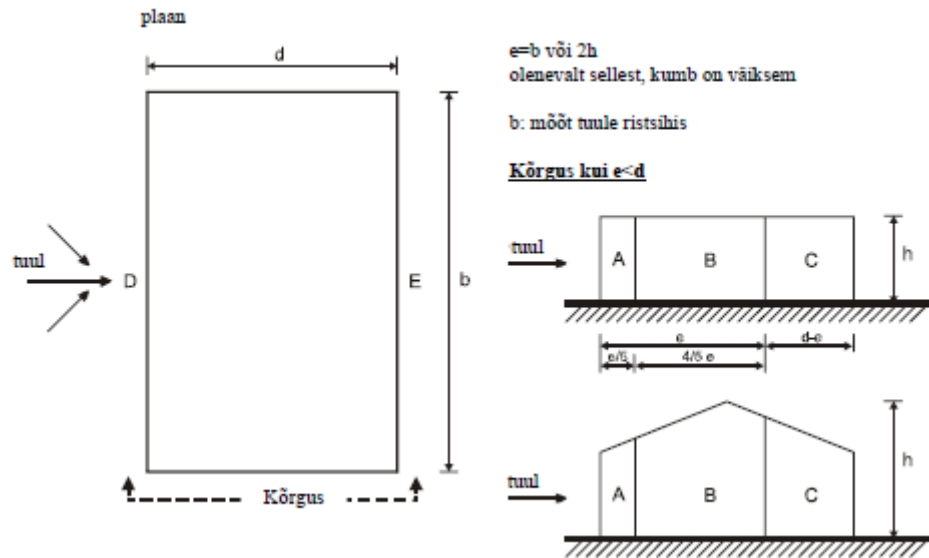
Tuule kiirusrõhk vastavalt valemile (3.5):

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] * \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = [1 + 7 * 0,3072] * \frac{1}{2} * 1,25 * 14,7252^2 = 427 \text{ N/m}^2$$

Kuna tuulega koormatud pinna suurus ületab 10 m², siis kasutatakse arvutustes välisrõhutegurit $c_{pe,10}$.

3.5.1 Tuulekoormus seintele

Ristkülikukujulise põhiplaaniga hoone, mille kõrgus on väiksem tuulele avatud külje laiuselt, tuleks vaadelda üheosalisena, ehk kogu hoone kõrguses on kiirusrõhk sama väärtusega. Kuna hoone kõrgus on väiksem, kui hoone laius tuule mõjumise suuna sihis, siis võib seinadele mõjuvat resultantkoormust vähendada teguriga 0,85. [7, jaotis 7.2.2] Siiski antud magistritöös seda võimalust ei kasutata, et tulemused oleksid tagavara kasuks.



Joonis 3.2. Tuulerõhu tsoonide leidmine välisseintele

Tabel 3.3. Välisrõhutegurid riskülikulise põhiplaaniga hoonete vertikaalsetele seintele

Tsoon	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

$$b = 33,39 \text{ m} > 2 * h = 2 * 7,78 \text{ m} = 15,56 \text{ m} \rightarrow e = 15,56 \text{ m}$$

$$d = 21,84 \text{ m}$$

$$\frac{h}{d} = \frac{7,78}{21,84} = 0,36$$

Interpoleeritud välisrõhutegurid on toodud tabelis 3.4.

3.3. Interpoleeritud välisrõhutegurid

Tsoon	A	B	C	D	E
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
0,36	-1,2	-0,8	-0,5	0,715	-0,329

Välisseintele mõjuvad tuulerõhud w_e leitakse vastavalt valemile (3.4):

$$w_{e,A} = 0,427 * (-1,2) = -0,512 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,B} = 0,427 * (-0,8) = -0,342 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

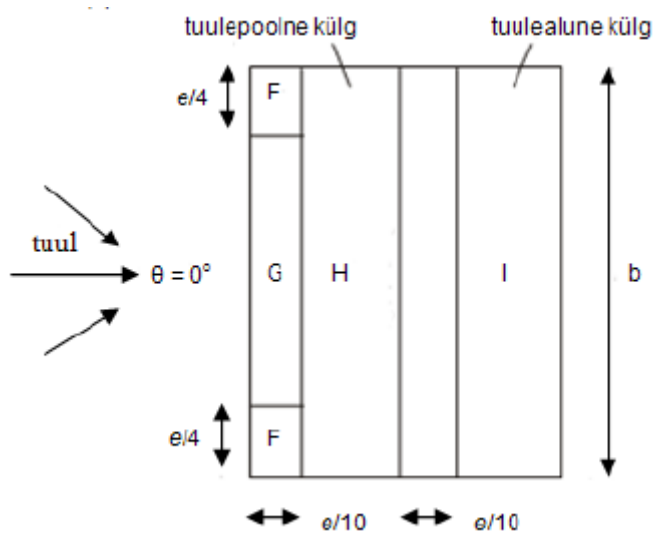
$$w_{e,C} = 0,427 * (-0,5) = -0,214 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,D} = 0,427 * 0,715 = 0,305 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,E} = 0,427 * (-0,329) = -0,141 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

3.5.2 Tuulekoormus katustele

Käesoleval juhul on katuse tüübiks kahekaldeline katuse.



Joonis 3.3. Tuulerõhu tsoonide leidmine kahekaldelisele katusele

Tabel 3.4. Välisrõhutegurid kahekaldelisele katusele (tuule suund 0°).

Katuse kaldenurk α	F	G	H	I	J
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
15°	-0,9	-0,8	-0,3	-0,4	-1,0
	+0,2	+0,2	+0,2	+0,0	+0,0

Kahekaldelise katuse tsoonidele mõjuvad tuulerõhud w_e leitakse vastavalt valemile

(3.4):

$$w_{e,F} = 0,427 * (-0,9) = -0,384 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,G} = 0,427 * (-0,8) = -0,342 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,H} = 0,427 * (-0,3) = -0,128 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,I} = 0,427 * (-0,4) = -0,171 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,E} = 0,427 * (-1,0) = -0,427 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kahekaldelise katuse tsoonidele mõjuvad tuulerõhud w_e , kui tuulele avatud katusepoolt surutakse, leitakse vastavalt valemile (3.4):

$$w_{e,F} = 0,427 * 0,2 = 0,085 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,G} = 0,427 * 0,2 = 0,085 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,H} = 0,427 * 0,2 = 0,085 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,I} = 0,427 * (-0,4) = -0,171 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,E} = 0,427 * (-1,0) = -0,427 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

3.6 Koormuskombinatsioonid

Kõige kriitilisemad sisejõud on leitud, kasutades koormuskombinatsioone. Konstruktsiooni kandevõime arvutuseks on leitud kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid ning konstruktsiooni lubatud deformatsioonide arvutuseks on leitud kasutuspiirseisundi kombinatsioonid.

Kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid

1. $\gamma_{G,sup} * omakaal + \gamma_Q * lumi + \psi_0 * \gamma_Q * tuul_{tõstev}$
2. $\gamma_{G,sup} * omakaal + \psi_0 * \gamma_Q * lumi + \gamma_Q * tuul_{tõstev}$
3. $\gamma_{G,sup} * omakaal + \gamma_Q * lumi + \psi_0 * \gamma_Q * tuul_{suruv}$
4. $\gamma_{G,sup} * omakaal + \psi_0 * \gamma_Q * lumi + \gamma_Q * tuul_{suruv}$
5. $\gamma_{G,sup} * omakaal + \gamma_Q * lumi$
6. $\gamma_{G,inf} * omakaal + \gamma_Q * tuul_{tõstev}$

Kasutuspiiriseisundi koormuskombinatsioonid

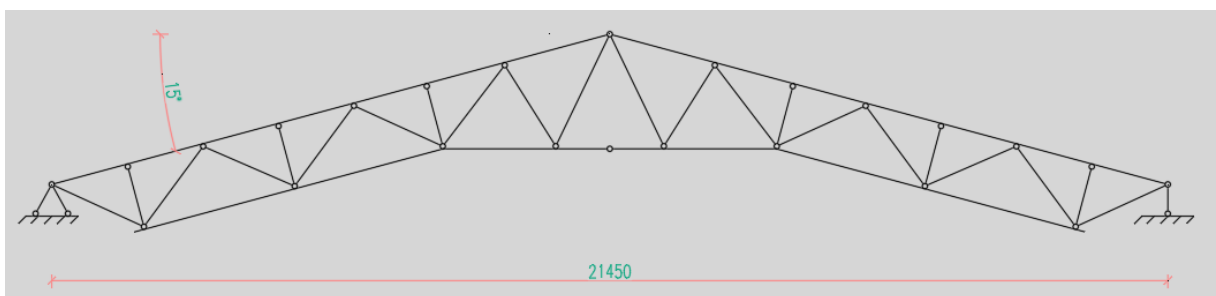
1. $omakaal + lumi + \psi_0 * tuul_{suruv}$
2. $omakaal + tuul_{suruv}$

Erakorralise arvutusolukorra koormuskombinatsioon

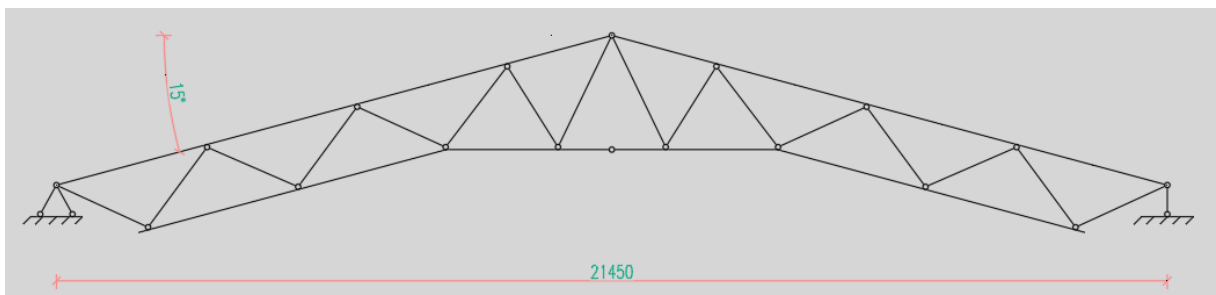
1. $omakaal + tuul_{siserõhk+välisrõhk} + \psi_1 * lumi$

4 ARVUTUSSKEEMID

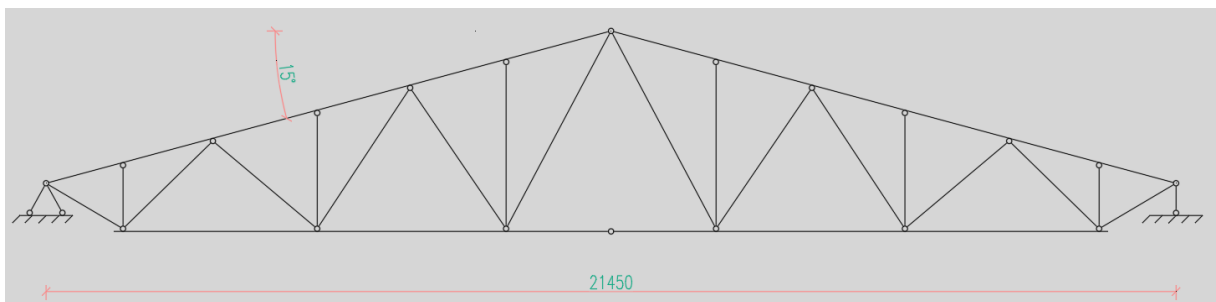
Sisejõudude leidmiseks ning konstruktsiooni dimensioneerimiseks koostati arvutuskeemid, mis kirjeldaksid võimalikult täpselt tegelikku olukorda. Katusekonstruktsiooni tugi postile ja fermi sõrestikuelementide otsaühendused on arvestatud liigenditena. Puitkonstruktsiooni ühendussõlmed on arvestatud samuti liigenditena. Raamkonstruktsioonide puhul on nurgasõlm arvestatud jäigaks ühenduseks ning harjasõlm ja vundamendisõlmed liigenditeks. Alljärgnevalt on toodud erinevate kandekonstruktsiooni lahenduste dimensioneerimiseks nende arvutuskeemid kuvatõmmisena programmist *Autodesk AutoCad 2021*.



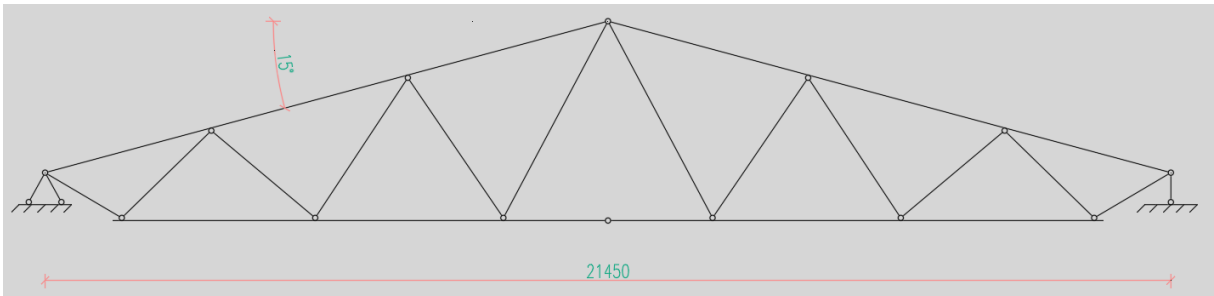
Joonis 4.1. Terasferm sõrestikupostidega. Postid vähendavad ülemise vöö nõtkepikkust



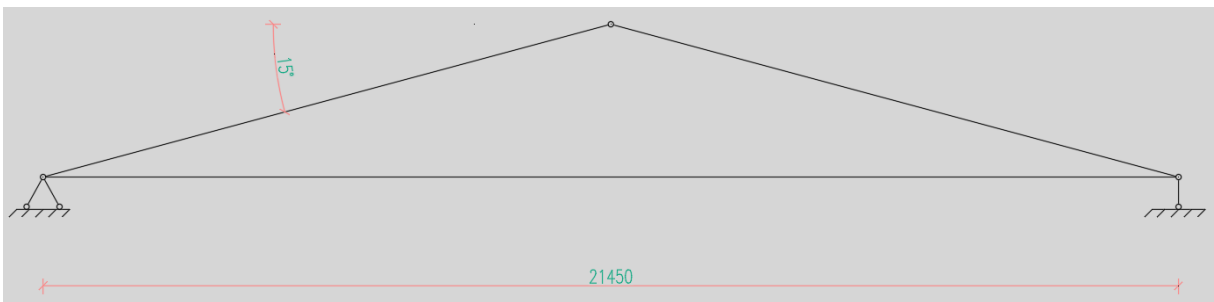
Joonis 4.2. Terasferm sõrestikupostideta. Sõrestiku vahelt on võimalik läbi minna ventilatsioonitorudega, kuid ülemise vöö nõtkepikkus on suurem



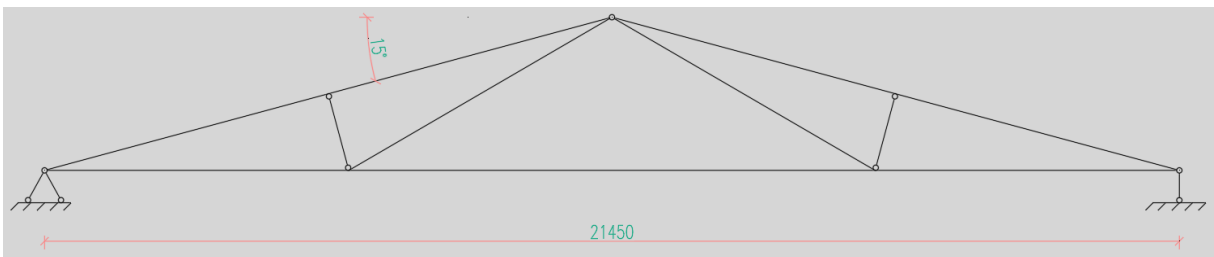
Joonis 4.3. Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega. Postid vähendavad ülemise vöö nõtkepikkust



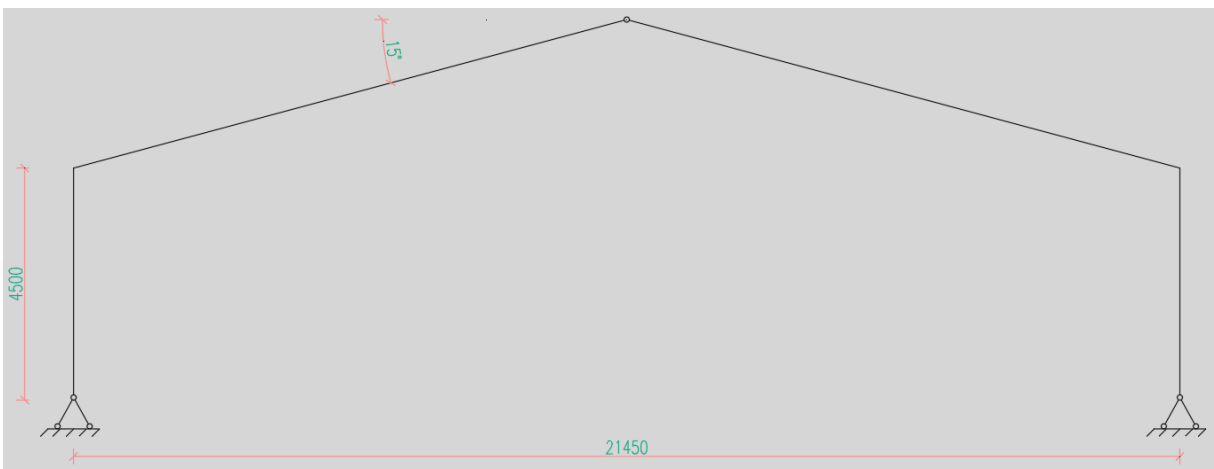
Joonis 4.4. Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta. Sõrestiku vahelt on võimalik läbi minna ventilatsioonitorudega, kuid ülemise võõ nõtkepikkus on suurem



Joonis 4.5. Liimpuidust talad terastõmbiga



Joonis 4.6. Sprengeltalad. Postid vähendavad tala nõtkepikkust, kuid konstruktsioon on keerukam



Joonis 4.7. Terasest ja puidust raamkonstruktsiooni arvutuskeem



Joonis 4.8. Terasposti arvutuskeem

5 KANDEKONSTRUKTSIOONI DIMENSIONEERIMINE

Põhiline osa dimensioneerimisest on tehtud programmiga *Robot Structural Analysis Professional 2020*. Need arvutused, mis on välja toodud, on tehtud programmiga *Mathcad Prime 2.0* ning need arvutused on esitatud alljärgnevalt. Dimensioneerimise põhiohk on katusekandjatel, kuid kuna võrdlusesse on lisatud ka raamkonstruktsioonid, siis selleks, et kõiki lahendusi omavahel võrrelda saaks, on ka postid dimensioneeritud. Kuna kõikide katusekonstruktsioonide puhul on kasutatud samu poste (v.a. raamkonstruktsioonid), siis postide sisejõud on võetud sellisest lahendusest, kus sisejõud on maksimaalsed. Kandekonsruktsiooni samm on 5,6m ning see on arvesse võetud joonkoormuste leidmisel. Iga lahenduse juures on ära märgitud ka kogumass (puidu puhul kogu maht) ning maksumus. Maksumuse arvutamiseks küsiti teraskonstruktsioonide valmistamise hinda ettevõttest B&W Metall OÜ ning puitkonstruktsioonide valmistamise hinda ettevõttest Arcwood. Keskmine teraskonstruktsioonide maksumus on 1,8 €/kg (sisaldab ka värvimist ja lõppviimistlust vastavalt keskkonnaklassile C1) ning puitkonstruktsioonide maksumus 600 €/m³ + 5 €/m² viimistlemine (lakkimine). Järgnevalt on välja toodud dimensioneerimise tulemused erinevate konstruktsioonide kaupa.

Dimensioneerimisel kasutatud osavarutegurid [3]:

Kandevõime leidmisel	$\gamma_{M0} = 1,0$
Üldstabiilsuse kontrollil	$\gamma_{M1} = 1,0$
Arvutustel materjali tõmbetugevuse f_u järgi:	$\gamma_{M2} = 1,25$
Sõrestiku toruprofiilidest varraste liidete kandevõime	$\gamma_{M5} = 1,0$

5.1 Teraspostid

Teraspostid dimensioneeriti programmiga *Mathcad Prime 2.0*, võttes seejuures arvesse alghälbeid ning deformeerunud kuju. Terasposti dimensioneerimise arvutuskäik on toodud allpool:

Posti arvutamisel on arvesse võetud 2 erinevat sisejõudude olukorda:

- a) Sisejõud, kui paindemoment on maksimaalne

$$M_{Ed,A} = 6,45 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed,A} = 144,16 \text{ kN}$$

- b) Sisejõud, kui pikijõud on maksimaalne

$$M_{Ed,B} = 3,87 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed,B} = 204,25 \text{ kN}$$

Posti SHS 150x150x4 omadused [8, tabel 12.3]:

Posti kõrgus	$h = 4,5 \text{ m}$
Nõtkepikkus	$l_{eff} = 4500 \text{ mm}$
Postide arv	$m = 2$
Ristlõikepindala	$A = 2295 \text{ mm}^2$
Terased voolavuspiir	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
Inertsiraadius	$i = 59,3 \text{ mm}$
Elastsusmoodul	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
Ristlõike laius	$b = 150 \text{ mm}$
Seina paksus	$t = 4 \text{ mm}$
Raadius	$r = 8 \text{ mm}$
Inertsimoment	$I = 808 \text{ cm}^4$
Plastne vastupanumoment	$W_{pl} = 124,9 \text{ cm}^3$

Terased tugevusklassi mõju arvestav tegur leitakse valemiga [4, tabel 5.2]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

(5.1)

kus

f_y – terase voolavuspiir, N/mm²

Terase tugevusklassi mõju arvestav tegur vastavalt valemile (5.1) on seega:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

Alghälvete arvesse võtmise sisejõudude leidmisel

Varraskonstruksiooni üldhälve leitakse valemiga [4, lk 40, valem 5.5]:

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m \quad (5.2)$$

kus

$$\phi_0 = \frac{1}{200}$$

- Hälbe põhiväärtus

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$$

- Kõrgusest h sõltuv vähendustegur
 h - konstruktsiooni kõrgus, m

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

- Vähendustegur, mis arvestab postide arvu reas
 m - postide arv reas, mille vertikaalkoormus N_{Ed} on vähemalt 50% vaadeldavas vertikaaltasandis paiknevate postide keskmisest koormusest

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{4,5}} = 0,943$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,866$$

Üldhälbe leidmine vastavalt valemile (5.2):

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m = \frac{1}{200} * 0,943 * 0,866 = 0,004$$

Üldhälbele vastavad horisontaalkoormused posti otsas ning täiendav paindemoment posti alumises otsas [9]:

$$H_{ekv,A} = \phi * 2 * N_{Ed,A} = 0,004 * 2 * 144,16 = 1,177 \text{ kN}$$

$$M_{ekv,A} = \frac{1}{2} * H_{ekv,A} * h = \frac{1}{2} * 1,177 * 4,5 = 2,648 \text{ kNm}$$

$$H_{ekv,B} = \phi * 2 * N_{Ed,B} = 0,004 * 2 * 204,25 = 1,668 \text{ kN}$$

$$M_{ekv,B} = \frac{1}{2} * H_{ekv,B} * h = \frac{1}{2} * 1,668 * 4,5 = 3,752 \text{ kNm}$$

Posti summaarne paindemoment posti alumises otsas [9]:

$$M_A = M_{Ed,A} + M_{ekv,A} = 6,45 + 2,648 = 9,098 \text{ kNm}$$

$$M_B = M_{Ed,B} + M_{ekv,B} = 3,87 + 3,752 = 7,622 \text{ kNm}$$

Kohalike hälvete arvesse võtmine

Kohalikke hälbeid tuleks lisaks nõtkekõveratele täiendavalt arvestada, kui vähemalt üks varda otstest on jäigalt kinnitatud ja varda tingsaledus on [4, lk 42, valem 5.8]:

$$\lambda > 0,5 * \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Ed}}} \quad (5.3)$$

kus

- λ - Varda tingsaledus
- A - Varda ristlõikepindala, mm²
- f_y - Terasse voolavuspiir, N/mm²
- N_{Ed} - Vardas mõjus pikijõud, kN

Tingsaledus leitakse valemiga [4, lk 73, valem 5.50]:

$$\lambda = \frac{L}{\pi * i} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (5.4)$$

kus

- L - Varda geomeetriline pikkus, mm (nõtkekandevõime leidmisel nõtkepikkus) [9, lk 189 ja lk 191]
- i - Varda ristlõike inertsiraadius, mm
- E - Elastsusmoodul, N/mm²

Tingsaledus arvutatakse vastavalt valemile (5.4) ja võrreldakse valemiga (5.3):

$$\lambda = \frac{L}{\pi * i} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{4500}{\pi * 59,3} * \sqrt{\frac{355}{210\,000}} = 0,993 < 0,5 * \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Ed,A}}} = 0,5 * \sqrt{\frac{2295 * 355}{144,16}} = 0,999$$

$$\lambda = \frac{L}{\pi * i} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{4500}{\pi * 59,3} * \sqrt{\frac{355}{210\,000}} = 0,993 < 0,5 * \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{Ed,B}}} = 0,5 * \sqrt{\frac{2295 * 355}{204,25}} = 1,189$$

Kohalikke hälbeid ei pea arvestama.

Deformeerunud kuju mõju arvestamine

Teist järku mõjureid arvestavad tegurid leitakse valemiga [4, lk 39, valem 5.4]:

$$k_{\alpha} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (5.5)$$

kus

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}}$$

kus

- F_{cr} - konstruktsiooni üldstabiilsuse kaole vastav kriitiline koormus, kN
 F_{Ed} - raamile mõjuv summaarne vertikaalkoormus (survejõud), kN

Konstruktsiooni üldstabiilsuse kaole vastav kriitiline koormus leitakse valemiga [9, lk 22]:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_{eff}^2} \quad (5.6)$$

kus

- I - inertsimoment, mm⁴
 l_{eff} - varda nõtkepikkus, mm

Raamile mõjuvad summaarsed verikaalkoormused:

$$F_{Ed,A} = 2 * N_{Ed,A} = 2 * 144,16 = 288,32 \text{ kN}$$

$$F_{Ed,B} = 2 * N_{Ed,B} = 2 * 204,25 = 408,5 \text{ kN}$$

Kogu raami kriitiline koormus leitakse valemiga (5.6):

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 * 210\,000 * 2 * 8\,080\,000}{4500^2} = 1654 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cr,A} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed,A}} = \frac{1654}{288,32} = 5,737$$

$$\alpha_{cr,B} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed,B}} = \frac{1654}{408,5} = 4,049$$

Teist järku mõjureid arvestavad tegurid leitakse valemiga (5.5):

$$k_{\alpha,A} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr,A}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{5,737}} = 1,211$$

$$k_{\alpha,B} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr,B}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{4,049}} = 1,328$$

Korrigeeritud paindemomendid (mida kasutatakse koos pikijõududega ristlõike kandevõime arvutamisel) [9, lk 190]:

$$M_{sum,A} = M_A * k_{\alpha,A} = 9,098 * 1,211 = 11,019 \text{ kNm}$$

$$M_{sum,B} = M_B * k_{\alpha,B} = 3,752 * 1,328 = 4,983 \text{ kNm}$$

Edaspidistel kandevõime arvutustel kasutatakse suurimaid sisejõudusid, ehk:

$$M_{Ed} = M_{sum,A} = 11,019 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = N_{Ed,B} = 204,25 \text{ kN}$$

Posti ristlõike tugevuskontroll

Kui ristlõikes mõjuv põikjõud on suurem, kui pool ristlõike põikjõukandevõimet, siis tuleb ristlõike kandevõimet pikijõu ja paindemomendi koosmõju suhtes vähendada. [4]

Ristlõike põikjõu kandevõime leitakse valemiga [4, lk 63, valem 6.18]:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \frac{f_y}{3}}{\gamma_{M0}} \quad (5.7)$$

kus

A_v - ristlõike lõikepindala, mm²

γ_{M0} - terase materjali osavarutegur kandevõime leidmisel

Ristlõike lõikepindala nelikanttorudel leitakse valemiga [4, lk 63, valem 6.18]:

$$A_v = \frac{A * b}{b + h} \quad (5.8)$$

kus

b - ristlõike laius, mm

h - ristlõike kõrgus, mm

Posti ristlõikes mõjuv põikjõud:

$$V_{Ed} = 7,17 \text{ kN}$$

Ristlõike lõikepindala vastavalt valemile (5.8):

$$A_v = \frac{A * b}{b + h} = \frac{A * b}{2b} = \frac{A}{2} = 1148 \text{ mm}^2$$

Ristlõike põikjõu kandevõime vastavalt valemile (5.7):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1148 * \frac{355}{\sqrt{3}}}{1,0} = 235 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} < 0,5V_{pl,Rd}$$

Põikjõu mõju kandevõimele ei pea arvestama

Posti ristlõikeklass surve puhul [4, tabel 5.2]:

$$c = b - 2 * t - 2 * r = 150 - 2 * 4 - 2 * 8 = 126 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{126}{4} = 31,9 < 42 * \varepsilon = 34,2 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 3}$$

Posti ristlõikeklass painde puhul [4, tabel 5.2]:

$$\frac{c}{t} = \frac{126}{4} = 31,9 < 72 * \varepsilon = 58,6 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 1}$$

Posti paindekandevõime arvutamise valem ristlõikeklasside 1 ja 2 puhul [4, lk 62, valem 6.13]:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.9)$$

kus

W_{pl} - ristlõike plastne vastupanumoment, mm^3

Posti paindekandevõime vastavalt valemile (5.9):

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{124,9 * 355}{1,0} = 44,34 \text{ kNm}$$

Posti survekandevõime ristlõikeklasside 1,2 ja 3 puhul leitakse valemiga [4, lk 61, valem 6.10]:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.10)$$

Posti survekandevõime vastavalt valemile (5.10) on seega:

$$N_{pl,Rd} = \frac{2295 * 355}{1,0} = 814,725 \text{ kN}$$

Paindekandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul nelikanttorude puhul leitakse valemiga [4, lk 68, 6.39]:

$$M_{N,Rd} = M_{c,Rd} * \frac{1 - n}{1 - 0,5 * \alpha_w} \quad (5.11)$$

kus

$M_{c,Rd}$ - varda paindekandevõime

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (5.12)$$

kus

N_{Ed} - vardale mõjuv maksimaalne survejõud

$N_{pl,Rd}$ - varda survekandevõime

$$a_w = \frac{A - 2bt}{A} \quad (5.13)$$

Vastavalt valemile (5.12):

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{204,25}{814,725} = 0,251$$

Vastavalt valemile (5.13):

$$a_w = \frac{A - 2 * b * t}{A} = \frac{2295 - 2 * 150 * 4}{2295} = 0,477$$

Paindekandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul vastavalt valemile (5.11):

$$M_{N,Rd} = M_{c,Rd} * \frac{1 - n}{1 - 0,5 * \alpha_w} = \frac{1 - 0,251}{1 - 0,5 * 0,477} = 43,6 \text{ kNm} > M_{Ed} = 11,019 \text{ kNm} \rightarrow \text{OK!}$$

Posti ristlõike kandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul on tagatud.

Posti nõtkekandevõime painde ja surve koosmõjul

Paindemoment posti keskel $M_s = -2,18 \text{ kNm}$

Paindemoment sõlmes $M_h = 7,622 \text{ kNm}$

Surve ja painde koosmõjul peab olema täidetud tingimus [4, lk 80, valem 6.61]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad (5.14)$$

kus

k_{yy} - Koosmõjutegur

χ - Nõtketegur

- N_{Rd} - Survekandevõime, kN, vastavalt valemile 5.10
 M_{Rd} - Paindekandevõime, kNm, vastavalt valemile 5.9

Nõtketegur leitakse vastavalt valemile [4, lk 71, valem 6.49]:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (5.14)$$

kus

- ϕ - nõtkekõverast sõltuv abisuurus
 λ - Posti tingsaledus vastavalt valemile (5.4)

Nõtkekõverast sõltuv abisuurus leitakse vastavalt valemile [4, lk 71, valem 6.49]:

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2) \quad (5.15)$$

kus

- α - hällbetegur vastavalt nõtkekõverale

Koosmõjutegur leitakse nelikantprofiilidel valemiga [4, tabel B.1]:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,6\lambda \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) \quad (5.16)$$

kus

- C_{my} - Ekvivalentse paindemomendi tegur

Ekvivalentse paindemomendi tegur leitakse valemiga [4, tabel B.3]:

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 * \alpha_s \geq 0,4 \quad (5.17)$$

kus

- α_s - Tegur, mis võtab arvesse paindemomentide erinevust avas ja toel

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} \quad (5.18)$$

kusjuures

$$-1 \leq \alpha_s \leq 0$$

Hällbetegur vastavalt külmpainutatud toruprofiilide nõtkekõverale c [4, tabel 6.1 ja tabel 6.2]:

$$\alpha = 0,49$$

Tingsaledus paindenõtkel ristlõikeklassi 3 puhul vastavalt valemile (5.4):

$$\lambda = \frac{l_{eff}}{\pi i} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{4500}{\pi * 59,3} * \sqrt{\frac{355}{210000}} = 0,993$$

Nõtkekõverast sõltuv abisuurus vastavalt valemile (5.16):

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2) = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,993 - 0,2) + 0,993^2) = 1,187$$

Nõtketegur vastavalt valemile (5.15):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,187 + \sqrt{1,187^2 - 0,993^2}} = 0,544$$

Tegur, mis võtab arvesse paindemomentide erinevust avas ja toel vastavalt valemile (5.20):

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-2,18}{7,622} = -0,286$$

Ekvivalentse paindemomendi tegur vastavalt valemile (5.19):

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 * \alpha_s = 0,1 - 0,8 * (-0,286) = 0,329 < 0,4 \rightarrow C_{my} = 0,4$$

Koosmõjuteguri leidmine vastavalt valemile (5.18):

$$\begin{aligned} k_{yy} &= C_{my} \left(1 + 0,6\lambda \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) = 0,4 * \left(1 + 0,6 * 0,993 * \frac{204,25}{0,544 * 814,725} \right) = 0,51 \leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) \\ &= 0,4 * \left(1 + 0,6 * \frac{204,25}{0,544 * 804,725} \right) = 0,51 \end{aligned}$$

Kandevõime kontroll vastavalt valemile (5.14):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{204,25}{0,544 * 814,725} + 0,51 * \frac{7,622}{44,34} = 0,55 < 1 \rightarrow \text{OK}$$

Varda nõtkekandevõime surve ja painde koosmõjul on tagatud.

Posti massi arvutamine

Posti mass 1 meetri pikkuse lõigu kohta [8, tabel 12.3]

$$G = 18 \text{ kg}$$

Kahe posti kogumass:

$$m = 2hG = 2 * 4,5 * 18 = 162 \text{ kg}$$

Kuna nii nõtkekandevõime, kui ka kandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul on tagatud, siis post ristlõikega 150x150x4 sobib. Kandevõime poolest sobiks ka väiksema ristlõikega post, kuid kuna postide külge kinnitatakse seinapaneelid, siis seinapaneelide vajaliku toetuspikkuse saavutamiseks tuleb valida suurem ristlõige.

5.2 Terasferm sõrestikupostidega

Terasferm 1 on koos sõrestikupostidega, mis soodustavad ülemise vöö nõtkekandevõimet. Ära on näidatud ülemise ja alumise vöö dimensioneerimine, enimkoormatud surutud diagonaali dimensioneerimine ning sama diagonaali mõlema sõlme dimensioneerimine. Ülejäänud elemendid dimensioneeriti programmiga *Robot Structural Analysis Professional 2020*.

5.2.1 Ülemise vöö dimensioneerimine

Ristlõike tugevuskontroll tehakse toruprofiiliga 140x140x6. Ristlõike parameetrid [8, tabel 12.3]:

Kõrgus	$h = 140 \text{ mm}$
Laius	$b = 140 \text{ mm}$
Seina paksus	$t = 6 \text{ mm}$
Raadius	$r = 12 \text{ mm}$
Pindala	$A = 3123 \text{ mm}^2$
Plastne vastupanumoment	$W_{pl} = 155300 \text{ mm}^3$
Inertsiraadius	$i = 54,3 \text{ mm}$
Elastsusmoodul	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
Ülemise vöö kogupikkus	$l = 11,11 \text{ m}$

Ristlõikes mõjuvad maksimaalsed sisejõud:

Survejõud	$N_{Ed} = 760 \text{ kN}$
Põikjõud	$V_{Ed} = 24 \text{ kN}$
Paindemoment	$M_{Ed} = 12,65 \text{ kNm}$
Paindemoment varda keskel	$M_s = 12,65 \text{ kNm}$
Paindemoment sõlmes	$M_h = -4,28 \text{ kNm}$

Ristlõikeklass, kui element on surutud [4, tabel 5.2]:

$$c = b - 2t - 2r = 140 - 2 * 6 - 2 * 12 = 104 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{104}{6} = 17,33 < 33\varepsilon = 33 * 0,814 = 26,86 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 1}$$

Ristlõikeklass, kui element on painutatud [4, tabel 5.2]:

$$\frac{c}{t} = \frac{104}{6} = 17,33 < 72\varepsilon = 72 * 0,814 = 58,61 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 1}$$

Ristlõike plastne survekandevõime vastavalt valemile (5.10):

$$N_{Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3123 * 355}{1,0} = 1109 \text{ kN}$$

Ristlõike plastne paindekandevõime vastavalt valemile (5.9):

$$M_{Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{155300 * 355}{1,0} = 55,132 \text{ kNm}$$

Varda nõtkekandevõime surve ja painde koosmõjul

Varda geomeetriline pikkus $L = 1398 \text{ mm}$

Toruprofiilidest sõrestiku vöö nõtkepikkuseks nõtkepuhul, mis toimub nii sõrestiku tasapinnas kui ka risttasapinnas, võib võtta $0,9L$, kus L on geomeetriline pikkus. [4]

Varda nõtkepikkus:

$$L_{cr} = 0,9 * L = 0,9 * 1398 = 1258 \text{ mm}$$

Hälbetegur vastavalt külmpainutatud toruprofiilide nõtkekõverale c [4, tabel 6.1 ja tabel 6.2]:

$$\alpha = 0,49$$

Tingsaledus paindenõtkel ristlõikeklassi 1 puhul vastavalt valemile (5.4):

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{\pi i} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1258}{\pi * 54,3} * \sqrt{\frac{355}{210000}} = 0,303$$

Nõtkekõverast sõltuv abisuurus vastavalt valemile (5.16):

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2) = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,303 - 0,2) + 0,303^2) = 0,571$$

Nõtketegur vastavalt valemile (5.15):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,571 + \sqrt{0,571^2 - 0,303^2}} = 0,947$$

Tegur, mis võtab arvesse paindemomentide erinevust avas ja sõlmes vastavalt valemile (5.20):

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{12,65}{-4,28} = -2,956$$

$$-1 \leq \alpha_s \leq 0 \rightarrow \alpha_s = -1$$

Ekvivalentse paindemomendi tegur vastavalt valemile (5.19):

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 * \alpha_s = 0,1 - 0,8 * (-1) = 0,9 \geq 0,4$$

Koosmõjuteguri leidmine vastavalt valemile [4, tabel B.1]:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\lambda - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,8 * \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) \quad (5.21)$$

Seega:

$$\begin{aligned} k_{yy} &= C_{my} \left(1 + (\lambda - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) = 0,9 * \left(1 + (0,303 - 0,2) * \frac{760}{0,947 * 1109} \right) = 0,967 \\ &\leq C_{my} \left(1 + 0,8 * \frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} \right) = 0,9 * \left(1 + 0,8 * \frac{760}{0,947 * 1109} \right) = 1,421 \end{aligned}$$

Kandevõime kontroll vastavalt valemile (5.14):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{760}{0,947 * 1109} + 0,967 * \frac{12,65}{55,132} = 0,946 < 1 \rightarrow \text{OK}$$

Varda nõtkekandevõime surve ja painde koosmõjul on tagatud.

Varda põikjõu kandevõime

Ristlõike lõikepindala vastavalt valemile (5.8):

$$A_v = \frac{Ab}{b+h} = \frac{3123 * 140}{140 + 140} = 1562 \text{ mm}^2$$

Põikjõu kandevõime vastavalt valemile (5.7):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1562 * \frac{355}{\sqrt{3}}}{1,0} = 320 \text{ kN} > V_{Ed} = 24 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Põikjõu kandevõime on tagatud.

Seega on ristlõikega 140x140x6 ülemise vöö kandevõime tagatud.

Ülemise vöö massi arvutamine

Ülemise vöö mass ühe meetri pikkuse lõigu kohta [8, tabel 12.3] $G = 24,5 \text{ kg}$

Kahe ülemise vöö kogumass $m = 2lG = 2 * 11,11 * 24,5 = 544 \text{ kg}$

5.2.2 Alumise vöö dimensioneerimine

Ristlõike tugevuskontroll tehakse toruprofiiliga 100x100x6. Ristlõike parameetrid [8, tabel 12.3]:

Kõrgus	$h = 100 \text{ mm}$
Laius	$b = 100 \text{ mm}$
Seina paksus	$t = 6 \text{ mm}$
Raadius	$r = 12 \text{ mm}$
Pindala	$A = 2163 \text{ mm}^2$
Plastne vastupanumoment	$W_{pl} = 75\,100 \text{ mm}^3$
Inertsiraadius	$i = 37,9 \text{ mm}$
Elastsusmoodul	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

Alumiste vööde kogupikkus $l = 18,68 \text{ m}$

Ristlõikes mõjuvad maksimaalsed sisejõud:

Tõmbejõud	$N_{Ed} = 663 \text{ kN}$
Põikjõud	$V_{Ed} = 0,82 \text{ kN}$
Paindemoment	$M_{Ed} = 3,75 \text{ kNm}$

Ristlõike plastne tõmbekandevõime

Leitakse valemiga [4, lk 61, valem 6.6]:

$$N_{Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.19)$$

Tõmbekandevõime vastavalt valemile (5.22):

$$N_{Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2163 \cdot 355}{1,0} = 767 \text{ kN} > N_{Ed} = 663 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Ristlõikeklass, kui element on painutatud [4, tabel 5.2]:

$$c = b - 2t - 2r = 100 - 2 \cdot 6 - 2 \cdot 12 = 64 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{64}{6} = 10,67 < 72\varepsilon = 72 * 0,814 = 58,61 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 1}$$

Ristlõike põikjõu kandevõime:

Ristlõike lõikepindala vastavalt valemile (5.8):

$$A_v = \frac{Ab}{b+h} = \frac{2163 * 100}{100 + 100} = 1082 \text{ mm}^2$$

Põikjõu kandevõime vastavalt valemile (5.7):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1082 * \frac{355}{\sqrt{3}}}{1,0} = 221 \text{ kN} > V_{Ed} = 0,82 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Põikjõu kandevõime on tagatud.

Ristlõike kandevõimet ei pea vähendama pikijõu ja paindemomendi koosmõju suhtes, kuna [4]:

$$V_{Ed} = 0,82 \text{ kN} < 0,5V_{pl,Rd} = 0,5 * 221 = 110,5 \text{ kN}$$

Ristlõike paindekandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul:

Vastavalt valemile (5.12):

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{663}{767} = 0,863$$

Vastavalt valemile (5.13):

$$a_w = \frac{A - 2bt}{A} = \frac{2163 - 2 * 100 * 6}{2163} = 0,445$$

Ristlõike paindekandevõime 1. ristlõikeklassi puhul vastavalt valemile (5.9):

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{75100 * 355}{1,0} = 26,661 \text{ kNm}$$

Paindekandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul vastavalt valemile (5.11):

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} * \frac{1-n}{1-0,5a_w} = 26,661 * \frac{1-0,863}{1-0,5 * 0,445} = 4,684 \text{ kNm} > M_{Ed} = 3,75 \text{ kNm}$$

$$ratio = \frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{3,75}{4,684} = 0,801$$

Ristlõike 100x100x6 kandevõime on tagatud.

Alumise vöö massi arvutamine

Alumise vöö mass ühe meetri pikkuse lõigu kohta [8, tabel 12.3] $G = 17 \text{ kg}$

Alumise vöö kogumass $m = lG = 18,68 * 17 = 318 \text{ kg}$

5.2.3 Enim koormatud surutud diagonaali dimensioneerimine

Ristlõike tugevuskontroll tehakse toruprofiiliga 70x70x3. Ristlõike parameetrid [8, tabel 12.3]:

Kõrgus	$h = 70 \text{ mm}$
Laius	$b = 70 \text{ mm}$
Seina paksus	$t = 3 \text{ mm}$
Raadius	$r = 6 \text{ mm}$
Pindala	$A = 781 \text{ mm}^2$
Inertsiraadius	$i = 27,1 \text{ mm}$
Elastsusmoodul	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
Profiiliga 70x70x3 diagonaalide kogupikkus	$l = 7,82 \text{ m}$
Maksimaalne survejõud	$N_{Ed} = 162 \text{ kN}$

Ristlõikeklass, kui element on surutud [4, tabel 5.2]:

$$c = b - 2t - 2r = 70 - 2 * 3 - 2 * 6 = 52 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{52}{3} = 17,33 < 33\varepsilon = 33 * 0,814 = 26,86 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 1}$$

Varda nõtkekandevõime

Varda geomeetriline pikkus $L = 1980 \text{ mm}$

Kui sõrestik koosneb toruprofiilidest ning on paralleelvöödega ja võrguvarraste ning vöö diameetrite või laiuste suhe ei ületa 0,6, võib võrguvarda nõtkepikkuseks L_{cr} võtta nii sõrestiku tasapinnas kui risttasapinnas 0,75L. Lisaks tuleb jälgida, et võrguvarraste otsad ei oleks lapikuks deformeeritud ja on keevitatud kogu perimeetri ulatuses vöö külge. [4]

Antud juhul seega:

$$\frac{\text{Sõrestik}}{\text{Al.vöö}} = \frac{70}{100} = 0,7 > 0,6$$

Kuna võrguvarda ning alumise vöö laiuste suhe on suurem, kui 0,6, siis ei saa võrguvarda nõtkepikkuseks võtta 0,75L. Küll aga saab nõtkepikkuseks võtta $L_{cr} = 0,9L$, kui võrguvarras on keevitatud kogu perimeetri ulatuses vööde külge või on kinnitatud muul viisil piisavalt jäigalt vööde külge. [4] Sellisel juhul varda nõtkepikkus on:

$$L_{cr} = 0,9L = 0,9 * 1980 = 1782 \text{ mm}$$

Hälbetegur vastavalt nõtkekõverale c [4, tabel 6.1 ja tabel 6.2] $\alpha = 0,49$

Tingsaledus paindenõtkel ristlõikeklassi 1 puhul vastavalt valemile (5.4):

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{\pi i} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1782}{\pi * 27,1} * \sqrt{\frac{355}{210000}} = 0,861$$

Nõtkekõverast sõltuv abisuurus vastavalt valemile (5.16):

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2) = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,861 - 0,2) + 0,861^2) = 1,032$$

Nõtketegur vastavalt valemile (5.15):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,032 + \sqrt{1,032^2 - 0,861^2}} = 0,624$$

Varda nõtkekandevõime ristlõikeklassi 1 puhul vastavalt valemile (5.14):

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,624 * 781 * 355}{1,0} = 173 \text{ kN}$$

Varda kasutatud kandevõime:

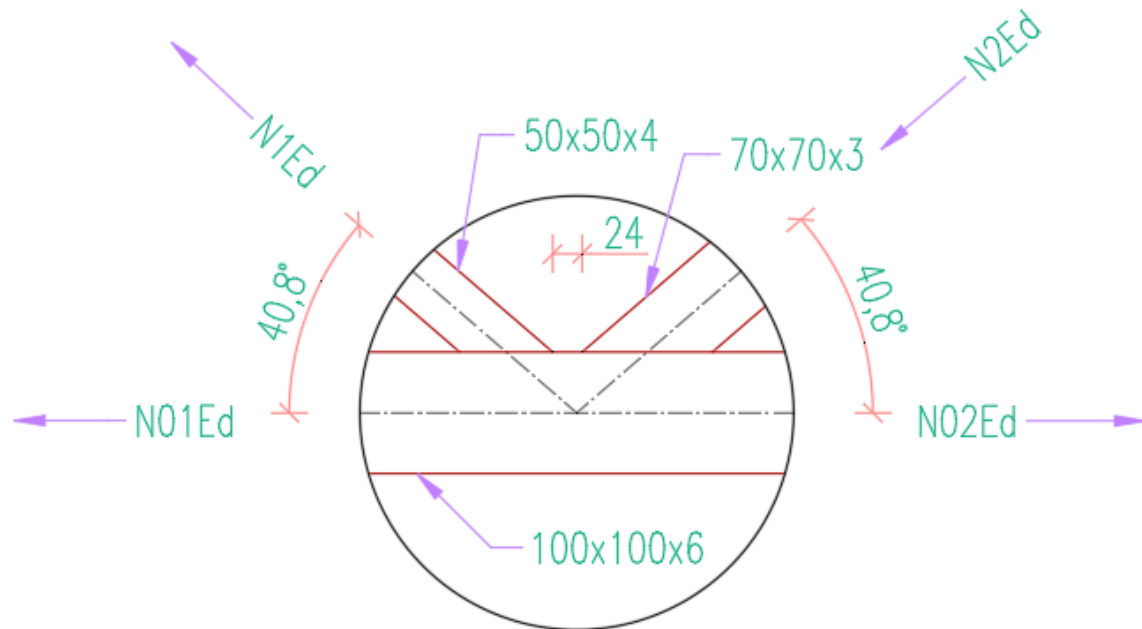
$$\text{ratio} = \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{162}{173} = 0,936$$

Sõrestikuvarda 70x70x3 massi arvutamine

Sõrestikuvarda mass ühe meetri pikkuse lõigu kohta [8, tabel 12.3] $G = 6,13 \text{ kg}$

Sõrestikuvarraste kogumass $m = lG = 7,82 * 6,13 = 48 \text{ kg}$

5.2.4 Võrguvarraste 70x70x3, 50x50x4 ja alumise vöö sõlme kontroll (ülekateta K sõlm)



Joonis 5.1 Ülekatteta K sõlm

Sõlme varrastes mõjuvad arvutuslikud sisejõud (kuigi kokkuleppeliselt on määratud teisiti, siis antud juhul märgitakse positiivseks survejõud ning negatiivseks tõmbejõud):

$$N_{01,Ed} = -394 \text{ kN}$$

$$N_{02,Ed} = -660 \text{ kN}$$

$$N_{1,Ed} = -179 \text{ kN}$$

$$N_{2,Ed} = 162 \text{ kN}$$

$$M_{0,Ed} = 0,58 \text{ kNm}$$

Sõlme geomeetria:

$$\theta_1 = 40,8^\circ$$

$$\theta_2 = 40,8^\circ$$

$$g = 24 \text{ mm}$$

$$e = 0 \text{ mm}$$

Alumise vöö 100x100x6 ristlõikeparameetrid [8, tabel 12.3]:

$$A_0 = 2163 \text{ mm}^2$$

$$W_{el.0} = 62290 \text{ mm}^3$$

$$b_0 = h_0 = 100 \text{ mm}$$

$$t_0 = 6 \text{ mm}$$

Sõrestikuvarda 50x50x4 ristlõikeparameetrid (tõmmatud varras) [8, tabel 12.3]:

$$b_1 = h_1 = 50 \text{ mm}$$

$$t_1 = 4 \text{ mm}$$

$$r_1 = 8 \text{ mm}$$

Sõrestikuvarda 70x70x3 ristlõikeparameetrid (surutud) [8, tabel 12.3]:

$$b_2 = h_2 = 70 \text{ mm}$$

$$t_2 = 3 \text{ mm}$$

Arvutuseelduste kehtivuse kontroll

- Selleks, et arvutusjuhised kehtiksid, peavad nii vööd kui ka sõrestikuvadad olema 1. või 2. ristlõikeklassis [10, tabel 7.8]:

Alumine vöö 100x100x6 on ristlõikeklassis 1.

Sõrestikuvarras 70x70x3 on ristlõikeklassis 1.

Sõrestikuvarda 50x50x4 ristlõikeklassi arvutamine, kui element on surutud [4, tabel 5.2]:

$$c = b_1 - 2t_1 - 2r_1 = 50 - 2 * 4 - 2 * 8 = 26 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{26}{4} = 6,5 < 33\varepsilon = 33 * 0,814 = 26,86 \rightarrow \text{Ristlõikeklass 1}$$

Arvutuseeldus on täidetud.

- Vöö ja võrguvarraste vahelised nurgad θ_i peaksid olema vähemalt 30° . [10] Vastasel juhul on raske tagada keevisõmbluste nõutavat kvaliteeti. [9] Arvutuseeldus on täidetud ($\theta_1 > 30^\circ$ ja $\theta_2 > 30^\circ$).

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{50}{100} = 0,5 \geq 0,35 \geq 0,1 + 0,01 * \frac{b_0}{t_0} = 0,1 + 0,01 * \frac{100}{6} = 0,267 \rightarrow \text{Täidetud}$$

$$\frac{b_2}{b_0} = \frac{70}{100} = 0,7 \geq 0,35 \geq 0,1 + 0,01 * \frac{b_0}{t_0} = 0,1 + 0,01 * \frac{100}{6} = 0,267 \rightarrow \text{Täidetud}$$

$$\frac{b_1}{t_1} = \frac{h_1}{t_1} = \frac{50}{4} = 12,5 \leq 35 \rightarrow \text{Täidetud}$$

$$\frac{b_2}{t_2} = \frac{h_2}{t_2} = \frac{70}{3} = 23,33 \leq 35 \rightarrow \text{Täidetud}$$

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} = \frac{100}{100} = 1 \leq 2 \text{ ja } 0,5 \leq \frac{h_1}{b_1} = \frac{50}{50} = 1 \leq 2 \text{ ja } 0,5 \leq \frac{h_2}{b_1} = \frac{70}{70} = 1 \leq 2 \rightarrow \text{Täidetud}$$

$$\frac{b_0}{t_0} = \frac{h_0}{t_0} = \frac{100}{6} = 16,67 \rightarrow \text{Täidetud}$$

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} = \frac{50 + 70 + 50 + 70}{4 * 100} = 0,6$$

$$0,5(1 - \beta) = 0,5 * (1 - 0,6) = 0,2 \leq \frac{g}{b_0} = \frac{24}{100} = 0,24 \leq 1,5 * (1 - \beta) = 1,5 * (1 - 0,6) = 0,6$$

→ Täidetud

$$g = 24 \text{ mm} \geq t_1 + t_2 = 4 + 3 = 7 \text{ mm} \rightarrow \text{Täidetud}$$

Kõik arvutuseeldusteks olevad nõuded on täidetud. [10, tabel 7.8] Võib asuda sõlme kandevõime kontrolli teostama.

Sõlme kandevõime kontroll

1) Vöö liitepinna kandevõime

Vöö liitepinna kandevõime leitakse valemiga [10, tabel 7.12]:

$$N_{1.Rd} = \frac{8,9k_n f_y t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_1 \gamma_{M5}} \beta \quad (5.20)$$

kus

- t_0 - Vöö ristlõike seina paksus, mm
- θ_1 - Vöö ja diagonaali vaheline nurk kraadides

ja [9, tabel 9.4]

$$\gamma = \frac{h_0}{2t_0}$$

kus

- h_0 - Vöö ristlõike kõrgus, mm

$$\text{kui } n > 0 \rightarrow k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \leq 1,0$$

$$\text{kui } n \leq 0 \rightarrow k_n = 1,0$$

kus [10, tabel 7.12 ja lk 120, valem 7.1]]

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{A_0 f_y \gamma_{M5}} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0} f_y \gamma_{M5}} \quad (5.24)$$

kus

- $N_{0,Ed}$ - Maksimaalne pikijõud lõikes, kN
- A_0 - Vöö ristlõike pindala, mm²
- f_y - Vöö terase voolavuspiir, N/mm²
- γ_{M5} - Sõrestiku toruprofiilidest varraste liidete kandevõime osavarutegur
- $M_{0,Ed}$ - Sõlmes mõjuv maksimaalne paindemoment, kNm
- $W_{el,0}$ - Vöö elastne vastupanumoment, mm³

Maksimaalne pikijõud lõikes:

$$N_{0,Ed} = N_{02,Ed} = -660 \text{ kN}$$

Vastavalt valemile (5.24):

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{A_0 f_y \gamma_{M5}} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0} f_y \gamma_{M5}} = \frac{-660}{2163 * 355 * 1} + \frac{0,58}{62290 * 355 * 1} = -0,833$$

Kuna $n < 0$, siis

$$k_n = 1$$

$$\gamma = \frac{h_0}{2t_0} = \frac{100}{2 * 6} = 8,33$$

Liitepinna kandevõime kontroll vastavalt valemile (5.23):

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 k_n f_y t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_1 \gamma_{M5}} * \beta = \frac{8,9 * 1 * 355 * 6^2 * \sqrt{8,33}}{\sin 40,8^\circ * 1} * 0,6 = 301 \text{ kN} > |N_{1,Ed}| = 179 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Liitepinna kandevõime tagatud.

2) Vöö lõikekandevõime

Ristlõike lõikepindala leitakse valemiga [10, tabel 7.12]:

$$A_v = (2h_0 + \alpha b_0)t_0 \quad (5.25)$$

kus

- h_0 - Vöö ristlõike kõrgus, mm
- b_0 - Vöö ristlõike laius, mm
- t_0 - Vöö ristlõike seina paksus, mm

ja [10, tabel 7.12]

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} \quad (5.26)$$

kus

g - Diagonaalide vahekaugus, mm

Vöö löikekandevõime leitakse valemitega [10, tabel 7.12]:

$$N_{0,Rd} = \frac{f_y A_v}{\gamma_{M5} \sqrt{3} \sin \theta_1} \quad (5.27)$$

ja

$$N_{0,Rd} = \frac{(A_0 - A_v) f_y + A_v f_y \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} \quad (5.28)$$

Vastavalt valemile (5.26):

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 * 24^2}{3 * 6^2}}} = 0,212$$

Lõikepindala vastavalt valemile (5.25):

$$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) t_0 = (2 * 100 + 0,212 * 100) * 6 = 1327 \text{ mm}^2$$

Vöö arvutuslik maksimaalne põikjõud sõlmes:

$$V_{Ed} = N_{2,Ed} * \sin \theta_1 = -179 * \sin 40,8^\circ = -116 \text{ kN}$$

Vöö plastne põikjõu kandevõime vastavalt valemile (5.7):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{1327 * 355}{1,0 * \sqrt{3}} = 271 \text{ kN} > |V_{Ed}| = 116 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Põikjõu kandevõime on tagatud.

Vastavalt valemile (5.27):

$$N_{0,Rd} = \frac{f_y A_v}{\gamma_{M5} \sqrt{3} \sin \theta_1} = \frac{355 * 1327}{1,0 * \sqrt{3} * \sin 40,8^\circ} = 416 \text{ kN} > N_{1,Ed} = 179 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Vöö kandevõime kontroll sõlmes normaal- ja lõikejõu koosmõju suhtes vastavalt valemile (5.28):

$$N_{0,Rd} = \frac{(A_0 - A_v)f_y + A_v f_y \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} = \frac{(2163 - 1327) * 355 + 1327 * 355 * \sqrt{1 - \left(\frac{107}{271}\right)^2}}{1,0}$$

$$= 722 \text{ kN} > |N_{0,Ed}| = 660 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Vöö kandevõime normaal- ja lõikejõu koosmõju suhtes on tagatud.

3) Diagonaalide kandevõime

Leitakse valemiga [10, tabel 7.12]:

$$N_{i,Rd} = f_y t_i \frac{(2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff,i})}{\gamma_{M5}} \quad (5.29)$$

kus

$$b_{eff,i} = \frac{10f_y t_0 b_i}{\frac{b_0}{t_0} f_y t_i} \quad (5.30)$$

i - Diagonaali järjekorra number

Vastavalt valemile (5.30):

$$b_{eff,1} = \frac{10f_y t_0 b_1}{\frac{b_0}{t_0} f_y t_1} = \frac{10 * 355 * 6 * 50}{\frac{100}{6} * 355 * 4} = 45 \text{ mm}$$

$$b_{eff,2} = \frac{10f_y t_0 b_2}{\frac{b_0}{t_0} f_y t_2} = \frac{10 * 355 * 6 * 70}{\frac{100}{6} * 355 * 3} = 84 \text{ mm}$$

Diagonaalide kandevõimed vastavalt valemile (5.29):

$$N_{1,Rd} = f_y t_1 \frac{(2h_1 - 4t_1 + b_1 + b_{eff,1})}{\gamma_{M5}} = 355 * 4 * \frac{(2 * 50 - 4 * 4 + 50 + 45)}{1,0} = 254 \text{ kN} > |N_{1,Ed}|$$

$$= 179 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

$$N_{2,Rd} = f_y t_2 \frac{(2h_2 - 4t_2 + b_2 + b_{eff,2})}{\gamma_{M5}} = 355 * 3 * \frac{(2 * 70 - 4 * 3 + 70 + 84)}{1,0} = 300 \text{ kN} > N_{2,Ed}$$

$$= 163 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Mõlema diagonaali kandevõime sõlmes on tagatud.

4) Vöö liitepinna läbistuskandevõime

Tuleb kontrollida juhul, kui [10, tabel 7.12]:

$$\beta = 0,6 \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) = 1 - \frac{1}{8,33} = 0,88 \rightarrow \text{Vöö liitepinna läbistuskandevõimet peab kontrollima}$$

Vöö liitepinna läbistuskandevõime diagonaali jõu suhtes leitakse valemiga [10, tabel 7.12]:

$$N_{i,Rd.2} = \frac{f_y t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \frac{\left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p,i}\right)}{\gamma_{M5}} \quad (5.31)$$

kus

$$b_{e,p,i} = \frac{10b_i}{\frac{b_0}{t_0}} \quad (5.32)$$

Vastavalt valemile (5.32):

$$b_{e,p,1} = \frac{10b_1}{\frac{b_0}{t_0}} = \frac{10 * 50}{\frac{100}{6}} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{e,p,2} = \frac{10b_2}{\frac{b_0}{t_0}} = \frac{10 * 70}{\frac{100}{6}} = 42 \text{ mm}$$

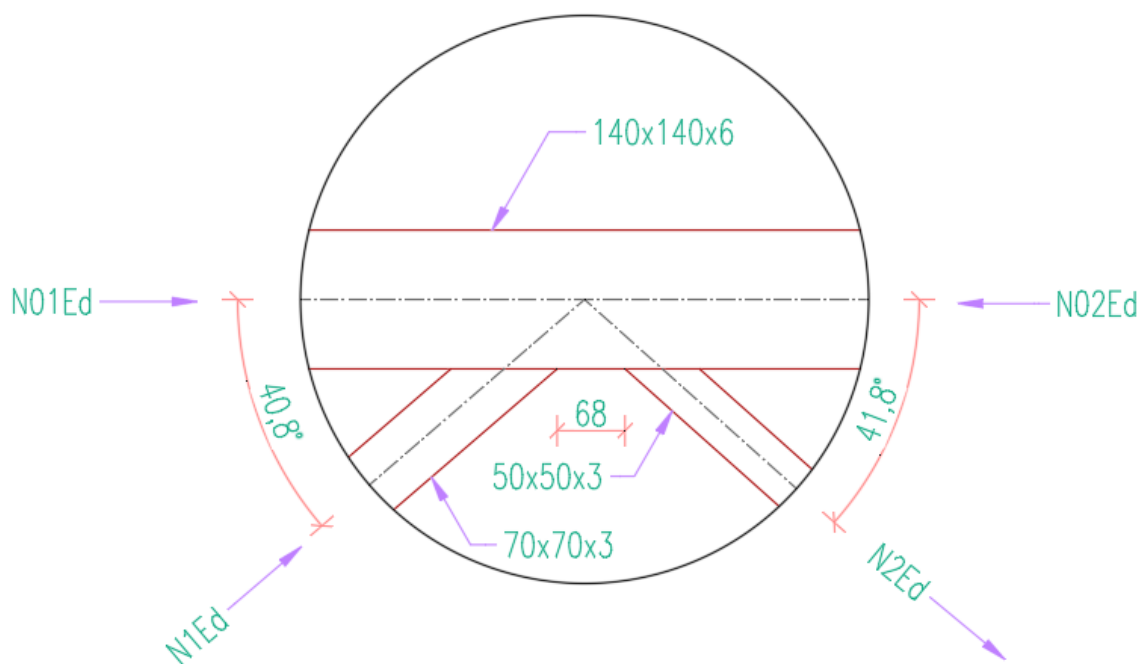
Vöö liitepinna läbistuskandevõime kummagi diagonaali jõu suhtes vastavalt valemile (5.31):

$$N_{1,Rd.2} = \frac{f_y t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \frac{\left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + b_1 + b_{e,p,1}\right)}{\gamma_{M5}} = \frac{355 * 6}{\sqrt{3} \sin 40,8^\circ} \frac{\left(\frac{2 * 50}{\sin 40,8^\circ} + 50 + 30\right)}{1,0} = 438 \text{ kN} > N_{1,Ed}$$
$$= 179 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

$$N_{2,Rd.2} = \frac{f_y t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_2} \frac{\left(\frac{2h_2}{\sin \theta_2} + b_2 + b_{e,p,2}\right)}{\gamma_{M5}} = \frac{355 * 6}{\sqrt{3} \sin 40,8^\circ} \frac{\left(\frac{2 * 70}{\sin 40,8^\circ} + 70 + 42\right)}{1,0} = 614 \text{ kN} > N_{2,Ed}$$
$$= 163 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Vöö liitepinna läbistuskandevõime on küllaldane ning sõlme kandevõime on tagatud kõigi võimalike purunemisviiside suhtes.

**5.2.5 Võrguvarraste 70x70x3, 50x50x3 ja ülemise vöö
140x140x6 sõlme kontroll (ülekateta, tugevdamist vajav
K)**



Joonis 5.2. Ülekateta (tugevdamist vajav) K sõlm

Sõlme varrastes mõjuvad arvutuslikud sisejõud (kuigi kokkuleppeliselt on määratud teisiti, siis antud juhul märgitakse positiivseks survejõud ning negatiivseks tõmbejõud):

$$N_{01,Ed} = 564 \text{ kN}$$

$$N_{02,Ed} = 760 \text{ kN}$$

$$N_{1,Ed} = 162 \text{ kN}$$

$$N_{2,Ed} = -99,2 \text{ kN}$$

$$M_{0,Ed} = 2,56 \text{ kNm}$$

Sõlme geometria:

$$\theta_1 = 40,8^\circ$$

$$\theta_2 = 41,8^\circ$$

$$g = 68 \text{ mm}$$

$$e = 0 \text{ mm}$$

Ülemise vöö 140x140x6 ristlõikeparameetrid [8, tabel 12.3]:

$$A_0 = 3123 \text{ mm}^2$$

$$W_{el,0} = 131500 \text{ mm}^3$$

$$b_0 = h_0 = 140 \text{ mm}$$

$$t_0 = 6 \text{ mm}$$

Sõrestikuvarda 70x70x3 ristlõikeparameetrid (suratud) [8, tabel 12.3]:

$$b_1 = h_1 = 70 \text{ mm}$$

$$t_1 = 3 \text{ mm}$$

$$r_1 = 6 \text{ mm}$$

Sõrestikuvarda 50x50x3 ristlõikeparameetrid (suratud) [8, tabel 12.3]:

$$b_2 = h_2 = 50 \text{ mm}$$

$$t_2 = 3 \text{ mm}$$

$$r_2 = 6 \text{ mm}$$

Kõik arvutuseeldused on täidetud ning neid on kontrollitud samamoodi nagu eelneva sõlme puhul.

Sõlme kandevõime kontroll

1) Vöö liitepinna kandevõime

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} = \frac{70 + 50 + 70 + 50}{4 * 140} = 0,429$$

Maksimaalne pikijõud lõikes:

$$N_{0,Ed} = N_{02,Ed} = 760 \text{ kN}$$

Vastavalt valemile (5.24):

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{A_0 f_y \gamma_{M5}} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0} f_y \gamma_{M5}} = \frac{760}{2163 * 355 * 1} + \frac{2,56}{131500 * 355 * 1} = 0,74$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4 * n}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 * 0,74}{0,429} = 0,609$$

$$\gamma = \frac{h_0}{2t_0} = \frac{140}{2 * 6} = 11,67$$

Liitepinna kandevõime kontroll vastavalt valemile (5.23):

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9k_n f_y t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_1 \gamma_{M5}} * \beta = \frac{8,9 * 0,609 * 355 * 6^2 * \sqrt{11,67}}{\sin 40,8^\circ * 1} * 0,429 = 155 \text{ kN} < N_{1,Ed} = 162 \text{ kN}$$

→ Kandevõime pole tagatud!

Liitepinna kandevõime pole tagatud. Vöö lõikekandevõime, võrguvarda kandevõime sõlmes ning vöö lõikepinna läbistuskandevõime on tagatud ning kontrolliti samamoodi nagu eelneva sõlme puhul. Sõlme tuleb tugevdada ning alljärgnevalt on toodud tugevdamise lahendus plaadiga:

Plaadi vajalik pikkus leitakse valemiga [10, tabel 7.18]:

$$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\sin\theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin\theta_2} \right) \quad (5.34)$$

Seega:

$$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\sin\theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin\theta_2} \right) = 1,5 * \left(\frac{70}{\sin 40,8^\circ} + 68 + \frac{50}{\sin 41,8^\circ} \right) = 375 \text{ mm} \rightarrow 380 \text{ mm}$$

Plaadi laius leitakse valemiga [10, tabel 7.18]:

$$b_p \geq b_0 - 2t_0 \quad (5.35)$$

Seega:

$$b_p \geq b_0 - 2t_0 = 140 - 2 * 6 = 128 \text{ mm} \rightarrow 130 \text{ mm}$$

Plaadi paksus leitakse valemiga [10, tabel 7.18]:

$$t_p \geq 2t_1 \text{ ja } t_p \geq 2t_2 \quad (5.36)$$

Seega:

$$t_p \geq 2t_1 = 2 * 3 = 6 \text{ mm ja } t_p \geq 2t_2 = 2 * 3 = 6 \text{ mm} \rightarrow 8 \text{ mm}$$

Kuna ülemise vöö paksus on 6 mm, siis 6 mm plaadi kasutamine tugevdamiseks ei anna tulemust, sest vöö seinapaksus asendatakse kandevõime arvutusel plaadi paksusega. [10, tabel 7.18] Seega kasutatakse tugevdamiseks 8 mm paksust plaati.

$$\gamma = \frac{h_0}{2t_p} = \frac{140}{2 * 8} = 8,75$$

Liitepinna kandevõime kontroll vastavalt valemile (5.23), kus t_0 asendatakse t_p -ga [10, tabel 7.18]:

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9k_n f_y t_p^2 \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_1 \gamma_{M5}} * \beta = \frac{8,9 * 0,609 * 355 * 8^2 * \sqrt{8,75}}{\sin 40,8^\circ * 1} * 0,429 = 238 \text{ kN} > N_{1,Ed} = 162 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Liitepinna kandevõime tugevdatud lahenduse puhul on tagatud. Kandevõime on tagatud ka kõigi teiste võimalike purunemisviiside suhtes.

5.2.6 Terasfermi läbipaine

Läbipainde arvutused on tehtud programmiga *Robot Structural Analysis Professional*. Muude katuste puhul arvutatakse maksimaalne läbipaine valemiga [4, tabel NA7.1]:

$$w_{max} = \frac{L}{200} \quad (5.37)$$

kus

L - Sildeava, mm

Maksimaalne lubatud läbipaine on seega:

$$w_{max} = \frac{21450}{200} = 107 \text{ mm}$$

Terasfermi läbipaine programmist *Robot Structural Analysis Professional 2020* vastavalt kasutuspiiriseisundi koormuskombinatsioonile:

$$w = 82 \text{ mm} < w_{max} = 107 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Terasfermi läbipaine on lubatud piirides

Tabel 5.1. Terasferm sõrestikupostidega dimensioneerimise tulemused koos seinapostidega

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	150x150x4	162	55%
Ülemine vöö	140x140x6	544	95%
Alumine vöö	100x100x6	318	86%
Sõrestik	90x90x3	32	90%
Sõrestik	80x80x3	28	88%
Sõrestik	70x70x3	48	94%
Sõrestik	50x50x4	23	73%
Sõrestik	50x50x3	44	85%
Sõrestik	40x40x3	34	95%
	Kokku	1233	

Maksumus (1,8 €/kg)

2219 €

5.3 Terasferm sõrestikupostideta

Tabel 5.2. Terasferm sõrestikupostideta dimensioneerimise tulemused koos seinapostidega

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	150x150x4	162	55%
Ülemine vöö	150x150x8	754	93%
Alumine vöö	100x100x6	317	87%
Sõrestik	90x90x3	32	99%
Sõrestik	70x70x3	72	100%
Sõrestik	60x60x3	87	74%
	Kokku	1424	

Maksumus (1,8 €/kg)

2563 €

5.4 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega

Tabel 5.3. Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega dimensioneerimise tulemused koos seinapostidega

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	150x150x4	162	55%
Ülemine vöö	110x110x5	356	87%
Alumine vöö	90x90x3	151	94%
Sõrestik	80x80x3	82	76%
Sõrestik	60x60x4	23	83%
Sõrestik	60x60x3	33	59%
Sõrestik	50x50x3	23	46%
Sõrestik	40x40x3	77	90%
	Kokku	907	

Maksumus (1,8 €/kg)

1633 €

5.5 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta

Tabel 5.4. Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta dimensioneerimise tulemused koos seinapostidega

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	150x150x4	162	55%
Ülemine vöö	140x140x7,1	628	88%
Alumine vöö	90x90x3	151	97%
Sõrestik	80x80x3	35	92%
Sõrestik	70x70x3	41	76%
Sõrestik	50x50x4	20	90%
Sõrestik	50x50x3	87	62%
	Kokku	1124	

Maksumus (1,8 €/kg)

2023 €

5.6 Terasraam

Kuna raami riiv ja post on omavahel jäigalt ühendatud, siis nõtkepikkusi mõjutavad nende elementide suhtelised jäikused. Alljärgnevalt on toodud raami postide ja riivide nõtkepikkuse tegurite leidmine.

5.6.1 Raami postide nõtkepikkuse tegurite leidmine

Varda nõtkepikkuse tegur leitakse valemiga [11]:

$$\mu = \sqrt{\frac{1 - 0,2 * (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 * \eta_1 * \eta_2}{1 - 0,8 * (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 * \eta_1 * \eta_2}} \quad (5.38)$$

kus

η_1 ja η_2 - jaotusfaktorid

Jaotusfaktor posti jäiga kinnitusega ülemises otsas leitakse valemiga [11]:

$$\eta_1 = \frac{K_p}{K_p + K_{11} + K_{12}} \quad (5.39)$$

kus

- K_p - posti suhteline jäikus, mm^3
- K_{11} - posti suhteline jäikus jäiga kinnitusega ülemises otsas, mm^3
- K_{12} - riivtala suhteline jäikus posti nõtketeguri leidmiseks, mm^3

Posti suhteline jäikus leitakse valemiga [11]:

$$K_p = \frac{I_{p,y}}{h} \quad (5.40)$$

kus

- $I_{p,y}$ - Varda inertsimoment ümber y telje, mm^4
- h - Varda pikkus, mm

Riivtala suhteline jäikus posti nõtkepikkuse leidmiseks, kui vastassõlme pööre on samasuunaline ja sama suur kui vaadeldaval sõlmel, leitakse valemiga [11]:

$$K_{12} = 1,5 * \frac{I_{r,y}}{L} \quad (5.41)$$

kus

- $I_{r,y}$ - Riivi inertsimoment ümber y telje, mm^4
- L - Sildeava pikkus, mm

Raami ava $L = 21,45$ m

Posti kõrgus $h = 4,5$ m

Postid on vundamendiga kinnitatud liigendiliselt ning riiviga jäigalt.

Posti ja riivi inertsimomendid:

Post HEB 340 [8, tabel 12.3]:

$$I_{p,y} = 366\,560\,000 \text{ mm}^4$$

Riiv HEB 500 [8, tabel 12.3]:

$$I_{r,y} = 1\,071\,760\,000 \text{ mm}^4$$

Posti suhteline jäikus vastavalt valemile (5.40):

$$K_p = \frac{I_{p,y}}{h} = \frac{366\,560\,000}{4\,500} = 81\,460 \text{ mm}^3$$

Posti suhteline jäikus liigendkinnitusega alumises otsas [11]:

$$K_2 = 0$$

Posti suhteline jäikus jäiga kinnitusega ülemises otsas [11]:

$$K_{11} = 0$$

Riivtala suhteline jäikus posti nõtkepikkuse leidmiseks vastavalt valemile (5.41):

$$K_{12} = 1,5 * \frac{I_{r,y}}{L} = 1,5 * \frac{1\,071\,760\,000}{21\,450} = 74\,950 \text{ mm}^3$$

Jaotusfaktorid:

Posti liigendkinnitusega alumises otsas [11]:

$$\eta_2 = 1$$

Posti jäiga kinnitusega ülemises otsas vastavalt valemile (5.39):

$$\eta_1 = \frac{K_p}{K_p + K_{11} + K_{12}} = \frac{81\,460}{81\,460 + 0 + 74\,950} = 0,521$$

Posti nõtkepikkuse tegur vastavalt valemile (5.38):

$$\mu = \sqrt{\frac{1 - 0,2 * (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 * \eta_1 * \eta_2}{1 - 0,8 * (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 * \eta_1 * \eta_2}} = \sqrt{\frac{1 - 0,2 * (0,521 + 1) - 0,12 * 0,521 * 1}{1 - 0,8 * (0,521 + 1) + 0,6 * 0,521 * 1}} = 2,571$$

5.6.2 Raami riivide nõtkepikkuse tegurite leidmine

Riivi kaugus vundamendist $L = 4,5 \text{ m}$

Riivi pikkus $l = 11,11 \text{ m}$

Riivid on omavahel (harjasõlmes) kinnitatud liigendiliselt ning postiga jäigalt.

Posti ja riivi inertsimomendid:

Post HEB 340 [8, tabel 12.3]:

$$I_{p,y} = 366\,560\,000 \text{ mm}^4$$

Riiv HEB 500 [8, tabel 12.3]:

$$I_{r,y} = 1\,071\,760\,000 \text{ mm}^4$$

Riivi suhteline jäikus vastavalt valemile (5.40):

$$K_r = \frac{I_{r,y}}{l} = \frac{1\,071\,760\,000}{11,11} = 96\,470 \text{ mm}^3$$

Riivi suhteline jäikus liigendkinnitusega ülemises otsas [11]:

$$K_2 = 0$$

Riivi suhteline jäikus jäiga kinnitusega alumises otsas [11]:

$$K_{11} = 0$$

Posti suhteline jäikus riivi nõtkepikkuse leidmiseks, kui vastassõlmes on liigend, leitakse valemiga [11]:

$$K_{12} = 0,75 * \frac{I_{p,y}}{L} \tag{5.42}$$

Seega:

$$K_{12} = 0,75 * \frac{I_{p,y}}{L} = 1,5 * \frac{366\,560\,000}{4\,500} = 61\,090 \text{ mm}^3$$

Jaotusfaktorid:

Riivi liigendkinnitusega ülemises otsas [11]:

$$\eta_2 = 1$$

Riivi jäiga kinnitusega alumises otsas vastavalt valemile (5.38):

$$\eta_1 = \frac{K_r}{K_r + K_{11} + K_{12}} = \frac{96\,470}{96\,470 + 0 + 61\,090} = 0,612$$

Riivi nõtkepikkuse tegur vastavalt valemile (5.37):

$$\mu = \sqrt{\frac{1 - 0,2 * (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 * \eta_1 * \eta_2}{1 - 0,8 * (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 * \eta_1 * \eta_2}} = \sqrt{\frac{1 - 0,2 * (0,612 + 1) - 0,12 * 0,612 * 1}{1 - 0,8 * (0,612 + 1) + 0,6 * 0,612 * 1}} = 2,791$$

Dimensioneerimise tulemused peale postide ja riivide nõtkepikkuste sisestamist programmi *Robot Structural Analysis Professional 2020*:

Tabel 5.5. Terasraami dimensioneerimise tulemused

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	HEB 340	1208	99%
Riiv	HEB 500	4164	92%
	Kokku	5372	

Maksumus (1,8 €/kg)

9670 €

5.7 Liimpuidust talad terasest tõmbiga

Tabel 5.6. Liimpuidust talade ja terasest tõmbi dimensioneerimise tulemused koos seinapostidega

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Maht, m ³	Puidu pindala, m ²	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	150x150x4	162			55%
Tala	160x800		2,845	42,66	98%
Tõmb	2Ø28	208			85%
	Kokku	370	2,845	42,66	

Maksumus (teras 1,8 €/kg + puit 600 €/m³ + puidu viimistlus 5 €/m²)

2586 €

5.8 Sprengeltalad

Sprengeltalade dimensioneerimisel tuleb arvestada, et sprengeltala post avaldab talale ristikiudu survet. Tala ristikiudu survetugevuse arvutus on näidatud allpool.

Ristikiudu survetugevuse kontrollimisel peab olema täidetud tingimus [12, lk 36, valem 6.3]:

$$\sigma_{c,90,d} < k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (5.43)$$

kus

- $\sigma_{c,90,d}$ - Talale mõjuv arvutuslik ristikiudu survepinge, N/mm²
- $k_{c,90}$ - Liimpuidul 1,5, kui $l_1 \geq 2h$ (l_1 – kontaktpindade vahekaugus, h – tala kõrgus)
- $f_{c,90,d}$ - Ristikiudu arvutuslik survetugevus, N/mm²

Ristikiudu survepinge leitakse valemiga [12, lk 36, valem 6.4]:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (5.44)$$

kus

- $F_{c,90,d}$ - Ristikiudu mõjuv koormus, N
- A_{ef} - Efektiivne kontaktpind, mm²

Kandevõime arvutusväärtus leitakse valemiga [12, lk 25, valem 2.17]:

$$R_d = k_{mod} * \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (5.45)$$

kus

- k_{mod} - 0,9. Lamell-liimpuidul lühiajalise koormuse ja 1. kasutusklassi puhul
- R_k - Kandevõime normväärtus
- γ_M - 1,25. Lamell-liimpuidu materjali omaduste osavarutegur

Ristikiudu mõjuv koormus: $F_{c,90,d} = 85 \text{ kN}$

Sprengeltala posti ristlõike laius: $b = 160 \text{ mm}$

Sprengeltala posti ristlõike kontaktpinna pikkus $l = 140 \text{ mm}$

Ristikiudu normatiivne survetugevus [5]:

$$f_{c,90,g,k} = 2,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Efektiivse kontaktpinna A_{ef} määramisel tuleb arvestada efektiivset kontaktpikkust pikikiudu, kus tegelikku kontaktpikkust suurendatakse mõlemas suunas 30 mm. [12]

Efektiivne kontaktpikkus: $l_{ef} = l + 2 * 30 = 140 + 60 = 200 \text{ mm}$

Efektiivne kontaktpind: $A_{ef} = b * l_{ef} = 160 * 200 = 32\,000 \text{ mm}^2$

Ristikiudu arvutuslik survepinge vastavalt valemile (5.44):

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} = \frac{85\,000}{32\,000} = 2,656 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$k_{c,90} = 1,5$$

Ristikiudu arvutuslik survetugevus vastavalt valemile (5.45):

$$f_{c,90,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,90,g,k}}{\gamma_M} = 0,9 * \frac{2,5}{1,25} = 1,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c,90,d} = 2,656 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < k_{c,90} * f_{c,90,d} = 1,5 * 1,8 = 2,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \rightarrow \text{OK}$$

Sprengeltala ristikiudu survetugevus on tagatud.

Tabel 5.7. Sprengeltalade dimensioneerimise tulemused

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Kogumass, kg	Maht, m ³	Puidu pindala, m ²	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	150x150x4	162			55%
Tala	160x520		1,848	30,22	95%
Tala post	160x140		0,067	1,8	20%
Tõmb	2Ø28	208			88%
Tõmb	1Ø28	114			96%
	Kokku	484	1,915	32,02	

Maksumus (teras 1,8 €/kg + puit 600 €/m³ + puidu viimistlus 5 €/m²) 2180 €

5.9 Puidust raamkonstruktsioon

Puidust raami puhul tuleb postide ja riivide nõtkepikkused leida käsitsi. Kuna ükski sõlm pole ideaalselt jäik, siis postide ja riivide suhtelised jäikused mõjutavad nende nõtkepikkuseid. Nõtkepikkuste leidmiseks tuleb kõigepealt dimensioneerida posti ja riivi paindejäik nurgasõlm, et teada saada ristlõigete mõõtmed nurgasõlmes.

5.9.1 Posti ja riivi paindejäiga nurgasõlme dimensioneerimine

Sõlmes mõjuv paindemoment	$M_{Ed} = 669 \text{ kNm}$
Talale mõjuv põikjõud	$V_{Ed,t} = 160 \text{ kN}$
Postile mõjuv põikjõud	$V_{Ed,p} = 148 \text{ kN}$
Talale mõjuv pikijõud	$N_{Ed,t} = 196 \text{ kN}$
Postile mõjuv pikijõud	$N_{Ed,p} = 209 \text{ kN}$

Liimpuit GL28h tugevusparameetrid [5]

Liimpuidu osavarutegur	$\gamma_M = 1,25$
Normatiivne paindetugevus	$f_{m,g,k} = 28 \text{ N/mm}^2$
Keskmine tihedus	$\rho_k = 425 \text{ kg/m}^3$
Ristlõike kõrgus	$h = 1240 \text{ mm}$
	$k_{mod} = 0,9$
Postide paksus	$t_1 = 100 \text{ mm}$
Riivide paksus	$t_2 = 200 \text{ mm}$

Keermeslati tugevusparameetrid [8]

Tõmbetugevus	$f_u = 400 \text{ N/mm}^2$
Keermeslati läbimõõt	$d = 20 \text{ mm}$
Keermeslati keermestatud osa arvutuslik läbimõõt	$d_k = 17,66 \text{ mm}$
Materjali osavarutegur	$\gamma_{M,teras} = 1,1$

Ühenduse dimensioneerimine

Välimise poldiringi raadius leitakse valemiga [14, D8/5]:

$$r_1 = 0,5h - 4d \quad (5.46)$$

Seega:

$$r_1 = 0,5 * h - 4 * d = 0,5 * 1240 - 4 * 20 = 540 \text{ mm}$$

Sisemise poldiringi raadius leitakse valemiga [14, D8/5]:

$$r_2 = r_1 - 5d \quad (5.47)$$

Seega:

$$r_2 = r_1 - 5 * d = 540 - 5 * 20 = 440 \text{ mm}$$

Poltide arv välises poldiringis leitakse valemiga [14, D8/5]:

$$n_1 = \frac{2\pi r_1}{6d} \quad (5.48)$$

Seega:

$$n_1 = \frac{2\pi r_1}{6d} = \frac{2 * \pi * 540}{6 * 20} = 28$$

Poltide arv sisemises poldiringis leitakse valemiga [14, D8/5]:

$$n_2 = \frac{2\pi r_2}{6d} \quad (5.49)$$

Seega:

$$n_2 = \frac{2\pi r_2}{6d} = \frac{2 * \pi * 440}{6 * 20} = 23$$

Sisejõud, mis mõjuvad kinnitile:

1) Paindemomendist postis ja talas leitakse valemiga:

$$F_M = \frac{r_1}{n_1 r_1^2 + n_2 r_2^2} M_{Ed} \quad (5.50)$$

Seega:

$$F_M = \frac{r_1}{n_1 * r_1^2 + n_2 * r_2^2} * M_{Ed} = \frac{540}{28 * 540^2 + 23 * 440^2} * 669 = 28,631 \text{ kN}$$

2) Põikjõust postis ja talas leitakse valemiga:

$$F_{V,i} = \frac{V_{Ed,i}}{n_1 + n_2} \quad (5.51)$$

kus

i - p (post) ja t (tala)

Seega:

$$F_{V,p} = \frac{V_{Ed,p}}{n_1 + n_2} = \frac{148}{28 + 23} = 2,902 \text{ kN}$$

$$F_{V,t} = \frac{V_{Ed,t}}{n_1 + n_2} = \frac{160}{28 + 23} = 3,137 \text{ kN}$$

3) Pikijõust postis ja talas leitakse valemiga:

$$F_{N,i} = \frac{N_{Ed,i}}{n_1 + n_2} \quad (5.52)$$

Seega:

$$F_{N,p} = \frac{N_{Ed,p}}{n_1 + n_2} = \frac{209}{28 + 23} = 4,098 \text{ kN}$$

$$F_{N,t} = \frac{N_{Ed,t}}{n_1 + n_2} = \frac{196}{28 + 23} = 3,843 \text{ kN}$$

Arvutuslikud resultantjõud kinnitile leitakse valemiga:

$$F_{d,i} = \sqrt{(F_M + F_{V,i})^2 + F_{N,i}^2} \quad (5.53)$$

1) Postis

$$F_{d,p} = \sqrt{(F_M + F_{V,p})^2 + F_{N,p}^2} = \sqrt{(28,631 + 2,902)^2 + 4,098^2} = 31,799 \text{ kN}$$

2) Talas

$$F_{d,t} = \sqrt{(F_M + F_{V,t})^2 + F_{N,t}^2} = \sqrt{(28,631 + 3,137)^2 + 3,843^2} = 32 \text{ kN}$$

Järgnevad arvutused on teostatud suurema resultantjõuga, ehk:

$$F_d = F_{d,t} = 32 \text{ kN}$$

Kõige kriitilisem nurk puidu pikikiu ja liites mõjuva resultantjõu vahel leitakse valemiga:

$$\tan \alpha = \frac{F_M + F_{V,i}}{F_{N,i}} \quad (5.54)$$

1) Postis

$$\tan \alpha_1 = \frac{F_M + F_{V,p}}{F_{N,p}} = \frac{28,631 + 2,902}{4,098} = 7,695 \rightarrow \alpha_1 = \tan^{-1} \alpha_1 = 82,595^\circ$$

2) Talas

$$\tan \alpha_2 = \frac{F_M + F_{V,t}}{F_{N,t}} = \frac{28,631 + 3,137}{3,843} = 8,266 \rightarrow \alpha_2 = \tan^{-1} \alpha_2 = 83,102^\circ$$

Puidukiu ja jõu vahelisest nurgast sõltuvat muljumistugevuse normväärtust leitakse valemiga [12, lk 71, valem 8.31]:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1} \quad (5.55)$$

kus [12, lk 71, valem 8.32]:

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) \rho_k \quad (5.56)$$

Liimpuidul [12, lk 71, valem 8.33]:

$$k_{90} = 1,3 + 0,015d \quad (5.57)$$

Seega:

$$k_{90} = 1,3 + 0,015 * d = 1,3 + 0,015 * 20 = 1,6$$

Vastavalt valemile (5.56):

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) * \rho_k = 0,082 * (1 - 0,01 * 20) * 425 = 27,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vastavalt valemile (5.55):

$$f_{h,1,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1} = \frac{27,88}{1,6 * \sin^2 82,595 + \cos^2 82,595} = 17,534 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{h,2,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_2} = \frac{27,88}{1,6 * \sin^2 83,102 + \cos^2 83,102} = 17,52 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Arvutuslikud väärtused vastavalt valemile (5.45):

$$f_{h,1,d} = k_{mod} * \frac{f_{h,1,k}}{\gamma_M} = 0,9 * \frac{17,534}{1,25} = 12,625 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{h,2,d} = k_{mod} * \frac{f_{h,2,k}}{\gamma_M} = 0,9 * \frac{17,52}{1,25} = 12,614 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keermeslati voolavuspiirile vastav paindemomendi väärtus leitakse valemiga [12, lk 71, valem 8.30]:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_u d_k^{2,6} \quad (5.58)$$

Seega:

$$M_{y,Rk} = 0,3 * f_u * d_k^{2,6} = 0,3 * 400 * 17,66^{2,6} = 3\,322\,000 \text{ Nmm}$$

Arvutuslik paindemomendi väärtus:

$$M_{y,Rd} = \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M,teras}} = \frac{3\,322\,000}{1,1} = 3\,020\,000 \text{ Nmm}$$

Kinniti ühe lõike kandevõime leitakse valemitega [12, lk 58, valem 8.7]:

$$F_{v,Rd,1} = f_{h,1,d} t_1 d \quad (5.59)$$

$$F_{v,Rd,2} = 0,5 f_{h,2,d} t_2 d \quad (5.60)$$

$$F_{v,Rd,3} = 1,05 \frac{f_{h,1,d} t_1 d_k}{2 + \beta} \left(\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rd}}{f_{h,1,d} d_k t_1^2}} - \beta \right) \quad (5.61)$$

$$F_{v,Rd,4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rd} f_{h,1,d} d_k} \quad (5.62)$$

kus [12, lk 58, valem 8.8]:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5.63)$$

Seega:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{17,52}{17,534} = 0,999$$

Vastavalt valemitele (5.59), (5.60), (5.61) ja (5.62):

$$F_{v,Rd,1} = f_{h,1,d} * t_1 * d = 12,625 * 100 * 20 = 25,249 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd,2} = 0,5 * f_{h,2,d} * t_2 * d = 0,5 * 12,614 * 200 * 20 = 25,228 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{v,Rd,3} &= 1,05 * \frac{f_{h,1,d} * t_1 * d_k}{2 + \beta} * \left(\sqrt{2 * \beta * (1 + \beta) + \frac{4 * \beta * (2 + \beta) * M_{y,Rd}}{f_{h,1,d} * d_k * t_1^2}} - \beta \right) \\ &= 1,05 * \frac{12,625 * 100 * 17,66}{2 + 0,999} \\ &\quad * \left(\sqrt{2 * 0,999 * (1 + 0,999) + \frac{4 * 0,999 * (2 + 0,999) * 3\,020\,000}{12,625 * 17,66 * 100^2}} - 0,999 \right) \\ &= 27,308 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{v,Rd,4} &= 1,15 * \sqrt{\frac{2 * \beta}{1 + \beta}} * \sqrt{2 * M_{y,Rd} * f_{h,1,d} * d_k} \\ &= 1,15 * \sqrt{\frac{2 * 0,999}{1 + 0,999}} * \sqrt{2 * 3\,020\,000 * 12,625 * 17,66} = 42,19 \text{ kN} \end{aligned}$$

Valitakse väiksem ühe lõike kandevõime ning leitakse ühe kahelõikelise poldi kandevõime liites:

$$F_{v,Rd} = 2 * F_{v,Rd,2} = 2 * 25,228 = 50,457 \text{ kN} > F_d = 32 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Liite kandevõime on tagatud.

5.9.2 Posti ja riivi nõtkepikkuse tegurite leidmine

Posti inertsimoment leitakse valemiga:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.64)$$

kus

- b - ristlõike laius
- h - ristlõike kõrgus

Inertsimomendi leidmiseks kasutatakse ristlõike kõrgust, mis on elemendi kitsaimast kohast kaugusel $0,65L$, kus L on elemendi pikkus. [13, B7/7] Leitakse valemiga:

$$h = 0,65h_2 + 0,35h_1 \quad (5.65)$$

kus

- h_1 - ristlõike kõrgus posti alumises otsas
- h_2 - ristlõike kõrgus posti ülemises otsas

Posti parameetrid:

Posti pikkus $L_p = 4500$ mm

Posti ristlõike laius $b = 100$ mm

Posti ristlõike kõrgus alumises otsas $h_1 = 680$ mm

Posti ristlõike kõrgus ülemises otsas $h_2 = 1240$ mm

Elastsusmoodul:

$$E_{0,9,05} = 10500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Posti ristlõike arvutuslik kõrgus inertsimomendi arvutamiseks vastavalt valemile (5.65):

$$h = 0,65h_2 + 0,35h_1 = 0,65 * 1240 + 0,35 * 680 = 1044 \text{ mm}$$

Posti inertsimoment vastavalt valemile (5.64):

$$I = \frac{2bh^3}{12} = \frac{2 * 100 * 1044^3}{12} = 1,896 * 10^{10} \text{ mm}^4$$

Riivi parameetrid:

Riivi pikkus $L_r = 11100$ mm

Riivi ristlõike laius $b = 200 \text{ mm}$

Riivi ristlõike kõrgus harjas $h_1 = 360 \text{ mm}$

Riivi ristlõike kõrgus sõlmes $h_2 = 1240 \text{ mm}$

Riivi ristlõike arvutuslik kõrgus inertsimomendi arvutamiseks vastavalt valemile (5.65):

$$h = 0,65h_2 + 0,35h_1 = 0,65 * 1240 + 0,35 * 360 = 932 \text{ mm}$$

Riivi inertsimoment vastavalt valemile (5.64):

$$I_0 = \frac{bh^3}{12} = \frac{200 * 932^3}{12} = 1,349 * 10^{10} \text{ mm}^4$$

Posti ja riivi nõtkepikkuse tegurid

Posti nõtkepikkuse tegur leitakse valemiga [13, B7/5, valem 16]:

$$\lambda_p = \sqrt{4 + 3,2 * \frac{I * L_r}{I_0 * L_p} + 10 * \frac{E_{0,9,05} * I}{L_p * K_r}} \quad (5.66)$$

Riivi nõtkepikkuse tegur leitakse valemiga [13, B7/5, valem 17]:

$$\lambda_r = \lambda_p * \sqrt{\frac{I_0 * N_{Ed,p}}{I * N_{Ed,t}}} \quad (5.67)$$

kus [13, B7/7]:

$$K_r = 2K_u(n_1 r_1^2 + n_2 r_2^2) \quad (5.68)$$

kus [13, B7/7]:

$$K_u = \frac{2K_{ser}}{3} \quad (5.69)$$

kus [13, B7/7]:

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} * d}{20} \quad (5.70)$$

Seega:

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} * d}{20} = \frac{425^{1,5} * 20}{20} = 8762 \text{ N/mm}$$

Vastavalt valemile (5.69):

$$K_u = \frac{2 * K_{ser}}{3} = \frac{2 * 8762}{3} = 5841 \text{ N/mm}$$

Vastavalt valemile (5.68):

$$K_r = 2 * K_u * (n_1 * r_1^2 + n_2 * r_2^2) = 2 * 5841 * (28 * 540^2 + 23 * 440^2) = 1,474 * 10^{11} \text{ Nmm}$$

Posti nõtkepikkuse tegur vastavalt valemile (5.66):

$$\lambda_p = \sqrt{4 + 3,2 * \frac{I * L_r}{I_0 * L_p} + 10 * \frac{E_{0,g,05} * I}{L_p * K_r}}$$

$$= \sqrt{4 + 3,2 * \frac{1,896 * 10^{10} * 11100}{1,349 * 10^{10} * 4500} + 10 * \frac{10500 * 1,896 * 10^{10}}{4500 * 1,474 * 10^{11}}} = 4,254$$

Riivi nõtkepikkuse tegur vastavalt valemile (5.67):

$$\lambda_r = \lambda_p * \sqrt{\frac{I_0 * N_{Ed,p}}{I * N_{Ed,t}}} = 4,254 * \sqrt{\frac{1,349 * 10^{10} * 209}{1,896 * 10^{10} * 196}} = 3,705$$

Nõtkepikkused tuleb sisestada programmi Robot ning seejärel saab dimensioneerida kogu raami.

Tabel 5.7. Puidust raamkonstruktsiooni dimensioneerimise tulemused

Ristlõike nimetus	Ristlõige	Maht, m ³	Puidu pindala, m ²	Max. koormatud elemendi kasutatud kandevõime, %
Post	2x100x680...1240	1,727	38,16	98%
Riiv	200x360...1240	3,555	44,44	99%
	Kokku	5,282	82,6	

Maksumus (puit 600 €/m³ + puidu viimistlus 5 €/m²) 3582 €

6 TULEMUSTE ANALÜÜS

6.1 Teraskonstruksioonide materjali kulu

Tabel 6.1. Teraskonstruksioonide materjali kulu

Teraskonstruksioonid (koos seinapostidega)		
Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega	907	kg
Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta	1124	kg
Terasferm sõrestikupostidega	1233	kg
Terasferm sõrestikupostideta	1424	kg
Terasraam	5372	kg

Kõige ökonoomsema tulemuse teraskonstruksioonide puhul saab kolmnurkse fermiga, millel on ka sõrestikupostid. Paremuselt teise tulemuse saab samuti kolmnurkse fermiga, kuid sellel fermil pole sõrestikuposte. Sõrestikupostidega fermi ülemise vöö saab teha ökonoomsema, kuna sõrestikupostid takistavad ülemise vöö välja nõtkumist surve puhul. Ökonoomsema ülemise vöö arvelt saabki fermi teha ökonoomsema. Antud fermi puhul on miinuseks suur ruumivajadus lae all.

Terasferm sõrestikupostidega ja terasferm sõrestikupostideta vajavad küll rohkem materjali kui kolmnurkse kujuga fermid, kuid positiivse külje pealt võtavad need vähem ruumi ning seetõttu saab hoones kasutada kõrgemaid esemeid/seadmeid. Nagu kolmnurkse fermi puhulgi, saab siin ökonoomsema tulemuse, kui kasutada fermi sõrestikus poste, kuna need vähendavad ülemise vöö nõtkepikkust ja seeläbi saab valmistada ökonoomsema ülemise vöö. Võrreldes kolmnurkse fermiga, kulub siin materjali rohkem, kuna fermi kõrgus on väiksem ja seega jaotuvad vöödesse väiksema jõuõla tõttu suuremad sisejõud.

Kõige kulukam variant oleks hoone põhiline kandekonstruksioon lahendada terasraamiga. Kuna ava on suur (21,45 m), siis tekivad elementides suured paindemomendid ning selleks, et elemendid neile vastu peaksid, tuleb nende ristlõikeid suurendada. Fermide puhul jaotuvad sisejõud elementide vahel ning seetõttu saab ökonoomsema tulemuse, kuid terasraami puhul ei toimu sisejõudude jagunemist ning seetõttu kulub ka rohkem materjali. Lisaks sellele tekivad raamkonstruksioonide kasutamisel toesõlmes märkimisväärsed põikjõud, mis omakorda mõjutavad vundamente.

6.2 Puitkonstruktsioonide materjali kulu

Tabel 6.2. Puitkonstruktsioonide materjali kulu

Puitkonstruktsioonid (koos seinapostidega)						Hind (puit 600 €/m ³ + 5 €/m ² , teras 1,8 €/kg)	Kokku, €
Sprengeltalad	Puit	1,915	m ³	32,02	m ²	1309,1	2180
	Teras	484	kg			871,2	
Liimpuidust talad terastõmbidega	Puit	2,845	m ³	42,66	m ²	1920,3	2586
	Teras	374	kg			666	
Liimpuidust raam	Puit	5,282	m ³	82,6	m ²	3582,2	3582
	Teras	0	kg			0	

Kuna puitkonstruktsioonide puhul on lisaks liimpuidule kasutusel ka teras (seinapostid ning tõmbid), siis parema võrdluse saamiseks võrreldakse siin puitkonstruktsioonide maksumusi. Maksumuse arvutamiseks küsiti keskmist teraskonstruktsioonide tootmise maksumust ettevõttest B&W Metall OÜ ning puitkonstruktsioonide maksumust ettevõttest Arcwood. Teraskonstruktsioonide keskmine maksumus koos valmistamisega on 1,8€/kg ning puitkonstruktsioonide keskmine maksumus 600€/m³ + viimistlus 5€/m².

Puitkonstruktsioonide puhul saab ökonoomseima tulemuse samuti sellisel juhul, kui ülemise vöö nõtkepikkust vähendada. Sprengeltaladel on keskel post ning see aitab kaasa ülemise vöö kandevõimele nõtkel, lisaks sellele vähendab post ka ülemise vöö paindemomenti. Liimpuidust taladel terastõmbiga keskel post puudub ning talade kandevõime nõtkel on tunduvalt väiksem ja seetõttu on vajalik suurem ristlõige ja kulub rohkem materjali.

Nagu teraskonstruktsioonide puhul, on siingi kõige kulukam lahendus raamkonstruktsioon. Suurimad paindemomendid koonduvad riivi ja posti nurgasõlme ning seetõttu kulub ka materjali palju rohkem.

Tasub mainida, et liimpuidust katusekonstruktsioonide võrdlemisel dimensioneeriti veel ka kahekaldelist altkõverusega liimpuittala (niinimetatud bumerangtala), kuid arvutustest selgus, et harjatsoonis mõjuvad ristikiudu tõmbepinged ületasid tõmbetugevust toodetavate ristlõigete puhul ning seetõttu jäi see lahendus võrdlusest välja.

Kokkuvõtteks võib öelda, et selliste terasest ja puidust liitkonstruktsioonide montaaž on mõnevõrra keerukam ja aeganõudvam kui otse tehasesst tuleva terafermi montaaž.

6.3 Kandekonstruksioonide maksumuse analüüs

Tabel 6.3. Kandekonstruksioonide maksumus

	Kandekonstruksioon	Hind, €
1	Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega	1633
2	Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta	2023
3	Sprengeltalad	2180
4	Terasferm sõrestikupostidega	2219
5	Terasferm sõrestikupostideta	2563
6	Liimpuidust talad terastõmbiga	2586
7	Liimpuidust raam	3582
8	Terasraam	9670

Peale dimensioneerimist ning maksumuse arvutamist selgus, et kõige odavam on toota kolmnurkse kujuga terasfermi, mille sõrestikus on lisaks diagonaalidele ka postid. Sellise kujuga fermi tootmine koos seinapostidega maksaks 1633 eurot. Kõige kallim lahendus on hoone ehitada raamidest, kuna nende nurgasõlmed on projekteeritud jäigaks ning seetõttu peavad suutma taluda suuri paindemomente. Puidust raami tootmine maksab 3582 eurot ning terasraami tootmine 9670 eurot. Samas raamide puhul saab ära kasutada hoone kogukõrgust, mis fermide ja muude konstruktsioonide puhul jääb kasutamata. Samas, kui oluline on ökonoomne lahendus, kuid lisaks sellele on soov kasutada ära ka ruumi avarust, siis kõige parema kompromissi annab terasfermide kasutamine (järjekorranumbrid tabelis 4 ja 5). Kulude poolest on need variandid vaadeldutest keskpärased, kuid kuna ferm pole kõrge, siis saab hoone kõrgust paremini ära kasutada.

Kuna vaatluse all olev hoone kuulub tulepüsivusklassi TP3, siis ei ole ühelgi konstruktsioonil tulepüsivusnõudeid. Kui tulepüsivusklass oleks TP1 või TP2, siis võib kandekonstruksioonide maksumuse tabeli järjestus erineda. Näiteks teraselementide puhul oleks sellisel juhul vajalik tuletõkkevärviga katmine. Lisaks sellele ei saaks tulekahjuolukorras arvestada kandeprofiilpleki jäigastava diafragmana töötamist ning tuleks kasutada lisasidemeid, et tagada konstruktsiooni kandevõime nõutava aja jooksul.

Üldiselt võib öelda, et vaadeldud terasest konstruktsioonide tootmine on tunduvalt odavam, kui vaadeldud liimpuidust konstruktsioonide tootmine. Lisaks tuleb ehitise püstitamise kulude hindamisel arvesse võtta ka ehitustehnoloogilist keerukust. Tunduvalt lihtsam on monteerida konstruktsiooni, mis on ühes tükis, kuna sel juhul saab kasutada ühte kraanat. Selle arvestamine soodustab veelgi enam terasfermide

kasutamist. Kõike seda arvestades on mõistetav, miks suurema sildeavadega hoonete puhul on katusekonstruktsioonina kasutatud terasferme. Samas sõltuvalt ehitise otstarbest võib raamkonstruktsioon osutada mõistlikumaks. Antud ehitise puhul oleks kõige ökonoomsem lahendus kolmnurkse kuju ja sõrestikupostidega terasferm.

6.4 Võrdlus varem koostatud magistritöö tulemustega

Sarnast teemat on käsitletud varemgi, näiteks Kristin Kartsep võrdles aastal 2017 oma magistritöös terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioone Nõo Konsumi näitel. Maksumuse arvutamisel on võetud arvesse konstruktsiooni kogumaksumus alates tootmisest kuni püstitamiseni. Magistritöös vaadeldud hoone tulepüsivusklass on TP2 ning sildeava pikkus on 17,5 meetrit, hoonel on lamekatus. Autor jõudis tulemusteni, et liimpuidust ja terasest karkassi maksumuse erinevus on väga väike ning erinevus võib kaduda vähimagi muutuse tõttu materjali maksumuses või konstruktiivses lahenduses. Kuid liimpuidu eelisteks on keskkonnasõbralikkus ning kohaliku materjalina panustab selle kasutamine ka kohalikku majandusse. [15] Käesolevas töös saadud tulemused kajastavad ainult tootmise maksumust. Siiski kõige odavama teraskonstruktsiooni ning puitkonstruktsiooni hinnavahe on märkimisväärne. Üks põhjusi võib olla tulepüsivusklassi ning sildeava pikkuse erinevuses. Käesolevas töös käsitletud hoone sildeava on 21,45 meetrit ning tulepüsivusklass TP3. Kuna kandekonstruktsioonile pole tulepüsivusnõudeid esitatud, siis see võib muuta teraskonstruktsiooni soodsamaks võrreldes puitkonstruktsiooniga, kuna teraskonstruktsiooni ei pea katma tulekaitsevõrk. Lisaks on erinev sprengetalade konstruktsioon. Käesolevas töös on sprengetala keskel üks post, kuid võrreldavas töös on sprengetalal kaks posti, mille tõttu on sprengetala ristlõige väiksem ning see teeb liimpuidust konstruktsiooni ka soodsamaks.

7 KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö teemaks oli erinevate liimpuidust ja terasest kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel. Magistritöö eesmärk oli välja selgitada põhiline kandekonstruktsioon, mille tootmine on Kanepi Coop kaupluse ehitamiseks kõige odavam. Kandekonstruktsioonile mõjuvad koormused ja koormuskombinatsioonid leiti vastavalt kehtivatele standarditele. Kokku lahendati läbi 8 erinevat konstruktsiooni, nende hulgas 5 teraskonstruktsiooni ning 3 erinevat puitkonstruktsiooni. Teraskonstruktsioonide puhul olid vaatluse all erineva kõrgusega fermid ning sõrestikupostidega ja sõrestikupostideta fermid. Puitkonstruktsioonide puhul vaadeldi talade süsteeme: liimpuidust talad terasest tõmbidega ning spregneltalad. Lisaks vaadeldi terasest ja puidust raamkonstruktsioone. Konstruktsioonid dimensioneeriti, kasutades programme *Mathcad Prime 2.0* ja *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020*.

Kõige odavam tulemus saavutati kolmnurksete terasfermidega ja kõige kallim lahendus terasraamiga. Kolmnurkse fermi negatiivne pool on suur ruumivajadus, mistõttu ei saa kogu ruumi avarust ära kasutada. Raamide puhul saab kasutada suuremal hulgal ruumi kõrgust. Siiski võib tulemus erineda, kui arvestada maksumuses veel ka ehitamise kulu. Tulemusi võib mõjutada ka tulepüsivusklassi TP1 või TP2 kasutamine, mis nõuaks terase katmise tuletõkkevärviga.

Lisaks võrreldi käesoleva töö tulemusi varem koostatud teise autori magistritöö tulemustega, kus maksumuses arvestati ka ehitamise kuluga. Mainitud töös jõuti tulemusele, et teraskonstruktsiooni ja liimpuitkonstruktsiooni kogumaksumus on ligilähedane ning valiku tegemisel võivad oluliseks osutada muud aspektid nagu keskkonnasäästlikkus ning kohaliku majanduse toetamine.

8 SUMMARY

The topic of the master's thesis was to design different steel and glulam structures and to compare their costs in example of Kanepi Coop store. The aim was to find out which load - bearing structure would be most economical to produce for building the store. Loads that influence the load – bearing structure and load combinations were calculated according to current standards. Altogether there were 8 different solutions for the structures, 5 different steel structures and 3 different glulam structures. Among steel structures there were trusses with different height and also trusses with and without truss columns. Among glulam structures there were different beam systems such as glulam beams with tension rods. Finally frames made of steel and glulam were also calculated. All the structures were designed using programs *Mathcad Prime 2.0* and *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020*.

The most economical result were achieved with triangle shaped steel trusses and the least economical result came with steel frame. Although the negative side with using triangle shaped steel trusses is that it takes up a lot of space under the roof. That is why sometimes it is reasonable to choose frame structures, it is possible to use the height of the room. It should be pointed out that the results may vary if the cost of building is taken into account. Also if fire resistance classes TP1 or TP2 were used, the results might be different from the ones above. In that case steel structures need to be covered with fire protection paint.

The results of this master's thesis were compared with previously made master's thesis by another author where building costs were taken into account. It was concluded that the total cost of glulam and steel structures are almost the same and to make a choice it would be reasonable to take into account other aspects like environmental affection and supporting local economy.

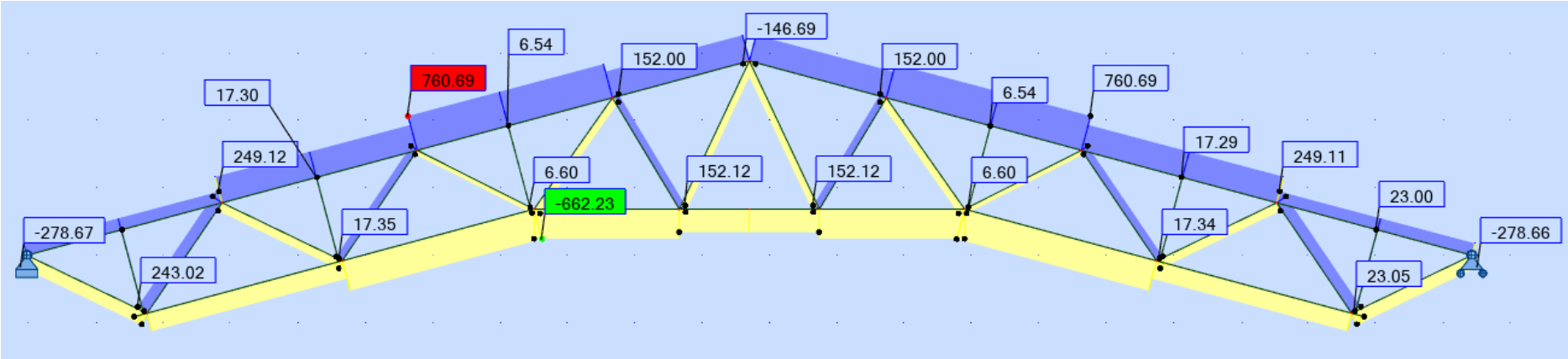
9 KASUTATUD KIRJANDUS

1. 2107. Kanepi „Konsum“ kauplus. Eelprojekt. Resand AS, 2021
2. Eurokoodeks. Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused. EVS-EN 1990:2002+NA:2002. Eesti Standardikeskus, 2003
3. Eurokoodeks 1. Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused. Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused. EVS-EN 1991-1-1:2002. Eesti Standardikeskus, 2009
4. Eurokoodeks 3. Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. EVS-EN 1993-1-1:2006. Eesti standardikeskus, 2006
5. Puitkonstruksioonid. Lamell-liimpuit ja plankliimpuit. Nõuded. EVS-EN 14080:2013. Eesti Standardikeskus, 2013
6. Eurokoodeks 1. Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus. EVS-EN 1991-1-3:2006. Eesti Standardikeskus, 2009
7. Eurokoodeks 1. Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus. EVS-EN 1991-1-4:2007. Eesti Standardikeskus, 2007
8. Masso, T. Ehituskonstruktorigi käsiraamat. 4. parandatud trükk. Ehitame, 2014
9. Loorits, K. Teraskonstruksioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi. Eesti Teraskonstruksiooniühing, 2008
10. Eurokoodeks 3. Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-8: Liidete projekteerimine. EVS-EN 1993-1-8:2006. Eesti Standardikeskus, 2006
11. Teraskonstruksioonid. Osa 1-1: Hoonete projekteerimiseeskirjad, Lisa E. Eesti Standardikeskus, 2003
12. Eurokoodeks 5. Puitkonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. EVS-EN 1995-1-1:2005+NA:2007+A1:2008+NA:2009. Eesti Standardikeskus, 2009
13. Timber Engineering STEP 1. Basics of design, material properties, structural components and joints. Centrum Hout, Netherlands, 1995
14. Timber Engineering STEP 2 Design – Details and structural systems. Centrum Hout, Netherlands, 1995

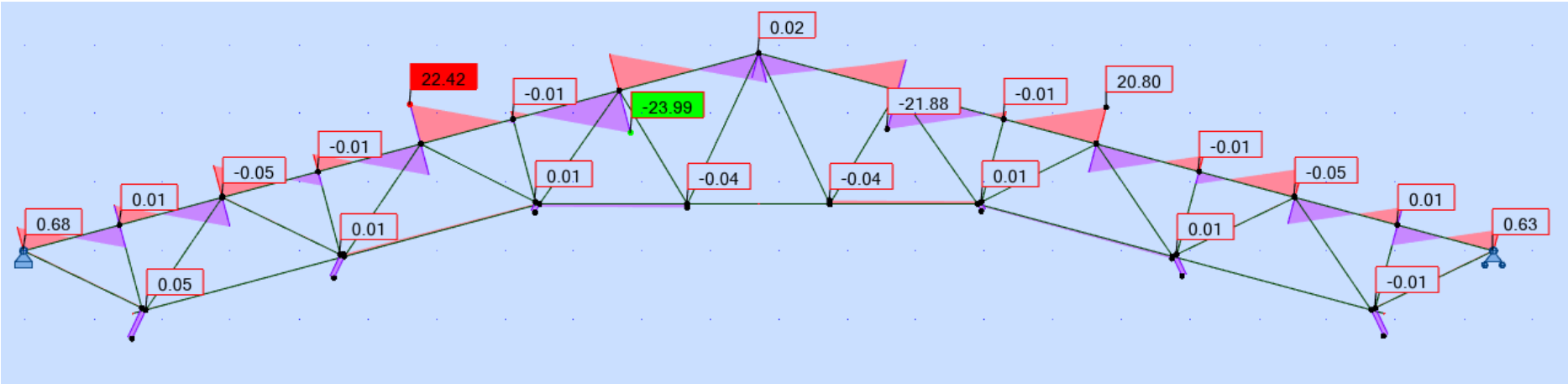
15. Kartsep, K. Terasest ja liimpuidust kandekarkasside võrdlev arvutus Nõo Konsumi näitel. Magistritöö. Tartu, 2017
16. Ruukki. <https://www.ruukki.com/est/katuseooted/tooted-ja-teenused/katuseprofiilid/katuse-detailid/classic-nextgen-c-ee#tehniline-info>
17. Tectis. <http://www.tectis.ee/et/index.php/tooted/katusealuskatted/anticon-rankka>
18. Isover. <https://www.isover.ee/tooted/isover-ol-top>
19. Kpartner. <https://materjal.kpartner.ee/katusematerjal/sbs-bituumen-rullmaterjal-katusekate/>
20. Isover. <https://www.isover.ee/tooted/isover-ol-p>
21. Ruukki. <https://www.ruukki.com/est/ehitustooted/tooted/katusekonstruktsioonid/kergtalad-katusekonstruktsioonidele/light-weight-purlin-detail/termo-purlin#%c3%bcldandmed>

LISAD

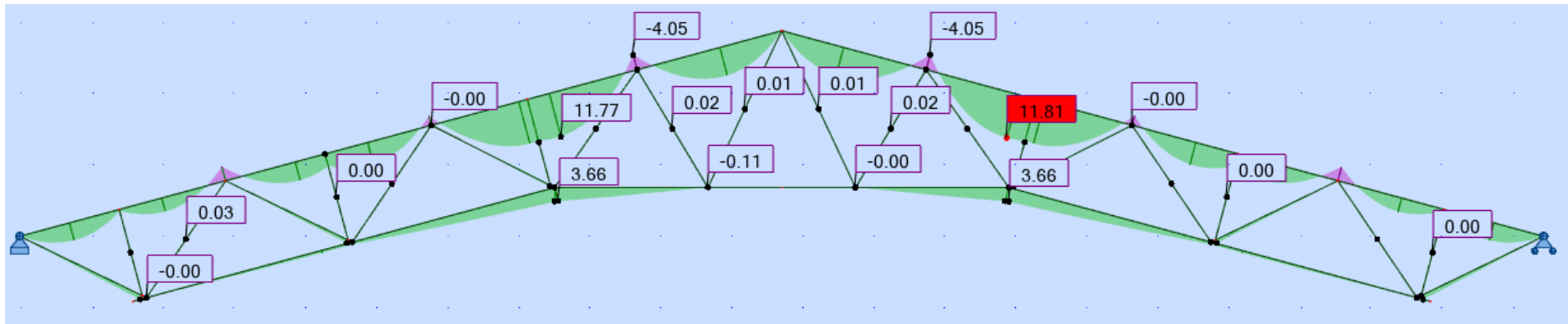
Lisa 1 Terasferm sõrestikupostidega, sisejõud



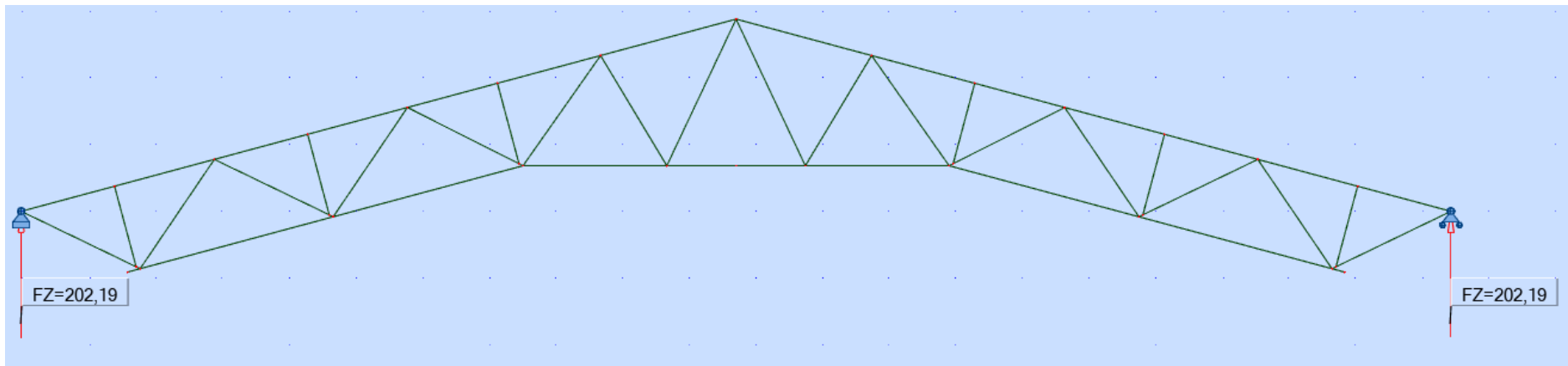
Joonis L1.1 Fermi maksimaalsed pikijõud



Joonis L1.2 Fermi maksimaalsed põikjõud

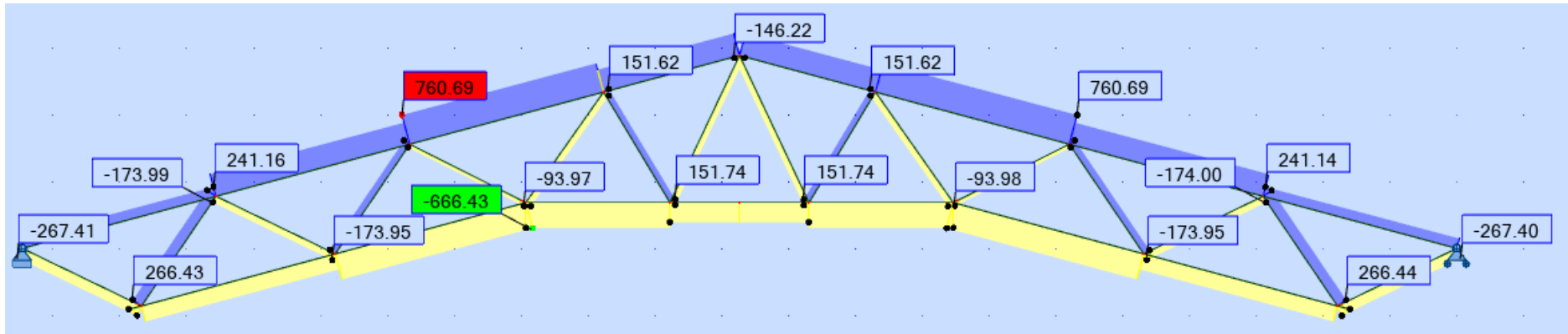


Joonis L1.3 Fermi maksimaalsed paindemomendid

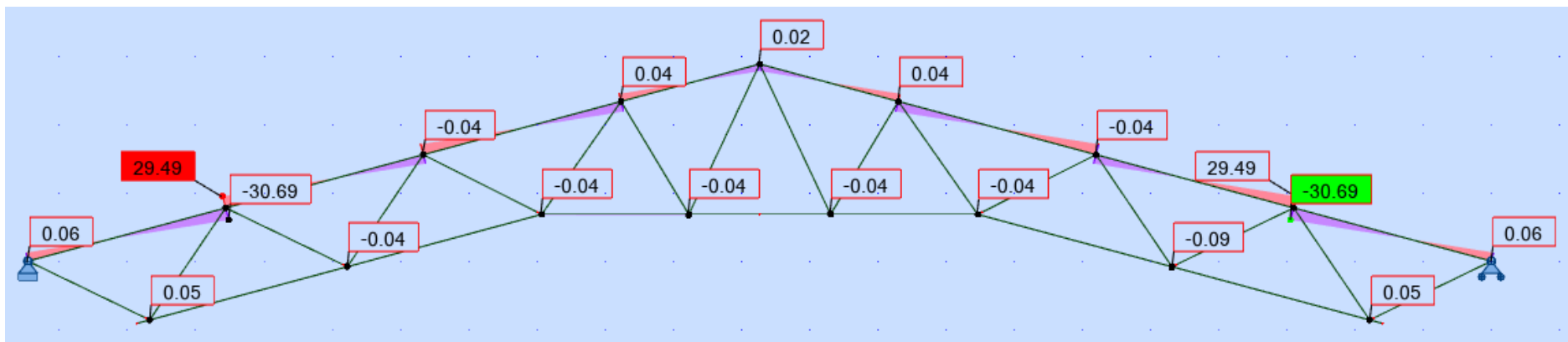


Joonis L1.4 Fermi maksimaalsed toereaktsioonid

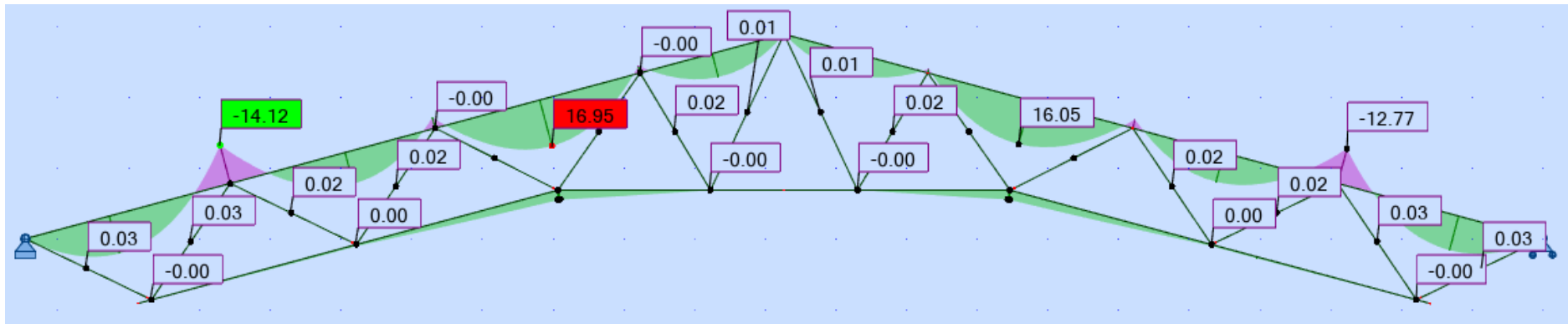
Lisa 2 Terasferm sõrestikupostideta, sisejõud



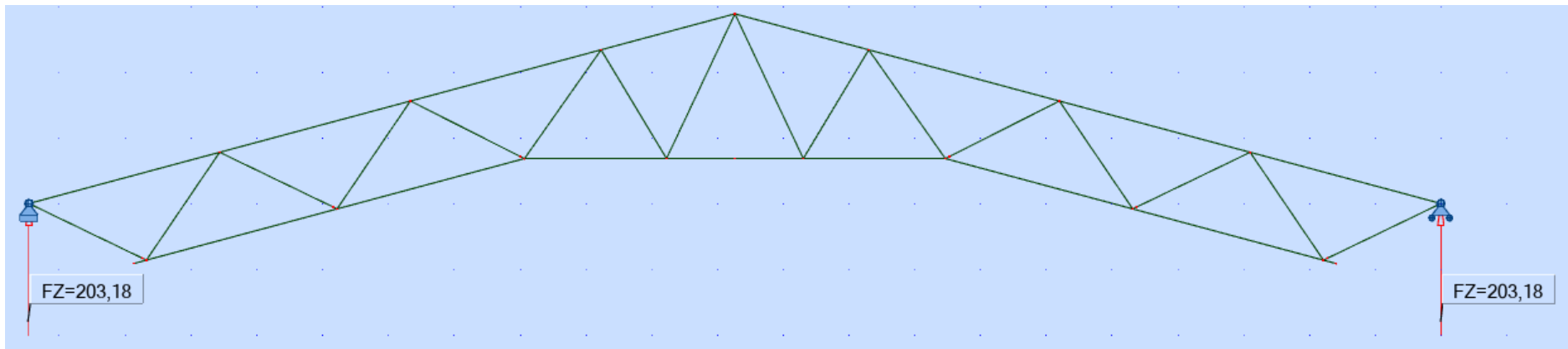
Joonis L2.1 Fermi maksimaalsed pikijõud



Joonis L2.2 Fermi maksimaalsed pöikjõud

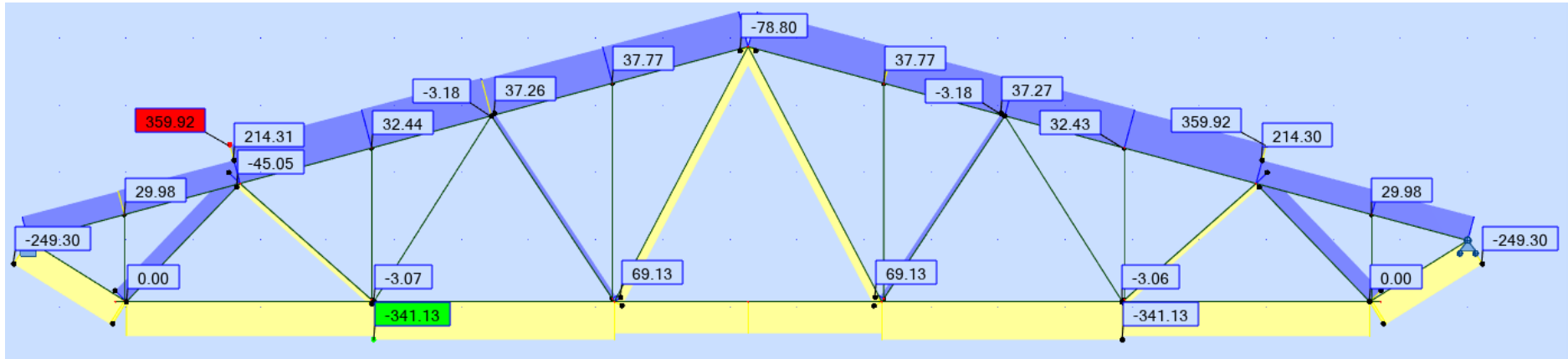


Joonis L2.3 Fermi maksimaalsed paindemomendid

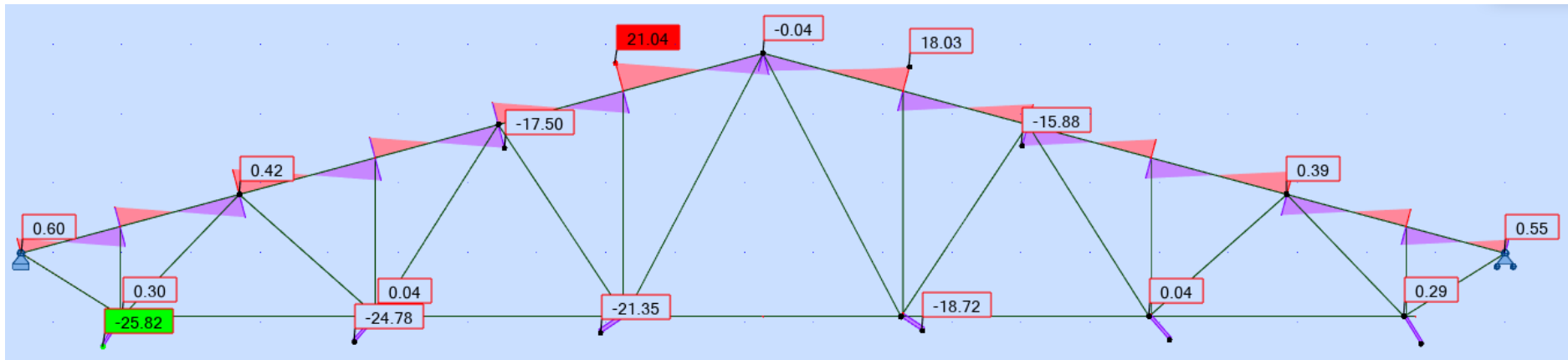


Joonis L2.4 Fermi maksimaalsed toereaktsioonid

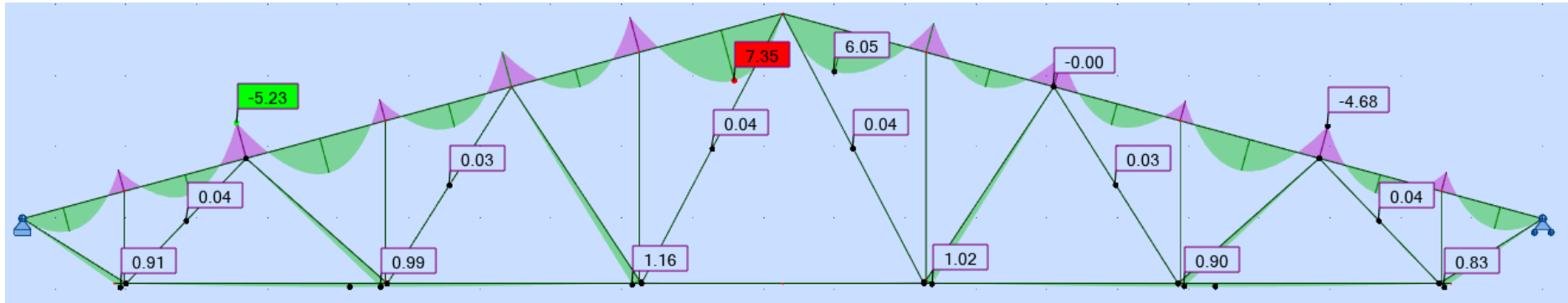
Lisa 3 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega, sisejõud



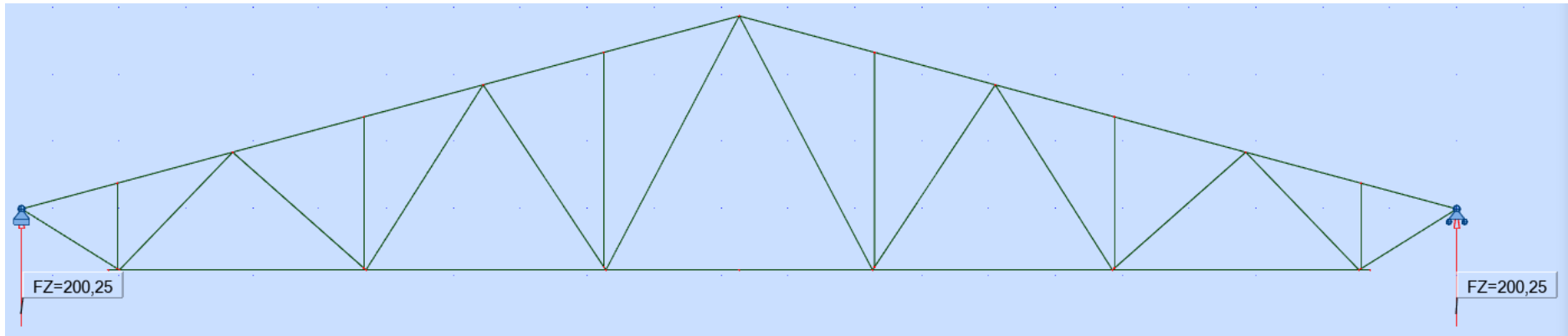
Joonis L3.1 Fermi maksimaalsed pikijõud



Joonis L3.2 Fermi maksimaalsed pöikjõud

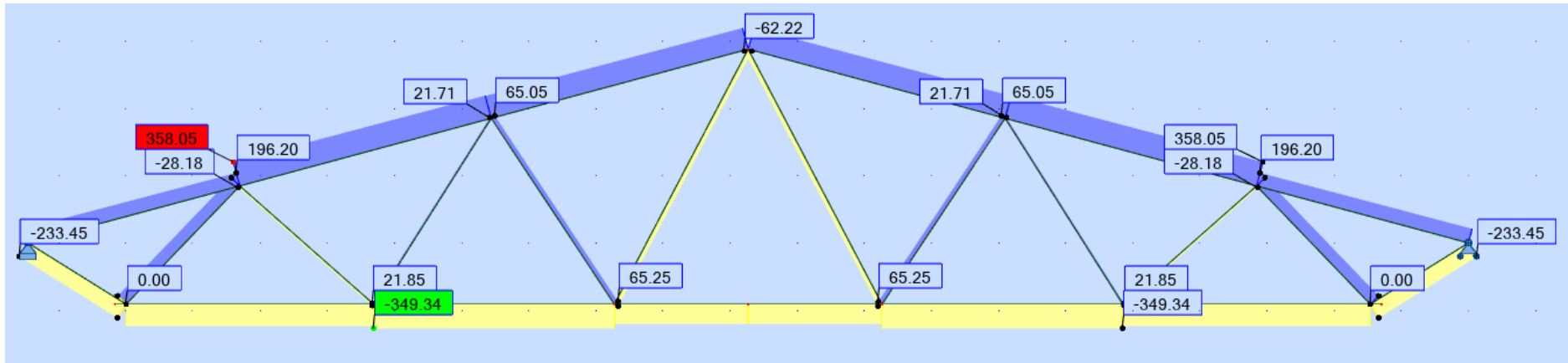


Joonis L3.3 Fermi maksimaalsed paindemomendid

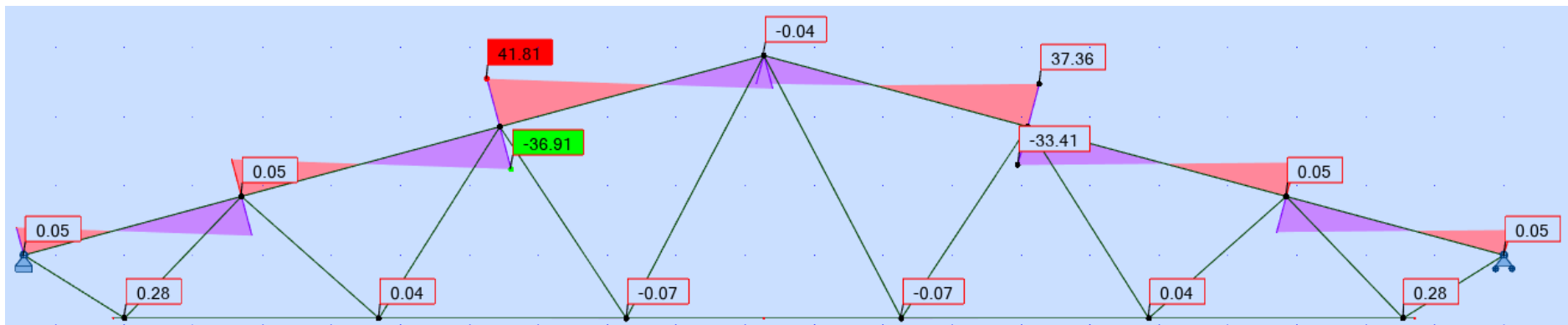


Joonis L3.4 Fermi maksimaalsed toereaktsioonid

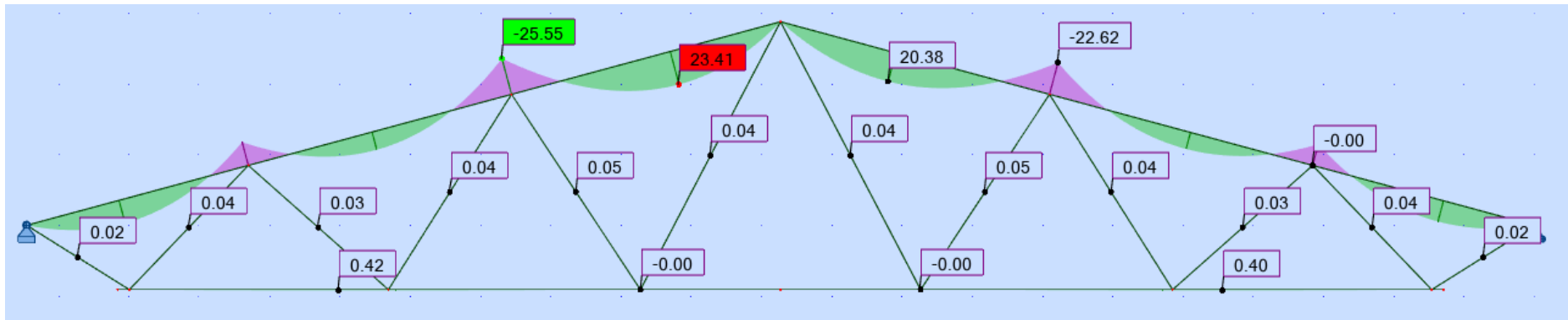
Lisa 4 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta, sisejõud



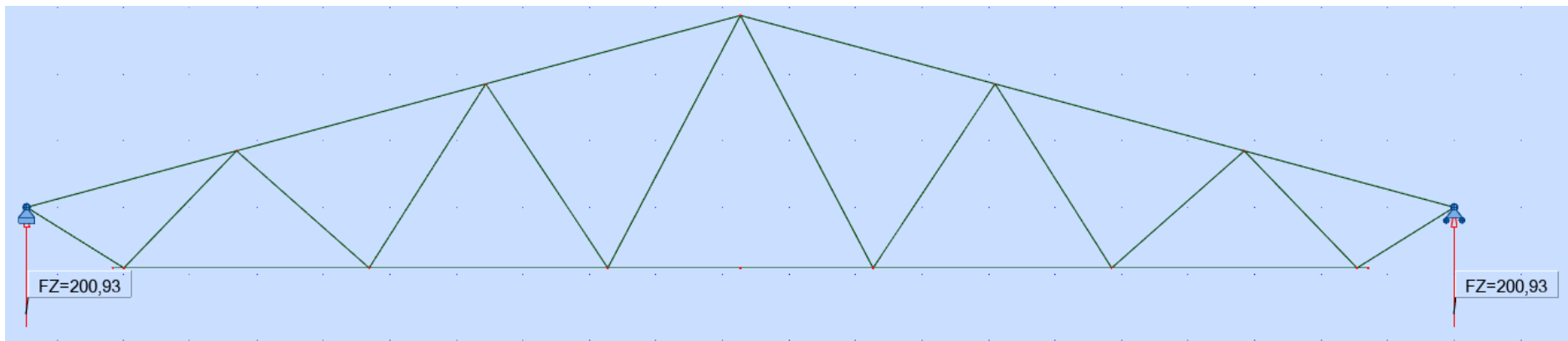
Joonis L4.1 Fermi maksimaalsed pikijõud



Joonis L4.2 Fermi maksimaalsed pöikjõud

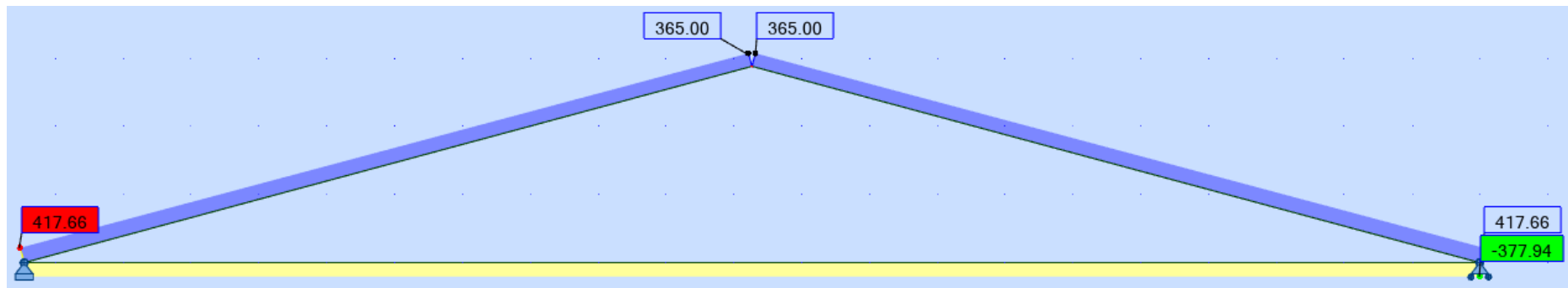


Joonis L4.3 Fermi maksimaalsed pändemomendid

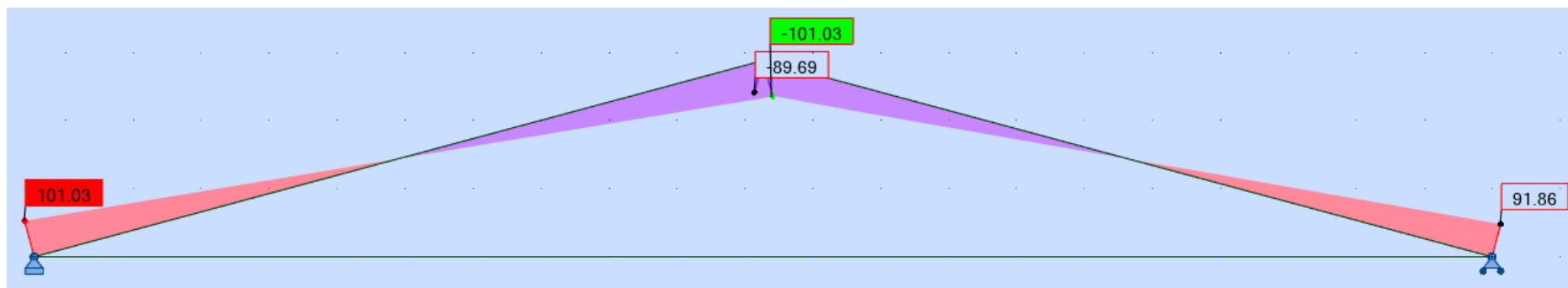


Joonis L4.4 Fermi maksimaalsed toereaktsioonid

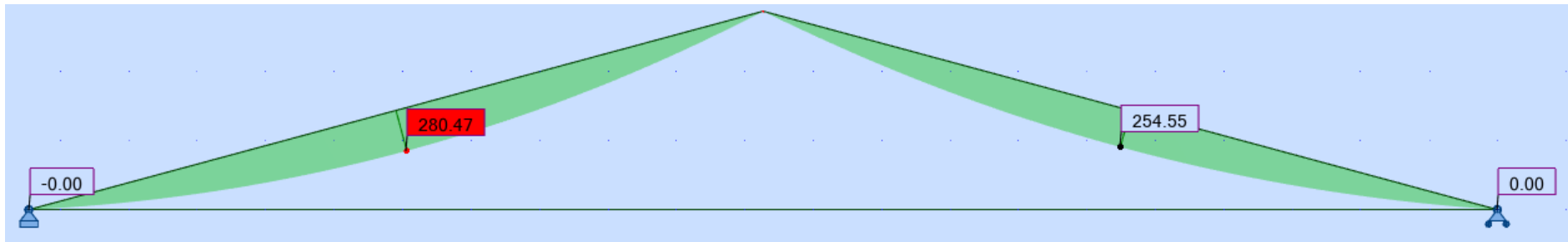
Lisa 5 Liimpuidust talad terasest tõmbiga, sisejõud



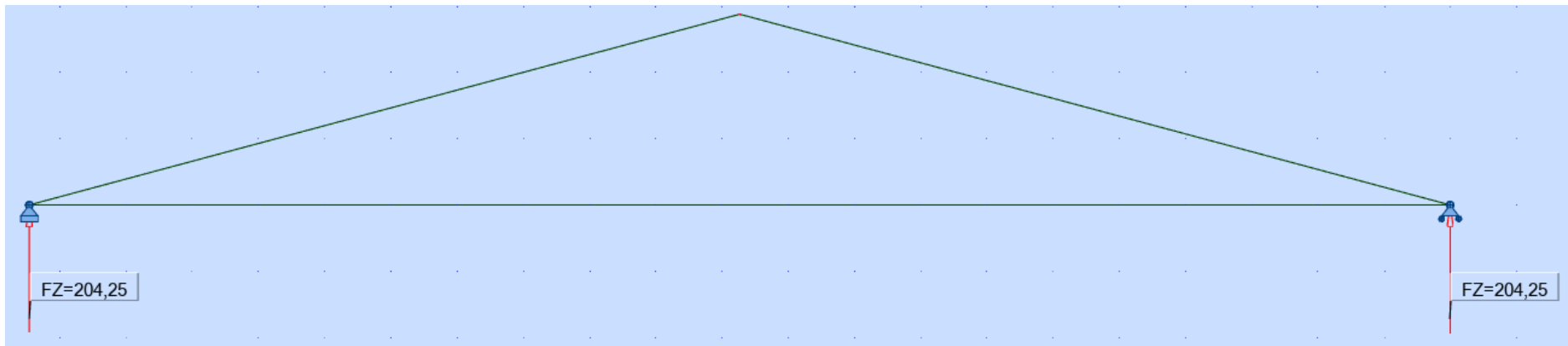
Joonis L5.1 Maksimaalsed pikijõud



Joonis L5.2 Maksimaalsed põikjõud

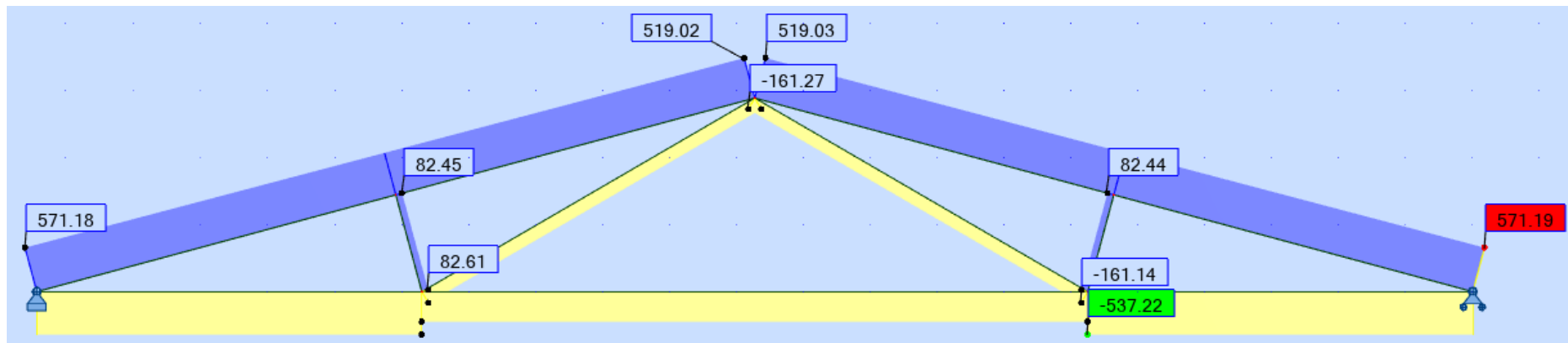


L5.3 Maksimaalsed paindemomendid

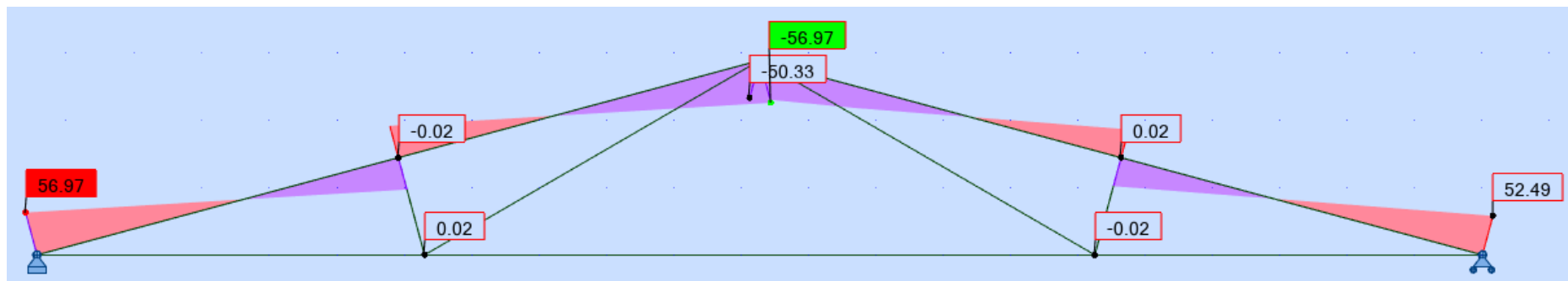


L5.4 Maksimaalsed toereaktsioonid

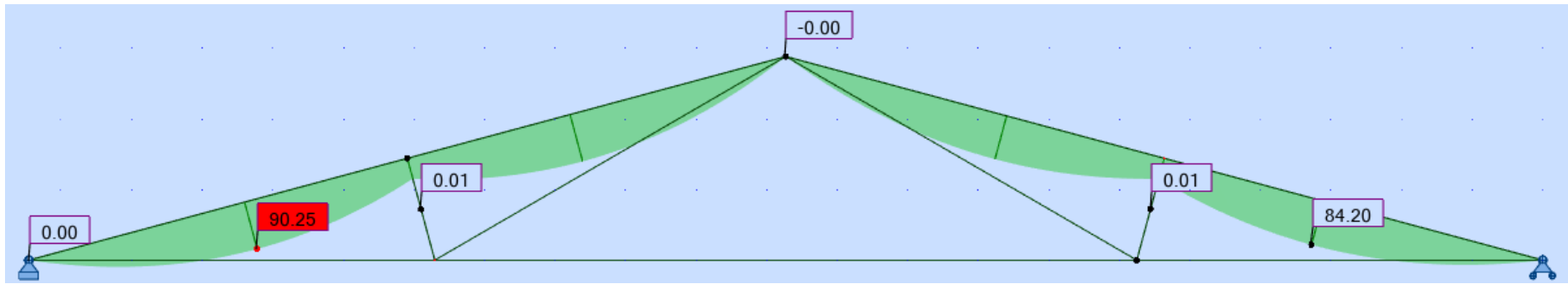
Lisa 6 Sprengeltalad, sisejõud



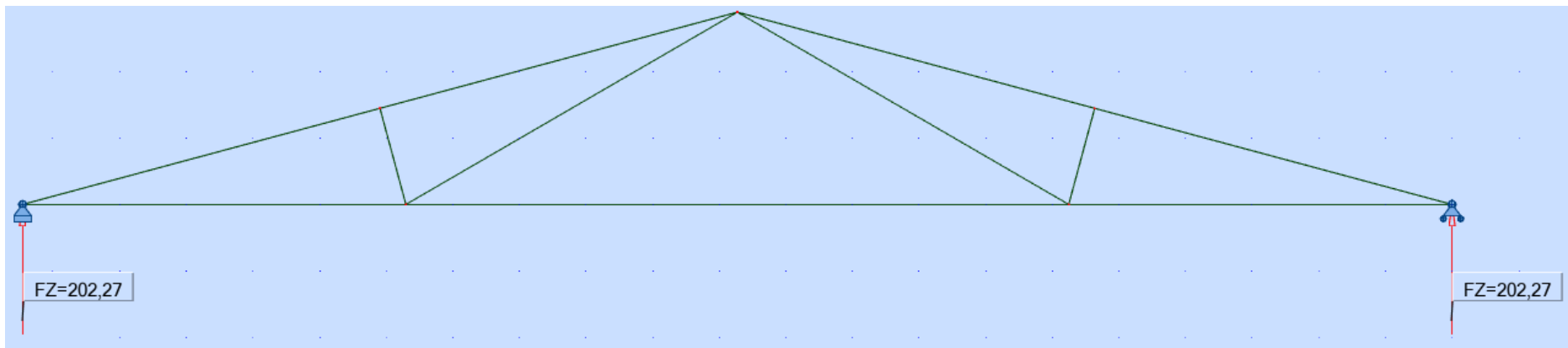
L6.1 Sprengeltalade maksimaalsed pikijõud



L6.2 Sprengeltalade maksimaalsed põikjõud

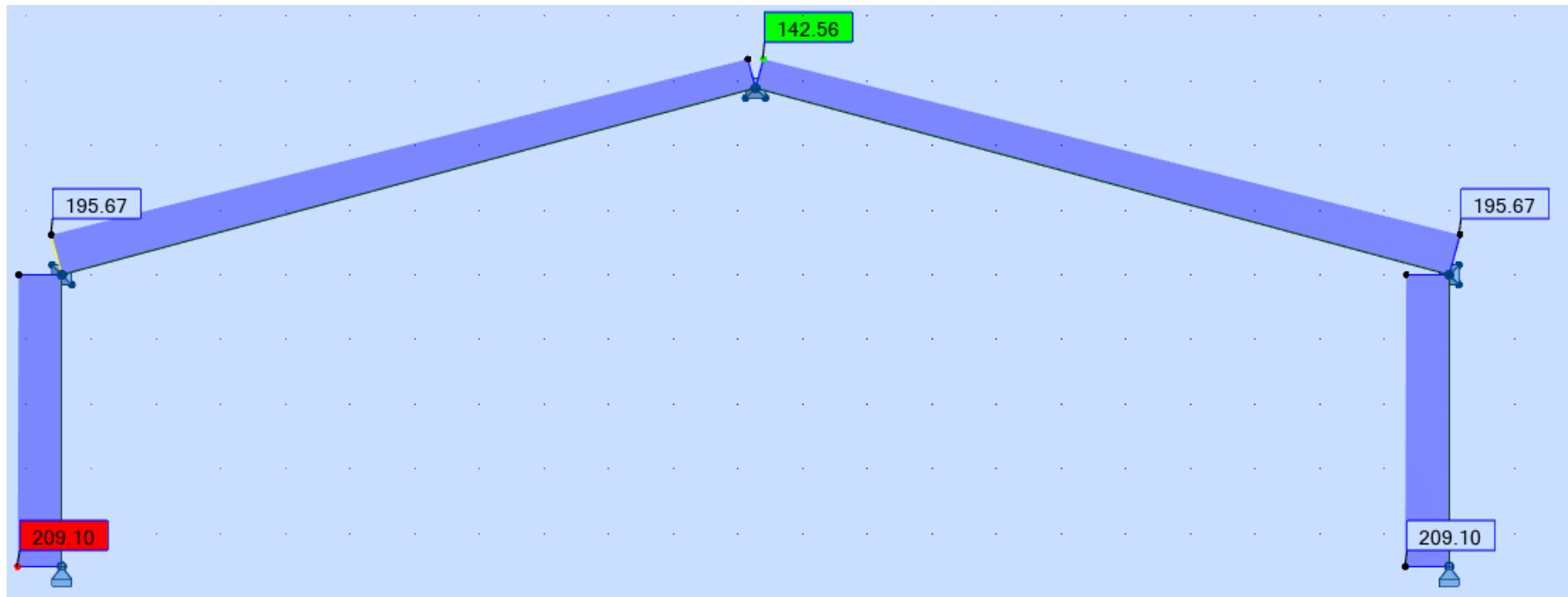


L6.3 Sprengetalade maksimaalsed paindemomendid

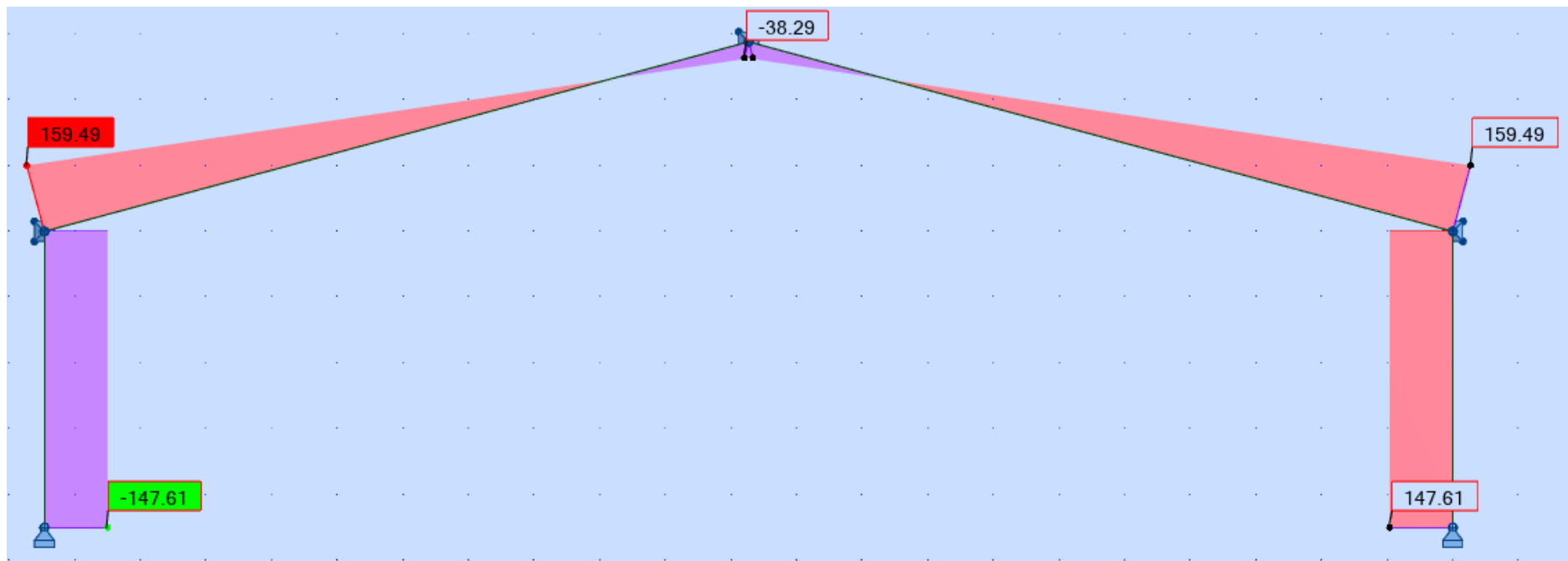


L6.4 Sprengetalade maksimaalsed toereaktsioonid

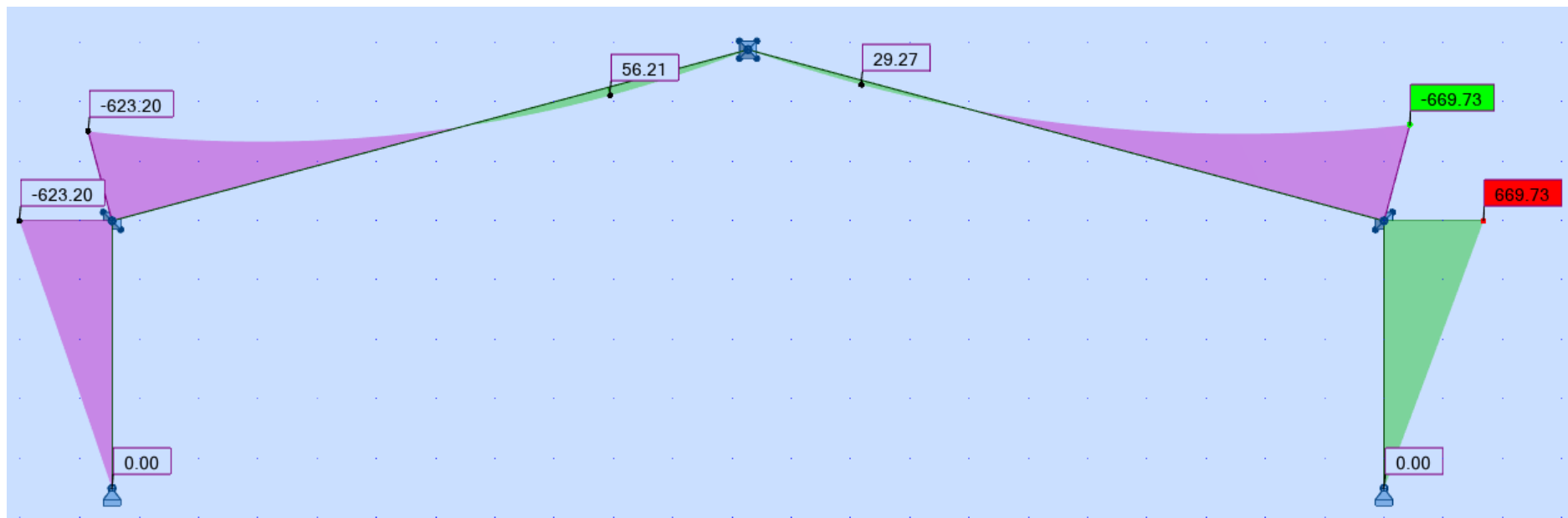
Lisa 7 Puidust raamkonstruktsioon, sisejõud



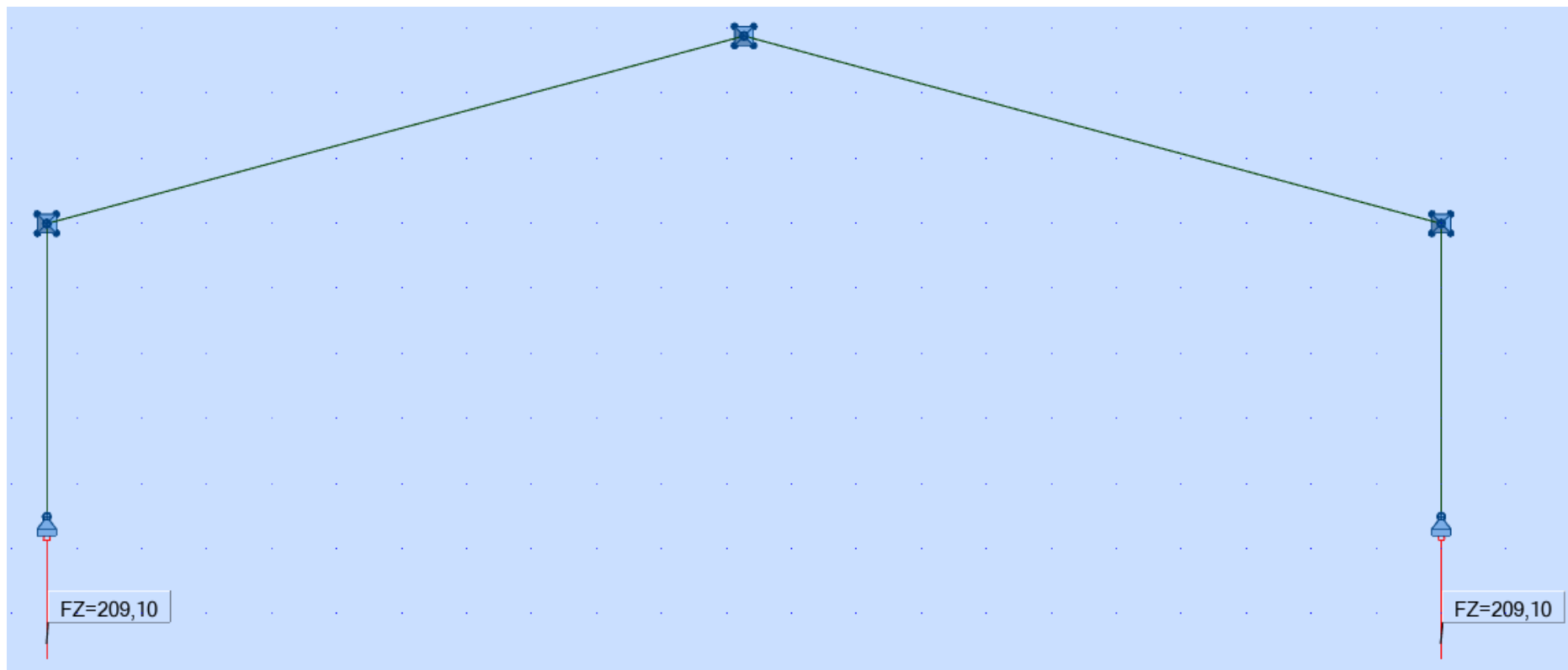
L7.1 Puidust raamkonstruktsiooni maksimaalsed pikijõud



L7.2 Puidust raamkonstruktsiooni maksimaalsed põikjõud

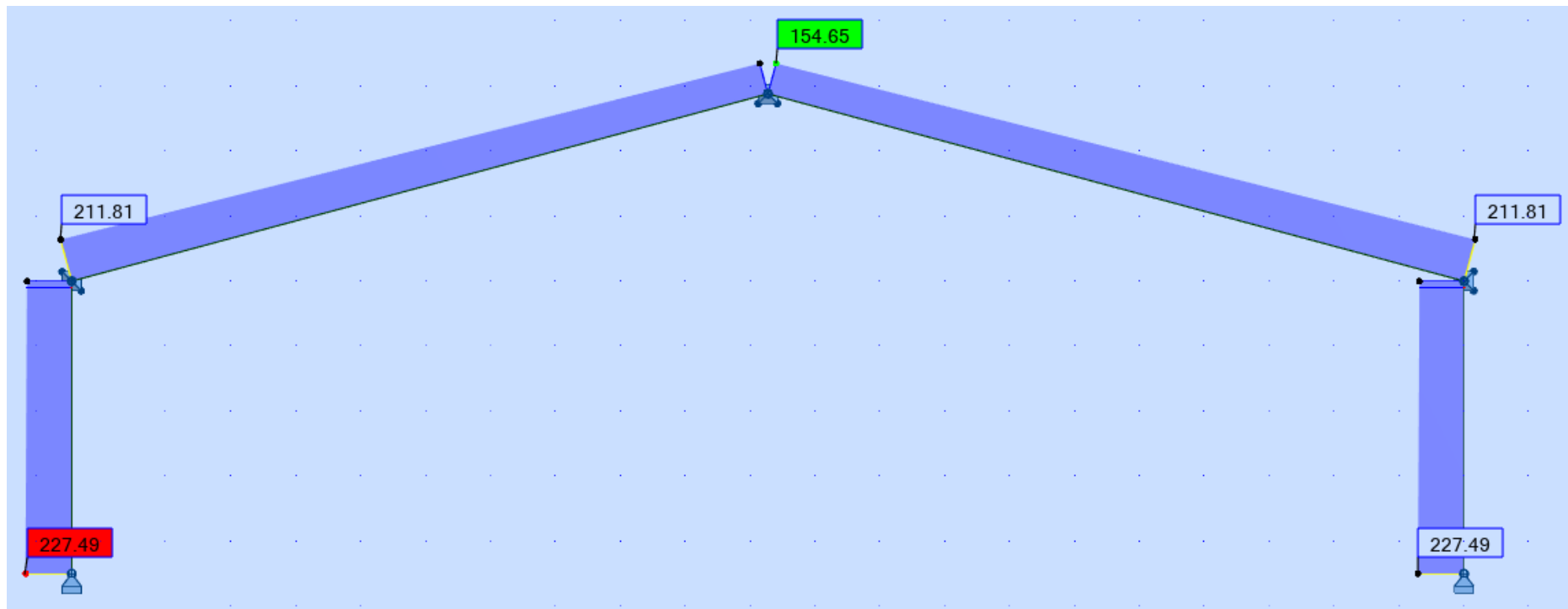


L7.3 Puidust raamkonstruktsiooni maksimaalsed paindemomendid

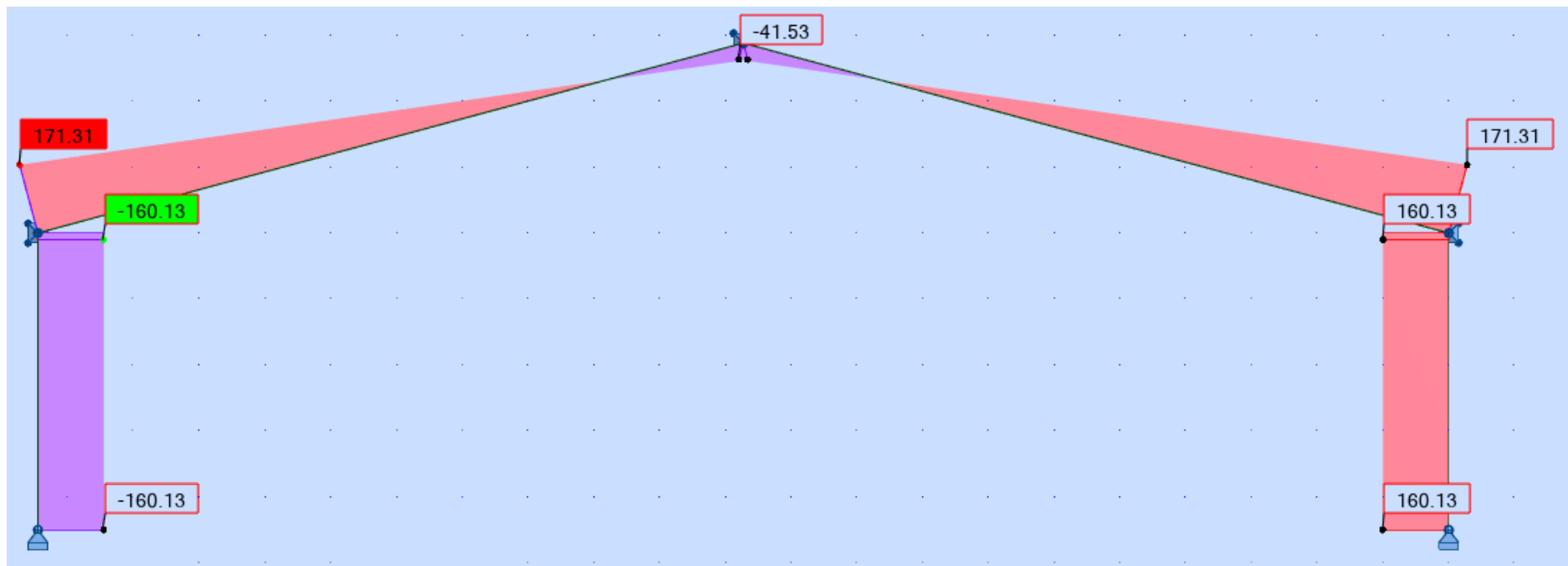


L7.4 Puidust raamkonstruktsiooni maksimaalsed toereaktsioonid

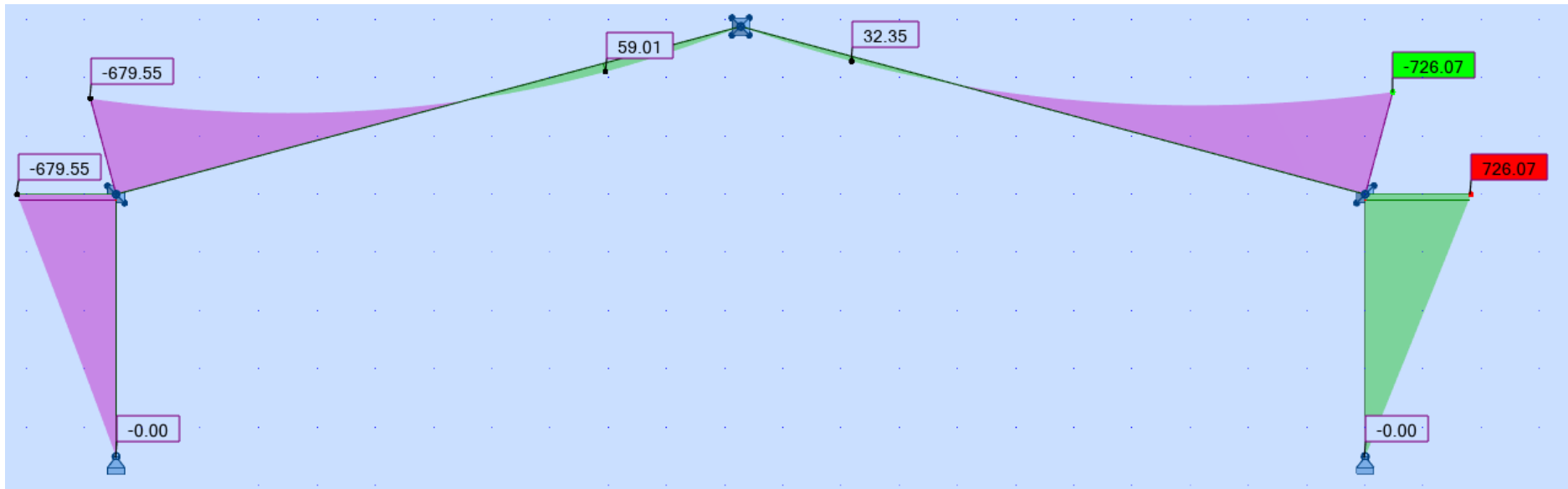
Lisa 8 Terasest raamkonstruktsioon



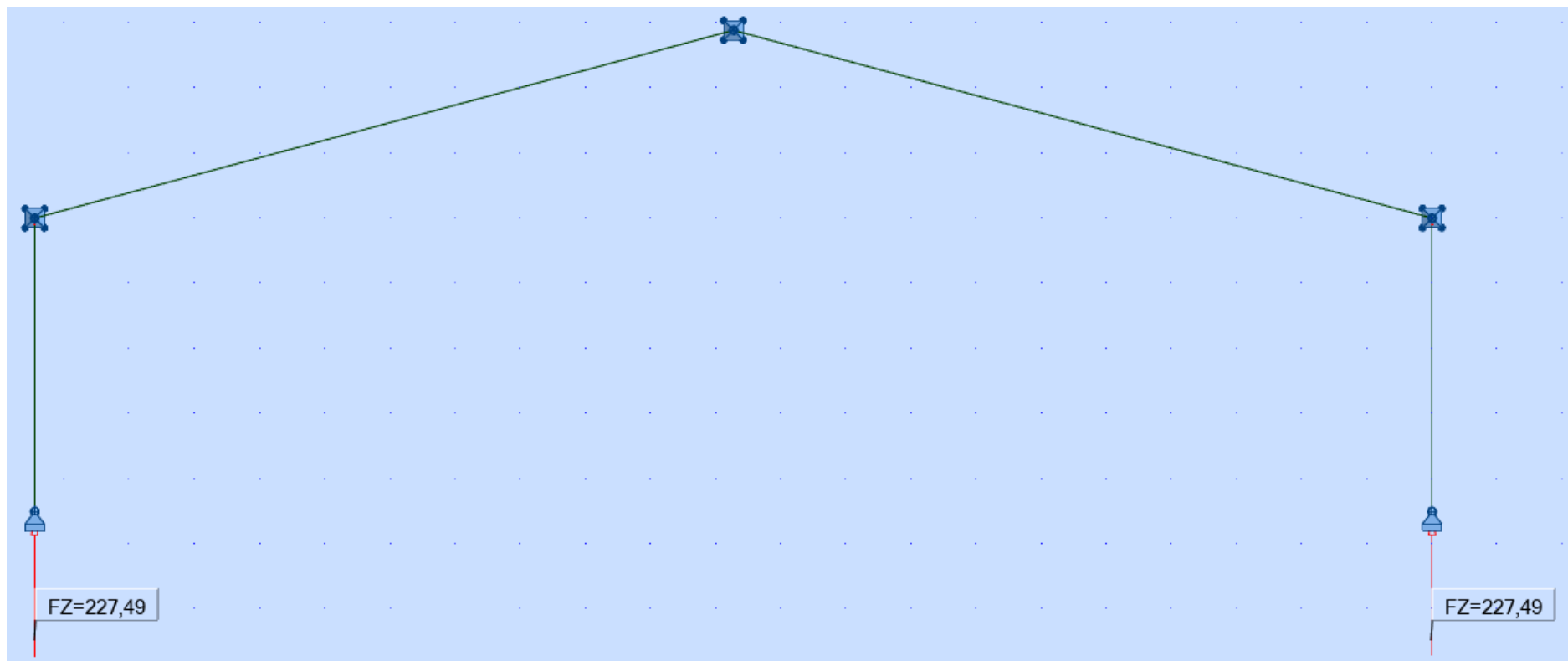
L8.1 Terasest raamkonstruktsiooni maksimaalsed pikijõud



L8.2 Terasest raamkonstruktsiooni maksimaalsed pöikjõud

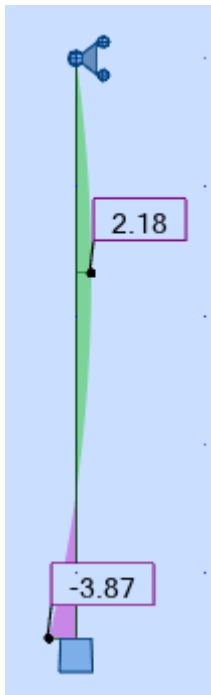


L8.3 Terasest raamkonstruktsiooni maksimaalsed paindemomendid

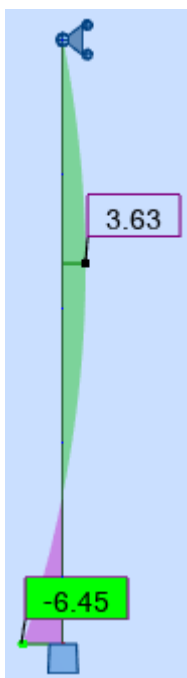


L8.4 Terasest raamkonstruktsiooni maksimaalsed toereaktsioonid

Lisa 9 Terasposti paindemomendid

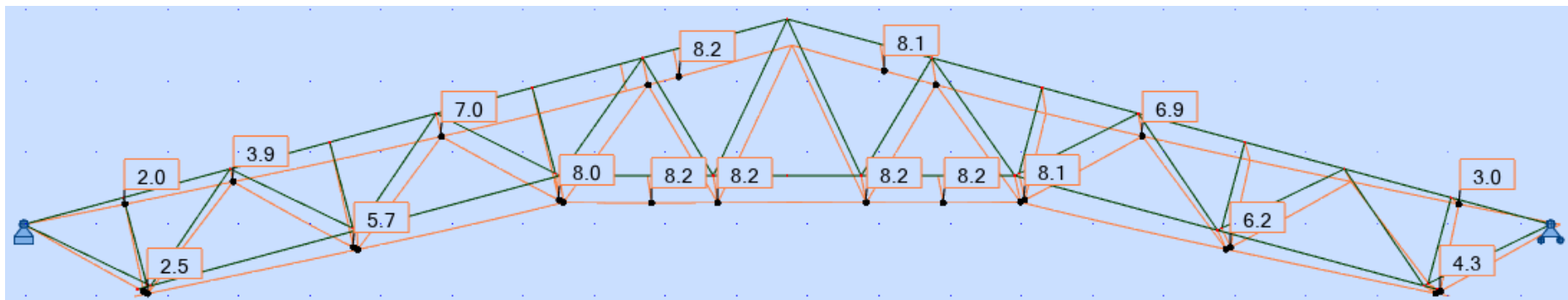


Joonis L9.1 Paindemoment maksimaalse pikijõu korral

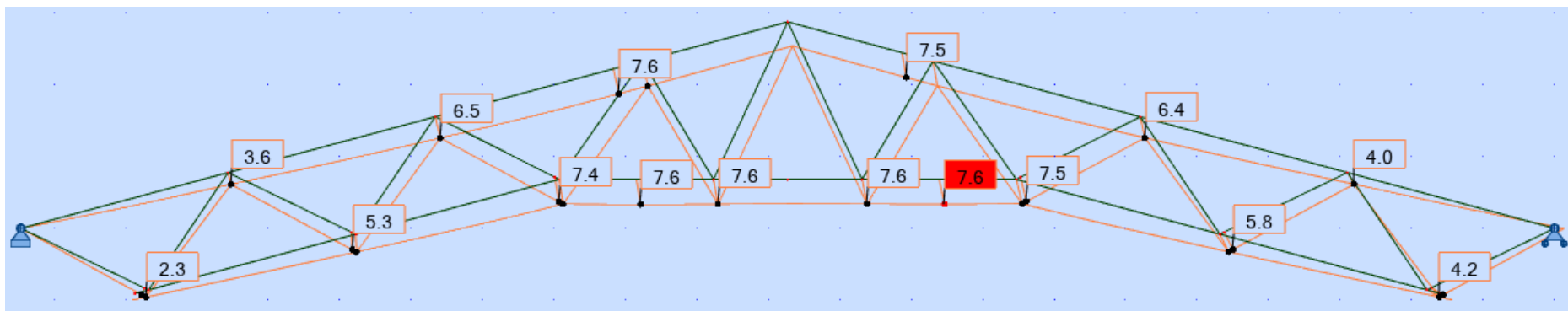


Joonis L9.2 Paindemoment minimaalse pikijõu korral

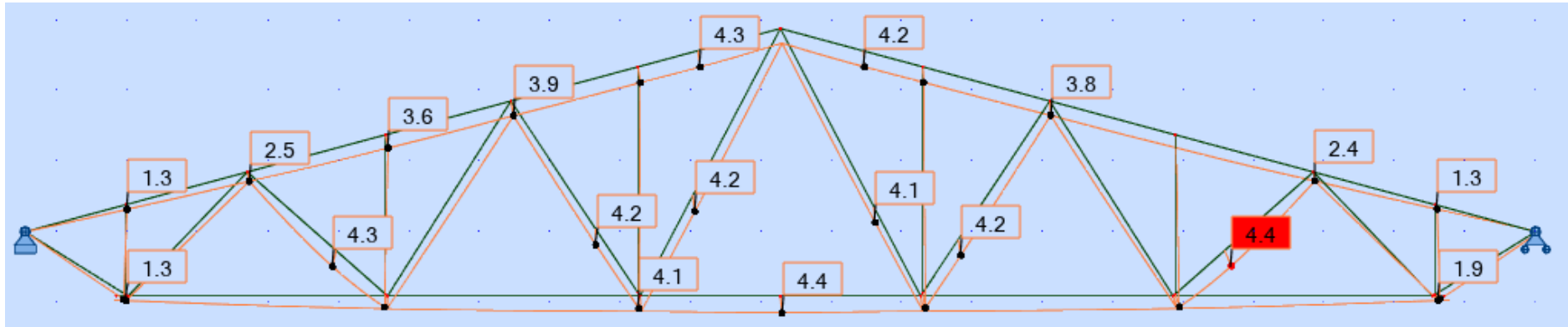
Lisa 10 Katusekonstruktsioonide maksimaalsed läbipained kasutuspiirseisundis



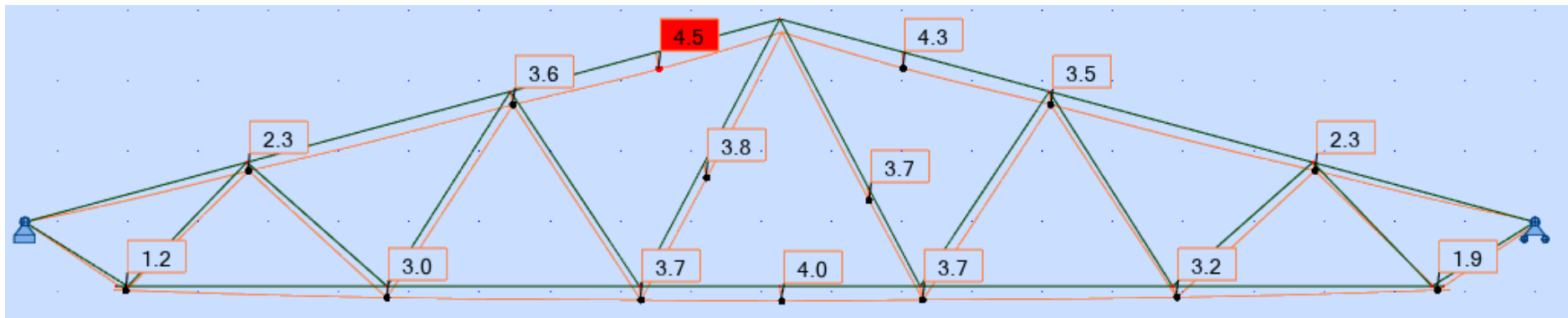
Joonis L10.1 Terasferm sõrestikupostidega läbipaine



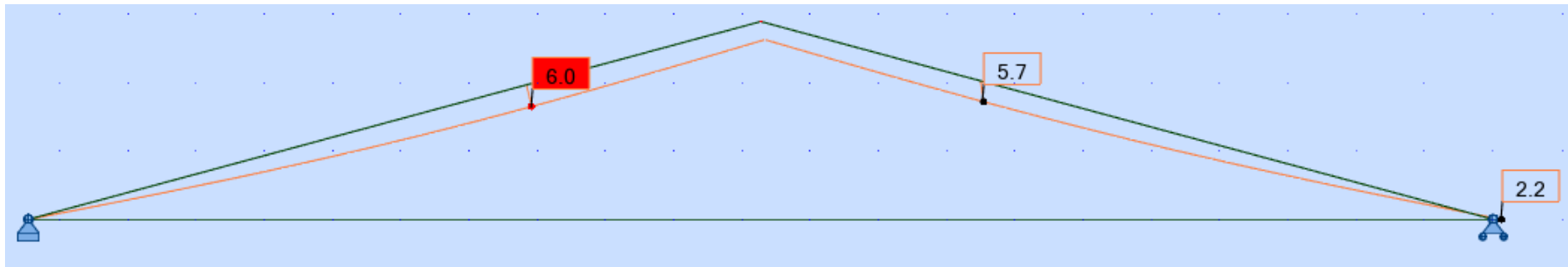
Joonis L10.2 Terasferm sõrestikupostideta läbipaine



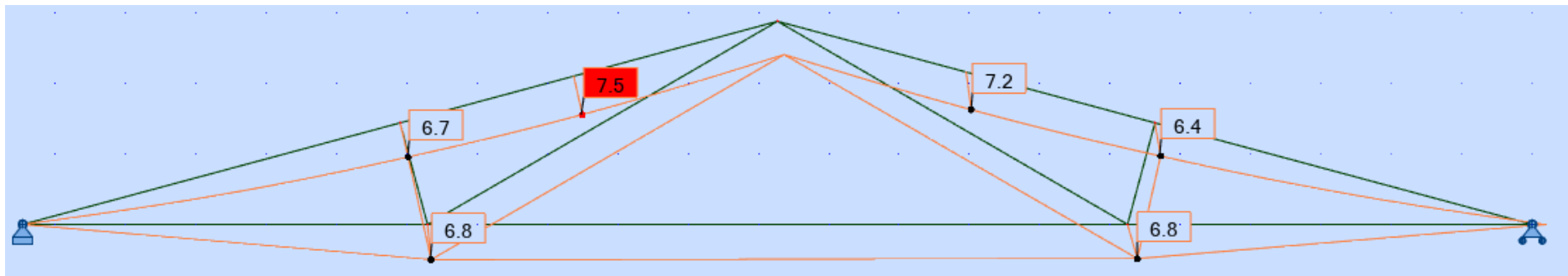
Joonis L10.3 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega läbipaine



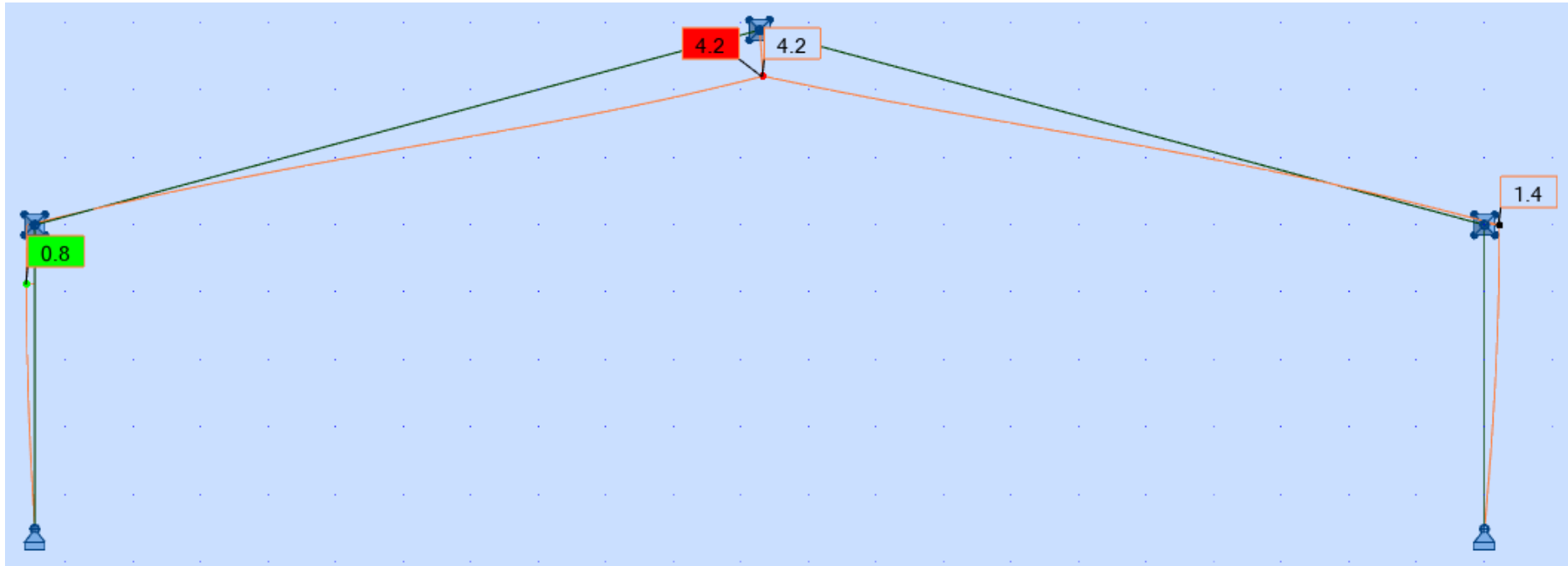
Joonis L10.4 Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta läbipaine



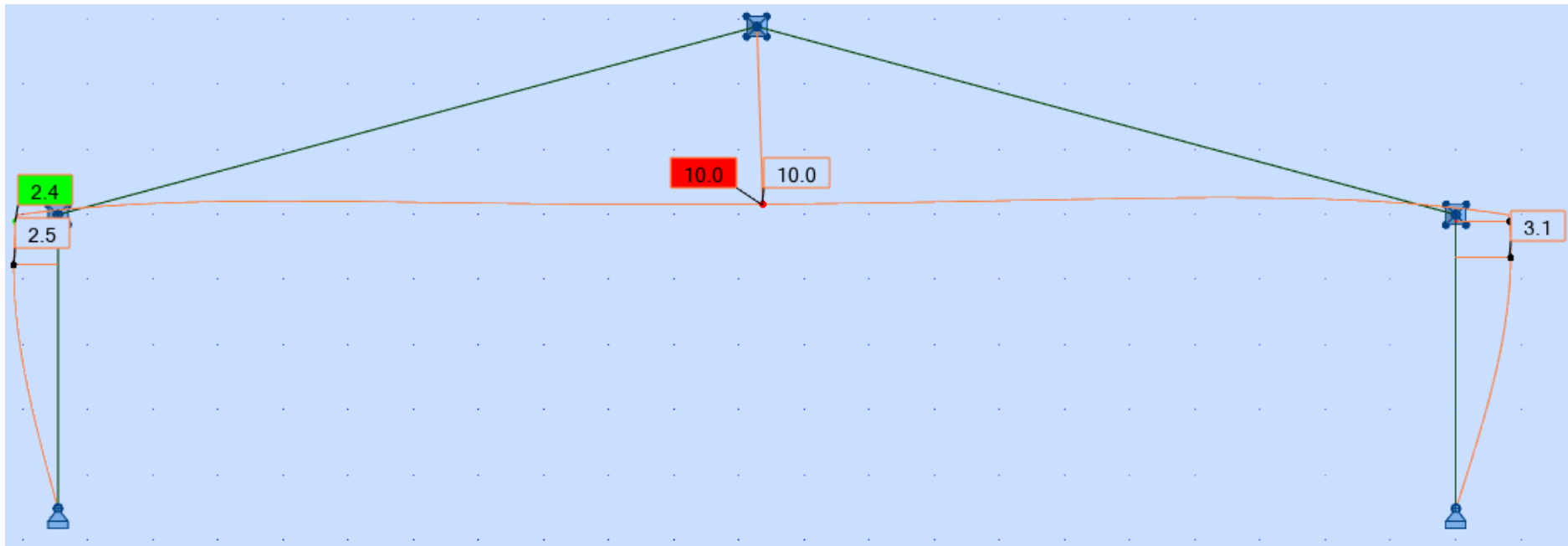
Joonis L10.5 Liimpuidust talad terasest tõmbiga, läbipaine



Joonis L10.6 Sprengeltalade läbipaine



Joonis L10.7 Puidust raamkonstruktsiooni läbipaine



Joonis L10.8 Teraseest raamkonstruktsiooni läbipaine

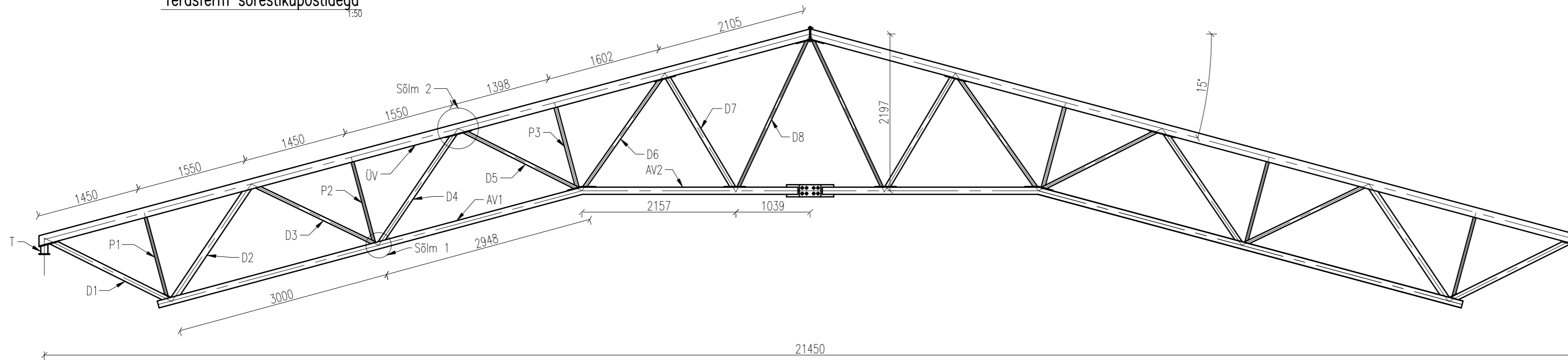
Lisa 11 Toereaktsioonid kandevprofiilplekist

Koormuse liik	Väärtus	Ühik
Omakaal	5,7	kN/m
Lumi	7,2	kN/m
Tuul (suruv)	0,6	kN/m
Tuul (G)	2,39	kN/m
Tuul (H)	0,9	kN/m
Tuul (I)	1,2	kN/m
Tuul (J)	2,99	kN/m

Joonis L11.1 Maksimaalsed toereaktsioonid kandevprofiilplekist, programmist *Poimu*.
Tuulekoormused tsoonidele G, H, I ja J on leitud käsitsi.

GRAAFILINE OSA

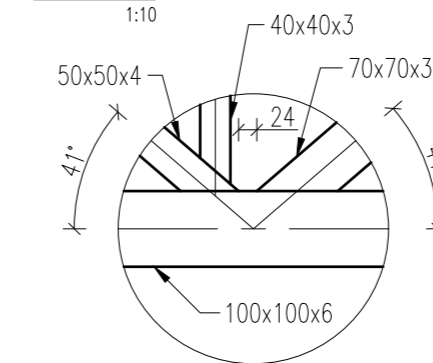
Terasferm sõrestikupostidega
1:50



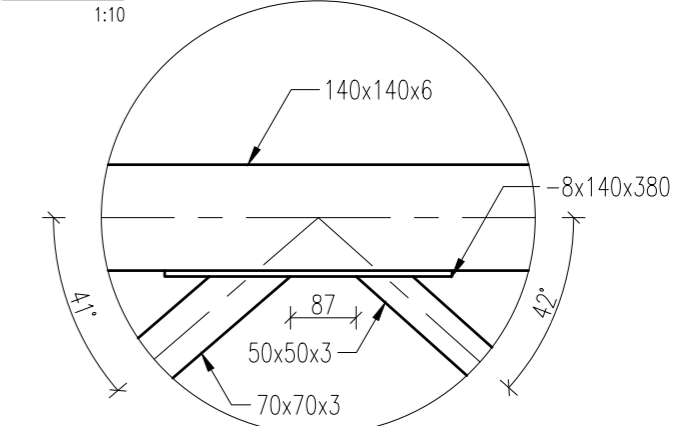
TERASFERM SÕRESTIKUPOSTIDEGA, TERASE KOGUS

Tähis	Profiil	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg
Üv	140x140x6	2	11105	24.50	544.15
AV1	100x100x6	2	6145	17.00	208.93
AV2	100x100x6	2	3196	17.00	108.66
P1	40x40x3	2	1250	3.30	8.25
P2	40x40x3	2	1250	3.30	8.25
P3	50x50x3	2	1249	4.25	10.62
D1	80x80x3	2	1996	7.07	28.22
D2	90x90x3	2	1987	8.01	31.83
D3	50x50x4	2	1980	5.45	21.58
D4	70x70x3	2	1980	6.13	24.27
D5	50x50x3	2	1941	4.25	16.50
D6	50x50x3	2	2020	4.25	17.17
D7	70x70x3	2	1945	6.13	23.85
D8	40x40x3	2	2449	3.30	16.16
T	100x100x5	2	131	14.40	3.77
				KOKKU:	1072

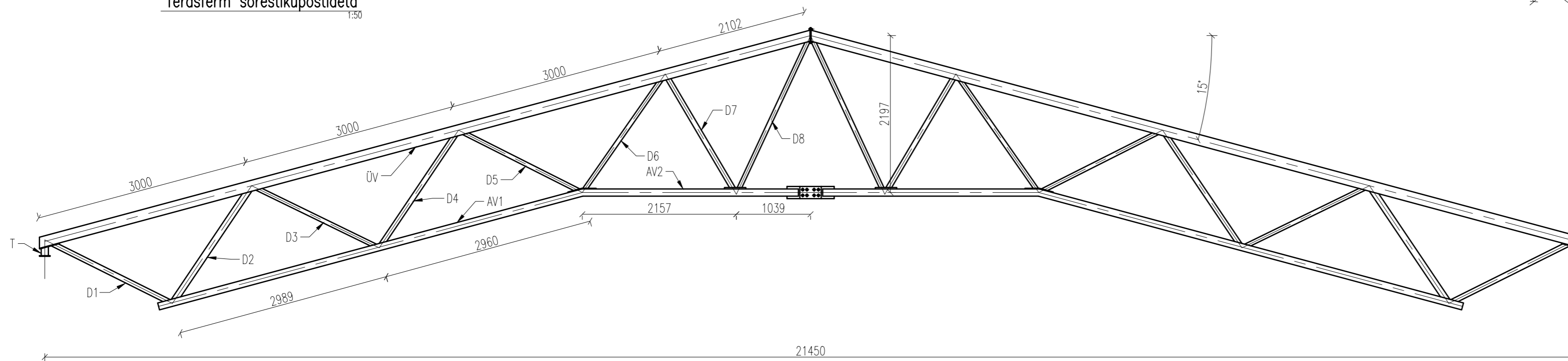
Sõlm 1
1:10



Sõlm 2
1:10



Terasferm sõrestikupostideta
1:50



TERASFERM SÕRESTIKUPOSTIDETA, TERASE KOGUS

Tähis	Profiil	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg
Üv	150x150x8	2	11105	34.00	755.14
AV1	100x100x6	2	6145	17.00	208.93
AV2	100x100x6	2	3196	17.00	108.66
D1	70x70x3	2	1996	6.13	24.47
D2	90x90x3	2	1987	8.01	31.83
D3	60x60x3	2	1980	5.19	20.55
D4	70x70x3	2	1980	6.13	24.27
D5	60x60x3	2	1941	5.19	20.15
D6	60x60x3	2	2020	5.19	20.97
D7	70x70x3	2	1945	6.13	23.85
D8	60x60x3	2	2449	5.19	25.42
T	100x100x5	2	131	14.40	3.77
				KOKKU:	1268



TalTech Inseneriteaduskond

Magistritöö

Koostaja

Andrus Jaakson

Kuupäev

11.05.2021

Juhendaja

Ragnar Pabart

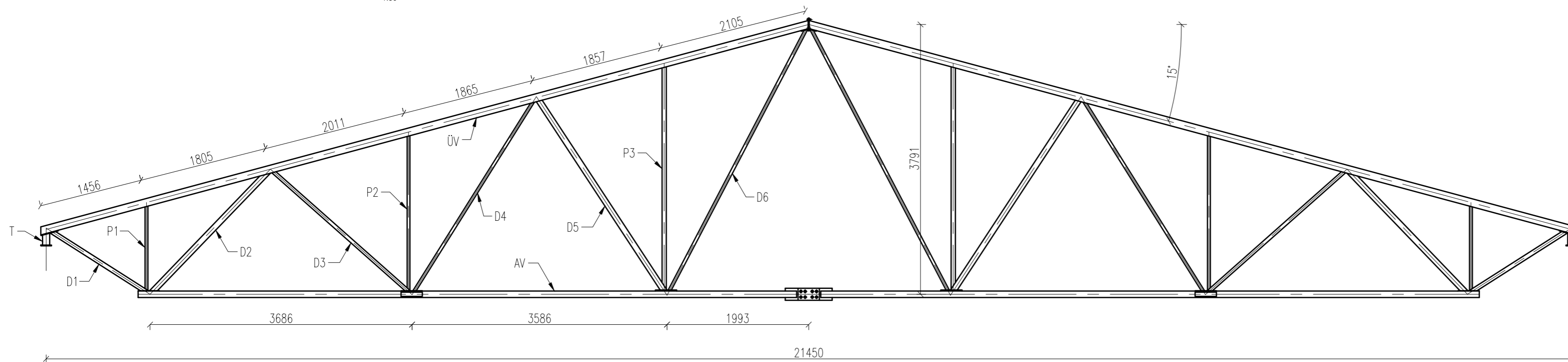
Terasfermid

Tartu kolledž

Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel

Kolmnurkne terasferm sõrestikupostidega

1:50

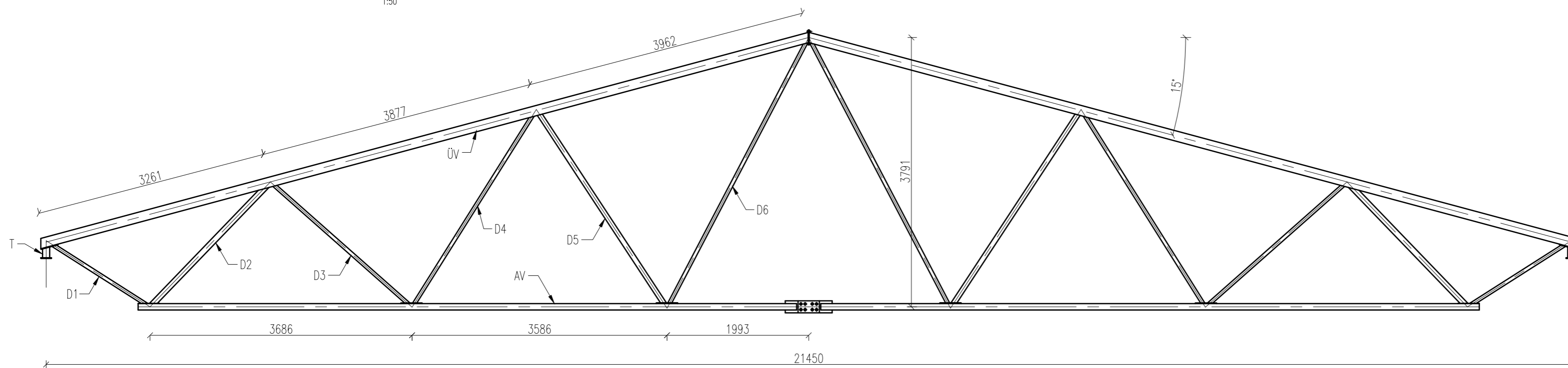


KOLMNURKNE TERASFERM SÕRESTIKUPOSTIDEGA, TERASE KOGUS

Tähis	Profiil	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg
ÜV	110x110x5	2	11105	16.00	355.36
AV	90x90x3	2	9431	8.01	151.08
P1	40x40x3	2	1258	3.30	8.30
P2	40x40x3	2	2240	3.30	14.78
P3	60x60x3	2	3199	5.19	33.21
D1	60x60x4	2	1732	6.71	23.24
D2	80x80x3	2	2441	7.07	34.52
D3	50x50x3	2	2660	4.25	22.61
D4	40x40x3	2	3286	3.30	21.69
D5	80x80x3	2	3343	7.07	47.27
D6	40x40x3	2	4296	3.30	28.35
T	100x100x5	2	166	14.40	4.78
KOKKU:					745

Kolmnurkne terasferm sõrestikupostideta

1:50



KOLMNURKNE TERASFERM SÕRESTIKUPOSTIDETA, TERASE KOGUS

Tähis	Profiil	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg
ÜV	140x140x7,1	2	11105	28.30	628.54
AV	90x90x3	2	9431	8.01	151.08
D1	50x50x4	2	1732	5.45	18.88
D2	80x80x3	2	2441	7.07	34.52
D3	50x50x3	2	2660	4.25	22.61
D4	50x50x3	2	3286	4.25	27.93
D5	70x70x3	2	3348	6.13	41.05
D6	50x50x3	2	4301	4.25	36.56
T	100x100x5	2	151	14.40	4.35
KOKKU:					966



TalTech Inseneriteaduskond

Magistritöö

Koostaja Andrus Jaakson

Kuupäev 11.05.2021

Juhendaja Ragnar Pabart

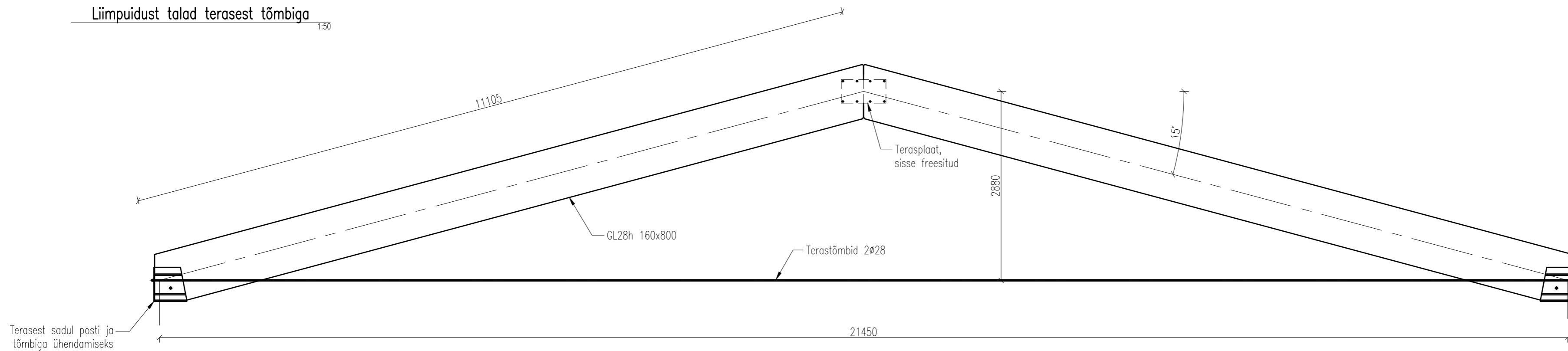
Kolmnurksed terasfermid

Tartu kolledž

Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioonierimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel

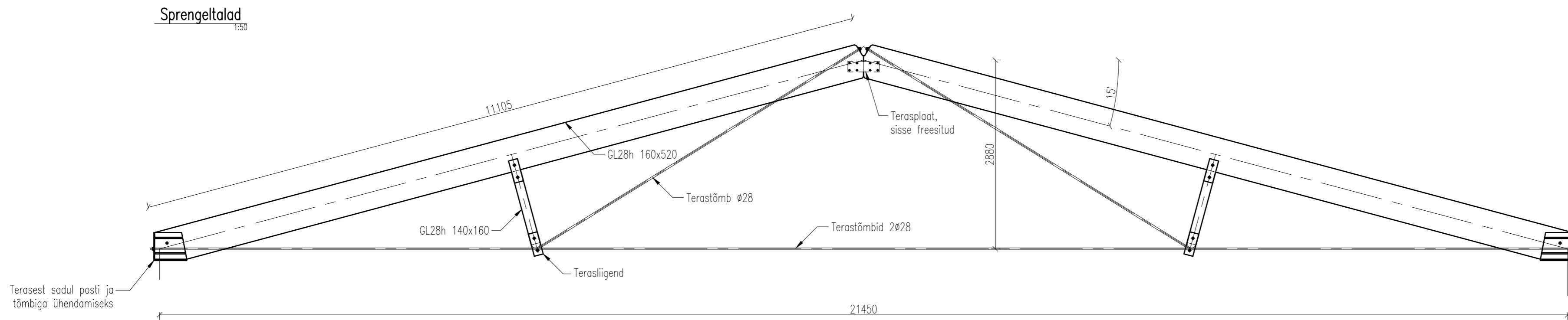
Liimpuidust talad terasest tõmbiga

1:50



Sprengeltalad

1:50



LIIMPUIDUST TALAD TERASEST TÕMBIGA, MATERJALI KOGUS

Tähis	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg	Puidu maht, m ³	Puidu pindala, m ²
GL28h 160x800	2	11105			2,845	42,66
Tõmb Ø28	2	21700	4,8340	210		

SPRENGELTALAD, MATERJALI KOGUS

Tähis	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg	Puidu maht, m ³	Puidu pindala, m ²
GL28h 160x520	2	11105			1,848	30,22
GL28h 140x160	2	1492			0,067	1,80
Tõmb Ø28	2	21700	4,8340	210		
Tõmb Ø28	2	11698	4,8340	113		
			Kokku teras:	323		
			Kokku puit:		1,915	32,02

**TAL
TECH**

TalTech Inseneriteaduskond

Magistritöö

Koostaja Andrus Jaakson

Kuupäev 11.05.2021

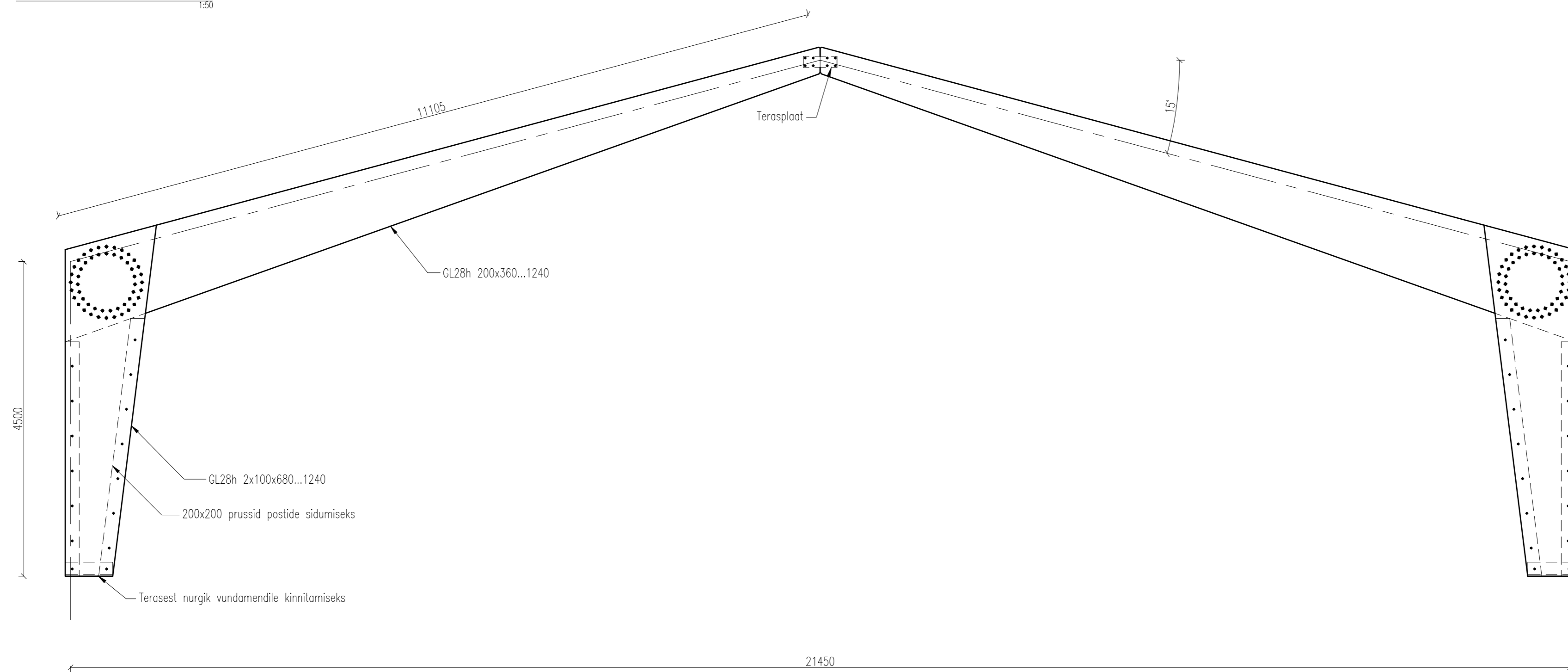
Juhendaja Ragnar Pabart

Liimpuidust talad terasest
tõmbidega ja sprengeltalad

Tartu kolledž

Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide
dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop
kaupluse näitel

Puidust raamkonstruktsioon
1:50



PUIDUST RAAMKONSTRUKTSIOON, MATERJALI KOGUS

Tähis	Kogus, tk	Pikkus, mm	Puidu maht, m ³	Puidu pindala, m ²
GL28h 200x360...1240	2	11105	3,555	38,16
GL28h 2x100x680...1240	2	4500	1,727	44,44
		KOKKU:	5,282	82,60



TalTech Inseneriteaduskond

Magistritöö

Koostaja Andrus Jaakson

Kuupäev 11.05.2021

Juhendaja Ragnar Pabart

Puidust raamkonstruktsioon

Tartu kolledž

Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel

Terasest raamkonstruktsioon
1:50



Profiil	Kogus, tk	Pikkus, mm	Kaal, kg/m	Mass, kg
HEB500	2	11105	187	4153.27
HEB340	2	4500	134	1206.00
KOKKU:				5359

TAL TECH		TalTech Inseneriteaduskond		Magistritöö
Koostaja	Andrus Jaakson	Kuupäev	11.05.2021	Terasest raamkonstruktsioon
Juhendaja	Ragnar Pabart			
Tartu kolledž				Erinevate terasest ja liimpuidust kandekonstruktsioonide dimensioneerimine ja maksumuse võrdlemine Kanepi Coop kaupluse näitel