



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

RISTKIHTLIIMPUIDUST  
SPRENGELKANDEKONSTRUKTSIOONI  
PROJEKTEERIMINE

DESIGN OF CROSS-LAMINATED TIMBER TIE ROD STRUCTURE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ralf Makienko

Üliõpilaskood: 131851

Juhendaja: Eero Tuhkanen

Tallinn 2019

## 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.

“.....” ..... 2019

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 2019

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....2019

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**Ehituse ja arhitektuuri instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

Üliõpilane: Ralf Makienko, 131851  
Õppekava, peeriala: 1931, Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine  
Juhendaja: Lektor, Eero Tuhkanen, +372 520 6399

**Lõputöö teema:**

Ristkihtliimpuidust sprengelkandekonstruktsiooni projekteerimine  
Design of cross-laminated timber tie rod structure

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. CLT-elementi jäikusparameetrite arvutamine ja konstruktsiooni sisejõudude leidmine
2. Ristlõigete ja sõlmede dimensioneerimine
3. Jooniste vormistamine

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Sprengeltala tööpõhimõte; esialgne arvutusskeem	11.2018
2.	CLT tugevus- ja jäikusparameetritega tutvumine; Arvutusskeem	12.2018
3.	Jäikusparameetrite arvutamine; Lõplik arvutusmudel; Sisejõud	02.2019
4.	Ristlõigete dimensioneerimine; Kandevoime arvutused	03.2019
5.	Sõlmede dimensioneerimine	04.2019
6.	Kandevoime arvutus tulekahju korral	05.2019
7.	Lõputöö ja jooniste vormistamine	05.2019

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:**

28. mai 2019a

**Üliõpilane:** Ralf Makienko

.....

“.....” .....2019a

/allkiri/

**Juhendaja:** Eero Tuhkanen

.....

“.....” .....2019a

/allkiri

# SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
SISSEJUHATUS .....	10
1 SPRENGELTALA .....	12
1.1 Sprengeltala tööpõhimõte .....	12
1.2 Sprengli rakendamine plaadile .....	12
2 RISTKIHTLIIMPUIDU TUGEVUS- JA JÄIKUSPARAMEETRITE ÜLEVAADE.....	13
2.1 Ristkihtliimpuidust paneelide arvutusmudel .....	13
2.2 Ristkihtliimpuidust paneelide arvutusmeetodid .....	14
2.3 Paindejäikus.....	16
2.4 Jäikus piki x- ja y- telge.....	16
2.5 Nihkejäikus plaadi tasandis .....	17
2.6 Nihkejäikus plaadi tasandist välja .....	18
2.7 Väändejäikus .....	19
2.8 Paindekandevõime.....	20
2.9 Tõmbekandevõime .....	21
2.10 Survekandevõime plaadi tasandis.....	21
2.11 Survekandevõime plaadi tasandist välja.....	22
2.12 Nihkekandevõime tasandist välja .....	24
2.13 Nihkekandevõime plaadi tasandis .....	25
3 SISEJÕUDUDE LEIDMINE JA PLAADI DIMENSIONEERIMINE.....	27
3.1 Koormused ja koormuskombinatsioonid.....	27
3.1.1 Lumekoormus.....	27
3.1.2 Kasuskoormus .....	27
3.1.3 Omakaalukoormus.....	28
3.1.4 Tuulekoormus.....	28
Tuulekoormus katusele.....	29
Tuulekoormus seintele.....	30
3.2 Konstruktsiooni geomeetria.....	31
3.3 Ristkihtliimpuidust plaadi jäikusmaatriks arvutusmudeli jaoks .....	32
3.3.1 Paindejäikus x-telje suunas.....	33
3.3.2 Paindejäikus y-telje suunas.....	33

3.3.3 Väändejäikus .....	34
3.3.4 Nihkejäikus x-telje suunas.....	34
3.3.5 Nihkejäikus y-telje suhtes.....	35
3.3.6 Jäikus piki x- ja y-telge.....	35
3.3.7 Nihkejäikus plaadi tasandis .....	36
3.3.8 Jäikusmaatriks .....	36
3.4 Arvutusmudel .....	37
3.5 Koormuskombinatsioonid .....	38
3.6 Sisejõud .....	39
3.7 Baasmaterjali omadused .....	39
3.8 Kandevõime pikisuunas.....	40
3.8.1 Paindekandevõime.....	40
3.8.2 Survekandevõime plaadi tasandis.....	41
3.8.3 Nihkekandevõime tasapinnast välja .....	42
3.8.4 Paindemomendi ja pikijõu koosmõju .....	43
3.9 Kandevõime ristisuunas.....	44
3.9.1 Paindekandevõime.....	44
3.9.2 Survekandevõime plaadi tasandis.....	45
3.9.3 Nihkekandevõime tasapinnast välja .....	46
3.9.4 Paindemomendi ja pikijõu koosmõju .....	47
3.9.5 Tõmbekandevõime .....	48
3.10 Nihkekandevõime plaadi tasandis .....	48
3.11 Muljumiskandevõime otsatugede kohal .....	50
3.12 Tulepüsivus.....	50
3.13 Kasutuspiiriseisund.....	52
3.13.1 Deformatsioonid .....	52
3.13.2 Vibratsioonid .....	52
4 TERASVARRASTE DIMENSIONEERIMINE.....	53
4.1 Kandevõime arvutus tavaolukorras .....	53
4.2 Kandevõime tulekahju korral .....	53
5 SÕLMEDE DIMENSIONEERIMINE.....	54
5.1 Otsatõe sõlm .....	54
5.1.1 Nihkekandevõime kontroll punkttoe kohal .....	54
5.1.2 Plaadi armeerimine täiskeermekruvidega.....	56

5.2 Ankurdusplaadi kinnitussõlm .....	61
5.2.1 Muljumiskandevõime z-telje suunas .....	61
5.2.2 Survekandevõime x-telje suunas .....	61
5.2.3 Muljumiskandevõime y-telje suunas .....	62
5.3 Vahetoe sõlm .....	63
5.4 Keskmise toe sõlm.....	64
5.5 CLT-plaadi jätkusõlm.....	65
5.5.1 Kruvi tõmbekandevõime .....	65
5.5.2 Kruvi survekandevõime.....	66
5.6 Nihkeliide plaadi tasandis.....	67
5.6.1 Liite kandevõime otsapiirkonnas.....	68
5.6.2 Liite kandevõime plaadi keskel .....	69
5.6.3 Naaglite vahekaugused .....	69
5.7 Terassõlmed.....	69
KOKKUVÕTE .....	70
6 Kasutatud kirjanduse loetelu .....	74
LISAD .....	77
Lisa 1 CLT-plaadi sisejõud .....	78
Lisa 2 Terasvarraste dimensioneerimine .....	93
L2.1 Kandevõime arvutus tavaolukorras.....	93
L2.1.1 Surutud varraste kandevõime kontroll.....	93
L2.1.2 Tõmmatud varraste kandevõime kontroll.....	95
L2.2 Kandevõime tulekahju korral.....	96
L2.2.1 Tõmbekandevõime.....	97
L2.2.2 Surutud varda nõtkekandevõime.....	98
L2.3 Sõlmede dimensioneerimine .....	100
L2.3.1 Terasvarraste liitumissõlm.....	100
L2.3.2 Tõmbediagonaali liitumine ankruplaadiga .....	102
Lisa 3 Kandevõime tulekahju korral.....	103
L3.1 CLT-plaadi tugevusomadused tulekahju korral .....	103
L3.2 Söestumissügavus.....	104
L3.3 Jäikusparameetrid tulekahju korral .....	105
L3.3.1 Jäikus x-telje suunas .....	105
L3.3.2 Jäikus y-telje suunas .....	105

L3.3.3	Kaitstud plaadi jäikus y-telje suunas .....	106
L3.4	Kandevõime pikisuunas .....	107
L3.4.1	Paindekandevõime .....	107
L3.4.2	Survekandevõime.....	108
L3.4.3	Nihkekandevõime tasapinnast välja.....	109
L3.4.4	Paindemomendi ja pikijõu koosmõju .....	110
L3.5	Kandevõime ristisuunas .....	111
L3.5.1	Paindekandevõime .....	111
L3.5.2	Survekandevõime.....	112
L3.5.3	Nihkekandevõime .....	113
L3.5.4	Paindemomendi ja pikijõu koosmõju .....	114
L3.5.5	Tõmbekandevõime.....	114
L3.6	Nihkekandevõime plaadi tasandis.....	115
	GRAAFILINE OSA .....	116

## Lühendite ja tähiste loetelu

### Ladina suurtähed

$A$	- pindala
$A_{net,ef}$	- Netoristlõike pindala
$CLT$	- Ristkihtpuit ( <i>ingl k Cross Laminated Timber</i> )
$C_{pe,10}$	- Tuulekoormuse välisrõhutegur
$D_{x(y)}$	- CLT-elementi jäikus piki x(y)-telge
$D_{xy}$	- CLT-elementi väändjäikus
$E_{0,mean}$	- Elastsusmooduli keskvärtus pikisuunas
$E_{90,mean}$	- Elastsusmooduli keskvärtus ristisuunas
$FEM$	- Lõplike elementide meetod ( <i>ingl k Finite Element Method</i> )
$F_{c,90,d}$	- Arvutuslik survejõud ristikiudu
$F_{ki,d}$	- Krugi arvutuslik nõtkekandevõime
$F_{v,Rd}$	- Liite ühe lõike arvutuslik kandevõime
$F_{v,Rk}$	- Liite ühe lõike normatiivne kandevõime
$G_{mean}$	- Nihkemooduli keskvärtus pikisuunas
$G_{r,mean}$	- Külgnihkemooduli keskvärtus ristisuunas
$I$	- inertsimoment
$IP$	- Tasapinnas ( <i>ingl k In Plane</i> )
$K_{CLT,05}$	- 5-protsentiili paindejäikus
$K_{CLT}$	- CLT-elementi paindejäikus
$M_{T,i}$	- Väändemoment punktis i
$M_{x(y)}$	- Paindemoment x(y)-telje suunas
$M_{y,Rk}$	- Kinnituselemendi voolupiirile vastava momendi normvärtus
$N_{Ed}$	- Arvutuslik pikijõud
$N_{ki,k}$	- Krugi elastne nõtkekandevõime
$N_{x(y)}$	- Pikijõud x(y)-telje suunas
$N_{xy}$	- Põikjõud IP
$OP$	- Tasapinnast välja ( <i>ingl k Out of Plane</i> )
$RVE$	- Mahuelement ( <i>ingl k Representative Volume Element</i> )
$RVSE$	- Alamelement ( <i>ingl k Representative Volume Sub-Element</i> )
$R_{ax,k}$	- Krugi teljesuunaline kandevõime
$R_{t,u,k}$	- Krugi väljatõmbe normkandevõime
$S$	- Staatiline moment
$S_{CLT,05}$	- 5-protsentiili nihkejäikus
$S_{CLT}$	- CLT-elementi nihkejäikus tasapinnast välja
$S_{tot}$	- Jäiga komposiittala nihkejäikus
$S_{xy}$	- CLT-elementi nihkejäikus tasapinnas
$V_{Ed}$	- Arvutuslik põikjõud
$V_{x(y)}$	- Põikjõud x(y)-telje suunas
$W_{el}$	- Elastne vastupanumoment
$W_{pl}$	- Plastne vastupanumoment

### Ladina väiketähed

$a$	- Lamellide laius või pragudevaheline kaugus
$a_1$	- Krugide vahekaugus pikisuunas



$a_{2,ef}$	- Efektiivne kaugus kruvide vahel risti vaadeldava suunaga
$a_2$	- Kruvide vahekaugus ristisuunas
$b$	- Laius
$b_{ef,x(y)}$	- Toe efektiivne laius x(y)-telje suunas
$c_h$	- Kruvi elastset keskkonda arvestav tegur
$c_a$	- Teras eisisoojus
$d$	- läbimõõt
$d_{char}$	- söestumissügavus
$d_{ef}$	- efektiivne söestumissügavus
$e_i$	- Kihi i pinnakeskme kaugus ristlõike pinnakeskmest
$f_{h,a,k}$	- Kinnituselemendi normatiivne muljumistugevus
$f_{R,k}$	- Normatiivne külgnihke kandevõime
$f_{T,node,d}$	- Arvutuslik väändetugevus IP
$f_{T,node,k}$	- Normatiivne väändetugevus IP
$f_{ax,k,90}$	- Normatiivne väljatõmbe parameeter
$f_{c,0,CLT,net,d}$	- Arvutuslik survetugevus
$f_{c,0,CLT,net,k}$	- Normatiivne survetugevus
$f_{c,90,CLT,d}$	- Arvutuslik survetugevus ristikiudu
$f_{c,90,CLT,k}$	- Normatiivne survetugevus ristikiudu
$f_{m,CLT,d}$	- Arvutuslik paindetugevus
$f_{m,CLT,k}$	- Normatiivne paindetugevus
$f_{r,CLT,d}$	- Arvutuslik külgnihketugevus
$f_{R,k}$	- Armeeritud elemendi normatiivne külgnihkekandevõime
$f_{t,0,CLT,net,d}$	- Arvutuslik tõmbetugevus
$f_{t,0,CLT,net,k}$	- Normatiivne tõmbetugevus
$f_u$	- Poldi tõmbetugevus
$f_{v,CLT,d}$	- Arvutuslik nihketugevus
$f_{y,k}$	- Normatiivne voolepiir
$f_y$	- Teras voolepiir
$g_k$	- omakaalukoormus
$h_p$	- Kaitseplaadi paksus
$\dot{h}_{net}$	- Netosoojusvoog
$k_1$	- Lamellide koostõõtegur
$k_{90}$	- Puidu liiki arvestav tegur
$k_A$	- Toe laiuse ja plaadi paksuste suhtest sõltuv tegur
$k_{CLT,p}$	- Väändejäikuse vähendustegur
$k_{E,\theta}$	- Teras elastsusmooduli vähendustegur
$k_{R,90}$	- Survepinge mõju arvestav tegur
$k_{R,x(y)}$	- Kihtide arvust sõltuv tegur
$k_{c,90,CLT}$	- Toe asukohta arvestav koormuse jaotustegur
$k_c$	- Nõtketegur
$k_{fi}$	- 20-protsentiili teisendustegur
$k_{mod}$	- Modifikatsioonitegur
$k_{sh}$	- Varjestustegur
$k_{y,\theta}$	- Teras voolepiiri vähendustegur
$l_{ef}$	- Kruvi efektiivne süvistussügavus
$l_k$	- Nõtkepikkus
$n$	- Külgnevate lamellide arv 1m laiuses lõigis
$n_x$	- Kruviridade arv risti vaadeldava suunaga

$n_{cr}$	- Euler'i kriitiline koormus
$n_{xy,RVSE(i)}^*$	- Proportsionaalne nihkejõud
$n_{xy}$	- nihkejõud IP
$q_k$	- kasuskoormus
$q_k$	- tuule kiirusrõhk
$s$	- Lumekoormus katusel
$s_0$	- nulltugevusega kompenseeriva kihi paksus
$s_k$	- Lumekoormus maapinnal
$t$	- aeg
$t_{CLT}$	- CLT-elementi paksus
$t_{ch}$	- Söestumise algusaeg
$t_f$	- Tõrketekkeae
$t_{i,x(y)}$	- Kihi i paksus x(y)-telje suunas
$u_z$	- Läbipaine
$w_{net,fin}$	- Lõplik netoläbipaine

### Kreeka väiketähed

$\alpha$	- Nurk kiudude suuna ja pikisuuna vahel
$\beta_0$	- Ühemõõtmeline söestumiskiirus
$\beta_c$	- Tootmistäpsust arvestav tegur
$\gamma_M$	- Materjali osavarutegur
$\kappa$	- Nihkeparandustegur
$\lambda$	- Saledus
$\lambda_{rel}$	- Suhteline saledus
$\bar{\lambda}$	- Tingsaledus
$\mu_0$	- Ristlõike kasutusaste
$\mu_1$	- Lumekoormuse kujutegur
$\rho_a$	- Terasetihedus
$\rho_k$	- Normtihedus
$\sigma_{c,0,d}$	- Arvutuslik survepinge pikikiudu
$\sigma_{c,90,CLT,d}$	- Arvutuslik survepinge ristikiudu
$\sigma_{m,0,d}$	- Arvutuslik
$\sigma_{max,d}$	- Maksimaalne arvutuslik normaalpinge
$\tau_{0,RVSE(i)}^*$	- Ideaalne nihkepinge
$\tau_{T,i}^*$	- Väändepinge
$\tau_{max,d}$	- Arvutuslik nihkepinge
$\tau_{r,max,d}$	- Arvutuslik külgnihkepinge
$\tau_v^*$	- Efektiivne nihkepinge
$\varphi$	- Abisuurus
$\chi$	- Nõtketegur

### Kreeka suurtähed

$\theta_g$	- Keskkonna temperatuur
$\Delta\theta_{a,t}$	- Isoleerimata teraskonstruktsiooni temperatuuri tõus
$\Delta t$	- Ajavahemik
$\theta_{a,cr}$	- Teraset kriitiline temperatuur

## SISSEJUHATUS

Ristkihtliimpuit on tänapäeval populaarsust koguv ehitusmaterjal, kuna järjest enam pööratakse tähelepanu keskkonna säästmisele ja taastuvate ressursside kasutamisele. Üheks suurimaks globaalseks probleemiks on tänapäeval kliima soojenemine, mida põhjustavad kasvuhoonegaasid. Põhiliseks kasvuhoonegaasiks, mis tekib inimtegevuse tagajärjel, on süsihappegaas. Puitmaterjali kasutamisel ehituses eritatakse atmosfääri oluliselt vähem süsihappegaasi kui terast või betooni kasutades, seega on puidu kasutamine ehituses üks viis kliima soojenemise vastu võitlemiseks. Suuremad puitmaterjali tootjad ja metsakasvatavad tegelevad aktiivselt uute puude istutamisega ja metsa taastamisega. Kasvades puu seob õhust süsihappegaasi ja toodab hapnikku. Puitmaterjali positiivne mõju keskkonnale avaldub ka selles, et puit ei vaja nii energiamahukat ümbertöötlemist kui teras või betoon. Avalik huvi ristkihtpuidu kasutamise vastu ehituses kasvab ja see annab teadlastele ja inseneridele põhjuse ristkihtliimpuitu puudutavaid arvutusmetoodikaid ja lahendusi uurida ning arendada.

Ristkihtliimpuit koosneb paaritust arvust kihtidest, mille lamellid on liimitud teineteise suhtes risti. Välimised kihid on paralleelsed paneeli töötamise peamise suunaga. Selline kihtide asetus tagab ristkihtpuidu töötamise mõlemas suunas ega sea arhitektuursele lahendusele piiranguid. Risti asetsevad kihid vähendavad ka puidu deformatsioone tulenevalt niiskuse mõjust. Lisaks sellele, et ristkihtpuit on keskkonnasõbralik, on tal ka teisi eeliseid terase ja betooni ees. Mõneks eeliseks on näiteks hea töödeldavus, suur tugevus tiheduse kohta, head soojusisolatsiooni omadused, kiire- ja kuiv montaaž ehitusplatsil. On levinud arusaam, et puit ehitusmaterjalina on tuleohtlik, kuid tegelikult on puidu käitumine tules hästi ennustatav ja seega on võimalik edukalt projekteerida tuleohutuid hooneid kasutades puidust kandekonstruktsioone.

Ristkihtliimpuit leiab järjest enam kasutust hoonete konstruktsioonides ning sellest tulenevalt otsustasin kirjutada CLT-teemalise lõputöö ja ennast selles valdkonnas arendada. Magistritöö teema valikuks pöördusin enda juhendaja, Eero Tuhkanen, poole. Juhendaja poolt on välja pakutud lähteülesanne, mis näeb ette Tartusse kavandatava Puumarketi laohoone 18m ava sildamist ristkihtliimpuidust kandekonstruktsiooniga. Kuna sellise sildeava korral ainult CLT-plaadist ei piisa, on otsustatud kasutada kombineeritud süsteemi (sprengelsüsteem). Sprengelsüsteemi eesmärgiks on varraste lisamisega vähendada paindemomenti põhielemendis, milleks on vaadeldavas konstruktsioonis ristkihtliimpuidust paneel. Käesolevas töös käsitletud konstruktsiooni suureks eeliseks on see, et monteeritakse ruumiline element mida ei ole stabiilsuse tagamiseks vaja

ühendada pikisidemetega. Lisaks kandekonstruktsiooni funktsiooni täitmisele on vaadeldav monteeritav element ka osa katusetarindist.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on 18-meetrise sildeavaga ristkihtliimpuidust sprengelkandekonstruktsiooni projektlahenduse väljatöötamine. Lõputöö põhiosa alguses on kirjeldatud peamised töös kasutatavad ristkihtliimpuidu arvutusmetoodikad ja -põhimõtted. Järgnevalt on käsitletud konstruktsiooni jäikusomaduste ja sisejõudude leidmist ning seejärel ristkihtliimpuidust ja terasest konstruktsioonelementide ja sõlmede dimensioneerimist kande- ja kasutuspiirseisundis. Kuna töö põhiline fookus on ristkihtliimpuit, siis terasvarraste dimensioneerimine nii tavaolukorras kui tulekahju korral on esitatud lisas. Samuti on esitatud lisana ristkihtliimpuidu arvutused tulekahju korral. Lisade järel on graafilise osana esitatud kaks joonist, mis kirjeldavad lõputöös projekteeritud ristkihtliimpuidust sprengelkandekonstruktsiooni ja selle geomeetriat. Kolmandal joonisel on välja toodud mõned arvutustulemuste väljavõtted arvutustarkvaradest.

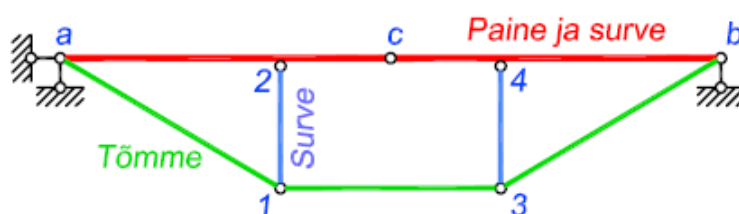
Käesoleva töö puhul on inspiratsiooni saanud Austrias asuva Graz'i Tehnikaülikooli spordihoone katusekonstruktsioonist. Sarnaselt lõputöös käsitletud konstruktsioonile on ka seal kasutatud ava sildamiseks kombineeritud süsteemi, kus ristkihtliimpuidust paneel töötab koos terasvarrastega. Käesolevas töös käsitletud konstruktsiooni ja Graz'i Tehnikaülikooli spordihoones kasutatud katusekonstruktsiooni vahel võib peamiseks erinevuseks lugeda kombineeritud süsteemi geomeetria ja kasutatavate sprengelvarraste tüübi. Austrias asuva konstruktsiooni survevardad on valmistatud terastorudest ning tõmbevardad ümarterasest. Käesolevas töös on nii surve kui ka tõmbevardad projekteeritud toruprofiilidest.

Lõputöös on kasutatud konstruktsiooni staatika arvutuste tegemiseks FEM-tarkvara SCIA Engineer 18.1. FEM-tarkvaraga arvutuste tegemiseks vajalik jäikusmaatriks on leitud käsiarvutusena MS Excel kasutades. Kolmemõõtmelise sõlme, kus liituvad seitse terasvarrast, toimivust on kontrollitud kasutades tarkvara IDEA StatiCa 10. Excel'ga on teostatud ka kandevoime arvutused SCIA's leitud sisejõudude järgi. Lõputöö tulemusena saadud konstruktsiooni 3D-mudel ja joonised on teostatud tarkvara Tekla Structures 2017 kasutades.

# 1 SPRENGELTALA

## 1.1 Sprengeltala tööpõhimõte

Sprengelsüsteemiks nimetatakse [1] põhjal kombineeritud varrassüsteemi, mille eesmärgiks on varraste lisamisega vähendada paindemomente põhielemendis, milleks sprengeltala puhul on tala. Lisavardad on enamasti valmistatud terasest, harvem puidust. Lisavardad töötavad kas tõmbele või survele, põhielemendis tekivateks sisejõududeks on survejõud, paindemoment ja põikjõud. Sprengeltala sisejõud leitakse ehitusmehaanika arvutuseeskirjadega. Toereaktsioonid on võrdsed samasuguse sildega lihtala toereaktsioonidega. Varraste sisejõud leitakse sõlmede paindemomendi ja jõudude tasakaalutingimustest [2].



Joonis 1.1 Sprengeltala skeem ja sisejõud varrastes [2]

## 1.2 Sprengli rakendamine plaadile

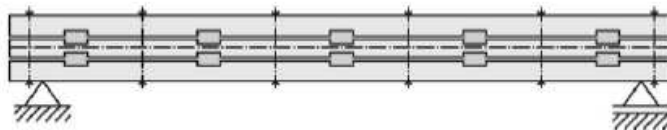
Käesoleva töö eesmärgiks on sprengelsüsteemi rakendamine ristkihtliimpuidust plaadile. Sprengeltala on tasapinnaline konstruktsioonelement. Ruumilise stabiilsuse tagamiseks ühendatakse sprengeltala ülemine vöö katusekonstruktsiooniga ning sprenglipostid alt sidemetega [1]. Asendades sprengeltala ülemises osas tala plaadiga, saame ruumilise konstruktsioonelemendi. Survejõudu, paindemomenti ja põikjõudu peab nüüd vastu võtma plaat. Kuna tasapinnalisest konstruktsioonelemendist sai ruumiline, siis erinevalt sprengeltalast tekivad lisaks pikisuunalistele sisejõududele ( $N_x$ ,  $M_y$ ,  $V_x$ ) sisejõud ka ristisuunas ( $N_y$ ,  $M_x$ ,  $V_y$ ). Asendades sprengelkonstruktsioonis tala plaadiga, on ülemine vöö ka katusekonstruktsiooni osa. Selleks, et sisejõud plaadis oleksid ühtlasemad asetatakse sprenglipostid vertikaaltelje suhtes kaldu. Postide ülemised otsad paiknevad plaadi servas ja alumised punktid paiknevad keskel, plaadi teljel. Postid ja plaat on ühendatud veel tõmbevarrastega, mis algavad plaadi nurkadest ja läbivad sprenglipostide alumisi punkte. Selline varraste asetus tagab iga monteeritava sprengelkonstruktsiooni elemendi ruumilise stabiilsuse ja sprengliposte ei ole vaja pikisidemetega ühendada.

## 2 RISTKIHTLIIMPUIDU TUGEVUS- JA JÄIKUSPARAMEETRITE

### ÜLEVAADE

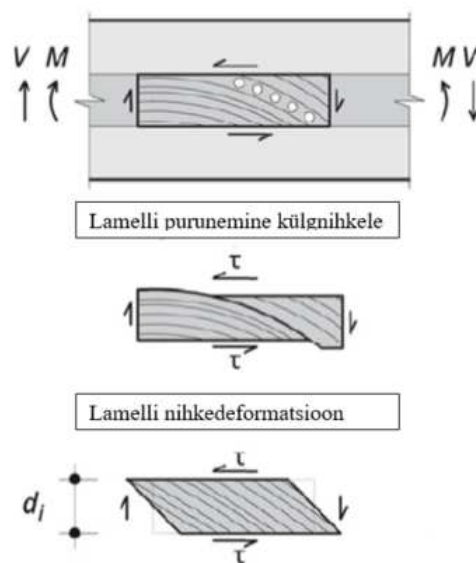
#### 2.1 Ristkihtliimpuidust paneelide arvutusmudel

Ristkihtpuidul on paaritu arv kihte ja välimised kihid on alati samasuunalised, ning näitavad ka plaadi põhilise töötamise suuna. Kuna lamellide kiudude suund on teineteisega risti on tegemist ortotroopse materjaliga [3]. CLT paneeli projekteerimisel, eriti tasapinnaga risti koormatud plaatide arvutamisel, tuleb arvestada lamellide külgnihkega [4]. Plaadi pikisuunalised lamellid arvestatakse tala töötava osana, risti olevaid kihte käsitletakse distantspuksidena, mis töötavad ainult nihkele [5].

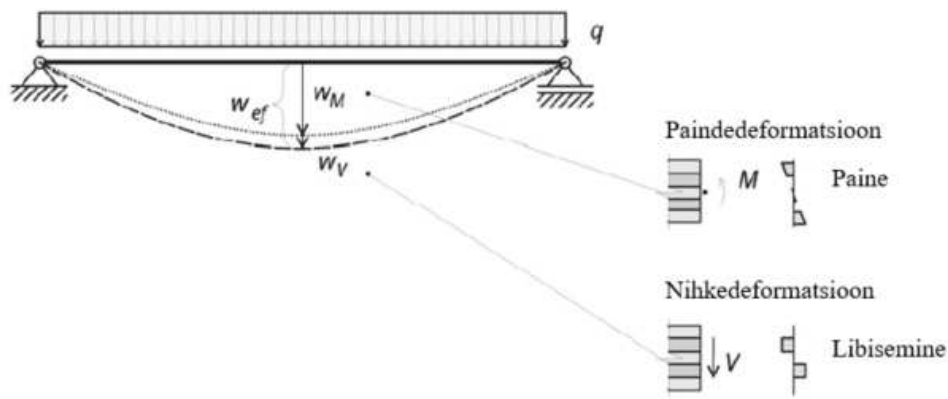


Joonis 2.1 CLT tala analoogiline mudel arvestades risti olevaid kihte distantspuksidena [5]

Külgnihke kandevõime on ületatud kui risti asetsevad lamellid purunevad tangentsiaalselt mööda aastarõngaid (*rolling shear failure*) [5]. CLT kogudeformatsioon plaadi tasandist välja on toel tekkiva nihkedeformatsiooni ja paindedeformatsiooni summa. Nihkedeformatsiooni osakaal kogudeformatsioonis oleneb paneeli silde ja paksuse suhtest  $l/h$ . Üldiselt on nihkedeformatsiooni osakaal kogudeformatsioonis alla 30%. [4] [5]



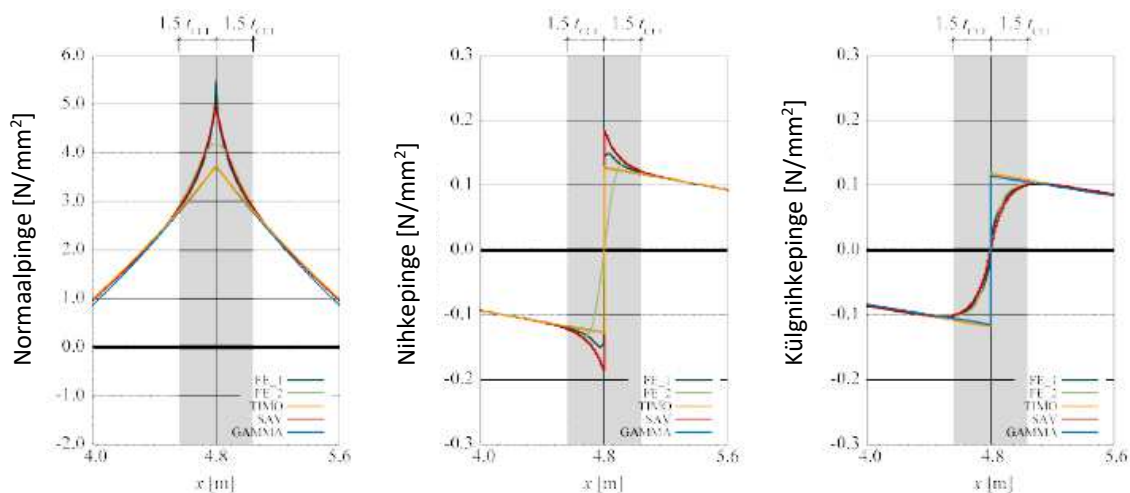
Joonis 2.2 Külgnihke mõjumine [5]



Joonis 2.3 Painde ja nihkedeformatsioon [5]

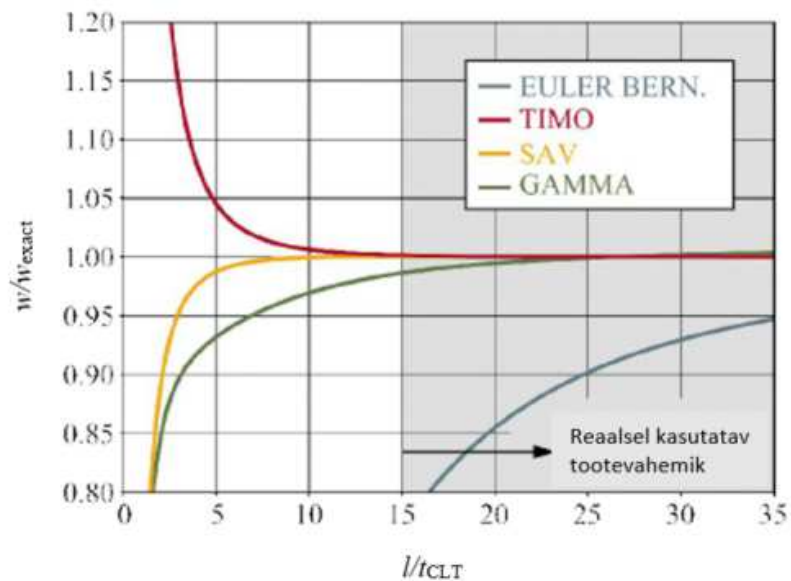
## 2.2 Ristkihtliimpuidust paneelide arvutusmeetodid

Ristkihtliimpuidust paneelide arvutamist plaadina käsitlevad mitmed erinevad meetodid [6] [4], millest tuntumad on modifitseeritud  $\gamma$ -meetod (mehaaniliste liidetega tala meetod), nihke analoogia meetod ja Timoshenko painde- ja nihkedeformatsioone arvestav tala mudel. Nende arvutusmeetodite erinevuseks on normaal- ja nihkepingete jaotus jätkuvtala vahetugede lähedal olevas piirkonnas ( $\pm 1,5 * t_{CLT}$ ).



Joonis 2.4 Normaal-, nihke-, ja külgnihkepinged kaheavalise jätkuvtala vahetoel paindemomendist [6]

Kõige täpsemad normaal- ja nihkepingete väärtused selles piirkonnas annab [6] põhjal nihke analoogia meetod,  $\gamma$ - ja Timoshenko meetod alahindavad seal pingeid. Teiseks erinevuseks on tala deformatsioonide erinevus kõrgete ja lühikeste talade korral, kus plaadi silde ja paksuse suhe  $\frac{l}{t_{CLT}} < 15$ . Vaadeldes praktilist silde ja plaadi paksuse suhte piirkonda  $\frac{l}{t_{CLT}} \geq 15$ , annavad need kolm meetodit samaväärseid tulemusi. [6] [4]



Joonis 2.5 5-kihilise CLT elemendi deformatsioonid erinevaid meetode kasutades [6]

Nihke analoogia meetod on kasutatav erinevate koormusolukordade ja konstruktsioonide korral ning annab täpsemaid tulemusi vahetugede kohal, kuid on töömahukas. Lisaks ülehindab ta momendi väärtusi punktkoormuste ja punkttingede piirkonnas. Modifitseeritud  $\gamma$ -meetod on esitatud Eurokoodeksis 5, kuid see on kasutatav ainult 3- ja 5-kihiliste plaatide korral, suurema arvu kihtide korral tuleb rakendada modifikatsioone. Praktikas on kõige paremini kasutatav Timoshenko painde- ja nihkedeformatsioone arvestav tala mudel ning seetõttu on ta valitud ka käesolevas töös kasutatavaks meetodiks. [6] [4]

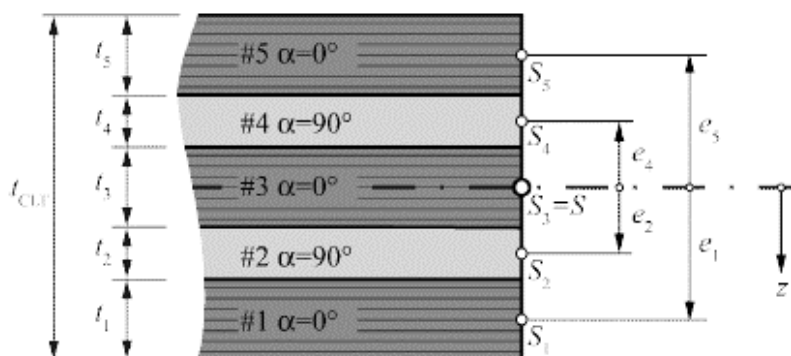
Tabel 2.1 Arvutusmeetodite võrdlus

Arvutusmeetod	eelised	puudused
Modifitseeritud $\gamma$ -meetod ehk mehaaniliste liidetega tala arvutusmeetod	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Käsitletakse Eurokood 5's</li> <li>• Täpne lihtala korral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kasutatav ainult 3- ja 5-kihiliste paneelide korral</li> <li>• Tülikas vähendustegurite leidmine</li> <li>• Ebatäpsed tulemused vahetugede piirkonnas</li> </ul>
Nihke analoogia meetod	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kõige täpsem meetod</li> <li>• Annab täpsed tulemused ka tugede piirkonnas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liiga üksikasjalik</li> <li>• Liiga aeganõudev</li> </ul>
Timoshenko painde- ja nihkedeformatsioone arvestav tala mudel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Võimalik arvutada kahesuunas töötavat plaati</li> <li>• Võimalik kasutada mistahes koormussüsteeme</li> <li>• Mugav käsiarvutuseks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ebatäpsed tulemused vahetugede piirkonnas</li> </ul>



## 2.3 Paindejäikus

CLT elemendi paindejäikus  $K_{CLT}$  arvutatakse [6] põhjal valemiga (2.1). Sellega võetakse arvesse ristuvate kihtide omadused. Pikisuunaliste kihtide ( $\alpha = 0^\circ$ ) elastsusmooduli väärtus on  $E_{0,mean}$  ja ristisuunaliste kihtidel ( $\alpha = 90^\circ$ )  $E_{90,mean}$ . Kuna pikisuunalise ja ristisuunalise elastsusmooduli suhe on suur,  $E_{0,mean}/E_{90,mean} \approx 30$ , siis ristisuunaliste kihtide ( $\alpha = 90^\circ$ ) elastsusmoodulit ei arvestata, võttes selle võrdseks nulliga  $E_{90,mean} = 0$ . Plaadi töötamisel ristisuunas loetakse pikisuunalisteks kihtideks vahekihid.



Joonis 2.6 5-kihilise CLT elemendi ristlõige [6]

$$K_{CLT} = \sum (E_i \cdot I_i) + \sum (E_i \cdot A_i \cdot e_i^2) \quad (2.1)$$

Kus  $K_{CLT}$  – paindejäikus,  $Nmm^2/m$ ,  
 $I_i$  – kihi  $i$  inertsimoment neutraaltelje suhtes,  $mm^4$ ,  
 $E_i$  – kihi  $i$  elastsusmoodul ( $E_{0,i}$  või  $E_{90,i}$ ),  $N/mm^2$ ,  
 $A_i$  – kihi  $i$  ristlõike pindala,  $mm^2$ ,  
 $e_i$  – kihi  $i$  pinnakeskme kaugus ristlõike pinnakeskmest,  $mm$ .

## 2.4 Jäikus piki x- ja y- telge

Nagu paindejäikuse puhul tuleb ka piki x- ja y-telge suunatud jäikuste arvutamisel arvestada ristkihtpuidu risti asetsevate kihtide mõju. Jäikus piki x-telge arvutatakse [6] järgi valemiga (2.2).

$$(EA)_{ef} = D_x = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \quad (2.2)$$

Kui paneel on koormatud enda tasandis, siis sarnaselt paindejäikusega ristisuunaliste kihtide jäikusega ei arvestata  $E_{90} = 0$ .

Meetri laiuse plaadiriba jäikus leitakse kasutades efektiivristlõike pindala. Piki x-telge  $D_x$  leitakse valemiga (2.3) ning jäikus piki y-telge  $D_y$  leitakse valemiga (2.4).

$$D_x = E_{0,mean} \sum_{i=1}^n t_{i,x} \quad (2.3)$$

$$D_y = E_{0,mean} \sum_{i=1}^n t_{i,y} \quad (2.4)$$

Kus  $A_i$  – kihi  $i$  pindala,  $\text{mm}^2$ ,  
 $D_x$  – telgjäikus x-telje suunas, N/m,  
 $D_y$  – telgjäikus y-telje suunas, N/m,  
 $t_{i,x}$  – kihi  $i$  paksus x-telje suunas, mm,  
 $t_{i,y}$  – kihi  $i$  paksus y-telje suunas, mm.

## 2.5 Nihkejäikus plaadi tasandis

Tasapinnas koormatud ristkihtpuidust plaadi nihkejäikus  $S_{xy}$  leitakse [6] põhjal valemiga (2.5). nihkejäikus sõltub efektiivsest nihkemoodulist  $G^*$  ja CLT plaadi paksusest  $t_{CLT}$ . Efektiivne nihkemoodul leitakse valemiga (2.6). Valemis (2.6) kasutatud tegur  $\alpha_T$  kirjeldab suhet  $t/a$ . Erinevate  $t$  ja  $a$  väärtuste korral tuleks kasutada lamellide keskmisi väärtusi. [6]

$$S_{xy} = G^* \cdot t_{CLT} \quad (2.5)$$

$$G^* = \frac{G_{0,mean}}{1 + 6 \cdot \alpha_T \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2} \quad (2.6)$$

$$\alpha_T = 0,32 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{-0,77}$$

Kus  $G_{0,mean}$  – lamellide nihkemoduli keskväertus,  $\text{N/mm}^2$ ,  
 $t$  – lamellide (keskmise) paksus, mm,  
 $a$  – lamellide (keskmise) laius või pragudevaheline kaugus, mm.

## 2.6 Nihkejäikus plaadi tasandist välja

Ristkihtpuitpaneeli nihkejäikus  $S_{CLT}$  plaadi koormamisel tasandist välja leitakse [6] järgi valemiga (2.7). Nihkejäikus sõltub jäiga komposiitlala nihkejäikusest  $S_{tot}$  vastavalt valemile (2.8), mille ristlõiget pole vähendatud, ja nihkeparandustegurist  $\kappa$  vastavalt valemile (2.9). Pikisuunaliste kihtide puhul kasutatakse nihkemooduli keskvaärtust  $G_{CLT,mean}$  ja ristisuunaliste kihtide puhul kasutatakse külgnihkemooduli keskvaärtust  $G_{r,CLT,mean}$ . [6]

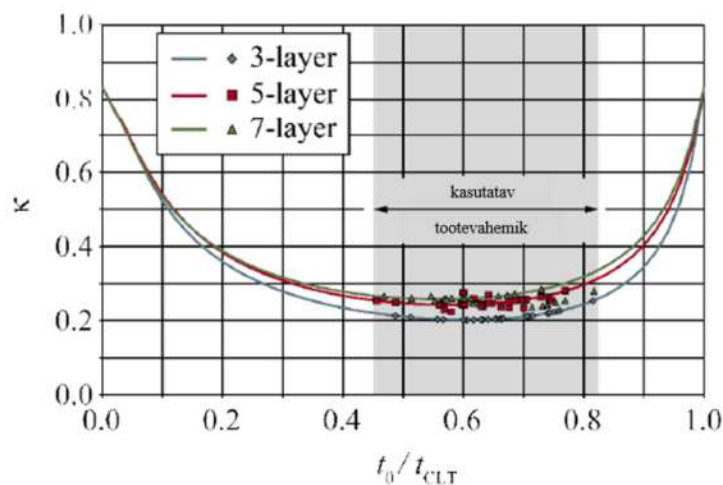
$$S_{CLT} = S_{tot} \cdot \kappa \quad (2.7)$$

$$S_{tot} = \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \sum (G_i \cdot A_i) \quad (2.8)$$

$$\kappa = \frac{1}{S_{tot} \cdot \frac{1}{K_{CLT}^2} \cdot \int_{t_{CLT}} \frac{[E(z) \cdot S(z)]^2}{G(z) \cdot b(z)} dz} \quad (2.9)$$

Kus  $G_i$  – kihi  $i$  nihkemoodul ( $G_i$  või  $G_{r,i}$ ), N/mm<sup>2</sup>,  
 $B_i$  – kihi  $i$  laius, mm,  
 $t_i$  – kihi  $i$  paksus, mm,  
 $S(z)$  – staatiline moment sõltuvalt koordinaadist  $z$ , mm<sup>3</sup>,  
 $E(z)$  – elastsusmoodul sõltuvalt koordinaadist  $z$ , N/mm<sup>2</sup>,  
 $G(z)$  – nihkemoodul sõltuvalt koordinaadist  $z$ , N/mm<sup>2</sup>,  
 $b(z)$  – ristlõike laius sõltuvalt koordinaadist  $z$ , mm.

Ristisuunaliste kihtide nihkeelastsuse tõttu on 3-, 5- ja 7-kihiliste CLT paneelide nihkeparandustegur peaaegu konstantne,  $\kappa = 0,25$  (vt joonis 2.7). Nihkeparandustegur vastavalt valemile (2.9) ei arvesta lamellide laiust ja vahesid. [6]



Joonis 2.7 Nihkeparandustegur sõltuvalt suhtest  $t_0/t_{CLT}$ , kus  $t_0$  on pikisuunaliste kihtide kogupaksus ja  $t_{CLT}$  ristlõike kogupaksus [6]

## 2.7 Väändejäikus

Väändejäikus  $D_{xy}$  arvutatakse [6] põhjal valemiga (2.10) kasutades nihkemoodulit  $G_{xy}$  kogu ristlõike ulatuses. See valem kehtib kui lamellid on liimitud servapidi kokku. Kui lamellid pole servapidi kokku liimitud tuleb kasutada vähendatud väändejäikust  $G_{xy}^*$  vastavalt valemile (2.11).

$$D_{xy} = G_{xy} \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} \quad (2.10)$$

$$D_{xy}^* = G_{xy}^* \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} = \kappa_{CLT,p} \cdot D_{xy} \quad (2.11)$$

$$\kappa_{CLT,p} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_{FIT} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2} \quad (2.12)$$

Kus  $\alpha_{FIT} = p \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^q$

$D_{xy}$  – pragudeta liimitud servadega elemendi väändejäikus, Nmm<sup>2</sup>,

$D_{xy}^*$  – vähendatud väändejäikus liimimata servadega või pragudega elemendil, Nmm<sup>2</sup>,

$G_{xy}^*$  – vähendatud nihkemoodul liimimata servadega või pragudega elemendil, N/mm<sup>2</sup>,

$\kappa_{CLT,p}$  – väändejäikuse vähendustegur,

$t$  – lamelli paksus, mm,

$a$  – lamelli laius, mm.

Ilma pragudeta lamellidega ristlõike korral võib võtta  $\kappa_{CLT,p} = 0,80$  ja pragude korral on soovitatav  $\kappa_{CLT,p} = 0,65$ . [7]

Tabel 2.2 parameetrite p ja q väärtused. [6]

parameeter	3-kihiline	5-kihiline	7-kihiline
$p$	0,89	0,67	0,55
$q$	-0,67	-0,74	-0,77

## 2.8 Paindekandevõime

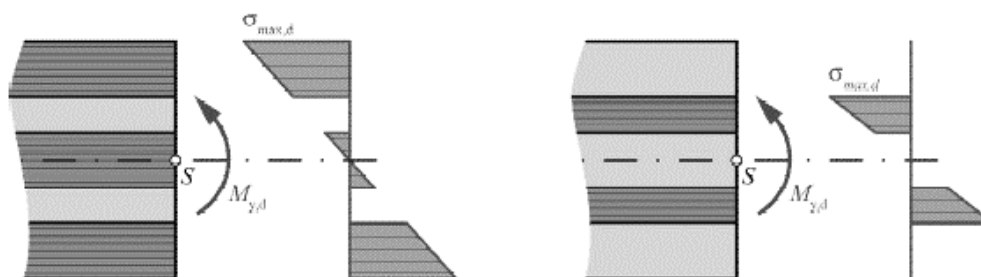
Paindekandevõime on [6] [8] põhjal tagatud kui maksimaalsed pinged ristlõike servas ei ületa ristlõike paindekandevõimet, vt valem (2.13).

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1,0 \quad (2.13)$$

Paindepinged ristlõikes arvutatakse Timoshenko tala teooriat kasutades valemiga (2.14). Pingeid arvutades arvestatakse ainult pikisuunaliste kihtidega ja ristisuunaliste kihtide  $E_{90} = 0$ . Selline eeldus annab suuremad paindepinged pikisuunalistes lamellides ja arvutus on tagavara kasuks. [4] [6]

$$\sigma(z) = \frac{M_{Ed}}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z) \quad (2.14)$$

Kus  $M_{Ed}$  – arvutuslik paindemoment lõikes, Nmm,  
 $K_{CLT}$  – ristlõike paindejäikus, Nmm<sup>2</sup>,  
 $z$  – vaadeldava punkti kaugus raskuskeskmest, mm,  
 $E(z)$  – pikisuunaliste kihtide elastsusmoodul, N/mm<sup>2</sup>.



Joonis 2.8 Paindepingete jaotus CLT elemendis [6]

Normatiivne paindetugevuse võib leida vastavalt valemile (2.15) [6]:

$$f_{m,CLT,k} = k_1 \cdot f_{m,GLT,k} \quad (2.15)$$

Kus  $k_1$  – lamellide koostöötegur, mis leitakse valemiga (2.16) [6],  
 $f_{m,GLT,k}$  – lamellide normatiivne paindetugevus, N/mm<sup>2</sup>.

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 1 + 0,025 \cdot n \end{array} \right. \text{ kus } n > 1 \quad (2.16)$$

Kus  $n$  – külgnevate lamellide arv 1m laiuses ribas.

Arvutuslik paindetugevus leitakse valemiga (2.17) [6]:

$$f_{m,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (2.17)$$

Kus  $k_{mod}$  – modifikatsioonitegur  
 $\gamma_M$  – materjali osavarutegur

## 2.9 Tõmbekandevõime

Tõmbekandevõime leidmisel eeldatakse [6] [8] põhjal, et pikisuunaliste lamellide elastsusmoodul on võrdne ning arvestatakse ainult pikisuunalisi kihte. Tugevustingimus vastavalt valemile (2.18) [6].

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net,ef}} \leq f_{t,0,CLT,net,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,CLT,net,k}}{\gamma_M} = k_{sys,t,0} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,1,k}}{\gamma_M} \quad (2.18)$$

Kus  $A_{net,ef}$  – netoristlõike pindala, mm<sup>2</sup>,  
 $f_{t,0,1,k}$  – lamelli normatiivne tõmbetugevus, N/mm<sup>2</sup>,  
 $k_{sys,t,0}$  – paralleelsete lamellide süsteemitegur,  $k_{sys,t,0} = 1,0$ .

## 2.10 Survekandevõime plaadi tasandis

Tasapinnas surutud ristkihtpuidust elemendi tugevustingimus leitakse [6] [8] järgi vastavalt valemile (2.19).

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1,0 \quad (2.19)$$

Kus  $A_{net,ef}$  – netoristlõike pindala (pikisuunaliste lamellide pindala 1m laiuselt), mm<sup>2</sup>,  
 $f_{c,0,CLT,net,d}$  – arvutuslik survetugevus, N/mm<sup>2</sup>.

Surutud elemendi kandevõime arvutamisel tuleb arvestada ka nõtkete mõju. Üks võimalus nõtkete arvestamiseks on ekvivalenttala meetod vastavalt valemile (2.20) [6].

$$\frac{N_{Ed}}{k_c \cdot A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1,0 \quad (2.20)$$

Survetugevust vähendatakse vähendusteguriga  $k_c$ , vastavalt valemile (2.21), mis sõltub suhtelisest saledusest (2.25), ristlõike kujust ja tootmistäpsusest (2.24). Suhteline saledus sõltub Euler'i kriitilisest koormusest vastavalt valemile (2.21). [6] [8]

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT,05} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,05}}{S_{CLT,05} \cdot l_k^2}\right)} \quad (2.21)$$

Kus  $n_{cr}$  – Euler'i kriitiline koormus, N,  
 $l_k$  – nõtkepikkus, mm,  
 $K_{CLT,05}$  – paindejäikuse 5-protsentiili väärtus vastavalt valemile (2.1), Nmm<sup>2</sup>/m,  
 $S_{CLT,05}$  – nihkejäikuse 5-protsentiili väärtus vastavalt valemile (2.7), N/m.

$$k_c = \min \left[ \frac{1,0}{1}, \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \right] \quad (2.22)$$

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \quad (2.23)$$

$$\beta_c = 0,1 \quad (2.24)$$

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,k}}{n_{cr}}} \quad (2.25)$$

Kus  $k_c$  – nõtketegur,  
 $k$  – abisuurus,  
 $\beta_c$  – tootmistäpsust arvestav tegur,  
 $\lambda_{rel}$  – suhteline saledus,  
 $A_{net,ef}$  – pikisuunaliste lamellide pindale, mm<sup>2</sup>,  
 $f_{c,0,CLT,net,k}$  – arvutuslik survetugevus pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>.

## 2.11 Survekandevõime plaadi tasandist välja

Tasandist välja survele koormatud ristkihtpuidust elemendi tugevustingimus [6] [8] järgi vastavalt valemile (2.27).

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{c,90}} \quad (2.26)$$

$$\sigma_{c,90,CLT,d} \leq k_{c,90,CLT} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (2.27)$$

Kus  $\sigma_{c,90,CLT,d}$  – survepinge toeplaadi all, N/mm<sup>2</sup>,  
 $F_{c,90,d}$  – arvutuslik koormus toeplaadile, N,  
 $A_{c,90}$  – toeplaadi pindala, mm<sup>2</sup>,  
 $k_{c,90,CLT}$  – parandustegur sõltuvalt toe asukohast

Tabel 2.3 Soovitav parandustegur  $k_{c,90,CLT}$  sõltuvalt toe asukohast [6]

Toe asukoht	$k_{c,90,CLT}$
Keskel	1,8
Pikisuunalisel serval	1,5
Ristisuunalisel serval	1,5
Nurgas	1,3

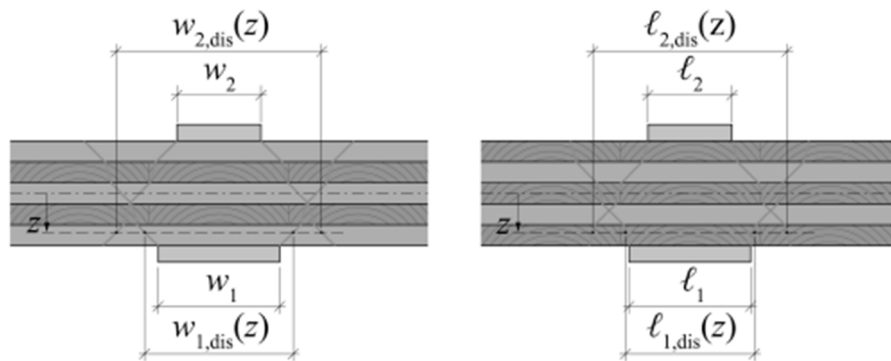
Parandusteguri  $k_{c,90,CLT}$  suurust on võimalik [8] põhjal arvutada valemiga (2.28):

$$k_{c,90,CLT} = \frac{A_{c,ef}}{A_{c,sec}} \quad (2.28)$$

$$A_{c,ef} = \sqrt{w_{1,dis}(z) \cdot w_1} \cdot \sqrt{l_{1,dis}(z) \cdot l_1} \quad (2.29)$$

$$A_{c,sec} = w_1 \cdot l_1 \quad (2.30)$$

- Kus  $A_{c,ef}$  – toeplaadi efektiivne pindala eeldades, et pikisuunalistes kihtides jaotub pinge 45 ja ristisuunalistes kihtides 15 kraadise nurga all,  $\text{mm}^2$ ,  
 $A_{c,sec}$  – Toeplaadi tegelik pindala,  $\text{mm}^2$ ,  
 $w_{1,dis}$  – toeplaadi efektiivne laius, mm,  
 $w_1$  – toeplaadi tegelik laius, mm,  
 $l_{1,dis}$  – toeplaadi efektiivne pikkus, mm,  
 $l_1$  – toeplaadi tegelik pikkus, mm.



Joonis 2.9 Survepinge jaotus punkttoe kohal. [8]



## 2.12 Nihkekandevõime tasandist välja

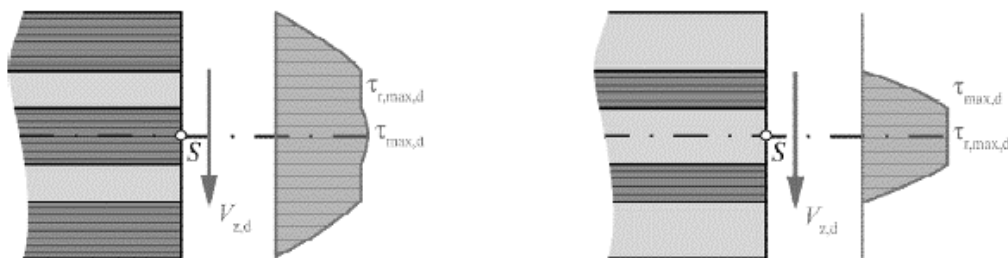
Plaadi koormamisel tasandist välja on võimalik leida nihkepinged valemiga (2.31) [6]. Kuna eeldatakse, et ristisuunaliste kihtide  $E_{90} = 0$ , siis pingete juurdekasvu ristisuunalistes kihtides ei toimu. Risti asetsevate kihtide tõttu tuleb kandevõime arvutuses teostada kaks kontrolli, maksimaalse nihkepinge kontroll nihketugevuse järgi pikisuunalistes kihtides ja maksimaalse nihkepinge kontroll külgnihketugevuse järgi ristuvates kihtides vastavalt valemitele (2.32) ja (2.33). [6] [8]

$$\tau(z) = \frac{V_{Ed} \cdot \int_A E(z) \cdot z \cdot dA}{K_{CLT} \cdot b(z)} = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT} \cdot b(z)} \quad (2.31)$$

$$\frac{\tau_{max,d}}{f_{v,CLT,d}} \leq 1,0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\tau_{r,max,d}}{f_{r,CLT,d}} \leq 1,0 \quad (2.33)$$

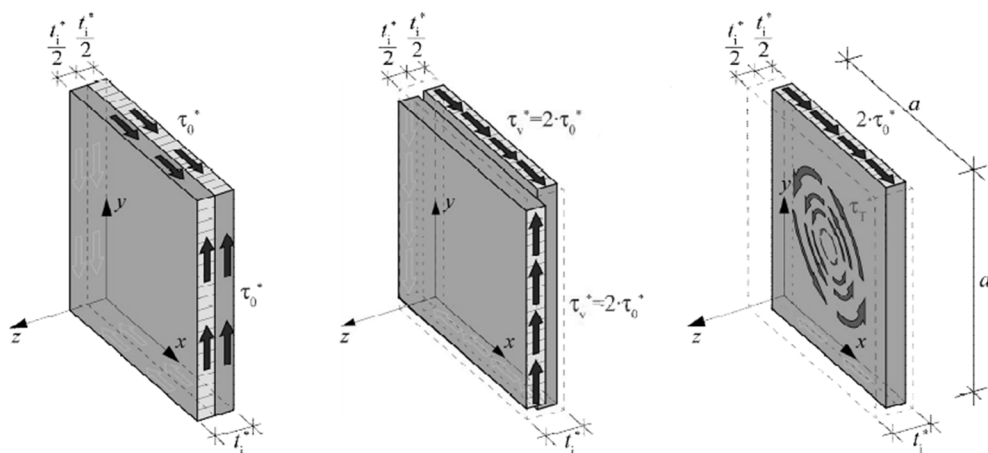
- Kus  $V_{Ed}$  – arvutuslik pöikjõud, N,  
 $E(z)$  – elastsusmoodul sõltuvalt koordinaadist  $z$ , N/mm<sup>2</sup>,  
 $z$  – vaadeldava kihi kaugus raskuskeskmest, mm,  
 $K_{CLT}$  – paindejäikus, Nmm<sup>2</sup>,  
 $S$  – pikisuunalise kihi staatiline moment raskuskeskme suhtes, mm<sup>3</sup>  
 $b$  – ristlõike laius, mm,  
 $\tau_{max,d}$  – maksimaalne nihkepinge pikisuunalises kihis, Nmm<sup>2</sup>  
 $\tau_{r,max,d}$  – maksimaalne nihkepinge ristisuunalises kihis, Nmm<sup>2</sup>  
 $f_{v,CLT,d}$  – nihketugevus, Nmm<sup>2</sup>  
 $f_{r,CLT,d}$  – külgnihketugevus, Nmm<sup>2</sup>.



Joonis 2.10 Nihkepingete jaotus ristkihtpuidus pöikjõust [6]

## 2.13 Nihkekandevõime plaadi tasandis

Tasandis koormatud ristkihtpuidust plaat jagatakse osadeks RVE (*representative volume element*), mis omakorda jaguneb osadeks RVSE (*representative volume sub-element*). Vaadeldav element on koormatud ainult plaadi tasandis, seega pinged kogu elemendi ulatuses on konstantsed. Kuna lamellide kitsad servad pole enamasti kokku liimitud ja pragude esinemine lamellide pikkisuunas on tõenäoline, siis nihkepingeid piki lamellide kitsaid servi ei saa tekkida. Seetõttu saavad nihkepinged tekkida ainult lamelliga ristisuunas ja kuna lamellid asetsevad teineteise suunas risti tekib ristlõikesse väändepinge. Nihkepinget (mehanism I) ja väändepinget liimitud pinnal (mehanism II) vaadeldakse eraldi. [6] [8]



Joonis 2.11 Liimitud kitsaste servadega pragudeta RVSE (vasakul), mehanism I (keskel), mehanism II (paremal) [6]

RVSE kihtide paksused leitakse vastavalt tabelile 2.4.

Tabel 2.4 kihipaksuste  $t^*_i$  leidmine n-kihilise CLT korral [6]

Punkt 1	Kiht 1 (välimine) Kiht 2 (sisemine)	$t^*_{1} = \min(2t_1; t_2)$
Punkt $i$	Kiht $i$ (sisemine) Kiht $i+1$ (sisemine)	$t^*_{i} = \min(t_i; t_{i+1})$
Punkt $n-1$	Kiht $n-1$ (sisemine) Kiht $n$ (välimine)	$t^*_{n} = \min(2t_n; t_{n-1})$

Kogupaksus  $t^*$  leitakse valemiga (2.34) [6]:

$$t^* = \sum_{i=1}^{n-1} t^*_i \leq t_{CLT} \quad (2.34)$$

Proportsionaalne nihkejõud  $n_{xy,RVSE(i)}^*$  leitakse valemiga (2.35) [6]:

$$n_{xy,RVSE(i)}^* = \frac{n_{xy}}{t^*} \cdot t_i^* \quad (2.35)$$

Ideaalne nihkepinge  $\tau_{0,RVSE(i)}^*$  leitakse valemiga (2.36) [6]:

$$\tau_{0,RVSE(i)}^* = \frac{n_{xy,RVSE(i)}^*}{t_i^*} = \frac{n_{xy}}{t^*} = \tau_0^* \quad (2.36)$$

Mehanismi I korral kasutatakse efektiivset nihkepinget  $\tau_v^*$ , mis on ideaalsest nihkepingest kaks korda suurem. [6]

$$\tau_v^* = 2 \cdot \tau_0^* \quad (2.37)$$

Mehanismi I tugevustingimust kontrollitakse vastavalt valemile (2.38) [6]:

$$|\tau_v^*| \leq f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (2.38)$$

Mehanismi II puhul tuleb kontrollida kõiki punkte, aga määravaks saab RVSE mille paksus  $t_i^*$  on kõige suurem kuna siis tekib suurim väändemoment  $M_{T,i}$ . [6]

$$M_{T,i} = \tau_0^* \cdot t_i^* \cdot a^2 \quad (2.39)$$

Kus  $a$  – lamelli laius, mm.

Väändepinge  $\tau_{T,i}^*$  leitakse väändemomendi  $M_{T,i}$  jagamisel polaarinerertsimomendiga  $W_p$  ning taandub valemiks (2.40) [6].

$$\tau_{T,i}^* = \frac{M_{T,i}}{W_p} = \frac{\tau_0^* \cdot t_i^* \cdot a^2}{\frac{a^3}{3}} = 3 \cdot \tau_0^* \cdot \frac{t_i^*}{a} \quad (2.40)$$

Mehanismi II tugevustingimust kontrollitakse vastavalt valemile (2.41) [6]:

$$|\tau_T^*| \leq f_{T,node,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,node,k}}{\gamma_M} \quad (2.41)$$

## 3 SISEJÕUDUDE LEIDMINE JA PLAADI DIMENSIONEERIMINE

### 3.1 Koormused ja koormuskombinatsioonid

Hoone projekteerimisel on võetud aluseks piirseisundite ja osavarutegurite süsteem vastavalt eurokoodeksile EN-1990 [9]. Konstruktsioonile mõjuvad koormused on leitud vastavalt eurokoodeksile EN-1991.

Tabel 3.1 Lähteandmed

Hoone asukoht	Tartu linn, Ringtee tn. 37c
Hoone kasutusea kategooria	4 (projekteeritud kasutusiga 50a)
Hoone kasutustingimused	Kõetud
Konstruktsiooni kasutusklass	1
Maastikutüüp	III
Hoone mõõtmed	Pikkus: 48m Laius: 18m Kõrgus: 10m

#### 3.1.1 Lumekoormus

Lumekoormus katusele leitakse vastavalt standardile EVS-EN 1991-1-3 valemiga (3.1) [10]:

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (3.1)$$

Kus  $\mu_1$  – lumekoormuse kujutegur ( $\mu_1 = 0,8$ )

$s_k$  – normatiivne lumekoormus maapinnal (Tartus  $s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ )

$C_e$  – avatustegur = 1,0 (NA)

$C_t$  – soojustegur = 1,0 (NA)

Lumekoormus katusel vastavalt valemile (3.1):

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

#### 3.1.2 Kasuskoormus

Vastavalt standardile EVS-EN 1991-1-1 kuulub antud konstruktsioon gruppi H, ehk katus kuhu pääseb ainult hoolduseks, remondiks ja puhastustöödeks. Katuse kalle on alla 20 kraadi, seega on kasuskoormuseks  $q_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$  ja  $Q_k = 1,5 \text{ kN}$ . Klassi H kombinatsioonitegurid on kõik võrdsed nulliga, seega saab arvestada ainult tuule ja lumekoormuse puudumisel. [11]

### 3.1.3 Omakaalukoormus

Katusekattekihtide omakaalukoormus ristkihtpuidule toetuvatest kihtidest on esitatud tabelis 3.2. Sprengelkandekonstruksiooni omakaalukoormust on arvestatud arvutustes eraldi. Omakaalukoormusena on arvestatud ka võimaliku riputuskoormusega  $g_{k2} = 0,15 \text{ kN/m}^2$ . Seega on kasutatud omakaalukoormusena arvutusmudelil  $g_k = 0,27 + 0,15 = 0,42 \text{ kN/m}^2$ .

Tabel 3.2 Katusekonstruktsioonile toetuvate kihtide omakaalukoormused alates välimisest pinnast [11] [12]

Katusekonstruktsioon	Kihi paksus, mm	mahukaal, $\text{kN/m}^3$	pinnakoormus $\text{kN/m}^2$
2xSBS kummbiituumen katusekate			0.100
punnsoonühendusega soojustus ISOVER OL-TOP/U	30	0.5	0.015
soojustus ISOVER OL-LAM	300	0.5	0.150
õhu- ja aurutõke	0.22		0.001
		<b>kokku</b>	<b><math>g_{k1} = 0.27</math></b>

### 3.1.4 Tuulekoormus

Tuulekoormus hoonele on leitud vastavalt standardile EVS-EN 1991-1-4. Antud hoone puhul on tegemist maastikutüübiga III, mis käsitleb ühtlaselt hoonetega kaetud maastikku, mille vahekaugus pole suurem 20-kordsest kõrgusest. Tuule kiirusrõhk  $q_p$  leitakse III-maastikutüübi puhul valemiga (3.2). [13]

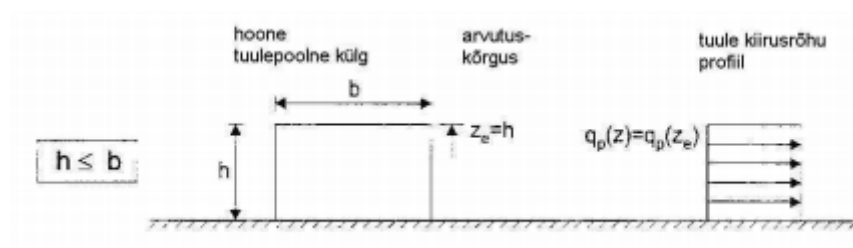
$$q_p = 12,81 \ln^2 \cdot \frac{z}{0,3} + 89,64 \cdot \ln \frac{z}{0,3} \quad (3.2)$$

Kus  $z$  – kõrgus maapinnast, m.

Kuna hoone lühem külg on pikem kui hoone kõrgus  $h < b$ , siis on tuule kiirusrõhu profiil kogu kõrguse ulatuses ühtlane ja arvutuskõrgus võrdne hoone kõrgusega (vt joonis 3.1).

Tuule kiirusrõhk 10 m kõrgusel vastavalt valemile (3.2):

$$q_p = 12,81 \ln^2 \cdot \frac{10}{0,3} + 89,64 \cdot \ln \frac{10}{0,3} = 471,8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

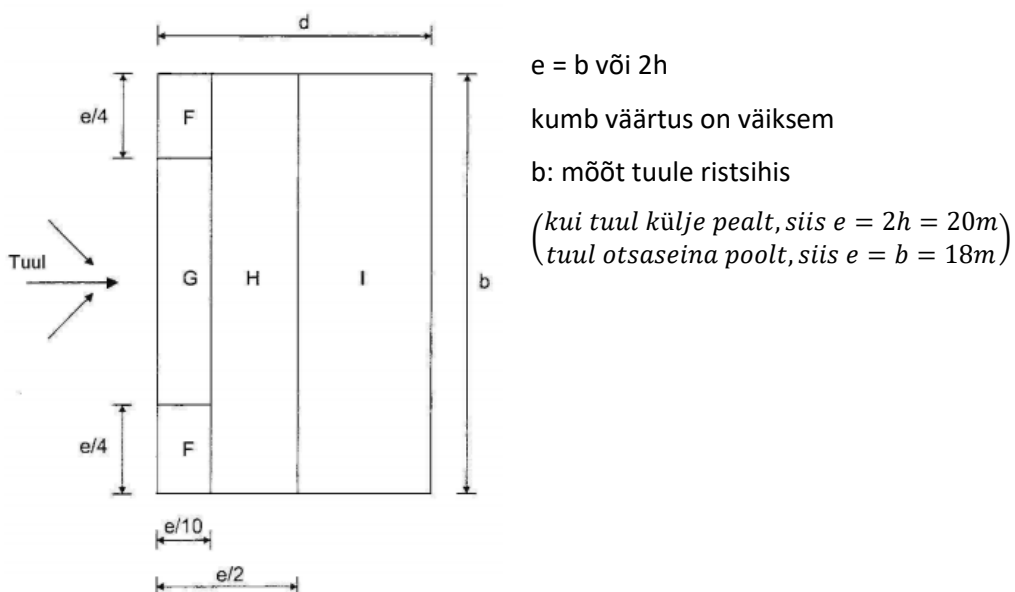


Joonis 3.1 arvutuskõrgus  $z_e$  vastavalt kiirusrõhu profiilile sõltuvalt väärtustest  $h$  ja  $b$  [13]

Hoone kandekonstruktsiooni arvutamiseks tervikuna on kasutatud välisrõhutegurite  $C_{pe,10}$  väärtusi. Välisrõhutegurid, välisrõhutegurite tsoonid ja tuulekoormus katusele on kirjeldatud tabelis 3.3 ja joonisel 3.2. Välisrõhutegurid, välisrõhutegurite tsoonid ja tuulekoormus seintele on kirjeldatud tabelites 3.4 ja 3.5 ning joonisel 3.3. [13]

## Tuulekoormus katusele

Antud hoone katuse kalle on alla 5 kraadi, seega võib selle lugeda lamekatuseks. [13]

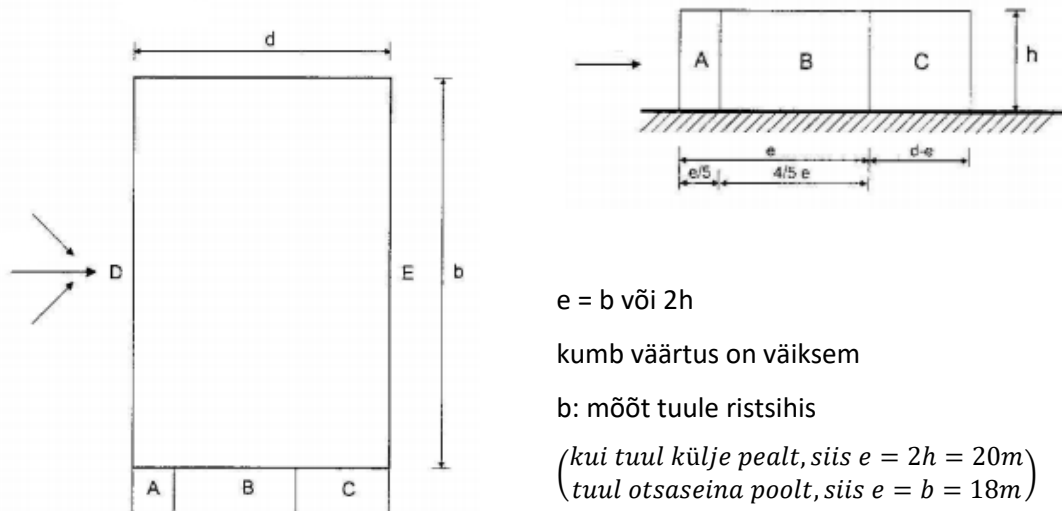


Joonis 3.2 Välisrõhutegurite tsoonid lamekatusele [13]

Tabel 3.3 Välisrõhutegurid ja tuulerõhk lamekatusele [13]

Teravate servadega räästad	Tsoon			
	F	G	H	I
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
	-1,8	-1,2	-0,7	+0,2 ; -0,6
Tuulerõhk $kN/m^2$	-0,849	-0,566	-0,330	+0,094 ; -0,283

## Tuulekoormus seintele



Joonis 3.3 Välisrõhutegurite tsoonid seintele [13]

Tabel 3.4 Välisrõhutegurid ja tuulerõhu väärtused seintele tuule mõjumisel risti pikema seinaga [13]

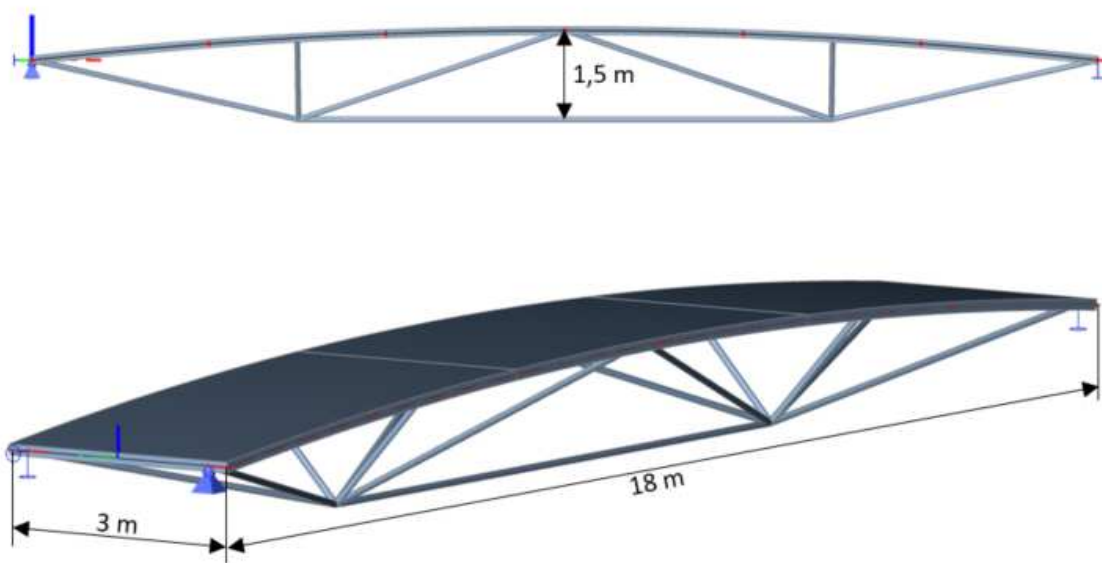
	A	B	C	D	E
$h/d$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
0,55	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,5
Tuulerõhk $kN/m^2$	-0,566	-0,377	-0,236	0,377	-0,236

Tabel 3.5 Välisrõhutegurid ja tuulerõhu väärtused seintele tuule mõjumisel risti lühema seinaga [13]

	A	B	C	D	E
$h/d$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
0,55	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3
Tuulerõhk $kN/m^2$	-0,566	-0,377	-0,236	0,330	-0,142

## 3.2 Konstruksiooni geomeetria

Kandekonstruksioon koosneb kolme meetri laiusest kumerast plaadist, mis töötab paindele, survele ja põikjõule. Sprenglipostidena ja tõmbevarrastena on kasutatud terasest ümartorusid. Plaadi keskosa on 0,5 m kõrgem kui otsad. Plaat on jagatud kolmeks võrdse pikkusega osaks ning plaadi paksuseks on valitud 130 mm (vaata tabel 3.6) . Plaadi baasmaterjalina on kasutatud lamelle T14 (C24), mis annab CLT-plaadi tugevusklassiks CL24h [variatsioonikoefitsent  $COV(f_{t,0,1,k}) = 25 \pm 5\%$ ]. Konstruksiooni kõrgus on 1,5 m, laius 3 m ja pikkus 18 m. [14]



Joonis 3.4 Sprengelkandekonstruksioonelemendi geomeetria

Tabel 3.6 CLT ristlõike kihtide paksused ja suund

Kiht	Kihi paksus, mm	Suund	Materjal
1	30	0	CL24h
2	20	90	CL24h
3	30	0	CL24h
4	20	90	CL24h
5	30	0	CL24h



### 3.3 Ristkihtpuidust plaadi jäikusmaatriks arvutusmodeli jaoks

Teineteise suhtes risti asetsevate lamellide tõttu on ristkihtpuidu näol tegemist ortotroopse materjaliga. Seetõttu tuleb konstruktsiooni sisejõudude ja deformatsioonide leidmiseks defineerida plaadile jäikusmaatriks . [7] [15]

$$K = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{11} & d_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{21} & d_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} & 0 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

- Kus  $D_{11}$  – Paindejäikus x-telje suunas vastavalt valemile (2.1),  
 $D_{22}$  – Paindejäikus y-telje suunas vastavalt valemile (2.1),  
 $D_{33}$  – Väändejäikus vastavalt valemile (2.11),  
 $D_{12}, D_{21}$  – Ristisuunalise pikenemise mõju paindemomendile (eeldatakse, et  $D_{12}=D_{21}=0$ )  
 $D_{44}$  – Nihkejäikus x-telje suunas vastavalt valemile (2.7),  
 $D_{55}$  – Nihkejäikus y-telje suunas vastavalt valemile (2.7),  
 $d_{11}$  – Jäikus piki x-telge vastavalt valemile (2.3),  
 $d_{22}$  – Jäikus piki y-telge vastavalt valemile (2.4),  
 $d_{33}$  – Nihkejäikus plaadi tasandis vastavalt valemile (2.5),  
 $d_{12}, d_{21}$  – Ristisuunalise pikenemise mõju pikijõududele (eeldatakse, et  $d_{12}=d_{21}=0$ ).

### 3.3.1 Paindejäikus x-telje suunas

Paindejäikuse leidmisel x-telje suunas arvestatakse ainult x-telje suunalisi ehk antud juhul plaadi pikisuunalisi lamelle (kihid 1, 3 ja 5). Paindejäikus leitakse  $b = 1$  m laiuse plaadiriba kohta. Ristlõike kihtide pindala  $A_i = t_i \cdot b_i$  ja inertsimoment  $I_i = \frac{b_i \cdot t_i^3}{12}$  on arvatatud tabelis 3.7.

Tabel 3.7 Telje x suunas paindejäikuse arvutamine

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_i$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_i$ [mm]	$E_{0,g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	30	1000	30000	2250000	50	11000
3	30	1000	30000	2250000	0	11000
5	30	1000	30000	2250000	50	11000

X-telje suunaline paindejäikus vastavalt valemile (2.1):

$$K_{CLT,0} = D11 = \sum (E_i \cdot I_i) + \sum (E_i \cdot A_i \cdot e_i^2) = 3 \cdot 11000 \cdot 225 \cdot 10^4 + 2 \cdot 11000 \cdot 30000 \cdot 50^2$$

$$= 1,72425 \cdot 10^{12} \text{ Nmm} = 1724,25 \text{ kNm}$$

### 3.3.2 Paindejäikus y-telje suunas

Paindejäikuse leidmisel y-telje suunas arvestatakse y-telje suunalisi ehk antud juhul plaadi ristisuunalisi lamelle (kihid 2 ja 4).

Tabel 3.8 Telje y suunas paindejäikuse arvutamine

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_i$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_i$ [mm]	$E_{0,g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2	20	1000	20000	666666,7	25	11000
4	20	1000	20000	666666,7	25	11000

X-telje suunaline paindejäikus vastavalt valemile (2.1):

$$K_{CLT,90} = D22 = \sum (E_i \cdot I_i) + \sum (E_i \cdot A_i \cdot e_i^2) =$$

$$= 2 \cdot 11000 \cdot 666666,7 + 2 \cdot 11000 \cdot 20000 \cdot 25^2 = 2,8967 \cdot 10^{11} \text{ Nmm} =$$

$$= 289,67 \text{ kNm}$$

### 3.3.3 Väändejäikus

Eeldusel, et lamellidel võib esineda pragusid ja lamellide servad on omavahel kokku liimimata, leitakse väändejäikus vastavalt valemile (2.11). Liimimata servadega lamellidega ristlõike korral on soovitatav võtta väändejäikuse vähendustegur  $\kappa_{CLT,p} = 0,65$ . Nihkemoodul  $G_{xy} = 650 \text{ N/mm}^2$ . Lamelli paksus  $a = 30\text{mm}$  ja laius  $t = 150\text{mm}$ . Väärtused  $p = 0,67$  ja  $q = -0,74$  (vaata tabel 2.2).

Plaadi väändejäikus vastavalt valemile (2.11):

$$D_{33} = D_{xy}^* = G_{xy}^* \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} = \kappa_{CLT,p} \cdot G_{xy} \cdot \frac{t_{CLT}^3}{12} = 0,654 \cdot 650 \cdot \frac{130^3}{12} = 77827144,02 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$= 77,827 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\kappa_{CLT,p} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_{FIT} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2} = \frac{1}{1 + 6 \cdot 2,205 \cdot \left(\frac{30}{150}\right)^2} = 0,654$$

$$\alpha_{FIT} = p \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^q = 0,67 \cdot \left(\frac{30}{150}\right)^{-0,74} = 2,205$$

### 3.3.4 Nihkejäikus x-telje suunas

Plaadi nihkejäikus x-telje suunas leitakse vastavalt valemile (2.7), milles  $S_{tot}$  leitakse vastavalt valemile (2.8). Nihkeparandusteguri väärtus x-telje suunas on võetud  $k = 0,2546$  (CLT designeri järgi).

Tabel 3.9 Ristlõike andmed nihkejäikuse arvutamiseks x-telje suunas

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{r,g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	30	1000	30000	650	
2	20	1000	20000		65
3	30	1000	30000	650	
4	20	1000	20000		65
5	30	1000	30000	650	

Komposiitlala nihkejäikus  $S_{tot}$  vastavalt valemile (2.8):

$$S_{tot} = \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \sum (G_i \cdot A_i) = 3 \cdot 650 \cdot 30000 + 2 \cdot 65 \cdot 20000 = 6,11 \cdot 10^7 \text{ N}$$

Plaadi nihkejäikus x-telje suunas vastavalt valemile (2.7):

$$D_{44} = S_{CLT} = S_{tot} \cdot \kappa = 6,11 \cdot 10^7 \cdot 0,255 = 15556060 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 15556,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 3.3.5 Nihkejäikus y-telje suhtes

Plaadi nihkejäikus y-telje suunas leitakse vastavalt valemile (2.7), milles  $S_{tot}$  leitakse vastavalt valemile (2.8). Nihkeparandusteguri väärtus y-telje suunas on võetud  $k = 0,179$  (CLT designeri järgi).

Tabel 3.10 Ristlõike andmed nihkejäikuse arvutamiseks y-telje suunas

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{r,g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	30	1000	30000	65	
2	20	1000	20000		650
3	30	1000	30000	65	
4	20	1000	20000		650
5	30	1000	30000	65	

Komposiitlala nihkejäikus  $S_{tot}$  vastavalt valemile (2.8):

$$S_{tot} = \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \sum (G_i \cdot A_i) = 3 \cdot 65 \cdot 30000 + 2 \cdot 650 \cdot 20000 = 3,185 \cdot 10^7 N$$

Plaadi nihkejäikus y-telje suunas vastavalt valemile (2.7):

$$D_{55} = S_{CLT} = S_{tot} \cdot \kappa = 3,185 \cdot 10^7 \cdot 0,179 = 5702347 \frac{N}{m} = 5702,35 \frac{kN}{m}$$

### 3.3.6 Jäikus piki x- ja y-telge

Plaadi jäikus piki x-telge arvutatakse vastavalt valemile (2.3) ja piki y-telge valemiga (2.4). X-telje suunalise jäikuse arvutamisel arvestatakse ainult x-telje suunalisi lamelle (kihid 1, 3 ja 5) y-telje suunalise jäikuse puhul y-telje suunalisi lamelle (kihid 2 ja 4). Kihtide paksused ja elastsusmoodulid vaata tabel 3.7 ja tabel 3.8.

$$d_{11} = D_x = E_{0,mean} \sum_{i=1}^n t_{i,x} = 3 \cdot 11000 \cdot 30 = 990000 \frac{kN}{m}$$

$$d_{22} = D_y = E_{0,mean} \sum_{i=1}^n t_{i,y} = 2 \cdot 11000 \cdot 20 = 440000 \frac{kN}{m}$$

### 3.3.7 Nihkejäikus plaadi tasandis

Plaadi nihkejäikus tasapinnas leitakse valemiga (2.5), mis sõltub valemiga (2.6) leitavast efektiivsest nihkemoodulist  $G^*$  ja plaadi paksusest  $t_{CLT}$ . Lamellide keskmine laius  $a=150\text{mm}$  ja paksus  $t=30\text{mm}$ .

$$\alpha_T = 0,32 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{-0,77} = 0,32 \cdot \left(\frac{30}{150}\right)^{-0,77} = 1,105$$

Efektiivne nihkemoodul vastavalt valemile (2.6):

$$G^* = \frac{G_{0,mean}}{1 + 6 \cdot \alpha_T \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2} = \frac{650}{1 + 6 \cdot 1,105 \cdot \left(\frac{30}{150}\right)^2} = 513,75 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Plaadi nihkejäikus tasapinnas vastavalt valemile (2.5):

$$d_{33} = S_{xy} = G^* \cdot t_{CLT} = 513,75 \cdot 130 = 66787,9 \frac{N}{\text{mm}} = 66787,9 \frac{kN}{m}$$

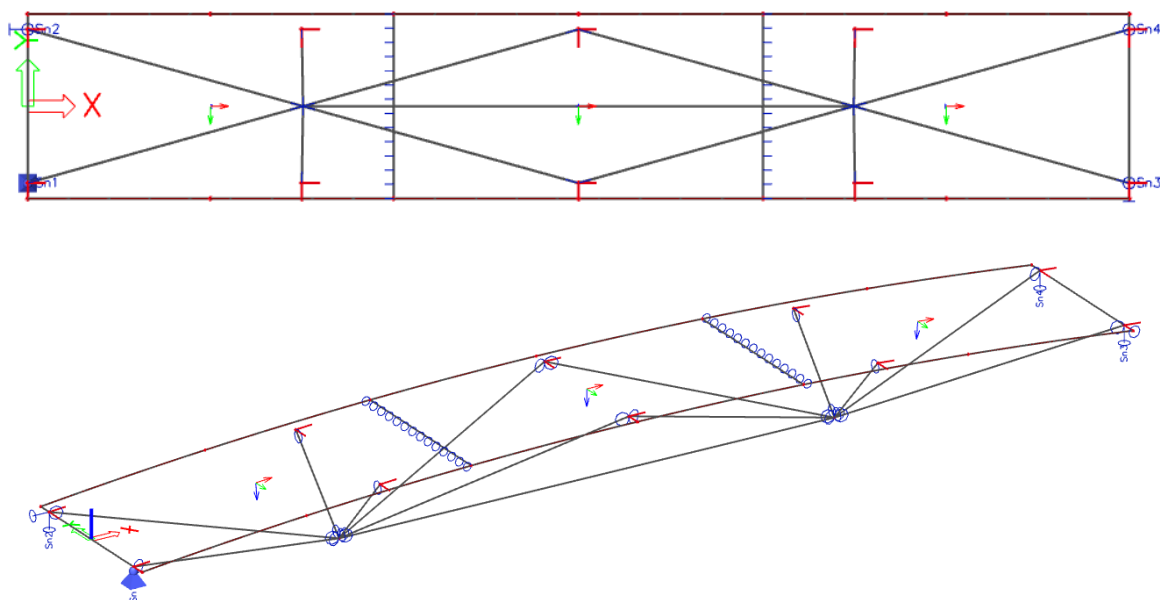
### 3.3.8 Jäikusmaatriks

Eelpool arvatud jäikusparameetrite põhjal saab koostada FEM tarkvaraga arvutamise jaoks vajamineva jäikusmaatriksi vastavalt maatriksile (3.3).

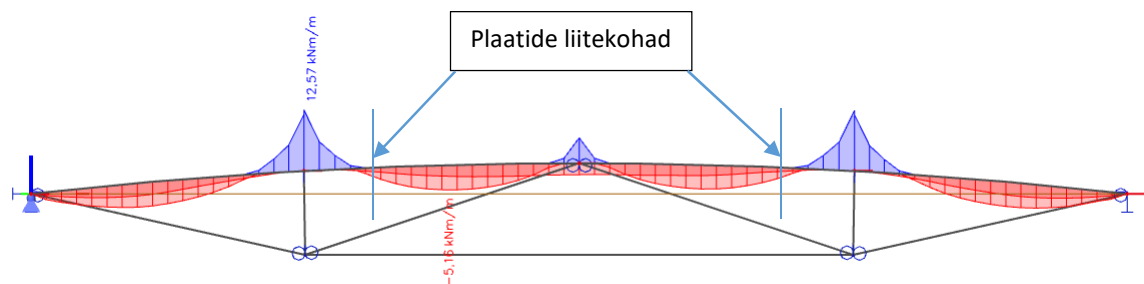
D11=1724,25	D12=0	0	0	0	0	0	0	0
D21=0	D22=289,67	0	0	0	0	0	0	0
0	0	D33=77,8	0	0	0	0	0	0
0	0	0	D44=15556,1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	D55=5702,4	0	0	0	0
0	0	0	0	0	d11=990000	d12=0	0	0
0	0	0	0	0	d21=0	d22=440000	0	0
0	0	0	0	0	0	0	d33=66787,9	0

### 3.4 Arvutusmudel

Konstruksiooni sisejõud ja deformatsioonid on leitud FEM-tarkvaraga SCIA Engineer 18.1. Sprengelkandekonstruksioon koosneb kolmest võrdse pikkusega kumerast plaadist, mis on omavahel ühendatud lineaarse liigendiga. Plaadi liitekohtade asukohad on valitud selliselt, et paindemoment liitekohas oleks võimalikult väike (vaata joonis 3.6). Terasvarraste ülemised otsad kinnituvad plaadi pikemast servast 250 mm sissepoole. Terasvarraste otstes on liigendid. Konstruktsioon on toetatud punktitudedele, mis asuvad elemendi otstes, terastõmbevarraste ja plaadi ristumispunktides (vt joonis 3.5 ja tabel 3.11). Lineaarne liigend plaatide vahel ei takista pööret ümber y-telje.



Joonis 3.5 Toed ja liigendid arvutusmudelis



Joonis 3.6 Plaatide liitekohtade asukoha valik sõltuvalt paindemomendist

Tabel 3.11 Tugede kirjeldused

Tugi	x	y	z	Rx	Ry	Rz
Sn1	kinni	kinni	kinni	vaba	vaba	vaba
Sn2	kinni	vaba	kinni	vaba	vaba	vaba
Sn3	vaba	kinni	kinni	vaba	vaba	vaba
Sn4	vaba	vaba	kinni	vaba	vaba	vaba

Ristkihtpuidust plaat on mudeldatud Shell-tööriista kasutades, mis võimaldab mudeldada plaadi kumerana. Lõplikud elemendid on siiski tasapinnalised elemendid, mille suurus on arvutusvõrgu silma suurus. CLT-plaadi materjal on defineeritud ortotroopsena. Jäikusmaatriksi väärtused on esitatud punktis 3.3.8. Plaadi arvutusvõrgu silma suuruseks on ligikaudu kaks plaadi paksust ehk 0,25 m. Materjaliks ortotroopsel plaadil on määratud okaspuit C24, mille alusel arvutatakse plaadi omakaal. Terasvarrasteks on ümartorud CFHS76,1x6mm terasest S355.

### 3.5 Koormuskombinatsioonid

Arvutustarkvarasse sisestatud koormuste järgi koostatakse koormuskombinatsioonid nii kandepiiriseisundi kui kasutuspiiriseisundi jaoks (vastavalt EN 1990 Annex A1 ja A2). Koormused, millest kombinatsioonid genereeritakse on järgmised: konstruktsiooni omakaal (CLT plaat + terasvardad), katusekihtide omakaal koos riputuskoormusega, lumekoormus, suruv tuulekoormus ja H-kategooria katuse kasuskoormus. Kokku on genereeritud 29 koormuskombinatsiooni. Töös on kasutatud omakaalu koormuse osavarutegurit  $\gamma_{G,sup} = 1,35$ .

Tabel 3.12 Määravaks saanud koormuskombinatsioonid

<p>ULS-Set B (auto)/2 Kandepiiriseisundi koormuskombinatsioon</p>	<p>1.35*Omakaal + 1.50*lumekoormus + 1.35*katusekihid + 0.90*Tuul suruv</p>
<p>SLS-Char (auto)/2 Kasutuspiiriseisund - Normkombinatsioon</p>	<p>1*Omakaal + 1*lumekoormus + 1*katusekihid + 0.60*Tuul suruv</p>
<p>ACC-tulekahju Erakordse arvutusolukorra kombinatsioon</p>	<p>1*Omakaal + 1*katusekihid +0,2*lumekoormus</p>

### 3.6 Sisejõud

CLT-plaat on jagatud piki- ja ristisunas sümmeetriatelgedega pooleks ning koormuse asukohta paremaks jälgimiseks on see neljandik plaadist jagatud veel kuueks tsooniks (1,5x1,5m ruudud). Plaadi arvutusvõrgu suuruseks on 0,25 m ning iga võrguelemendi raskuskeskmes mõjuva sisejõu väärtuseks on antud võrguelemendi sisejõudude aritmeetiline keskmine (in-centres) [16]. Selle lähenemisega saab lahti ebarealistlikest sisejõudude tippudest punktude kohal. Selliselt leitud plaadi sisejõud on viidud Excel'i tabeli kujule ning andmetöötluse käigus on leitud arvutustes kasutatavad maksimaalsed sisejõudude väärtused (vaata lisa 1).



Joonis 3.7 Plaadi jaotus tsoonideks

### 3.7 Baasmaterjali omadused

Tabel 3.13 arvutustes kasutatavad baasmaterjali omadused [14]

omadus	Liimpuidu tugevusklass	CL24h	T14 (25±5%)
paindetugevus	$f_{m,CLT,k} =$	24	N/mm <sup>2</sup>
tõmbetugevus	$f_{t,0,CLT,net,k} =$	16	N/mm <sup>2</sup>
	$f_{t,90,CLT,k} =$	0.5	N/mm <sup>2</sup>
survetugevus	$f_{c,0,CLT,net,k} =$	24	N/mm <sup>2</sup>
	$f_{c,90,CLT,k} =$	2.85	N/mm <sup>2</sup>
nihketugevus (IP)	$f_{v,CLT,k} =$	5	N/mm <sup>2</sup>
väändetugevus (IP)	$f_{T,node,k} =$	2.5	N/mm <sup>2</sup>
nihketugevus (OP)	$f_{v,CLT,k} =$	3	N/mm <sup>2</sup>
külgnihketugevus (OP)	$f_{r,CLT,k} =$	1.25	N/mm <sup>2</sup>
Elastsusmoodul	$E_{0,CLT,mean} =$	11000	N/mm <sup>2</sup>
	$E_{0,CLT,05} =$	9166.7	N/mm <sup>2</sup>
	$E_{90,CLT,mean} =$	300	N/mm <sup>2</sup>
	$E_{90,CLT,05} =$	250	N/mm <sup>2</sup>
Nihkemoodul	$G_{CLT,mean} =$	650	N/mm <sup>2</sup>
	$G_{CLT,05} =$	540	N/mm <sup>2</sup>
Külgnihkemoodul	$G_{r,g,mean} =$	65	N/mm <sup>2</sup>
	$G_{r,g,05} =$	54	N/mm <sup>2</sup>
tihedus	$\rho_{CLT,k} =$	350	kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_{CLT,mean} =$	385	kg/m <sup>3</sup>



## 3.8 Kandevoime pikisuunas

### 3.8.1 Paindekandevoime

Maksimaalne paindemoment  $M_x = 10,49$  kNm/m esineb plaadis tsoonide 3 ja 4 vahelises osas. Paindekandevoime on tagatud, kui paindepinge ja paindetugevuse suhe on väiksem kui 1. Paindepingete jaotus ristlõikes on esitatud joonisel 3.8.

Paindepinged ristlõikes leitakse valemiga (2.14):

$$\sigma(z) = \frac{M_{Ed}}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z) = \frac{10,49 \cdot 10^6}{1,72425 \cdot 10^{12}} \cdot 65 \cdot 11000 = 4,35 \frac{N}{mm^2}$$

Ristkihtpuidu normatiivne paindetugevus vastavalt valemile (2.16):

$$f_{m,CLT,k} = k_1 \cdot f_{m,GLT,k} = 1,1 \cdot 24 = 26,4 \frac{N}{mm^2}$$

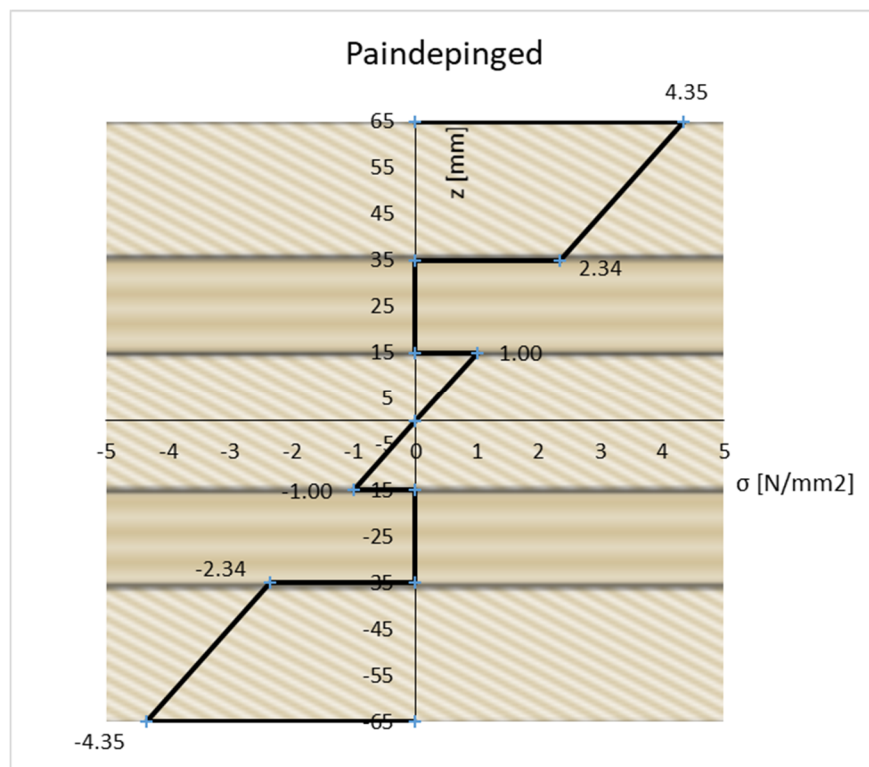
Arvutuslik paindetugevus vastavalt valemile (2.17):

$$f_{m,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 26,4}{1,25} = 16,9 \frac{N}{mm^2}$$

Tugevustingimus vastavalt valemile (2.13):

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} = \frac{4,35}{16,9} = 0,26 < 1,0$$

Paindekandevoime pikisuunas on tagatud.



Joonis 3.8 Paindepinged ristlõikes paindemomendi mõjumisel pikisuunas

### 3.8.2 Survekandevõime plaadi tasandis

Maksimaalne survejõud plaadis  $N_x = 247,69$  kN/m esineb tsoonis 1, tõmbevarda ja plaadi kinnituskohas. Tugevustingimus arvestades nõtket vastavalt valemile (2.20):

$$\frac{N_{Ed}}{k_c \cdot A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} = \frac{250 \cdot 10^3}{0,302 \cdot 90000 \cdot 15,36} = 0,6 < 1,0$$

Survekandevõime pikisuunas on tagatud.

Vähendustegur  $k_c$  sõltub suhtelisest saledusest, mis omakorda leitakse Euler'i kriitilise koormuse järgi vastavalt valemile (2.21):

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT,05} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,05}}{S_{CLT,05} \cdot l_k^2}\right)} = \frac{1,44 \cdot 10^{12} \cdot \pi^2}{4500^2 \cdot \left(1 + \frac{1,44 \cdot 10^{12}}{1,29 \cdot 10^7 \cdot 4500^2}\right)} = 696491,34 \text{ N}$$

Suhteline saledus vastavalt valemile (2.25):

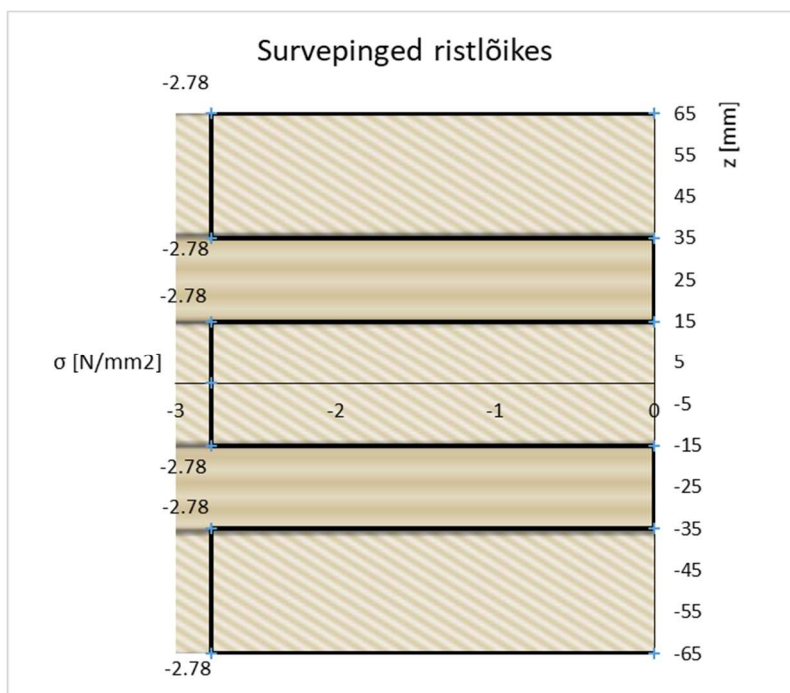
$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,k}}{n_{cr}}} = \sqrt{\frac{90000 \cdot 24}{696491,34}} = 1,76$$

Abisuurus  $k$  valemiga (2.23):

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,76 - 0,3) + 1,76^2) = 2,12$$

Vähendustegur  $k_c$  leitakse valemiga (2.22):

$$k_c = \min \left[ \frac{1,0}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \right] = \left[ \frac{1,0}{2,12 + \sqrt{2,12^2 - 1,76^2}} \right] = 0,302$$



Joonis 3.9 Survepinged ristlõikes pikisuunas

### 3.8.3 Nihkekandevõime tasapinnast välja

Maksimaalne põikjõud  $V_x = 15,44 \text{ kN/m}$  asub tsoonide 3 ja 4 vahepealses osas sprengliposti kohal.

Kuna ristkihtpuidu kihid asetsevad risti, tehakse kaks kontrolli.

Maksimaalse nihkepinge kontroll nihketugevuse järgi pikisuunalistes kihtides vastavalt valemile

(2.32):

$$\frac{\tau_{max,d}}{f_{v,CLT,d}} = \frac{0,159}{1,92} = 0,08 < 1,0$$

Nihkepinged keskmises kihis vastavalt valemile (2.31):

$$\tau(z) = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT} \cdot b(z)} = \frac{15,44 \cdot 10^3 \cdot 1612500 \cdot 11000}{1,72 \cdot 10^{12} \cdot 1000} = 0,159 \frac{N}{mm^2}$$

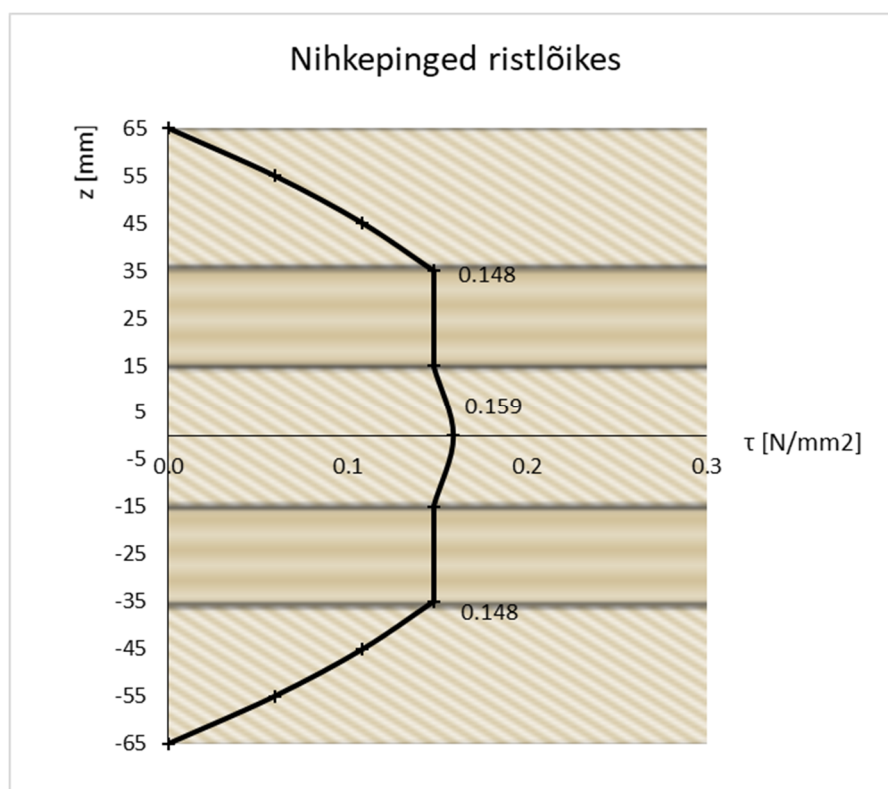
maksimaalse nihkepinge kontroll külgnihketugevuse järgi ristuvates kihtides vastavalt valemile

(2.33):

$$\frac{\tau_{r,max,d}}{f_{r,CLT,d}} = \frac{0,148}{0,8} = 0,18 < 1,0$$

Nihkepinged kihtides 2 ja 4 vastavalt valemile (2.31):

$$\tau(z) = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT} \cdot b(z)} = \frac{15,44 \cdot 10^3 \cdot 1500000 \cdot 11000}{1,72 \cdot 10^{12} \cdot 1000} = 0,148 \frac{N}{mm^2}$$



Joonis 3.10 Nihkepinged plaadis pikisuunas

### 3.8.4 Paindemomendi ja pikijõu koosmõju

Kuna plaadile mõjub samaaegselt survejõud ja paindemoment, tuleb arvestada nende koosmõju [17]. Tugevustingimus survejõu ja paindemomendi koosmõjul on esitatud valemis (3.4). Antud konstruktsiooni korral on kõige kriitilisem punkt koosmõju poolest punkt, kus asub ka maksimaalne survejõud  $N_x = 247,69 \text{ kN/m}$ . Selles punktis on vastav paindemoment pikisuunas  $M_x = -1,12 \text{ kNm/m}$ .

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1 \quad (3.4)$$

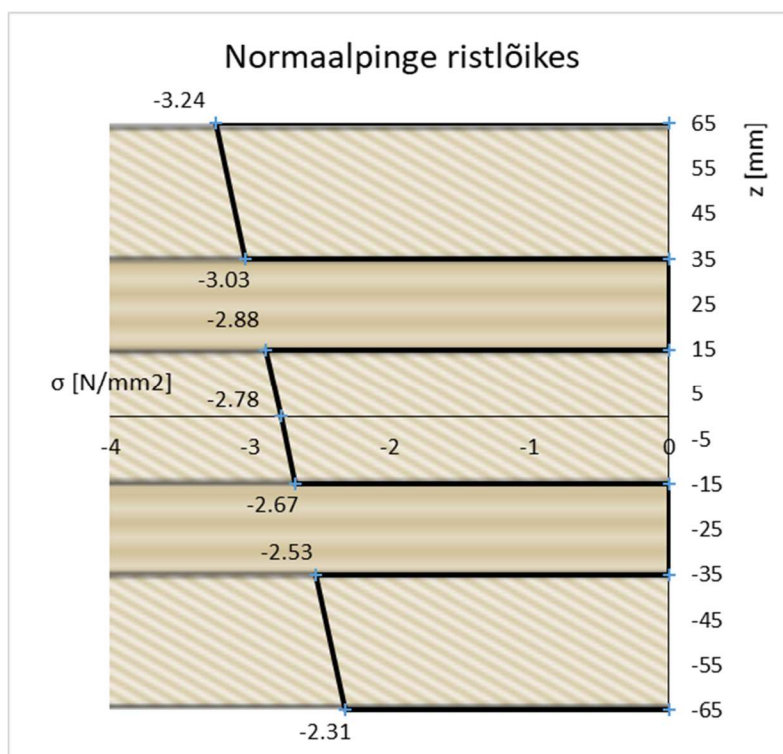
Kus  $\sigma_{c,0,d}$  – survepinge pikisuunas,  $\sigma_{c,0,d} = 2,78 \text{ N/mm}^2$ ,

$\sigma_{m,0,d}$  – Paindepinge,  $\sigma_{m,0,d} = 0,46 \text{ N/mm}^2$ .

Tugevustingimuse kontroll:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,CLT,d}} = \frac{2,78}{0,302 \cdot 15,36} + \frac{0,46}{16,9} = 0,63 < 1$$

Tugevustingimus pikisuunas paindemomendi ja pikijõu koosmõjul on täidetud.



Joonis 3.11 Normaalpinge ristlõikes pikijõu ja paindemomendi koosmõjust pikisuunas

## 3.9 Kandevoime ristisuunas

### 3.9.1 Paindekandevoime

Maksimaalne paindemoment ristisuunas  $M_y = -2,35$  kNm/m esineb tsoonide 3 ja 4 vahelises osas plaadi keskel. Paindekandevoime on tagatud, kui paindepinge ja paindetugevuse suhe on väiksem kui 1. Paindepingete jaotus ristlõikes on esitatud joonisel 3.12.

Paindepinged ristlõikes leitakse valemiga (2.14):

$$\sigma(z) = \frac{M_{Ed}}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z) = \frac{2,35 \cdot 10^6}{2,90 \cdot 10^{11}} \cdot 35 \cdot 11000 = 3,12 \frac{N}{mm^2}$$

Ristkihtpuidu normatiivne paindetugevus vastavalt valemile (2.16):

$$f_{m,CLT,k} = k_1 \cdot f_{m,GLT,k} = 1,1 \cdot 24 = 26,4 \frac{N}{mm^2}$$

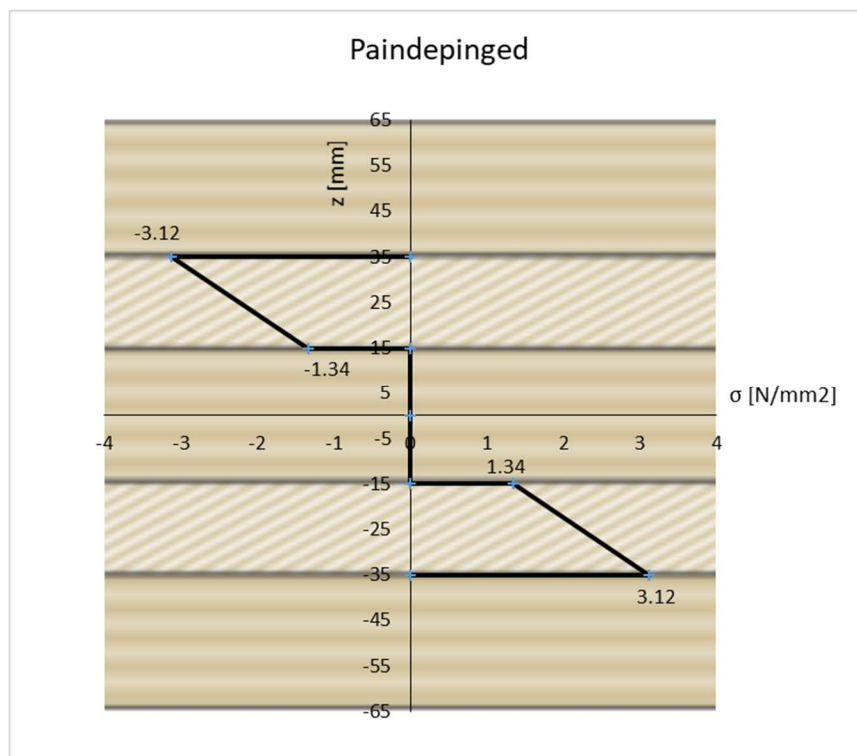
Arvutuslik paindetugevus vastavalt valemile (2.17):

$$f_{m,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 26,4}{1,25} = 16,9 \frac{N}{mm^2}$$

Tugevustingimus vastavalt valemile (2.13):

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} = \frac{3,12}{16,9} = 0,18 < 1,0$$

Paindekandevoime pikisuunas on tagatud.



Joonis 3.12 Paindepinged ristlõikes paindemomendi mõjumisel ristisuunas

### 3.9.2 Survekandevõime plaadi tasandis

Maksimaalne survejõud ristisuunas  $N_y = 120,05$  kN/m esineb tsoonis 1, tõmbevarda ja plaadi kinnituskohas. Tugevustingimus arvestades nõtket vastavalt valemile (2.20):

$$\frac{N_{Ed}}{k_c \cdot A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} = \frac{121 \cdot 10^3}{0,365 \cdot 40000 \cdot 15,36} = 0,54 < 1,0$$

Survekandevõime pikisuunas on tagatud.

Vähendustegur  $k_c$  sõltub suhtelisest saledusest, mis omakorda leitakse Euler'i kriitilise koormuse järgi vastavalt valemile (2.21):

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT,05} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,05}}{S_{CLT,05} \cdot l_k^2}\right)} = \frac{2,41 \cdot 10^{11} \cdot \pi^2}{2500^2 \cdot \left(1 + \frac{2,41 \cdot 10^{11}}{4,74 \cdot 10^6 \cdot 2500^2}\right)} = 378102,8 \text{ N}$$

Suhteline saledus vastavalt valemile (2.25):

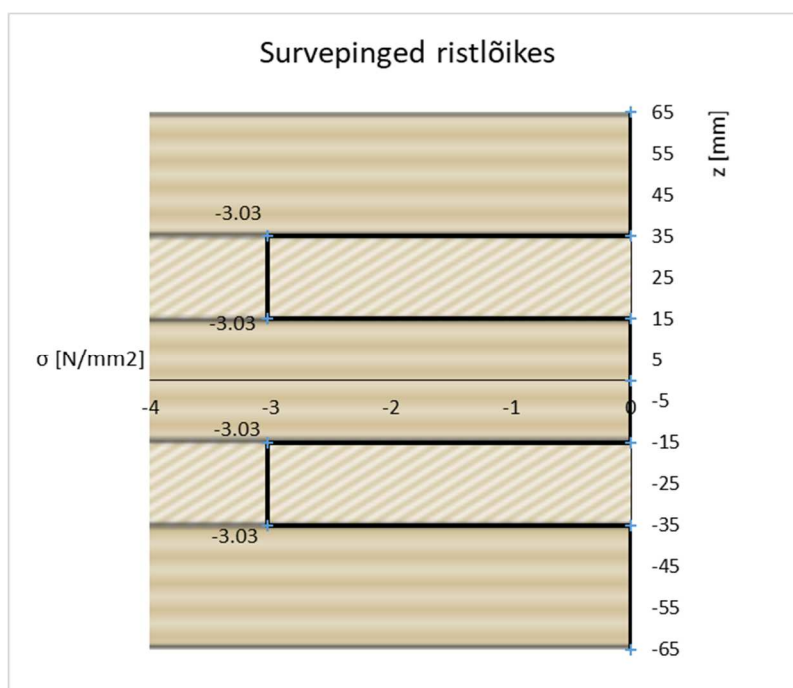
$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,k}}{n_{cr}}} = \sqrt{\frac{40000 \cdot 24}{378102,8}} = 1,59$$

Abisuurus  $k$  valemiga (2.23):

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,59 - 0,3) + 1,59^2) = 1,83$$

Vähendustegur  $k_c$  leitakse valemiga (2.22):

$$k_c = \min \left[ \frac{1,0}{1}, \frac{1,0}{1,83 + \sqrt{1,83^2 - 1,59^2}} \right] = 0,365$$



Joonis 3.13 Survepinged ristlõikes ristisuunas

### 3.9.3 Nihkekandevõime tasapinnast välja

Maksimaalne põikjõud  $V_y = 11,13 \text{ kN/m}$  asub tsoonide 3 ja 4 vahepealses osas sprengliposti kohal.

Kuna ristkihtpuidu kihid asetsevad risti, tehakse kaks kontrolli.

Maksimaalse nihkepinge kontroll nihketugevuse järgi pikisuunalistes kihtides vastavalt valemile

(2.32):

$$\frac{\tau_{max,d}}{f_{v,CLT,d}} = \frac{0,211}{1,92} = 0,11 < 1,0$$

Nihkepinged kihis 2 ja 4 vastavalt valemile (2.31):

$$\tau(z) = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT} \cdot b(z)} = \frac{11,13 \cdot 10^3 \cdot 500000 \cdot 11000}{2,90 \cdot 10^{11} \cdot 1000} = 0,211 \frac{N}{mm^2}$$

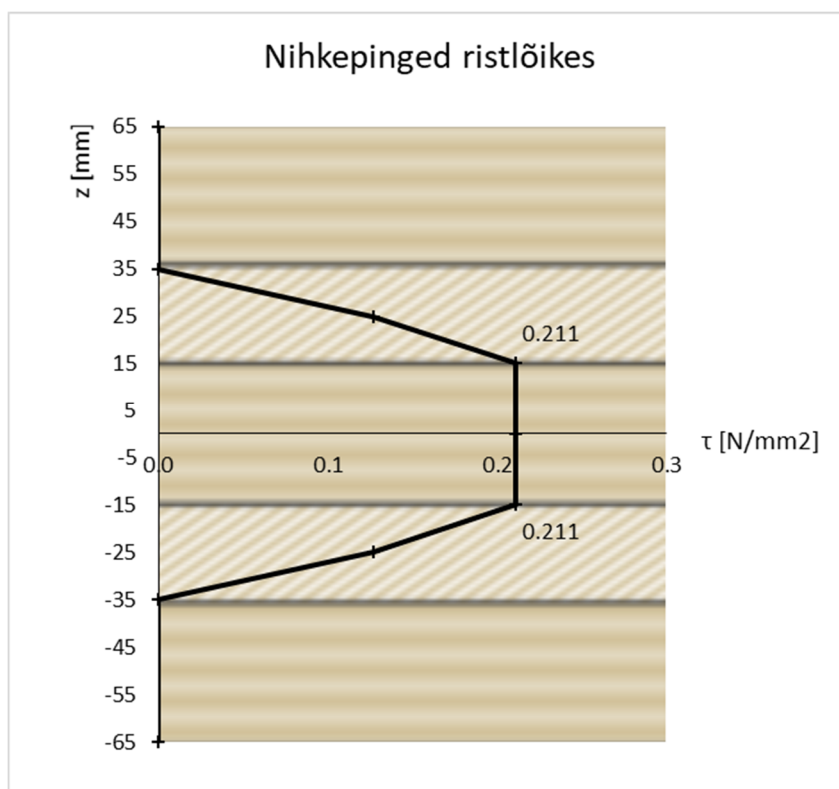
maksimaalse nihkepinge kontroll külgnihketugevuse järgi ristuvates kihtides vastavalt valemile

(2.33):

$$\frac{\tau_{r,max,d}}{f_{r,CLT,d}} = \frac{0,211}{0,8} = 0,26 < 1,0$$

Nihkepinged keskmises kihis vastavalt valemile (2.31):

$$\tau(z) = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT} \cdot b(z)} = \frac{11,13 \cdot 10^3 \cdot 500000 \cdot 11000}{2,90 \cdot 10^{11} \cdot 1000} = 0,211 \frac{N}{mm^2}$$



Joonis 3.14 Nihkepinged plaadis ristisuunas

### 3.9.4 Paindemomendi ja pikijõu koosmõju

Ka ristisuunas mõjub plaadile samaaegselt survejõud ja paindemoment ning tuleb arvestada nende koosmõju [17]. Tugevustingimus survejõu ja paindemomendi koosmõjul on esitatud valemis (3.4). Antud konstruktsiooni korral on kõige kriitilisem punkt koosmõju poolest punkt, kus asub ka maksimaalne survejõud  $N_y = 120,1 \text{ kN/m}$ . Selles punktis on vastav paindemoment  $M_y = 0,33 \text{ kNm/m}$ .

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1$$

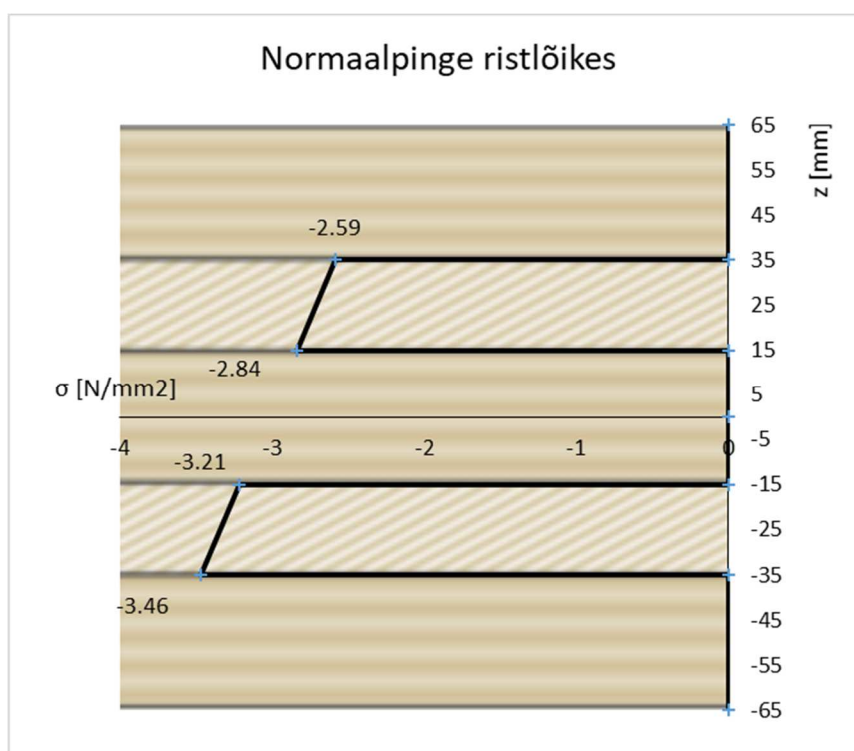
Kus  $\sigma_{c,0,d}$  – survepinge pikisuunas,  $\sigma_{c,0,d} = -3,03 \text{ N/mm}^2$ ,

$\sigma_{m,0,d}$  – Paindepinge,  $\sigma_{m,0,d} = 0,44 \text{ N/mm}^2$ .

Tugevustingimuse kontroll:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,CLT,d}} = \frac{3,03}{0,365 \cdot 15,36} + \frac{0,44}{16,9} = 0,57 < 1$$

Tugevustingimus pikisuunas paindemomendi ja pikijõu koosmõjul on täidetud.



Joonis 3.15 Normaalpinge ristlõikes pikijõu ja paindemomendi koosmõjust ristisuunas



### 3.9.5 Tõmbekandevõime

Plaadi ristisuunas tekib tsoonide 3 ja 4 vahel sprengliposti lähedal tõmbejõud  $n_y = 26,09 \text{ kN/m}$ .

Tõmbekandevõimet ristlõikes kontrollitakse valemiga (2.18).

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net,ef}} \leq f_{t,0,CLT,net,d}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net,ef}} = \frac{26,09 \cdot 10^3}{40000} = 0,65 < 10,24$$

Tõmbekandevõime on tagatud.

$$f_{t,0,CLT,net,d} = k_{sys,t,0} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,1,k}}{\gamma_M} = 1,0 \cdot \frac{0,8 \cdot 16}{1,25} = 10,24 \frac{N}{mm^2}$$

$$k_{sys,t,0} = 1,0.$$

### 3.10 Nihkekandevõime plaadi tasandis

Maksimaalne nihkejõud  $n_{xy} = 111,9 \text{ kN/m}$  plaadi tasandis esineb tsoonis 1 tõmbevarda ja plaadi kinnituskoha lähedal. Kihtidevahelised punktid ja paksused  $t_i^*$  on leitud vastavalt tabelile 2.4.

Tabel 3.14 Kihipaksused  $t_i^*$

		$t_i$ [mm]	$t_i^*$ [mm]
punkt 1	kiht 1	30	20
	kiht 2	20	
punkt 2	kiht 2	20	20
	kiht 3	30	
punkt 3	kiht 3	30	20
	kiht 4	20	
punkt 4	kiht 4	20	20
	kiht 5	30	

Kogupaksus  $t^*$  vastavalt valemile (2.34):

$$t^* = \sum_{i=1}^{n-1} t_i^* = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm} < t_{CLT} = 130 \text{ mm}$$

Proportsionaalne nihkejõud  $n_{xy,RVSE(i)}^*$  vastavalt valemile (2.35):

$$n_{xy,RVSE(i)}^* = \frac{n_{xy}}{t^*} \cdot t_i^* = \frac{112}{80} \cdot 20 = 28 \frac{N}{mm}$$

Ideaalne nihkepinge  $\tau_{0,RVSE(I)}^*$  leitakse valemiga (2.36):

$$\tau_0^* = \frac{n_{xy}}{t^*} = \frac{28}{20} = 1,4 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanism I puhul leitakse efektiivne nihkepinge  $\tau_v^*$  vastavalt valemile (2.37):

$$\tau_v^* = 2 \cdot \tau_0^* = 2 \cdot 1,4 = 2,8 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanismi I tugevustingimus vastavalt valemile (2.38):

$$|\tau_v^*| \leq f_{v,CLT,d}$$

$$2,8 < 3,2$$

Tugevustingimus on täidetud.

$$f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,CLT,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 5,0}{1,25} = 3,2 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanismi II puhul on vaja leida väändemoment igas punktis. Kuna kihtide paksused on  $t_i^* = 20$  mm iga punkti korral samad, siis on ka väändemomendid võrdsed. Lamellide paksuse ja laiuse suhe on 1:5 seega 20 mm paksuse lamelli laius  $a = 100$  mm.

väändemoment  $M_{T,i}$  vastavalt valemile (2.39):

$$M_{T,i} = \tau_0^* \cdot t_i^* \cdot a^2 = 1,4 \cdot 20 \cdot 100^2 = 280000 \text{ Nmm}$$

Väändepinge  $\tau_{T,i}^*$  vastavalt valemile (2.40):

$$\tau_{T,i}^* = \frac{M_{T,i}}{W_p} = 3 \cdot \tau_0^* \cdot \frac{t_i^*}{a} = 3 \cdot 1,4 \cdot \frac{20}{100} = 0,84 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanismi II tugevustingimus vastavalt valemile (2.41):

$$|\tau_T^*| \leq f_{T,node,d}$$

$$0,84 < 1,6$$

Tugevustingimus on täidetud.

$$f_{T,node,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,node,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 2,5}{1,25} = 1,6 \frac{N}{mm^2}$$

### 3.11 Muljumiskandevõime otsatugede kohal

Otsatõe z-telje suunaline toereaktsioon on  $F_z = 41$  kN. Otsatõe laius  $w_1 = 250$  mm ja pikkus  $l_1 = 250$  mm. Arvestades, et pinge jaguneb pikisuunalistes kihtides 45- ja ristisuunalistes kihtides 15-kraadise nurga all on efektiivseteks toe mõõtmeteks:

$$w_{1,dis} = 250 + 2 \cdot (45 \cdot \tan(15) + 20) = 314,1 \text{ mm}$$

$$l_{1,dis} = 250 + 2 \cdot (20 \cdot \tan(15) + 45) = 350,7 \text{ mm}$$

Tegur  $k_{c,90,CLT}$  vastavalt valemile (2.28):

$$k_{c,90,CLT} = \frac{\sqrt{w_{1,dis} \cdot w_1} \cdot \sqrt{l_{1,dis} \cdot l_1}}{w_1 \cdot l_1} = \frac{\sqrt{314,1 \cdot 250} \cdot \sqrt{350,7 \cdot 250}}{250 \cdot 250} = 1,33$$

Pinge toeplaadi all vastavalt valemile (2.26):

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{c,90}} = \frac{41 \cdot 10^3}{250 \cdot 250} = 0,66 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Tugevustingimus vastavalt valemile :

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = 0,66 < k_{c,90,CLT} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M} = 1,33 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,85}{1,25} = 2,43 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Seega plaadi muljumiskandevõime otsatugede kohal on tagatud.

### 3.12 Tulepüsivus

Tulekahju korral saab määravaks koormuskombinatsioon ACC-Tulekahju (1\*Omakaal + 1\*katusekihid + 0,2\*lumekoormus). Kandevõime arvutamiseks tulekahju olukorras on kasutatud efektiivristlõike meetodi vastavalt [18] ja [19]. Selle meetodi puhul määrab kandevõime ristlõige, mille mõõtmed, tugevus- ja jäikusomadused on kõrge temperatuuri tõttu vähendatud. Efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  sõltub söestumiskiirusest  $\beta$ , kasutatavast liimist ja tulekaitsekihtide olemasolust ning sellele lisatakse nulltugevusega kihi paksus. Ristkihtpuidu puhul esitatakse nulltugevusega kihi paksus kompenseeriva kihina  $s_0$ , mis leitakse [18] järgi 5-kihilise kaitsmata elemendi korral valemiga (L3.3) (kui tuli on surutud poolel). Juhul kui tegemist on kaitstud elemendiga, siis on kompenseeriva kihi paksus [18] järgi  $s_0 = 18$  mm. Vaadeldava konstruktsiooni puhul on eeldatud, et kasutatud on liimi, mis 60 minutilise tulekahju korral säilitab oma omadused ([19] põhjal võib kasutada fenool-formaldehüüd ja aminoplastseid tüüp 1 liime vastavalt [20]) ja vahed lamellide vahel on kuni 2 mm. Sellisel juhul söestub ristlõige nagu massiivne puitelement ühemõõtmeliselt ühtlase söestumiskiirusega  $\beta_0 = 0,65$  mm/min. Kandevõime arvutused tulekahju korral on esitatud Lisa 3. CLT-plaadi kandevõime 60 minutilise tulekahju korral on pikisuunas tagatud ning tulemused on esitatud tabelis 3.15.

Tabel 3.15 Kandevõime tulekahju korral pikisuunas

	Sisejõud tulekahju korral	Maksimaalne pingeline ristlõikes	Jääkristlõike kandevõime	[%]
Paindekandevõime pikisuunas	$M_{x,fi} = 3,7 \text{ kNm}$	$\sigma_{m,d,fi} = 4,22 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{m,CLT,fi} = 27,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$	15
Survekandevõime pikisuunas	$N_{x,fi} = 89 \text{ kN}$	$\sigma_{c,d,fi} = 1,66 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{c,CLT,fi} = 2,98 \frac{N}{\text{mm}^2}$	56
Nihkekandevõime pikisuunas (OP)	$V_{x,fi} = 5,4 \text{ kN}$	$\tau_{max,d,fi} = 0,104 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{v,CLT,fi} = 3,45 \frac{N}{\text{mm}^2}$	3
		$\tau_{r,max,d,fi} = 0,104 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{r,CLT,fi} = 1,44 \frac{N}{\text{mm}^2}$	7
Paindemomendi ja pikijõu koosmõju	$N_{x,fi} = 89 \text{ kN}$ $M_{x,fi} = 0,34 \text{ kNm}$	$\sigma_{c,d,fi} = 1,66 \frac{N}{\text{mm}^2}$ $\sigma_{m,d,fi} = 0,39 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{c,CLT,fi} = 2,98 \frac{N}{\text{mm}^2}$ $f_{m,CLT,fi} = 27,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$	57

Kandevõime arvutustes ristisuunas tuli välja, et nõtkekandevõime otsatugede vahelises alas ei ole tagatud. Nõtkekandevõime tagamiseks on lisatud otsatugede vahele 26 mm paksune liimpuidust kaitsekiht, mille võib valmistada CLT-paneeli tootmise jääkidest. Kandevõime arvutuse tulemused tulekahju korral plaadi ristisuunas on esitatud tabelis 3.16.

Tabel 3.16 Kandevõime tulekahju korral ristisuunas.

	Sisejõud tulekahju korral	Maksimaalne pingeline ristlõikes	Jääkristlõike kandevõime	[%]
Paindekandevõime ristisuunas (kaitsmata)	$M_{x,fi} = 0,83 \text{ kNm}$	$\sigma_{m,d,fi} = 12,45 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{m,CLT,fi} = 27,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$	45
Survekandevõime ristisuunas (kaitstud)	$N_{x,fi} = 42,6 \text{ kN}$	$\sigma_{c,d,fi} = 1,61 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{c,CLT,fi} = 5,9 \frac{N}{\text{mm}^2}$	24
Nihkekandevõime ristisuunas (OP) (kaitsmata)	$V_{x,fi} = 3,9 \text{ kN}$	$\tau_{max,d,fi} = 0,29 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{v,CLT,fi} = 3,45 \frac{N}{\text{mm}^2}$	8
Paindemomendi ja pikijõu koosmõju Ristisuunas (kaitstud)	$N_{x,fi} = 42,6 \text{ kN}$ $M_{x,fi} = 0,05 \text{ kNm}$	$\sigma_{c,d,fi} = 1,61 \frac{N}{\text{mm}^2}$ $\sigma_{m,d,fi} = 0,12 \frac{N}{\text{mm}^2}$	$f_{c,CLT,fi} = 5,9 \frac{N}{\text{mm}^2}$ $f_{m,CLT,fi} = 27,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$	24

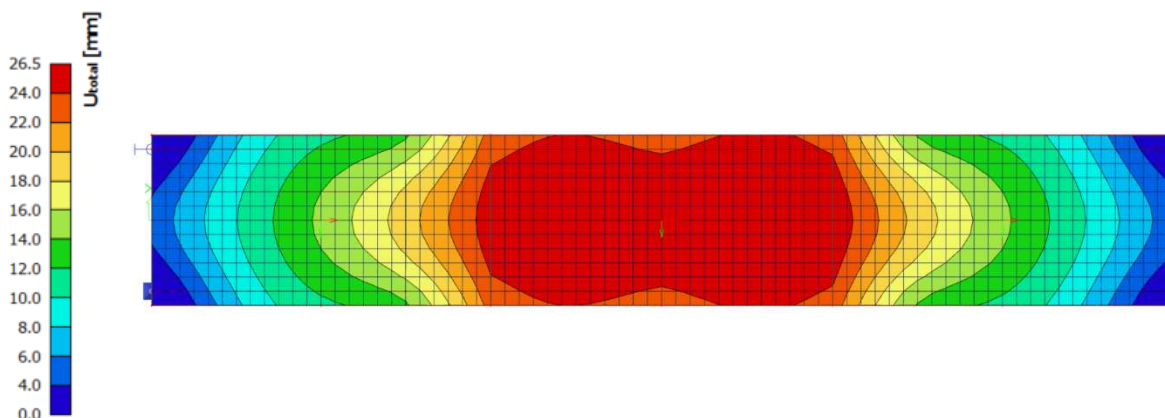
## 3.13 Kasutuspiirseisund

### 3.13.1 Deformatsioonid

Kasutuspiirseisundi kontrollimiseks on võrreldud SCIA-arvutustarkvarast saadud arvutuslike läbipainete suurusi Eurokood 5 rahvuslikus lisas toodud lubatavate läbipainete suurustega. Suurim läbipaine plaadis on saadud kasutuspiirseisundi normkombinatsiooniga. Plaadi läbipained on esitatud joonisel 3.16.

Määrav kombinatsioon:

SLS-Char (auto)/2 - 1\*Omakaal + 1\*lumekoormus + 1\*katusekihid + 0.60\*Tuul suruv



Joonis 3.16 CLT-plaadi läbipaine kasutuspiirseisundis.

Soovitavad puitkonstruktsioonide piirläbivajumised on esitatud Eurokoodeks 5 rahvuslikus lisas. Peakandjate lõplik lubatud netoläbipaine  $w_{net,fin} = l/300$ , mis 18 m sildeava korral on  $w_{net,fin} = 60$  mm. Antud konstruktsiooni korral on suurimaks läbipaindeks plaadi keskel  $u_z = 26,5$  mm < 60 mm, seega lubatavaid deformatsioone kasutuspiirseisundis ei ületata. [21]

### 3.13.2 Vibratsioonid

Antud konstruktsiooni puhul on tegemist katusekonstruktsiooniga ja vibratsioonide arvutusi pole käsitletud.

## 4 TERASVARRASTE DIMENSIONEERIMINE

### 4.1 Kandevõime arvutus tavaolukorras

Sprenglivarraste kandevõime arvutused on teostatud Eurokoodeks 3 põhjal [22] [23]. Tavaolukorras saab määravaks koormuskombinatsioon ULS-Set B(auto)/2 ( $1,35 \cdot \text{Omakaal} + 1,35 \cdot \text{Katusekihid} + 1,5 \cdot \text{lumekoormus} + 0,9 \cdot \text{Tuul suruv}$ ). Kandevõime arvutused on esitatud Lisa 2.

Tabel 4.1 Terasvarraste sisejõud kandepiiriseisundi koormuskombinatsiooni korral

Varda Nr	Terasprofiil	Materjal	Pikkus [m]	Surutud varras / tõmmatud varras	Pikijõud vardas [kN]	Varda kandevõime [kN]
1	CFCHS76.1x6	S 355	1,858	Surve	23,40	263,9
2	CFCHS76.1x6	S 355	4,905	Surve	19,30	61,1
3	CFCHS76.1x6	S 355	4,776	Tõmme	114,96	490,3
4	CFCHS76.1x6	S 355	9,00	Tõmme	251,35	490,3

### 4.2 Kandevõime tulekahju korral

Sprenglivarraste ristlõigete dimensioneerimisel sai määravaks erakordse arvutusolukorra kombinatsioon tulekahju korral ACC-tulekahju ( $1 \cdot \text{Omakaal} + 1 \cdot \text{katusekihid} + 0,2 \cdot \text{lumekoormus}$ ). Kandevõime arvutused on teostatud vastavalt Eurokood 3 osa 1-2 järgi [24]. Kandevõime arvutus tulekahju olukorras (R60) on esitatud lisa 2. Värvihihi paksus on valitud vastavalt ristlõike kasutusastmele tulekahju olukorras ja ristlõiketegurist.

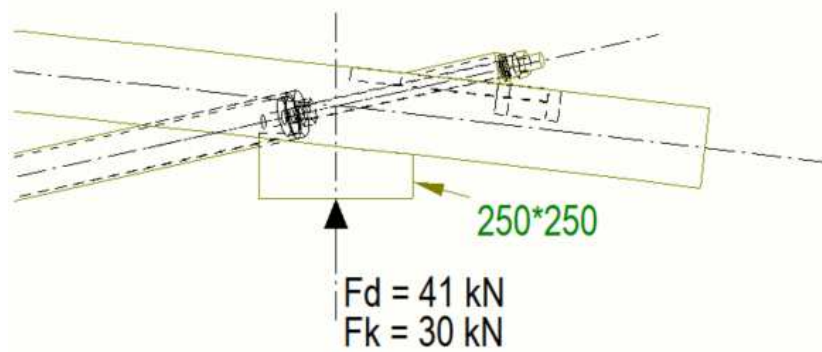
Tabel 4.2 Terasvarraste vajalik tulekaitsevärvi kihi paksus.

Varda Nr	Terasprofiil	Materjal	Pikkus [m]	Surutud varras / tõmmatud varras	Pikijõud vardas [kN]	Varda Kandevõime [kN]	Vajalik kaitsevärvi kihipaksus [mm]
1	CFCHS76.1x6	S 355	1,858	Surve	7,93	13,1	-
2	CFCHS76.1x6	S 355	4,905	Surve	6,69	3,4	1,16
3	CFCHS76.1x6	S 355	4,776	Tõmme	40,34	25,5	0,63
4	CFCHS76.1x6	S 355	9,00	Tõmme	88,16	25,5	0,87

## 5 SÕLMEDE DIMENSIONEERIMINE

### 5.1 Otsatõe sõlm

#### 5.1.1 Nihkekandevõime kontroll punkttoe kohal



Joonis 5.1 Otsatõe sõlme skemaatiline joonis

Nihkekandevõime tugevuskontrolliks on kasutatud arvutusmetoodikat vastavalt [25], kus on analüüsitud punktugesid plaadi nurgapiirkonnas ja keskel. Tugevustingimust kontrollitakse vastavalt valemile (2.33), kus maksimaalsed nihkepinged peavad jääma väiksemaks külgnihketugevusest. Sisejõudude ja pingete leidmiseks ristlõikes peavad olema täidetud tabelis 5.1 esitatud tingimused.

Tabel 5.1 Arvutusmetoodika kehtivuspiirid [25]

CLT plaadi paksus $d$	$0,10\text{m} < d < 0,22\text{m}$	$d = 0,13\text{m}$
Sildeavade suhe $l/b$	$1 < l/b < 3$	$l/b = 4,5/2,5 = 1,8$
Kihtide arv $n$	$5 < n < 11$	$n = 5$
Ruudukujuline tugi	$b_{A,x} = b_{A,y}$	$b_{A,x} = b_{A,y}$

Analüüsi tulemused [25] näitasid, et põikjõud punkttoe kohal sõltub põhiliselt ristkihtpuidu kihtide arvust ja plaadi paksuse ning sildeavade suhte võib jätta arvestamata. Põikjõud pikisuunas leitakse vastavalt valemitele (5.1) ja (5.2) ning ristisuunas vastavalt valemitele (5.3) ja (5.4).

Põikjõud x-telje suunas plaadi nurgapiirkonnas [25]:

$$V_{xz,d} = 0,67 \cdot n^{-0,1} \cdot F_d \quad (5.1)$$

Põikjõud x-telje suunas plaadi keskel [25]:

$$V_{xz,d} = 0,33 \cdot n^{-0,1} \cdot F_d \quad (5.2)$$

Põikjõud y-telje suunas plaadi nurgapiirkonnas [25]:

$$V_{yz,d} = F_d - V_{xz,d} \quad (5.3)$$

Põikjõud y-telje suunas plaadi keskel [25]:

$$V_{yz,d} = 0,5F_d - V_{xz,d} \quad (5.4)$$

Kus  $n$  – kihtide arv,

$F_d$  – arvutuslik toereaktsioon, kN.

Külgnihkepinge x-telje suunas [25]:

$$\tau_{R,xz} = \frac{V_{xz}/b_{ef,x}}{k_{R,x} \cdot (d_x + d_y)} \cdot k_A \quad (5.5)$$

Külgnihkepinge y-telje suunas [25]:

$$\tau_{R,yz} = \frac{V_{yz}/b_{ef,y}}{k_{R,y} \cdot (d_x + d_y)} \cdot k_A \quad (5.6)$$

Kus  $b_{ef,x}$  – toe efektiivne laius x-telje suunas (toe servast 35° kuni plaadi keskteljeni), mm,

$b_{ef,y}$  – toe efektiivne laius y-telje suunas (toe servast 35° kuni plaadi keskteljeni), mm,

$k_{R,x}$  ja  $k_{R,y}$  – kihtide arvust sõltuvad tegurid,

$k_A$  – toe laiuse ja plaadi paksuse suhtest sõltuv tegur.

Tabel 5.2 Teguri  $k_{R,x}$  ja  $k_{R,y}$  väärtused [25]

Kihtide arv n	5	7	9	11
$k_{R,x}$	2,00	2,50	3,33	3,89
$k_{R,y}$	1,00	2,00	2,50	3,33

Tabel 5.3 Teguri  $k_A$  väärtused [25]

Suhe $b_{A,x}/d$ või $b_{A,y}/d$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	$\leq 2,0$
Punktugi nurgapiirkonnas, $k_A =$	1,35	1,50	1,65
Punktugi keskel, $k_A =$	1,0		

Kuna otsatugi ei asu täpselt nurgas ega ka keskel, siis kasutan väärtust  $k_A = 1,5$ .



### Nihkepingete kontroll:

Arvutuslik toereaktsioon	$F_d = 41 \text{ kN}$
Plaadi paksus	$d = 130 \text{ mm}$
Toe laius x- telje suunas	$b_{A,x} = 250 \text{ mm}$
Toe laius y- telje suunas	$b_{A,y} = 250 \text{ mm}$
Efektiivne toe laius x telje suunas	$b_{ef,x} = 250 \cdot 130 \cdot \tan(35) = 341 \text{ mm}$
Efektiivne toe laius y telje suunas	$b_{ef,y} = 250 \cdot 130 \cdot \tan(35) = 341 \text{ mm}$
Lamellide paksus x-telje suunas	$d_x = 30 \text{ mm}$
Lamellide paksus y-telje suunas	$d_y = 20 \text{ mm}$

Põikjõud x-telje suunas vastavalt valemile (5.1):

$$V_{xz,d} = 0,67 \cdot n^{-0,1} \cdot F_d = 0,67 \cdot 5^{-0,1} \cdot 41 = 23,4 \text{ kN}$$

Põikjõud y-telje suunas vastavalt valemile (5.3):

$$V_{yz,d} = F_d - V_{xz,d} = 41 - 23,4 = 17,6 \text{ kN}$$

Külgnihkepinge x-telje suunas vastavalt valemile (5.5):

$$\tau_{R,xz} = \frac{V_{xz}}{k_{R,x} \cdot (d_x + d_y)} \cdot k_A = \frac{23,4 \cdot 10^3}{2,0 \cdot (30 + 20)} \cdot 1,50 = 1,03 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Külgnihkepinge y-telje suunas vastavalt valemile (5.6):

$$\tau_{R,yz} = \frac{V_{yz}}{k_{R,y} \cdot (d_x + d_y)} \cdot k_A = \frac{17,6 \cdot 10^3}{1,0 \cdot (30 + 20)} \cdot 1,50 = 1,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Arvutuslik külgnihkekandevõime

$$f_{r,CLT,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{r,CLT,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{1,25}{1,25} = 0,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

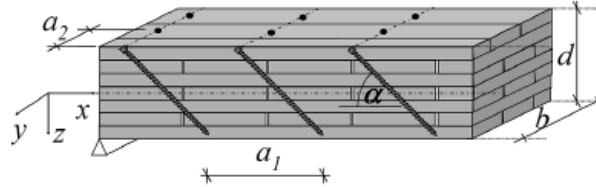
Külgnihke kandevõime pole x- ja y-telje suunas tagatud, seega tuleb plaati armeerida isepuurivate täiskeermekruvidega.

### 5.1.2 Plaadi armeerimine täiskeermekruvidega

Juhised ristkihtpuidust paneeli armeerimiseks täiskeermekruvidega annab [25]. Armeeritud elemendi kandevõime koosneb külgnihke kandevõimest ja kruvide kandevõimest. Katsed [25] põhjal näitavad, et hoolimata CLT-elementi väikesest nihkedeformatsioonist aktiveeruvad kruvid koormates koheselt tööle tõmbele. Kuna kruvid hakkavad tööle tõmbele avaldavad nad survet risti nihketasandiga ja see omab positiivset mõju külgnihkekandevõimele. Armeeritud elemendi normatiivne külgnihke kandevõime  $\bar{f}_{R,k}$  leitakse vastavalt valemile (5.7). [25]

Arvutusmetoodika kehtimiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused [25]:

- Ristlõige peab olema sümmeetriline
- Kruvide kaldenurk on  $45^\circ$
- Kruvide paigutus vastavalt Joonis 5.2.



Joonis 5.2 Kruvide paigutuse piirid [25]

Kus

$$\begin{aligned} d/3 &\leq a_1 \leq d \\ d/3 &\leq a_2 \leq 1,5d \\ \alpha &= 45^\circ \end{aligned}$$

$$\bar{f}_{R,k} = k_{R,90} \cdot f_{R,k} + \frac{R_{ax,k}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} \quad (5.7)$$

Kus  $\bar{f}_{R,k}$  – normatiivne külgnihke kandevõime, N/mm<sup>2</sup>,  
 $k_{R,90}$  – parameeter mis arvestab survepinge mõju risti nihketasandiga,  
 $f_{R,k}$  – Normatiivne külgnihke kandevõime, N/mm<sup>2</sup>,  
 $R_{ax,k}$  – kruvi normatiivne tõmbekandevõime, N,  
 $a_{2,ef}$  – efektiivne kaugus kruvide vahel risti vaadeldava suunaga, mm  
 $a_1$  – kaugus kruvide vahel vaadeldavas suunas, mm.

Surve ristikiudu  $\sigma_{c,90}$  võetakse arvesse teguriga  $k_{R,90}$ , mis leitakse kruvi vertikaalse jõukomponendi, kruvidevaheliste kauguste ning normatiivse survepinge summa järgi.

$$k_{R,90} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,35 \cdot \sigma_{c,90} \\ 1,20 \end{array} \right. \quad (5.8)$$

$$\sigma_{c,90} = \frac{F_k}{b_{ef,x} \cdot b_{ef,y}} + \frac{R_{ax,k}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} \quad (5.9)$$

$$a_{2,ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} a_2 \\ b_{ef,x}/n_i \end{array} \right. \quad (5.10)$$

Kus  $n_i$  - kruviridade arv risti vaadeldava suunaga.  
 $F_k$  – normatiivne toereaktsioon, N,  
 $a_2$  – kaugus kruvide vahel risti vaadeldava suunaga, mm

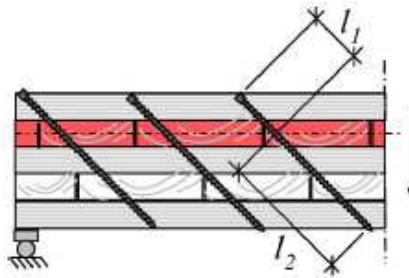
Kruvi teljesuunaline kandevõime  $R_{ax,k}$  leitakse vastavalt [25] valemiga (5.11) .

$$R_{ax,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 24,8 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9} \\ R_{t,u,k} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

Kus kruvi väljatõmbe normkandevõime  $R_{t,u,k}$  leitakse vastavalt [26] valemiga (5.12).

$$R_{t,u,k} = f_{ax,k,90} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (5.12)$$

Kus  $f_{ax,k,90}$  – normatiivne väljatõmbe parameeter, mis määratakse vastavalt [27], arvestades vastava puidu tihedusega  $\rho_a$ , N/mm<sup>2</sup>,  
 $l_{ef}$  – kruvi efektiivne süvistussügavus, mm,  
 $\rho_k$  – puitelemendi normtihedus, kg/m<sup>3</sup>,  
 $d$  – kruvi läbimõõt, mm.



Joonis 5.3 Kruvi efektiivse süvistussügavuse määramine, kus punasega on tähistatud külgnihke kandevõime seisukohalt määrav kiht [25]

$$l_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} l_1 \\ l_2 \end{array} \right. \quad (5.13)$$

#### Plaadi armeerimine täiskeermekruvidega x-telje suunas.

Valin:  $a_1 = 100 \text{ mm}; a_2 = 100 \text{ mm}; n_x = 3$

Valitud kruvid - SFS WT-T-6,5x160 [28]

Kruvi pikkus	$L = 160 \text{ mm}$
Keerme pikkus kruvi otsas	$S_g = 65 \text{ mm}$
Keerme pikkus kruvi pea juures	$S_{spann} = 65 \text{ mm}$
Kruvi läbimõõt	$d = 6,5 \text{ mm}$
Normatiivne väljatõmbe parameeter ( $\rho_a = 350 \text{ kg/m}^3$ )	$f_{ax,k,90} = 12,9 \text{ N/mm}^2$

Kruvi efektiivse süvistussügavuse määramine:

$$l_1 = \frac{160}{2} - \frac{\frac{20}{2} + \frac{30}{2}}{\sin(45)} = 44,6 \text{ mm}$$

$$l_2 = 65 \text{ mm}$$

$$l_{ef} = 44,6 \text{ mm}$$

Kruvi teljesuunaline kandevõime  $R_{ax,k}$  vastavalt valemile (5.11):

$$R_{ax,k} = \min \begin{cases} 24,8 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9} \\ R_{t,u,k} \end{cases} \Rightarrow R_{ax,k} = 3,4 \text{ kN}$$

$$R_{ax,k1} = 24,8 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9} = 24,8 \cdot 6,5^{0,8} \cdot 44,6^{0,9} / 1000 = 3,4 \text{ kN}$$

Kruvi normatiivne tõmbekandevõime valemiga (5.12):

$$R_{t,u,k} = f_{ax,k,90} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8} = 12,9 \cdot 6,5 \cdot 44,6 \cdot \left(\frac{350}{350}\right)^{0,8} / 1000 = 3,7 \text{ kN}$$

Surve ristikiudu  $\sigma_{c,90}$  vastavalt valemile (5.9):

$$\sigma_{c,90} = \frac{F_k}{b_{ef,x} \cdot b_{ef,y}} + \frac{R_{ax,k}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} = \frac{30 \cdot 10^3}{341 \cdot 341} + \frac{3,4 \cdot 10^3/\sqrt{2}}{100 \cdot 114} = 0,47 \frac{N}{mm^2}$$

$$a_{2,ef} = \max \begin{cases} a_2 = 100 \text{ mm} \\ \frac{b_{ef,x}}{n_s} = \frac{341}{3} = 114 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow a_{2,ef} = 114 \text{ mm}$$

Pingejaotustegur  $k_{R,90}$  vastavalt valemile (5.8):

$$k_{R,90} = \min \begin{cases} 1 + 0,35 \cdot \sigma_{c,90} \\ 1,20 \end{cases} = 1,16 \Rightarrow k_{R,90} = 1,16$$

Normatiivne külgnihke kandevõime  $\bar{f}_{R,k}$  vastavalt valemile (5.7):

$$\bar{f}_{R,k} = k_{R,90} \cdot f_{R,k} + \frac{R_{ax,k}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} = 1,16 \cdot 1,25 + \frac{3,4 \cdot 10^3}{100 \cdot 114} = 1,67 \text{ N/mm}^2$$

Arvutuslik külgnihke kandevõime  $\bar{f}_{R,d}$ :

$$\bar{f}_{R,d} = k_{mod} \cdot \frac{\bar{f}_{R,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{1,67}{1,25} = 1,07 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{R,xz} = 1,03 \frac{N}{mm^2} < \bar{f}_{R,d} = 1,07 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on täidetud.

**Plaadi armeerimine täiskeermekruvidega y-telje suunas.**

Valin:  $a_1 = 50 \text{ mm}; a_2 = 75 \text{ mm}; n_1 = 5$

Kruvi efektiivse süvistussügavuse määramine:

$$l_{ef} = l_1 = l_2 = 65 \text{ mm}$$

Kruvi teljesuunaline kandevõime  $R_{ay,k}$  vastavalt valemile (5.11):

$$R_{ay,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 24,8 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9} \\ R_{t,u,k} \end{array} \right. \min \implies R_{ay,k} = 4,7 \text{ kN}$$

$$R_{ay,k1} = 24,8 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9} = 24,8 \cdot 6,5^{0,8} \cdot 65^{0,9} / 1000 = 4,7 \text{ kN}$$

Kruvi normatiivne tõmbekandevõime valemiga (5.12):

$$R_{t,u,k} = f_{ax,k,90} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} = 12,9 \cdot 6,5 \cdot 65 \cdot \left( \frac{350}{350} \right)^{0,8} / 1000 = 5,5 \text{ kN}$$

Surve ristikiudu  $\sigma_{c,90}$  vastavalt valemile (5.9):

$$\sigma_{c,90} = \frac{F_k}{b_{ef,x} \cdot b_{ef,y}} + \frac{R_{ay,k} / \sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} = \frac{30 \cdot 10^3}{341 \cdot 341} + \frac{4,7 \cdot 10^3 / \sqrt{2}}{50 \cdot 75} = 1,29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$a_{2,ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} a_2 = 75 \text{ mm} \\ \frac{b_{ef,x}}{n_1} = \frac{341}{5} = 68,2 \text{ mm} \end{array} \right. \xrightarrow{\max} a_{2,ef} = 75 \text{ mm}$$

Pingejaotustegur  $k_{R,90}$  vastavalt valemile (5.8):

$$k_{R,90} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,35 \cdot \sigma_{c,90} = 1,29 \\ 1,20 \end{array} \right. \min \implies k_{R,90} = 1,20$$

Normatiivne külgnihke kandevõime  $\bar{f}_{R,k}$  vastavalt valemile (5.7):

$$\bar{f}_{R,k} = k_{R,90} \cdot f_{R,k} + \frac{R_{ax,k}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} = 1,20 \cdot 1,25 + \frac{4,7 \cdot 10^3}{50 \cdot 75} = 2,53 \text{ N/mm}^2$$

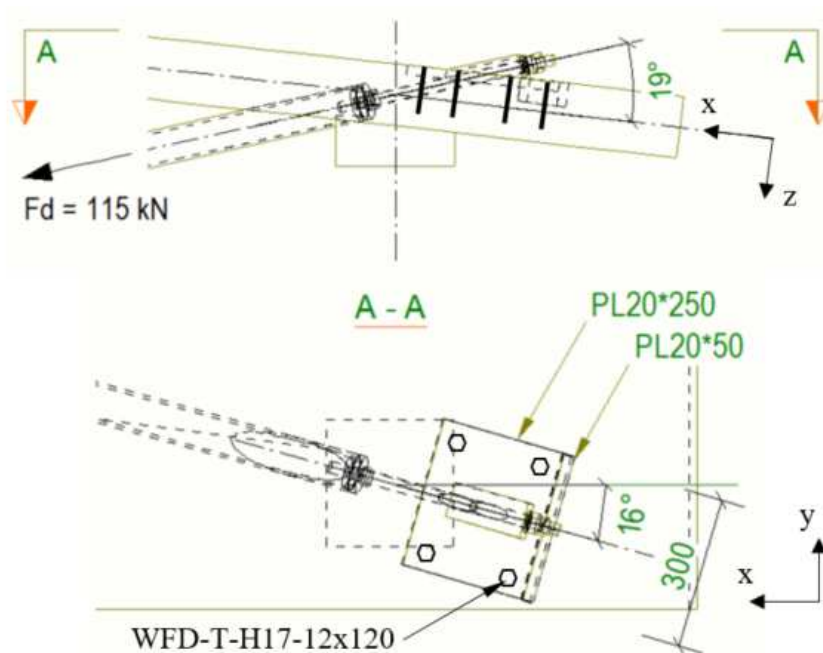
Arvutuslik külgnihke kandevõime  $\bar{f}_{R,d}$ :

$$\bar{f}_{R,d} = k_{mod} \cdot \frac{\bar{f}_{R,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{2,53}{1,25} = 1,62 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{R,yz} = 1,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \bar{f}_{R,d} = 1,62 \text{ N/mm}^2$$

Tugevustingimus on mõlemas suunas täidetud. Kruvid lisatakse ulatuses, kus kandevõime on ületatud (x-telje suunas toest 500 mm ulatuses, y-telje suunas 600 mm ulatuses).

## 5.2 Ankurdusplaadi kinnitussõlm



Joonis 5.4 Ankurdusplaadi kinnitussõlme skemaatiline joonis

Plaadi telgedesuunalised komponendid tõmbejõust vardas:

$$F_d = 115 \text{ kN}$$

$$F_{x,Ed} = 115 \cdot \cos(19) \cdot \cos(16) = 104,5 \text{ kN}$$

$$F_{y,Ed} = 115 \cdot \cos(19) \cdot \sin(16) = 30,0 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = 115 \cdot \cos(16) \cdot \sin(19) = 36,0 \text{ kN}$$

### 5.2.1 Muljumiskandevõime z-telje suunas

Kandevõime kontroll survele risti plaadi tasandiga teostatakse vastavalt valemitele (2.26) ja (2.27).

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{F_{z,Ed}}{A_{c,90}} = \frac{36 \cdot 10^3}{300 \cdot 250} = 0,48 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = 0,48 < k_{c,90,CLT} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M} = 1,3 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,85}{1,25} = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

Kandevõime on tagatud.

### 5.2.2 Survekandevõime x-telje suunas

Plaadi töötav kõrgus on 30 mm. Survekandevõime kontroll x-telje suunas vastavalt valemile (2.19):

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} = \frac{104,5 \cdot 10^3}{300 \cdot \cos(16) \cdot 30 \cdot 0,8 \cdot \frac{24}{1,25}} = 0,79 < 1,0$$

Kandevõime on tagatud.

### 5.2.3 Muljumiskandevõime y-telje suunas

Kandevõime kontroll y-telje suunas teostatakse vastavalt valemitele (2.26) ja (2.27).

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{F_{y,Ed}}{A_{c,90}} = \frac{30 \cdot 10^3}{250 \cdot \cos(16) \cdot 20} = 6,24 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = 6,24 > k_{c,90,CLT} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M} = 1,8 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,85}{1,25} = 3,3 \text{ N/mm}^2$$

Kandevõime ei ole tagatud, lisan kandevõime tagamiseks terasplaadi nurkadesse poldid WFD-T-H17-12x120.

Poltide andmed [29] [30]:

Poldi läbimõõt	$d = 12 \text{ mm}$
Poltide arv liites	$n = 4$
Poldi tõmbetugevus	$f_u = 900 \text{ N/mm}^2$
CLT paksus liite kohal	$t_1 = 100 \text{ mm}$
CLT plaadi normtihedus	$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

Kuna terasplaadi paksus  $t = 20\text{mm} > 0,5d = 6\text{mm}$ , on tegemist paksu terasplaadiga ja liite kandevõime kontroll vastavalt [31] tehakse valemiga (5.14).

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,a,k} t_1 d & (c) \\ f_{h,k} t_1 d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,a,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,a,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \end{cases} \quad (5.14)$$

Kus  $M_{y,Rk}$  – kinnituselemendi voolupiirile vastava momendi normväärtus [31],  
 $f_{h,a,k}$  – poltide normatiivne muljumistugevus,  $\text{N/mm}^2$ .

Naagelliite normatiivne muljumistugevus leitakse [32] põhjal CLT's vastavalt valemile (5.15):

$$f_{h,k} = \frac{0,031(1 - 0,015 \cdot d) \cdot \rho_k^{1,16}}{1,1 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (5.15)$$

Kus  $\alpha$  – nurk liitele mõjuva jõu ja väliskihi kiudude suuna vahel.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} \quad (5.16)$$

Kinnituselemendi voolupiirile vastava momendi normväärtus vastavalt valemile (5.16):

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot 900 \cdot 12^{2,6} = 172677,2$$

Poldi normatiivne muljumiskandevõime vastavalt valemile (5.15):

$$f_{h,k} = \frac{0,031(1 - 0,015 \cdot 12) \cdot 350^{1,16}}{1,1 \sin^2 90 + \cos^2 90} = 20,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ühe poldi kandevõime vastavalt valemile (5.14):

$$c) f_{h,k} t_1 d = 20,6 \cdot 100 \cdot 12 = 24779 \text{ N} = 24,8 \text{ kN}$$

$$d) f_{h,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] = 20,6 \cdot 100 \cdot \frac{12 \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 172677,2}{20,6 \cdot 12 \cdot 100^2}} - 1 \right]}{1000} = 12,6 \text{ kN}$$

$$e) 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} = \frac{2,3 \sqrt{172677,2 \cdot 20,6 \cdot 12}}{1000} = 15,05 \text{ kN}$$

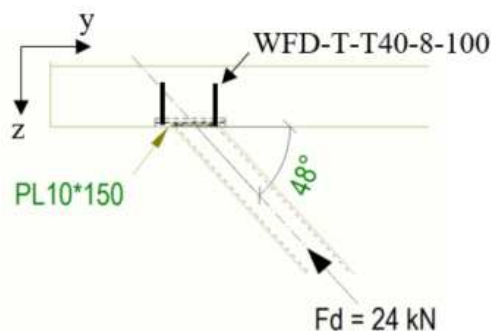
$$F_{v,Rk,1} = 12,6 \text{ kN}$$

Liite normatiivne kandevõime

$$F_{v,Rd} = 0,8 \cdot \frac{4 \cdot 12,6}{1,25} = 32,3 \text{ kN} > F_{y,Ed} = 30 \text{ kN}$$

Kandevõime on tagatud.

### 5.3 Vahetoe sõlm



Joonis 5.5 Vahetoe sõlme skemaatiline joonis

Telgedesuunalised komponendid survejõust vardas:

$$F_{y,Ed} = 24 \cdot \sin(48) = 17,8 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = 24 \cdot \cos(48) = 16,1 \text{ kN}$$

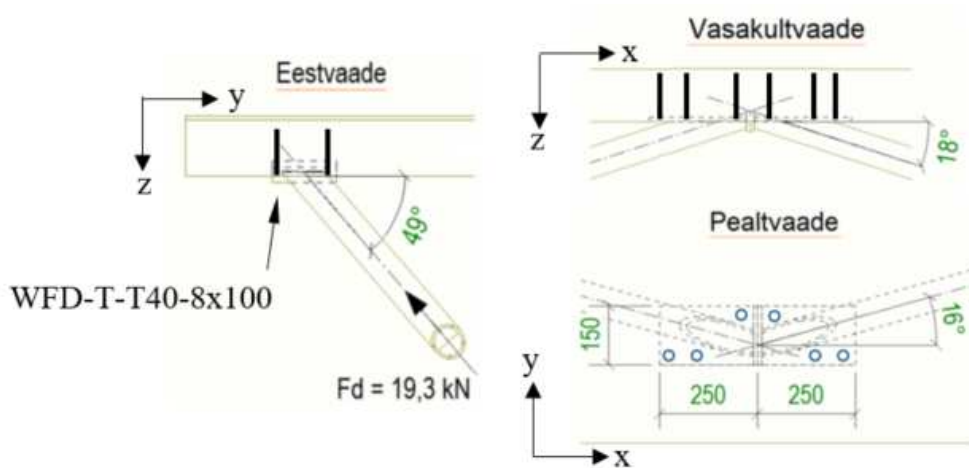
Sarnaselt punktile 5.1.1 on teostatud nihkekandevõime kontroll punkttoe kohal.

Külgnihkepinge x-telje suunas  $\tau_{R,xz} = 0,31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja y-telje suunas  $\tau_{R,yz} = 0,49 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  on väiksemad külgnihke kandevõimest  $f_{r,CLT,d} = 0,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , seega külgnihkekandevõime on tagatud. Ka z-telje suunaline pinge toeplaadi kohal  $\sigma_{c,90,CLT,d} = 0,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  on väiksem kui lubatav pinge  $\sigma_{c,90,CLT,Rd} = 2,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ( $k_{c,90,CLT} = 1,5$ ). Telje y suunas mõjuva jõukomponendi vastuvõtmiseks on lisatud plaadi nurkadesse kruvid SFS WFD-T-T40-8-100 [29] [30]. Tegemist on ühelõikelise liitega ja paksu



terasplaadiga. Põiksuunas koormatud kruvide mille läbimõõt on suurem kui 6 mm arvutus teostatakse vastavalt poltliite juhistele [31]. Arvutus on teostatud sarnaselt punktile 5.2.3. Kruviliite arvutuslik kandevõime  $F_{v,Rd} = 19,2 \text{ kN}$ , seega liite kandevõime on tagatud.

## 5.4 Keskmise toe sõlm



Joonis 5.6 Keskmise toe sõlme skemaatiline joonis

Telgedesuunalised komponendid survejõust vardas:

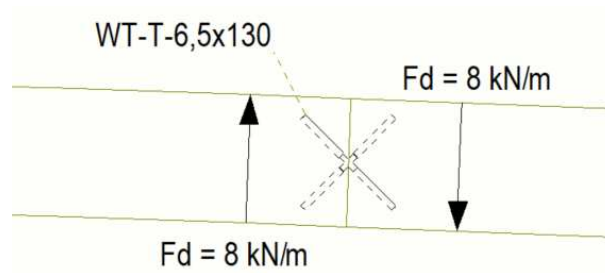
$$F_{x,Ed} = 19,3 \cdot \cos(18) \cdot \cos(16) = 17,6 \text{ kN}$$

$$F_{y,Ed} = 19,3 \cdot \cos(49) \cdot \sin(16) = 3,5 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = 19,3 \cdot \sin(49) \cdot \sin(18) = 4,5 \text{ kN}$$

Sarnaselt punktile 5.1.1 on teostatud nihkekandevõime kontroll punkttoe kohal. Külgnihkepinge x-telje suunas  $\tau_{R,xz} = 0,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja y-telje suunas  $\tau_{R,yz} = 0,12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  on väiksemad külgnihke kandevõimest  $f_{r,CLT,d} = 0,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ . Telje z suunaline pinge toeplaadi kohal  $\sigma_{c,90,CLT,d} = 0,12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , on väiksem kui lubatav pinge  $\sigma_{c,90,CLT,Rd} = 3,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ . Muljumiskandevõime y-telje suunas on leitud sarnaselt punktile 5.2.3. Muljumiskandevõime  $f_{c,90,CLT,d} = 2,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ( $k_{c,90,CLT} = 1,5$ ) on suurem kui muljumispinge  $\sigma_{c,90,CLT,d} = 1,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , seega kandevõime on tagatud tagatud. Siiski on lisatud plaadi nurkadesse fikseerimiseks kruvid SFS WFD-T-T40-8x100.

## 5.5 CLT-plaadi jätkusõlm



Joonis 5.7 Skemaatiline joonis CLT-plaadi jätkusõlmest

Vaadates liite vasakut poolt on ülemine kruvi tõmmatud ja alumine surutud. Teljesuunalised komponendid on  $F_c = F_t = 0,5 \cdot \frac{8}{\sin(45)} = 5,7 \frac{kN}{m}$ .

Kruvi andmed [28] järgi:

Kruvi pikkus	$L = 130 \text{ mm}$
Keermestatud osade pikkused kruvi otstes	$S_{spann/G} = 55 \text{ mm}$
Keerme välisläbimõõt	$d = 6,5 \text{ mm}$
Keerme siseläbimõõt	$d_1 = 4 \text{ mm}$
Normatiivne väljatõmbe parameeter	$f_{ax,k,90} = 12,9 \text{ N/mm}^2$
Normatiivne tõmbetugevus	$f_{tens,k} = 14,4 \text{ kN}$
Normatiivne voolepiir	$f_{y,k} = 990 \text{ N/mm}^2$

### 5.5.1 Kruvi tõmbekandevõime

Kruvi väljatõmbe normkandevõime leitakse [26] järgi vastavalt valemile (5.12):

$$F_{ax,a,k} = f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8} = 12,9 \cdot 6,5 \cdot 55 \cdot \left(\frac{350}{350}\right)^{0,8} = 4,61 \cdot 10^3 \text{ N} = 4,61 \text{ kN}$$

Kus [28] järgi kruvi kaldenurga 45 kraadi korral  $f_{ax,k} = k_{ax} \cdot f_{ax,k,90} = f_{ax,k,90}$

Kruvi arvutuslik tõmbekandevõime:

$$F_{ax,a,d} = 0,8 \cdot \frac{4,61}{1,25} = 2,95 \text{ kN}$$

Kruvi arvutuslik tõmbetugevus:

$$f_{tens,d} = 0,8 \cdot \frac{14,4}{1,25} = 9,2 \text{ kN}$$

## 5.5.2 Kruvi survekandevõime

Survekandevõime leitakse [28] põhjal valemiga (5.17).

$$F_{c,a,Rd} = \min\{F_{ax,a,d}; F_{ki,d}\} \quad (5.17)$$

Kus  $F_{ki,d}$  – kruvi arvutuslik nõtkekandevõime, N.

$$F_{ki,d} = \frac{F_{ki,k}}{\gamma_M} = \frac{\chi \cdot N_{pl,k}}{\gamma_M} \quad (5.18)$$

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 + \bar{\lambda}^2}} \quad (5.19)$$

$$\varphi = 0,5[1 + 0,49(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (5.20)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,k}}{N_{ki,k}}} \quad (5.21)$$

$$N_{pl,k} = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot f_{y,k} \quad (5.22)$$

$$N_{ki,k} = \sqrt{c_h \cdot E_s \cdot I_s} \quad (5.23)$$

$$c_h = (0,19 + 0,12 \cdot d_1) \cdot \rho_k \cdot \left(\frac{90 + \alpha}{180}\right) \quad (5.24)$$

$$I_s = \pi \cdot \frac{d_1^4}{64} \quad (5.25)$$

Kus  $\chi$  – Nõtketegur

$N_{pl,k}$  – Survekandevõime, N,

$\bar{\lambda}$  – tingsaledus,

$\varphi$  – abisuurus,

$c_h$  - kruvi elastset keskkonda arvestav tegur

$N_{ki,k}$  – elastne nõtkekandevõime, N.

**Survekandevõime arvutus:**

$$c_h = (0,19 + 0,12 \cdot 4) \cdot 350 \cdot \left(\frac{90 + 45}{180}\right) = 62,48 \frac{N}{mm^2}$$

$$N_{ki,k} = \sqrt{62,48 \cdot 210000 \cdot \pi \cdot \frac{4^4}{64}} = 12840 \text{ N}$$

$$N_{pl,k} = \pi \cdot \frac{4^2}{4} \cdot 990 = 12441 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{12441}{12840}} = 0,98$$

$$\varphi = 0,5[1 + 0,49(0,98 - 0,2) + 0,98^2] = 1,18$$

$$\chi = \frac{1}{1,18 + \sqrt{1,18^2 + 0,98^2}} = 0,55$$

$$F_{ki,d} = \frac{0,55 \cdot 12441}{1,1} = 6,2 \cdot 10^3 N = 6,2 kN$$

$$F_{c,a,Rd} = \min\{2,95; 6,2\} = 2,95 kN$$

Ühe krurvipaari arvutuslik kandevõime:

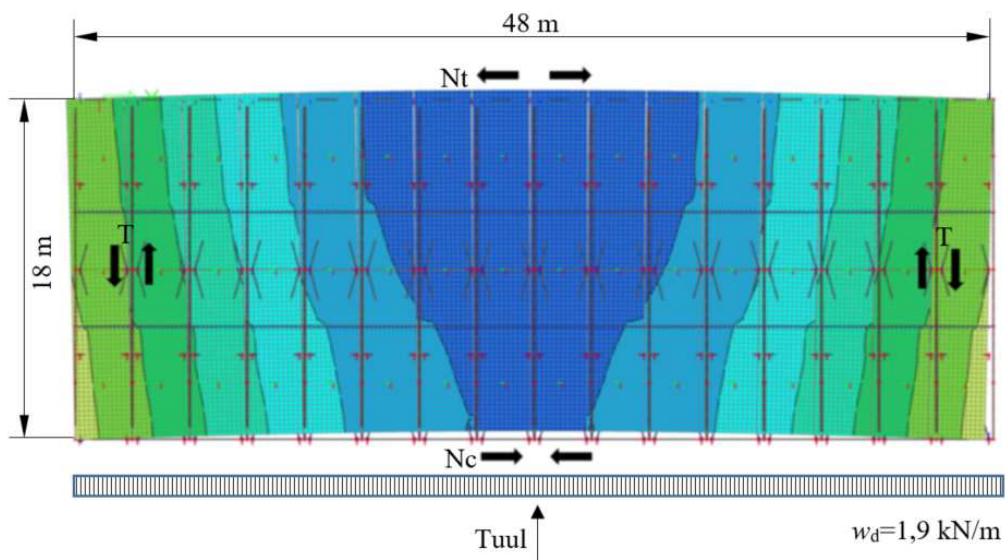
$$F_{Rd} = (F_{ax,a,d} + F_{c,a,Rd}) \cdot \sin 45 = (2,95 + 2,95) \cdot \sin 45 = 4,2 kN$$

Valin krurvipaaride sammuks 300 mm seega liite kandevõime meetri kohta on:

$$F_{Rd} = \frac{1000}{300} \cdot 4,2 = 13,9 \frac{kN}{m} > F_d = 8 \frac{kN}{m}$$

## 5.6 Nihkeliide plaadi tasandis

Tuulekoormus seinale tekitab katuse tasandis alloleval joonisel toodud deformatsioonipildi. Tuulepoolsel küljel tekivad Konstruktsioonelementide vahel survejõud ja tuulealusel küljel tõmbejõud. Risti tuule mõjumise suunaga tekivad konstruktsioonelementide vahel põikjõud. Katuseelemendid ühendatakse omavahel külgepidi kolme CLT-paneeli sissefreesitud terasplaadiga (otstes ja keskel).



Joonis 5.8 Tuulekoormusest põhjustatud sisejõud katuse tasandis

Maksimaalne tõmbejõud otsapiirkonnas  $N_{y,1,Ed} = 47 kN$  ja plaadi keskel  $N_{y,2,Ed} = 9 kN$ .

Maksimaalne põikjõud otsapiirkonnas  $N_{xy,1,Ed} = 21 kN$  ja plaadi keskel  $N_{xy,2,Ed} = 11 kN$ .

Igasuguse paksusega terasplaadist keskelemendiga kahelõikelist liidet arvutatakse [31] põhjal valemiga (5.26).

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,a,k} t_1 d & (f) \\ f_{h,a,k} t_1 d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,a,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,a,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{cases} \quad (5.26)$$

### 5.6.1 Liite kandevõime otsapiirkonnas

Liites on kasutatud puurnaagleid WS-T-7x113 3x4 tk ja 6mm sissefreesitud terasplaati.

Naagli andmed [33]:

Naagli läbimõõt	$d = 7 \text{ mm}$
Naagli tõmbetugevus	$f_u = 550 \text{ N/mm}^2$
CLT paksus liite kohal	$t_1 = 53,5 \text{ mm}$
CLT plaadi normtihedus	$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

#### Liite kandevõime y-telje suunas

Kinnituselemendi voluupiirile vastava momendi normväärtus vastavalt valemile (5.16):

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot 550 \cdot 7^{2,6} = 25986$$

Normatiivne muljumistugevus ristikiudu vastavalt valemile (5.15):

$$f_{h,k} = \frac{0,031(1 - 0,015 \cdot 7) \cdot 350^{1,16}}{1,1 \sin^2 90 + \cos^2 90} = 22,54 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ühe lõike kandevõime vastavalt valemile (5.26):

$$f) f_{h,k} t_1 d = 22,5 \cdot 53,5 \cdot 7 = 8440 \text{ N} = 8,4 \text{ kN}$$

$$g) f_{h,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] = 22,5 \cdot 53,3 \cdot 7 \cdot \frac{\left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot 25986}{22,5 \cdot 7 \cdot 53,5^2}} - 1 \right]}{1000} = 4,2 \text{ kN}$$

$$h) 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} = \frac{2,3 \sqrt{25986 \cdot 22,5 \cdot 7}}{1000} = 4,7 \text{ kN}$$

Liite arvutuslik kandevõime:

$$F_{v,Rd} = 0,8 \cdot \frac{12 \cdot 4,2}{1,25} \cdot 2 = 64,0 \text{ kN} > F_{y,Ed} = 47 \text{ kN}$$

#### Liite kandevõime x-telje suunas

Sarnaselt eelneva punktiga on leitud liite kandevõime x-telje suunas valemiga (5.26). Liite arvutuslik

kandevõime x-telje suunas on  $F_{v,Rd} = 69,4 \text{ kN} > N_{xy,1,Ed} = 21 \text{ kN}$ .

## 5.6.2 Liite kandevõime plaadi keskel

Liites on kasutatud puurnaagleid WS-T-5x113 1x4 tk ja 6mm sissefreesitud terasplaati.

Naagli andmed [33]:

Naagli läbimõõt  $d = 5 \text{ mm}$

Naagli tõmbetugevus  $f_u = 800 \text{ N/mm}^2$

CLT paksus liite kohal  $t_1 = 53,5 \text{ mm}$

CLT plaadi normtihedus  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

### Liite kandevõime y-telje suunas

Sarnaselt punktile 5.6.1 on arvutatud liite kandevõime plaadi keskel.

$$F_{v,Rd} = 15,3 \text{ kN} > N_{y,2,Ed} = 9 \text{ kN}$$

### Liite kandevõime x-telje suunas

Sarnaselt punktile 5.6.1 on arvutatud liite kandevõime plaadi keskel.

$$F_{v,Rd} = 16,6 \text{ kN} > N_{xy,2,Ed} = 11 \text{ kN}$$

## 5.6.3 Naaglite vahekaugused

Terasplaadi paksus nihkeliites on valitud 6mm. Naaglite vahekaugused on valitud vastavalt [31] piki- ja ristisuunas on  $a_1 = a_2 = 50 \text{ mm}$  ning esimese naagli kaugus CLT-plaadi servast  $a_3 = 80 \text{ mm}$ .

## 5.7 Terassõlmed

Terassõlmede arvutused on esitatud lisas 2.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö raames on projekteeritud Tartusse kavandatava laohoone 18-meetrise sildeavaga katuse kandekonstruktsioon. Kandekonstruktsioonina on kasutatud kombineeritud süsteemi, kus kumerat ristkihtliimpuidust plaati on toetatud terasest sprengelvarrastega. Töö käigus on tehtud vajalikud arvutused ja projekteerimise tulemusena on saadud ruumiline konstruktsioonelement, mille laius on 3 m, tõmbevarda teljest plaadi teljeni on 1,5 m ja sille 18 m.

Ristkihtliimpuidust plaadi paksuseks on kandevõime arvutuste tulemusena valitud 130 mm (30/20/30/20/30 mm). CLT-paneelis kasutatud lamellide tugevusklassiks on T14, mis annab paneeli tugevusklassiks CL24h. Kuna ristkihtliimpuidust plaat on toetatud punktitudedele, siis esinevad tugevade kohal suured põikjõud. Külgnihkekandevõime tagamiseks otsatugede kohal on plaati armeeritud otsatugede ümber isepuurivate täiskeermekruvidega SFS WT-T-6,5x160. Maksimaalne CLT-plaadi pikkus mida toodetakse on 15 m, seega on plaat valmistatud kolmest umbes 6 m pikkusest plaadist, mis omavahel kinnitatud isepuurivate täiskeermekruvidega SFS WT-T-6,5x130. Sprengli tõmbevardad on kinnitatud plaadi külge läbi terasest ankruplaadi. Survevardad on fikseeritud plaadi külge kruvidega SFS WFD-T-T40-8x100. Projekteeritud ruumiline element monteeritakse montaažitugedel kokku ja tõstetakse seejärel paika. Elemendid kinnitatakse omavahel külgepidi sissefreesitud 6 mm paksuste terasplaatide ja puurnaaglitega SFS WS-T-7x113 ja WS-T-5x113.

Sprenglivarrastena on kasutatud terasest S355 valmistatud ümartorusid CFCHS 76.1x6. Sprenglivardad jagunevad kahte koostu. Esimesse koostu (TS1) kuuluvad survevardad ning tõmbevardad, mis kinnituvad ankruplaadi külge. Nimetatud vardad keevitatakse nende telgede lõikepunkti läbiva hülsi (CFCHS 88.9x6) külge. Teise koostu (TS2) kuulub alumine tõmbevarras. Koostud TS1 ja TS2 kinnitatakse omavahel keermearvaga M30 8.8. Koostu TS1 tõmbevardad kinnitatakse CLT-plaadi külge läbi ankruplaadi keermearvaga M24 8.8 ja survevardad läbi toepaadi kruvidega SFS WFD-T-T40-8x100.

Lõputöös projekteeritud konstruktsioon vastab tulepüsivusklassile R60. CLT-plaadi kandevõime tagamiseks 60-minutilise tulekahju korral on vaja otsatugede vahelist ala plaadi ristisuunas kaitsta 26mm paksuse puuidust kaitsekihiga. Terasvarraste kandevõime tagamiseks on vaja pikemad survevardad ja tõmbevardad katta tulekaitsevärvi.

Käesoleva töö edasiarendusena on võimalik uurida töös käsitletud sõlmede kandevõimet ja käitumist tulekahju korral või võrrelda vaadeldavat konstruktsiooni teiste võimalike lahendustega. Kuna tegemist ei ole kuigi tavapärase konstruktsiooniga oleks hea läbi viia katsed projekteeritud konstruktsioonelemendi kandevõime kontrollimiseks.



## SUMMARY

In this Master's thesis the bearing structure of the warehouse roof with 18-meter span planned in Tartu has been designed. Combined structure is used as load bearing structure, in which the curved CLT-panel is supported by steel rods. The necessary calculations have been made during this work and as a result, a 3D structure with a width of 3 m, height of 1,5 m and a span length of 18 m has been obtained.

The thickness of the cross-laminated timber panel is 130 mm (30/20/30/20/30 mm) as a result of the calculations. The strength class of the lamellas used in this structure is T14, which gives the strength class of the panel CL24h. Due to the fact that the CLT-panel is supported by nodal supports, large shear forces occur around the supports at the edges. To ensure rolling shear capacity around the edge supports, the panel is reinforced with self-tapping screws SFS WT-T-6,5x160. The maximum length of CLT is limited to 15 m by production technology, so the panel is made of three 6 m long curved panels, which are fixed together with self-tapping screws SFS WT-T-6,5x130. The tension rods are attached to CLT-panel through a steel anchor plate. The compression rods are fixed to the cross-laminated timber with screws SFS WFD-T-T40-8x100. The designed 3D element is assembled on the mounting supports and then lifted to its working position. Elements side by side are fastened with 6 mm thick steel plates and dowels SFS WS-T-7x113 and WS-T-5x113.

The circular tubes CFCHS 76.1x6 made of steel S355 are used as rods. The tubes are divided into two assemblies. The first assembly (TS1) comprises compression rods and tension rods that are attached to CLT-panel through anchor plate. Those rods are welded to a sleeve (CFCHS 88.9x6) which axis passes through the intersection of the axes of the rods. The second assembly (TS2) includes the lower tension rod. Assemblies TS1 and TS2 are secured with threaded rod M30 8.8. Tension rods of TS1 are attached to the CLT-panel through the anchor plate with threaded rod M24 8.8 and compression rods through support plates with screws SFS WFD-T-T40-8x100.

The fire resistance class of the element designed in this thesis is R60. To ensure the load bearing capacity in 60-minute fire it is necessary to add a 26 mm thick protective layer made of timber between the supports at the short edge of the element. To ensure the load bearing capacity of the steel rods in fire, tension rods and longer compression rods has to be covered with fire protection intumescent coating.

As a further development of this work, it is possible to study the load bearing capacity and behavior of the joints discussed in this thesis in case of fire. Another way to continue this work is to compare the structure to other possible solutions. Due to the fact that the structure designed in this thesis is not very common it would be good to carry out tests to check the load bearing capacity of the structure.

## 6 Kasutatud kirjanduse loetelu

- [1] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid,“ : *Kombineeritud süsteemid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2015, lk. 314-316.
- [2] A. Räämet ja R. Räämet, „Ehitusmehaanika: varraskonstruktsioonide staatika: õpik kõrgkoolidele,“ : *Peatükk 9 Kombineeritud konstruktsioonid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018.
- [3] E.-J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid,“ : *Kandekonstruktsioonides kasutatav liimitud puitmaterjal*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2015, lk. 48-56.
- [4] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid,“ : *Ristkihtliimpuidust paneelide arvutusmeetodid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2015, lk. 234-238.
- [5] M. W. Novak, J. Koppelhuber and K. Pock, "Product description," in *Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and engineering principles according to Eurocode*, Graz, proHolz Austria, 2014, pp. 8-17.
- [6] A. Thiel, "ULS and SLS design of CLT and its implementation in the CLTdesigner," in *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT). Theme II: Design and Construction*, Graz, 2013.
- [7] M. W. Novak, J. Koppelhuber and K. Pock, "Cross-sectional values," in *Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and engineering principles according to Eurocode*, Graz, proHolz Austria, 2014, pp. 29-44.
- [8] A. Thiel and R. Brandner, "ULS Design of CLT Elements – Basics and Some Special Topics," in *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 "Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings"*, Stockholm, 2016.
- [9] *Eurokoodeks. Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. EVS-EN 1990:2002*, Eesti Standardikeskus, 2002.
- [10] *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus. EVS-EN 1991-1-3:2006*, 2006: Eesti Standardikeskus.
- [11] *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused . Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused. EVS-EN 1991-1-1:2002*, Eesti Standardikeskus, 2002.
- [12] „ISOVER SAINT-GOBAIN,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.isover.ee/lahendused/uusehitus-korrusmaja-lamekatus>. [kasutatud 20.05.2019].
- [13] *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus. Eesti standardi rahvuslik lisa. EVS-EN 1991-1-4/NA:2007*, Eesti Standardikeskus, 2007.
- [14] R. Brandner, R. Tomasi, T. Moosbrugger, E. Serrano and P. Dietsch, "Material Properties," in *Properties, Testing and Design of Cross Laminated Timber: A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 2*, Aachen, Shaker Verlag, 2018, pp. 18-41.

- [15] „SCIA support,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.scia.net/en/support/faq/modeller/orthotropic-parameters-explained>. [kasutatud 8.03.2019]
- [16] SCIA help, [Online]. Available: <https://www.scia.net/en/support/faq/results/explanation-different-interpolation-types-fem-surface-results>. [kasutatud 8.03.2019]
- [17] M. W. Novak, J. Koppelhuber ja K. Pock, „Ultimate Limit States,“ in *Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and engineering principles according to Eurocode*, Graz, proHolz Austria, 2014, pp. 45-68.
- [18] E. Wiesner, "Load bearing timber structures," in *Fire safety in timber buildings: technical guideline for Europe*, Stockholm, SP Technical Research Institute of Sweden, 2010, pp. 79-126.
- [19] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreegliid. Tulepüsivusarvutus. EVS-EN 1995-1-2:2005+NA:2006.*, Eesti Standardikeskus, 2006.
- [20] *Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements. EVS-EN 301:2017*, Eesti Standardikeskus, 2017.
- [21] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreegliid ja reegliid hoonete projekteerimiseks. Eesti standardi rahvuslik lisa. EVS-EN 1995-1-1/NA:2007+A1:2008/NA:2009*, Eesti Standardikeskus, 2009.
- [22] *Eurokoodeks 3. Teraskonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreegliid ja reegliid hoonete projekteerimiseks. EVS-EN 1993-1-1:2005*, Eesti Standardikeskus, 2005.
- [23] K. Loorits, *Teraskonstruktsioonide arvutus Eurokoodeks 3 järgi*, Tallinn: Eesti Teraskonstruktsiooniühing, 2008.
- [24] *Eurokoodeks 3: Teraskonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldeeskirjad. Tulepüsivusarvutus. EVS-EN 1993-1-2:2006*, Eesti Standardikeskus, 2006.
- [25] P. Mestek and P. Dietsch, "Design concept for CLT - reinforced with self-tapping screws," in *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT). Theme II: Design and Construction*, Graz, 2013.
- [26] E.-J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid,“ : *Isekeermestavad täiskeermekruvid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2015, lk. 154-156.
- [27] *Puittarindid. Tüübelkinnitusdetailid. Nõuded. EVS-EN 14592:2008+A1:2012*, Eesti Standardikeskus, 2012.
- [28] *European technical approval ETA-12/0063*, Vienna: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2013.
- [29] *Timber to Timber and Steel to Timber Connections. According to EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008 and ETA-12/0373.*, Heerbrugg: SFS intec AG/ Division Construction, 2014.
- [30] *European Technical Assessment ETA-12/0373*, Vienna: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2017.
- [31] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreegliid ja reegliid hoonete projekteerimiseks. EVS-EN 1995-1-1:2005*, Eesti Standardikeskus, 2005.

- [32] T. Uibel and J. H. Blaß, "Joints with Dowel Type Fasteners in CLT Structures," in *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT). Theme II: Design and Construction*, Graz, 2013.
- [33] SFS Intec OÜ Eesti filiaal, *ET-3 0203-0780: PUITTARINDITE KINNITUSTARVIKUD*, Tallinn: Eesti Ehitusteave, 2007.
- [34] *European Technical Approval. ETA -12/0355*, Warrington: European Organisation for Technical Approvals, 2012.

## LISAD

## Lisa 1 CLT-plaadi sisejõud

Koormuskombinatsiooni nimetus	Selgitus
ULS-Set B (auto)/1	Omakaal + katusekihid
ULS-Set B (auto)/2	$1.35 \cdot \text{Omakaal} + 1.50 \cdot \text{lumekoormus} + 1.35 \cdot \text{katusekihid} + 0.90 \cdot \text{Tuul suruv}$
ULS-Set B (auto)/3	$\text{Omakaal} + 1.50 \cdot \text{lumekoormus} + \text{katusekihid} + 0.90 \cdot \text{Tuul suruv}$
ULS-Set B (auto)/4	$1.35 \cdot \text{Omakaal} + 1.35 \cdot \text{katusekihid}$

Tabel L1. 1 Koormuskombinatsioonid



Joonis L1.1 Plaadi jaotus tsoonidesse

Tabel L1. 2 Tsooni 1 sisejõudude kokkuvõte.

Tsoon	1	N ja M pikisuunas			N ja M ristisuunas		
		mx [kNm/m]	nx [kN/m]	määrav kombinatsioon	my [kNm/m]	ny [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne pikijõud ja vastav paindemoment		-1.12	<b>-247.69</b>	ULS-Set B (auto)/2	0.33	<b>-120.05</b>	ULS-Set B (auto)/2
maksimaalne paindemoment ja vastav pikijõud		<b>-4.67</b>	-119.09	ULS-Set B (auto)/2	<b>-2.27</b>	0.15	ULS-Set B (auto)/2

Tsoon	1	V pikisuunas		V ristisuunas	
		Vx [kN/m]	määrav kombinatsioon	Vy [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne põikjõud		<b>-8.48</b>	ULS-Set B (auto)/2	<b>-10.42</b>	ULS-Set B (auto)/2

Tabel L1. 3 Tsooni 1 sisejõud.

Mesh	Case	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nx [kN/m]	ny [kN/m]	nxy [kN/m]	tsoon
88	ULS-Set B (auto)/1	-0.02	-0.59	-0.01	-0.1	-0.15	-0.87	-0.25	-0.45	1
89	ULS-Set B (auto)/1	-0.02	-0.54	-0.04	-0.13	-0.49	0.25	-1.96	-1.33	1
88	ULS-Set B (auto)/4	-0.03	-0.79	-0.02	-0.14	-0.21	-1.17	-0.33	-0.61	1
90	ULS-Set B (auto)/1	-0.03	-0.44	-0.06	-0.21	-0.9	1.49	-5.82	-2.66	1
91	ULS-Set B (auto)/1	-0.03	-0.26	-0.09	-0.34	-1.5	-6.23	-12.48	-7.45	1
88	ULS-Set B (auto)/3	-0.07	-2.06	-0.04	-0.36	-0.54	-2.78	0.23	-1.47	1
88	ULS-Set B (auto)/2	-0.08	-2.27	-0.05	-0.4	-0.59	-3.08	0.15	-1.63	1
137	ULS-Set B (auto)/1	-0.08	-0.54	-0.02	-0.13	-0.09	-1.88	-4.03	-1.01	1
89	ULS-Set B (auto)/2	-0.09	-2.1	-0.15	-0.5	-1.88	0.87	-5.98	-4.79	1
138	ULS-Set B (auto)/1	-0.1	-0.5	-0.06	-0.19	-0.29	-2.1	-4.57	-3.27	1
90	ULS-Set B (auto)/2	-0.12	-1.72	-0.25	-0.82	-3.46	5.15	-19.74	-9.51	1
91	ULS-Set B (auto)/2	-0.13	-1.02	-0.36	-1.31	-5.8	-21.89	-43.42	-26.35	1
139	ULS-Set B (auto)/1	-0.13	-0.4	-0.09	-0.35	-0.52	-4.72	-5.59	-6.64	1
182	ULS-Set B (auto)/1	-0.15	-0.47	-0.02	-0.13	-0.08	-4.1	-3.83	-1.13	1
183	ULS-Set B (auto)/1	-0.19	-0.43	-0.05	-0.21	-0.25	-5	-3.78	-3.56	1
223	ULS-Set B (auto)/1	-0.22	-0.41	-0.02	-0.1	-0.07	-6.29	-2.98	-1.08	1
140	ULS-Set B (auto)/1	-0.23	-0.24	-0.13	-0.7	-0.79	-14.42	-7.63	-12.18	1
260	ULS-Set B (auto)/1	-0.26	-0.35	-0.01	-0.04	-0.06	-8.31	-2.58	-1	1
224	ULS-Set B (auto)/1	-0.27	-0.36	-0.05	-0.17	-0.22	-7.37	-2.84	-3.29	1
184	ULS-Set B (auto)/1	-0.27	-0.34	-0.09	-0.4	-0.41	-8.53	-3.57	-6.48	1
37	ULS-Set B (auto)/1	-0.28	0.06	0.04	-1.95	0.87	-47.43	-6.89	8.92	1
261	ULS-Set B (auto)/1	-0.29	-0.31	-0.01	0	-0.05	-10.17	-2.36	-0.91	1
92	ULS-Set B (auto)/1	-0.29	0.09	-0.11	-2.18	-2.7	-70.88	-34.27	-31.89	1
137	ULS-Set B (auto)/2	-0.32	-2.09	-0.07	-0.5	-0.35	-6.72	-13.81	-3.6	1
225	ULS-Set B (auto)/1	-0.33	-0.31	-0.04	-0.1	-0.18	-9.42	-2.41	-3	1
226	ULS-Set B (auto)/1	-0.37	-0.28	-0.03	-0.03	-0.15	-11.3	-2.18	-2.73	1
138	ULS-Set B (auto)/2	-0.38	-1.92	-0.22	-0.74	-1.09	-7.47	-15.73	-11.67	1
185	ULS-Set B (auto)/1	-0.39	-0.28	-0.08	-0.32	-0.33	-10.7	-2.34	-5.57	1
261	ULS-Set B (auto)/4	-0.4	-0.42	-0.01	0	-0.07	-13.72	-3.18	-1.22	1
141	ULS-Set B (auto)/1	-0.44	-0.2	-0.12	-0.68	-0.51	-16.15	-1.99	-9.39	1
186	ULS-Set B (auto)/1	-0.47	-0.25	-0.06	-0.18	-0.26	-12.68	-2.03	-4.97	1



139	ULS-Set B (auto)/2	-0.52	-1.55	-0.37	-1.36	-1.98	-16.63	-19.34	-23.61	1
187	ULS-Set B (auto)/1	-0.52	-0.22	-0.04	-0.07	-0.2	-14.4	-1.79	-4.45	1
93	ULS-Set B (auto)/1	-0.59	-0.01	-0.15	-1.05	-0.73	-51.75	1.6	-16.53	1
182	ULS-Set B (auto)/2	-0.6	-1.82	-0.07	-0.51	-0.31	-14.67	-13.37	-4.03	1
142	ULS-Set B (auto)/1	-0.6	-0.18	-0.1	-0.45	-0.35	-18.82	-1.42	-7.64	1
38	ULS-Set B (auto)/1	-0.65	0.05	-0.04	-1.51	0.1	-48.5	4.77	7.29	1
143	ULS-Set B (auto)/1	-0.69	-0.16	-0.08	-0.22	-0.26	-20.42	-1.32	-6.58	1
183	ULS-Set B (auto)/2	-0.73	-1.65	-0.21	-0.82	-0.95	-17.76	-13.19	-12.72	1
144	ULS-Set B (auto)/1	-0.74	-0.15	-0.05	-0.07	-0.21	-21.19	-1.08	-5.67	1
94	ULS-Set B (auto)/1	-0.76	-0.06	-0.13	-0.69	-0.37	-44.11	1.9	-9.45	1
223	ULS-Set B (auto)/2	-0.85	-1.57	-0.06	-0.39	-0.28	-22.49	-10.44	-3.88	1
39	ULS-Set B (auto)/1	-0.87	0	-0.07	-1.16	-0.09	-45.32	1.4	1.86	1
95	ULS-Set B (auto)/1	-0.89	-0.08	-0.1	-0.41	-0.26	-39.34	0.23	-6.99	1
140	ULS-Set B (auto)/2	-0.92	-0.94	-0.53	-2.72	-3.04	-50.52	-26.51	-43.02	1
96	ULS-Set B (auto)/1	-0.96	-0.08	-0.08	-0.18	-0.21	-35.34	-0.25	-5.55	1
97	ULS-Set B (auto)/1	-1	-0.07	-0.06	-0.02	-0.17	-31.53	-0.16	-4.51	1
260	ULS-Set B (auto)/2	-1.03	-1.35	-0.05	-0.18	-0.24	-29.71	-9.09	-3.58	1
40	ULS-Set B (auto)/1	-1.03	-0.01	-0.07	-0.96	-0.13	-40.53	0.71	-0.14	1
184	ULS-Set B (auto)/2	-1.04	-1.3	-0.35	-1.55	-1.59	-30.04	-12.45	-23.04	1
224	ULS-Set B (auto)/2	-1.05	-1.41	-0.18	-0.68	-0.82	-26.19	-9.96	-11.77	1
261	ULS-Set B (auto)/3	-1.05	-1.08	-0.03	0	-0.18	-32.8	-7.54	-2.94	1
37	ULS-Set B (auto)/2	-1.1	0.25	0.12	-7.71	3.44	-167.27	-24.17	31.36	1
92	ULS-Set B (auto)/2	-1.12	0.33	-0.45	-8.48	-10.42	-247.69	-120.05	-111.88	1
41	ULS-Set B (auto)/1	-1.14	-0.02	-0.06	-0.67	-0.13	-36.75	0.39	-0.83	1
261	ULS-Set B (auto)/2	-1.15	-1.19	-0.04	0	-0.2	-36.36	-8.37	-3.25	1
42	ULS-Set B (auto)/1	-1.19	-0.02	-0.04	-0.33	-0.11	-34.22	0.21	-1.16	1
225	ULS-Set B (auto)/2	-1.3	-1.21	-0.15	-0.4	-0.68	-33.48	-8.5	-10.73	1
226	ULS-Set B (auto)/2	-1.45	-1.07	-0.11	-0.13	-0.56	-40.19	-7.74	-9.76	1
185	ULS-Set B (auto)/2	-1.52	-1.1	-0.3	-1.24	-1.25	-37.67	-8.22	-19.84	1
141	ULS-Set B (auto)/2	-1.73	-0.79	-0.47	-2.64	-1.97	-56.53	-6.9	-33.25	1
186	ULS-Set B (auto)/2	-1.85	-0.95	-0.23	-0.72	-0.97	-44.69	-7.15	-17.74	1
187	ULS-Set B (auto)/2	-2.04	-0.84	-0.17	-0.29	-0.78	-50.8	-6.36	-15.91	1
93	ULS-Set B (auto)/2	-2.29	-0.06	-0.6	-4.12	-2.83	-181.02	5.74	-58.25	1
142	ULS-Set B (auto)/2	-2.35	-0.7	-0.38	-1.75	-1.32	-65.87	-4.99	-27.13	1
38	ULS-Set B (auto)/2	-2.53	0.2	-0.16	-5.98	0.38	-170.44	16.82	25.52	1
143	ULS-Set B (auto)/2	-2.72	-0.62	-0.29	-0.88	-0.99	-71.5	-4.68	-23.43	1
144	ULS-Set B (auto)/2	-2.9	-0.57	-0.21	-0.3	-0.81	-74.21	-3.83	-20.21	1
94	ULS-Set B (auto)/2	-2.98	-0.25	-0.5	-2.68	-1.42	-154.13	6.8	-33.41	1
39	ULS-Set B (auto)/2	-3.42	-0.01	-0.26	-4.58	-0.35	-159.09	4.86	6.33	1
95	ULS-Set B (auto)/2	-3.48	-0.31	-0.41	-1.63	-1	-137.58	0.72	-24.85	1
96	ULS-Set B (auto)/2	-3.78	-0.31	-0.32	-0.74	-0.79	-123.53	-0.92	-19.81	1
97	ULS-Set B (auto)/2	-3.91	-0.29	-0.23	-0.12	-0.66	-110.02	-0.55	-16.14	1
40	ULS-Set B (auto)/2	-4.04	-0.05	-0.26	-3.77	-0.52	-141.81	2.48	-0.64	1
41	ULS-Set B (auto)/2	-4.47	-0.07	-0.23	-2.61	-0.49	-128.21	1.37	-3	1
42	ULS-Set B (auto)/2	-4.67	-0.07	-0.17	-1.3	-0.41	-119.09	0.74	-4.18	1

Tabel L1. 4 Tsooni 2 sisejõudude kokkuvõte.

Tsoon	2	N ja M pikisuunas			N ja M ristisuunas		
		mx [kNm/m]	nx [kN/m]	määrav kombinatsioon	my [kNm/m]	ny [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne pikijõud ja vastav paindemoment		-4.66	<b>-111.86</b>	ULS-Set B (auto)/2	-1.08	<b>-7.3</b>	ULS-Set B (auto)/2
maksimaalne paindemoment ja vastav pikijõud		<b>-4.66</b>	-111.86	ULS-Set B (auto)/2	<b>-1.3</b>	-4.1	ULS-Set B (auto)/2

Tsoon	2	V pikisuunas		V ristisuunas	
		Vx [kN/m]	määrav kombinatsioon	Vy [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne põikjõud		<b>4.6</b>	ULS-Set B (auto)/2	<b>-1.02</b>	ULS-Set B (auto)/3

Tabel L1. 5 Tsooni 2 sisejõud.

Mesh	Case	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nx [kN/m]	ny [kN/m]	nxy [kN/m]	tsoon
267	ULS-Set B (auto)/1	0	-0.33	0.01	0.29	-0.06	-18.61	-1.15	-0.56	2
267	ULS-Set B (auto)/2	-0.02	-1.3	0.04	1.14	-0.25	-66.69	-4.1	-2.01	2
232	ULS-Set B (auto)/1	-0.05	-0.3	0.03	0.37	-0.18	-19.08	-1.04	-1.6	2
266	ULS-Set B (auto)/1	-0.11	-0.3	0.01	0.38	-0.05	-17.46	-1.27	-0.61	2
193	ULS-Set B (auto)/1	-0.16	-0.23	0.05	0.49	-0.25	-20.06	-0.82	-2.39	2
231	ULS-Set B (auto)/1	-0.17	-0.27	0.02	0.44	-0.14	-18.08	-1.17	-1.77	2
265	ULS-Set B (auto)/1	-0.2	-0.27	0	0.28	-0.04	-16.21	-1.22	-0.66	2
232	ULS-Set B (auto)/2	-0.22	-1.16	0.12	1.45	-0.69	-68.06	-3.69	-5.77	2
264	ULS-Set B (auto)/1	-0.27	-0.26	0	0.17	-0.04	-14.88	-1.41	-0.7	2
230	ULS-Set B (auto)/1	-0.28	-0.25	0.01	0.32	-0.12	-16.97	-1.14	-1.91	2
263	ULS-Set B (auto)/1	-0.3	-0.26	0	0.1	-0.04	-13.44	-1.71	-0.75	2
192	ULS-Set B (auto)/1	-0.3	-0.21	0.04	0.53	-0.2	-19.44	-0.95	-2.67	2
262	ULS-Set B (auto)/1	-0.31	-0.28	-0.01	0.03	-0.04	-11.88	-2.05	-0.82	2
150	ULS-Set B (auto)/1	-0.32	-0.15	0.06	0.63	-0.26	-21.39	-0.52	-2.65	2
229	ULS-Set B (auto)/1	-0.35	-0.24	0	0.19	-0.11	-15.77	-1.31	-2.05	2
228	ULS-Set B (auto)/1	-0.38	-0.24	-0.01	0.1	-0.11	-14.45	-1.58	-2.23	2
227	ULS-Set B (auto)/1	-0.39	-0.25	-0.02	0.01	-0.12	-12.97	-1.89	-2.45	2
266	ULS-Set B (auto)/2	-0.42	-1.15	0.03	1.45	-0.2	-62.56	-4.5	-2.22	2
191	ULS-Set B (auto)/1	-0.42	-0.2	0.02	0.37	-0.17	-18.74	-0.96	-2.91	2
149	ULS-Set B (auto)/1	-0.48	-0.14	0.04	0.62	-0.21	-21.54	-0.65	-3.01	2
190	ULS-Set B (auto)/1	-0.5	-0.19	0	0.21	-0.15	-17.93	-1.09	-3.16	2
103	ULS-Set B (auto)/1	-0.51	-0.08	0.07	0.73	-0.21	-22.18	-0.09	-1.96	2
189	ULS-Set B (auto)/1	-0.53	-0.19	-0.01	0.1	-0.15	-16.97	-1.29	-3.49	2
188	ULS-Set B (auto)/1	-0.54	-0.2	-0.03	-0.01	-0.17	-15.83	-1.54	-3.92	2
148	ULS-Set B (auto)/1	-0.61	-0.13	0.02	0.43	-0.18	-21.62	-0.68	-3.29	2
193	ULS-Set B (auto)/2	-0.63	-0.91	0.19	1.95	-0.97	-71	-2.9	-8.6	2
48	ULS-Set B (auto)/1	-0.66	-0.02	0.05	1.16	-0.11	-20.98	-0.12	-0.74	2
231	ULS-Set B (auto)/2	-0.68	-1.03	0.09	1.67	-0.56	-64.46	-4.12	-6.4	2
102	ULS-Set B (auto)/1	-0.69	-0.07	0.05	0.67	-0.18	-23.81	-0.42	-2.37	2
147	ULS-Set B (auto)/1	-0.7	-0.13	0.01	0.24	-0.17	-21.7	-0.73	-3.65	2

146	ULS-Set B (auto)/1	-0.74	-0.13	-0.01	0.12	-0.17	-21.69	-0.8	-4.12	2
145	ULS-Set B (auto)/1	-0.75	-0.14	-0.03	-0.01	-0.18	-21.5	-0.91	-4.78	2
265	ULS-Set B (auto)/2	-0.79	-1.06	0.02	1.09	-0.17	-58.06	-4.24	-2.37	2
101	ULS-Set B (auto)/1	-0.83	-0.07	0.03	0.45	-0.17	-24.88	-0.39	-2.68	2
47	ULS-Set B (auto)/1	-0.86	-0.02	0.04	0.89	-0.11	-22.03	0.1	-0.74	2
100	ULS-Set B (auto)/1	-0.92	-0.07	0.01	0.26	-0.16	-25.82	-0.24	-3	2
99	ULS-Set B (auto)/1	-0.97	-0.07	-0.01	0.14	-0.16	-27.19	-0.47	-3.45	2
98	ULS-Set B (auto)/1	-0.99	-0.07	-0.04	0.06	-0.17	-28.3	0.1	-3.81	2
46	ULS-Set B (auto)/1	-1.01	-0.02	0.02	0.6	-0.11	-24.02	-0.08	-0.97	2
264	ULS-Set B (auto)/2	-1.04	-1.01	0.01	0.67	-0.15	-53.25	-4.93	-2.5	2
230	ULS-Set B (auto)/2	-1.09	-0.95	0.06	1.22	-0.46	-60.5	-3.95	-6.88	2
45	ULS-Set B (auto)/1	-1.1	-0.02	0.01	0.32	-0.1	-26.44	-0.12	-1.16	2
44	ULS-Set B (auto)/1	-1.16	-0.02	-0.01	0.06	-0.1	-28.88	0.16	-1.24	2
263	ULS-Set B (auto)/2	-1.17	-1.02	-0.01	0.39	-0.15	-48.09	-6.04	-2.69	2
192	ULS-Set B (auto)/2	-1.18	-0.82	0.14	2.03	-0.78	-68.76	-3.34	-9.63	2
43	ULS-Set B (auto)/1	-1.19	-0.02	-0.03	-0.03	-0.1	-32.22	-0.31	-1.38	2
262	ULS-Set B (auto)/2	-1.2	-1.08	-0.02	0.12	-0.17	-42.49	-7.3	-2.94	2
150	ULS-Set B (auto)/2	-1.24	-0.6	0.24	2.49	-1.02	-74.93	-1.8	-9.54	2
229	ULS-Set B (auto)/2	-1.35	-0.91	0.01	0.73	-0.41	-56.19	-4.59	-7.36	2
228	ULS-Set B (auto)/2	-1.49	-0.92	-0.03	0.39	-0.41	-51.45	-5.59	-7.98	2
227	ULS-Set B (auto)/2	-1.51	-0.97	-0.07	0.05	-0.46	-46.17	-6.73	-8.79	2
191	ULS-Set B (auto)/2	-1.64	-0.76	0.08	1.44	-0.65	-66.22	-3.33	-10.46	2
149	ULS-Set B (auto)/2	-1.88	-0.55	0.17	2.41	-0.83	-75.43	-2.26	-10.85	2
190	ULS-Set B (auto)/2	-1.94	-0.73	0.02	0.83	-0.58	-63.33	-3.82	-11.34	2
103	ULS-Set B (auto)/2	-1.99	-0.29	0.26	2.91	-0.83	-76.69	-0.3	-7.14	2
189	ULS-Set B (auto)/2	-2.09	-0.74	-0.04	0.41	-0.58	-59.91	-4.56	-12.51	2
188	ULS-Set B (auto)/2	-2.12	-0.77	-0.1	-0.02	-0.65	-55.86	-5.48	-14.03	2
148	ULS-Set B (auto)/2	-2.4	-0.52	0.1	1.66	-0.7	-75.7	-2.37	-11.83	2
48	ULS-Set B (auto)/2	-2.58	-0.07	0.2	4.6	-0.45	-71.35	-0.39	-2.72	2
102	ULS-Set B (auto)/2	-2.7	-0.28	0.18	2.6	-0.71	-82.34	-1.39	-8.61	2
147	ULS-Set B (auto)/2	-2.73	-0.51	0.03	0.94	-0.64	-75.99	-2.58	-13.08	2
146	ULS-Set B (auto)/2	-2.91	-0.51	-0.05	0.47	-0.63	-75.95	-2.85	-14.75	2
145	ULS-Set B (auto)/2	-2.95	-0.53	-0.13	-0.03	-0.69	-75.31	-3.25	-17.05	2
101	ULS-Set B (auto)/2	-3.26	-0.28	0.11	1.8	-0.65	-86.29	-1.38	-9.66	2
47	ULS-Set B (auto)/2	-3.36	-0.07	0.14	3.53	-0.42	-75.4	0.34	-2.65	2
100	ULS-Set B (auto)/2	-3.62	-0.27	0.03	1.05	-0.62	-89.72	-0.86	-10.76	2
99	ULS-Set B (auto)/2	-3.82	-0.28	-0.05	0.56	-0.62	-94.64	-1.69	-12.36	2
98	ULS-Set B (auto)/2	-3.91	-0.28	-0.13	0.22	-0.63	-98.6	0.34	-13.62	2
46	ULS-Set B (auto)/2	-3.95	-0.07	0.08	2.39	-0.41	-82.52	-0.28	-3.48	2
45	ULS-Set B (auto)/2	-4.33	-0.07	0.02	1.3	-0.4	-91.15	-0.41	-4.16	2
44	ULS-Set B (auto)/2	-4.54	-0.07	-0.04	0.3	-0.4	-99.91	0.56	-4.45	2
43	ULS-Set B (auto)/2	-4.66	-0.07	-0.1	-0.13	-0.39	-111.9	-1.09	-5.01	2

Tabel L1. 6 Tsooni 3 sisejõudude kokkuvõte.

Tsoon	3	N ja M pikisuunas			N ja M ristisuunas		
		mx [kNm/m]	nx [kN/m]	määrav kombinatsioon	my [kNm/m]	ny [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne pikijõud ja vastav paindemoment		1.75	<b>-85.29</b>	ULS-Set B (auto)/2	0.04	<b>21.37</b>	ULS-Set B (auto)/2
maksimaalne paindemoment ja vastav pikijõud		<b>9.53</b>	-46.01	ULS-Set B (auto)/2	<b>-2.35</b>	8.83	ULS-Set B (auto)/2

Tsoon	3	V pikisuunas		V ristisuunas	
		Vx [kN/m]	määrav kombinatsioon	Vy [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne põikjõud		<b>15.44</b>	ULS-Set B (auto)/2	<b>-10.81</b>	ULS-Set B (auto)/2

Tabel L1. 7 Tsooni 3 sisejõud.

Mesh	Case	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nx [kN/m]	ny [kN/m]	nxy [kN/m]	tsoon
1	ULS-Set B (auto)/2	3.47	0.01	0.22	10.88	-0.54	-54.25	0.26	-1.7	3
1	ULS-Set B (auto)/1	0.86	0	0.06	2.75	-0.15	-16.51	0.06	-0.45	3
104	ULS-Set B (auto)/1	-0.29	-0.08	0.08	0.99	-0.26	-21.06	-0.2	-1.79	3
104	ULS-Set B (auto)/2	-1.11	-0.32	0.32	3.92	-1.03	-72.79	-0.68	-6.55	3
105	ULS-Set B (auto)/3	0	-0.3	0.34	4.22	-1.18	-62.13	-0.25	-5.47	3
105	ULS-Set B (auto)/2	-0.01	-0.33	0.38	4.63	-1.3	-69.13	-0.29	-6.05	3
105	ULS-Set B (auto)/4	-0.01	-0.12	0.13	1.57	-0.44	-26.98	-0.13	-2.23	3
105	ULS-Set B (auto)/1	-0.01	-0.09	0.1	1.16	-0.33	-19.99	-0.1	-1.65	3
106	ULS-Set B (auto)/2	1.31	-0.34	0.41	5.82	-1.71	-65.69	-0.73	-5.59	3
106	ULS-Set B (auto)/1	0.32	-0.09	0.1	1.46	-0.43	-18.93	-0.21	-1.53	3
13	ULS-Set B (auto)/2	2.95	-0.31	0.41	7.45	-2.44	-61.76	1.24	-5.32	3
13	ULS-Set B (auto)/1	0.73	-0.08	0.11	1.87	-0.61	-17.71	0.32	-1.46	3
14	ULS-Set B (auto)/2	4.97	-0.14	0.38	9.85	-4.26	-61.73	3.42	-7.18	3
14	ULS-Set B (auto)/1	1.24	-0.04	0.1	2.46	-1.07	-17.39	0.87	-1.98	3
15	ULS-Set B (auto)/2	7.72	0.04	0.2	14.62	-10.81	-54.3	21.37	-11.69	3
15	ULS-Set B (auto)/1	1.92	0	0.06	3.65	-2.72	-14.9	4.82	-3.13	3
151	ULS-Set B (auto)/1	-0.13	-0.17	0.08	0.84	-0.33	-21.25	-0.39	-2.37	3
151	ULS-Set B (auto)/2	-0.48	-0.67	0.3	3.3	-1.28	-74.47	-1.36	-8.52	3
152	ULS-Set B (auto)/2	0.43	-0.75	0.34	3.68	-1.65	-74.33	-0.95	-7.65	3
152	ULS-Set B (auto)/1	0.11	-0.19	0.09	0.93	-0.42	-21.21	-0.28	-2.13	3
153	ULS-Set B (auto)/2	1.49	-0.86	0.37	4.26	-2.17	-74.17	-0.37	-7.12	3
153	ULS-Set B (auto)/1	0.37	-0.22	0.09	1.08	-0.55	-21.17	-0.11	-1.99	3
154	ULS-Set B (auto)/2	2.74	-0.98	0.36	5.06	-2.88	-75.16	0.34	-7.99	3
154	ULS-Set B (auto)/1	0.7	-0.25	0.09	1.3	-0.73	-21.51	0.04	-2.19	3
194	ULS-Set B (auto)/1	0	-0.26	0.06	0.63	-0.31	-20.58	-0.65	-2.14	3
194	ULS-Set B (auto)/2	-0.01	-1.03	0.24	2.48	-1.22	-72.85	-2.3	-7.72	3
195	ULS-Set B (auto)/2	0.7	-1.18	0.26	2.46	-1.51	-74.47	-1.71	-6.9	3
195	ULS-Set B (auto)/1	0.18	-0.3	0.07	0.62	-0.38	-21.03	-0.49	-1.92	3
196	ULS-Set B (auto)/2	1.43	-1.37	0.27	2.5	-1.81	-75.85	-0.51	-6.48	3
196	ULS-Set B (auto)/1	0.36	-0.35	0.07	0.63	-0.46	-21.42	-0.18	-1.79	3

197	ULS-Set B (auto)/2	2.2	-1.58	0.25	2.7	-2.07	-77.38	1.12	-6.81	3
197	ULS-Set B (auto)/1	0.56	-0.4	0.06	0.7	-0.53	-21.85	0.22	-1.85	3
198	ULS-Set B (auto)/2	2.86	-1.8	0.18	1.54	-2.16	-79.15	4.47	-6.23	3
198	ULS-Set B (auto)/1	0.73	-0.46	0.05	0.39	-0.55	-22.36	1.01	-1.65	3
2	ULS-Set B (auto)/2	6.13	0.2	0.07	13.07	0.34	-48.97	0.97	-3.36	3
2	ULS-Set B (auto)/1	1.53	0.05	0.02	3.31	0.07	-15.35	0.16	-0.88	3
233	ULS-Set B (auto)/2	0.27	-1.32	0.15	1.75	-0.84	-71.25	-2.99	-5.21	3
233	ULS-Set B (auto)/1	0.07	-0.34	0.04	0.45	-0.22	-19.96	-0.84	-1.45	3
234	ULS-Set B (auto)/2	0.78	-1.51	0.16	1.48	-1	-74.11	-2.32	-4.68	3
234	ULS-Set B (auto)/1	0.2	-0.39	0.04	0.38	-0.25	-20.76	-0.66	-1.3	3
235	ULS-Set B (auto)/2	1.24	-1.72	0.16	1.3	-1.11	-76.7	-0.5	-4.41	3
235	ULS-Set B (auto)/1	0.32	-0.44	0.04	0.33	-0.28	-21.48	-0.2	-1.21	3
236	ULS-Set B (auto)/2	1.7	-1.94	0.14	1.45	-1.15	-79.37	0.88	-4.41	3
236	ULS-Set B (auto)/1	0.44	-0.5	0.04	0.38	-0.29	-22.21	0.13	-1.19	3
237	ULS-Set B (auto)/2	2.04	-2.12	0.09	0.56	-1.12	-82.02	4.36	-4.02	3
237	ULS-Set B (auto)/1	0.52	-0.54	0.02	0.14	-0.28	-22.93	1	-1.07	3
238	ULS-Set B (auto)/2	2.21	-2.23	0.03	0.37	-1.04	-85.12	9.38	-3.05	3
238	ULS-Set B (auto)/1	0.57	-0.57	0.01	0.1	-0.26	-23.79	2.3	-0.84	3
25	ULS-Set B (auto)/2	4.07	-1.18	0.3	4.33	-3.76	-73.08	6.54	-7.38	3
25	ULS-Set B (auto)/1	1.04	-0.3	0.08	1.11	-0.95	-20.97	1.66	-1.97	3
26	ULS-Set B (auto)/2	5.1	-1.36	0.1	1.55	-4.24	-76.47	15.3	-6.4	3
26	ULS-Set B (auto)/1	1.31	-0.35	0.03	0.42	-1.07	-21.93	3.47	-1.66	3
268	ULS-Set B (auto)/2	0.39	-1.48	0.05	1.33	-0.3	-70.42	-3.36	-1.82	3
268	ULS-Set B (auto)/1	0.1	-0.38	0.01	0.34	-0.08	-19.64	-0.95	-0.51	3
269	ULS-Set B (auto)/2	0.79	-1.68	0.05	0.97	-0.34	-73.78	-2.64	-1.63	3
269	ULS-Set B (auto)/1	0.2	-0.43	0.01	0.25	-0.09	-20.57	-0.75	-0.45	3
270	ULS-Set B (auto)/2	1.11	-1.9	0.05	0.75	-0.37	-76.85	-0.56	-1.53	3
270	ULS-Set B (auto)/1	0.29	-0.49	0.01	0.19	-0.09	-21.42	-0.23	-0.42	3
271	ULS-Set B (auto)/2	1.43	-2.1	0.04	0.96	-0.37	-79.81	0.77	-1.51	3
271	ULS-Set B (auto)/1	0.37	-0.54	0.01	0.25	-0.09	-22.23	0.1	-0.41	3
272	ULS-Set B (auto)/2	1.65	-2.26	0.03	0.2	-0.34	-82.71	3.82	-1.35	3
272	ULS-Set B (auto)/1	0.43	-0.58	0.01	0.05	-0.09	-23.01	0.85	-0.36	3
273	ULS-Set B (auto)/2	1.75	-2.35	0.01	0.25	-0.32	-85.29	8.83	-1.09	3
273	ULS-Set B (auto)/1	0.45	-0.6	0	0.07	-0.08	-23.72	2.2	-0.3	3
3	ULS-Set B (auto)/2	9.53	0.47	-0.06	15.44	6.26	-46.01	-0.53	-9.55	3
3	ULS-Set B (auto)/3	8.69	0.43	-0.05	14.07	5.71	-40.78	-0.64	-8.7	3
3	ULS-Set B (auto)/4	3.23	0.16	-0.02	5.29	2.15	-20.2	0.41	-3.29	3
3	ULS-Set B (auto)/1	2.39	0.12	-0.02	3.92	1.59	-14.96	0.3	-2.44	3
33	ULS-Set B (auto)/2	3.19	-1.95	0.06	0.72	-2.13	-80.23	13.48	-4.14	3
33	ULS-Set B (auto)/1	0.82	-0.5	0.02	0.19	-0.54	-22.64	3.32	-1.13	3
49	ULS-Set B (auto)/1	-0.41	-0.02	0.06	1.54	-0.13	-19.7	-0.03	-0.63	3
49	ULS-Set B (auto)/2	-1.56	-0.06	0.25	6.09	-0.52	-66.6	-0.11	-2.35	3
50	ULS-Set B (auto)/1	-0.08	-0.02	0.07	1.85	-0.15	-18.59	0.03	-0.54	3
50	ULS-Set B (auto)/2	-0.26	-0.06	0.28	7.33	-0.59	-62.38	0.11	-2.05	3
51	ULS-Set B (auto)/2	1.38	-0.04	0.28	9.13	-0.65	-58.69	-0.27	-2.17	3
51	ULS-Set B (auto)/1	0.33	-0.01	0.07	2.31	-0.17	-17.66	-0.09	-0.57	3

Tabel L1. 8 Tsooni 4 sisejõudude kokkuvõte.

Tsoon	4	N ja M pikisuunas			N ja M ristisuunas		
		mx [kNm/m]	nx [kN/m]	määrav kombinatsioon	my [kNm/m]	ny [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne pikijõud ja vastav paindemoment		0.15	<b>-86.77</b>	ULS-Set B (auto)/2	0.05	<b>26.09</b>	ULS-Set B (auto)/2
maksimaalne paindemoment ja vastav pikijõud		<b>10.49</b>	-40.09	ULS-Set B (auto)/2	<b>-2.34</b>	9.84	ULS-Set B (auto)/2

Tsoon	4	V pikisuunas			V ristisuunas		
			Vx [kN/m]	määrav kombinatsioon		Vy [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne põikjõud			<b>-15.31</b>	ULS-Set B (auto)/2		<b>-11.13</b>	ULS-Set B (auto)/2

Tabel L1. 9 Tsooni 4 sisejõud.

Mesh	Case	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nx [kN/m]	ny [kN/m]	nxy [kN/m]	tsoon
4	ULS-Set B (auto)/2	10.49	0.47	-0.09	-15.31	6.44	-40.09	-3.23	8.72	4
16	ULS-Set B (auto)/2	8.77	0.05	-0.11	-14.86	-11.13	-64.31	26.09	6.62	4
5	ULS-Set B (auto)/2	7.18	0.2	-0.17	-12.7	0.59	-42.75	1.48	1.88	4
17	ULS-Set B (auto)/2	5.91	-0.11	-0.37	-9.68	-4.6	-66.04	3.38	2.21	4
27	ULS-Set B (auto)/2	5.1	-1.36	-0.14	-0.43	-4.29	-75.6	18.64	1.84	4
6	ULS-Set B (auto)/2	4.67	0.02	-0.3	-10.44	-0.42	-46.54	0.47	0.43	4
28	ULS-Set B (auto)/2	4.34	-1.18	-0.34	-3.57	-3.89	-72	6.28	2.24	4
18	ULS-Set B (auto)/2	3.94	-0.28	-0.46	-6.9	-2.66	-62.89	1.35	1.03	4
34	ULS-Set B (auto)/2	3.24	-1.95	-0.08	-0.48	-2.14	-82.82	13.13	-0.4	4
155	ULS-Set B (auto)/2	3.22	-0.97	-0.43	-4.14	-3.01	-72.05	1.94	0.85	4
199	ULS-Set B (auto)/2	2.95	-1.79	-0.22	-1.32	-2.17	-80.46	6.84	0.89	4
52	ULS-Set B (auto)/2	2.8	-0.03	-0.36	-8.46	-0.63	-47.57	-0.6	0.06	4
4	ULS-Set B (auto)/1	2.72	0.12	-0.03	-3.95	1.67	-11.79	-1.24	2.32	4
107	ULS-Set B (auto)/2	2.44	-0.32	-0.5	-5.19	-1.85	-62.46	0.57	0.51	4
200	ULS-Set B (auto)/2	2.39	-1.55	-0.3	-2.06	-2.07	-79.88	2.66	0.44	4
16	ULS-Set B (auto)/1	2.29	0.01	-0.02	-3.84	-2.84	-20.08	7.46	1.61	4
239	ULS-Set B (auto)/2	2.2	-2.22	-0.05	-0.43	-1.04	-83.33	12.1	-0.21	4
156	ULS-Set B (auto)/2	2.12	-0.83	-0.47	-3.87	-2.23	-71.66	0.54	0.42	4
240	ULS-Set B (auto)/2	2	-2.1	-0.12	-0.63	-1.1	-84.38	6.35	0.17	4
5	ULS-Set B (auto)/1	1.87	0.05	-0.04	-3.28	0.16	-12.9	0.44	0.48	4
274	ULS-Set B (auto)/2	1.72	-2.34	-0.02	-0.48	-0.32	-86.43	9.84	-0.23	4
157	ULS-Set B (auto)/2	1.69	-1.31	-0.35	-2.41	-1.78	-79.41	0.93	0.06	4
201	ULS-Set B (auto)/2	1.68	-1.89	-0.18	-1.05	-1.12	-84.07	2.95	0.06	4
241	ULS-Set B (auto)/2	1.55	-2.23	-0.04	-0.42	-0.33	-86.53	6.83	0.1	4
17	ULS-Set B (auto)/1	1.54	-0.03	-0.09	-2.51	-1.19	-19.94	0.87	0.47	4
201	ULS-Set B (auto)/3	1.53	-1.72	-0.16	-0.96	-1.02	-75.83	2.67	0.06	4
157	ULS-Set B (auto)/3	1.53	-1.19	-0.32	-2.19	-1.62	-71.54	0.85	0.08	4
53	ULS-Set B (auto)/2	1.43	-0.06	-0.37	-6.67	-0.61	-45.99	0.91	0.57	4
202	ULS-Set B (auto)/2	1.31	-2.04	-0.06	-0.67	-0.35	-86.5	2.98	0.02	4
27	ULS-Set B (auto)/1	1.3	-0.35	-0.03	-0.08	-1.09	-21.49	5.29	0.48	4

108	ULS-Set B (auto)/2	1.3	-0.33	-0.51	-3.85	-1.31	-64.12	-1.17	0.2	4
158	ULS-Set B (auto)/2	1.24	-1.63	-0.22	-1.4	-1.06	-84.08	1.18	-0.12	4
6	ULS-Set B (auto)/1	1.22	0.01	-0.08	-2.7	-0.1	-14.1	0.13	0.11	4
202	ULS-Set B (auto)/3	1.2	-1.86	-0.05	-0.61	-0.32	-78.06	2.7	0.02	4
109	ULS-Set B (auto)/2	1.17	-0.71	-0.47	-3.17	-1.54	-71.54	-0.16	-0.03	4
28	ULS-Set B (auto)/1	1.11	-0.31	-0.09	-0.9	-1	-20.65	1.66	0.54	4
109	ULS-Set B (auto)/3	1.07	-0.64	-0.43	-2.89	-1.4	-64.33	-0.15	0	4
18	ULS-Set B (auto)/1	1.03	-0.07	-0.12	-1.8	-0.69	-18.76	0.37	0.22	4
159	ULS-Set B (auto)/2	0.98	-1.79	-0.07	-0.93	-0.34	-86.51	1.3	-0.04	4
110	ULS-Set B (auto)/2	0.98	-1.08	-0.37	-2.18	-1.34	-79.06	-0.01	-0.21	4
110	ULS-Set B (auto)/3	0.89	-0.99	-0.34	-1.99	-1.22	-71.23	0	-0.17	4
34	ULS-Set B (auto)/1	0.83	-0.5	-0.02	-0.12	-0.54	-23.29	3.54	-0.15	4
155	ULS-Set B (auto)/1	0.83	-0.25	-0.11	-1.06	-0.78	-20.73	0.5	0.14	4
199	ULS-Set B (auto)/1	0.76	-0.46	-0.05	-0.33	-0.55	-22.69	1.87	0.22	4
111	ULS-Set B (auto)/2	0.75	-1.36	-0.23	-1.32	-0.86	-84.1	0.04	-0.26	4
52	ULS-Set B (auto)/1	0.73	-0.01	-0.09	-2.19	-0.16	-14.42	-0.16	0.02	4
111	ULS-Set B (auto)/3	0.68	-1.24	-0.21	-1.21	-0.78	-75.85	0.04	-0.22	4
54	ULS-Set B (auto)/2	0.64	-0.09	-0.31	-5.13	-0.27	-48.89	-0.37	0.46	4
107	ULS-Set B (auto)/1	0.64	-0.08	-0.13	-1.35	-0.48	-18.51	0.16	0.1	4
200	ULS-Set B (auto)/1	0.61	-0.4	-0.08	-0.52	-0.53	-22.58	0.7	0.07	4
112	ULS-Set B (auto)/2	0.6	-1.5	-0.08	-0.86	-0.29	-86.64	0.08	-0.12	4
157	ULS-Set B (auto)/4	0.59	-0.46	-0.12	-0.83	-0.62	-30.33	0.31	-0.05	4
201	ULS-Set B (auto)/4	0.58	-0.66	-0.06	-0.37	-0.39	-31.77	1.07	-0.01	4
239	ULS-Set B (auto)/1	0.56	-0.57	-0.01	-0.11	-0.26	-23.28	3.22	-0.1	4
112	ULS-Set B (auto)/3	0.55	-1.37	-0.07	-0.78	-0.26	-78.18	0.08	-0.1	4
156	ULS-Set B (auto)/1	0.55	-0.21	-0.12	-1	-0.58	-20.65	0.13	0.04	4
240	ULS-Set B (auto)/1	0.51	-0.54	-0.03	-0.16	-0.28	-23.6	1.72	0.03	4
202	ULS-Set B (auto)/4	0.46	-0.71	-0.02	-0.24	-0.12	-32.55	1.08	0	4
274	ULS-Set B (auto)/1	0.44	-0.6	0	-0.13	-0.08	-24.05	2.59	-0.08	4
201	ULS-Set B (auto)/1	0.43	-0.49	-0.04	-0.27	-0.29	-23.53	0.79	-0.01	4
157	ULS-Set B (auto)/1	0.43	-0.34	-0.09	-0.62	-0.46	-22.47	0.23	-0.03	4
109	ULS-Set B (auto)/4	0.41	-0.25	-0.16	-1.1	-0.54	-27.83	-0.07	-0.08	4
241	ULS-Set B (auto)/1	0.4	-0.57	-0.01	-0.11	-0.09	-24.1	1.84	0.02	4
55	ULS-Set B (auto)/2	0.4	-0.32	-0.43	-3.23	-0.28	-61.33	0.44	0.67	4
53	ULS-Set B (auto)/1	0.38	-0.01	-0.1	-1.73	-0.16	-14.02	0.25	0.15	4
56	ULS-Set B (auto)/2	0.36	-0.61	-0.4	-2.86	-0.38	-71.13	-0.27	0	4
202	ULS-Set B (auto)/1	0.34	-0.52	-0.01	-0.17	-0.09	-24.11	0.8	0	4
110	ULS-Set B (auto)/4	0.34	-0.38	-0.13	-0.75	-0.47	-30.23	-0.03	-0.14	4
108	ULS-Set B (auto)/1	0.34	-0.08	-0.13	-1	-0.34	-18.89	-0.31	0.03	4
56	ULS-Set B (auto)/3	0.32	-0.55	-0.37	-2.6	-0.34	-63.95	-0.25	0.02	4
158	ULS-Set B (auto)/1	0.32	-0.42	-0.05	-0.36	-0.27	-23.56	0.3	-0.06	4
109	ULS-Set B (auto)/1	0.3	-0.18	-0.12	-0.82	-0.4	-20.61	-0.05	-0.06	4
57	ULS-Set B (auto)/2	0.28	-0.89	-0.32	-2.2	-0.42	-78.9	-0.43	-0.16	4
111	ULS-Set B (auto)/4	0.26	-0.47	-0.08	-0.46	-0.3	-31.84	-0.01	-0.13	4
159	ULS-Set B (auto)/1	0.25	-0.46	-0.02	-0.24	-0.09	-24.13	0.33	-0.02	4
110	ULS-Set B (auto)/1	0.25	-0.28	-0.1	-0.56	-0.35	-22.39	-0.02	-0.1	4
112	ULS-Set B (auto)/4	0.21	-0.52	-0.03	-0.3	-0.1	-32.66	0	-0.06	4

58	ULS-Set B (auto)/2	0.19	-1.11	-0.2	-1.56	-0.33	-84.14	-0.56	-0.21	4
111	ULS-Set B (auto)/1	0.19	-0.35	-0.06	-0.34	-0.22	-23.59	-0.01	-0.1	4
54	ULS-Set B (auto)/1	0.17	-0.02	-0.08	-1.34	-0.07	-14.82	-0.1	0.12	4
112	ULS-Set B (auto)/1	0.16	-0.39	-0.02	-0.22	-0.07	-24.19	0	-0.04	4
59	ULS-Set B (auto)/2	0.15	-1.24	-0.07	-1.18	-0.12	-86.77	-0.63	-0.12	4
56	ULS-Set B (auto)/4	0.13	-0.21	-0.14	-1.01	-0.14	-27.67	-0.11	-0.06	4
55	ULS-Set B (auto)/1	0.11	-0.08	-0.11	-0.85	-0.08	-18.08	0.12	0.17	4
56	ULS-Set B (auto)/1	0.09	-0.16	-0.1	-0.75	-0.11	-20.49	-0.08	-0.04	4
57	ULS-Set B (auto)/1	0.07	-0.23	-0.08	-0.57	-0.12	-22.36	-0.13	-0.08	4
58	ULS-Set B (auto)/1	0.05	-0.29	-0.05	-0.41	-0.09	-23.61	-0.17	-0.08	4
59	ULS-Set B (auto)/1	0.04	-0.32	-0.02	-0.31	-0.03	-24.24	-0.19	-0.04	4

Tabel L1. 10 Tsooni 5 sisejõudude kokkuvõte.

Tsoon	5	N ja M pikisuunas			N ja M ristisuunas		
		mx [kNm/m]	nx [kN/m]	määrav kombinatsioon	my [kNm/m]	ny [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne pikijõud ja vastav paindemoment		-0.72	<b>-87.3</b>	ULS-Set B (auto)/2	-0.36	<b>1.51</b>	ULS-Set B (auto)/1
maksimaalne paindemoment ja vastav pikijõud		<b>-2.59</b>	-50.34	ULS-Set B (auto)/2	<b>-1.05</b>	-0.05	ULS-Set B (auto)/2

Tsoon	5	V pikisuunas			V ristisuunas		
			Vx [kN/m]	määrav kombinatsioon		Vy [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne põikjõud			<b>-4.77</b>	ULS-Set B (auto)/2		<b>-0.76</b>	ULS-Set B (auto)/2

Tabel L1. 11 Tsooni 5 sisejõud.

Mesh	Case	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nx [kN/m]	ny [kN/m]	nxy [kN/m]	tsoon
352	ULS-Set B (auto)/1	-0.05	-0.27	-0.01	-0.28	-0.03	-24.27	-0.04	-0.03	5
353	ULS-Set B (auto)/1	-0.05	-0.24	-0.02	-0.36	-0.07	-23.62	-0.02	-0.05	5
353	ULS-Set B (auto)/4	-0.07	-0.33	-0.03	-0.48	-0.1	-31.88	-0.03	-0.07	5
354	ULS-Set B (auto)/1	-0.07	-0.2	-0.03	-0.49	-0.09	-22.31	0	-0.03	5
355	ULS-Set B (auto)/1	-0.09	-0.14	-0.04	-0.65	-0.07	-20.37	0.04	0.04	5
354	ULS-Set B (auto)/4	-0.1	-0.26	-0.04	-0.66	-0.11	-30.12	0	-0.04	5
413	ULS-Set B (auto)/1	-0.11	-0.25	0	-0.17	-0.04	-24.29	0.06	-0.03	5
356	ULS-Set B (auto)/1	-0.11	-0.08	-0.04	-0.8	-0.07	-17.76	0.07	0.19	5
289	ULS-Set B (auto)/1	-0.13	-0.02	-0.04	-1.25	-0.08	-15.2	-0.05	0.08	5
414	ULS-Set B (auto)/1	-0.14	-0.22	-0.01	-0.23	-0.12	-23.61	0.07	-0.03	5
352	ULS-Set B (auto)/2	-0.17	-1.05	-0.03	-1.03	-0.1	-86.82	-0.05	-0.09	5
353	ULS-Set B (auto)/3	-0.18	-0.86	-0.07	-1.19	-0.23	-75.83	0	-0.08	5
466	ULS-Set B (auto)/1	-0.18	-0.23	0	-0.29	-0.04	-24.29	0.25	-0.02	5
415	ULS-Set B (auto)/1	-0.18	-0.18	-0.02	-0.32	-0.17	-22.26	0.08	-0.01	5
353	ULS-Set B (auto)/2	-0.2	-0.94	-0.07	-1.32	-0.26	-84.1	-0.01	-0.1	5
549	ULS-Set B (auto)/1	-0.21	-0.24	0	-0.12	-0.05	-24.43	0.05	-0.04	5
548	ULS-Set B (auto)/1	-0.21	-0.23	0	0.08	-0.04	-24.37	0.07	-0.04	5
467	ULS-Set B (auto)/1	-0.21	-0.21	-0.01	-0.32	-0.12	-23.59	0.24	-0.03	5



511	ULS-Set B (auto)/1	-0.22	-0.23	0	-0.03	-0.04	-24.31	0.37	-0.04	5
416	ULS-Set B (auto)/1	-0.23	-0.12	-0.02	-0.45	-0.19	-20.31	0.1	0.03	5
354	ULS-Set B (auto)/3	-0.24	-0.69	-0.1	-1.65	-0.27	-70.88	0.06	0.02	5
415	ULS-Set B (auto)/4	-0.24	-0.24	-0.02	-0.44	-0.23	-30.05	0.11	-0.02	5
513	ULS-Set B (auto)/1	-0.25	-0.21	0	0.08	-0.12	-23.63	0.07	-0.1	5
514	ULS-Set B (auto)/1	-0.25	-0.21	0.01	-0.09	-0.13	-23.67	0.05	-0.09	5
354	ULS-Set B (auto)/2	-0.26	-0.76	-0.11	-1.83	-0.3	-78.69	0.06	0.01	5
512	ULS-Set B (auto)/1	-0.26	-0.21	0	-0.05	-0.11	-23.59	0.34	-0.07	5
468	ULS-Set B (auto)/1	-0.27	-0.17	-0.01	-0.38	-0.17	-22.21	0.21	0	5
511	ULS-Set B (auto)/4	-0.3	-0.31	0	-0.04	-0.06	-32.82	0.5	-0.05	5
357	ULS-Set B (auto)/1	-0.3	-0.07	-0.03	-0.61	-0.18	-17.74	0.02	0.1	5
471	ULS-Set B (auto)/1	-0.33	-0.17	0.02	-0.04	-0.18	-22.2	0.04	-0.13	5
470	ULS-Set B (auto)/1	-0.33	-0.16	0.01	0.07	-0.17	-22.19	0.07	-0.14	5
469	ULS-Set B (auto)/1	-0.33	-0.16	0	-0.08	-0.16	-22.18	0.27	-0.08	5
355	ULS-Set B (auto)/2	-0.34	-0.53	-0.14	-2.44	-0.25	-70.71	0.15	0.27	5
512	ULS-Set B (auto)/4	-0.35	-0.28	0	-0.06	-0.15	-31.85	0.45	-0.1	5
417	ULS-Set B (auto)/1	-0.35	-0.12	-0.01	-0.46	-0.19	-20.22	0.17	0.06	5
468	ULS-Set B (auto)/4	-0.37	-0.23	-0.01	-0.51	-0.23	-29.99	0.28	-0.01	5
290	ULS-Set B (auto)/1	-0.37	-0.02	-0.02	-0.93	-0.12	-15.28	0.12	0.11	5
413	ULS-Set B (auto)/2	-0.41	-0.95	-0.01	-0.62	-0.17	-86.83	0.3	-0.07	5
356	ULS-Set B (auto)/2	-0.42	-0.3	-0.16	-3.02	-0.23	-60.33	0.23	0.75	5
420	ULS-Set B (auto)/1	-0.43	-0.11	0.02	0	-0.19	-20.11	0.02	-0.11	5
418	ULS-Set B (auto)/1	-0.43	-0.11	0	-0.14	-0.18	-20.15	0.16	-0.05	5
471	ULS-Set B (auto)/4	-0.44	-0.23	0.02	-0.05	-0.24	-29.97	0.05	-0.17	5
419	ULS-Set B (auto)/1	-0.44	-0.11	0.01	0.05	-0.18	-20.16	0.05	-0.16	5
469	ULS-Set B (auto)/4	-0.45	-0.22	0	-0.11	-0.22	-29.94	0.36	-0.11	5
358	ULS-Set B (auto)/1	-0.45	-0.06	-0.02	-0.53	-0.18	-17.53	0.2	0.13	5
414	ULS-Set B (auto)/2	-0.5	-0.86	-0.04	-0.82	-0.47	-84.02	0.32	-0.07	5
289	ULS-Set B (auto)/2	-0.51	-0.09	-0.16	-4.77	-0.29	-50.22	-0.16	0.27	5
359	ULS-Set B (auto)/1	-0.54	-0.06	0	-0.21	-0.17	-17.77	-0.04	-0.05	5
291	ULS-Set B (auto)/1	-0.54	-0.01	-0.01	-0.65	-0.1	-15.56	-0.07	-0.06	5
361	ULS-Set B (auto)/1	-0.57	-0.06	0.02	0.05	-0.16	-17.6	0.04	0	5
360	ULS-Set B (auto)/1	-0.57	-0.05	0.01	0	-0.15	-17.78	0.03	-0.17	5
418	ULS-Set B (auto)/4	-0.58	-0.15	0	-0.19	-0.24	-27.21	0.22	-0.07	5
420	ULS-Set B (auto)/4	-0.59	-0.15	0.03	0	-0.26	-27.14	0.03	-0.15	5
415	ULS-Set B (auto)/3	-0.61	-0.63	-0.05	-1.09	-0.6	-70.69	0.33	0.04	5
466	ULS-Set B (auto)/2	-0.64	-0.91	-0.01	-1.02	-0.16	-86.81	1.04	-0.06	5
292	ULS-Set B (auto)/1	-0.64	-0.01	0	-0.29	-0.09	-15.36	-0.01	0	5
415	ULS-Set B (auto)/2	-0.67	-0.69	-0.05	-1.2	-0.66	-78.49	0.36	0.03	5
294	ULS-Set B (auto)/1	-0.67	-0.01	0.02	0.25	-0.08	-15.29	-0.06	-0.14	5
293	ULS-Set B (auto)/1	-0.68	-0.01	0	-0.04	-0.08	-15.21	0.09	0.08	5
511	ULS-Set B (auto)/3	-0.7	-0.82	0	-0.06	-0.15	-78.37	1.38	-0.11	5
549	ULS-Set B (auto)/2	-0.72	-0.96	0.02	-0.35	-0.18	-87.3	0.22	-0.15	5
548	ULS-Set B (auto)/2	-0.74	-0.91	0.01	0.34	-0.17	-87.08	0.31	-0.17	5
361	ULS-Set B (auto)/4	-0.76	-0.07	0.03	0.07	-0.22	-23.76	0.05	0	5
467	ULS-Set B (auto)/2	-0.77	-0.82	-0.02	-1.13	-0.45	-83.94	0.98	-0.06	5
360	ULS-Set B (auto)/4	-0.77	-0.07	0.01	0	-0.21	-24.01	0.05	-0.23	5

511	ULS-Set B (auto)/2	-0.78	-0.9	0	-0.07	-0.16	-86.88	1.51	-0.13	5
512	ULS-Set B (auto)/3	-0.84	-0.74	0	-0.12	-0.41	-75.68	1.25	-0.23	5
514	ULS-Set B (auto)/2	-0.86	-0.85	0.05	-0.23	-0.51	-84.23	0.21	-0.36	5
416	ULS-Set B (auto)/2	-0.88	-0.48	-0.07	-1.71	-0.74	-70.52	0.39	0.21	5
513	ULS-Set B (auto)/2	-0.9	-0.82	0.02	0.35	-0.46	-84.07	0.31	-0.39	5
468	ULS-Set B (auto)/3	-0.91	-0.6	-0.03	-1.21	-0.59	-70.53	0.77	0.04	5
293	ULS-Set B (auto)/4	-0.92	-0.02	0.01	-0.05	-0.11	-20.53	0.12	0.11	5
512	ULS-Set B (auto)/2	-0.93	-0.81	0	-0.13	-0.45	-83.94	1.36	-0.26	5
468	ULS-Set B (auto)/2	-1	-0.66	-0.03	-1.34	-0.65	-78.3	0.85	0.04	5
471	ULS-Set B (auto)/3	-1.04	-0.61	0.06	-0.03	-0.66	-70.5	0.15	-0.44	5
469	ULS-Set B (auto)/3	-1.1	-0.59	0	-0.24	-0.59	-70.41	0.98	-0.26	5
357	ULS-Set B (auto)/2	-1.14	-0.26	-0.09	-2.3	-0.7	-60.27	0.12	0.38	5
471	ULS-Set B (auto)/2	-1.16	-0.67	0.07	-0.04	-0.72	-78.27	0.17	-0.48	5
470	ULS-Set B (auto)/2	-1.21	-0.65	0.03	0.32	-0.66	-78.21	0.29	-0.53	5
469	ULS-Set B (auto)/2	-1.22	-0.64	0	-0.27	-0.64	-78.17	1.07	-0.29	5
417	ULS-Set B (auto)/2	-1.32	-0.45	-0.04	-1.66	-0.73	-70.2	0.66	0.25	5
290	ULS-Set B (auto)/2	-1.4	-0.06	-0.09	-3.54	-0.45	-50.52	0.39	0.42	5
420	ULS-Set B (auto)/3	-1.43	-0.4	0.08	0.12	-0.69	-62.81	0.09	-0.4	5
418	ULS-Set B (auto)/3	-1.45	-0.4	0	-0.46	-0.65	-62.92	0.59	-0.19	5
420	ULS-Set B (auto)/2	-1.59	-0.44	0.09	0.12	-0.76	-69.85	0.1	-0.44	5
418	ULS-Set B (auto)/2	-1.6	-0.44	0	-0.51	-0.71	-69.97	0.64	-0.2	5
419	ULS-Set B (auto)/2	-1.64	-0.43	0.04	0.23	-0.71	-70.02	0.23	-0.6	5
358	ULS-Set B (auto)/2	-1.7	-0.24	-0.05	-1.95	-0.68	-59.64	0.71	0.52	5
361	ULS-Set B (auto)/3	-1.91	-0.2	0.08	0.3	-0.58	-53.74	0.03	-0.02	5
360	ULS-Set B (auto)/3	-1.95	-0.2	0.03	0.04	-0.55	-54.15	0.22	-0.62	5
359	ULS-Set B (auto)/2	-2.05	-0.22	-0.01	-0.78	-0.65	-60.46	-0.16	-0.2	5
291	ULS-Set B (auto)/2	-2.05	-0.05	-0.05	-2.4	-0.39	-51.49	-0.21	-0.23	5
361	ULS-Set B (auto)/2	-2.1	-0.22	0.09	0.32	-0.64	-59.9	0.04	-0.02	5
360	ULS-Set B (auto)/2	-2.15	-0.22	0.04	0.03	-0.61	-60.37	0.23	-0.68	5
293	ULS-Set B (auto)/3	-2.35	-0.05	0.02	-0.01	-0.3	-45.02	0.24	0.27	5
292	ULS-Set B (auto)/2	-2.44	-0.05	-0.01	-1.03	-0.36	-50.83	-0.05	-0.01	5
294	ULS-Set B (auto)/2	-2.52	-0.05	0.07	1.11	-0.34	-50.39	-0.11	-0.59	5
293	ULS-Set B (auto)/2	-2.59	-0.05	0.03	-0.02	-0.33	-50.34	0.27	0.3	5

Tabel L1. 12 Tsooni 6 sisejõudude kokkuvõte.

Tsoon	6	N ja M pikisuunas			N ja M ristisuunas		
		mx [kNm/m]	nx [kN/m]	määrav kombinatsioon	my [kNm/m]	ny [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne pikijõud ja vastav paindemoment		-0.51	<b>-89.23</b>	ULS-Set B (auto)/2	0.24	<b>15</b>	ULS-Set B (auto)/1
maksimaalne paindemoment ja vastav pikijõud		<b>3.8</b>	-44.73	ULS-Set B (auto)/2	<b>-1.49</b>	7.05	ULS-Set B (auto)/2

Tsoon	6	V pikisuunas		V ristisuunas	
		Vx [kN/m]	määrav kombinatsioon	Vy [kN/m]	määrav kombinatsioon
maksimaalne põikjõud		<b>10.01</b>	ULS-Set B (auto)/2	<b>-7.49</b>	ULS-Set B (auto)/2

Tabel L1. 13 Tsooni 6 sisejõud.

Mesh	Case	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nx [kN/m]	ny [kN/m]	nxy [kN/m]	tsoon
300	ULS-Set B (auto)/2	3.8	0.23	-0.08	9.27	3.66	-44.73	-0.79	-5.05	6
367	ULS-Set B (auto)/2	2.97	0.24	0.02	10.01	-7.49	-56.65	15	-6.02	6
299	ULS-Set B (auto)/2	1.72	0.15	0.03	7.49	0.41	-46.1	0.72	-1.07	6
426	ULS-Set B (auto)/2	1.24	-0.78	0.06	0.95	-2.91	-72.36	10.88	-2.68	6
366	ULS-Set B (auto)/2	1.17	-0.05	0.19	6.13	-2.71	-60.06	2.33	-2.64	6
300	ULS-Set B (auto)/1	0.87	0.06	-0.02	2.31	0.91	-13.73	-0.22	-1.4	6
367	ULS-Set B (auto)/1	0.66	0.05	0.01	2.45	-1.82	-16.77	4.12	-1.64	6
425	ULS-Set B (auto)/2	0.64	-0.72	0.17	2.5	-2.45	-69.98	4.69	-2.66	6
299	ULS-Set B (auto)/1	0.36	0.04	0.01	1.85	0.1	-14.11	0.2	-0.31	6
426	ULS-Set B (auto)/1	0.24	-0.2	0.01	0.24	-0.71	-20.78	3	-0.73	6
477	ULS-Set B (auto)/2	0.23	-1.2	0.04	0.6	-1.42	-80.53	8.84	-1.25	6
477	ULS-Set B (auto)/3	0.23	-1.1	0.03	0.55	-1.3	-72.55	7.99	-1.13	6
366	ULS-Set B (auto)/1	0.22	-0.02	0.05	1.5	-0.67	-17.68	0.64	-0.72	6
298	ULS-Set B (auto)/3	0.2	0.01	0.1	5.46	-0.23	-43.22	-0.02	-0.17	6
298	ULS-Set B (auto)/2	0.19	0.01	0.11	5.97	-0.26	-48.38	-0.02	-0.19	6
425	ULS-Set B (auto)/1	0.09	-0.18	0.04	0.6	-0.6	-20.13	1.29	-0.72	6
476	ULS-Set B (auto)/3	0.05	-1.03	0.1	0.72	-1.27	-71.45	4.62	-1.54	6
476	ULS-Set B (auto)/2	0.03	-1.13	0.1	0.78	-1.38	-79.32	5.11	-1.7	6
477	ULS-Set B (auto)/4	-0.01	-0.4	0.01	0.21	-0.46	-30.78	3.3	-0.45	6
477	ULS-Set B (auto)/1	-0.01	-0.3	0.01	0.15	-0.34	-22.8	2.45	-0.34	6
365	ULS-Set B (auto)/3	-0.01	-0.16	0.2	3.85	-1.39	-53.36	0.73	-1.23	6
298	ULS-Set B (auto)/1	-0.02	0	0.03	1.47	-0.07	-14.74	0.01	-0.06	6
365	ULS-Set B (auto)/2	-0.03	-0.18	0.22	4.21	-1.52	-59.48	0.8	-1.36	6
298	ULS-Set B (auto)/4	-0.03	0	0.04	1.98	-0.09	-19.9	0.01	-0.08	6
424	ULS-Set B (auto)/3	-0.05	-0.56	0.18	2.32	-1.67	-62.88	1.6	-1.27	6
476	ULS-Set B (auto)/1	-0.06	-0.28	0.03	0.19	-0.34	-22.47	1.4	-0.46	6
365	ULS-Set B (auto)/1	-0.07	-0.05	0.05	1.03	-0.38	-17.5	0.23	-0.37	6
424	ULS-Set B (auto)/2	-0.08	-0.61	0.2	2.53	-1.83	-69.93	1.77	-1.4	6
476	ULS-Set B (auto)/4	-0.08	-0.38	0.03	0.25	-0.46	-30.34	1.9	-0.62	6
424	ULS-Set B (auto)/1	-0.08	-0.15	0.05	0.61	-0.45	-20.12	0.49	-0.37	6

365	ULS-Set B (auto)/4	-0.1	-0.06	0.07	1.39	-0.51	-23.62	0.3	-0.5	6
424	ULS-Set B (auto)/4	-0.11	-0.21	0.07	0.83	-0.61	-27.16	0.66	-0.5	6
520	ULS-Set B (auto)/1	-0.13	-0.35	0.01	0.1	-0.16	-24.21	2.12	-0.16	6
475	ULS-Set B (auto)/1	-0.13	-0.25	0.03	0.25	-0.32	-22.33	0.75	-0.29	6
519	ULS-Set B (auto)/1	-0.16	-0.33	0.01	0.04	-0.17	-24.04	1.48	-0.25	6
555	ULS-Set B (auto)/1	-0.18	-0.37	0	0.08	-0.05	-24.94	1.96	-0.06	6
518	ULS-Set B (auto)/1	-0.18	-0.31	0.02	0.06	-0.18	-23.88	0.89	-0.17	6
551	ULS-Set B (auto)/1	-0.18	-0.28	0.01	-0.08	-0.06	-24.54	-0.11	-0.03	6
474	ULS-Set B (auto)/1	-0.19	-0.22	0.03	0.11	-0.28	-22.28	0.31	-0.12	6
554	ULS-Set B (auto)/1	-0.2	-0.36	0	0	-0.05	-24.81	1.51	-0.08	6
552	ULS-Set B (auto)/1	-0.2	-0.31	0.01	-0.16	-0.06	-24.59	0.42	-0.02	6
517	ULS-Set B (auto)/1	-0.2	-0.28	0.02	-0.08	-0.17	-23.8	0.38	-0.08	6
550	ULS-Set B (auto)/1	-0.2	-0.26	0.01	0.13	-0.05	-24.49	-0.02	-0.04	6
516	ULS-Set B (auto)/1	-0.2	-0.25	0.02	-0.01	-0.16	-23.77	-0.09	-0.07	6
553	ULS-Set B (auto)/1	-0.21	-0.33	0.01	-0.01	-0.06	-24.67	0.95	-0.06	6
423	ULS-Set B (auto)/1	-0.22	-0.14	0.05	0.37	-0.34	-20.09	0.2	-0.13	6
515	ULS-Set B (auto)/1	-0.23	-0.23	0.02	0.18	-0.14	-23.72	-0.01	-0.11	6
473	ULS-Set B (auto)/1	-0.24	-0.2	0.03	0.12	-0.24	-22.26	-0.04	-0.11	6
554	ULS-Set B (auto)/4	-0.27	-0.48	0.01	-0.01	-0.07	-33.49	2.03	-0.11	6
516	ULS-Set B (auto)/4	-0.27	-0.34	0.03	-0.02	-0.21	-32.09	-0.12	-0.1	6
520	ULS-Set B (auto)/2	-0.28	-1.4	0.02	0.36	-0.67	-86.24	7.62	-0.61	6
475	ULS-Set B (auto)/2	-0.28	-1	0.14	1.05	-1.31	-78.77	2.76	-1.07	6
553	ULS-Set B (auto)/4	-0.28	-0.45	0.01	-0.01	-0.08	-33.3	1.29	-0.08	6
364	ULS-Set B (auto)/1	-0.28	-0.06	0.05	0.63	-0.26	-17.59	0.01	-0.08	6
472	ULS-Set B (auto)/1	-0.29	-0.18	0.02	0.25	-0.2	-22.22	-0.01	-0.16	6
297	ULS-Set B (auto)/1	-0.29	-0.01	0.03	1.1	-0.1	-14.89	0.02	-0.14	6
422	ULS-Set B (auto)/1	-0.31	-0.13	0.04	0.29	-0.26	-20.12	0.01	-0.11	6
364	ULS-Set B (auto)/4	-0.37	-0.07	0.07	0.85	-0.36	-23.75	0.02	-0.11	6
519	ULS-Set B (auto)/2	-0.38	-1.34	0.06	0.21	-0.7	-85.6	5.37	-0.93	6
421	ULS-Set B (auto)/1	-0.39	-0.12	0.03	0.33	-0.22	-20.09	0	-0.19	6
363	ULS-Set B (auto)/1	-0.41	-0.06	0.04	0.44	-0.2	-17.49	0.13	-0.08	6
422	ULS-Set B (auto)/4	-0.42	-0.17	0.05	0.39	-0.35	-27.16	0.01	-0.15	6
296	ULS-Set B (auto)/1	-0.48	-0.01	0.03	0.79	-0.09	-15.07	0.04	-0.06	6
554	ULS-Set B (auto)/3	-0.5	-1.31	0.02	0	-0.2	-80.05	4.96	-0.28	6
518	ULS-Set B (auto)/2	-0.5	-1.24	0.08	0.3	-0.73	-85.02	3.27	-0.63	6
555	ULS-Set B (auto)/2	-0.51	-1.49	0.01	0.3	-0.2	-89.23	7.05	-0.21	6
362	ULS-Set B (auto)/1	-0.51	-0.06	0.03	0.36	-0.18	-17.58	-0.06	-0.22	6
553	ULS-Set B (auto)/3	-0.54	-1.23	0.02	0.01	-0.21	-79.57	3.19	-0.19	6
516	ULS-Set B (auto)/3	-0.55	-0.92	0.07	0.05	-0.59	-76.29	-0.38	-0.24	6
474	ULS-Set B (auto)/2	-0.56	-0.88	0.14	0.56	-1.15	-78.58	1.11	-0.43	6
554	ULS-Set B (auto)/2	-0.57	-1.43	0.02	0	-0.21	-88.73	5.49	-0.31	6
551	ULS-Set B (auto)/2	-0.57	-1.12	0.03	-0.24	-0.22	-87.75	-0.51	-0.09	6
517	ULS-Set B (auto)/2	-0.58	-1.12	0.08	-0.18	-0.71	-84.74	1.4	-0.28	6
552	ULS-Set B (auto)/2	-0.6	-1.23	0.03	-0.51	-0.23	-87.91	1.52	-0.09	6
295	ULS-Set B (auto)/1	-0.6	-0.01	0.02	0.52	-0.09	-15.16	-0.01	0.11	6
553	ULS-Set B (auto)/2	-0.61	-1.34	0.03	0.01	-0.23	-88.2	3.52	-0.21	6
516	ULS-Set B (auto)/2	-0.62	-1.01	0.08	0.05	-0.64	-84.61	-0.41	-0.26	6

423	ULS-Set B (auto)/2	-0.65	-0.55	0.2	1.63	-1.36	-69.83	0.7	-0.47	6
550	ULS-Set B (auto)/2	-0.66	-1.03	0.02	0.54	-0.2	-87.53	-0.11	-0.16	6
473	ULS-Set B (auto)/2	-0.76	-0.79	0.13	0.6	-0.97	-78.51	-0.23	-0.39	6
515	ULS-Set B (auto)/2	-0.77	-0.92	0.06	0.72	-0.57	-84.43	-0.08	-0.41	6
364	ULS-Set B (auto)/3	-0.77	-0.2	0.19	2.44	-0.97	-53.77	-0.03	-0.25	6
364	ULS-Set B (auto)/2	-0.87	-0.22	0.21	2.66	-1.06	-59.93	-0.03	-0.27	6
297	ULS-Set B (auto)/2	-0.92	-0.03	0.14	4.52	-0.39	-48.82	0.1	-0.57	6
422	ULS-Set B (auto)/3	-0.94	-0.46	0.15	1.17	-0.96	-62.88	-0.01	-0.37	6
472	ULS-Set B (auto)/2	-1.01	-0.72	0.1	1.03	-0.82	-78.36	-0.05	-0.61	6
422	ULS-Set B (auto)/2	-1.04	-0.5	0.17	1.28	-1.05	-69.92	-0.01	-0.41	6
421	ULS-Set B (auto)/2	-1.39	-0.47	0.13	1.35	-0.87	-69.77	-0.03	-0.74	6
363	ULS-Set B (auto)/2	-1.44	-0.22	0.18	1.86	-0.82	-59.49	0.45	-0.33	6
296	ULS-Set B (auto)/2	-1.7	-0.04	0.13	3.29	-0.37	-49.53	0.21	-0.26	6
362	ULS-Set B (auto)/2	-1.87	-0.22	0.13	1.49	-0.71	-59.63	-0.14	-0.9	6
295	ULS-Set B (auto)/2	-2.22	-0.05	0.1	2.2	-0.36	-50.1	-0.12	0.4	6

## Lisa 2 Terasvarraste dimensioneerimine

### L2.1 Kandevõime arvutus tavaolukorras

Tavaolukorras on määravaks koormuskombinatsiooniks ULS-Set B(auto)/2 (1,35\*Omakaal+ 1,35\*Katusekihid + 1,5\*Lumekoormus + 0,9\*Tuul suruv). Allolevas tabelis on toodud terasvarraste sisejõud antud koormuskombinatsiooni korral:

Tabel L2.1 Terasvarraste sisejõud kandepiiriseisundi koormuskombinatsiooni korral

Varda Nr	Terasprofiil	Materjal	Pikkus [m]	Surutud varras / tõmmatud varras	Pikijõud vardas [kN]
1	CFCHS76.1x6	S 355	1,858	Survevarras	23,40
2	CFCHS76.1x6	S 355	4,905	Survevarras	19,30
3	CFCHS76.1x6	S 355	4,776	Tõmbevarras	114,96
4	CFCHS76.1x6	S 355	9,00	tõmbevarras	251,35

Tabel L2.2 Ristlõike andmed

Profiil	M [kg/m]	A [mm <sup>2</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> x 10 <sup>4</sup> ]	W <sub>el</sub> [mm <sup>4</sup> x 10 <sup>4</sup> ]	W <sub>pl</sub> [mm <sup>4</sup> x 10 <sup>4</sup> ]	i [mm]
CFCHS 76.1x6	10,8	1381	84,82	22,29	30,78	24,8

#### L2.1.1 Surutud varraste kandevõime kontroll

Tabel L2.3 Ristlõikeklass vastavalt [22] [23]

Ristlõikeklass	Painutatud ja/või surutud ristlõige
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81 \quad (\text{L2.1})$$

Kus  $f_y$  – terase voolepiir, N/mm<sup>2</sup>.

Ristlõike CFCHS76.1x6 korral:

$$\frac{d}{t} = \frac{76,1}{6} = 12,68 \leq 50 \cdot 0,81^2 = 32,8$$

Seega ristlõige kuulub klassi 1.

Surutud varda nõtkekandevõime  $N_{b,Rd}$  leitakse vastavalt [22] [23]:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{L2.2})$$

Kus  $\chi$  – nõtketegur,  
 $A$  – ristlõike pindala, mm<sup>2</sup>,  
 $f_y$  – terase voolepiir, N/mm<sup>2</sup>,  
 $\gamma_{M1}$  – materjali osavarutegur.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (\text{L2.3})$$

Kus  $\Phi$  – Nõtkekõverast sõltuv abisuurus  
 $\bar{\lambda}$  – tingsaledus

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (\text{L2.4})$$

Kus  $\alpha$  – hälbetegur (nõtkekõvera c korral  $\alpha = 0,49$ )

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (\text{L2.5})$$

Kus  $\lambda$  – Saledus  
 $E$  – Teraselastsusmoodul, N/mm<sup>2</sup>

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} \quad (\text{L2.6})$$

Kus  $L_{cr}$  – nõtkepikkus, mm,  
 $i$  – inertsiraadius, mm.

### Varda 1 nõtkekandevõime kontroll

Saledus vastavalt valemile (L2.6):

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{1900}{25} = 76,6$$

Tingsaledus vastavalt valemile (L2.5):

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{76,6}{\pi} \sqrt{\frac{355}{210000}} = 1,00$$

Nõtkekõverast sõltuv abisuurus vastavalt valemile (L2.4):

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,49(1 - 0,2) + 1^2] = 1,2$$

Nõtketegur vastavalt valemile (L2.3):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,2 + \sqrt{1,2^2 - 1^2}} = 0,54$$

Varda 1 nõtkekandevõime vastavalt valemile (L2.2):

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,54 \cdot 1381 \cdot 355}{1,0} = 263,9 \cdot 10^3 \text{ N} = 263,9 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} < N_{b,Rd}$$

Varda 1 nõtkekandevõime on tagatud.

## Varda 2 nõtkekandevõime kontroll

Saledus vastavalt valemile (L2.6):

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{4900}{25} = 197,6$$

Tingsaledus vastavalt valemile (L2.5):

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{197,6}{\pi} \sqrt{\frac{355}{210000}} = 2,59$$

Nõtkekõverast sõltuv abisuurus vastavalt valemile (L2.4):

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,49(2,59 - 0,2) + 2,59^2] = 4,43$$

Nõtketegur vastavalt valemile (L2.3):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{4,43 + \sqrt{4,43^2 - 2,59^2}} = 0,125$$

Varda 1 nõtkekandevõime vastavalt valemile (L2.2):

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,125 \cdot 1381 \cdot 355}{1,0} = 61,1 \cdot 10^3 N = 61,1 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} < N_{b,Rd}$$

Varda 2 nõtkekandevõime on tagatud.

## L2.1.2 Tõmmatud varraste kandevõime kontroll

Tõmmatud varda brutoristlõike arvutuslik kandevõime leitakse alloleva valemiga [22] [23].

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (L2.7)$$

Kus  $A$  – ristlõike pindala, mm<sup>2</sup>,

$f_y$  – terase voolepiir, N/mm<sup>2</sup>,

$\gamma_{M0}$  – materjali osavarutegur.

Varda 3 ja 4 tõmbekandevõime kontroll vastavalt valemile (L2.7):

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1381 \cdot 355}{1,0} = 490,26 \cdot 10^3 N = 490,26 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} < N_{t,Rd}$$

Varda 3 ja 4 tõmbekandevõime on tagatud.



## L2.2 Kandevõime tulekahju korral

Erakordse arvutusolukorra kombinatsioon tulekahju korral on ACC-tulekahju (1\*Omakaal + 1\*katusekihid +0,2\*lumekoormus). Kandevõime arvutused on teostatud vastavalt Eurokood 3 osa 1-2 järgi. Tulekahju korral terase temperatuur tõuseb ja sellega seoses vähendatakse voolepiiri ja elastsusmoodulit vähendusteguritega. [24]

Keskonna temperatuur on leitud ISO834 standardtulekahju mudelit kasutades valemiga (L2.8)

$$\theta_g = 345 \log(8t + 1) + 20 \quad (\text{L2.8})$$

Kus  $t$  – aeg tulekahju algushetkest, min.

Isoleerimata teraskonstruksiooni temperatuuri tõus tulekahjul leitakse valemiga (L2.9) 5 sekundilise sammuga [24].

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{1}{c_a \rho_a} \left( \frac{A_m}{V} \right) \dot{h}_{net} \cdot \Delta t \quad (\text{L2.9})$$

Kus  $c_a$  – terase erisoojus, J/kgK,

$\frac{A_m}{V}$  – ristlõiketegur, 1/m,

$\rho_a$  – terase tihedus, kg/m<sup>3</sup>,

$\dot{h}_{net}$  – netosoojusvoog

$\Delta t$  – ajavahemik, (5s)

$k_{sh}$  - varjestustegur, (toruprofiilidel  $k_{sh} = 1$ ).

Tulekahjuaegse röstlõikeklassi võib leida valemiga (L2.10) leitavat tegurit  $\varepsilon$  kasutades [24].

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (\text{L2.10})$$

Kus  $f_y$  – terase voolepiir tavatemperatuuril, N/mm<sup>2</sup>.

## L2.2.1 Tõmbekandevõime

Tugevustingimus vastavalt valemile (L2.11) [24].

$$N_{fi,Ed} \leq N_{fi,t,Rd} \quad (L2.11)$$

Kus  $N_{fi,Ed}$  – tõmbejõud tulekahju koormuskombinatsioonist, N,

$N_{fi,t,Rd}$  – arvutuslik tõmbekandevõime ajahetkel t, N.

$$N_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \cdot \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} N_{Rd} \quad (L2.12)$$

Kus  $k_{y,\theta}$  - terase voolavuspiiri vähendustegur vaadeldaval temperatuuril,

$\gamma_{M,1}$  – terase osavarutegur normaaltemperatuuril,  $\gamma_{M,1} = 1,0$ ,

$\gamma_{M,fi}$  – terase osavarutegur tulekahju korral,  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ ,

$N_{Rd}$  – terase tõmbekandevõime tavatemperatuuril, N.

Tulekahju algusest 60 minuti möödudes tõuseb ristlõike temperatuur 941°C'ni.

Voolavuspiiri vähendustegurantud temperatuuril on  $k_{y,\theta} = 0,052$ . [24]

Ristlõike arvutuslik tõmbekandevõime 60 min möödumisel tulekahju algusest vastavalt valemile (L2.12) [24]:

$$N_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \cdot \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} N_{Rd} = 0,052 \cdot \frac{1,0}{1,0} \cdot 355 \cdot 1381 = 25,5 \cdot 10^3 N = 25,5 \text{ kN}$$

Varda 3 tõmbejõud tulekahju olukorras on  $N_{fi,3,Ed} = 40,34 \text{ kN}$  ja vardal 4  $N_{fi,4,Ed} = 88,16 \text{ kN}$ ,

seega on vaja tõmbevardad katta tulekaitsevärvi. Tulekaitsevärvi kihipaksus on valitud vastavalt kriitilise temperatuuri  $\theta_{a,cr}$  ja ristlõiketeguri  $\frac{A_m}{V}$  järgi nullifire kataloogist. [34]

Kriitiline temperatuur leitakse valemiga (L2.13) [24].

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (L2.13)$$

Kus  $\mu_0$  – ristlõike kasutusaste tulekahjukoormusest ajahetkel  $t = 0$ .

Tabel L2.4 Varraste 3 ja 4 vajaliku tulekaitsevärvi kihipaksus

	Ristlõiketegur [1/m]	Kriitiline temperatuur [°C]	Ristlõike kasutusaste	Vajalik kaitsevärvi kihipaksus [mm]
Varras 3	173,1	759	0,16	0,63
Varras 4	173,1	711	0,22	0,87

## L2.2.2 Surutud varda nõtkekandeõime

Surutud varda nõtkekandeõime tulekahjus leitakse vastavalt valemile (L2.14) [24]. Voolepiiri vähendustegur 941°C juures on  $k_{y,\theta} = 0,052$  ja elastsusmooduli vähendustegur  $k_{E,\theta} = 0,058$ . [24]

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y \quad (\text{L2.14})$$

Kus  $A$  – varda ristlõike pindala,  $\text{mm}^2$ ,  
 $\chi_{fi}$  – tulekahjuaegne nõtketegur.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (\text{L2.15})$$

Kus  $\varphi_{\theta}$  – abisuurus  
 $\bar{\lambda}_{\theta}$  – tulekahjuaegne tingsaledus,

$$\varphi_{\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right] \quad (\text{L2.16})$$

Kus  $\alpha$  – hälbetegur

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (\text{L2.17})$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (\text{L2.18})$$

Kus  $\bar{\lambda}$  – tingsaledus (vt arvutus tavaolukorras)

### Varda 1 nõtkekandeõime tulekahju korral

Ristlõikeklass vastavalt (L2.10):

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,69$$

$$\frac{d}{t} = \frac{76,1}{6} = 12,7 < 50 \cdot 0,69^2 = 23 \rightarrow RK1$$

Tulekahjuaegne tingsaledus vastavalt valemile (L2.18):

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1,0 \sqrt{\frac{0,052}{0,058}} = 0,95$$

Hälbetegur vastavalt valemile (L2.17):

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,529$$

Abisuurus vastavalt valemile (L2.16):

$$\varphi_{\theta} = 0,5[1 + 0,53 \cdot 0,95 + 0,95^2] = 1,20$$

Tulekahjuaegne nõtketegur vastavalt valemile (L2.15):

$$\chi_{fi} = \frac{1}{1,20 + \sqrt{1,20^2 - 0,95^2}} = 0,52$$

Tulekahju aegne nõtkekandevõime vastavalt valemile (L2.14):

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,52 \cdot 1381 \cdot 0,052 \cdot 355 = 13,1 \cdot 10^3 N = 13,1 \text{ kN} > N_{b,fi,t,Ed} = 7,9 \text{ kN}$$

Varda 1 nõtkekandevõime tulekahju korral on tagatud.

## Varda 2 nõtkekandevõime tulekahju korral

Ristlõikeklass RK1 on sama, mis eelmises punktis.

Tulekahjuaegne tingsaledus vastavalt valemile (L2.18):

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 2,59 \sqrt{\frac{0,052}{0,058}} = 2,44$$

Hälbetegur vastavalt valemile (L2.17):

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,529$$

Abisuurus vastavalt valemile (L2.16):

$$\varphi_{\theta} = 0,5[1 + 0,53 \cdot 2,44 + 2,44^2] = 4,12$$

Tulekahjuaegne nõtketegur vastavalt valemile (L2.15):

$$\chi_{fi} = \frac{1}{4,12 + \sqrt{4,12^2 - 2,44^2}} = 0,14$$

Tulekahju aegne nõtkekandevõime vastavalt valemile (L2.14):

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,14 \cdot 1381 \cdot 0,052 \cdot 355 = 3,4 \cdot 10^3 N = 3,4 \text{ kN} < N_{b,fi,t,Ed} = 6,7 \text{ kN}$$

Varras 2 tuleb kandevõime tagamiseks tulekahju korral katta tulekaitsevärvi. [34]

Tabel L2.5 Varda 2 vajaliku tulekaitsevärvi kihipaksus.

	Ristlõiketegur [1/m]	Kriitiline temperatuur [°C]	Ristlõike kasutusaste	Vajalik Kaitsevärvi kihipaksus [mm]
Varras 2	173,1	659	0,31	1,16

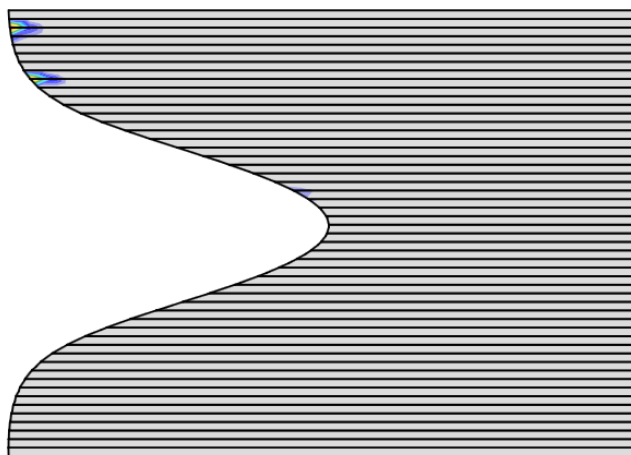
## L2.3 Sõlmede dimensioneerimine

### L2.3.1 Terasvarraste liitumissõlm

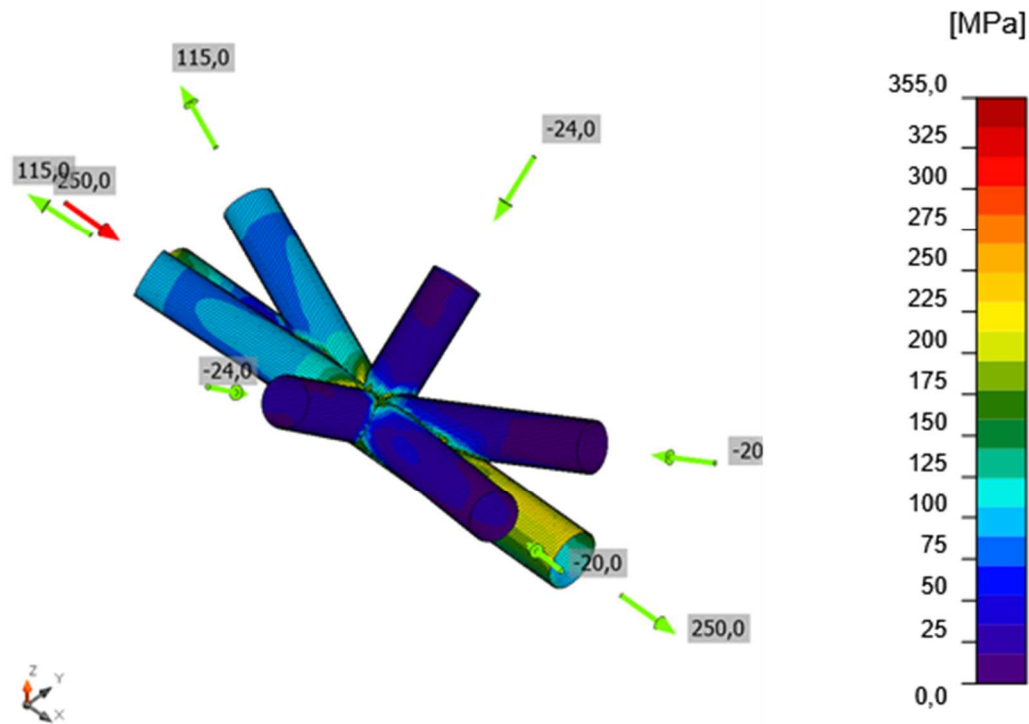
Sprenglivarraste omavaheline liitumissõlm on projekteeritud selliselt, et surutud ja tõmmatud diagonaalvardad (vardad 1, 2 ja 3) on keevitatud terastorst hülssile CFCHS88.9x6.3. Alumine horisontaalne tõmbevarras (varras 4) läheb otsapidi hülsi sisse ja kannab jõu hülsi otsas asuvale plaadile läbi keermevarda M30. Hülsile keevitatud varrastega sõlme on kontrollitud vastavalt komponentidel põhinevat lõplike elementide meetodi tarkvara (Idea Statica) kasutades. Antud tarkvaras on võimalik kontrollida sõlmes tekkivaid pingeid ja plastseid deformatsioone. Plastsete deformatsioonide suurimaks lubatavaks piiriks EN 1993-1-5 lisas C on soovitatud 5%. Tabelis L2.6 on toodud maksimaalsed pinged ja plastsed deformatsioonid liites. Varrastes 1, 2 ja 3 esinevad plastsed deformatsioonid tekivad väikestel aladel varda otste liitumiskohas hülsiga. Varda 3 plastse deformatsiooni piirkond on näidatud joonisel L2.1. Terase pinged vaadeldavas sõlmes on esitatud joonisel L2.2.

Tabel L2.6 Varraste maksimaalsed pinged ja plastsed deformatsioonid

Varda Nr	Terasprofiil	Materjal	Pikijõud vardas [kN]	Maksimaalne pinge $\sigma_{Ed}$ [MPa]	Maksimaalne plastne deformatsioon $\epsilon_{pl}$ [%]
1	CFCHS76.1x6	S 355	24	356,0	0,5
1	CFCHS76.1x6	S 355	24	356,0	0,5
2	CFCHS76.1x6	S 355	20	356,2	0,6
2	CFCHS76.1x6	S 355	20	355,2	0,1
3	CFCHS76.1x6	S 355	115	355,3	0,1
3	CFCHS76.1x6	S 355	115	356,8	0,9
5 (hülss)	CFCHS88.9x6.3	S 355	250	271,6	0,0



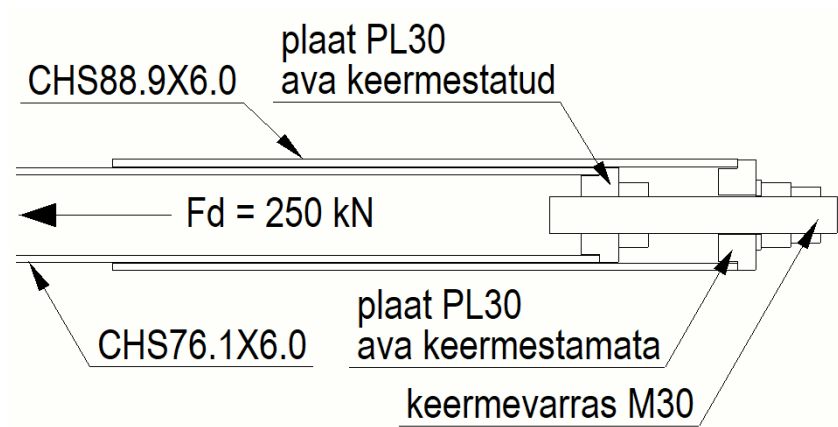
Joonis L2.1 Varda 3 plastsed deformatsioonid



Joonis L2.2 Pinged sõlmes

Kuna plastsed deformatsioonid esinevad väikestel aladel ja jäävad lubatavatesse piiridesse on sõlme kandevõime tagatud.

Alumises tõmbevöös olev jõud kantakse hülsile üle läbi keermevarda M30, vaata joonis L2.3.



Joonis L2.3 Alumise vöö ja hülsi liitumissõlme skeemiline joonis

Keermevarda tõmbekandevõime leitakse [22] [23] põhjal valemiga (L2.19).

$$F_{b,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (\text{L2.19})$$

Kus  $f_{ub}$  – poldi tõmbetugevus, N/mm<sup>2</sup>,  
 $A_s$  – poldi keermestatud osa pindala, mm<sup>2</sup>,  
 $\gamma_{M2}$  – materjali osavarutegur.

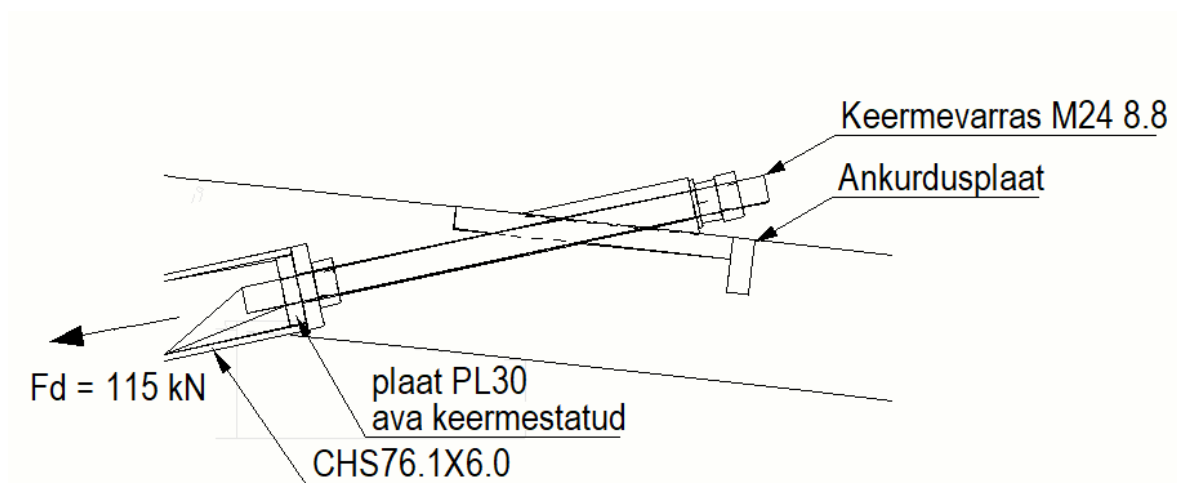
8.8 M30 keermevarda tõmbekandevõime vastavalt valemile (L2.19):

$$F_{b,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 560}{1,25} = 322,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 322,6 \text{ kN}$$

Seega keermevarda tõmbekandevõime on piisav.

### L2.3.2 Tõmbediagonaali liitumine ankruplaadiga

Tõmbejõud vardalt ankurdsplaadile kantakse üle läbi keermevarda, vaata joonis L2.4.



Joonis L2.4 Tõmbevarda ja ankurdsplaadi sõlme skemaatiline joonis

8.8 M24 keermevarda tõmbekandevõime vastavalt valemile (L2.19):

$$F_{b,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 352}{1,25} = 202,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 202,8 \text{ kN}$$

Seega keermevarda tõmbekandevõime on piisav.

## Lisa 3      Kandevoime tulekahju korral

Kandevoime arvutamiseks tulekahju olukorras on kasutatud efektiivristlõike meetodi vastavalt [18]. Selle meetodi puhul määrab kandevoime ristlõige, mille mõõtmed, tugevus- ja jäikusomadused on kõrge temperatuuri tõttu vähendatud. Efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  sõltub söestumiskiirusest  $\beta$ , kasutatavast liimist ja tulekaitsekihtide olemasolust ning sellele lisatakse nulltugevusega kihi paksus. Ristkihtpuidu puhul esitatakse nulltugevusega kihi paksus kompenseeriva kihina  $s_0$ , mis leitakse [18] järgi 5-kihilise kaitsmata elemendi korral valemiga (L3.3) (kui tuli on surutud poolele). Juhul kui tegemist on kaitstud elemendiga, siis on kompenseeriva kihi paksus [18] järgi  $s_0 = 18\text{mm}$ . Vaadeldava konstruktsiooni puhul on eeldatud, et kasutatud on kuumaga püsivat liimi ja vahed lamellide vahel on kuni 2 mm. Sellisel juhul söestub ristlõige nagu massiivne puitelement ühemõõtmeliselt ühtlase söestumiskiirusega  $\beta_0 = 0,65\text{ mm}/\text{min}$ .

### L3.1 CLT-plaadi tugevusomadused tulekahju korral

Tulekahju olukorras kasutatakse [19] põhjal puidu tugevuse 20-protsentiili väärtust ja puidu arvutustugevuse võib leida valemiga (L3.1).

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} k_{fi} \frac{f_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (\text{L3.1})$$

Kus  $k_{mod,fi}$  – modifikatsioonitegur tulekahju korral,  $k_{mod,fi} = 1,0$

$k_{fi}$  – 20-protsentiili teisendustegur,  $k_{fi} = 1,15$ ,

$f_k$  – normatiivne tugevus,

$\gamma_{M,fi}$  – materjali osavarutegur tulekahju korral,  $\gamma_{M,fi} = 1,0$

Tabel L3.1 CLT arvutuslikud tugevused tulekahju korral

Paindetugevus	$f_{m,CLT,d,fi}$	27,6	N/mm <sup>2</sup>
Tõmbetugevus	$f_{t,0,CLT,d,fi}$	18,4	N/mm <sup>2</sup>
Survetugevus	$f_{c,0,CLT,net,d,fi}$	27,6	N/mm <sup>2</sup>
Nihketugevus (OP)	$f_{v,CLT,d,fi}$	3,45	N/mm <sup>2</sup>
	$f_{r,CLT,d,fi}$	1,44	N/mm <sup>2</sup>
Nihketugevus (IP)	$f_{v,CLT,d,fi}$	5,75	N/mm <sup>2</sup>
Väändetugevus (IP)	$f_{T,node,d,fi}$	2,88	N/mm <sup>2</sup>



## L3.2 Söestumissügavus

Efektiivne söestumissügavus leitakse [18] põhjal valemiga (L3.2).

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 s_0 \quad (L3.2)$$

$$\text{Kus } k_0 = \min \left\{ \frac{t}{20}, 1,0 \right\}$$

$s_0$  – kompenseeriva kihi paksus, *mm*,

$$s_0 = \frac{h}{20} + 11 \quad (L3.3)$$

Kus  $h$  - CLT plaadi paksus, *mm*.

$$d_{char} = \beta_0 t \quad (L3.4)$$

Kus  $t$  – aeg, *min*.

CLT kaitsmisel puidust kaitseplaadiga algab CLT söestumine siis, kui on kaitseplaadi tõrketekkeaeag ( $t_{ch} = t_f$ ). Tõrketekkeaeag leitakse [19] põhjal valemiga (L3.5).

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_0} \quad (L3.5)$$

Kus  $h_p$  – kaitseplaadi paksus, *mm*.

Peale kaitseplaadi tõrketekkeaeaga algab CLT plaadi söestumine kahekordse kiirusega kuni 25mm paksuse söekihi tekkimiseni  $k_3 = 2$  [19].

Kaitsmata ristlõike efektiivne söestumissügavus vastavalt valemile (L3.2):

$$d_{ef} = \beta_0 t + k_0 s_0 = 0,65 \cdot 60 + \frac{130}{20} + 11 = 56,5 \text{ mm}$$

Kaitstud ristlõike efektiivne söestumissügavus vastavalt valemile (L3.2):

$$d_{ef} = k_3 \beta_0 t_2 + \beta_0 t_f + k_0 s_0 = 2 \cdot 0,65 \cdot 19,2 + 0,77 \cdot 0,65 + 18 = 43,5 \text{ mm}$$

$$t_c = t_f = \frac{h_p}{\beta_0} = \frac{26}{0,65} = 40 \text{ min}$$

25mm paksuse söekihi tekkimiseks kuluv aeg:

$$t_2 = \frac{25}{2 \cdot 0,65} = 19,2 \text{ min}$$

Järelkaitsefaasis toimuv söestumine:

$$t_3 = (60 - 40 - 19,2) = 0,77 \text{ min}$$

## L3.3 Jäikusparameetrid tulekahju korral

### L3.3.1 Jäikus x-telje suunas

Kuna ristlõike paksus tulekahju korral väheneb tuleb leida kandevõime arvutusteks alles jäänud ristlõike jäikusparameetrid.

Tabel L3.2 Telje x suunas paindejäikuse arvutamine

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_i$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_i$ [mm]	$E_{0,g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{0,g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	30	1000	30000	2250000	21,75	9166,7	11000
3	23,5	1000	23500	1081490	25	9166,7	11000

X-telje suunaline paindejäikus tulekahju korral vastavalt valemile (2.1):

$$K_{CLT,fi} = 11000 \cdot (225 \cdot 10^4 + 108,1 \cdot 10^4) + 11000 \cdot (30000 \cdot 21,75^2 + 23500 \cdot 25^2) =$$

$$= 3,54 \cdot 10^{11} \text{ Nmm} = 354,3 \text{ kNm}$$

$$K_{CLT,05,fi} = 9166,7 \cdot (225 \cdot 10^4 + 108,1 \cdot 10^4) + 9166,7 \cdot (30000 \cdot 21,75^2 + 23500 \cdot 25^2) =$$

$$= 2,95 \cdot 10^{11} \text{ Nmm} = 295,3 \text{ kNm}$$

Nihkeparandusteguri väärtus x-telje suunas on  $k = 0,22$  (CLT designeri järgi).

Tabel L3.3 Efektiivristlõike andmed nihkejäikuse arvutamiseks x-telje suunas

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{r,g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{r,g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	30	1000	30000	540		650	
2	20	1000	20000		54		65
3	23,5	1000	23500	540		650	

Plaadi nihkejäikus x-telje suunas vastavalt valemile (2.7):

$$S_{CLT,fi} = (650 \cdot 30000 + 650 \cdot 23500 + 65 \cdot 20000) \cdot 0,22 = 7900425 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 7900,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$S_{CLT,05,fi} = (540 \cdot 30000 + 540 \cdot 23500 + 54 \cdot 20000) \cdot 0,22 = 6563430 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 6563,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### L3.3.2 Jäikus y-telje suunas

Tabel L3.4 Telje y suunas paindejäikuse arvutamine

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_i$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_i$ [mm]	$E_{0,g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{0,g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2	20	1000	20000	666666,7	0	9166,7	11000

y-telje suunaline paindejäikus vastavalt valemile (2.1):

$$K_{CLT,fi} = 11000 \cdot 666666,7 = 7,33 \cdot 10^9 \text{ Nmm} = 7,33 \text{ kNm}$$

$$K_{CLT,05,fi} = 9166,7 \cdot 666666,7 = 6,11 \cdot 10^9 \text{ Nmm} = 6,11 \text{ kNm}$$

Nihkeparandusteguri väärtus y-telje suunas on  $k = 1,0$ .

Tabel L3.5 Ristlõike andmed nihkejäikuse arvutamiseks y-telje suunas

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{r,g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2	20	1000	20000		540		650

Plaadi nihkejäikus y-telje suunas vastavalt valemile (2.7):

$$S_{CLT,fi} = 650 \cdot 20000 = 13000000 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 13000,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$S_{CLT,05,fi} = 540 \cdot 20000 = 10800000 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 10800,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### L3.3.3 Kaitstud plaadi jäikus y-telje suunas

Tabel L3.6 Telje y suunas paindejäikuse arvutamine

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_i$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_i$ [mm]	$E_{0,g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{0,g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2	20	1000	20000	666666,7	18,25	9166,7	11000
4	6,5	1000	6500	22885,4	25	9166,7	11000

y-telje suunaline paindejäikus vastavalt valemile (2.1):

$$K_{CLT,fi} = 11000 \cdot (666666,7 + 22885,4) + 11000 \cdot (20000 \cdot 18,25^2 + 6500 \cdot 25^2)$$

$$= 1,26 \cdot 10^{11} \text{ Nmm} = 12,55 \text{ kNm}$$

$$K_{CLT,05,fi} = 9166,7 \cdot (666666,7 + 22885,4) + 9166,7 \cdot (20000 \cdot 18,25^2 + 6500 \cdot 25^2)$$

$$= 1,05 \cdot 10^{11} \text{ Nmm} = 10,46 \text{ kNm}$$

Nihkeparandusteguri väärtus y-telje suunas on  $k = 0,234$ .

Tabel L3.7 Ristlõike andmed nihkejäikuse arvutamiseks y-telje suunas

Kiht	$t_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,05,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{r,g,mean,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2	20	1000	20000		540		650
3	30	1000	30000	54		65	
4	6,5	1000	6500		540		650

Plaadi nihkejäikus y-telje suunas vastavalt valemile (2.7):

$$S_{CLT,fi} = (650 \cdot 20000 + 650 \cdot 6500 + 65 \cdot 30000) \cdot 0,234 = 4496347 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 4496,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$S_{CLT,05,fi} = (540 \cdot 20000 + 540 \cdot 6500 + 54 \cdot 30000) \cdot 0,234 = 3735427 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 3735,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## L3.4 Kandevõime pikisuunas

### L3.4.1 Paindekandevõime

Maksimaalne paindemoment tulekahju korral x-telje suunas on  $M_x = 3,7 \text{ kNm/m}$ . Paindepingete jaotus ristlõikes on esitatud joonisel L3.1.

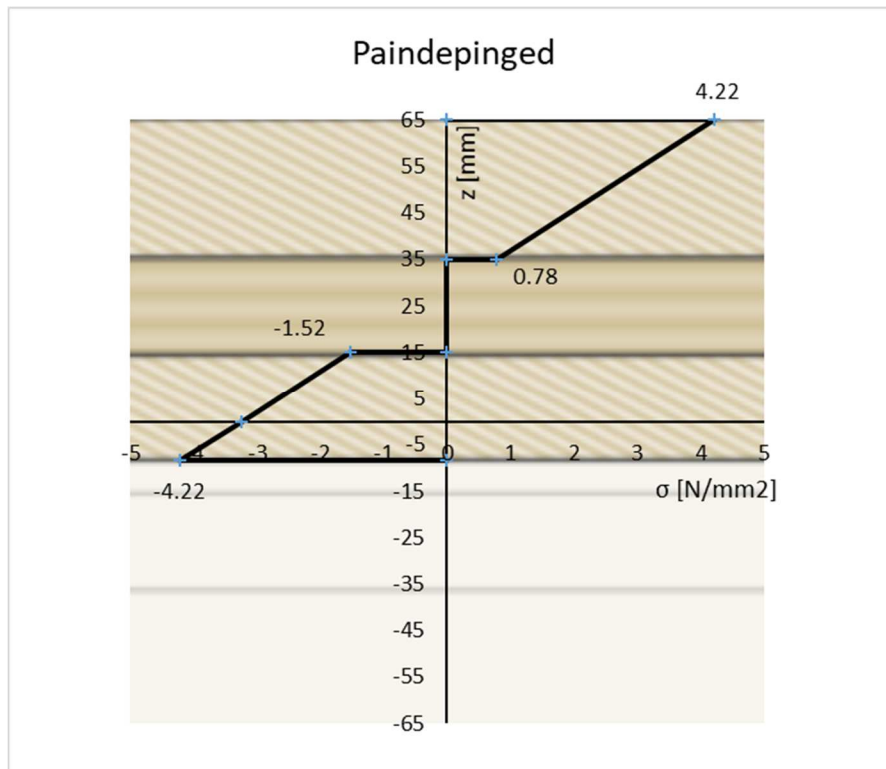
Paindepinged ristlõikes leitakse valemiga (2.14):

$$\sigma_{max,d,fi} = \frac{M_{Ed}}{K_{CLT,fi}} \cdot z \cdot E(z) = \frac{3,7 \cdot 10^6}{3,45 \cdot 10^{11}} \cdot 36,75 \cdot 11000 = 4,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tugevustingimus vastavalt valemile (2.13):

$$\frac{\sigma_{max,d,fi}}{f_{m,CLT,d,fi}} = \frac{4,22}{27,6} = 0,15 < 1,0$$

Paindekandevõime pikisuunas on tulekahju korral tagatud.



Joonis L3.1 Paindepinged ristlõikes paindemomendi mõjumisel pikisuunas

### L3.4.2 Survekandevõime

Maksimaalne survejõud plaadis tulekahju korral on  $N_x = 89 \text{ kN/m}$ .

Tugevustingimus arvestades nõtket vastavalt valemile (2.20):

$$\frac{N_{Ed}}{k_c \cdot A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d,fi}} = \frac{89 \cdot 10^3}{0,108 \cdot 53500 \cdot 27,6} = 0,56 < 1,0$$

Survekandevõime pikisuunas on tagatud.

Vähendustegur  $k_c$  sõltub suhtelisest saledusest, mis omakorda leitakse Euler'i kriitilise koormuse järgi vastavalt valemile (2.21):

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT,05,fi} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,05,fi}}{S_{CLT,05,fi} \cdot l_k^2}\right)} = \frac{2,95 \cdot 10^{11} \cdot \pi^2}{4500^2 \cdot \left(1 + \frac{2,95 \cdot 10^{11}}{6,56 \cdot 10^6 \cdot 4500^2}\right)} = 143635N$$

Suhteline saledus vastavalt valemile (2.25):

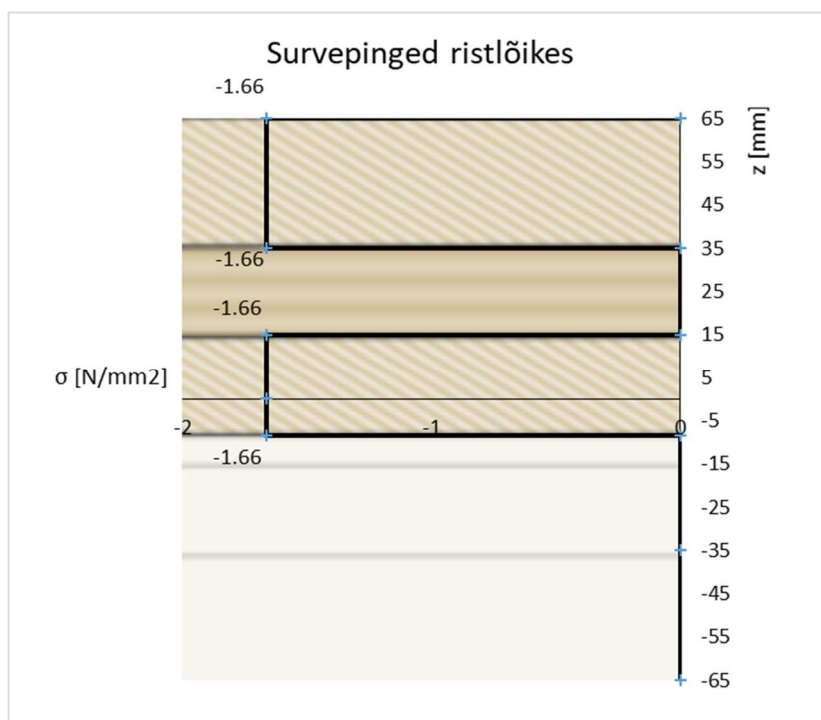
$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,k}}{n_{cr}}} = \sqrt{\frac{53500 \cdot 24}{143635}} = 2,99$$

Abisuurus  $k$  valemiga (2.23):

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (2,99 - 0,3) + 2,99^2) = 5,10$$

Vähendustegur  $k_c$  leitakse valemiga (2.22):

$$k_c = \min \left[ \frac{1,0}{1}, \frac{1,0}{5,10 + \sqrt{5,10^2 - 2,99^2}} \right] = 0,108$$



Joonis L3.2 Survepinged ristlõikes pikisuunas

### L3.4.3 Nihkekandevõime tasapinnast välja

Maksimaalne põikjõud tulekahju korral x-telje suunas on  $V_x = 5,4$  kN/m.

Maksimaalse nihkepinge kontroll nihketugevuse järgi pikisuunalistes kihtides vastavalt valemile (2.32):

$$\frac{\tau_{max,d,fi}}{f_{v,CLT,d,fi}} = \frac{0,104}{3,45} = 0,03 < 1,0$$

Nihkepinged kihtides 1 ja 3 vastavalt valemile (2.31):

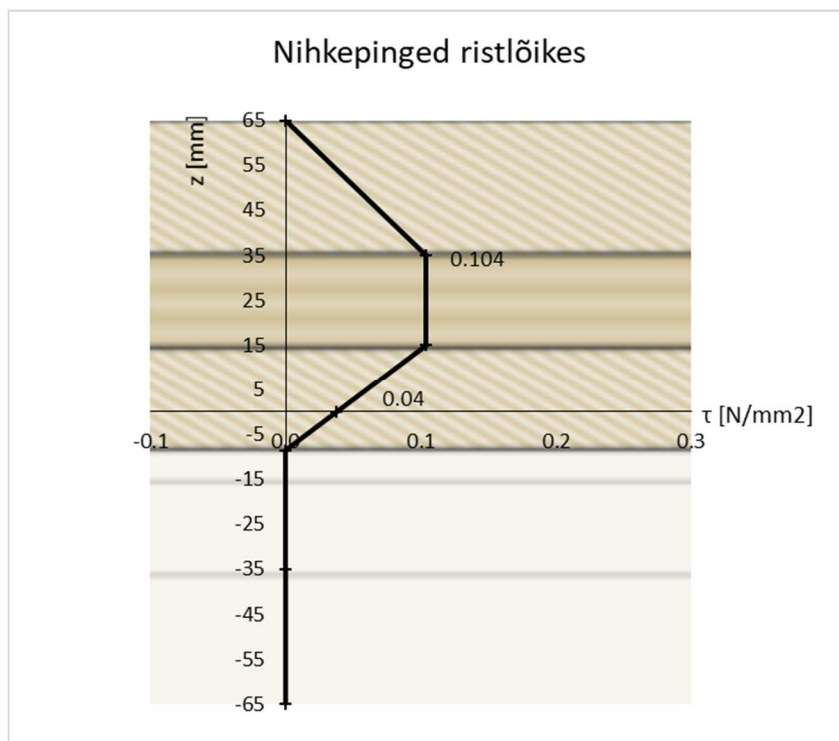
$$\tau_{max,d,fi} = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT,fi} \cdot b(z)} = \frac{5,4 \cdot 10^3 \cdot 620000 \cdot 11000}{3,54 \cdot 10^{11} \cdot 1000} = 0,104 \frac{N}{mm^2}$$

Maksimaalse nihkepinge kontroll külgnihketugevuse järgi ristuvates kihtides vastavalt valemile (2.33):

$$\frac{\tau_{r,max,d,fi}}{f_{r,CLT,d,fi}} = \frac{0,104}{1,44} = 0,07 < 1,0$$

Nihkepinged kihis 2 vastavalt valemile (2.31):

$$\tau_{r,max,d,fi} = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT,fi} \cdot b(z)} = \frac{5,4 \cdot 10^3 \cdot 620000 \cdot 11000}{3,54 \cdot 10^{11} \cdot 1000} = 0,104 \frac{N}{mm^2}$$



Joonis L3.3 Nihkepinged plaadis pikisuunas

### L3.4.4 Paindemomendi ja pikijõu koosmõju

Kuna plaadile mõjub tulekahju korral samaaegselt survejõud ja paindemoment, tuleb arvestada nende koosmõju vastavalt [17]. Tugevustingimus survejõu ja paindemomendi koosmõjul on esitatud valemis (3.4). Antud konstruktsiooni korral on kõige kriitilisem punkt koosmõju poolest punkt, kus asub ka maksimaalne survejõud  $N_x = 89 \text{ kN/m}$ . Selles punktis on vastav paindemoment pikisuunas  $M_x = -0,34 \text{ kNm/m}$ .

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1$$

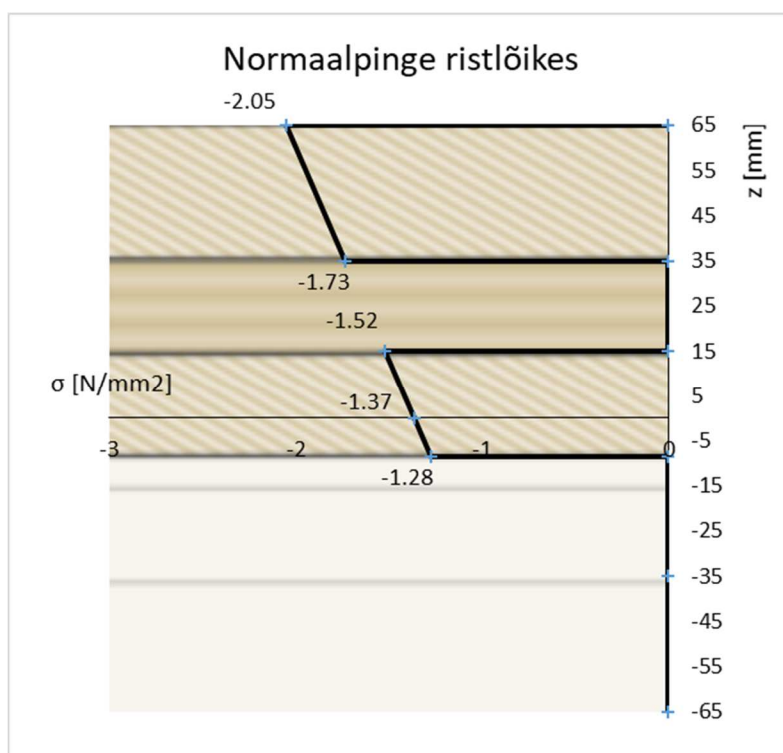
Kus  $\sigma_{c,0,d}$  – survepinge pikisuunas,  $\sigma_{c,0,d} = 1,66 \text{ N/mm}^2$ ,

$\sigma_{m,0,d}$  – Paindepinge,  $\sigma_{m,0,d} = 0,39 \text{ N/mm}^2$ .

Tugevustingimuse kontroll:

$$\frac{\sigma_{c,0,d,fi}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d,fi}} + \frac{\sigma_{m,0,d,fi}}{f_{m,CLT,d,fi}} = \frac{1,66}{0,108 \cdot 27,6} + \frac{0,39}{27,6} = 0,57 < 1$$

Tugevustingimus pikisuunas paindemomendi ja pikijõu koosmõjul tulekahju korral on täidetud.



Joonis L3.4 Normaalsurve ristlõikes pikijõu ja paindemomendi koosmõjust pikisuunas

## L3.5 Kandevõime ristisuunas

### L3.5.1 Paindekandevõime

Maksimaalne paindemoment tulekahju korral y-telje suunas on  $M_y = -0,83$  kNm/m. Paindepingete jaotus ristlõikes on esitatud joonisel L3.5.

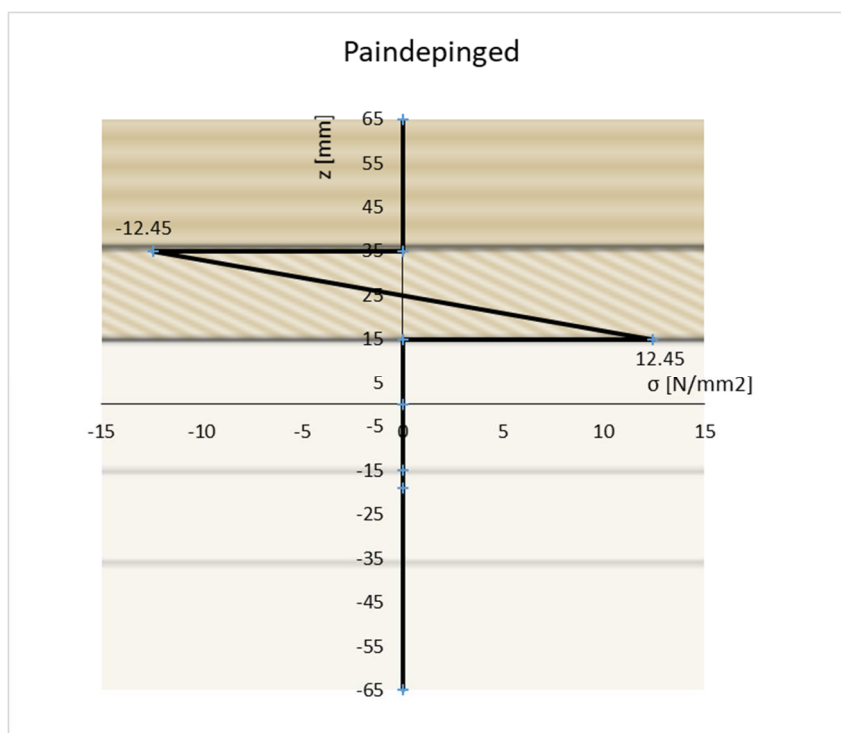
Paindepinged ristlõikes leitakse valemiga (2.14):

$$\sigma_{max,d,fi} = \frac{M_{Ed}}{K_{CLT,fi}} \cdot z \cdot E(z) = \frac{0,83 \cdot 10^6}{7,33 \cdot 10^9} \cdot 10 \cdot 11000 = 12,45 \frac{N}{mm^2}$$

Tugevustingimus vastavalt valemile (2.13):

$$\frac{\sigma_{max,d,fi}}{f_{m,CLT,d,fi}} = \frac{12,45}{27,6} = 0,45 < 1,0$$

Paindekandevõime y-telje suunas on tagatud.



Joonis L3.5 Paindepinged ristlõikes paindemomendi mõjumisel y-telje suunas



### L3.5.2 Survekandevõime

Maksimaalne y-telje suunas on  $N_y = 42,6 \text{ kN/m}$ . Maksimaalne survejõud esineb ristlõikes tsoonis 1 tõmbevarda ja CLT-plaadi liitumiskohas. Selleks, et nõtkekandevõime oleks tagatud tuleb otsatugede vahelist ala kaitsta. Tugevustingimus arvestades nõtket vastavalt valemile (2.20):

$$\frac{N_{Ed}}{k_c \cdot A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d,fi}} = \frac{42,6 \cdot 10^3}{0,245 \cdot 26500 \cdot 27,6} = 0,24 < 1,0$$

Survekandevõime on tagatud.

Vähendustegur  $k_c$  sõltub suhtelisest saledusest, mis omakorda leitakse Euler'i kriitilise koormuse järgi vastavalt valemile (2.21):

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT,05,fi} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,05,fi}}{S_{CLT,05,fi} \cdot l_k^2}\right)} = \frac{1,05 \cdot 10^{11} \cdot \pi^2}{2500^2 \cdot \left(1 + \frac{1,05 \cdot 10^{11}}{3,74 \cdot 10^6 \cdot 2500^2}\right)} = 164475 \text{ N}$$

Suhteline saledus vastavalt valemile (2.25):

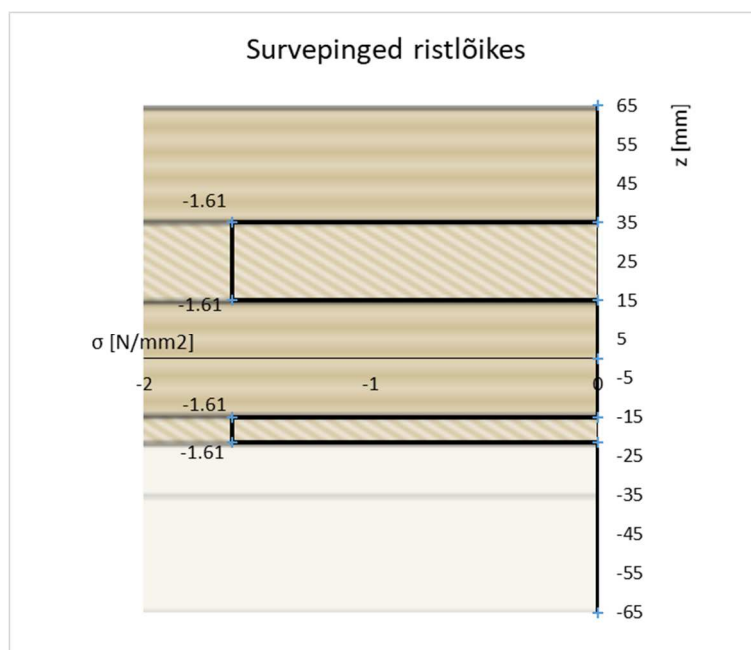
$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,k}}{n_{cr}}} = \sqrt{\frac{26500 \cdot 24}{164475}} = 1,97$$

Abisuurus  $k$  valemiga (2.23):

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,97 - 0,3) + 1,97^2) = 2,52$$

Vähendustegur  $k_c$  leitakse valemiga (2.22):

$$k_c = \min \left[ \frac{1,0}{1}, \frac{1,0}{2,52 + \sqrt{2,52^2 - 1,97^2}} \right] = 0,245$$



Joonis L3.6 Survepinged ristlõikes ristisuunas

### L3.5.3 Nihkekandevõime

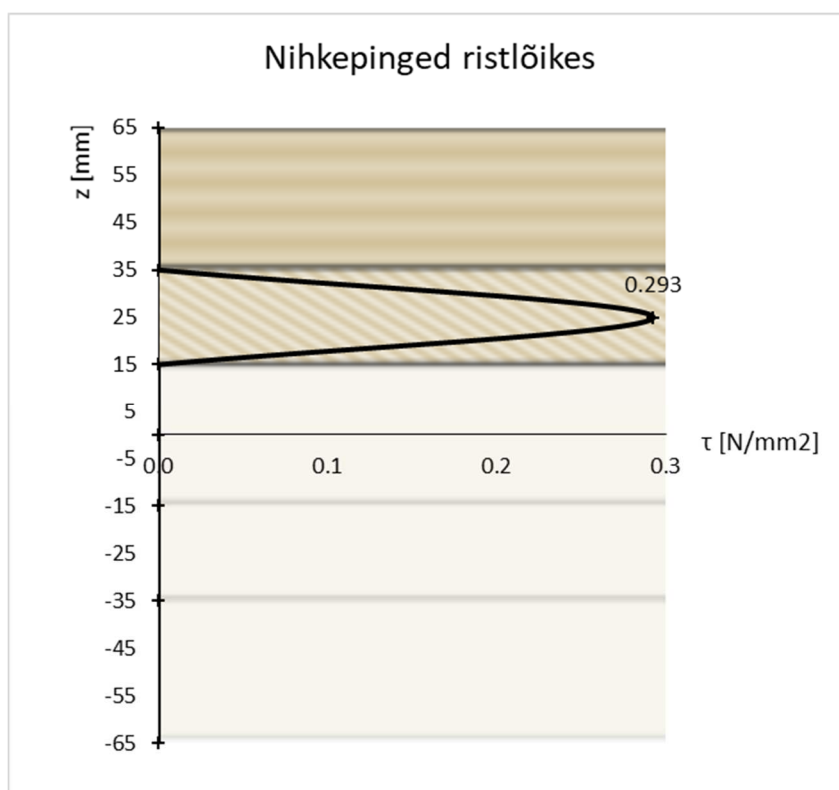
Maksimaalne põikjõud tulekahju korral y-telje suunas on  $V_y = 3,9$  kN/m.

Maksimaalse nihkepinge kontroll nihketugevuse järgi pikisuunalistes kihtides vastavalt valemile (2.32):

$$\frac{\tau_{max,d,fi}}{f_{v,CLT,d,fi}} = \frac{0,293}{3,45} = 0,08 < 1,0$$

Nihkepinged kihis 2 vastavalt valemile (2.31):

$$\tau_{max,d,fi} = \frac{V_{Ed} \cdot \sum S \cdot E_{0,mean}}{K_{CLT,fi} \cdot b(z)} = \frac{3,9 \cdot 10^3 \cdot 50000 \cdot 11000}{7,33 \cdot 10^9 \cdot 1000} = 0,293 \frac{N}{mm^2}$$



Joonis L3.7 Nihkepinged plaadis ristisuunas

### L3.5.4 Paindemomendi ja pikijõu koosmõju

Tugevustingimus survejõu ja paindemomendi koosmõjul on esitatud valemis (3.4). Antud konstruktsiooni korral on kõige kriitilisem punkt koosmõju poolest punkt, kus asub ka maksimaalne survejõud  $N_y = 42,6 \text{ kN/m}$ . Selles punktis on vastav paindemoment  $M_y = 0,05 \text{ kNm/m}$ .

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1$$

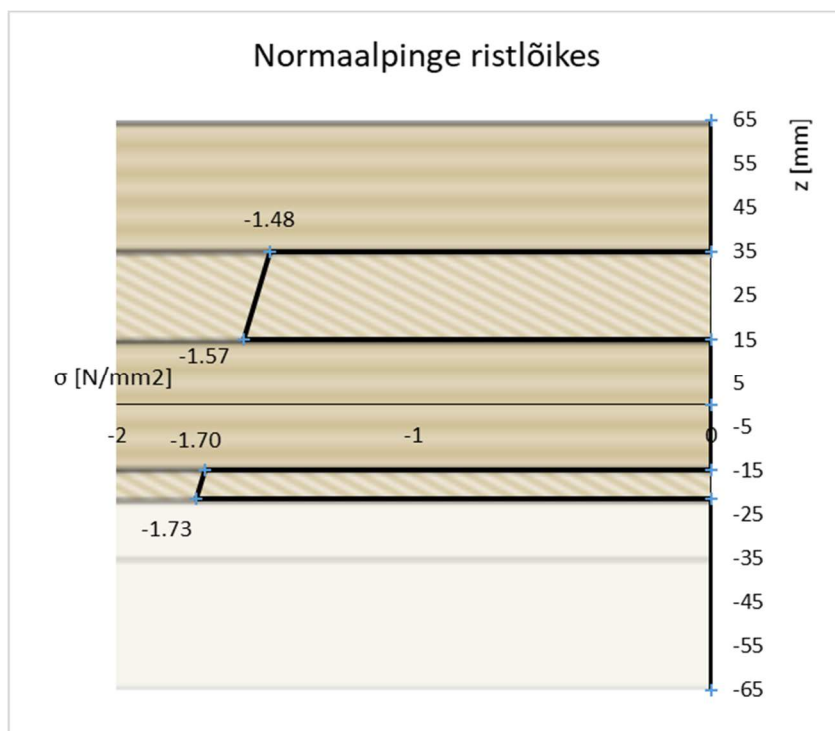
Kus  $\sigma_{c,0,d}$  – survepinge pikisuunas,  $\sigma_{c,0,d} = 1,61 \text{ N/mm}^2$ ,

$\sigma_{m,0,d}$  – Paindepinge,  $\sigma_{m,0,d} = 0,12 \text{ N/mm}^2$ .

Tugevustingimuse kontroll:

$$\frac{\sigma_{c,0,d,fi}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,net,d,fi}} + \frac{\sigma_{m,0,d,fi}}{f_{m,CLT,d,fi}} = \frac{1,61}{0,245 \cdot 27,6} + \frac{0,12}{27,6} = 0,24 < 1$$

Tugevustingimus paindemomendi ja pikijõu koosmõjul y-telje suunas on täidetud.



Joonis L3.8 Normaalpinge ristlõikes pikijõu ja paindemomendi koosmõjust ristisuunas

### L3.5.5 Tõmbekandevõime

Maksimaalne tõmbejõud tulekahju korral y-telje suunas on  $n_y = 9,6 \text{ kN/m}$ . Tõmbekandevõimet ristlõikes kontrollitakse valemiga (2.18).

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net,ef}} = \frac{9,6 \cdot 10^3}{20000} = 0,48 \text{ N/mm}^2 < f_{t,0,CLT,d,fi} = 18,4 \text{ N/mm}^2$$

Tõmbekandevõime on tagatud.

### L3.6 Nihkekandevõime plaadi tasandis

Maksimaalne nihkejõud plaadi tasandis tulekahju korral on  $n_{xy} = 39,9$  kN/m. Kihtidevahelised punktid ja paksused  $t_i^*$  on leitud vastavalt tabelile 2.4.

Tabel L3.8 Kihipaksused  $t_i^*$

		ti [mm]	ti* [mm]
punkt 1	kiht 1	30	20
	kiht 2	20	
punkt 2	kiht 2	20	20
	kiht 3	23,5	

Kogupaksus  $t^*$  vastavalt valemile (2.34):

$$t^* = \sum_{i=1}^{n-1} t_i^* = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm} < t_{CLT,fi} = 73,5 \text{ mm}$$

Proportsionaalne nihkejõud  $n_{xy,RVSE(i)}$  vastavalt valemile (2.35):

$$n_{xy,RVSE(i)}^* = \frac{n_{xy}}{t^*} \cdot t_i^* = \frac{39,9}{40} \cdot 20 = 19,95 \frac{N}{mm}$$

Ideaalne nihkepinge  $\tau_{0,RVSE(i)}^*$  leitakse valemiga (2.36):

$$\tau_0^* = \frac{n_{xy}}{t^*} = \frac{19,95}{20} = 0,998 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanism I puhul leitakse efektiivne nihkepinge  $\tau_v^*$  vastavalt valemile (2.37):

$$\tau_v^* = 2 \cdot \tau_0^* = 2 \cdot 0,998 = 1,995 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanismi I tugevustingimus vastavalt valemile (2.38):

$$|\tau_v^*| = 2,0 \text{ N/mm}^2 < f_{v,CLT,d,fi} = 5,8 \text{ N/mm}^2$$

Mehhanismi II puhul on vaja leida väändemoment igas punktis. Kuna kihtide paksused  $t_i^*=20$  mm iga punkti korral, siis on ka väändemomendid võrdsed. Lamellide paksuse ja laiuse suhe on 1:5 seega 20 mm paksuse lamelli laius  $a = 100$  mm.

väändemoment  $M_{T,i}$  vastavalt valemile (2.39):

$$M_{T,i} = \tau_0^* \cdot t_i^* \cdot a^2 = 0,998 \cdot 20 \cdot 100^2 = 199500 \text{ Nmm}$$

Väändepinge  $\tau_{T,i}^*$  vastavalt valemile (2.40):

$$\tau_{T,i}^* = \frac{M_{T,i}}{W_p} = 3 \cdot \tau_0^* \cdot \frac{t_i^*}{a} = 3 \cdot 0,998 \cdot \frac{20}{100} = 0,60 \frac{N}{mm^2}$$

Mehhanismi II tugevustingimus vastavalt valemile (2.41):

$$|\tau_T^*| = 0,60 \text{ N/mm}^2 < f_{T,node,d,fi} = 2,88 \text{ N/mm}^2$$

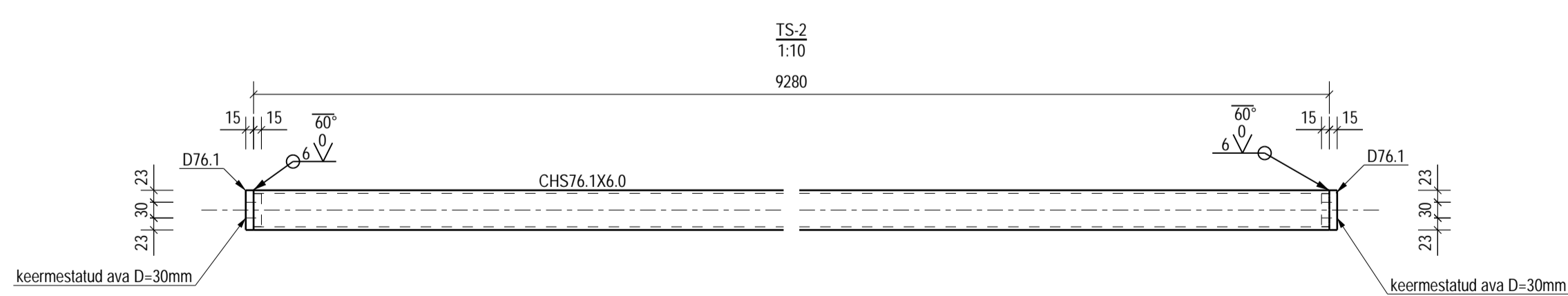
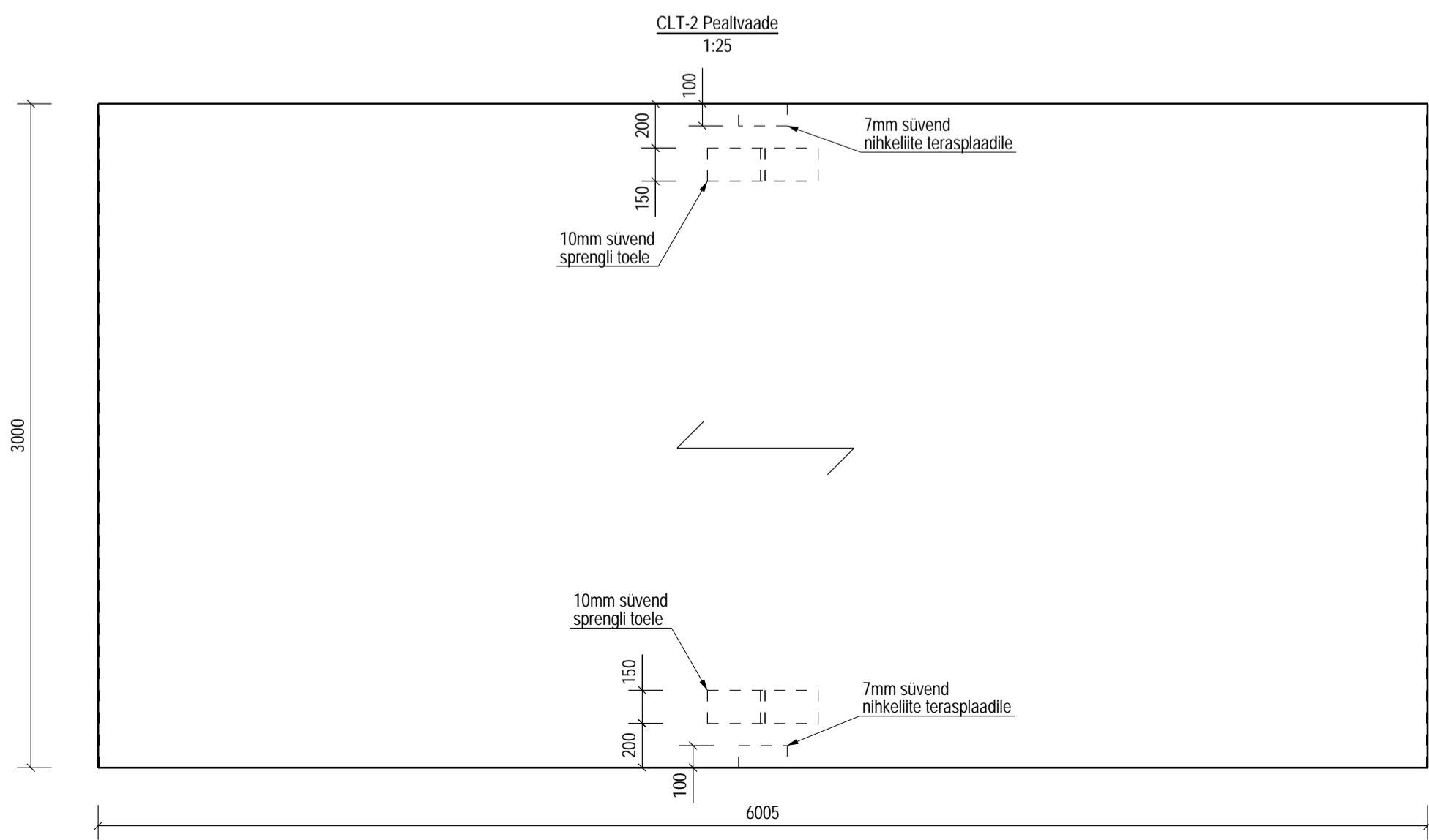
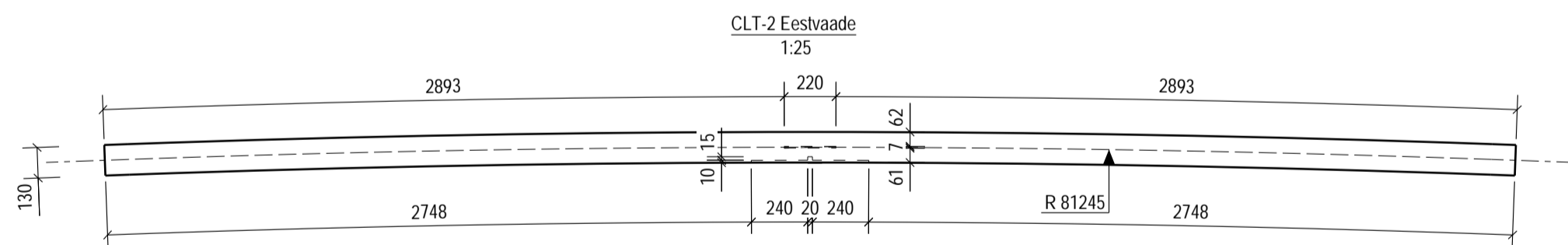
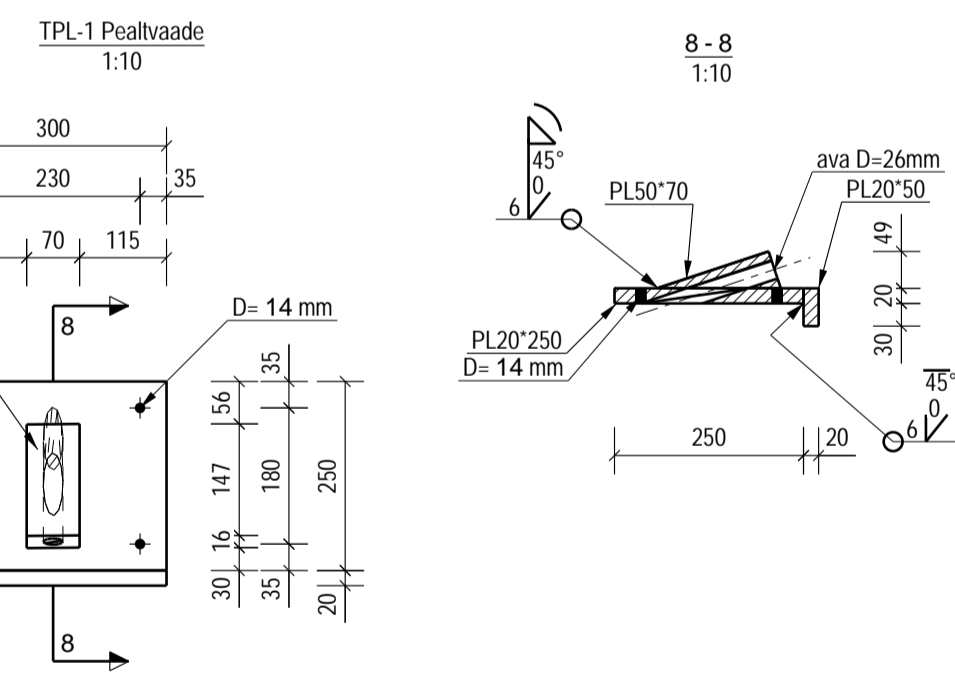
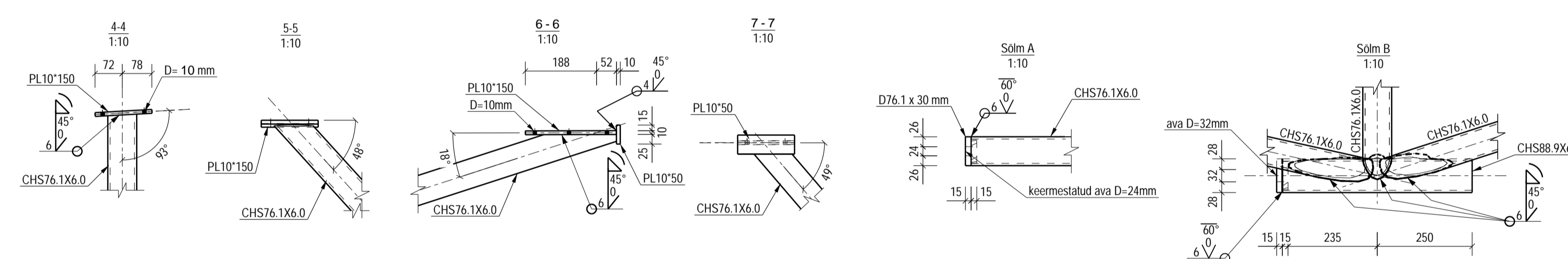
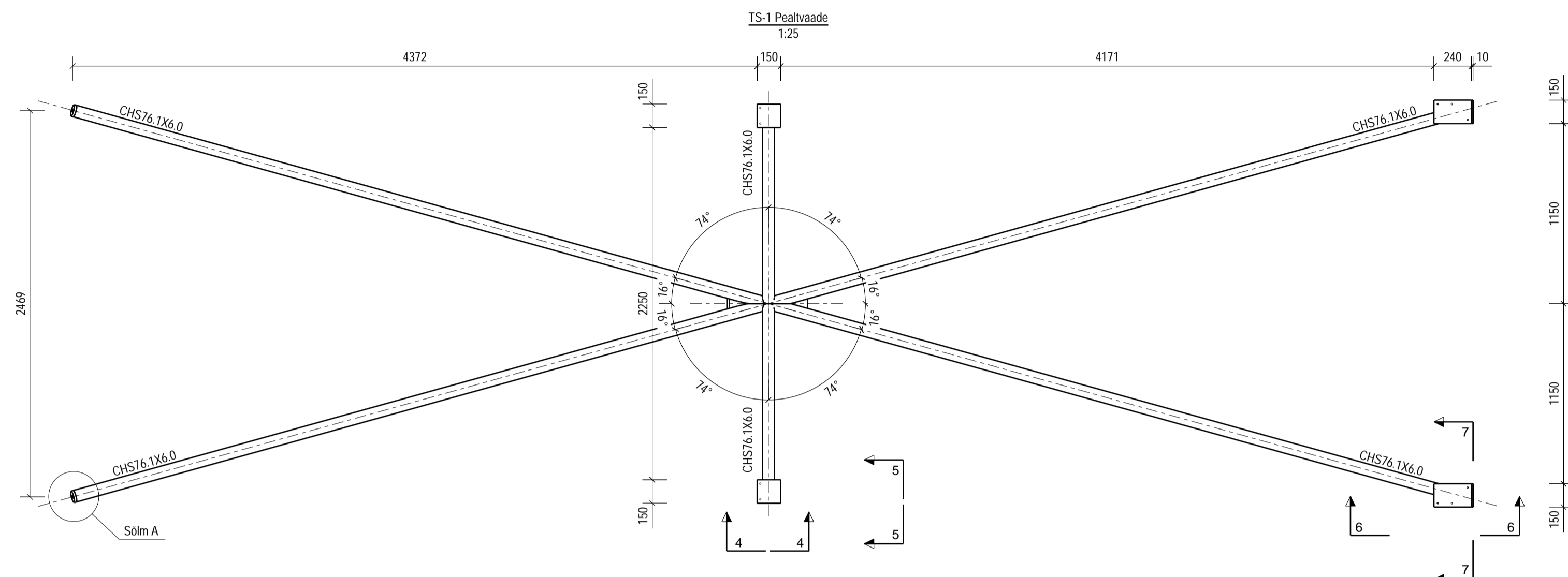
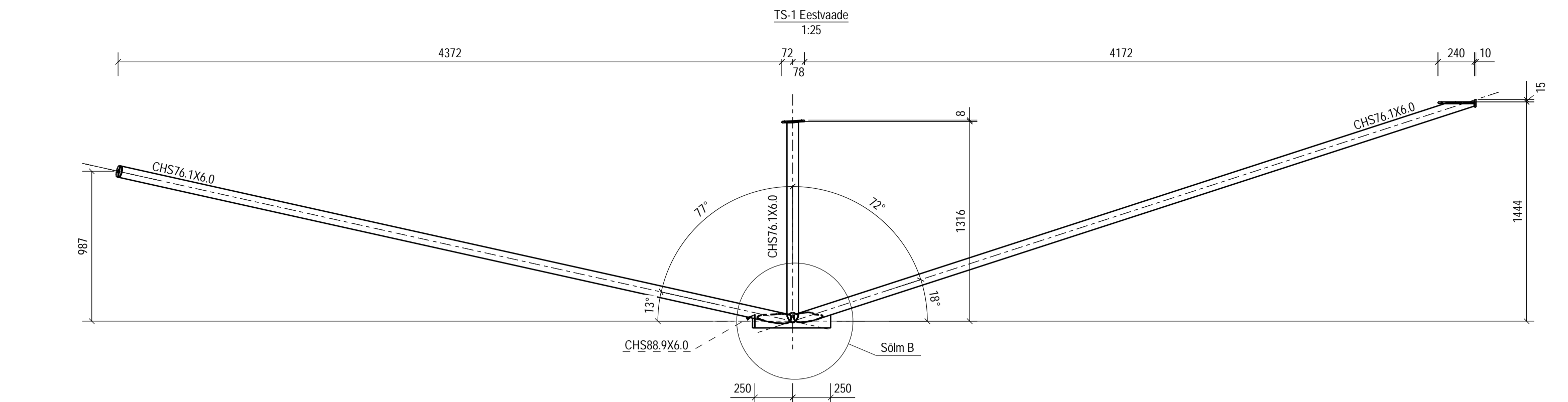
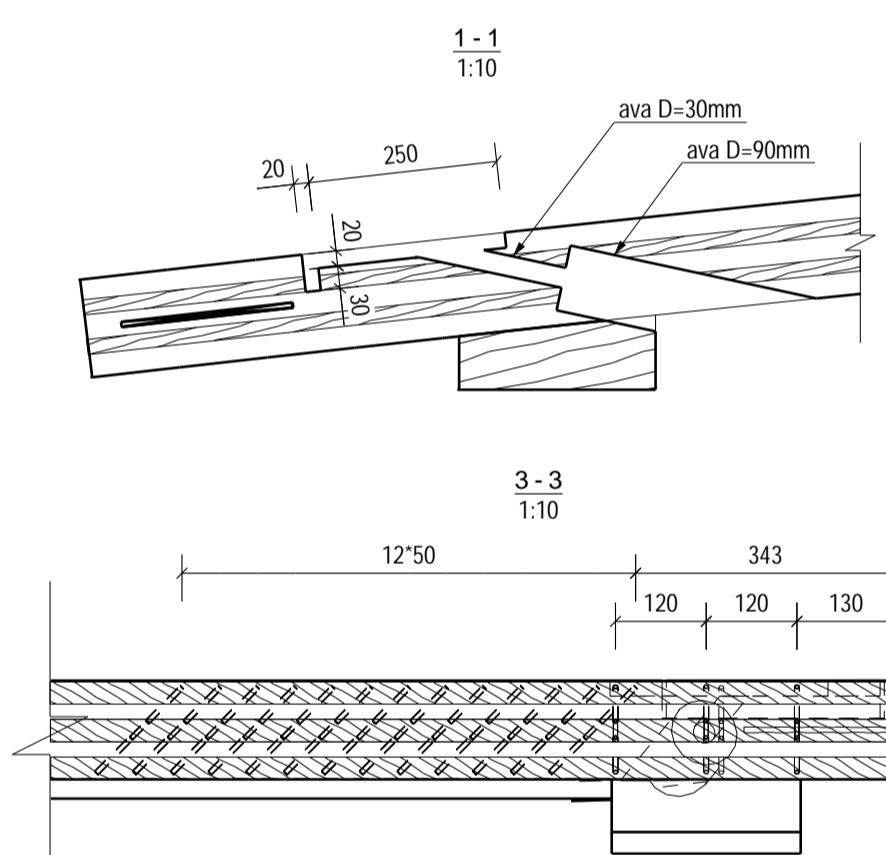
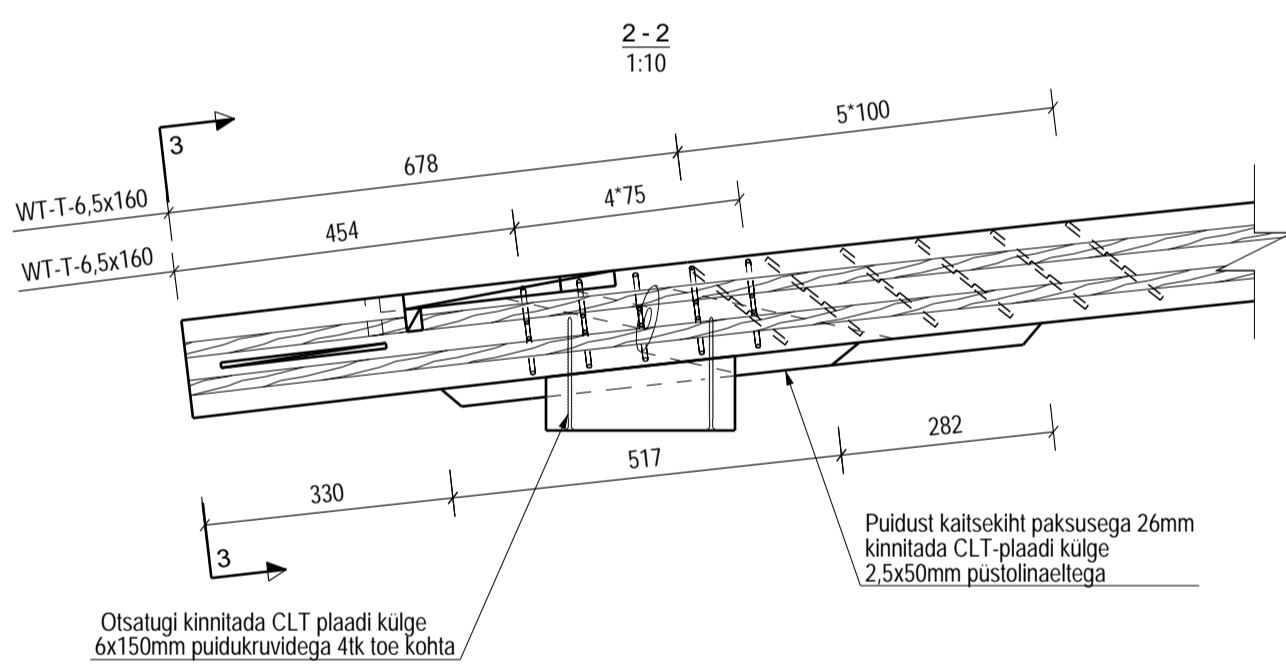
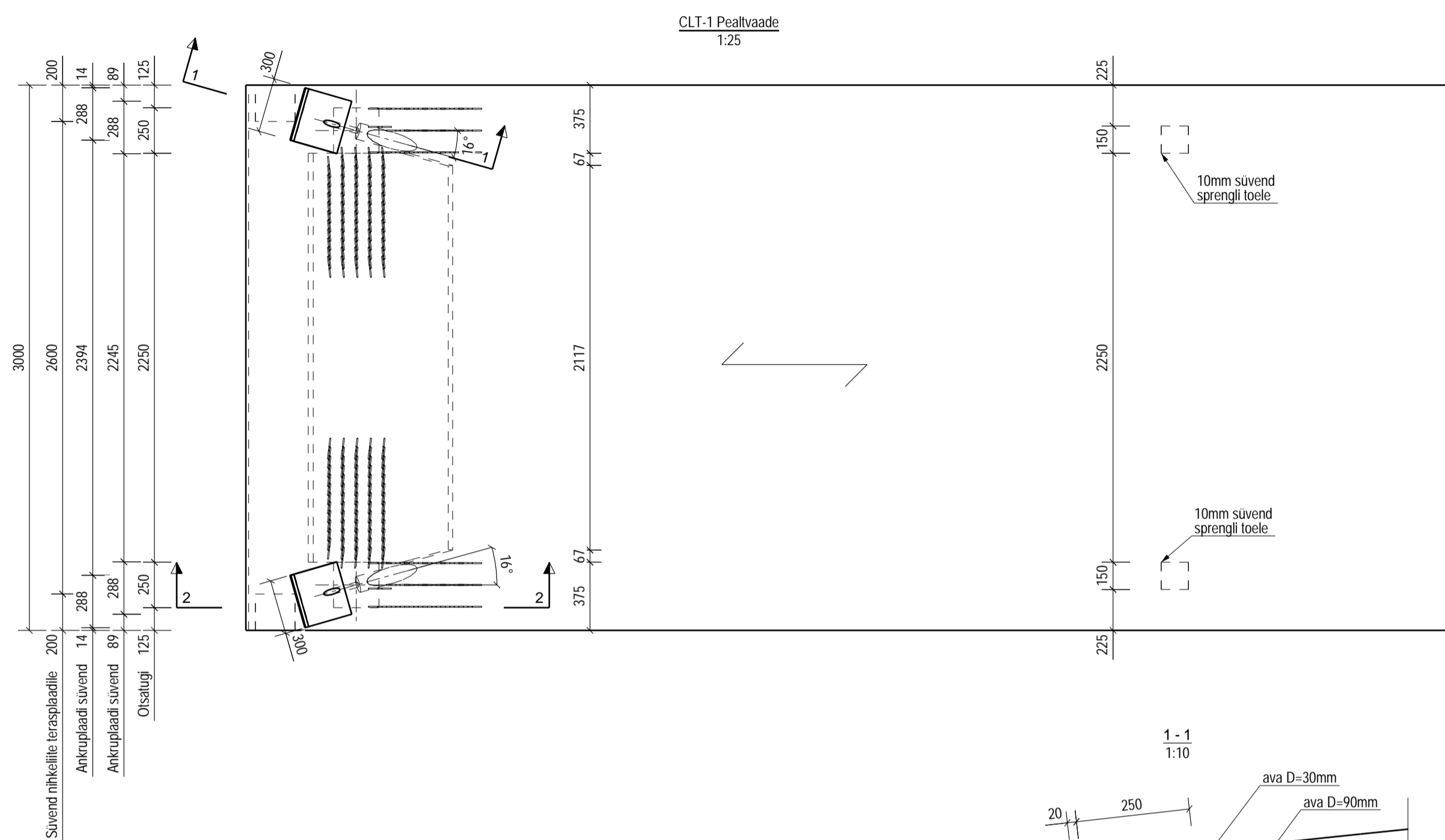
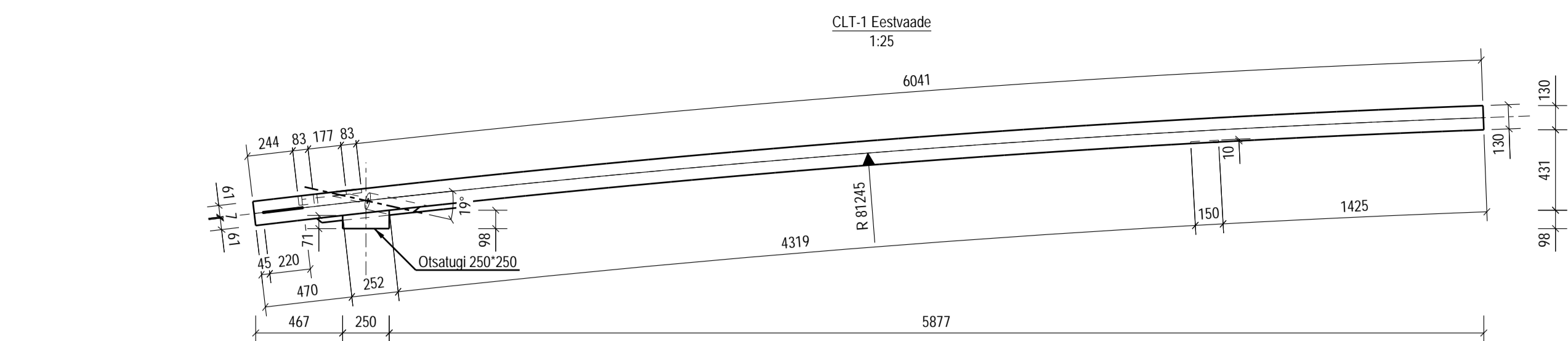
Tugevustingimus on täidetud.

## **GRAAFILINE OSA**

Elemendi koostude joonis.....(841x594)

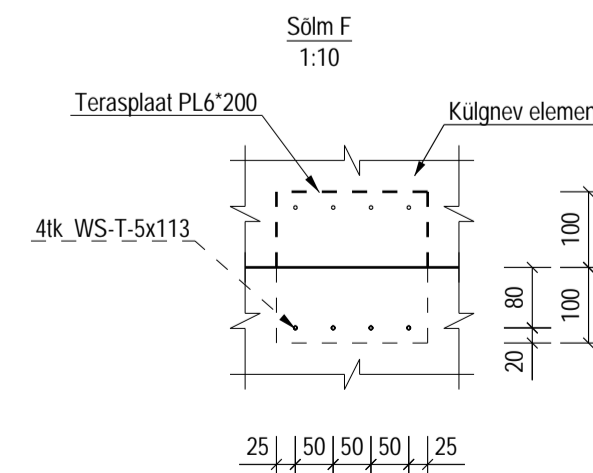
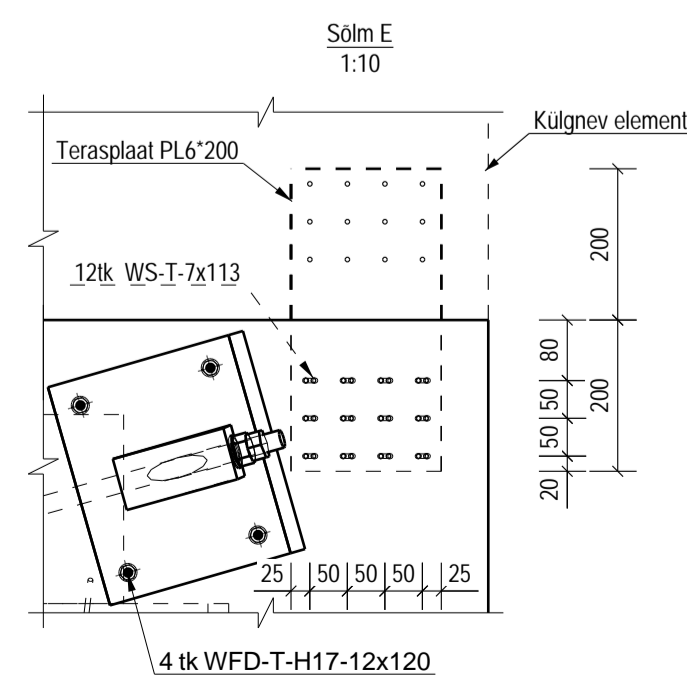
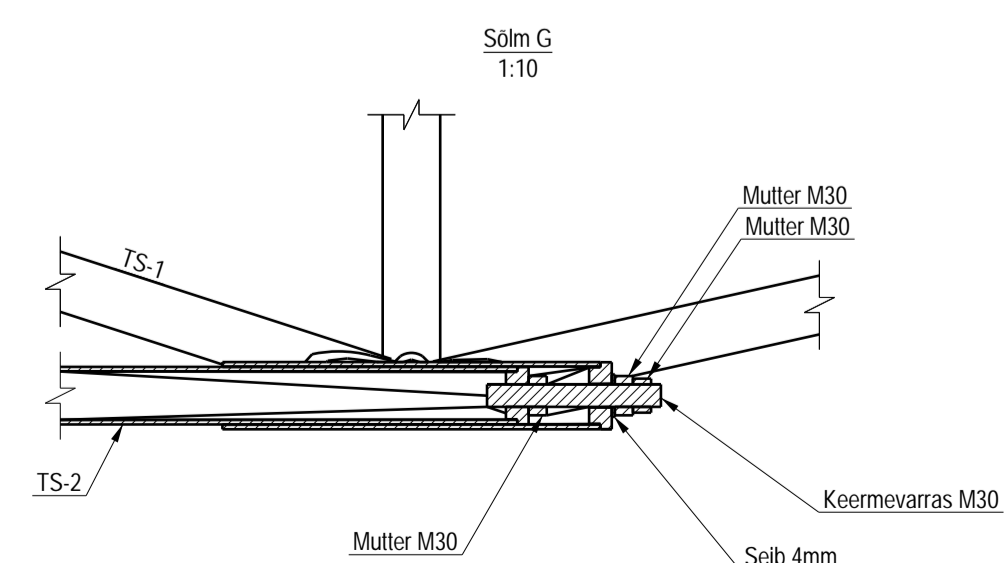
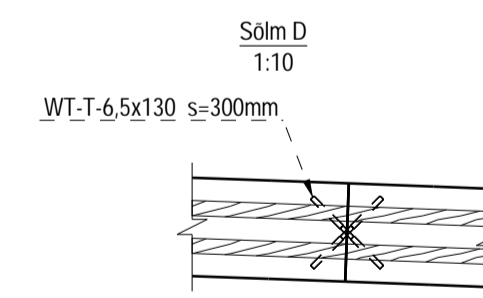
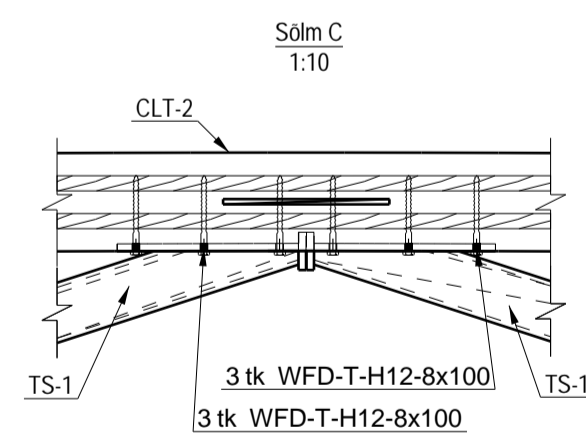
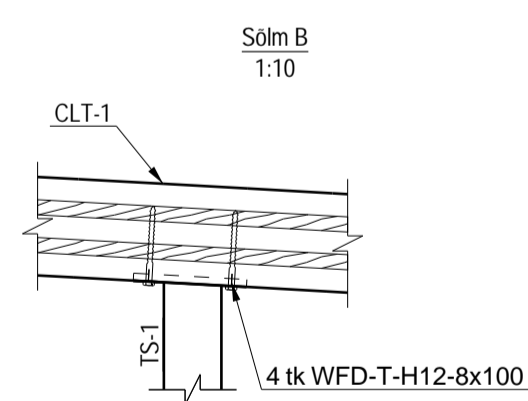
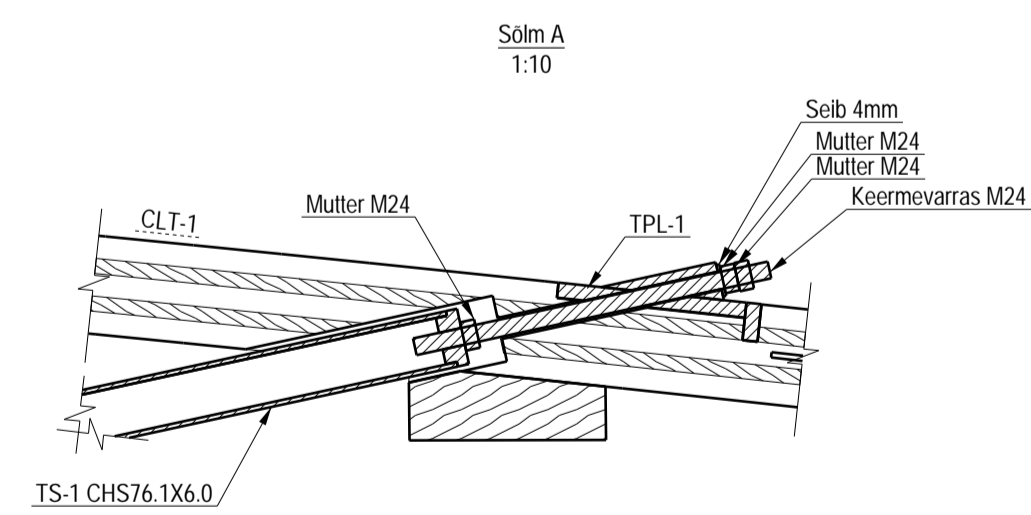
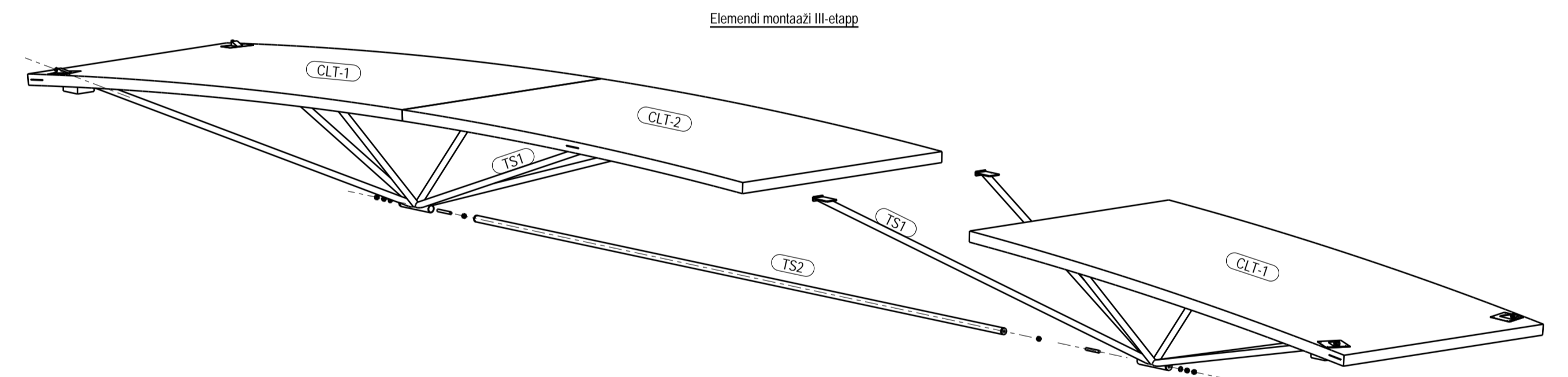
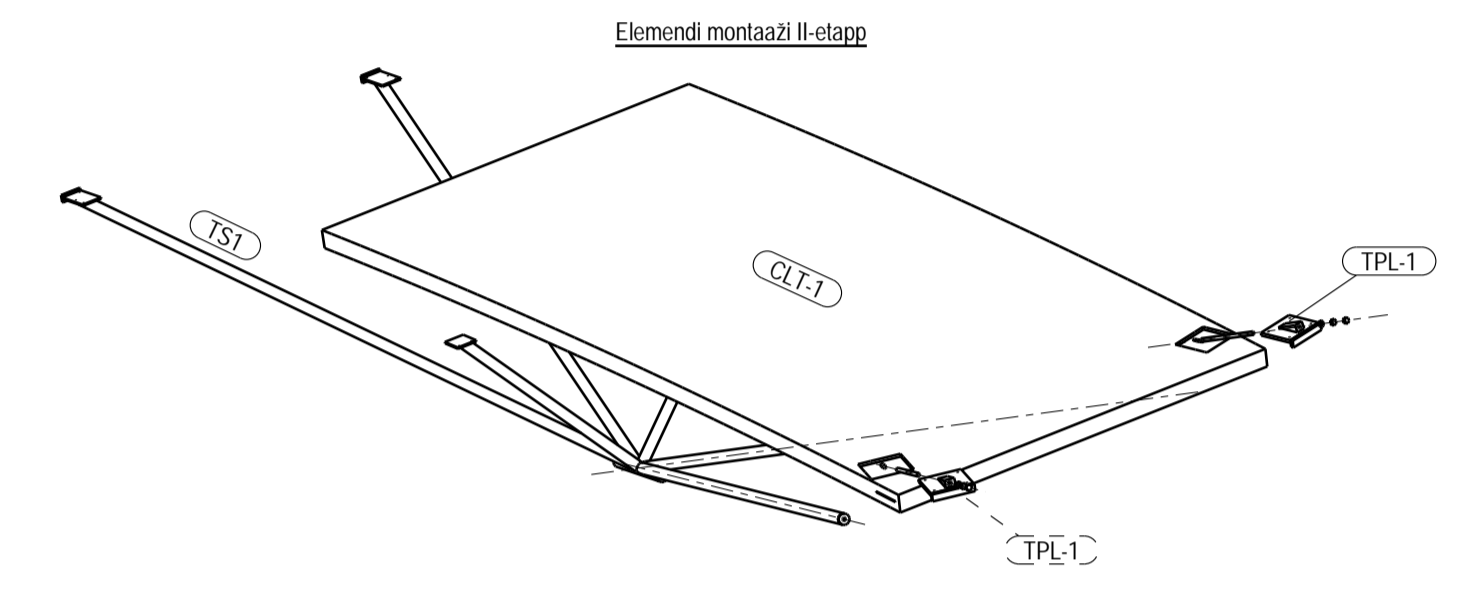
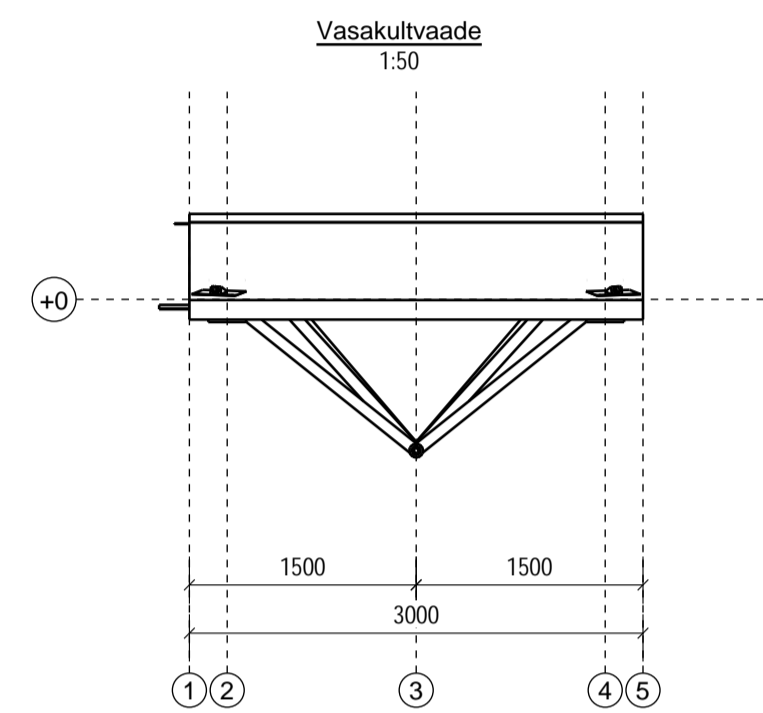
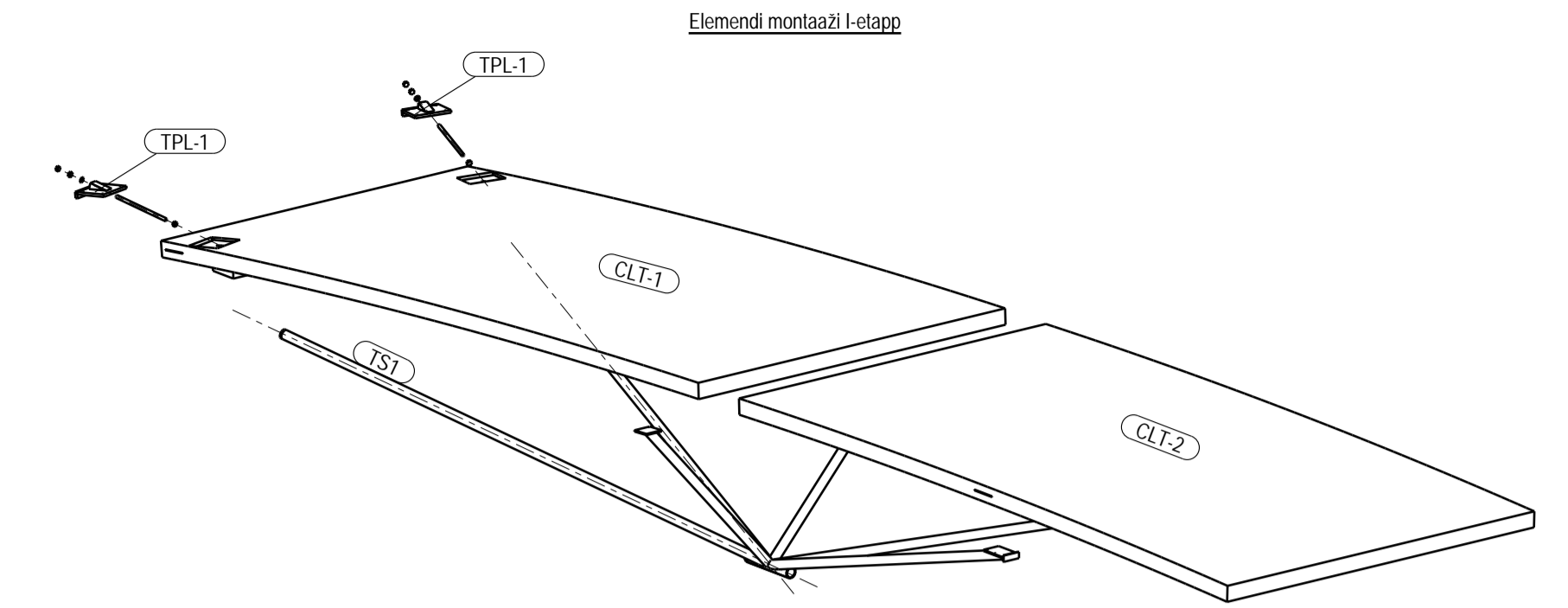
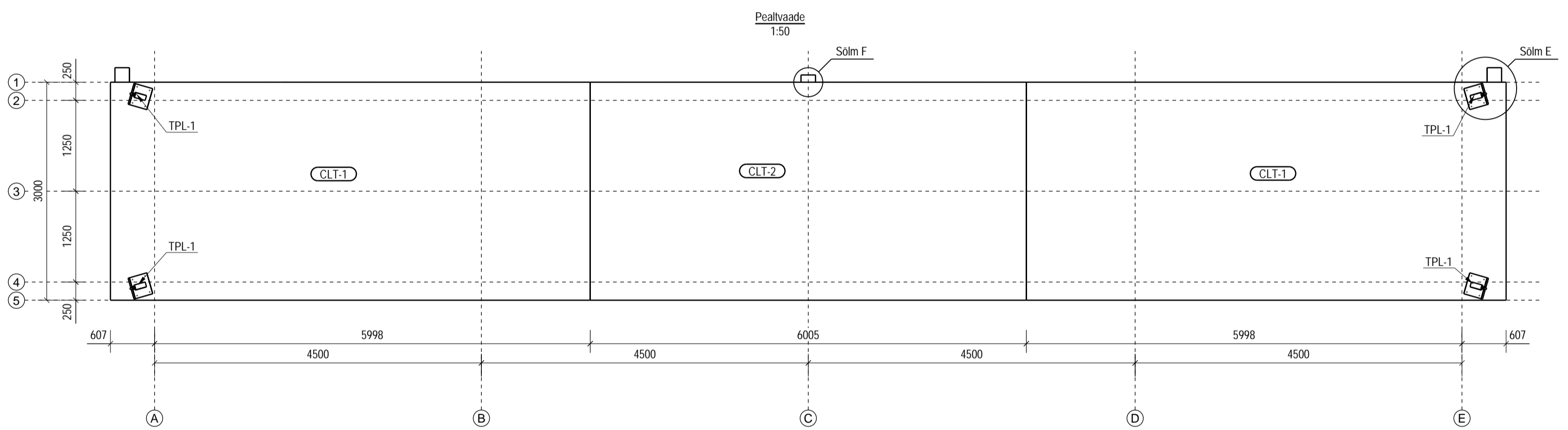
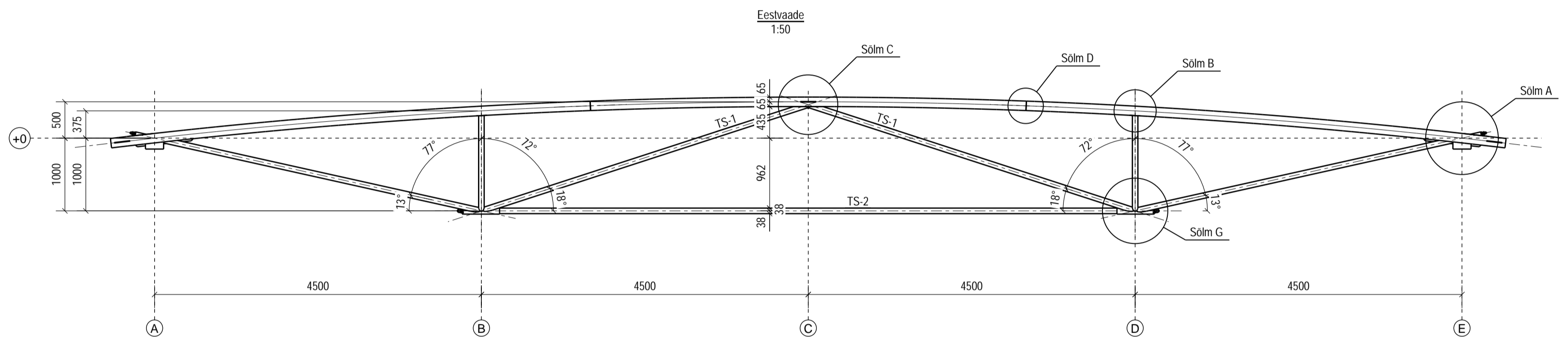
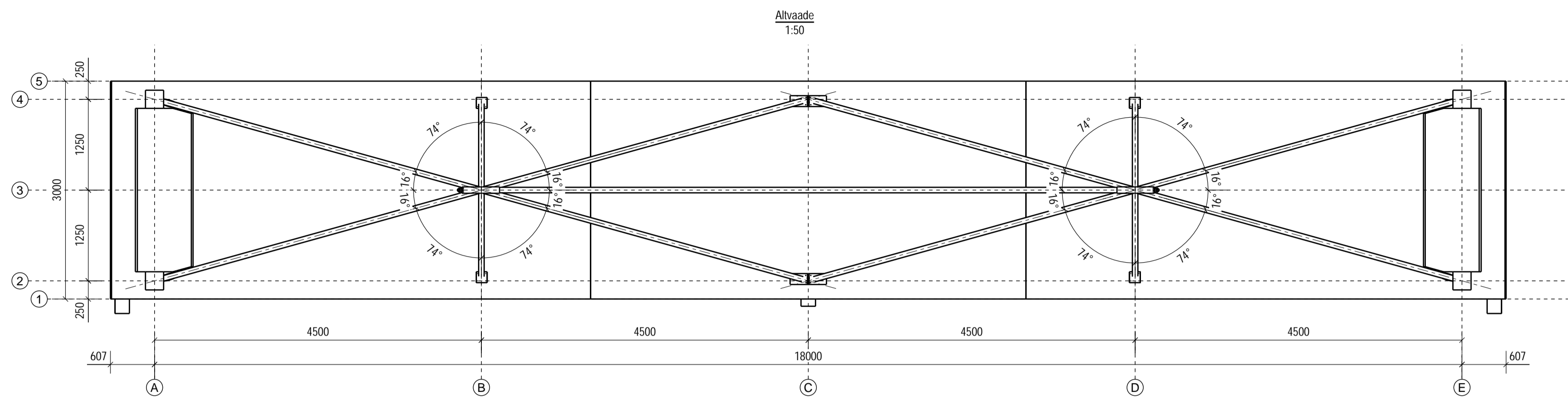
Konstruksioonelemendi montaažijoonis.....(841x594)

Sisejõud ja deformatsioonid.....(841x594)



- Märkused:**
- Ristkihtliimpuidu tugevusklass CL24h / EVS-EN 14080:2013
  - CLT-konstruktsioonide valmistamisel lähtuda standardist EVS-EN 16351:2015.
  - Terase tugevusklass S355 / EVS-EN 10025-1:2006.
  - Teraskonstruktsioonide valmistamisel lähtuda standardist EVS-EN 1090-2:2018.
  - Kõigi keeviste tugevus terasdetailide sõlmedes peab vastama ühendatavate terasprofiilide tugevusele kui ei ole märgitud teisiti.
  - Elementid tuleb kvaliteetsete õmbluste saavutamiseks eeltoodelda (vajadusel servad nõuetekohaselt faasida).
  - Keemisõmblused puhastatakse räbust ja silutakse.
  - Konstruktsiooni tulepüsivus R-60min

<b>TAL TECH</b>	<b>TTÜ INSENERITEADUSKOND</b>	Magistritöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Ralf Makienko	Juhendaja: Eero Tuhkanen	Elemendi koostude joonis	
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Ristkihtliimpuidust sprengel- kandekonstruktsiooni projekteerimine	



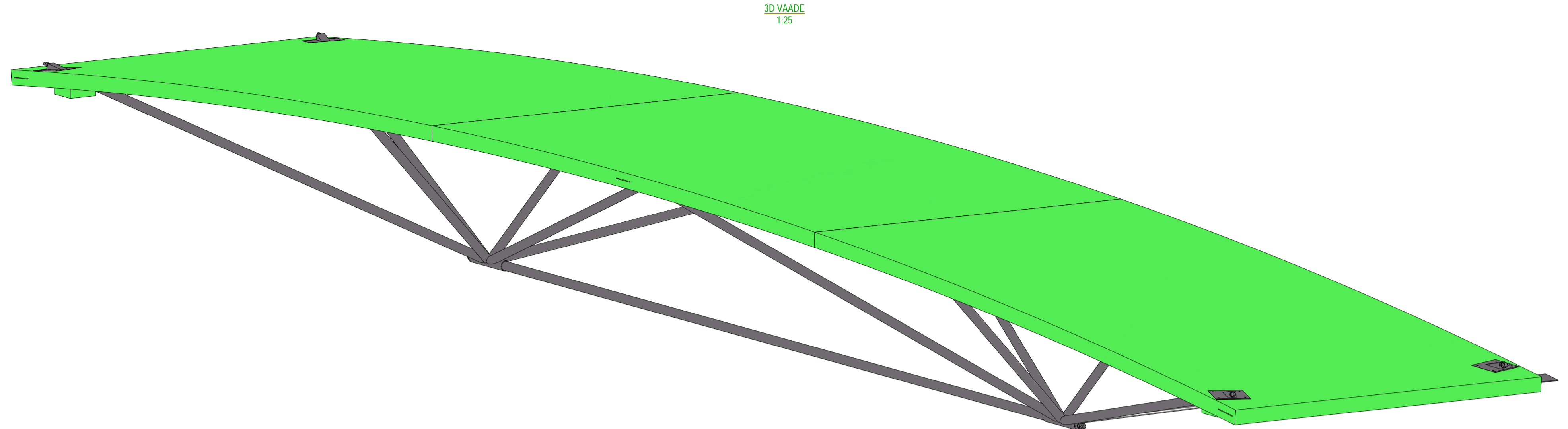
KOOSTUDE KOKKUVÕTE KONSTRUKTSIOONIELEMENDIS:

Koost	kogus [tk]	ühiku mass [kg/tk]	mass kokku [kg]
CLT-1	2	1321	2642
CLT-2	1	1169.4	1169.4
TPL-1	4	15.7	62.8
TS-1	2	253.7	507.4
TS-2	1	97.6	97.6
<b>Kokku [kg]:</b>			<b>4479.2</b>

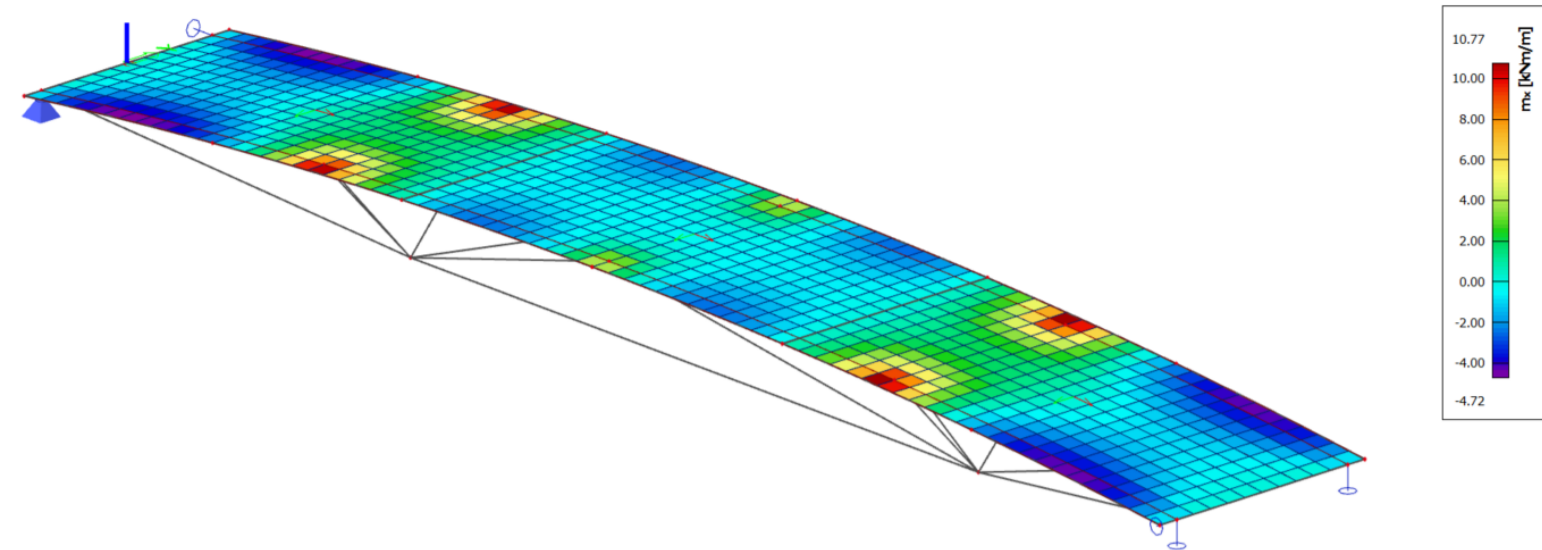
Märkused:

- Ristkihtliimpuidu tugevusklass CL24h / EVS-EN 14080:2013.
- CLT-konstruktsioonid valmistada vastavalt standardile EVS-EN 16351:2015.
- Teras tugevusklass S355 / EVS-EN 10025-1:2006.
- Terasstruktsioonid valmistada ja paigaldada vastavalt standardile EVS-EN 1090-2:2018.
- Konstruktsioonelemendi kokku monteerimine teostada vastavalt joonisel esitatud sõlmedele.
- Kui monteerimise käigus kahjustatakse terase tulekaitsevärvi, tuleb kahjustunud kohad parandada.
- Konstruktsioonelemendi kokku monteerimisel pingutada mutrid selliselt, et elemendis ei esineks lõtkusid. Kontramutrite pingutusmoment vastavalt tootja juhistele.
- Keermevarraste tugevusklass 8.8.

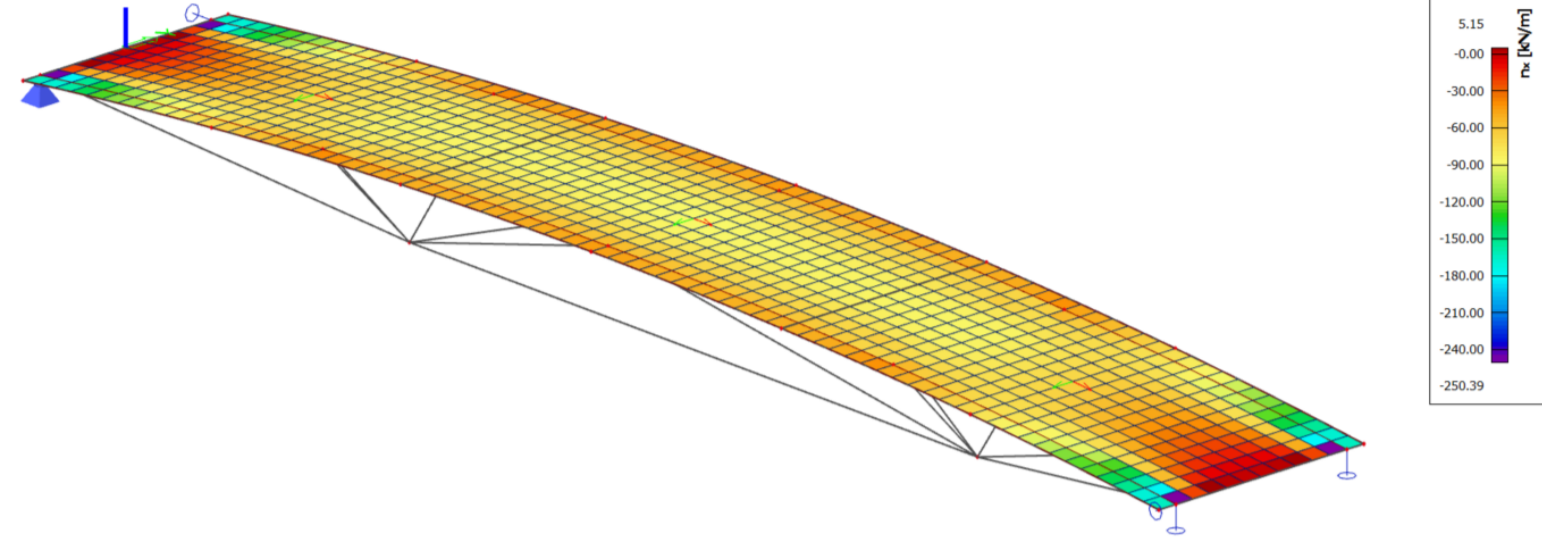
TAL TECH	TTÜ INSENERITEADUSKOND	Magistritöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja:	Ralf Makienko	Konstruktsioonelemendi montaažijoonis	
Juhendaja:	Eero Tuhkanen		
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Ristkihtliimpuidust sprengele- kandekonstruktsiooni projekteerimine	



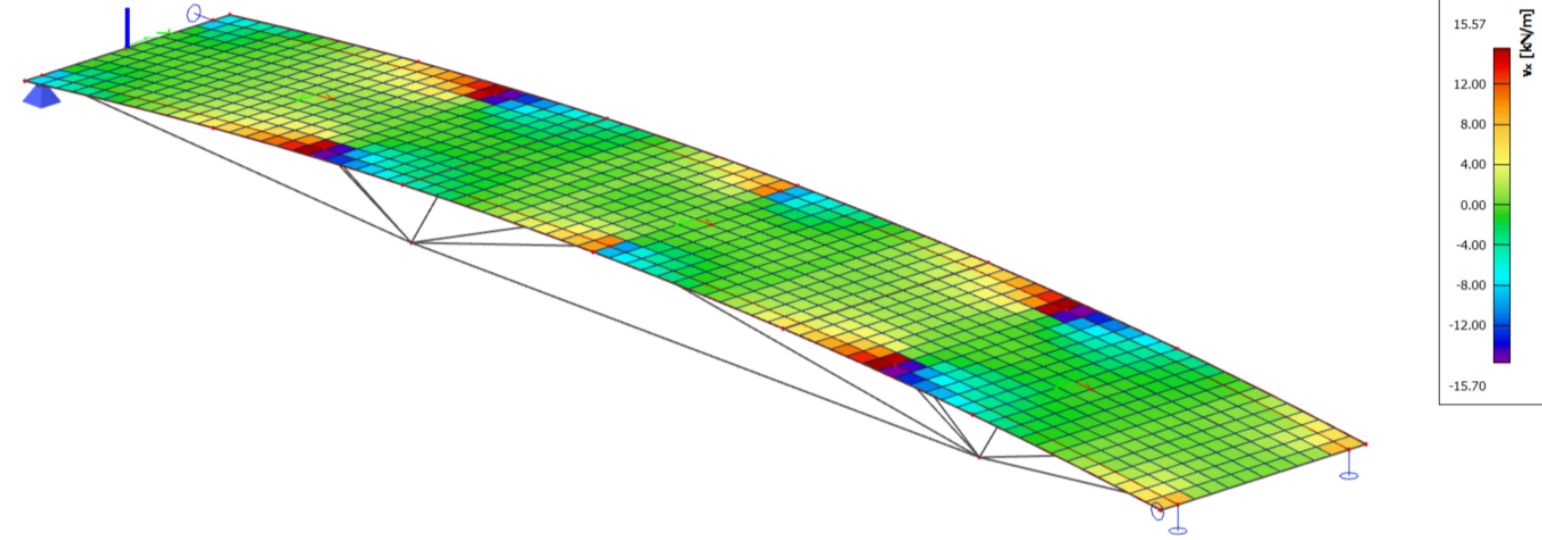
Paindemoment plaadi pikisuunas, Mx



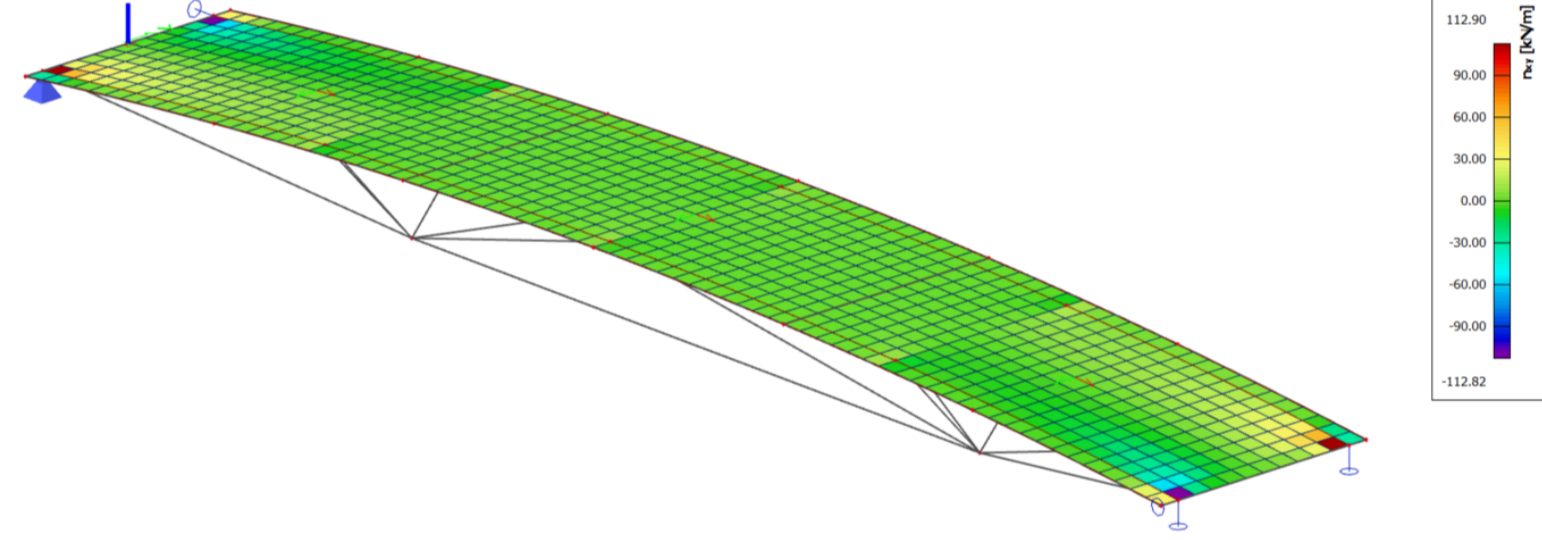
Pikijõud plaadi pikisuunas, Nx



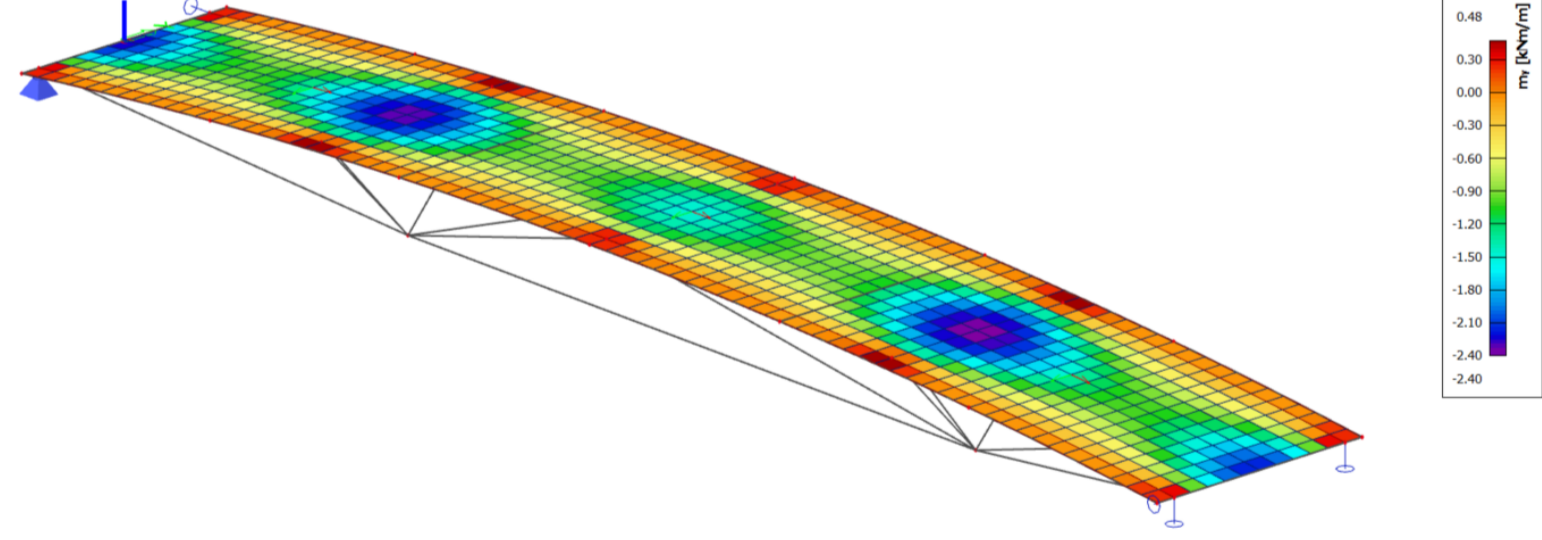
Põikjõud plaadi pikisuunas, Vx



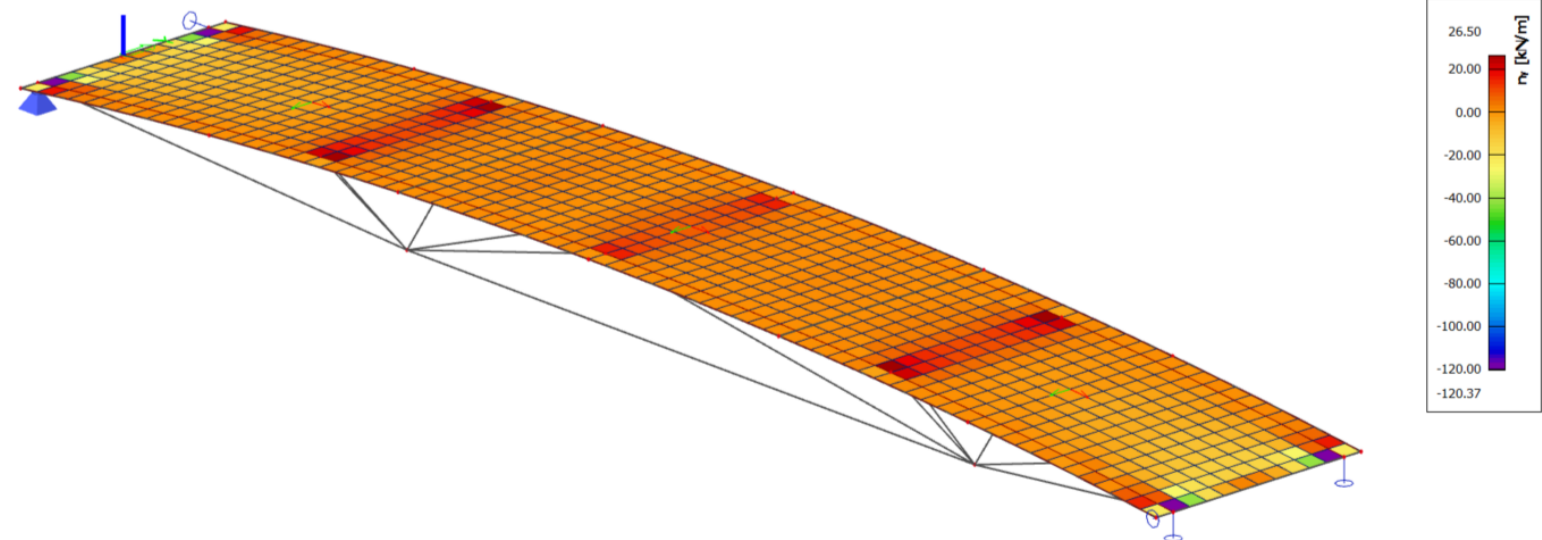
Põikjõud plaadi tasandis, Nxy



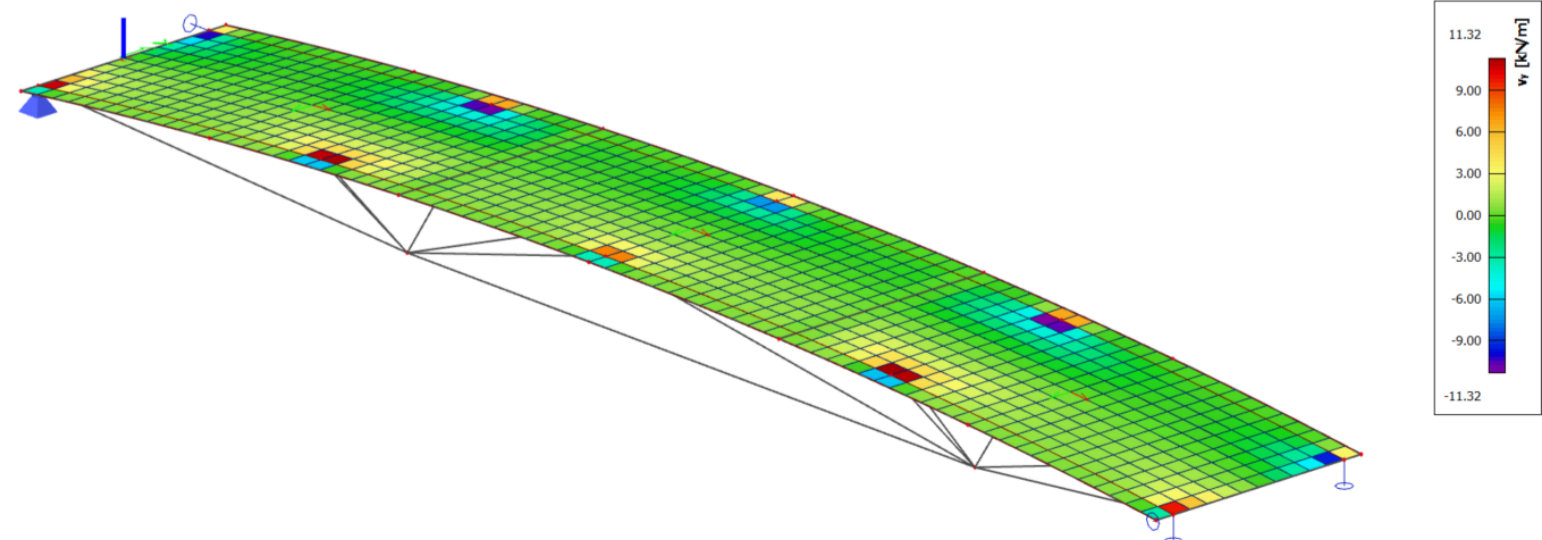
Paindemoment plaadi ristisuunas, My



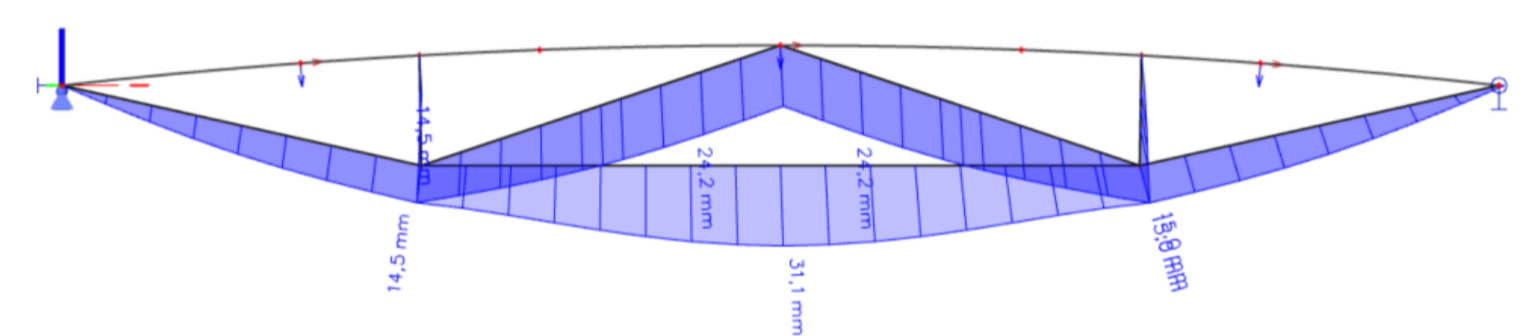
Pikijõud plaadi ristisuunas, Ny



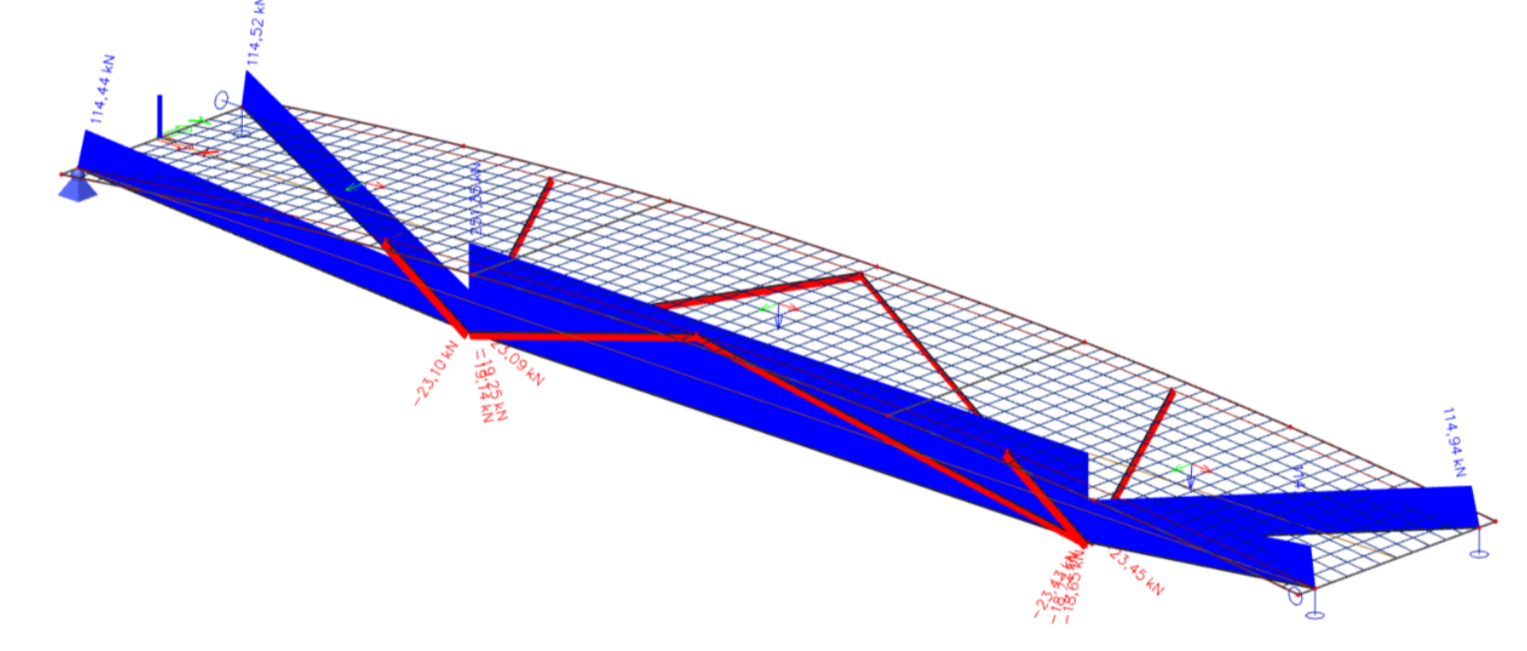
Põikjõud plaadi ristisuunas, Vy



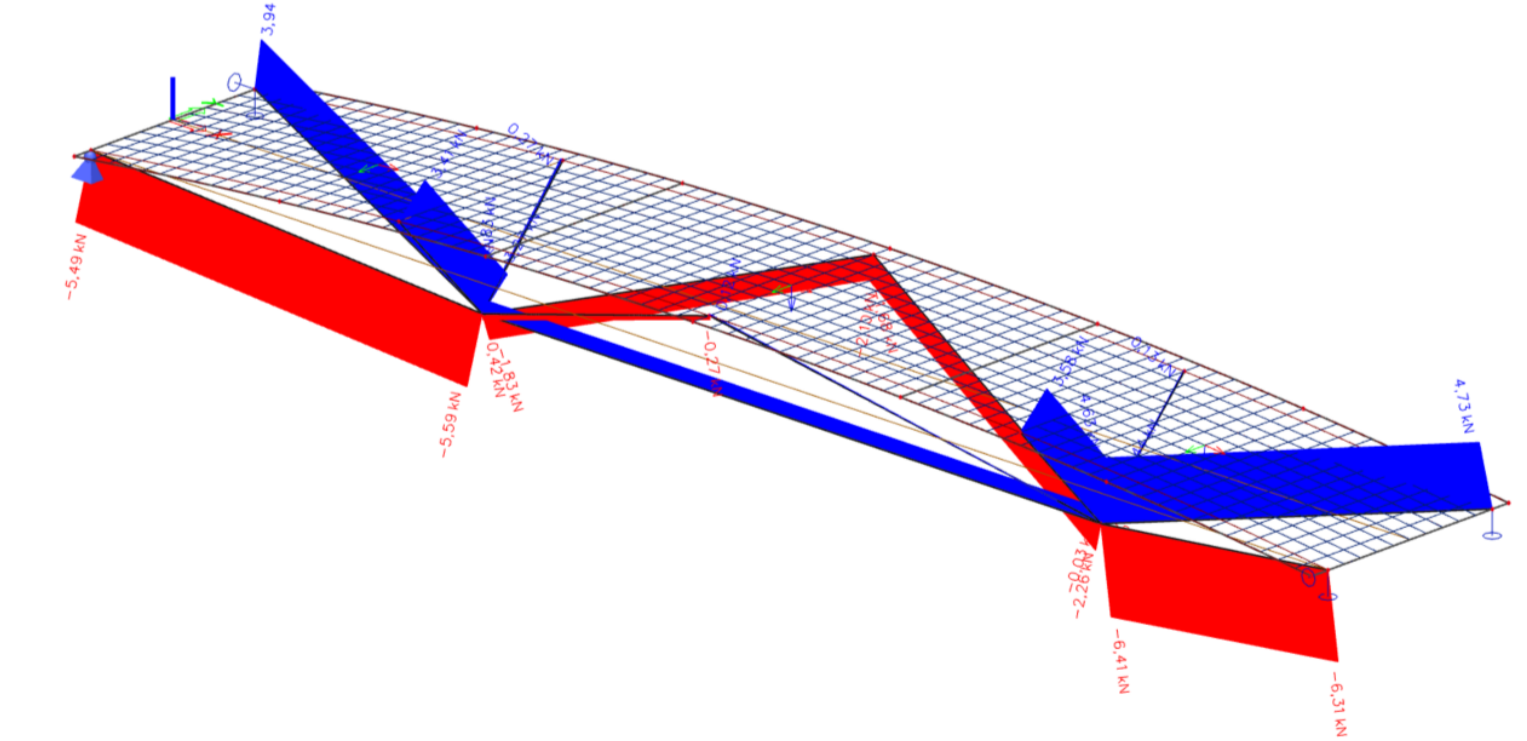
Terasvarraste deformatsioonid, Uz



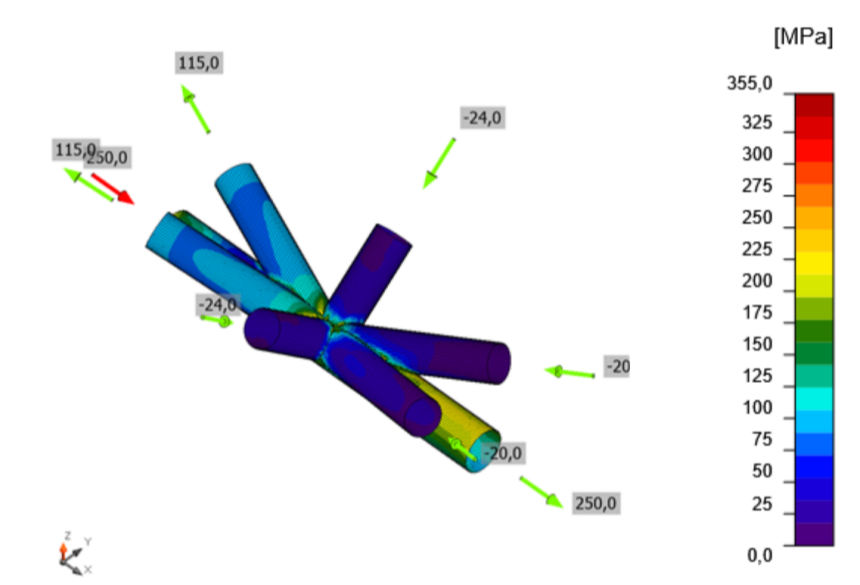
Maksimaalsed pikijõud terasvarrastes [kN]



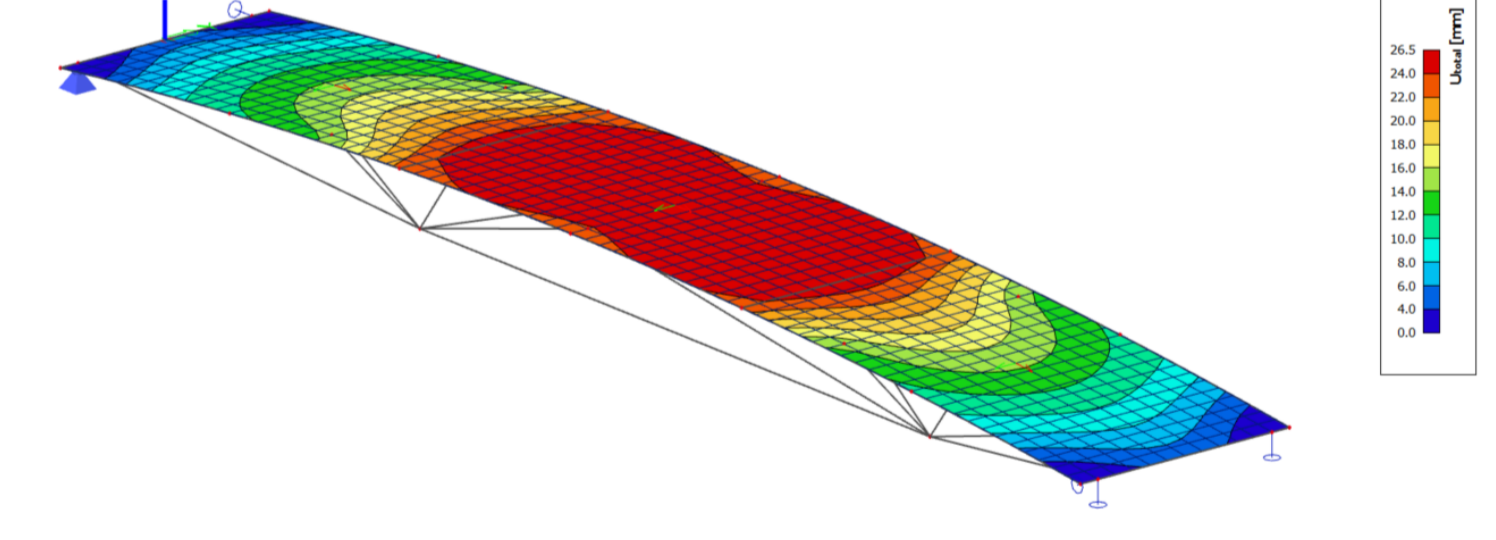
Pikijõud terasvarrastes (lõstva tuule korral) [kN]



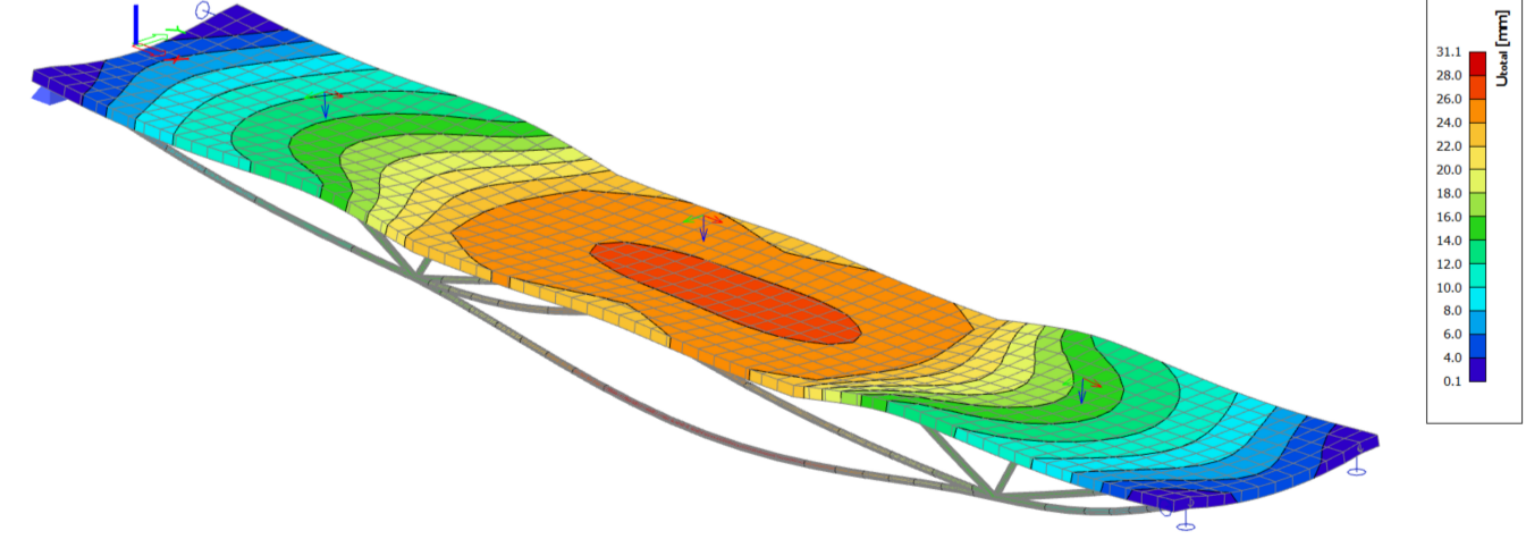
Pinged sprenglivarraste liitumissõlmes



CLT-plaadi deformatsioonid, Uz



Kogu elemendi deformatsioonid, Uz



<b>TTÜ INSENERITEADUSKOND</b>		Magistritöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja:	Ralf Makienko	Sisejõud ja deformatsioonid	
Juhendaja:	Eero Tuhkanen		
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Ristkihtliimpuidust sprengel- kandekonstruktsiooni projekteerimine	