



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

TARTU KOLLEDŽ

Säästva tehnoloogia õppetool

# RISTKIHTPUIDUST RÕDUKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE

DESIGN OF CROSS-LAMINATED TIMBER BALCONY CONSTRUCTIONS

Magistritöö

Ehitiste restaureerimise eriala

Üliõpilane: Tõnu Tootsi

Juhendaja: Laur Lõvi

Kaasjuhendaja: Illimar Kalk

Tartu, 2015

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.  
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite  
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt  
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 092638EAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

..... (kaasjuhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: ..... (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: ..... (allkiri)

**Abstract of the Master's Thesis**

Tallinn University of Technology Tartu College

Author: Tootsi T.

Place and date: Tartu, 2015

Supervisor(s): Lõvi L., Kalk I.

Language: Estonian

**Design of cross-laminated timber balcony constructions**

77 pages

23 figures

3 tables

2 appendixes

1 bidding

This thesis is based on the design of cross-laminated timber balcony constructions of five-storey apartment building in Trondheim, Norway. The purpose of using cross-laminated timber in balcony constructions is to make them more efficient.

This thesis has three chapters. First gives an overview of cross-laminated timber as a construction material. Second section consists of the design concept of load-bearing cross-laminated timber constructions. The final chapter offers calculations for the balcony slab and glued laminated timber balcony column in ultimate limit state and serviceability limit state are made. Additionally, the structural fire design is concluded using method of reduced cross section. Calculations are based on different calculation methods for cross-laminated timber and European standards with Norwegian National Annexes.

This paper has established a set of design methods, which are suitable for the design of similar constructions.

Keywords: cross-laminated timber (CLT), reinforced CLT, balcony, ultimate limit state design, serviceability limit state design, structural fire design.

# SISUKORD

|   |    |
|---|----|
| KASUTATUD TÄHISED.....  | 5  |
| SISSEJUHATUS .....  | 8  |
| 1. RISTKIHTPUIT .....   | 10 |
| 1.1. Ristkihtpuit materjalina.....  | 10 |
| 1.2. Tootmine .....   | 11 |
| 1.3. Ristkihtpuidu peamised eelised .....   | 13 |
| 1.4. Kasutusvõimalused .....  | 14 |
| 2. ARVUTUSMETOODIKA .....   | 17 |
| 2.1. Kandepiirseisund .....   | 17 |
| 2.1.1. Paine .....  | 17 |
| 2.1.2. Surve ristikiudu .....   | 19 |
| 2.1.3. Külgnihe .....   | 22 |
| 2.2. Ristkihtpuidu armeerimine isepuurivate kruvidega .....                                       | 25 |
| 2.2.1. Surve ristikiudu .....   | 26 |
| 2.2.2. Külgnihe .....   | 29 |
| 2.3. Kasutuspiirseisund .....   | 31 |
| 2.4. Tulepüsivus.....   | 32 |
| 3. RÕDUKONSTRUKTSIOONIDE KONTROLLARVUTUSED NORRAS,<br>TRONDHEIMIS PAIKNEVA KORTERMAJA NÄITEL..... | 34 |
| 3.1. Koormused.....   | 34 |
| 3.2. Koormuskombinatsioonid.....  | 36 |
| 3.3. Ristkihtpuidust rõdupaneeli kontrollarvutused .....  | 37 |
| 3.3.1. Kandepiirseisund .....   | 38 |
| 3.3.2. Kasutuspiirseisund.....  | 50 |
| 3.3.3. Tulepüsivus.....   | 50 |

|   |    |
|---|----|
| 3.4. Liimpuidust posti tugevusarvutused ..... | 57 |
| 3.4.1. Surve pikikiudu .....                  | 57 |
| 3.4.2. Tulepüsivus.....                       | 62 |
| KOKKUVÕTE .....                               | 67 |
| KASUTATUD KIRJANDUS .....                     | 68 |
| LISAD .....                                   | 71 |

# KASUTATUD TÄHISED

## Ladina suurtähed

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $A_h$                 | - netoristolõikepindala [mm <sup>2</sup> ]                               |
| $A_c$                 | - tegelik kontaktpind ristikiudu survele [mm <sup>2</sup> ]              |
| $E$                   | - elastsusmoodul [N/mm <sup>2</sup> ]                                    |
| $F_{90,Rk}$           | - normatiivne armeeritud ristkihtpuidu survetugevus [N/mm <sup>2</sup> ] |
| $F_{ax,Rk}, R_{ax,k}$ | - kruvi väljatõmbe normtugevus [N]                                       |
| $F_k$                 | - jõu normväärtus [N]  |
| $F_{ki,Rk}$           | - kruvi normatiivne nõtketugevus [N]                                     |
| $G$                   | - alaline koormus  |
| $I_y, I_z$            | - inertsimoment [mm <sup>4</sup> ]                                       |
| $K_{CLT}$             | - ristkihtpuidu paindejäikus [N/mm <sup>2</sup> ]                        |
| $M$                   | - paindemoment [kNm]   |
| $N_{ki,k}$            | - normatiivne elastne nõtkekandevõime [N]                                |
| $N_{pl,k}$            | - normatiivne plastne tõmbekandevõime [N]                                |
| $Q$                   | - muutuvkoormus  |
| $V_{xz}, V_{yz}$      | - nihkejõud [N]  |

## Ladina väiketähed

|                     |  |
|---------------------|--|
| $a_{1,c}$           | - kruvi kaugus puitelemendi koormamata otsast [mm]                           |
| $a_1$               | - kruvide vaheline kaugus risti paneeli ristikihiga [mm]                     |
| $a_2$               | - kruvide vaheline kaugus paneeli ristikihi suunas [mm]                      |
| $b_x, b_y$          | - toe mõõtmed [mm]   |
| $c_h$               | - elastne väljatõmbetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]                             |
| $d$                 | - ristkihtpuidust paneeli paksus [mm], keerme välisläbimõõt [mm]             |
| $d_0$               | - nulltugevusega kiht [mm]   |
| $d_1$               | - keerme siseläbimõõt [mm]   |
| $d_{char}$          | - söestunud kiht [mm]  |
| $d_x, d_y$          | - ristkihtpuidust paneeli kihtide paksused [mm]                              |
| $\bar{f}_{R,CLT,k}$ | - armeeritud ristkihtpuidu normatiivne külgnihketugevus [N/mm <sup>2</sup> ] |
| $f_{R,CLT,k}$       | - ristkihtpuidu normatiivne külgnihketugevus [N/mm <sup>2</sup> ]            |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $f_{ax,k}$           | - kruvi normatiivne väljatõmbetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]  |
| $f_{c,0,k}$          | - normatiivne survetugevus pikikiudu [N/mm <sup>2</sup> ]   |
| $f_{c,90,k}$         | - normatiivne survetugevus ristikiudu [N/mm <sup>2</sup> ]  |
| $f_{m,k}$            | - normatiivne paindetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]  |
| $f_{r,k}$            | - normatiivne külgnihketugevus [N/mm <sup>2</sup> ]   |
| $f_{y,k}$            | - normatiivne voolavuspiir [N/mm <sup>2</sup> ]   |
| $h$                  | - elemendi kõrgus paindel ja laius tõmbel [mm]  |
| $i_y, i_z$           | - inertsiraadius [mm]   |
| $k_3, k_m$           | - tegur   |
| $k_A$                | - toe laiuse ja paneeli paksuse suhet arvestav tegur  |
| $k_{R,90}$           | - survepingeid arvestav tegur   |
| $k_{R,x}, k_{R,y}$   | - paneeli kihtide arvu arvestav tegur   |
| $k_{c,90}$           | - tegur, mis arvestab koormuse konfiguratsiooni, lõhestumisvõimalust ning survedeformatsioonide astet |
| $k_c$                | - nõtketegur  |
| $k_{fi}$             | - tegur   |
| $k_l$                | - paralleelselt koos töötavaid lamelle arvestav tegur   |
| $k_{mod}$            | - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur                             |
| $l$                  | - sildeava [mm], pikkus [mm]  |
| $l_{ef,1}$           | - kontaktpinna efektiivne laius [mm]  |
| $l_{ef,2}, l_{ef,3}$ | - efektiivne jaotuspikkus kruvide otste pinnas [mm]   |
| $l_{ef,L}, l_{ef,C}$ | - kruvi töötava keerme pikkus samasuunalistes kihtides [mm]   |
| $l_{ef}$             | - keermestatud osa süvistussügavus [mm]   |
| $l_{y,ef}, l_{z,ef}$ | - nõtkepikkus [mm]  |
| $n$                  | - ristkihtpuidust paneeli kihtide arv, paralleelselt töötavate lamellide arv, armeerivate kruvide arv |
| $n_{\perp}$          | - kandva sihiga risti olevate kruviridade arv   |
| $n_0$                | - kruviridade arv pikikiudu   |
| $s$                  | - lumekoormuse normsuurus katusel [kN/m <sup>2</sup> ]  |
| $s_k$                | - lumekoormuse normsuurus maapinnal [kN/m <sup>2</sup> ]  |
| $t$                  | - tulekahju kestus [min]  |
| $t_a$                | - piiraeg [min]   |

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| $t_f$         | - tulekaitse aeg [min]      |
| $w_{net,fin}$ | - lõplik netoläbipaine [mm] |

### Kreeka väiketähed

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| $\alpha_L, \alpha_C$               | - kruvi nurk ristkihtpuidu kihi kiudude suhtes [°]                         |
| $\beta_c$                          | - tegur  |
| $\beta_n, \beta_0$                 | - söestumismäär [mm/min]   |
| $\gamma$                           | - koormuse osavarutegur  |
| $\gamma_M$                         | - materjali osavarutegur   |
| $\bar{\lambda}_k$                  | - kruvi tingsaledus  |
| $\lambda_{rel,y}, \lambda_{rel,z}$ | - suhteline saledus  |
| $\lambda_y, \lambda_z$             | - saledus  |
| $\mu_i$                            | - lumekoormuse kujutegur   |
| $\rho_k$                           | - materjali tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]                                   |
| $\sigma_{c,0,k}$                   | - normatiivne survepinge pikikiudu [N/mm <sup>2</sup> ]                    |
| $\sigma_{c,90,k}$                  | - normatiivne survepinge ristikiudu [N/mm <sup>2</sup> ]                   |
| $\sigma_{max,d}$                   | - arvutuslik maksimaalne paindepinge [N/mm <sup>2</sup> ]                  |
| $\tau_{r,k}$                       | - normatiivne külgnihkepinge [N/mm <sup>2</sup> ]                          |
| $\chi$                             | - nõtketegur, mis leitakse sõltuvalt kruvi tingsaledusest ja nõtkekõverast |
| $\psi$                             | - kombinatsioonitegur  |



# SISSEJUHATUS

Puit on üks vanemaid ehitusmaterjale. Puitu saab ehituses kasutada nii konstruktsiooni- kui ka viimistlusmaterjalina. Puit omab teiste ehitusmaterjalide ees erinevaid eeliseid: hea omakaalu ja kandevõime suhe, korrosioonikindlus, halb soojusjuhtivus ning hea töödeldavus. Ühtlasi on puit taastuv materjal. Puit on küll süttiv materjal, kuid puitkonstruktsioonide kandevõimekadu tulekahju korral on ühtlane ning etteaimatav. Teraskonstruktsioonide puhul näiteks võib tulekahjus varisemine tekkida täiesti ettearvamatult.

Teadmised puidu kasutamisest ehituskonstruktsioonides on oluliselt arenenud, mistõttu on muutunud selle kasutamine ehituses järjest olulisemaks. Inseneripuit on avardanud puidu kasutamise võimalusi. Liimpuidust ja ristkihtpuidust on saanud tõsiseltvõetav konkurent teistele laialtlevinud ehitusmaterjalidele nagu raudbetoon. Ristkihtpuit on oma omadustelt võrreldav rohkem raudbetooni kui puiduga. Ristkihtpuidu kasutuselevõtt on andnud arhitektidele ja inseneridele võimaluse projekteerida väga suuremõõtmelisi puitkonstruktsioone.

Ristkihtpuidu tootmine ja uurimine on Eestis veel algusjärgus, kuid järjest enam hakkab see koguma populaarsust ehitusvaldkonnas. 2011. aastal uuris Tallinna Tehnikaülikooli tudeng Areenika Tammissaar oma lõputöös ristkihtpuidu erinevaid omadusi. 2014. aastal teostas Maaülikooli tudeng Grete Roop oma magistritöös katsed Eestis toodetud kolmekihilise ristkihtpuiduga, uurimaks ristkihtpuidu omadusi teoreetiliste tulemustega. Oma uudsuse tõttu on ristkihtpuidust hoonete projekteerimine Eestis vähene. Standardite puudumise tõttu on teadmised ristkihtpuidust projekteerimise osas tihtipeale kehvad, tekitades ristkihtpuidust kartustäratava ehitusmaterjali.

Magistritöö teema valik toimus koostöös juhendaja Laur Lõvi'ga ja Kodumaja AS'ga. Firma huvi oli puitmoodulhoonete rõdukonstruktsioonide efektiivsemaks muutmine kasutades ristkihtpuidust paneele. Töö eesmärgiks oli ühtlasi luua arvutusmeetodika kogum, mida oleks võimalik kasutada sarnaste ristkihtpuidust konstruktsioonide projekteerimisel.

Käesolevas töö jaguneb sisult kolme osasse: ristkihtpuidu, kui ehitusmaterjali tutvustus, arvutusmeetodika tutvustus ning konstruktsiooniarvutused. Esimene osa tööst annab üle-

vaate ristkihtpuidust, kui ehitusmaterjalist. Teine osa tööst kirjeldab arvutusmetoodikat ristkihtpuidu koormamisel paneeli keskpinnaga risti. Töö kolmandas osas teostatakse vajalikud kontrollarvutused kande- ja kasutuspiiriseisundis ning tulekahjuolukorras.

Staatika arvutuste tegemiseks on töös kasutatud programmi Dlubal RFEM 5 ja Dlubal RF-Laminate ning PTC Mathcad Prime 3.0. Jooniste tegemiseks on kasutatud programmi Autodesk Revit Architecture 2015.

# 1. RISTKIHTPUIT

Algselt töötati ristkihtpuit välja Lausannes ja Zürichis, Šveitsis 1990ndate aastate alguses. Erinevad firmad alustasid tootmist kasutades patenteeritud lähenemisviise. 1996. aastal viidi Austrias läbi tööstuse ja akadeemiliste ringkondade ühine uurimustöö, mille tulemusena töötati välja kaasaegne ristkihtpuit. Massilisemalt võeti ristkihtpuit ehituses kasutusele 2000ndate aastate alguses tänu energiasäästliku ehitamise suurenemise ja nõuete muutumisele (nt. Rootsis ja Hollandis). Kõige enam kasutatakse ristkihtpuitu Austrias, Saksamaal, Šveitsis, Rootsis, Norras ja Suurbritannias. [1]

## 1.1. Ristkihtpuit materjalina

Ristkihtpuit on koormust taluv täispuidust toode. See koosneb vähemalt kolmest serviti kokku liimitud või liimimata puitlamellkihist, milledes kiudude suund kõrvuti asetsevates kihtides on teineteise suhtes risti. Kihid liimitakse omavahel terves ulatuses. Reeglina on paneeli ristlõige sümmeetriline. [2]

Puitmaterjal läbib enne kasutamist tugevuskontrolli. Peamiselt kasutatakse tugevusklassi C24 [3] kuuluvat puitmaterjali. Lubatud on kuni 10% materjali kuulumine astme võrra madalamasse tugevusklassi. Ristkihtpuidu valmistamisel kasutatavad puuliigid on nulg, kuusk, mänd ja ebatsuuga. Katsetusjärgus on ristkihtpuidu tootmine lehtpuidust. [2]

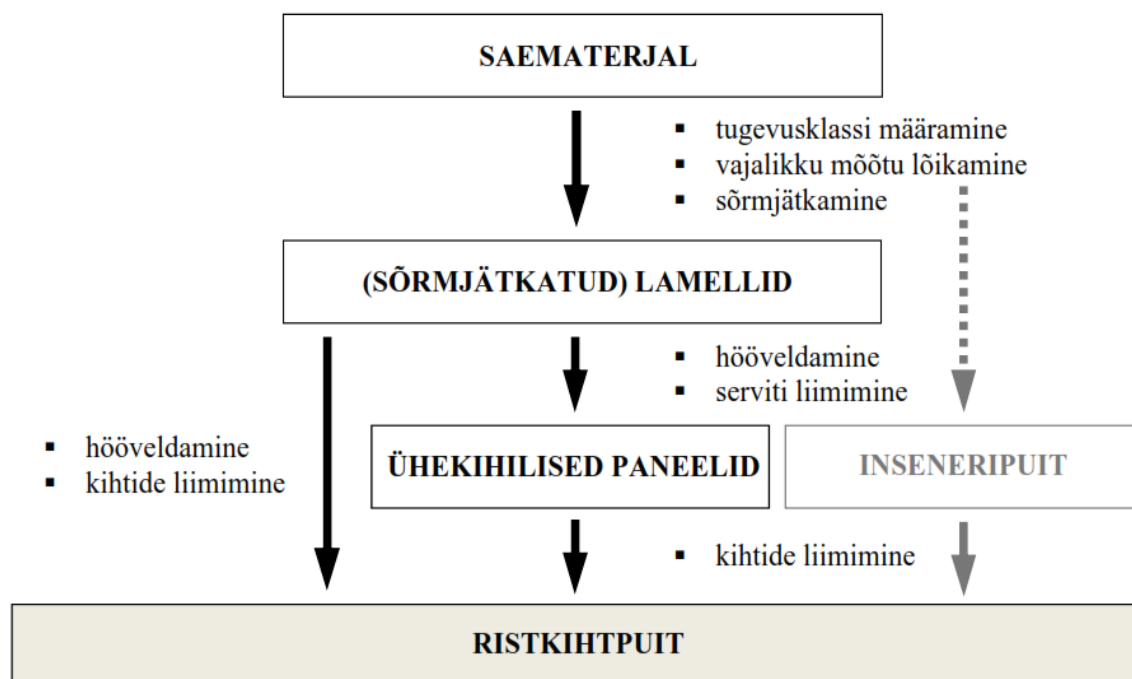
Ristkihtpuidus kasutatava puidu niiskussisaldus peab olema 12% ( $\pm 2\%$ ). [1] Vastavalt erinevatele Euroopa Tehnilistele Tunnustele (ETA-dele) jääb lamellide ristlõike paksus ( $t_B$ ) vahemikku 8 kuni 45 mm. Tootmisprotsessiga on aga välja kujunenud enamlevinud lamelli-paksused  $t_B = (20;30;40)$  mm. Lamellide ristlõike laiuse ( $w_B$ ) suhtes ei ole paika pandud ülemist lubatud piiri. Minimaalse laiuse puhul kehtib kihtidevaheliste nihkepingete tõttu nõue  $w_B \geq 4 \cdot t_B$ , mille mittetäitmise korral tuleb kasutada madalamat külgnihketugevust. Kooskõlastamis järgus oleva standardi prEN 16351 kohaselt peaks lamellide ristlõike paksus jääma vahemikku 12–45 mm ja laius vahemikku 40–300 mm. Tähelepanu tuleb pöörata lamellikihtide ühtlasele paksusele, et tagada pressimisel nõuetekohane surve ja liimikihi paksus. Ristkihtpuidu kasutamine 3. keskkonnaklassis on keelatud. [4]

## 1.2. Tootmine

Hetkel on ristkihtpuidu tootmine määratletud erinevate riiklike või Euroopa Tehniliste Tunnustustega (ETA-dega). Tunnustustes määratakse ära nõuded tootele, kasutatavale materjalile ja tootmisprotsessile. Ristkihtpuidu tootestandard EN 16351:2013 on esitatud Euroopa Standardikomiteele (CEN) hääletamiseks ning peatselt on oodata ühtset ristkihtpuidu standardit. Ühtlasi töötab grupp teadlasi Euroopa Standardikomiteest ristkihtpuidu kaasamise nimel Eurokoodeks 5te (EN 1995-1-1). [2]

Ristkihtpuidu tootmine on oma protsessilt suuresti võrreldav liimpuidu tootmisega. Esmalt määratakse eelkuivatatud puitmaterjalile tugevusklass, seejärel ühendatakse üksikud elemendid sõrmjätkudega omavahel pikkadeks lamellideks. Lamellid sorteeritakse, hõõveldatakse ja lõigatakse vajaliku mõõtu. Vajadusel liimitakse lamellid serviti moodustamaks ühekihilised paneelid. Seejärel ühendatakse liimimise ja pressimise teel omavahel üksikud kihid. Hiljem paneeli pinnad viimistletakse, lõigatakse sisse avad ja sooned vastavalt vajadusele ning pakendatakse transpordiks. [4]

Ristkihtpuidu tootmise põhimõtteline skeem on toodud joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Ristkihtpuidu tootmise lihtsustatud skeem [4]

Ristkihtpuitu on võimalik toota ka liimi kasutamata. Puidukihid on võimalik sellisel juhul omavahel liita näiteks pöökpuidust tüüblitega (joonis 1.2). Tüüblitega ühendamise puhul puuritakse kihtide kokkupressimise järel neisse avad. Avadesse pressitakse seejärel väga kuivad pöökpuidust tüüblid. Vastavalt tootmistehnoloogiale, tüübleid kas niisutatakse avadesse pressimisel või imavad need ümbritsevast niiskemast keskkonnast niiskust, mille tulemusena tüüblid punduvad ning suruvad end tihedalt avadesse. Tüübeldatud ristkihtpuitu toodetakse enamasti konkreetsete hoonete tarbeks. [5]



**Joonis 1.2.** Tüübeldatud ristkihtpuit [5]

Lisaks tüüblitele on võimalik ristkihtpuidu kihte omavahel ühendada keelte, soonte ja kalasabatappide süsteemi abil (joonis 1.3). Sellise tootmisviisi puhul puudub täielikult vajadus kinnitusvahendite ja liimi kasutuseks. Seetõttu ei ole vajalik ka pressimisseadmetega tootmisliini ning tootmine on võimalik mõningate täiendustega tavapärares saeveskites. [6]



**Joonis 1.3.** Ristkihtpuidu kihid ühendatud keelte, soonte ja kalasabatappide abil [6]

Eestis toodetakse ristkihtpuitu paksusega 60–300 mm. Maksimaalseks paneeli pikkuseks on 15 meetrit ja laiuseks 3,5 meetrit. Mujal maailmas on eritellimusel võimalik toota kuni 500 mm paksuseid, 24 meetri pikkuseid ja 4,8 meetri laiuseid paneele. Maailma suurimad ristkihtpuidu tootjad on KLH, Stora Enso, Binderholz ja MetsäWood. Eestis tegeleb ristkihtpuidu tootmisega Peetri Puit OÜ ja Dold Puidutööstus AS.

### **1.3. Ristkihtpuidu peamised eelised**

Ristkihtpuidu struktuursed omadused annavad võimaluse kasutada puitu kohtades, kus see varem võimalik ei ole olnud. Võimalikuks on saanud puidust kõrghooned. Tänu risti paiknevatele kihtidele ei oma üksikute elementide nõrgestused niivõrd oluliselt rolli ning ristkihtpuidust paneelid töötavad pigem ühtse puitmaterjalina. Seetõttu on ristkihtpuit oma kasutusvõimalustelt võrreldav rohkem raudbetooni kui sae- või liimpuiduga. Paneele on võimalik tööle panna mitmes suunas. See annab võimaluse kasutada ristkihtpuitu konsoolidena ning toestatuna punktugedele, mis annab võimaluse uutele põnevatele disainilahendustele. [7]

Kulude kokkuvõid ristkihtpuidust ehitamise puhul ei tulene ruutmeetri hinna võrdluses teiste ehitusmaterjalidega. Kulude kokkuvõid saavutatakse kogu hoone ehitusprojekti vältel. Väiksemad kulud on ristkihtpuidust ehitamise puhul tagatud paneelide ettevalmistamisega tehases, mis vähendab tunduvalt platsitööde mahtu. Ristkihtpuidust ehitamise puhul on tegemist kuiva ehitamisega, kui välja jätta vundamendid. Paneelide omavahelised ühendused tagatakse kruvide, ehitusnurgikute ja tüübeltüüpi kinnitustega. Tänu sellele puudub vajadus suurele tööjõule. Üheksakorruseline hoone on võimalik püstitada üheksa nädalaga ja seda vaid nelja mehelse meeskonnaga. [7]

Tänu ristkihtlahendusele on paneelide õhupidavus küllaltki suur, mis tagab konstruktsiooni parema soojapidavuse. Tänu arvutiprogrammjuhtimisega tööpinkide kasutamisele tehastes, mis võimaldab väga väikeste tolerantsidega paneelide tootmist, on paneelide vahelised ühendused tihedad. Kogu selle tulemusena on ristkihtpuidust võimalik luua õhutihe ühtne hoonekarp, mis annab hea eelise passiivmaja ehitamiseks. [8]

Ristkihtpuidu massiivsus tagab hoonele väga head heliisolatsiooni võrreldes puitkarkass-hoonetega. Testid näitavad, et ristkihtpuidust hooned töötavad hästi nii löök- kui ka õhumürale. Mürapidavusele aitab kaasa külmasildade vältimiseks mõeldud hermeetikute kasutamine seinte ja põrandate vahelistes sõlmedes. [8]

Tulekahjuolukorras töötavad ristkihtpuidust hooned paremini kui muud puidust hooned. Hea tulepüsivus on tagatud tänu väiksele põlemispinnale ja tihedale paneeli konstruktsioonile, mis pärsib tule juurdepääsu värskele põlemismaterjalile. Tänu puidu halvale soojusjuhtivusele ei levi tulekahju kuumus läbi seina ühest ruumist teise, mis omakorda takistab tule levikut. [7]

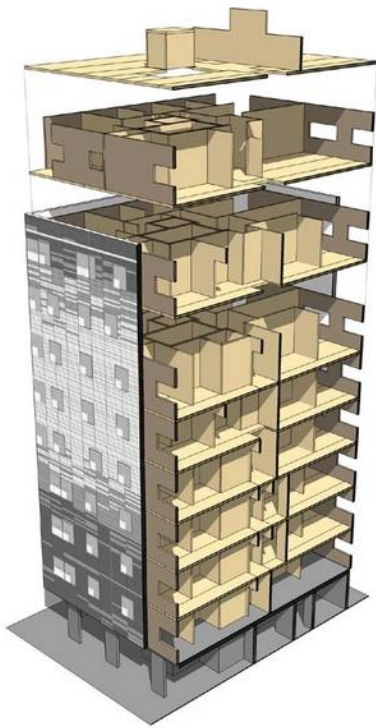
Ristkihtpuidu head tugevusomadused, plastilisus ja väike omakaal teevad temast ideaalse ehitusmaterjali maavärina piirkondades. Seismilised testid on näidanud, et ristkihtpuidust hooned peavad vastu ka kõige tugevamatele maavärinatele ilma, et kaasneks inimohvreid või konstruktiivseid kahjustusi. Väiksemad seismilised pinged maavärina korral tagab väga hea tugevuse ja kaalu suhe. Omaduste tõestuseks viidi 2007. aastal Jaapanis maailma suurimal maavärina simulaatoril läbi katse, kus seitsmekorruseline ristkihtpuidust hoone pidas vastu 7,2-magnituudilisele maavärinale konstruktiivseid kahjustusi kannatamata. [7]

## **1.4. Kasutusvõimalused**

Ristkihtpuidust paneele on võimalik kasutada kandvate ja mittekanvate sise- ja välisseintena, vahelae- ja laepaneelidena, sisevoodrina, fassaadipaneelina, trepina jne. Hoone kõik konstruktsioonelemendid on võimalik valmistada ristkihtpuidust (joonis 1.4). Näiteks Londonis valmis 2009. aastal üheksakorruseline korterelamu „Stadthaus“, mille kõik korrused peale esimese on ehitatud kasutades vaid ristkihtpuitu (joonis 1.5). Ristkihtpuidust on võimalik ehitada lisaks elumajadele ka halle, mitmekorruselisi büroo- ja õppehooneid ning suuresildelisi sildu (joonis 1.6). [9]



**Joonis 1.4.** Ristkihtpuidu kasutamine erinevate konstruktsioonelementidena [10]



**Joonis 1.5.** „Stradthausi“ ülesehituslik skeem [11]





**Joonis 1.6.** Ristkihtpuidust sild Kössenis [12]

Ristkihtpuidust majade ehitamine sarnaneb suurpaneelilamute ehitamisega. Erinevus seisneb selles, et kui betoonpaneelid peavad vormidesse valamise tõttu olema mõõdetult ja kujult sarnased, siis ristkihtpuidust paneelid lõigatakse arvprogrammjuhtimisega tööpinkidel välja suurest paneelist ning iga paneel võib olla täiesti erinev. Tänu risti paiknevatele kihtidele on paneele võimalik toetada ka punktudele (joonis 1.7), mis võimaldab ristkihtpuitu kasutada ka avarates ruumides. [5]



**Joonis 1.7.** Ristkihtpuidust paneelid toetatud postidele. Eramu Austrias [13]

## 2. ARVUTUSMETOODIKA

Antud töö raames on käsitletud kontrollarvutusi, mis saavad määravaks punkttoele toetatud ristkihtpuidust vahelaepaneelile (rõdupaneelile).

### 2.1. Kandepiirseisund

Järgnevas lõigus on käsitletud peamisi kandepiirseisundi olukordasid, mis saavad määravaks ristkihtpuidust vahelaepaneelide koormamisel risti plaadi keskpinnaga.

#### 2.1.1. Paine

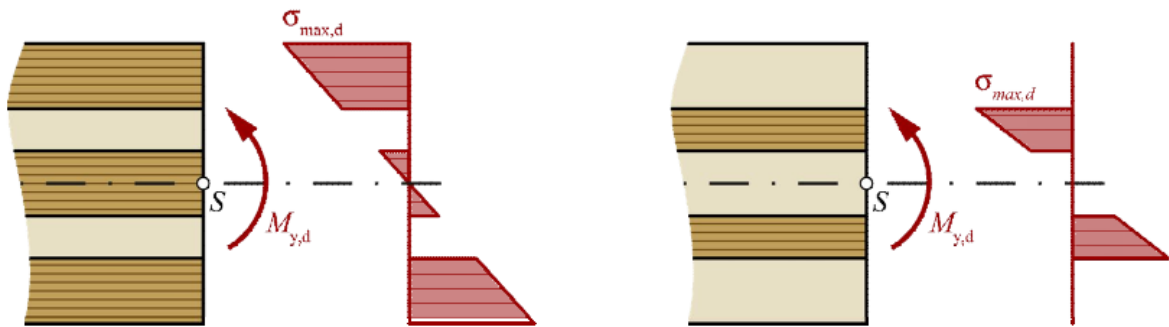
Ristkihtpuidust plaadi koormamisel risti plaadi keskpinnaga peab olema täidetud järgmine tingimus [14]:

$$\sigma_{max,d} \leq f_{m,CLT,d}, \quad (2.1)$$

kus

- $\sigma_{max,d}$  - arvutuslik maksimaalne paindepinge;
- $f_{m,CLT,d}$  - ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus.

Ristkihtpuidu paindepingete arvutus (valem 2.2) põhineb mehhaaniliselt liidetud talade arvutusmeetodil. Kehtib ka Bernoulli hüpotees, mistõttu jagunevad paindepinged ristlõikes lineaarselt. Lamellidevaheliste vahede tõttu ei ole ristisuunalistes kihtides surve ja tõmbe- pingete jagunemine lamellide vahel alati võimalik. Seega võib arvutustes kasutada  $E_{90} = 0$ . Selle tulemusena paindepinged pikisuunalistes kihtides suurenevad ning arvutustulemused on tagavara kasuks (joonis 2.1). [14]



**Joonis 2.1.** Pingete jaotus painutatud ristkihtpuidu ristlõikes ( $E_{90} = 0$ ): pikikihtides (vasakul) ja ristikihtides (paremal) [14]

Paindepinged ristkihtpuidus arvutatakse järgmiselt [14]:

$$\sigma(z) = \frac{M_y}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z), \quad (2.2)$$

kus

- $M_y$  - paindemoment;
- $K_{CLT}$  - ristkihtpuidu paindejäikus;
- $z$  - punkti kaugus keskpinnast;
- $E(z)$  - elastsusmoodul punktis  $z$ .

Ristkihtpuidu paindetugevus on võimalik arvutada kasutades vastava tugevusklassi liimpuidu normatiivset paindetugevust viitekõrgusega 600 mm (valem 2.3). [14]

$$f_{m,CLT,k} = k_l \cdot f_{m,k}, \quad (2.3)$$

kus

- $k_l$  - tegur, mis võtab arvesse paralleelselt koos töötavaid lamelle;
- $f_{m,k}$  - ristkihtpuidus kasutatava saepuidu normatiivne paindetugevus.

Tegur  $k_l$  leitakse järgmise valemiga [14]:

$$k_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 1 + 0,025 \cdot n \quad (n > 1), \end{array} \right. \quad (2.4)$$

kus

- $n$  - paralleelselt töötavate lamellide arv.

Ristkihtpuidust elemendi viitekõrgus paindel on 150 mm. Süstemaatiliste katsete puudumise tõttu ei ole võimalik viitekõrguse parandustegurit  $k_n$  ristkihtpuidule määrata. [14]

Ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus arvutatakse vastavalt EN 1995-1-1 toodud materjali tugevuse arvutusväärtuse valemile:

$$f_{m,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M}, \quad (2.5)$$

kus

- $f_{m,CLT,k}$  - normatiivne paindetugevus;
- $\gamma_M$  - materjali osavarutegur;
- $k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur.

### 2.1.2. Surve ristikiudu

Ristikiudu koormatud ristkihtpuidu survetugevuse kontrollarvutus teostatakse sarnaselt Eurokoodeks 5 toodule, kasutades vastavaid ristkihtpuidu näitajaid. Täidetud peab olema tingimus:

$$\sigma_{c,90,CLT,d} \leq k_{c,90,CLT} \cdot f_{c,90,CLT,d}, \quad (2.6)$$

kus

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_c} \quad (2.7)$$

- $\sigma_{c,90,CLT,d}$  - tegeliku kontaktpinna arvutuslik survepinge ristikiudu;
- $F_{c,90,d}$  - arvutuslik survejõud ristikiudu;
- $A_c$  - tegelik kontaktpind ristikiudu survele;
- $f_{c,90,CLT,d}$  - arvutuslik survetugevus ristikiudu;
- $k_{c,90,CLT}$  - tegur, mis arvestab koormuse konfiguratsiooni, lõhestumisvõimalust ning survedeformatsioonide astet.

Meeles tuleb pidada, et Eurokoodeks 5 kasutatakse ristikiudu survepingete leidmiseks efektiivset kontaktpind  $A_{ef}$ , antud arvutusmetoodikas aga tegelikku kontaktpinda  $A_c$ .

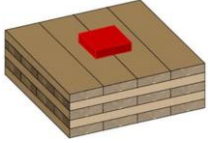
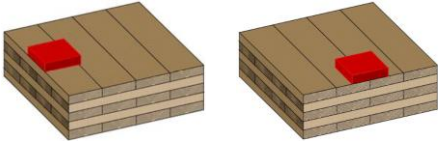

Ristkihtpuidu ristikiudu survetugevus sõltub paljudest parameetritest. Nende uurimiseks on läbi viidud erinevaid teadustöid. Halili [15] uuris oma diplomitöös laboritingimustes ristkihtpuidust kuubikukujuliste katsekehade peal järgmisi survetugevust mõjutavaid

parameetreid: aastarõngaste laius, säsi paiknemine, kihtide arv ja külgnevate kihtide paksuste suhe. Salzmann [16] kasutas oma magistritöös ühe tootja poolt valmistatud erineva paksusega (150 kuni 197 mm) viiekihilisi ristkihtpuidust katsekehi. Katsekehi, mõõtmetega 160×160 mm, koormati punktkoormusega erinevates punktides. Serrano [17] uuris 120 mm paksuste kolmekihiliste ristkihtpuidust elementide koormamist joonkoormusega (50×300 mm) katsekeha erinevates punktides.

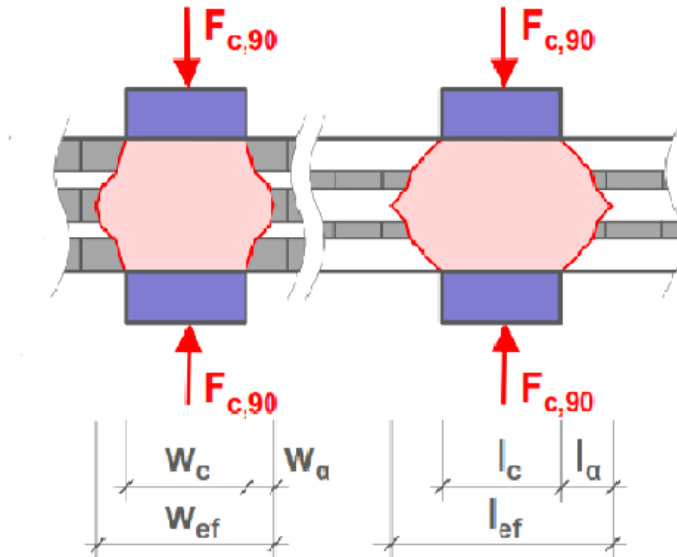
Eeltoodud teadustööde põhjal on välja pakutud ristkihtpuidu normatiivne survetugevus ristikiudu:  $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ . Väärtus sõltub plaadi paksusest ja kihilisest ehitusest, kuid esitatud väärtuse puhul pole neid arvestatud ning on antud tagavara kasuks. [14]

Teguri  $k_{c,90,CLT}$  väärtused on määratud katsete ja lõplike elementide analüüsi põhjal. Vastavalt koormamisolukorrale jääb väärtus vahemikku 1,0 kuni 1,8. Soovituslikud väärtused ühepoolisel koormamisel on toodud tabelis 2.1. [14]

**Tabel 2.1.** Soovituslikud  $k_{c,90,CLT}$  väärtused punktkoormusega ühepoolsest koormatud plaatidele põhinedes ristkihtpuidu normatiivsel ristikihti survetugevusel  $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$  ja tegelikult kontaktpinnal  $A_{c,90}$  [14]

| Koormuse paiknemine   |        | $k_{c,90,CLT}$ |
|---|--------|----------------|
|  | Keskel | 1,8            |
|  | Äärel  | 1,5            |
|  | Nurgas | 1,3            |

Ristkihtpuidu kahepoolisel koormisel punktkoormusega muutub survele töötava ristkihtpuidu efektiivpind väiksemaks (vt. joonis 2.2).



**Joonis 2.2.** Survepingete jagunemine kahepoolset koormamisel punktkoormusega

Survepingete jagunemine puidus toimub pikikiudu  $45^\circ$  nurga all ning ristikiudu  $15^\circ$  nurga all. Võrdsete kihipaksustega ristkihtpuidu elemendi puhul võib tagavara kasuks arvestada pingete jagunemist elemendis ühtlaselt  $30^\circ$  nurga all. [18]

Teguri  $k_{c,90,CLT}$  väärtust kahepoolisel koormamisel saab leida vastavalt järgnevale valemile [18]:

$$k_{c,90,CLT} = \sqrt{\frac{A_{ef}}{A_c}}, \quad (2.8)$$

kus

$A_{ef}$  - toe efektiivne pindala;

$A_c$  - toe tegelik pindala.

Ristkihtpuidu arvutuslik survetugevus ristikiudu arvutatakse vastavalt EN 1995-1-1 toodud materjali tugevuse arvutusväärtuse valemile:

$$f_{c,90,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M}, \quad (2.9)$$

kus

- $f_{c,90,CLT,k}$  - normatiivne survetugevus ristikiudu;
- $\gamma_M$  - materjali osavarutegur;
- $k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur.

### 2.1.3. Külgnihe

Ristkihtpuidust plaadi koormamisel risti plaadi keskpinnaga peab olema täidetud tingimus [14]:

$$\tau_{r,max,d} \leq f_{r,CLT,d}, \quad (2.10)$$

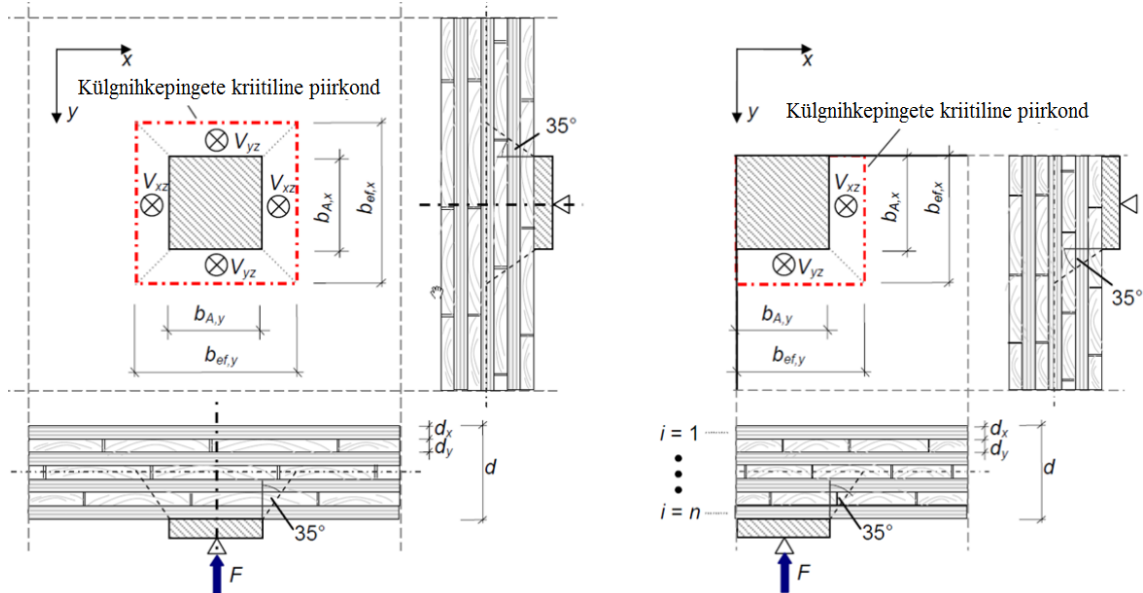
kus

- $\tau_{r,max,d}$  - arvutuslik maksimaalne külgnihkepinge;
- $f_{r,CLT,d}$  - ristkihtpuidu arvutuslik külgnihketugevus.

Ristkihtpuidu külgnihketugevus sõltub oluliselt üksikute lamellide mõõtmetest, paneeli kihilisest ülesehitusest ja tootmistehnoloogiast. Kuna üksikud lamellid töötavad paneeli kihtides ühtselt võib kasutatava saematerjali külgnihketugevust ( $f_{r,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2$  [19]) suurendada. Vastavalt erinevatele tehnilistele tunnustustele jääb ristkihtpuidu külgnihketugevus vahemikku  $0,7 \text{ N/mm}^2$  kuni  $1,5 \text{ N/mm}^2$ . Sellise vahemiku põhjustab peamiselt tootmistehnoloogia. [20]

Kui ristlamelli laius on suurem kui neli korda paksust ning lamellid on omavahel serviti kokku liimitud, võib külgnihketugevuseks võtta  $1,25 \text{ N/mm}^2$ . Kui antud tingimused pole täidetud on väga soovitatav võtta külgnihketugevuseks  $0,7 \text{ N/mm}^2$ . [20]

Punkttoele toetatud ristkihtpuidust paneeli kriitilise külgnihkepingete mõjupiirkond on toodud joonisel 2.3.



**Joonis 2.3.** Punkttoele toetatud paneeli külgnihkepingete kriitiline mõjupiirkond paneeli keskel (vasakul) ja paneeli nurgas (paremal) [21]

Ruudukujulise toetuspinna punkttoe ja võrdsete kihtidega ristkihtpuidust plaadi korral on külgnihkepinged võimalik leida järgnevate valemitega. [21]

X-telje suunaline külgnihkepinge paneeli keskel paikneva toe korral

$$\tau_{R,xz} = \frac{V_{xz}/b_{ef,x}}{k_{R,x} \cdot (d_x + d_y)} \quad (2.11)$$

ja paneeli nurgas paikneva toe korral

$$\tau_{R,xz} = \frac{V_{xz}/b_{ef,x}}{k_{R,x} \cdot (d_x + d_y)} \cdot k_A, \quad (2.12)$$

kus

- $V_{xz}$  - x-telje suunaline nihkejõud;
- $b_{ef,x}$  - toe efektiivne laius x-telje suhtes;
- $d_x, d_y$  - ristkihtpuidust paneeli pikikihi ja ristikihi paksus;
- $k_{R,x}$  - paneeli kihtide arvu arvestav tegur (vt. tabel 2.2);
- $k_A$  - toe laiuse ja paneeli paksuse suhet arvestav tegur (vt. tabel 2.3).



Y-telje suunaline külgnihkepinge paneeli keskel paikneva toe korral

$$\tau_{R,yz} = \frac{V_{yz}/b_{ef,y}}{k_{R,y} \cdot (d_x + d_y)} \quad (2.13)$$

ja paneeli nurgas paikneva toe korral

$$\tau_{R,yz} = \frac{V_{yz}/b_{ef,y}}{k_{R,y} \cdot (d_x + d_y)} \cdot k_A, \quad (2.14)$$

kus

- $V_{yz}$  - y-telje suunaline nihkejõud;
- $b_{ef,y}$  - toe efektiivne laius y-telje suhtes;
- $k_{R,y}$  - paneeli kihtide arvu arvestav tegur (vt. tabel 2.2).

**Tabel 2.2.** Paneeli kihtide arvu arvestavad tegurid  $k_{R,x}$  ja  $k_{R,y}$  [21]

| Kihtide arv | 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 2.3.** Toe laiuse ja paneeli paksuse suhet arvestav tegur  $k_A$  [21]

| $b_{ef,x}/d$ või<br>$b_{ef,y}/d$ | $\leq 1,0$ | $\leq 1,5$ | $\leq 2,0$ |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| $k_A$                            | 1,35       | 1,50       | 1,65       |

X-telje suunalist nihkejõudu paneeli keskel paikneva toe (valem 2.15) ja paneeli nurgas paikneva toe (valem 2.16) korral saab leida järgmiselt [21]:

$$V_{xz} \approx 0,33 \cdot n^{-0,1} \cdot F_d, \quad (2.15)$$

$$V_{xz} \approx 0,67 \cdot n^{-0,1} \cdot F_d, \quad (2.16)$$

kus

- $n$  - ristkihtpuidust paneeli kihtide arv;
- $F_d$  - paneelile mõjuv teoreaktsioon.

Y-telje suunalist nihkejõudu paneeli keskel paikneva toe (valem 2.17) ja paneeli nurgas paikneva toe (valem 2.18) korral saab arvutada järgmiselt [21]:

$$V_{yz} \approx 0,5 \cdot F_d - V_{xz}, \quad (2.17)$$

$$V_{yz} \approx F_d - V_{xz}. \quad (2.18)$$

Paneeli keskel paikneva toe (valem 2.19) ja paneeli nurgas paikneva toe (valem 2.20) efektiivsed mõõtmed leitakse järgnevalt [21]:

$$b_{ef,x} = b_{ef,y} = b_{A,x} + d \cdot \tan 35^\circ, \quad (2.19)$$

$$b_{ef,x} = b_{ef,y} = b_{A,x} + \frac{d}{2} \cdot \tan 35^\circ, \quad (2.20)$$

kus

- $b_{A,x}$  - toe laius;
- $d$  - ristkihtpuidust paneeli paksus.

Ristkihtpuidu arvutuslik külgnihketugevus arvutatakse vastavalt EN 1995-1-1 toodud materjali tugevuse arvutusväärtuse valemile.

$$f_{r,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{r,CLT,k}}{\gamma_M}, \quad (2.21)$$

kus

- $f_{r,CLT,k}$  - normatiivne külgnihketugevus;
- $\gamma_M$  - materjali osavarutegur;
- $k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur.

## 2.2. Ristkihtpuidu armeerimine isepuurivate kruvidega

Koondatud jõud põhjustavad punkttinged kohal ristkihtpuidust plaatides suuri kohalikke külgnihkepingeid ja survepingeid ristikiudu. Täiskeermega isepuurivad kruvid on näidanud väga häid armeerivaid omadusi sellistes pingete situatsioonides. Ristkihtpuidu armeerimist isepuurivate kruvidega on võimalik käsitleda lähtudes Euroopa Tehniliste Tunnustest ja vastavateemalistest uurimustöödest.

### 2.2.1. Surve ristikiudu

Isepuurivate kruvidega ristkihtpuidu kontaktpinna survetugevust ristikiudu on võimalik arvutada vastavalt järgmisele valemile [22]:

$$F_{90,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{c,90} \cdot A_{c,90} \cdot f_{c,90,k} + n \cdot \min\{F_{ax,Rk}; F_{ki,Rk}\} \\ l_{ef,3} \cdot l_{ef,2} \cdot f_{c,90,k} \end{array} \right\}, \quad (2.22)$$

kus

- $k_{c,90}$  - tegur, mis arvestab koormuse konfiguratsiooni, lõhestumisvõimalust ning survedeformatsioonide astet [19];
- $A_{c,90}$  - tegelik kontaktpinna pindala;
- $f_{c,90,k}$  - normatiivne survetugevus ristikiudu;
- $n$  - armeerivate kruvide arv;
- $F_{ax,Rk}$  - kruvi väljatõmbe normtugevus;
- $F_{ki,Rk}$  - kruvi normatiivne nõtketugevus;
- $l_{ef,2}, l_{ef,3}$  - efektiivne jaotuspikkus kruvide otste pinnas.

Paneeli keskel paikneva toe (valem 2.23) ja paneeli nurgas paikneva toe (valem 2.24) efektiivsed jaotuspikkused kruvide otste pinnas leitakse järgnevalt [22]:

$$l_{ef,2} = l_{ef,3} = 2 \cdot l_{ef} + (n_0 - 1) \cdot a_1, \quad (2.23)$$

$$l_{ef,2} = l_{ef,3} = l_{ef} + (n_0 - 1) \cdot a_1 + \min(l_{ef}; a_{1,c}), \quad (2.24)$$

kus

- $l_{ef}$  - keermestatud osa süvistussügavus;
- $n_0$  - kruviridade arv pikikiudu;
- $a_1$  - kruvide vahekaugus;
- $a_{1,c}$  - kruvi kaugus puitelemendi koormamata otsast.

Kruvi väljatõmbe normtugevus arvutatakse vastavalt järgnevale valemile [22]:

$$F_{ax,Rk} = f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef}, \quad (2.25)$$

kus

- $f_{ax,k}$  - kruvi normatiivne teravikupoolne väljatõmbetugevus;
- $d$  - keeme välisläbimõõt.

Kruvi normatiivne nõtketugevus arvutatakse vastavalt järgnevale valemile [22]:

$$F_{ki,Rk} = \chi \cdot N_{pl,k}, \quad (2.26)$$

kus

- $\chi$  - nõtketegur, mis leitakse sõltuvalt kruvi tingsaledusest ja nõtkekõverast;
- $N_{pl,k}$  - normatiivne plastne tõmbekandevõime.

Kruvi normatiivne plastne tõmbekandevõime arvutatakse vastavalt järgnevale valemile [22]:

$$N_{pl,k} = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot f_{y,k}, \quad (2.27)$$

kus

- $d_1$  - keeme siseläbimõõt;
- $f_{y,k}$  - kruvi normatiivne voolavuspiir.

Kruvi tingsaledust ja nõtkekõverast sõltuvat nõtketegurit leitakse järgnevalt [22]:

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{kui } \bar{\lambda}_k \leq 0,2 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_k^2}} & \text{kui } \bar{\lambda}_k > 0,2 \end{cases} \quad (2.28)$$

kus

$$k = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (\bar{\lambda}_k - 0,2) + \bar{\lambda}_k^2]; \quad (2.29)$$

$\bar{\lambda}_k$  - kruvi tingsaledus.

Kruvi tingsaledus leitakse järgneva valemiga [22]:

$$\bar{\lambda}_k = \sqrt{\frac{N_{pl,k}}{N_{ki,k}}}, \quad (2.30)$$

kus

- $N_{ki,k}$  - elastne nõtkekandevõime.

Kruvi elastne nõtkekandevõime leitakse järgmise valemiga [22]:

$$N_{ki,k} = \sqrt{c_h \cdot E_s \cdot I_s}, \quad (2.31)$$

kus

$c_h$  - elastne väljatõmbetugevus;

$E_s \cdot I_s$  - paindejäikus.

Elastne väljatõmbetugevus leitakse järgnevalt [22]:

$$c_h = (0,19 + 0,012 \cdot d_1) \cdot \rho_k \cdot \left( \frac{90^\circ + \alpha}{180^\circ} \right), \quad (2.32)$$

kus

$\rho_k$  - ristkihtpuidu tihedus.

Paidejäikus leitakse järgnevalt [22]:

$$E_s \cdot I_s = \frac{210000 \cdot \pi \cdot d_1^4}{64}. \quad (2.33)$$

Isepuurivate kruvidega ristkihtpuidu kontaktpinna arvutuslik survetugevus ristikiudu arvutatakse järgmiselt:

$$F_{90,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{90,Rk}}{\gamma_M}, \quad (2.34)$$

kus

$F_{90,Rk}$  - normatiivne armeeritud ristkihtpuidu survetugevus;

$\gamma_M$  - materjali osavarutegur;

$k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur.

## 2.2.2. Külgnihe

Ristkihtpuidu armeerimisel isepuurivate kruvidega külgnihkepingete vastu võtmiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused [23]:

$$d/3 \leq a_1 < d, \quad (2.35)$$

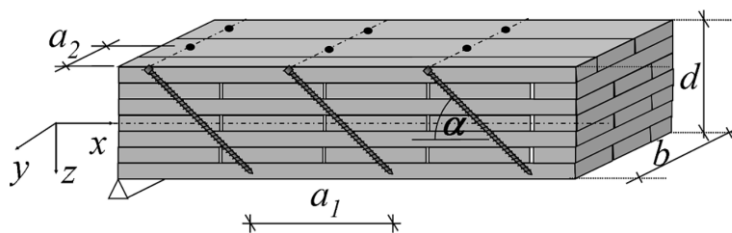
$$d/3 \leq a_2 < 1,5 \cdot d, \quad (2.36)$$

$$\alpha = 45^\circ, \quad (2.37)$$

$$d_x = d_y, \quad (2.38)$$

kus

- $d$  - ristkihtpuidust paneeli paksus (vt. joonis 2.4);
- $a_1$  - kruvide vaheline kaugus risti paneeli ristikihiga (vt. joonis 2.4);
- $a_2$  - kruvide vaheline kaugus paneeli ristikihi suunas (vt. joonis 2.4);
- $d_x, d_y$  - paneeli kihtide paksused (vt. joonis 2.3).



**Joonis 2.4.** Armeerivate kruvide paiknemine ristkihtpuidust elemendis [21]

Isepuurivate kruvidega armeeritud ristkihtpuidust plaadi koormamisel risti plaadi kesk-pinnaga peab olema täidetud järgmine tingimus [21]:

$$\tau_{r,max,d} \leq \frac{k_{mod} \cdot \bar{f}_{R,CLT,k}}{\gamma_M}, \quad (2.39)$$

kus

- $\tau_{r,max,d}$  - arvutuslik maksimaalne külgnihkepinge;
- $k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur;
- $\bar{f}_{R,CLT,k}$  - armeeritud ristkihtpuidu normatiivne külgnihketugevus;
- $\gamma_M$  - materjali osavarutegur.

Armeeritud ristkihtpuidu külgnihketugevus koosneb materjali külgnihketugevusest ja kurvide tõmbetugevusest ning arvutatakse järgmiselt [23]:

$$\bar{f}_{R,CLT,k} = k_{R,90} \cdot f_{R,CLT,k} + \frac{R_{ax,k}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}}, \quad (2.40)$$

kus

- $k_{R,90}$  - survepingeid arvestav tegur;
- $f_{R,CLT,k}$  - ristkihtpuidu normatiivne külgnihketugevus;
- $R_{ax,k}$  - kruvi väljatõmbe normtugevus;
- $a_{2,ef}$  - efektiivne kruvide vaheline kaugus paneeli ristikihi suunas.

Survepingeid arvestav tegur leitakse järgnevalt [21]:

$$k_{R,90} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,35 \cdot \sigma_{c,90,k} \\ 1,20 \end{array} \right., \quad (2.41)$$

kus

- $\sigma_{c,90,k}$  - survepinge ristikiudu.

Survepinge ristikiudu, mis on vajalik teguri  $k_{R,90}$  leidmiseks, koosneb koondatud koormusest ja kruvide vertikaalsest jõukomponendist [23]:

$$\sigma_{c,90,k} = \frac{F_k}{b_{ef,x} \cdot b_{ef,y}} + \frac{R_{ax,k}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}}, \quad (2.42)$$

kus

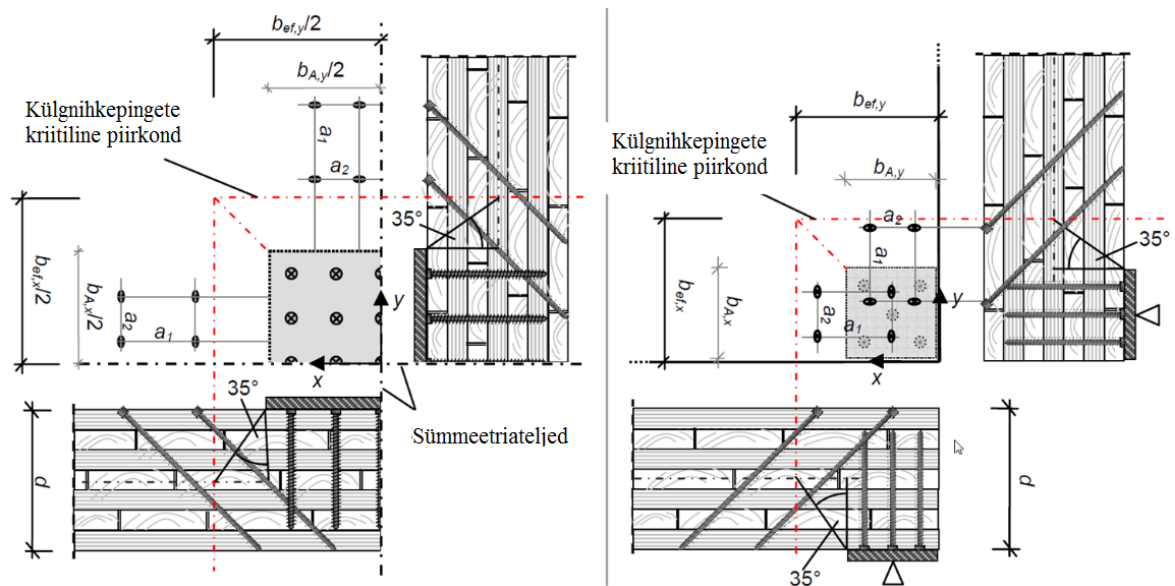
- $F_k$  - mõjuv põikjõud;
- $b_{ef,x}, b_{ef,y}$  - toe efektiivsed mõõtmed (vt. joonis 2.5).

Efektiivne kruvide vaheline kaugus kruvide töötamise suunale risti on leitav järgnevalt [21]:

$$a_{2,ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} a_2 \\ b_{ef,x}/n_{\perp} \end{array} \right., \quad (2.43)$$

kus

- $n_{\perp}$  - kandva sihiga risti olevate kruviridade arv.



**Joonis 2.5.** Punkttoele toetatud isepuuirivate kruvidega armeeritud paneeli külgnihkepingete kriitiline mõjupiirkond ja kruvide paiknemine paneeli keskel (vasakul) ja paneeli nurgas (paremal) [20]

Ristkihtpuidust elemendis kihtide suhtes nurga all paikneva kruvi väljatõmbe normtugevus on leitav järgmise valemiga [21]:

$$R_{ax,k} = f_{ax,k} \cdot d \cdot \left( \frac{l_{ef,L}}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha_L + \sin^2 \alpha_L} + \frac{l_{ef,C}}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha_C + \sin^2 \alpha_C} \right), \quad (2.44)$$

kus

- $d$  - keerme välisläbimõõt;
- $l_{ef,L}, l_{ef,C}$  - kruvi töötava keerme pikkus samasuunalistes kihtides;
- $\alpha_L, \alpha_C$  - kruvi nurk ristkihtpuidu kihi kiudude suhtes.

### 2.3. Kasutuspiiriseisund

Käesoleva töö raames on käsitletud ristkihtpuidust rõdupaneele, millele ei ole kehtestatud vibratsioonide piirmäärasid. Kasutuspiiriseisundi seisukohalt on vajalik kontrollida deformatsioonide jäämist lubatud piiridesse.

Nihkepaindlike ristikihtide tõttu tuleb ristkihtpuidu deformatsioonide arvutamisel kindlasti arvesse võtta nihkest põhjustatud deformatsioone. [14]



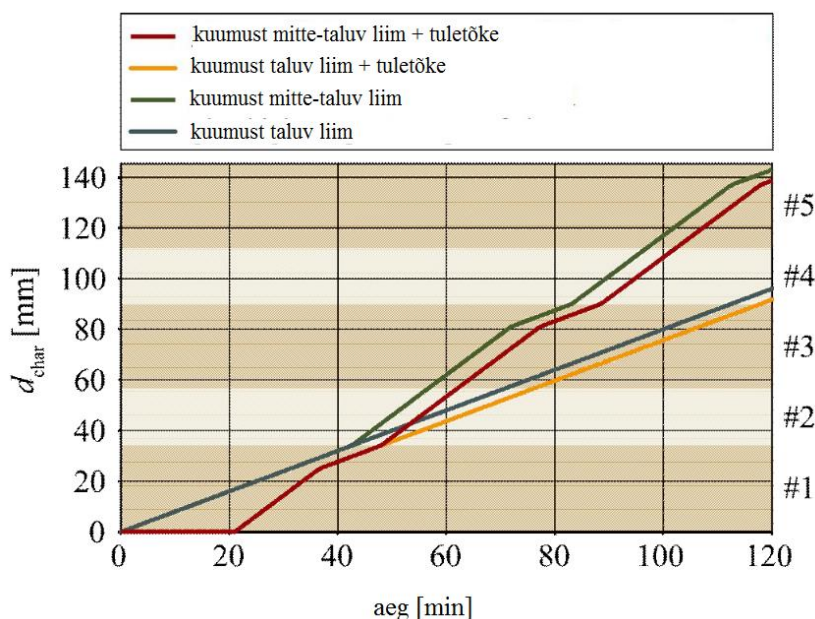
Ristkihtpuidus erinevates koormusolukordades tekkivate külgnihkepingete tõttu võetakse deformatsiooni tegur  $k_{def}$  suurem kui sae- ja liimpuidul. Erineva kirjanduse põhjal on määratud  $k_{def}$  väärtus kolme- kuni seitsmekihilise paneeli puhul vastavalt kasutusklassile. Soovituslik väärtus esimese kasutusklassi korral  $k_{def} = 0,85$  ja teise kasutusklassi korral  $k_{def} = 1,10$ . Enam kui seitsmekihiliste ristkihtpuidust elementide puhul võib kasutada vineeri deformatsiooni tegureid: vastavalt standardile EN 636 esimese kasutusklassi korral  $k_{def} = 0,80$  ja teise kasutusklassi korral  $k_{def} = 1,00$ . [14]

## 2.4. Tulepüsivus

Ristkihtpuidu tulepüsivuse arvutused tehakse standardi EN 1995-1-2 kohaselt efektiivristlõike meetodil. Seetõttu saab määravaks söestumissügavus aja jooksul. Ristkihtpuidu puhul sõltub söestumissügavus söestumismäärast  $\beta$ , kasutatava liimi tüübist (kuumust taluv või mitte-taluv) ja tuletõkke kasutamisest (vt. joonis 2.6). [14]

Söestumismäärad ristkihtpuidule on määratud järgnevalt [14]:

- ristkihtpuit, mille lamellide vahelised vahed on kuni 2 mm:  $\beta = 0,65$  mm/min,
- ristkihtpuit, mille lamellide vahelised vahed on kuni 6 mm:  $\beta = 0,80$  mm/min.



**Joonis 2.6.** Viiekihilise ristkihtpuidu söestumissügavus sõltuvalt ajast: erinevad olukorrad vastavalt kasutatava liimi tüübist ja kattekihtide tuletõkke kasutamisest [14]

Efektiivristlõige arvutatakse algristlõike mõõtmete vähendamise teel efektiivse söestumissügavuse võrra. Efektiivne söestumissügavus leitakse vastavalt järgmisele valemile [24]:

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0, \quad (2.45)$$

kus

$$k_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} t/20 \\ 1,0 \end{array} \right.$$

$d_{char}$  - söestunud kiht;

$d_0$  - nulltugevusega kiht, 7 mm;

$t$  - tulekahju kestus minutites.

Ristkihtpuidu söestumissügavus leitakse vastavalt järgmisele valemile [24]:

$$d_{char} = \beta \cdot t, \quad (2.46)$$

kus

$\beta$  - söestumismäär.

Efektiivristlõike meetodi kasutamisel tugevusomadusi ei vähendata, kuid kasutatakse ristkihtpuidu arvutustugevust tulekahjuolukorras  $f_{d,fi}$  (valem 2.47). [24]

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_k}{\gamma_{M,fi}}, \quad (2.47)$$

kus

$f_k$  - ristkihtpuidu normatiivne tugevus;

$k_{fi}$  - tegur, puidupõhiste plaatide puhul  $k_{fi} = 1,15$ ;

$k_{mod,fi}$  - modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel,  $k_{mod,fi} = 1$ ;

$\gamma_{M,fi}$  - materjali osavarutegur tulepüsivusarvutusel,  $\gamma_{M,fi} = 1$ .

### **3. RÕDUKONSTRUKTSIOONIDE KONTROLLARVUTUSED NORRAS, TRONDHEIMIS PAIKNEVA KORTERMAJA NÄITEL**

Käsitletav hoone paikneb Norras, Trondheimis. Tegemist on viiekorruselise puitkarkassil korterelamuga. Hoone ehitatakse tehases valmistatud ruumelementidest. Hoone arhitektuurne lahendus on toodud Lisas 1.

Käesoleva töö raames teostatakse tugevuskontrollid ristkihtpuidust rõdukonstruktsioonidele kandepiiriseisundis ja kontrollitakse deformatsioonide jäämist lubatud piiridesse kasutuspiiriseisundis. Teostatakse liimpuidust rõdupostide ristlõigete tugevuskontrollid kandepiiriseisundis. Eeltoodud kandekonstruktsioonidele teostatakse tulepüsivusarvutused. Lisaks lahendatakse rõdupostide ja –paneelide konstruktsioonisõlmed.

Sisejõudude ja toereaktsioonide leidmiseks kasutatakse arvutusprogrammi Dlubal RFEM ja selle lisa RF-Laminate.

#### **3.1. Koormused**

##### **Kasuskoormus**

Rõdupaneelile mõjuv koormus võetakse vastavalt standardi EN 1991-1-1:2002 Norra rahvuslikus lisas olevale tabelile NA.6.2. Rõdule mõjub jaotatud koormus  $q_k = 4,0 \text{ kN/m}^2$ .

##### **Püsikoormused**

Sisejõudude leidmisel on arvestatud ainult konstruktiivsete elementide omakaalukoormust. Rõdupiirete ja rõdupaneeli katvate kihtide omakaal on teiste koormustega võrreldes tühised ning seetõttu on need arvutusmudeli lihtsustamiseks arvutustest välja jäetud.

##### **Lumekoormus**

Lumekoormus arutatakse vastavalt standardile EN 1991-1-3:2006.

Vastavalt standardi EN 1991-1-3:2006 Norra rahvuslikule lisale on normatiivne lumekoormus maapinnal Trondheimis:  $s_k = 4,0 \text{ kN/m}^2$ .

Katuse lumekoormuse normsuurus määratakse järgmise valemiga [25]:

$$s = \mu_i \cdot s_k, \quad (3.1)$$

kus

- $\mu_i$  - lumekoormuse kujutegur;
- $s_k$  - lumekoormuse normsuurus maapinnal.

Käsitletava konstruktsiooni kõrgeim paneel toimib varikatusena, mille kaldenurk jääb alla  $5^\circ$ . Vastavalt standardi EN 1991-1-3:2006 tabelile 5.2 võetakse katusele, mille kaldenurk on vahemikus  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ , lumekoormuse kujutegur  $\mu_1 = 0,8$ . [25]

Normatiivne lumekoormus varikatusena töötavale paneelile saadakse valemiga 3.1:

$$s = 0,8 \cdot 4,0 = 3,2 \text{ kN/m}^2$$

### **Tuulekoormus**

Tuulekoormused rõdupaneelide kandevõime kontrollimisel hetkelise mõjumise tõttu määravaks ei saa. Tuule tõstev koormus võib saada määravaks konstruktsiooni kõrgeima paneeli puhul, kus tuule tõstev koormus võib ületada paneeli omakaalukoormust. Maastikutüüpi, suuna-, aastaaja- ja pinnavormitegurit puudutava informatsiooni puudulikkuse tõttu antud töö raames eelkirjeldatud situatsiooni ei käsitleta.

## 3.2. Koormuskombinatsioonid

Kandepiirseisundis alalise või ajutise arvutusolukordade koormuskombinatsioonid leitakse vastavalt järgmisele valemile:

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

kus

- $\gamma$  - koormuse osavarutegur vastavalt indeksile;
- $G_{k,j}$  - alaline koormus;
- $Q_{k,1}$  - domineeriv muutuvkoormus;
- $Q_{k,i}$  - muu muutuvkoormus;
- $\psi$  - kombinatsioonitegur.

Alalise koormuse ebasoodsa mõju korral on osavarutegur  $\gamma_{G,j} = 1,2$  (kandevõime kaotus). Muutuvkoormuse ebasoodsa mõju korral on osavarutegur  $\gamma_Q = 1,5$ . Mittedomineeriva muutuvkoormuse kombinatsioonitegur on lumekoormusel  $\psi_0 = 0,7$ . [26]

Kandepiirseisundis erakorralise arvutusolukorra koormuskombinatsioonid leitakse järgnevalt:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}. \quad (3.3)$$

Erakorralises arvutusolukorras on osavarutegurite väärtused 1,0. Domineeriva muutuvkoormuse kombinatsioonitegur on kasuskoormusel klass A puhul  $\psi_1 = 0,5$  ja lumekoormusel  $\psi_1 = 0,5$ . Mittedomineeriva muutuvkoormuse kombinatsioonitegur on kasuskoormusel klass A puhul  $\psi_2 = 0,3$  ja lumekoormusel  $\psi_2 = 0,2$ . [26]

Lõplik deformatsioon tuleks arvutada koormuste kvaasi-permanentse koormuskombinatsiooni järgi:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} (1 + k_{def}) + Q_{k,1} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + \sum_{i > 1} Q_{k,i} \cdot (\psi_{0,i} + \psi_{2,1} \cdot k_{def}). \quad (3.4)$$

### Koormuskombinatsioonid

Käesolevas töös on saanud määravateks järgnevad kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid:

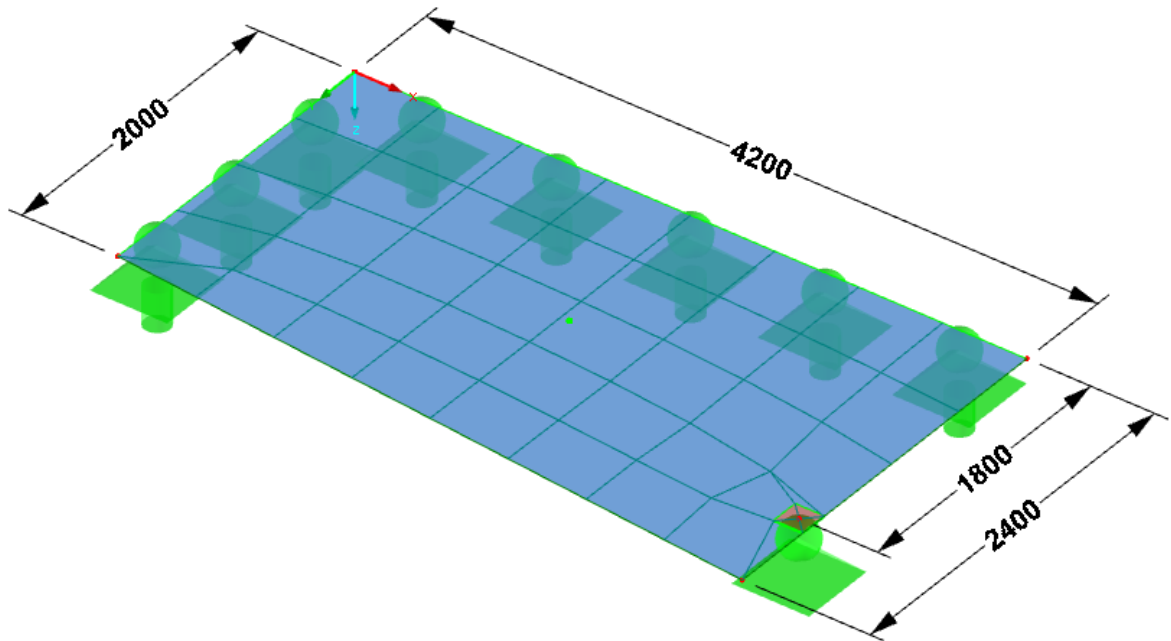
- KK1:  $1,2 \cdot Omakaal + 1,5 \cdot Kasuskoormus$ ;
- KK2:  $1,2 \cdot Omakaal + 1,5 \cdot (Kasuskoormus + 0,7 \cdot Lumi)$ ;
- KK3:  $Omakaal + 0,5 \cdot Kasuskoormus$  (tulekahju).

Rõdupaneelide puhul on määravaks saanud järgnev kasutuspiirseisundi koormuskombinatsioon:

- KK4:  $(1 + 1,10)Omakaal + (1 + 0,3 \cdot 1,10)Kasuskoormus$ .

### 3.3. Ristkihtpuidust rõdupaneeli kontrollarvutused

Töös käsitletav rõdu on trapetsikujulise pinnalahendusega. Rõdupaneelid on ristkihtpuidust, mis on pikemat külge pidi kinnitatud hoone külge ning ühelt lühemalt küljelt toetatud rõdudevahelisele seinale ja avatud nurgast liimpuidust postile. Rõdupaneeli arvutusmodel koos paneeli mõõtmetega on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1. Rõdupaneeli arvutusmodel

Rõdupaneeliks võetakse viiekihiline võrdsete kihtidega ristkihtpuidust paneel paksusega 150 mm. Ristkihtpuidu üksiku kihi paksus  $a = 30$  mm. Paneeli välimised kihid on x-telje sihiliselt. Ristkihtpuidu tootmiseks kasutatav saematerjal kuulub tugevusklassi C24.

### 3.3.1. Kandepiir seisund

Koormuse kestusklass on keskkestev ja konstruktsiooni kasutusklass on 2. Modifikatsiooni-  
tegur  $k_{mod} = 0,80$  ja ristkihtpuidu osavarutegur  $\gamma_M = 1,25$ . [20]

#### 3.3.1.1. Paine

Paindekandevõime puhul sai määravaks koormuskombinatsioon KK1:

$$1,2 \cdot \text{Omakaal} + 1,5 \cdot \text{Kasuskoormus}$$

Käsitletava ristkihtpuidust paneeli paindetugevuseks võib võtta selle valmistamiseks kasutatud saematerjali paindetugevuse. Kasutatud saepuit kuulub tugevusklassi C24 paindetugevusega  $f_{m,k} = 24$  N/mm<sup>2</sup>. [3]

Ristkihtpuidus kasutatavate lamellide laius jääb vahemikku 40 kuni 300 mm. Käsitletava paneeli väikseim mõõde on 2 meetrit, seega minimaalne paralleelselt töötavate lamellide arv on  $n = 2000/300 = 6,67 \Rightarrow 7$ .

Ristkihtpuidu paindetugevuse arvutamiseks kasutatav paralleelselt töötavaid lamelle arvestav tegur  $k_l$  leitakse valemiga 2.4:

$$k_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 1 + 0,025 \cdot 7 = 1,175 \end{array} \right. \Rightarrow k_l = 1,1.$$

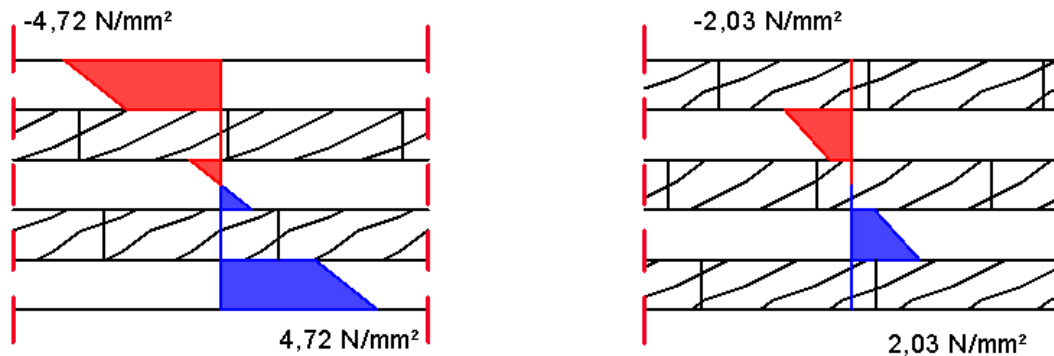
Ristkihtpuidu normatiivne paindetugevus vastavalt valemile 2.3:

$$f_{m,CLT,k} = 1,1 \cdot 24 = 26,4 \text{ N/mm}^2.$$

Ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus vastavalt valemile 2.5:

$$f_{m,CLT,d} = \frac{0,8 \cdot 26,4}{1,25} = 16,9 \text{ N/mm}^2.$$

Paindepingete leidmiseks käsitletavas paneelis on kasutatud programmi RF-Laminate. Paindepingete jagunemine x-telje ja y-telje suunalistes kihtides on toodud joonisel 3.2.



**Joonis 3.2.** Paindepingete jagunemine x-telje suunalistes kihtides (vasakul) ja y-telje suunalistes kihtides (paremal)

Paindekandevõime vastavalt tingimusele 2.1:

$$\sigma_{x,max,d} = 4,72 \text{ N/mm}^2 < f_{m,CLT,d} = 16,9 \text{ N/mm}^2,$$

$$\sigma_{y,max,d} = 2,03 \text{ N/mm}^2 < f_{m,CLT,d} = 16,9 \text{ N/mm}^2.$$

Paindekandevõime on tagatud.

### 3.3.1.2. Surve ristikiudu

Survel ristikiudu sai määravaks koormuskombinatsioon KK2:

$$1,2 \cdot \text{Omakaal} + 1,5 \cdot (\text{Kasuskoormus} + 0,7 \cdot \text{Lumi}).$$

Rõdupaneelid on avatud nurgast toetatud 200×200 mm ristlõikega liimpuidust postidele.

Ristkihtpuidu normatiivne survetugevus ristikiudu:  $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ .



Ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus vastavalt valemile 2.9:

$$f_{c,90,CLT,d} = \frac{0,8 \cdot 2,85}{1,25} = 1,82 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimaalne survejõud tekib teise korruse rõdupaneeli pinnale paneeli toetavast liimpuidust postist. Maksimaalse survejõud on leitud kasutades programmi RFEM:

$$F_{c,90,d} = 102 \text{ kN}$$

Kontaktpinna arvutuslik survepinge vastavalt valemile 2.7:

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = \frac{102 \cdot 10^3}{200 \cdot 200} = 2,54 \text{ N/mm}^2.$$

Toe efektiivsed laiused (vt. joonis 2.2):

$$l_{ef} = 200 + \frac{150}{2} \cdot \tan 30^\circ = 243 \text{ mm},$$

$$w_{ef} = 200 + 150 \cdot \tan 30^\circ = 287 \text{ mm}.$$

Tegur  $k_{c,90,CLT}$  vastavalt valemile 2.8:

$$k_{c,90,CLT} = \sqrt{\frac{243 \cdot 287}{200 \cdot 200}} = 1,34.$$

Kandevõime vastavalt tingimusele 2.6:

$$\sigma_{c,90,CLT,d} = 2,54 \text{ N/mm}^2 > k_{c,90,CLT} \cdot f_{c,90,CLT,d} = 1,34 \cdot 1,82 = 2,44 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime ei ole tagatud.

Kuna kandevõime survele ristikiudu ei ole tagatud tuleb ristkihtpuidust paneeli armeerida isepuurivate kruvidega.

### 3.3.1.3. Ristkihtpuidust paneeli armeerimine survele ristikiudu

Paneeli armeerimiseks kasutatakse SFS intec kruve WT-T-6,5×65.

Kruvi WT-T-6,5×65 tehnilised näitajad [22]:

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| keerme välisläbimõõt:          | $d = 6,5 \text{ mm};$             |
| keerme siseläbimõõt:           | $d_I = 4,6 \text{ mm};$           |
| kruvi pikkus:                  | $l_s = 65 \text{ mm};$            |
| normatiivne voolavuspiir:      | $f_{y,k} = 990 \text{ N/mm}^2;$   |
| normatiivne väljatõmbetugevus: | $f_{ax,k} = 12,9 \text{ N/mm}^2.$ |

Ristkihtpuidu pind armeeritakse nelja rea kruvidega, igas reas on neli kruvi. Kasutatakse seega kokku  $n = 4 \cdot 4 = 16$  kruvi.

Kruvid paigutatakse omavaheliste vahedega mõlemas suunas  $a_I = 50 \text{ mm}$ . Kruvide kaugus paneeli otsas on 25 mm.

Ristkihtpuidu tiheduseks kandevõime piirseisundi kontrollarvutustel võib võtta tootmises kasutatud saepuidu tiheduse  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$  (C24).

Kruvide paiknemine paneelis on toodud Lisas 2.

Kruvi paindejäikus vastavalt valemile 2.33:

$$E_s \cdot I_s = \frac{210000 \cdot \pi \cdot 4,6^4}{64} = 4,62 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2.$$

Elastne väljatõmbetugevus vastavalt valemile 2.32:

$$c_h = (0,19 + 0,012 \cdot 4,6) \cdot 350 \cdot \left( \frac{90^\circ + 90^\circ}{180^\circ} \right) = 85,8 \text{ N/mm}^2.$$

Kruvi elastne nõtkekandevõime vastavalt valemile 2.31:

$$N_{ki,k} = \sqrt{85,8 \cdot 4,62 \cdot 10^6} = 19,9 \text{ kN}.$$

Kruvi plastne tõmbekandevõime vastavalt valemile 2.27:

$$N_{pl,k} = \pi \cdot \frac{4,6^2}{4} \cdot 990 = 16,5 \text{ kN}.$$

Kruvi tingsaledus vastavalt valemile 2.30:

$$\bar{\lambda}_k = \sqrt{\frac{16,5}{19,9}} = 0,911.$$

Tegur  $k$  vastavalt valemile 2.29:

$$k = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,911 - 0,2) + 0,911^2] = 1,09.$$

Kuna  $\bar{\lambda}_k > 0,2$ , siis nõtketegur vastavalt valemile 2.28:

$$\chi = \frac{1}{1,09 + \sqrt{1,09^2 - 0,911^2}} = 0,592.$$

Kruvi nõtketugevus vastavalt valemile 2.26:

$$F_{ki,Rk} = 0,592 \cdot 16,5 = 9,77 \text{ kN}.$$

Kruvi väljatõmbe normtugevus vastavalt valemile 2.25:

$$F_{ax,Rk} = 12,9 \cdot 6,5 \cdot 65 = 5,45 \text{ kN}.$$

Efekttiivne jaotuspikkus kruvide otste pinnas x-telje sihis vastavalt valemile 2.24:

$$l_{ef,2} = 65 + (4 - 1) \cdot 50 + 25 = 240 \text{ mm}.$$

Efekttiivne jaotuspikkus kruvide otste pinnas y-telje sihis vastavalt valemile 2.23:

$$l_{ef,3} = 2 \cdot 65 + (4 - 1) \cdot 50 = 280 \text{ mm}.$$

Armeeritud kontaktpinna normatiivne survetugevus ristikiudu vastavalt valemile 2.22:

$$F_{90,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,34 \cdot 200 \cdot 200 \cdot 2,85 + 16 \cdot \min\{9,77 \cdot 10^3; 5,45 \cdot 10^3\} = 240 \text{ kN} \\ 240 \cdot 280 \cdot 2,85 = 192 \text{ kN} \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{90,Rk} = 192 \text{ kN}.$$

Armeeritud kontaktpinna arvutuslik survetugevus ristikiudu vastavalt valemile 2.34:

$$F_{90,Rd} = \frac{0,8 \cdot 192}{1,25} = 123 \text{ kN} > F_{c,90,d} = 102 \text{ kN}.$$

Kandevõime on tagatud.

### 3.3.1.4. *Külgnihe*

Külgnihkekandevõime puhul sai määravaks koormuskombinatsioon KK1:

$$1,2 \cdot \textit{Omakaal} + 1,5 \cdot \textit{Kasuskoormus}$$

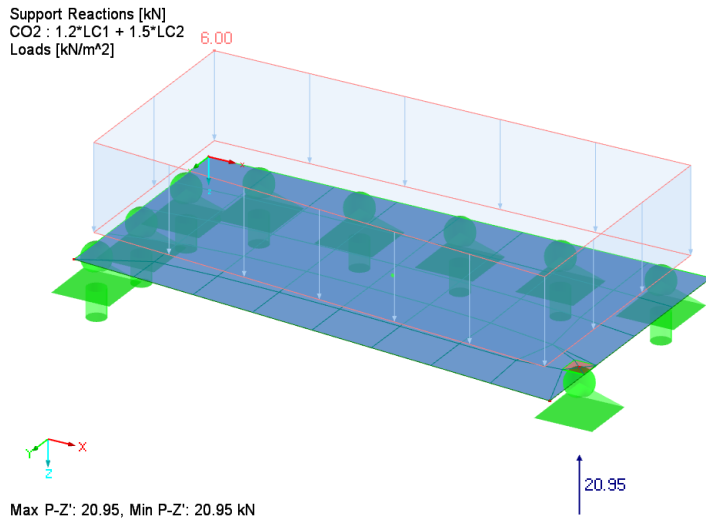
Tagavara kasuks on eeldatud, et külgnihkele töötava lamelli laius on väiksem kui neli korda paksust ning lamellid ei ole omavahel serviti kokku liimitud. Seega ristkihtpuidu külgnihketugevus  $f_{r,CLT,k} = 0,70 \text{ N/mm}^2$ .

Ristkihtpuidu arvutuslik külgnihketugevus vastavalt valemile 2.21:

$$f_{r,CLT,d} = \frac{0,8 \cdot 0,70}{1,25} = 0,448 \text{ N/mm}^2.$$

Paneeli toetamisest liimpuidust postile tekkiv külgnihkepingeid põhjustav arvutuslik põikjõud on leitud kasutades programmi RFEM (vt. joonis 3.3):

$$F_d = 21,0 \text{ kN}$$



**Joonis 3.3.** Kuvatõmmis programmist RFEM: külgnihkepingeid põhjustav arv. põikjõud

Kandevõime tagavara kasuks leitakse nihkejõud vastavalt olukorrale, kus ristkihtpuidust paneel on toetatud nurgast.

X-telje suunaline nihkejõud paneeli nurgas paikneva toe korral vastavalt valemile 2.16:

$$V_{xz} \approx 0,67 \cdot 5^{-0,1} \cdot 21,0 = 12,0 \text{ kN.}$$

Y-telje suunaline nihkejõud paneeli nurgas paikneva toe korral vastavalt valemile 2.18:

$$V_{yz} \approx 21,0 - 12,0 = 9,00 \text{ kN.}$$

Toe efektiivne laius x-telje suhtes vastavalt valemile 2.19:

$$b_{ef,x} = 200 + 150 \cdot \tan 35^\circ = 306 \text{ mm.}$$

Toe efektiivne laius y-telje suhtes vastavalt valemile 2.20:

$$b_{ef,y} = 200 + \frac{150}{2} \cdot \tan 35^\circ = 253 \text{ mm.}$$

Paneeli kihte arvestavad tegurid vastavalt tabelile 2.2:

$$k_{R,x} = 2,00 \text{ ja}$$

$$k_{R,y} = 1,00.$$

Kasutades nihkejõudusid, mis tekivad nurgas paikneva toekorral, võib maksimaalsed külgnihkepinged leida kasutades paneeli keskel paikneva toe arvutusvalemeid.

X-telje suunaline külgnihkepinge vastavalt valemile 2.11:

$$\tau_{R,xz} = \frac{12,0 \cdot 10^3 / 306}{2,00 \cdot (30 + 30)} = 0,327 \text{ N/mm}^2 < f_{r,CLT,d} = 0,448 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime on tagatud.

Y-telje suunaline külgnihkepinge vastavalt valemile 2.13:

$$\tau_{R,yz} = \frac{9,00 \cdot 10^3 / 253}{1,00 \cdot (30 + 30)} = 0,593 \text{ N/mm}^2 > f_{r,CLT,d} = 0,448 \text{ N/mm}^2.$$

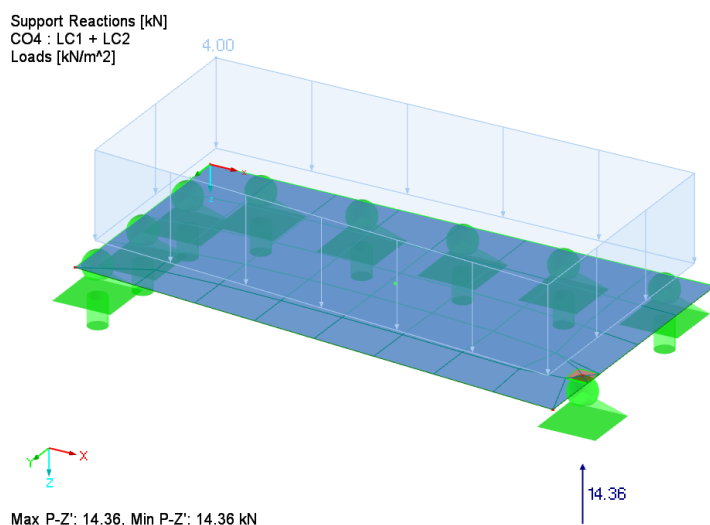
Kandevõime ei ole tagatud.

Kuna külgnihkekandevõime ei ole tagatud tuleb ristkihtpuidust paneeli armeerida isepuurivate kruvidega.

### 3.3.1.5. Ristkihtpuidust paneeli armeerimine külgnihkele

Paneeli toetamisest liimpuidust postile tekkinud külgnihkepingeid põhjustav normatiivne põikjõud on leitud kasutades arvutusprogrammi RFEM (vt. joonis 3.4):

$$F_k = 14,4 \text{ kN}$$



**Joonis 3.4.** Kuvatõmmis programmist RFEM: külgnihkepingeid põhjustav normpõikjõud

Ristkihtpuidust paneeli armeerimiseks kasutatakse SFS intec kruve WT-T-8,2×190.

Kruvi WT-T-8,2×190 tehnilised näitajad [22]:

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| keerme välisläbimõõt:                  | $d = 8,2 \text{ mm};$             |
| kruvi pikkus:                          | $l_s = 190 \text{ mm};$           |
| keermestatud osa pikkus kruvi otstest: | $l_g = 80 \text{ mm};$            |
| normatiivne väljatõmbetugevus:         | $f_{ax,k} = 13,4 \text{ N/mm}^2.$ |

Ristkihtpuidust paneel armeeritakse külgnihkepingetele posti juures igas suunas samamoodi. Paneeli on vaja armeerida osas, kus külgnihkepinged ületavad külgnihkekandevõimet. Armeerimist vajava paneeliosa leidmiseks eeldatakse, et külgnihkepingete jagunemine toest kuni 2/3-ni sildeavast on lineaarne:

$$1800 \cdot \frac{2}{3} - \left( \frac{1800 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,448}{0,594} \right) = 295 \text{ mm}.$$

Kruvide vaheline kaugus  $a_1 = 100 \text{ mm}$  (valitud). Seega kruviridade arv  $a_1$  suunas:

$$295/100 = 2,95 \Rightarrow 3.$$

Kruvide vaheline kaugus  $a_2 = 50 \text{ mm}$  (valitud) ning kruviridade arv  $a_2$  suunas:  $n_{\perp} = 4$  (valitud).

Kruvide paiknemine peab vastama tingimustele 2.35 – 2.37:

$$150/3 = 50 \text{ mm} \leq a_1 = 100 \text{ mm} < 150 \text{ mm},$$

$$150/3 = 50 \text{ mm} \leq a_2 = 50 \text{ mm} < 1,5 \cdot 150 = 225 \text{ mm},$$

$$\alpha = 45^\circ.$$

Kruvide paiknemine paneelis on toodud Lisas 2.

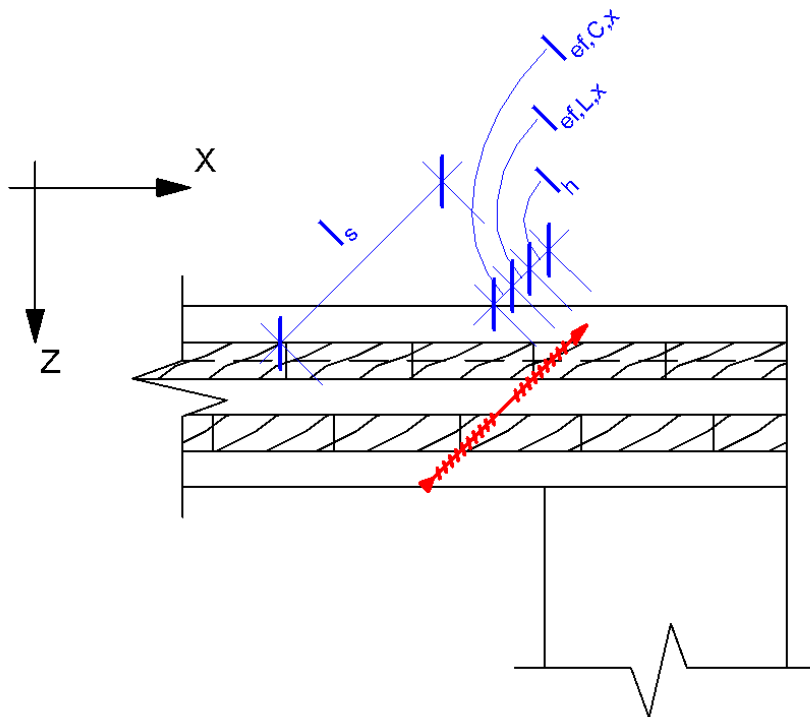
### Armeeritud paneeli x-telje suunaliste nihkepingete kontroll

Kruvi töötava keermepikkus pikisuunalistes kihtides (vt. joonis 3.5):

$$l_{ef,L,x} = \sqrt{2} \cdot d_x - l_h = \sqrt{2} \cdot 30 - 20 = 22,4 \text{ mm.}$$

Kruvi töötava keermepikkus ristisuunalistes kihtides (vt. joonis 3.5):

$$l_{ef,C,x} = \sqrt{2} \cdot 0,5 \cdot d_x = \sqrt{2} \cdot 0,5 \cdot 30 = 21,2 \text{ mm.}$$



**Joonis 3.5.** Kruvi töötava keermepikkus x-telje suunas

X-telje suunas töötava kruvi väljatõmbe normtugevus vastavalt valemile 2.44:

$$R_{ax,k,x} = 13,4 \cdot 8,2 \cdot \left( \frac{22,4}{1,2 \cdot \cos^2 45^\circ + \sin^2 45^\circ} + \frac{21,2}{1,2 \cdot \cos^2 90^\circ + \sin^2 90^\circ} \right) = 4,55 \text{ kN.}$$

Efektivne kruvide vaheline kaugus kruvide töötamise suunale risti vastavalt valemile 2.43:

$$a_{2,ef,x} = \max \left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 306/4 = 76,5 \end{array} \right. \Rightarrow a_{2,ef,x} = 76,5 \text{ mm.}$$



Teguri  $k_{R,90}$  leidmiseks vajalik survepinge ristikiudu vastavalt valemile 2.42:

$$\sigma_{c,90,k,x} = \frac{14,4 \cdot 10^3}{306 \cdot 253} + \frac{4,55 \cdot 10^3 / \sqrt{2}}{100 \cdot 76,5} = 0,607 \text{ N/mm}^2.$$

Survepingeid arvestav tegur vastavalt valemile 2.41:

$$k_{R,90,x} = \min \left\{ 1 + 0,35 \cdot 0,607 = 1,21 \right. \\ \left. 1,20 \right\} \Rightarrow k_{R,90,x} = 1,20.$$

Armeeritud ristkihtpuidu külgnihketugevus vastavalt valemile 2.40:

$$\bar{f}_{R,CLT,k,x} = 1,20 \cdot 0,70 + \frac{4,55 \cdot 10^3 / \sqrt{2}}{100 \cdot 76,5} = 1,26 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime kontroll vastavalt tingimusele 2.39:

$$\frac{k_{mod} \cdot \bar{f}_{R,CLT,k,x}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 1,26}{1,25} = 0,806 \text{ N/mm}^2 > \tau_{R,xz} = 0,327 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime on tagatud.

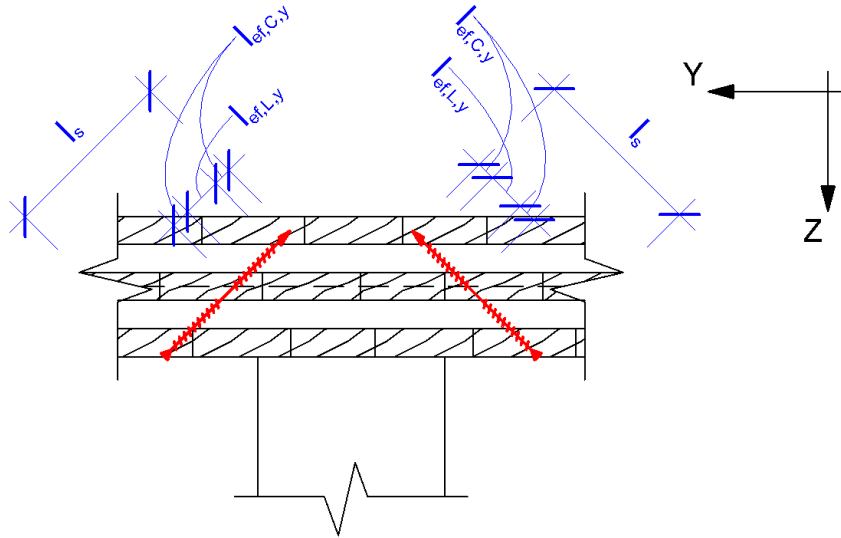
### **Armeeritud paneeli y-telje suunaliste nihkepingete kontroll**

Kruvi töötava keerme pikkus pikisuunalistes kihtides (vt. joonis 3.6):

$$l_{ef,L,y} = \sqrt{2} \cdot d_x = \sqrt{2} \cdot 30 = 42,4 \text{ mm}.$$

Kruvi töötava keerme pikkus ristisuunalistes kihtides (vt. joonis 3.6):

$$l_{ef,C,y} = l_g - l_{ef,L,y} = 80 - 42,4 = 37,6 \text{ mm}.$$



**Joonis 3.6.** Kruvi töötava keerme pikkus y-telje suunas

Y-telje suunas töötava kruvi väljatõmbe normtugevus vastavalt valemile 2.44:

$$R_{ax,k,y} = 13,4 \cdot 8,2 \cdot \left( \frac{42,4}{1,2 \cdot \cos^2 45^\circ + \sin^2 45^\circ} + \frac{37,6}{1,2 \cdot \cos^2 90^\circ + \sin^2 90^\circ} \right) = 8,34 \text{ kN}.$$

Efektiiivne kruvide vaheline kaugus kruvide töötamise suunale risti vastavalt valemile 2.43:

$$a_{2,ef,y} = \max \left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 253/4 = 63,3 \end{array} \right. \Rightarrow a_{2,ef,y} = 63,3 \text{ mm}.$$

Teguri  $k_{R,90}$  leidmiseks vajalik survepinge ristikiudu vastavalt valemile 2.42:

$$\sigma_{c,90,k,y} = \frac{14,4 \cdot 10^3}{306 \cdot 253} + \frac{8,34 \cdot 10^3 / \sqrt{2}}{100 \cdot 63,3} = 1,12 \text{ N/mm}^2.$$

Survepingeid arvestav tegur vastavalt valemile 2.41:

$$k_{R,90,y} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,35 \cdot 1,12 = 1,39 \\ 1,20 \end{array} \right. \Rightarrow k_{R,90,y} = 1,20.$$

Armeeritud ristkihtpuidu külgnihketugevus vastavalt valemile 2.40:

$$\bar{f}_{R,CLT,k,y} = 1,20 \cdot 0,70 + \frac{8,34 \cdot 10^3 / \sqrt{2}}{100 \cdot 63,3} = 1,77 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime kontroll vastavalt tingimusele 2.39:

$$\frac{k_{mod} \cdot \bar{f}_{R,CLT,k,y}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 1,77}{1,25} = 1,13 \text{ N/mm}^2 > \tau_{R,yz} = 0,594 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime on tagatud.

### 3.3.2. Kasutuspiirseisund

Kasutuspiirseisundis sai määravaks koormuskombinatsioon KK4:

$$(1 + 1,10)O_{makaal} + (1 + 0,3 \cdot 1,10)K_{asuskoormus}.$$

Vastavalt standardi EN 1995-1-1 Norra rahvuslikule lisale on konstruktsioonide lõplike läbi-painete soovituslik piirväärtus vastavalt [27]:

tugedel konstruktsioonil:  $w_{net,fin} \leq l/350$ ;

konsoolil:  $w_{net,fin} \leq l/175$ .

Maksimaalsed deformatsioonid ristkihtpuidust rõdupaneelile on leitud kasutades programmi RFEM.

Suurim deformatsioon plaadis tekib pikemalt küljel, kus sildeava  $l = 4200$  mm:

$$w_{net,fin} = 11,9 \text{ mm} < 4200/350 = 12 \text{ mm}.$$

Deformatsioonid jäävad lubatud piiridesse.

### 3.3.3. Tulepüsivus

Rõdukonstruktsioonide tulepüsivus on määratud R60.

Kasutatav ristkihtpuidu lamellide vahelised vahed on alla 2 mm. Vastav ristkihtpuidu söestumismäär ühemõõtmelisel söestumisel standardtulekahjus  $\beta = 0,65$  mm/min. Ristkihtpuidu üksiku kihi paksus  $a = 30$  mm.

Käsitletud konstruktsioonide puhul ei kasutata tuletõkkematerjale. Konstruktsiooni kandevõime tagavara kasuks eeldatakse, et ristkihtpuidu tootmisel on kasutatud kuumust mitte-taluvat liimi. Arvestatakse, et üksik ristkihtpuidu kiht variseb kui nulltugevusega kiht jõuab kihtide vahelise liimikihini.

Ristkihtpuidu esimese kihi söestunud kihi paksus enne varisemist:

$$d_{char,1} = a - d_0 = 30 - 7 = 23 \text{ mm.}$$

Ristkihtpuidu esimese kihi põlemise aeg enne varisemist tuletatult valemist 2.46:

$$d_{char,1} = \beta \cdot t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{d_{char,1}}{\beta} = \frac{23}{0,65} = 35,3 \text{ min.}$$

Ristkihtpuidu esimene kiht toimub järgmisele kihile tuletõkkena. Seega teise kihi söestumise määramisel lähtutakse tuletõkkega kaetud elemendi arvutusest.

Teise kihi söestumise algusaeg on võrdne tulekaitse ajaga. Piiraege  $t_a$  leitakse vastavalt [24]:

$$t_a = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot t_f \\ \frac{25}{k_3 \cdot \beta} + t_f \end{array} \right. \quad (3.5)$$

kus

$t_f$  - tulekaitse aeg;

$k_3$  - tegur,  $k_3 = 2$ .

Tulekaitse aeg teisele kihile on võrdne esimese kihi põlemise ajaga:

$$t_f = t_1 = 35,3 \text{ min.}$$

Teise kihi söestumissügavuse jõudmisel 23 millimeetrini toimub kihi varisemine. Seega varisemine toimub enne piirdeaega ning teise kihi varisemise aeg on leitav järgnevalt:

$$t_2 = \frac{23}{k_3 \cdot \beta} + t_f = \frac{23}{2 \cdot 0,65} + 35,3 = 53,0 \text{ min.}$$

Kolmanda kihi söestumisaeg:

$$t_3 = 60 - 53 = 7 \text{ min.}$$

Sarnaselt esimese kihi toimimisel tuletõkkena teisele kihile töötab teine kiht tuletõkkena kolmandale kihile. Seega pärast teise kihi varisemist toimub kolmanda kihi äkilisem põlemine. Kolmanda kihi söestumissügavus leitakse järgnevalt:

$$t_{char,3} = k_3 \cdot \beta \cdot t_3 = 2 \cdot 0,65 \cdot 7 = 9,1 \text{ mm.}$$

Nulltugevusega kihi paksust reguleeriv tegur  $k_0$  vastavalt kolmanda kihi põlemisele:

$$k_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} 7/20 = 0,35 \\ 1,0 \end{array} \right. \Rightarrow k_0 = 0,35.$$

Ristkihtpuidust paneeli efektiivne söestumissügavus vastavalt valemile 2.45 arvestades kahte varisenud kihti:

$$d_{ef} = 2 \cdot a + t_{char,3} + k_0 \cdot d_0 = 2 \cdot 30 + 9,1 + 0,35 \cdot 7 = 71,6 \text{ mm} \approx 72 \text{ mm.}$$

Efektiivne ristkihtpuidust paneeli paksus:

$$d - d_{ef} = 150 - 72 = 78 \text{ mm.}$$

### **3.3.3.1. Paine**

Paindekandevõime puhul sai tulekahjuolukorras määravaks koormuskombinatsioon KK3:  
*Omakaal* + 0,5 · *Kasuskoormus*.

Antud ristkihtpuidust paneeli valmistamiseks on kasutatud saepuit, mis kuulub tugevusklassi C24 paindetugevusega  $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ . [3]

Ristkihtpuidus kasutatavate lamellide laius jääb vahemikku 40 kuni 300 mm. Käsitletava paneeli väikseim mõõde on 2 meetrit, seega minimaalne paralleelselt töötavate lamellide arv on  $n = 2000/300 = 6,67 \Rightarrow 7$ .

Ristkihtpuidu paindetugevuse arvutamiseks kasutatav paralleelselt töötavaid lamelle arvestav tegur  $k_l$  leitakse valemiga 2.4:

$$k_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 1 + 0,025 \cdot 7 = 1,18 \end{array} \right. \Rightarrow k_l = 1,1.$$

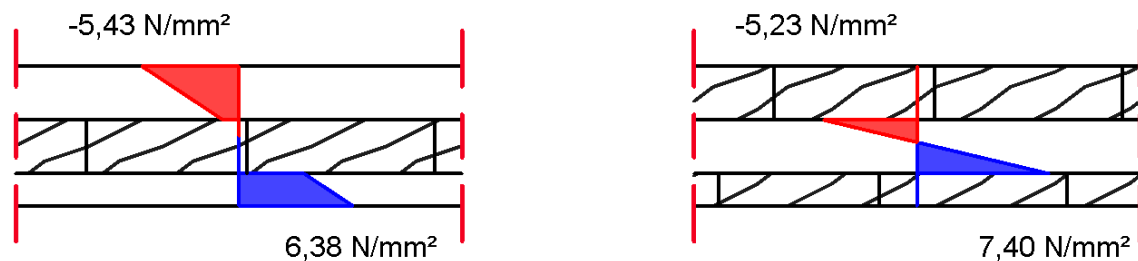
Ristkihtpuidu normatiivne paindetugevus vastavalt valemile 2.3:

$$f_{m,CLT,k} = 1,1 \cdot 24 = 26,4 \text{ N/mm}^2.$$

Ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras vastavalt valemile 2.47:

$$f_{m,CLT,d,fi} = 1,0 \cdot \frac{1,15 \cdot 26,4}{1,0} = 30,4 \text{ N/mm}^2.$$

Paindepingete leidmiseks tulekahjuolukorras käsitletavas paneelis on kasutatud programmi RF-Laminate. Paindepingete jagunemine x-telje ja y-telje suunalistes kihtides on toodud joonisel 3.7.



**Joonis 3.7.** Paindepingete jagunemine tulekahjuolukorras x-telje suunalistes kihtides (vasakul) ja y-telje suunalistes kihtides (paremal)

Paindekandevõime tulekahjuolukorras vastavalt tingimusele 2.1:

$$\sigma_{x,max,d,fi} = 6,38 \text{ N/mm}^2 < f_{m,CLT,d,fi} = 30,4 \text{ N/mm}^2.$$

$$\sigma_{y,max,d,fi} = 7,40 \text{ N/mm}^2 < f_{m,CLT,d,fi} = 30,4 \text{ N/mm}^2.$$

Paindekandevõime tulekahjuolukorras on tagatud.

### 3.3.3.2. Surve ristikiudu

Survel ristikiudu sai tulekahjuolukorras määravaks koormuskombinatsioon KK3:

$$Omakaal + 0,5 \cdot Kasuskoormus.$$

Tulekahjuolukorras on liimpuidust postide efektiivne jääkristlõige 102×102 mm (vt. peatükk 3.4.2).

Ristkihtpuidu normatiivne survetugevus ristikiudu:  $f_{c,90,CLT,k} = 2,85 \text{ N/mm}^2$ .

Ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras vastavalt valemile 2.47:

$$f_{c,90,CLT,d,fi} = 1,0 \cdot \frac{1,15 \cdot 2,85}{1,0} = 3,28 \text{ N/mm}^2.$$

Maksimaalne survejõud tekib teise korruse rõdupaneeli pinnale paneeli toetavast liimpuidust postist. Maksimaalse survejõud on leitud kasutades programmi RFEM:

$$F_{c,90,d,fi} = 30,4 \text{ kN}$$

Kontaktpinna arvutuslik survepinge vastavalt valemile 2.7:

$$\sigma_{c,90,CLT,d,fi} = \frac{30,4 \cdot 10^3}{102 \cdot 102} = 2,93 \text{ N/mm}^2.$$

Toe efektiivsed laiused (vt. joonis 2.2):

$$l_{ef} = 102 + \frac{78}{2} \cdot \tan 30^\circ = 125 \text{ mm},$$

$$w_{ef} = 102 + 78 \cdot \tan 30^\circ = 147 \text{ mm}.$$

Tegur  $k_{c,90,CLT}$  vastavalt valemile 2.8:

$$k_{c,90,CLT} = \sqrt{\frac{125 \cdot 147}{102 \cdot 102}} = 1,33.$$

Kandevõime vastavalt tingimusele 2.6:

$$\sigma_{c,90,CLT,d,fi} = 2,93 \text{ N/mm}^2 < k_{c,90,CLT} \cdot f_{c,90,CLT,d,fi} = 1,33 \cdot 3,28 = 4,36 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime on tagatud.

### 3.3.3.3. *Külgnihe*

Külgnihkekandevõime puhul sai tulekahjuolukorras määravaks koormuskombinatsioon KK3:

*Omakaal + 0,5 · Kasuskoormus.*

Tagavara kasuks on eeldatud, et külgnihkele töötava lamelli laius on väiksem kui neli korda paksust ning lamellid ei ole omavahel serviti kokku liimitud. Seega ristkihtpuidu külgnihketugevus  $f_{r,CLT,k} = 0,70 \text{ N/mm}^2$ .

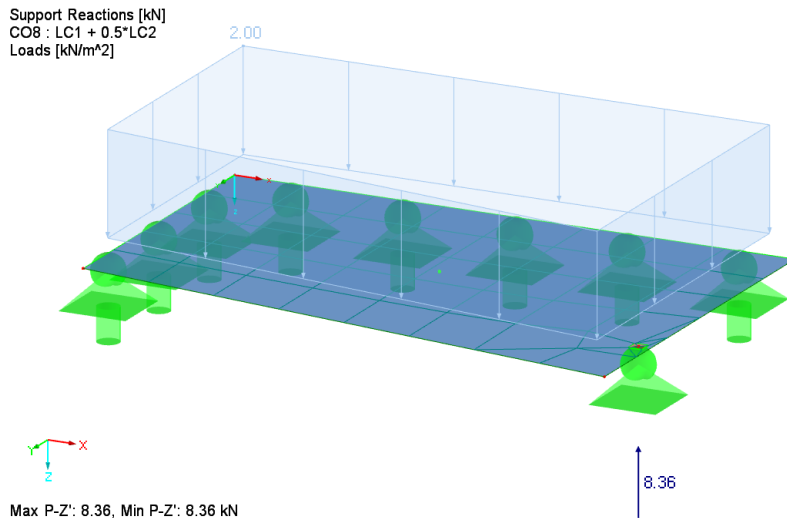
Ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras vastavalt valemile 2.47:

$$f_{r,CLT,d,fi} = 1,0 \cdot \frac{1,15 \cdot 0,70}{1,0} = 0,805 \text{ N/mm}^2.$$

Paneeli toetamisest liimpuidust postile tekkiv külgnihkepingeid põhjustav arvutuslik põikjõud tulekahjuolukorras on leitud kasutades programmi RFEM:

$$F_{d,fi} = 8,36 \text{ kN}$$





**Joonis 3.8.** Kuvatõmmis programmist RFEM: külgnihkepingeid põhjustav arv. põikjõud tulekahjuolukorras

Ristkihtpuidust paneeli efektiivne jääkpaksus kujutab endast kolmekihilist paneeli. Kolmekihilises paneelis tekivad külgnihkepinged ainult keskmises kihis. Seega tulekahjuolukorras leitakse ainult y-telje suunalised külgnihkepinged.

Kandevõime tagavara kasuks leitakse nihkejõud vastavalt olukorrale, kus ristkihtpuidust paneel on toetatud nurgast.

X-telje suunaline nihkejõud paneeli nurgas paikneva toe korral vastavalt valemile 2.16:

$$V_{xz,fi} \approx 0,67 \cdot 3^{-0,1} \cdot 8,36 = 5,02 \text{ kN.}$$

Y-telje suunaline nihkejõud paneeli nurgas paikneva toe korral vastavalt valemile 2.18:

$$V_{yz,fi} \approx 8,36 - 5,02 = 3,34 \text{ kN.}$$

Toe efektiivne laius x-telje suhtes tulekahjuolukorras vastavalt valemile 2.19:

$$b_{ef,x,fi} = 102 + 78 \cdot \tan 35^\circ = 156 \text{ mm.}$$

Toe efektiivne laius y-telje suhtes tulekahjuolukorras vastavalt valemile 2.20:

$$b_{ef,y,fi} = 102 + \frac{78}{2} \cdot \tan 35^\circ = 129 \text{ mm.}$$

Paneeli kihte arvestavad tegurid kolmekihilise ristpuitust paneeli korral [14]:

$$k_{R,x} = 1,00 \text{ ja}$$

$$k_{R,y} = 1,00.$$

Kasutades nihkejõudusid, mis tekivad nurgas paikneva toekorral, võib maksimaalsed külgnihkepinged leida kasutades paneeli keskel paikneva toe arvutusvalemeid.

Y-telje suunaline külgnihkepinge vastavalt valemile 2.13:

$$\tau_{R,yz,fi} = \frac{3,34 \cdot 10^3 / 129}{1,00 \cdot (18 + 30)} = 0,539 \text{ N/mm}^2 < f_{r,CLT,d,fi} = 0,805 \text{ N/mm}^2.$$

Kandevõime on tagatud.

## 3.4. Liimpuidust posti tugevusarvutused

Ristkihtpuidust rõdupaneel on avatud nurgast toetatud liimpuidust postile. Kasutatavad postid kuuluvad tugevusklassi GL28h. Postid on ristlõikega 200×200 mm. Hoone korruste kõrguste vahe on 3,00 m, seega postide pikkus on 2,85 m.

Koormuse kestusklass on keskkestev ja konstruktsiooni kasutusklass on 2. Modifikatsiooni-tegur  $k_{mod} = 0,80$  ja liimpuidu osavarutegur  $\gamma_M = 1,25$ . [19]

Liimpuidu GL24h omadused [28]:

paindetugevus:  $f_{m,k} = 28 \text{ N/mm}^2$ ;

survetugevus pikikiudu:  $f_{c,0,k} = 26,5 \text{ N/mm}^2$ ;

liimpuidu 5% elastsusmoodul pikikiudu:  $E_{0,05} = 10200 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.4.1. Surve pikikiudu

Liimpuidust posti survele pikikiudu sai määravaks koormuskombinatsioon KK2:

$$1,2 \cdot \text{Omakaal} + 1,5 \cdot (\text{Kasuskoormus} + 0,7 \cdot \text{Lumi}).$$

Maksimaalne pikijõud postis tekib esimese korruse postis. Maksimaalne pikijõud on leitud kasutades programmi RFEM:

$$F_{c,d} = 102 \text{ kN}$$

Liimpuidust posti inertsimomendid:

$$I_y = I_z = \frac{a^4}{12} = \frac{200^4}{12} = 13,3 \cdot 10^7 \text{ mm}^4.$$

Inertsiraadiused:

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I_z}{a^2}} = \sqrt{\frac{13,3 \cdot 10^7}{200^2}} = 57,7 \text{ mm}.$$

Nõtkepikkused:

$$l_{y,ef} = l_{z,ef} = 1,0 \cdot l = 1,0 \cdot 2850 = 2850 \text{ mm}.$$

Saledused:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{z,ef}}{i_z} = \frac{2850}{57,7} = 49,4.$$

Suhtelised saledused määratakse järgnevalt [19]:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.6)$$

ja

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.7)$$

kus

- $f_{c,0,k}$  - normatiivne survetugevus pikikiudu;
- $E_{0,05}$  - liimpuidu 5% elastsusmoodul pikikiudu.

Suhtelised saledused vastavalt valemitele 3.6 ja 3.7:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z} = \frac{49,4}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{26,5}{10200}} = 0,801.$$

Nõtketegurid määratakse järgmiste avaldistega [19]:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}, \quad (3.8)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}, \quad (3.9)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2), \quad (3.10)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2), \quad (3.11)$$

kus

$\beta_c$  - tegur, liimpuidu puhul  $\beta_c = 0,1$ .

Tegurid  $k_y$  ja  $k_z$  vastavalt valemitele 3.10 ja 3.11:

$$k_y = k_z = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (0,801 - 0,3) + 0,801^2) = 0,846.$$

Tegurid  $k_{c,y}$  ja  $k_{c,z}$  vastavalt valemitele 3.8 ja 3.9:

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{0,846 + \sqrt{0,846^2 - 0,801^2}} = 0,894.$$

Survepinged leitakse vastavalt järgmisele valemile [19]:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,d}}{A_h}, \quad (3.12)$$

kus

$\sigma_{c,0,d}$  - survepinge arvutusväärtus pikikiudu;

$F_{c,d}$  - survejõu arvutusväärtus;

$A_h$  - netoristolõikepindala.

Survepinge arvutusväärtus pikikiudu:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{102 \cdot 10^3}{200 \cdot 200} = 2,55 \text{ N/mm}^2.$$

Liimpuidu arvutuslik survetugevus pikikiudu arvutatakse vastavalt EN 1995-1-1 toodud materjali tugevuse arvutusväärtuse valemile.

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M}, \quad (3.13)$$

kus

- $f_{c,0,k}$  - normatiivne survetugevus pikikiudu;
- $\gamma_M$  - materjali osavarutegur;
- $k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur.

Liimpuidust posti arvutuslik survetugevus pikikiudu vastavalt valemile 3.13:

$$f_{c,0,d} = \frac{0,80 \cdot 26,5}{1,25} = 17,0 \text{ N/mm}^2.$$

Postile mõjub pikijõud ekstsentriliselt. Seetõttu tuleb kandevõime arvutamisel arvestada ekstsentrilisel survele tekkivaid paindepingeid. Kandevõime tagavara kasuks arvestatakse võimalikku suurimat ekstsentrilisust: olukord, kus jõud mõjub posti nurgale.

Maksimaalne võimalik ekstsentrilisus 200×200 mm ristlõikega posti puhul:  $e = 100 \text{ mm}$ .

Ekstsentriliselt mõjuvast jõust tingitud paindemoment:

$$M_{d,y} = M_{d,z} = e \cdot F_{c,d} = 0,10 \cdot 102 = 10,2 \text{ kNm}.$$

Määrame liimpuidust posti ristlõike vastupanumomendid:

$$W_y = W_z = \frac{a^3}{6} = \frac{200^3}{6} = 1,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Ekstsentriliselt mõjuvast jõust tingitud paindepinged:

$$\sigma_{m,y,d} = \sigma_{m,z,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{10,2 \cdot 10^6}{1,33 \cdot 10^6} = 7,67 \text{ N/mm}^2.$$

Liimpuidu arvutuslik paindetugevus arvutatakse vastavalt EN 1995-1-1 toodud materjali tugevuse arvutusväärtuse valemile.

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M}, \quad (3.14)$$

kus

- $f_{c,0,k}$  - normatiivne survetugevus pikikiudu;
- $\gamma_M$  - materjali osavarutegur;
- $k_{mod}$  - koormuse kestuse ja niiskussisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur.

Liimpuidu ristlõikele, mille kõrgus paindel või laius tõmbel on väiksem kui 600 mm, suurendatakse normatiivset paindetugevust ja normatiivset tõmbetugevust teguriga  $k_h$  [19]:

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} (600/h)^{0,1} \\ 1,1 \end{array} \right., \quad (3.15)$$

kus

- $h$  - elemendi kõrgus paindel ja laius tõmbel.

Ruudukujulise ristlõike puhul teguri  $k_h$  väärtused ristlõike mõlema telje suhtes võrdsed ning leitakse vastavalt valemile 3.15:

$$k_{h,y} = k_{h,z} = \min \left\{ \begin{array}{l} (600/200)^{0,1} = 1,12 \\ 1,1 \end{array} \right. \Rightarrow k_{h,y} = k_{h,z} = 1,1.$$

Liimpuidust posti arvutuslik paindetugevus arvestades tegurit  $k_h$  ning vastavalt valemile 3.14:

$$f_{m,d} = \frac{0,80 \cdot 1,1 \cdot 28}{1,25} = 19,7 \text{ N/mm}^2.$$

Kuna  $\lambda_{rel} > 0,3$ , siis ekstsentriliselt surutud varda puhul peavad olema täidetud tingimused [19]:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1, \quad (3.16)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1, \quad (3.17)$$

kus

$k_c$  - nõtketegur;

$k_m$  - tegur, täisnurkristlõike puhul  $k_m = 0,7$ .

Ekstsentriliselt surutud liimpuidust posti kandevõime vastavalt tingimustele 3.16 ja 3.17:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &= \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \\ &= \frac{2,55}{0,894 \cdot 17,0} + \frac{7,67}{19,7} + 0,7 \cdot \frac{7,67}{19,7} = 0,830 < 1. \end{aligned}$$

Kandevõime on tagatud.

### 3.4.2. Tulepüsivus

Tulepüsivusarvutus teostatakse efektiivristlõike meetodil.

Rõdukonstruktsioonide nõutav tulepüsivus on R60.

Tinglik söestumissügavus leitakse järgmiselt [24]:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t, \quad (3.18)$$

kus

$\beta_n$  - tinglik söestumismäär standardtulekahjus;

$t$  - tulekahju kestus minutites.

Liimpuidu tinglik söestumismäär standardtulekahjus:  $\beta_n = 0,70$  mm/min. [24]

Tinglik söestumissügavus vastavalt valemile 3.18:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0,70 \cdot 60 = 42 \text{ mm.}$$

Nulltugevus kihi paksus reguleeriv tegur  $k_0$ :

$$k_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} 60/20 = 3,0 \\ 1,0 \end{array} \right. \Rightarrow k_0 = 1,0.$$

Efektivne söestumissügavus vastavalt valemile 2.45:

$$d_{ef} = 42 + 1,0 \cdot 7 = 49 \text{ mm.}$$

Liimpuidust posti efektiivristlõike mõõtmed:

$$a_{ef} = a - 2 \cdot d_{ef} = 200 - 2 \cdot 49 = 102 \text{ mm.}$$

### 3.4.2.1. Surve pikikiudu

Survel pikikiudu tulekahjuolukorras sai määravaks koormuskombinatsioon KK3:

$$Omaaal + 0,5 \cdot Kasuskoormus.$$

Maksimaalne pikijõud postis tekib esimese korruse postis. Maksimaalne pikijõud on leitud kasutades programmi RFEM:

$$F_{c,d,fi} = 31,5 \text{ kN}$$

Efektivse jääkristlõike inertsimomendid:

$$I_y = I_z = \frac{102^4}{12} = 9,02 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

Inertsiraadiused:

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{9,02 \cdot 10^6}{102^2}} = 29,4 \text{ mm.}$$



Nõtkepikkused:

$$l_{y,ef} = l_{z,ef} = 1,0 \cdot 2850 = 2850 \text{ mm.}$$

Saledused:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{2850}{29,4} = 96,9.$$

Suhtelised saledused vastavalt valemitele 3.6 ja 3.7:

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z} = \frac{96,9}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{26,5}{10200}} = 1,57.$$

Tegurid  $k_y$  ja  $k_z$  vastavalt valemitele 3.10 ja 3.11:

$$k_y = k_z = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,57 - 0,3) + 1,57^2) = 1,80.$$

Tegurid  $k_{c,y}$  ja  $k_{c,z}$  vastavalt valemitele 3.8 ja 3.9:

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{1,80 + \sqrt{1,80^2 - 1,57^2}} = 0,373.$$

Survepinge arvutusväärtus pikikiudu:

$$\sigma_{c,0,d,fi} = \frac{31,5 \cdot 10^3}{102 \cdot 102} = 3,03 \text{ N/mm}^2.$$

Efektivristslõike meetodi kasutamisel materjali tugevusomadusi ei vähendata, kuid kasutatakse arvutuslikku pikikiudu survetugevust tulekahjuolukorras, mis arvutatakse järgmiselt [24]:

$$f_{c,0,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3.19)$$

kus

- $f_{c,0,k}$  - normatiivne pikikiudu survetugevus;
- $k_{fi}$  - tegur, liimpuidu puhul  $k_{fi} = 1,15$ ;
- $k_{mod,fi}$  - modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel,  $k_{mod,fi} = 1$ ;
- $\gamma_{M,fi}$  - materjali osavarutegur tulepüsivusarvutusel,  $\gamma_{M,fi} = 1$ .

Liimpuidust posti arvutuslik survetugevus pikikiudu tulekahjuolukorras vastavalt valemile 3.19:

$$f_{c,0,d,fi} = 1,0 \cdot \frac{1,15 \cdot 26,5}{1,0} = 30,5 \text{ N/mm}^2.$$

Pikijõud mõjub postile ekstsentriliselt. Seetõttu tuleb kandevõime arutamisel tulekahjuolukorras arvestada ekstsentrilisel survele tekkivaid paindepingeid. Kandevõime tagavara kasuks arvestatakse võimalikku suurimat ekstsentrilisust, mis tekib jõu mõjumisel posti nurgale.

Maksimaalne võimalik ekstsentrilisus tulekahjuolukorras:  $e = 102 / 2 = 51 \text{ mm}$ .

Ekstsentriliselt mõjuvast jõust tingitud paindemoment:

$$M_{d,y,fi} = M_{d,z,fi} = 0,051 \cdot 31,54 = 1,61 \text{ kNm}.$$

Liimpuidust posti ristlõike vastupanumomendid tulekahjuolukorras:

$$W_y = W_z = \frac{102^3}{6} = 0,177 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Ekstsentriliselt mõjuvast jõust tingitud paindepinged tulekahjuolukorras:

$$\sigma_{m,y,d,fi} = \sigma_{m,z,d,fi} = \frac{1,61 \cdot 10^6}{0,177 \cdot 10^6} = 9,10 \text{ N/mm}^2.$$

Ruudukujulise ristlõike puhul teguri  $k_h$  väärtused ristlõike mõlema telje suhtes võrdsed ning leitakse vastavalt valemile 3.15:

$$k_{h,y} = k_{h,z} = \min \left\{ \frac{(600/102)^{0,1}}{1,1} = 1,19 \Rightarrow k_{h,y} = k_{h,z} = 1,1. \right.$$

Arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras arvutatakse järgmiselt [24]:

$$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3.20)$$

kus

$f_{m,k}$  - normatiivne paindetugevus.

Liimpuidust posti arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras arvestades tegurit  $k_h$  ning vastavalt valemile 3.20:

$$f_{m,d,fi} = \frac{1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,1 \cdot 28}{1,0} = 35,4 \text{ N/mm}^2.$$

Kuna  $\lambda_{rel} > 0,3$ , siis ekstsentriliselt surutud liimpuidust posti kandevõime tulekahjuolukorras vastavalt tingimustele 3.16 ja 3.17:

$$\frac{3,03}{0,373 \cdot 30,5} + \frac{9,10}{35,4} + 0,7 \cdot \frac{9,10}{35,4} = 0,703 < 1.$$

Kandevõime tulekahjuolukorras on tagatud.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö põhieesmärgiks oli projekteerida viiekorruselisele Norra Trondheimi planeeritavale kortermajale ristkihtpuidust rõdukonstruksioonid. Teostati vajalikud insener-tehnilised arvutused ristkihtpuidust rõdupaneeli ja liimpuidust rõduposti dimensioneerimiseks.

Kontrollarvutuste tulemusena saadi trapetsikujulise viiekihilise ristkihtpuidust rõdupaneeli paksuseks 150 mm (5×30 mm). Muljumistugevuse ja külgnihketugevuse arvutustest selgus, et vajalik on paneeli armeerimine isepuurivate kruvidega posti kohal. Ristikiudu survete vastu võtmiseks kasutatakse kruve SFS intec WT-T-6,5×65 ning külgnihkepingete vastu võtmiseks kasutatakse kruve SFS intec WT-T-8,2×190.

Lisaks ristkihtpuidust rõdupaneeli kontrollarvutustele teostati ka liimpuidust rõduposti kontroll kandepiir seisundis. Arvutuste tulemusena saadi posti ristlõike mõõtmeteks 200×200 mm.

Eelnimetatud konstruktsioonidele teostati ka tulepüsivusarvutused. Rõdukonstruksioonidel on tagatud tulepüsivus R60.

Töö käigus on loodud arvutusmetoodika kogum, mis on sobilik võtta aluseks sarnaste konstruktsioonide projekteerimisel. Ühtlasi saab käesolevas töös teostatud insener-tehnilisi arvutusi kasutada võrdlevaks materjaliks sarnaste ristkihtpuidust elementide arvutamiseks.

# KASUTATUD KIRJANDUS

1. Cross Laminated Timber: a Primer [WWW]  
<https://fpinnovations.ca/media/publications/Documents/clt-primer.pdf> (20.04.2015)
2. Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J., Pock, K. Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and engineering principles according to Eurocode. Immenstadt: Eberl Print, 2014. 190 lk.
3. Ehituspuit. Tugevusklassid. EVS-EN 338:2009. Eesti Standardikeskus. 2009.
4. Bradner, R. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. Theme I. Production and Testing. – *Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*. Austria: Graz University of Technology, 2013. 36 lk.
5. Puitmaterjalide tutvustus [WWW]  
[http://www.puuinfo.ee/index.php?option=com\\_content&view=article&id=107&Itemid=116](http://www.puuinfo.ee/index.php?option=com_content&view=article&id=107&Itemid=116) (23.04.2015)
6. Smith, R. E. Interlocking Cross-Laminated Timber: Alternative use of waste wood in design and construction. [WWW]  
[http://forum.tempt.ee/uploads/4536\\_R.Smith%20ICLT%20final.pdf](http://forum.tempt.ee/uploads/4536_R.Smith%20ICLT%20final.pdf) (23.04.2015)
7. Cross laminated timber (CLT) benefits. [WWW]  
<http://www.cstinnovations.ca/benefits.php#strength> (24.04.2015)
8. Solid Advantages. WoodWorks, 2012. 8 lk.
9. Just, A. Üheksakorruseline puitmaja Londonis. – *Puuinfo*. 2/2008, 4 lk.
10. Building Structures Using Cross Laminated Timber Panels. [WWW]  
<https://crosslaminatedtimber.wordpress.com/tag/timber-panels/> (28.04.2015)
11. Tall Timber Buildings – The Stadthaus, Hoxton, London. [WWW]  
<http://techniker.oi-dev.org/blog/view/tall-timber-buildings-the-stadthaus-hoxton-london> (28.04.2015)
12. Bridge from Kössen across the Grossache to Staffe. [WWW]  
[http://www.grossmann-bau.de/en/referenzdetail/?tx\\_in2grossmannreferences\\_pi1%5Breference%5D=95&tx\\_in2grossmannreferences\\_pi1%5Baction%5D=show&tx\\_in2grossmannreferences\\_pi1%5Bcontroller%5D=References](http://www.grossmann-bau.de/en/referenzdetail/?tx_in2grossmannreferences_pi1%5Breference%5D=95&tx_in2grossmannreferences_pi1%5Baction%5D=show&tx_in2grossmannreferences_pi1%5Bcontroller%5D=References) (28.04.2015)

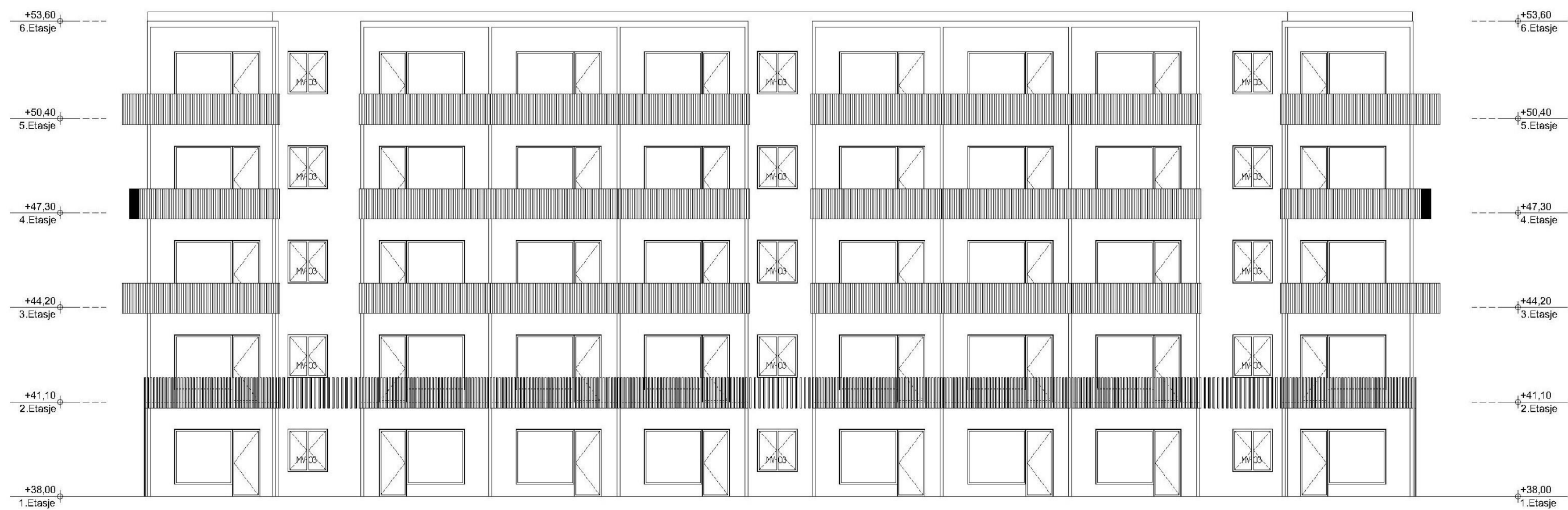
13. Residential Stage on a Slope. [WWW]  
[http://www.seewood.at/projekte\\_en.php?news\\_id=x\\_000343](http://www.seewood.at/projekte_en.php?news_id=x_000343) (28.04.2015)
14. Thiel, A. ULS and SLS design of CLT and its implementations in the CLTdesigner. Theme II. Design and Construction. – *Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*. Austria: Graz University of Technology, 2013. 28 lk.
15. Halili, Y. Versuchstechnische Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz. Diplomitöö. Saksamaa: Technische Universität Graz, 2008. 179 lk.
16. Salzmann, C. Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz (BSP). Magistritöö. Saksamaa: Technische Universität Graz, 2010. 198 lk.
17. Serrano, E., Enquist, B. Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT). – *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*. Riva del Garda: WCTE, 2010. 8lk.
18. Brandner, R., Schickhofer, G. Properties of Cross Laminated Timber (CLT) in Compression Perpendicular to Grain. Austria: International Network on Timber Engineering Research, 2014.
19. Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks.  
 EVS-EN 1995-1-1:2005+NA:2007+A1:2008+NA:2009. Eesti Standardikeskus. 2009.
20. Unterwieser, H., Schickhofer, G. Characteristic Values and Test Configurations of CLT with Focus on Selected Properties. Theme I. Production and Testing. – *Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*. Austria: Graz University of Technology, 2013. 22 lk.
21. Demschner, T. Point support of CLT. Analysis sample and theoretical background. Ybbs an der Donau: Storaenso, 2014. 26 lk.
22. European technical approval ETA-12/0063. Austria: European Organisation of Technical Approvals, 2012. 18 lk.
23. Mestek, P., Dietsch, P. Design concept for CLT – reinforced with self-tapping screws. Theme II. Design and Construction. – *Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*. Austria: Graz University of Technology, 2013. 32 lk.
24. Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreeglid. Tulepüsiusarvutus. EVS-EN 1995-1-2:2005+NA:2006. Eesti Standardikeskus. 2006.

25. Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus. EVS-EN 1991-1-3:2006. Eesti standardikeskus, 2006.
26. Eurokode: Grunnlag for projektering av konstruksjoner. NS-EN 1990:2002+NA:2008. Standard Norge, 2008.
27. Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010. Standard Norge, 2010.
28. Puitkonstruksioonid. Lamell-liimpuit ja plankliimpuit. Nõuded. EVS-EN 14080:2013. Eesti standardikeskus, 2013.

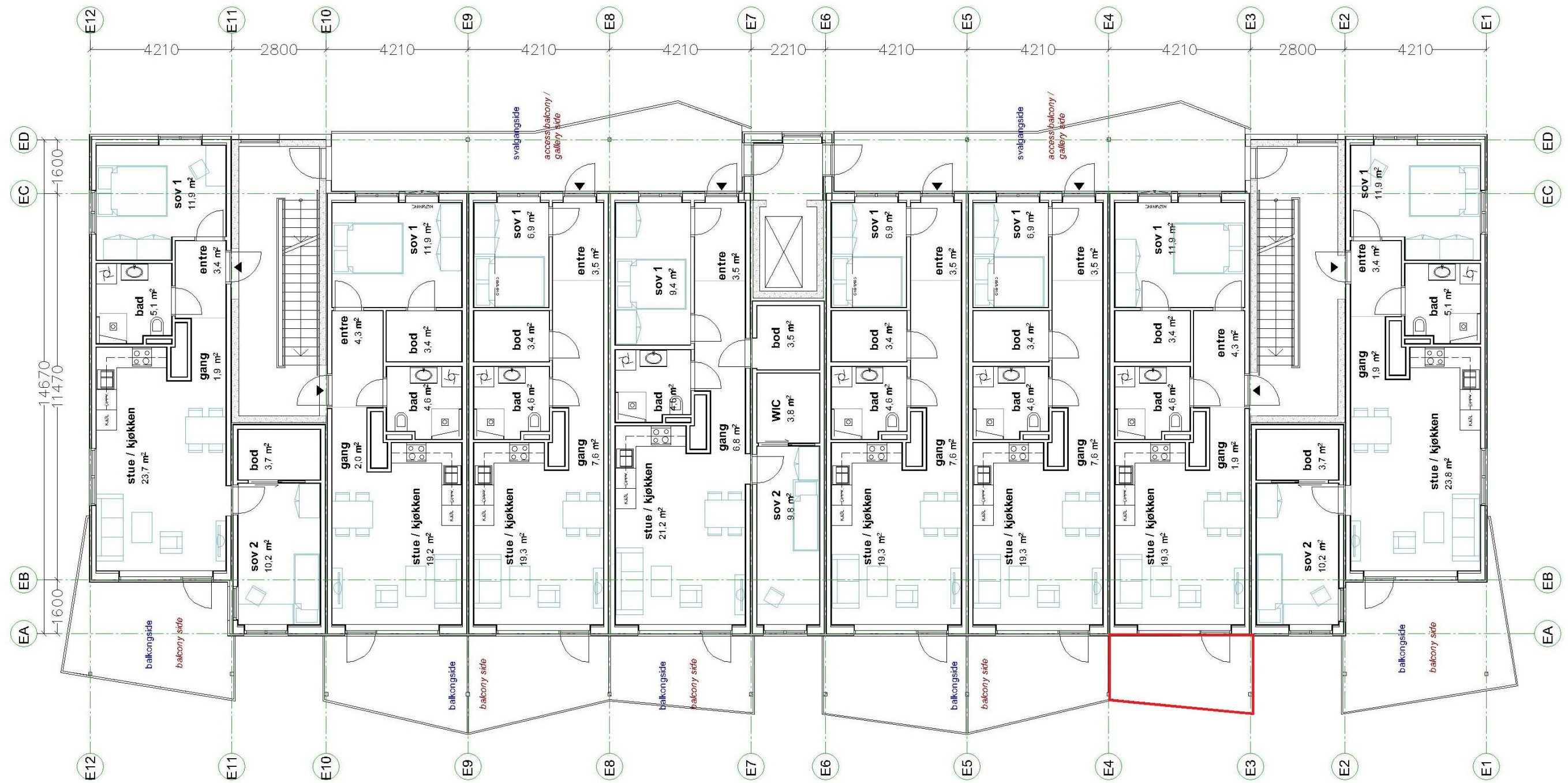
## **LISAD**



**Lisa 1. Väljavõtted Norras Trondheimis paikneva kortermaja arhitektuursest projektist**



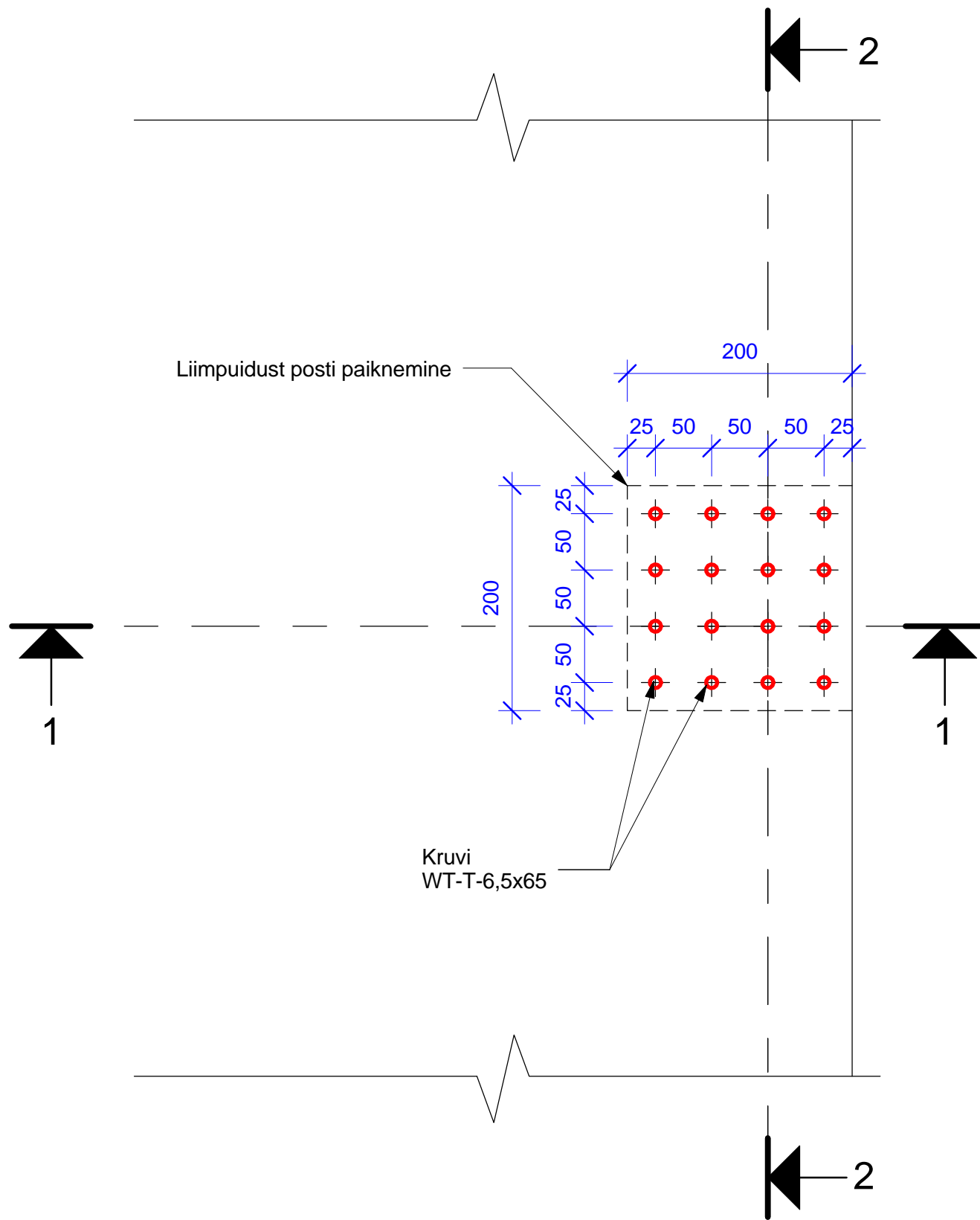
**Joonis L1.1.** Väljevõte arhitektuursest projektist: vaade hoonele tagant.



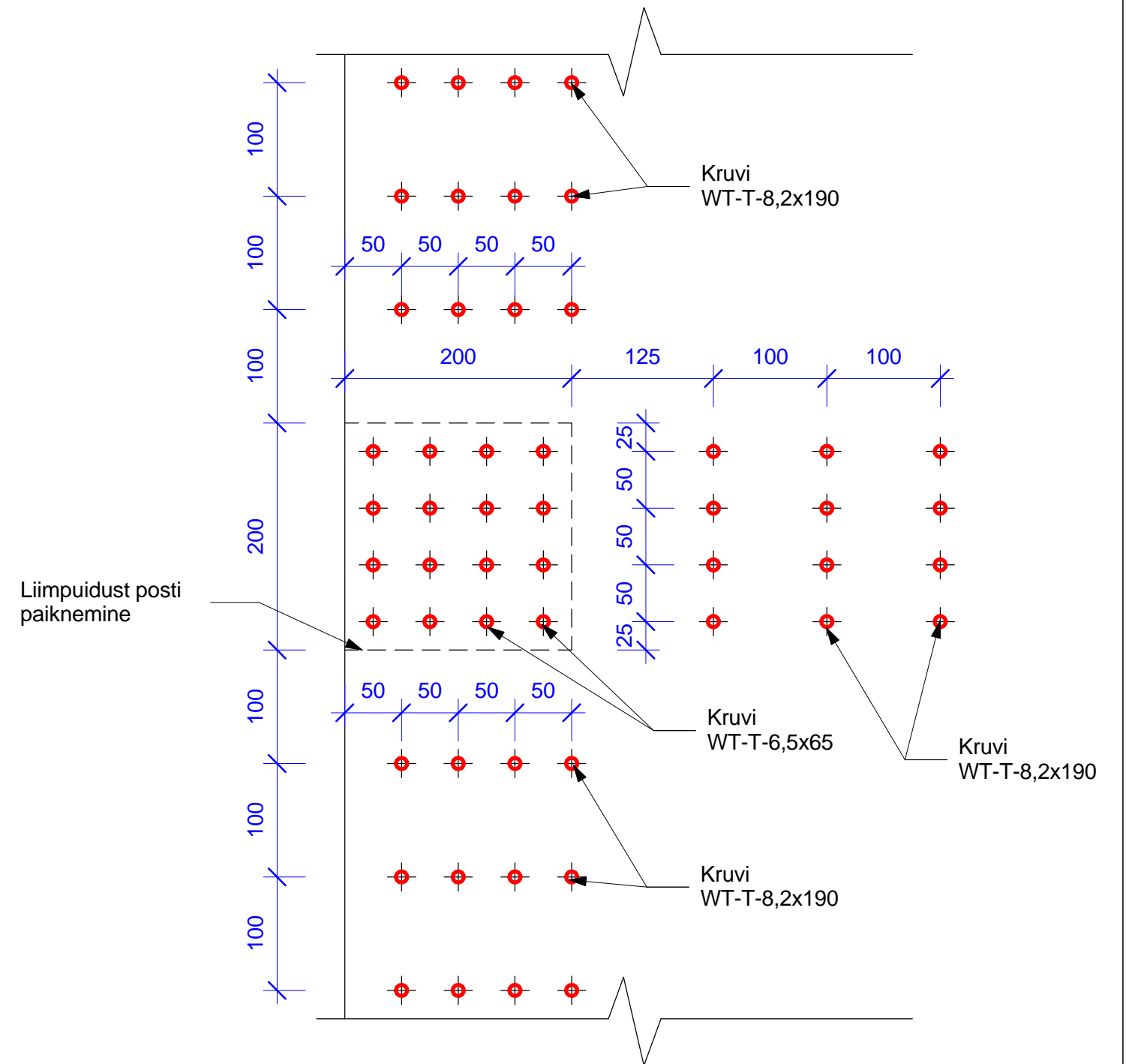
Joonis L1.2. Väljevõte arhitektuursest projektist: korruseplaan (käsitletud rõdu tähistatud punase joonega)

## **Lisa 2. Armeerivate kruvide paiknemine ristkihtpuidust paneelis**

## Vaade pealt



## Vaade alt

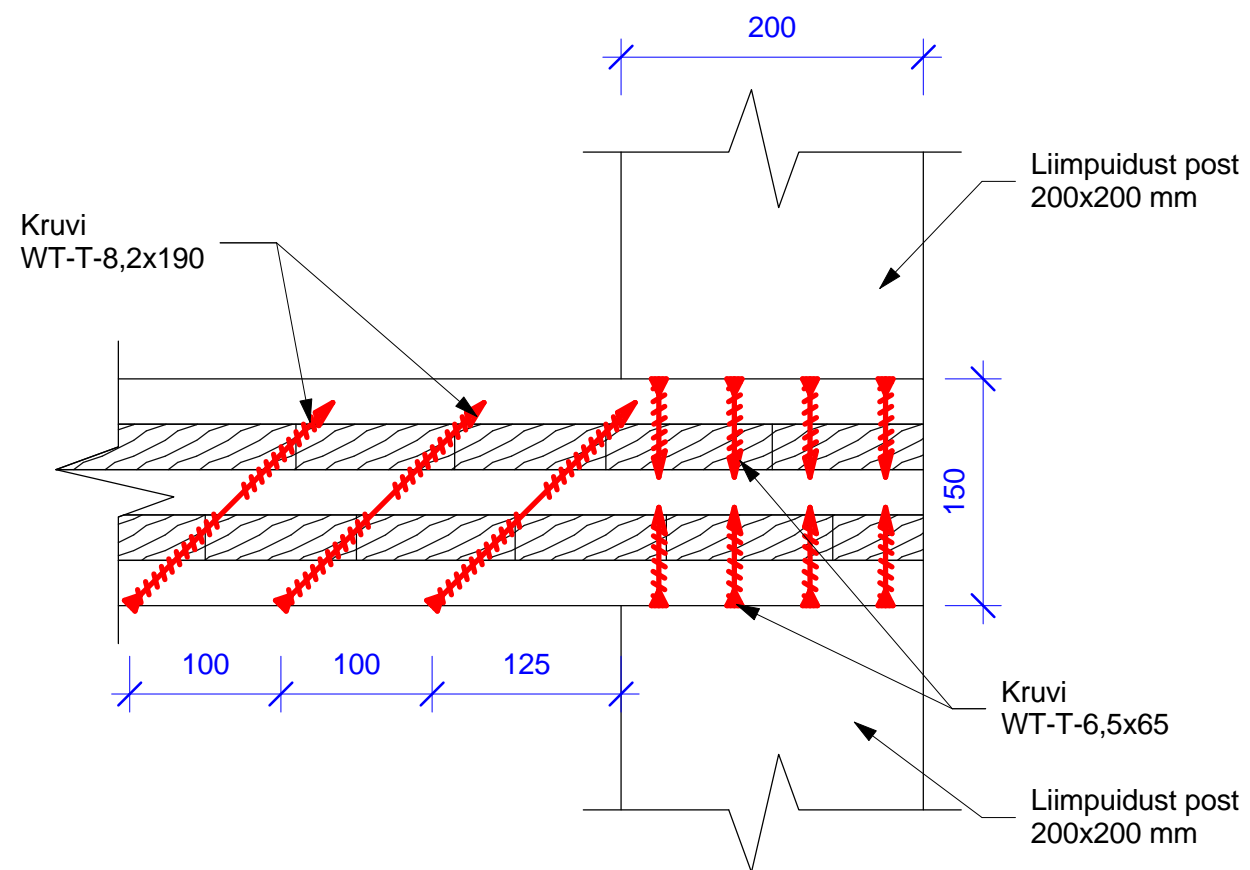


### MÄRKUSED:

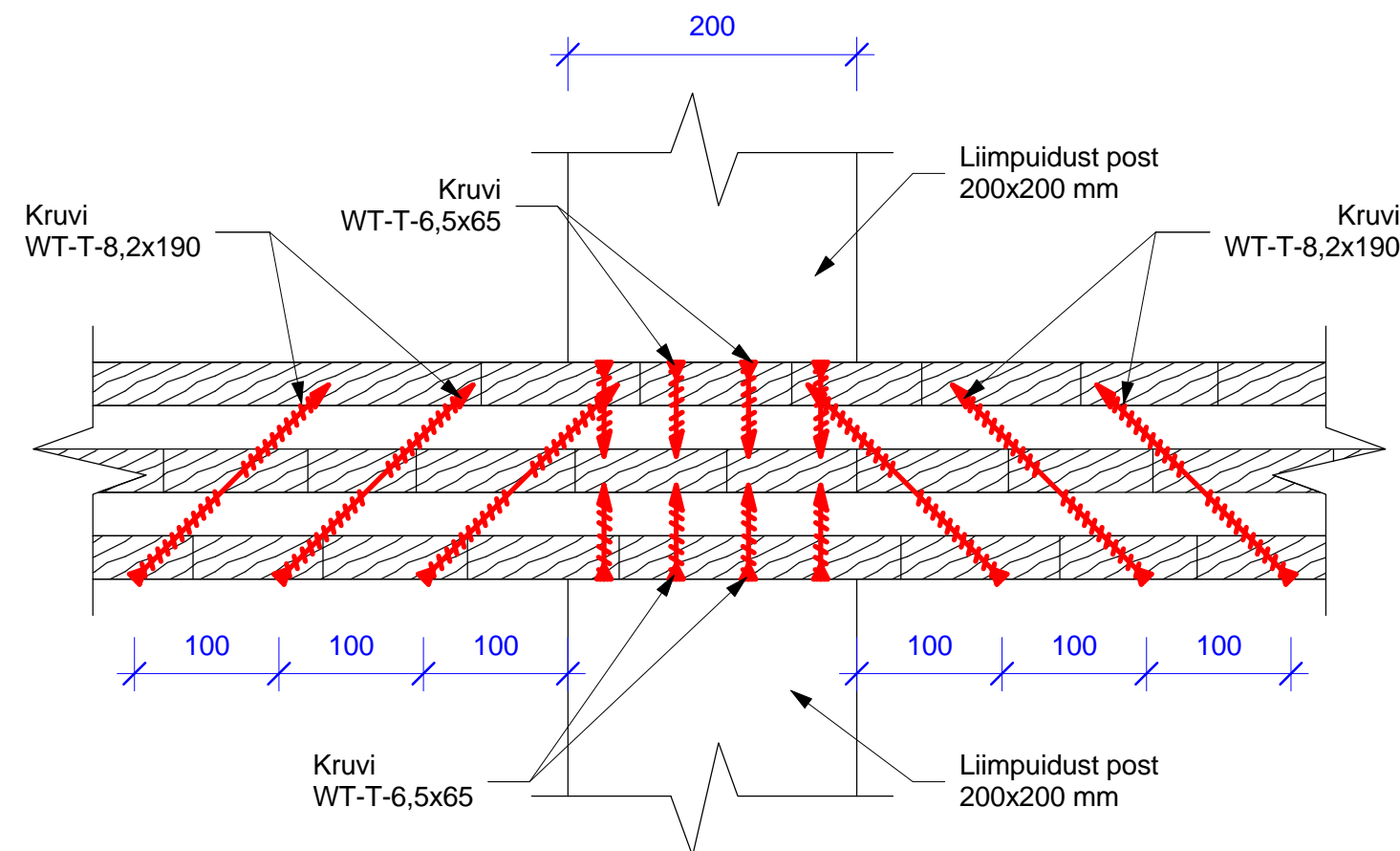
\* Kruvide arvud: WT-T-8,2x190 - 36 tk  
WT-T-6,5x65 - 32 tk

|   |  |  |                    |
|---|--|--|--------------------|
|  1918<br><b>TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL</b><br>TARTU KOLLEDŽ |  | <b>Töö pealkiri:</b> Ristkihtpuidust rõdukonstruktsioonide projekteerimine |                    |
| <b>Koostas</b> Tõnu Tootsi  |  | <b>Kuupäev</b> 24.05.2015  |                    |
| <b>Juhendas</b> Laur Lõvi   |  | <b>Kuupäev</b> 24.05.2015  |                    |
| <b>Tähis:</b> EAEI 092638   |  | <b>Leht:</b> 1   | <b>Leht:</b> 2     |
|   |  | <b>Mõõtkava:</b> 1:5   | <b>Formaat:</b> A3 |
| <b>Joonis:</b> Ristkihtpuidust paneeli armeeritud osa vaade pealt ja alt  |  |  |                    |


Lõige 1-1



Lõige 2-2



MÄRKUSED:  
 \* Kruvide arvud: WT-T-8,2x190 - 36 tk  
 WT-T-6,5x65 - 32 tk

|   |             |   |                    |
|---|-------------|---|--------------------|
|  1918<br><b>TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL</b><br>TARTU KOLLEDŽ |             | <b>Töö pealkiri:</b> Ristkihtpuidust rõdukonstruksioonide projekteerimine |                    |
|   |             | <b>Joonis:</b> Lõiked 1-1 ja 2-2  |                    |
| <b>Koostas</b>  | Tõnu Tootsi | <b>Kuupäev</b>  | 24.05.2015         |
| <b>Juhendas</b>   | Laur Lõvi   |   | 24.05.2015         |
| <b>Tähis:</b> EAEI 092638   |             | <b>Leht:</b> 2  | <b>Lehti:</b> 2    |
|   |             | <b>Mõõtkava:</b> 1:5  | <b>Formaat:</b> A3 |