

RISTKIHTPUIDU PROJEKTEERIMINE

SEMINAR: PUIT- JA PUIDUPÕHISTE KONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE

Eero Tuhkanen

18.10.2016

1

TEEMAD

- RISTKIHTLIIMPUIDU OLEMUS
- MÄRKUSED TOOTMISE KOHTA
- RISTKIHTLIIMPUIDU KARAKTERISTKUD
- ARVUTUSMEETODID
- KANDE- JA KASUTUSPIIRSEISUND

2

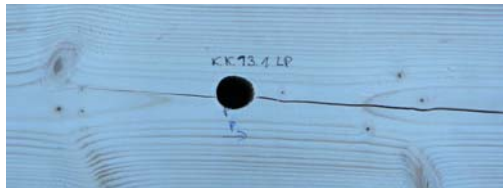
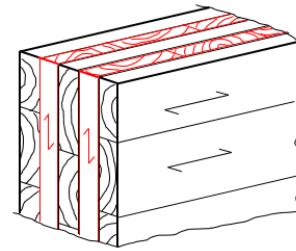
RISTKIHTLIIMPUIT

CLT – *Cross Laminated Timber*

RKP – *RistKihtPuit* (kokkuleppeliselt CLT)

BSP – *BrettSPerrHolz*

sks Sperre – tõke, sulg, lukustus



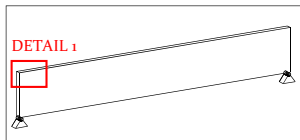
3

RKP TÖÖTAMINE PLAATELEMENDINA

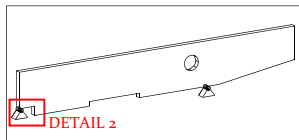
	joontoel	konsoolne	avadega	punkttugedel
seinad				
vahelaed				
katused voldikud				
katused Kumerad elemendid				

G.Schickhofer 4

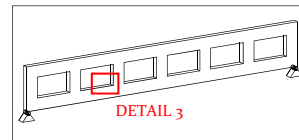
RKP TÖÖTAMINE VARRASELEMENDINA



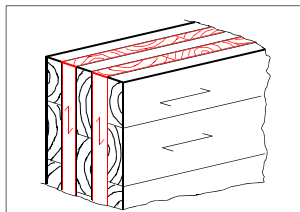
tala ilma aukudeta



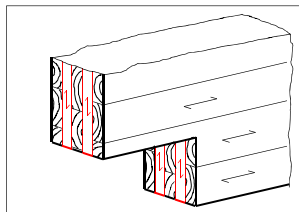
kitsenev tala sisselõike ja auguga



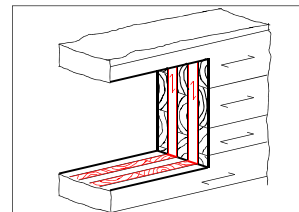
„Vierendeel“ tala



detail 1: 5-kihiline CLT-element



detail 2: sisselõikega tugi

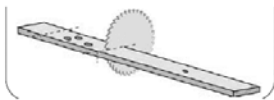


detail 3: ava

G.Schickhofer 5

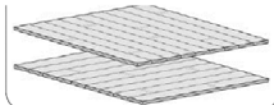
TOOTMISPROTSESS

sorteerimine



lamellide jätkamine

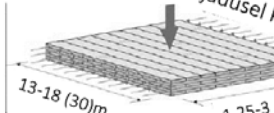
kihtide paigutamine



vaheetapp: külglüümine

kihtide liimimine

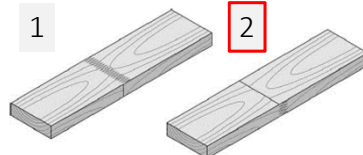
vajadusel külgsurvevõrk



mõõtu lõikamine CNC abil

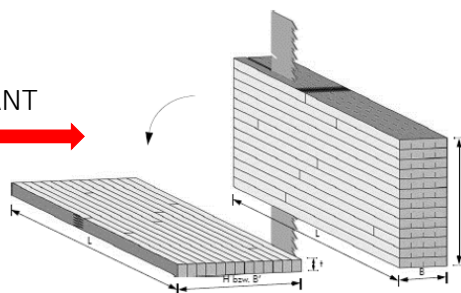


1



2

VARIANT



HÜDRAULILINE PRESS



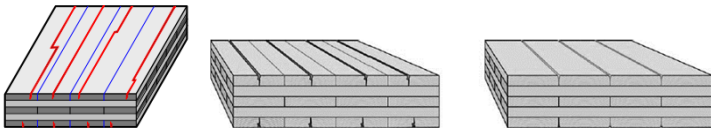
Surve 0,1...1,0+ (N/mm²)
Lubatud max 0,4...0,6 (N/mm²)
(Wassipaul, 1982)

VAAKUMPRESS



Surve 0,05...0,1 (N/mm²)

Külgliimimised plaadi ehitusfüüsikalised eelised on piiratud

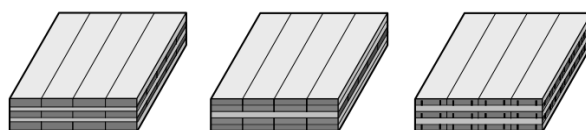
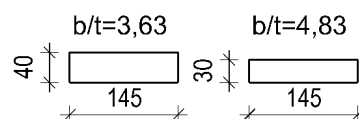
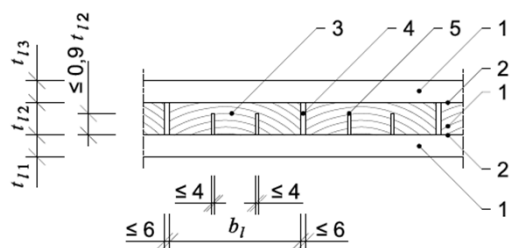


7

MÄRKUSED LAMELLIDE VALIKU KOHTA

- Lamellide paksus $6\text{mm} \leq t_l \leq 45\text{mm}$ [v.a 3-kihilise plaadi keskmine lamell: $t_l \leq 60\text{mm}$]
- Lamellide laius $40\text{mm} \leq b_l \leq 300\text{mm}$ [k.a kompensatsioonipilude vaheline kaugus]
- Paneeli maksimaalne kogupaksus $\leq 300\text{mm}$
- Piir, millest allpool tuleb kasutada vähendatud külgnihketugevust (liimimata küljed):

$$\frac{b_l}{t_l} \geq 4$$



8

RISTKIHTPUIDU KARAKTERISTIKUD

9

RISTKIHTPUIDU KARAKTERISTLIKUD VÄÄRTUSED

EVS-EN-1995-1-1

3 MATERJALI OMADUSED

3.1 Üldist

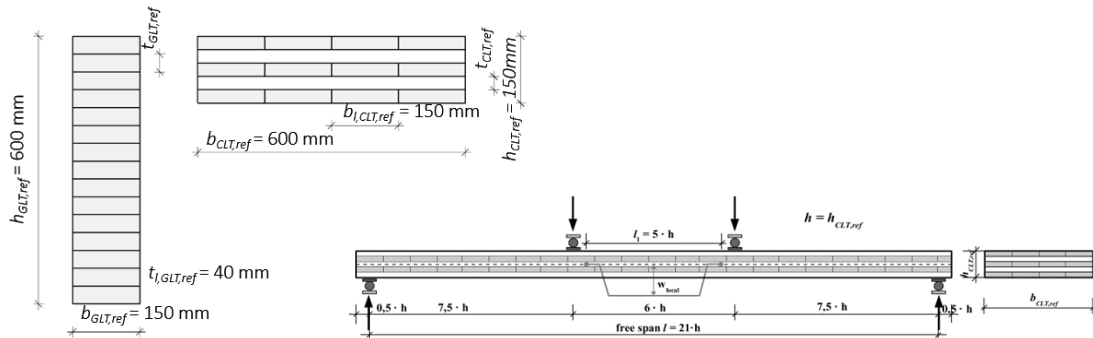
3.1.1 Tugevus- ja jäikusparameetrid

(1)P Materjali tugevus- ja jäikusparameetrid tuleb määrata katsetulemuste alusel, mis on saadud konstruktsioonile vastavate koormustega või sarnaste puusortide või puidupõhiste materialidega võrdlemisega või eri omaduste hästi tuntud suhete alusel.

10

REFERENTSMÕÖDUD

	Kõrgus/paksus	Laius
Liimpuit	$h_{GLT,ref}=600\text{mm}$	$b_{GLT,ref}=150\text{mm}$
Alusmaterjal - lamell	$t_{l,GLT,ref}=40\text{mm}$	$b_{l,GLT,ref}=150\text{mm}$
Ristkihtpuit	$h_{CLT,ref}=150\text{mm}$	$b_{GLT,ref}=600\text{mm}$
Alusmaterjal - lamell	$t_{l,CLT,ref}=30\text{mm}$	$b_{l,CLT,ref}=150\text{mm}$



CLT TUGEVUSKARAKTERISTIKUD

	Baasmaterjal	T14	
	COV [$f_{t,0,l}$]	25%±5%	35%±5%
CLT tugevusklass			
Omadus ^{a)}	tähis	CL24h	CL28h
Paindetugevus	$f_{m,CLT,k}$	24	28
Tõmbetugevus	$f_{c,0,CLT,net,k}$	16	18
	$f_{c,90,CLT,k}$	0,5	
Survetugevus	$f_{c,0,CLT,net,k}$	24	28
	$f_{c,90,CLT,net,k}$	3,0	
Nihketugevus koormusel plaadi tasapinnas	$f_{v,CLT,IP,k}$	5,5	
	$f_{T,node,k}$	2,5	
Nihketugevus koormusel plaadi tasapinnast välja	$f_{v,CLT,OP,k}$	3,5	
	$f_{r,CLT,k} - b/t \geq 4$	1,4	
	$f_{r,CLT,k} - b/t < 4$	0,8	

CLT PAINDETUGEVUS

$$f_{m,CLT,k} = k_{m,CLT} \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8}$$

$$k_{m,CLT} = k_{sys,CLT} \cdot k_{CLT,GLT} \cdot k_{h,CLT} \cdot k_{CV,t}$$

5-kihiline CLT, $b_{CLT,ref} = 600mm$, $h_{CLT,ref} = 150mm$		
Lamellide tugevusklass T14 vastavalt EN14080		
$f_{t,0,l,k}$ [N/mm ²]	Lamellide COV[$f_{t,0,l}$]	
	25% ± 5%	35% ± 5%
14,0	Mudel - CLT	
	$f_{m,CLT,k} = 3,0 \cdot 14^{0,8} = 24,8N/mm^2$	$f_{m,CLT,k} = 3,5 \cdot 14^{0,8} = 28,9N/mm^2$

13

NÄIDE: RISTLÕIKETEGURI $k_{h,CLT}$ KASUTAMINE

$$k_{h,CLT} = (150/h)^{0,1}$$

Teguri kehtivuspiirid: 60...280mm (1,1...0,94)

CLT	$f_{m,CLT,k}$ [N/mm ²]	Kõrgus [mm]	$k_{h,CLT}$ [-]	$f_{m,CLT,k,h=200}$ [N/mm ²]
CL28h	GL28h	200	$(150/200)^{0,1} = 0,97$	27,2

14

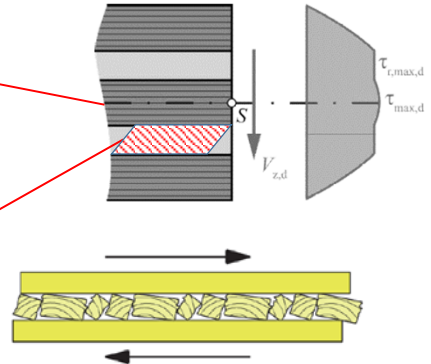
NIHKETUGEVUS KOORMUSEL PLAADI TASAPINNAST VÄLJA

$$f_{v,CLT,OP,k} = 3,5N/mm^2 [k_{cr} = 1,0]$$

$$f_{r,CLT,k} = \begin{cases} 0,2 + 0,3 \cdot \frac{w_l}{t_l} \\ 1,4 \end{cases}, [\text{Erhart 2015}]$$

Soovitus:

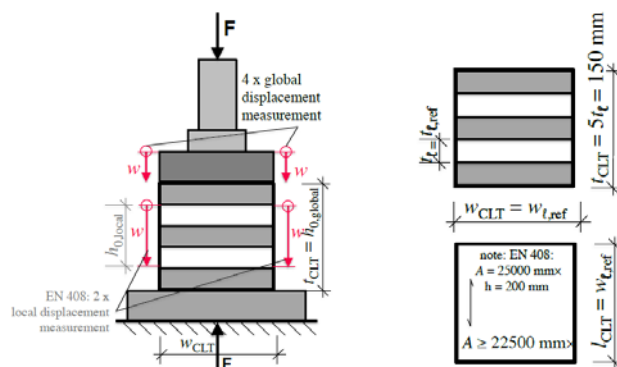
kui $\frac{w_l}{t_l} \geq 4$, siis $f_{r,CLT,k} = 1,4N/mm^2$; kui $\frac{w_l}{t_l} < 4$, siis $f_{r,CLT,k} = 0,8N/mm^2$



15

SURVETUGEVUS RISTIKIUDU

$$f_{c,90,CLT,net,k} = 3,0N/mm^2$$



Tegur, mis arvestab koormuse asetust: $k_{c,90,CLT} = 1,0 \dots 2,1$

16

CLT JÄIKUSKARAKTERISTIKUD

	Baasmaterjal	T14	
	COV [$f_{t,0,l}$]	25%±5%	35%±5%
		CLT tugevusklass	
Omadus ^{a)}	tähis	CL24h	CL28h
Elastusmoodul	$E_{0,CLT,mean}$	11600	
	$E_{0,CLT,05}$	9167	
	$E_{90,CLT,mean}$	300	
	$E_{90,CLT,05}$	250	
	$E_{c90,CLT,mean}$	450	
	$E_{c90,CLT,05}$	375	
Nihkemoodul	$G_{CLT,mean}$	650	
	$G_{CLT,05}$	540	
Külgnihkemoodul	$G_{rCLT,mean} : b/t \geq 4$	100	
	$G_{rCLT,mean} : b/t < 4$	65	
	$G_{rCLT,05}$	54	
Tihedus	$\rho_{CLT,k}$	385	
	$\rho_{CLT,mean}$	420	
a) Väärtused on leitud referentsristlöike baasil			

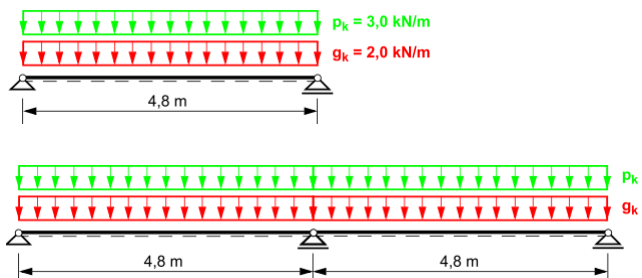
ARVUTUSMEETODID

ARVUTUSMEETODID – KOORMUS PLAADI TASAPINNAST VÄLJA

γ -MEETOD

NIHKE ANALOOGIA (SHEAR ANALOGY, SAV)

TIMOSCHENKO TALA MEETODIT (TIMO)



19

γ -MEETOD [EN-1995-1-1; LISA B]

- [+] Levinud ja tunnustatud meetod EC5 ja paljude tootjate tehnilises tunnustuses
- [-] Keeruline käsiarvutuseks ning ei ole ka otseselt kasutatav (ristkihtpuidu jaoks kohandatud)
- [-] Gamma väärtused jätkuvtala arvutamisel ei ole üheselt tõlgendatavad
- [-] Jätkuvtala arvutusel võib tekkida olukord, kus ühes avas momendi nullpunkt puudub (suurte sildeerinevuste puhul). Seetõttu on küsitavad ka gamma-meetodile ette nähtud ääritingimused.
- [-] Kasutatav ainult 3- ja 5-kihiliste plaatide korral. Suurema arvu kihtide jaoks on vaja täiendusi SHELLING-i teooriast
- [-] Kasutatav enamjaolt ainult jaotatud koormuse puhul

20

NIHKE ANALOOGIA MEETOD (SAV)

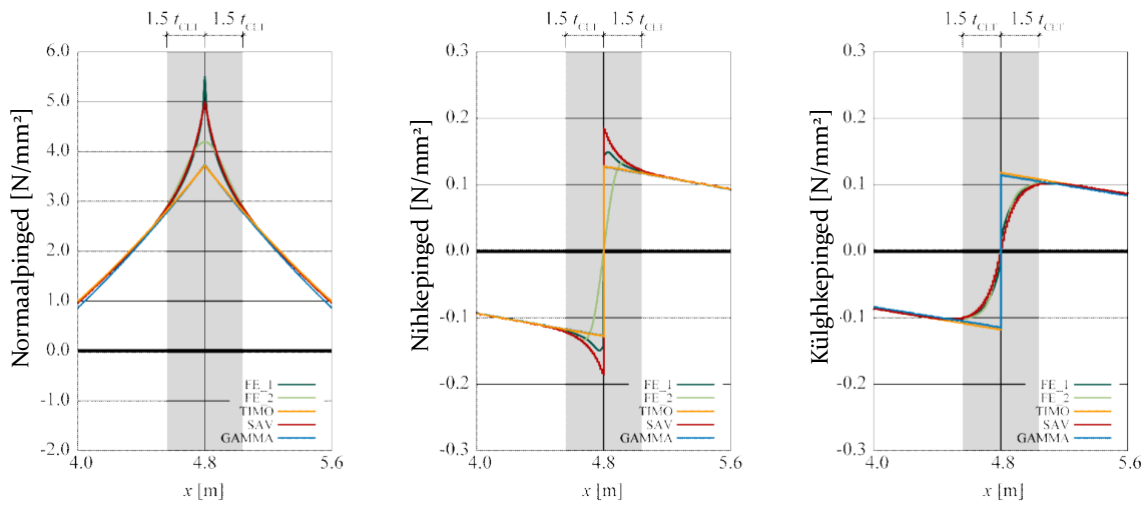
- [+] Meetod annab kahe ja kolme osaga sümmeetriliste ristlõigete korral täpsed tulemused
- [+] Lubab kasutada kõikvõimalikke arvutus- ja koormusskeeme
- [+] Ainus meetod (va FEM), mis võimaldab leida täpselt koondatud koormuste ja vahetugede mõju (momentide tipud)
- [-] Erineva kihipaksustega elementide puhul tulemus ligikaudne
- [-] Väga töömahukas vahetugede ja punktkoormuse all olevate tulemuste leidmisel
- [-] Nihkepingeid tugede ja punktkoormuste lähedal ei saa tuletada täpselt

21

TIMOSCHENKO (TIMO)

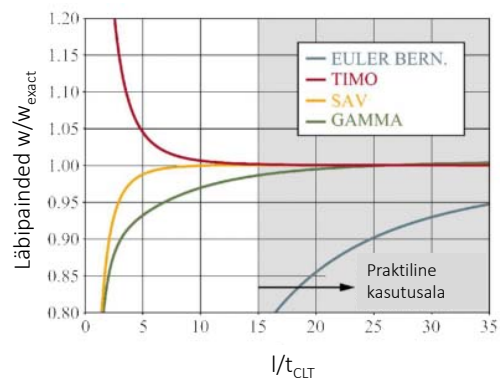
- [+] Meetod on laiendatav 2D plaatidele (REISSNER-MINDLIN teooria)
- [+] Teades paindejäikust ja nihkejäikust, on meetod hästi kasutatav ka käsiarvutus
- [+] Enamus tarkvarasid võimaldavad arvestada varraselementide nihkedeformatsioone paindel
- [+] Lubab kasutada kõikvõimalikke arvutus- ja koormusskeeme
- [+] Kuigi selle teooria alusel arvutatud läbipainded on ligikaudsed, on need siiski piisavalt täpsed praktikas
- [-] Jätkuvtalade ja punktkoormuste korral esineb hälve arvutatud tulemuse ja tegeliku väärtuse vahel

22



Toel annab täpseima tulemuse (normaalpinged) SAV meetod (-10%). Meetodid GAMMA ja TIMO alahindavad toel tekkivaid normaalpingeid märkimisväärselt, kuid seda väga piiratud alal ($\pm 1,5 \cdot t_{CLT}$). Täpsem FEM mudel (FE_2) peegeldab tasandatud momendi tippe ning tulemus on GAMMA ja TIMO omale lähemal

23



$$\frac{l}{t_{CLT}} \geq 15$$

Vahelae paksuse 150mm korral sildeava 2250

24

KANDE JA KASUTUSPIIRSEISUND

25

RISTLÕIKE JÄIKUSPARAMETRID

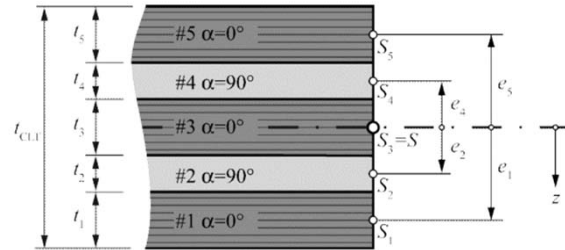
26

PAINDEJÄIKUS

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

$$\frac{E_{0,mean}}{E_{90,mean}} \approx 30$$

$$\rightarrow E_{90,mean} = 0$$



- I_i i-nda kihi inertsmoment
- E_i i-nda kihi elastsusmoodul
- A_i i-nda kihi ristlõike pindala
- e_i i-nda kihi raskuskeskme S_i kaugus ristlõike keskmest

27

PIKIJÄIKUS

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

$$D_x = E_{0,mean} \cdot \sum_{i=1}^n t_{i,x}$$

$$D_y = E_{0,mean} \cdot \sum_{i=1}^n t_{i,y}$$

- D_x pikijäikus x-suunas
- D_y pikijäikus y-suunas
- $t_{i,x}$ i-nda kihi paksus x-suunas
- $t_{i,y}$ i-nda kihi paksus y-suunas

$$\frac{E_{0,mean}}{E_{90,mean}} \approx 30$$

$$\rightarrow E_{90,mean} = 0$$

28

NIHKEJÄIKUS KOORMAMISEL PLAADI TASAPINNAST VÄLJA

$$S_{CLT} = S_{tot} \cdot \kappa$$

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

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

Nihke korrektuuri tegur

- G_i i-nda kihi nihkemoodul (G_i või $G_{r,i}$)
- b_i i-nda kihi laius
- t_i i-nda kihi paksus
- $S(z, E(z))$ z koordinaadist sõltuv staatiline moment
- $G(z)$ z koordinaadist sõltuv nihkemoodul
- $b(z)$ z-koordinaadist sõltuv ristlõike laius

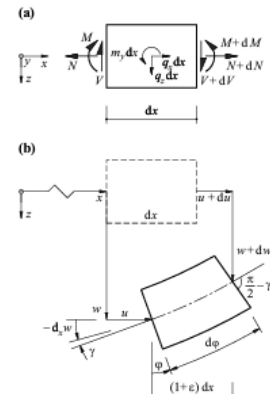
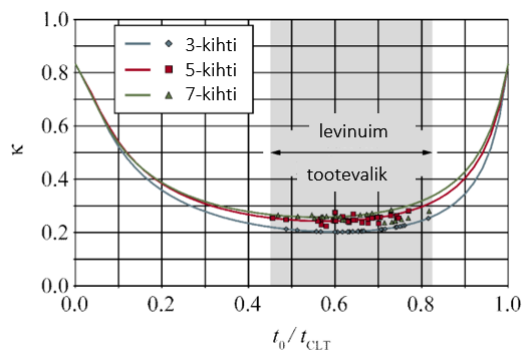
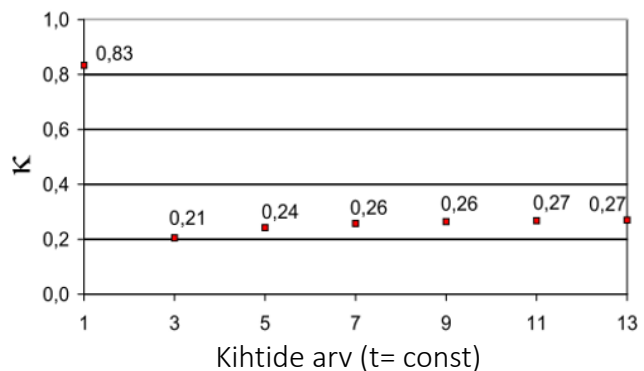


Fig. 8.5 Differential element of a plane framed structure: (a) statics, (b) kinematics

NIHKEKORREKTUURI TEGURI κ ARVUTUS



t_0 – pikikiudu paiknevate kihtide paksuste summa

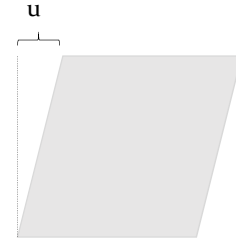


NIHKEJÄIKUS KOORMAMISEL PLAADI TASAPINNAS

$$S_{xy} = G^* \cdot t_{CLT}$$

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

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



$G_{0,mean}$ baasmaterjali nihkemooduli keskvärtus

t keskmine kihi paksus

a keskmine prussi laius (või pragude vaheline kaugus)

31

KANDEPIIRSEISUND

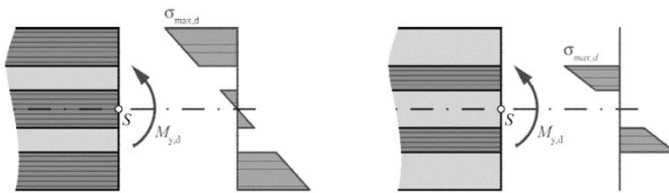
32

PAINE PLAADI TASAPINNAST VÄLJA

TUGEVUSTINGIMUS

$$\frac{\sigma(z)_d}{f_{m,CLT,d}} \leq 1,0$$

$$\sigma(z)_d = \frac{M_d}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z)$$



ARVUTUSLIK TUGEVUS

$$f_{m,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_l \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M}$$

$$k_l = \min \left\{ 1, 1 + 0,025 \cdot n, n > 1 \right.$$

Märkus: eeldades 1m laiuses CLT plaadis prusside arvuks vähemalt 4tk, rakendub tegur 1,1

33

NIHE KOORMUSEL PLAADI TASAPINNAST VÄLJA

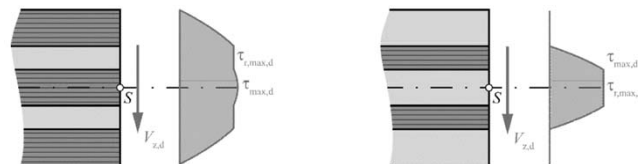
Maksimaalne nihkepinge avaldub:

$$\tau(z_0) = \frac{V_z \cdot \int_{A_0} E(z) \cdot z \cdot dA}{K_{CLT} \cdot b(z_0)}$$

TUGEVUSTINGIMUSED

$$\frac{\tau_{max,d}}{f_{v,CLT,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{\tau_{r,max,d}}{f_{r,CLT,d}} \leq 1,0$$



Kuna on tehtud eeldus, et $E_{90}=0$, siis külgnihkepinge epüür on konstantne

34

TÕMME PLAADI TASAPINNAS

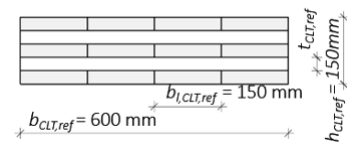
TUGEVUSTINGIMUS

$$\frac{N_d}{A_{net,ef}} \leq f_{t,0,CLT,net,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys,t,0} \cdot f_{t,0,l,k}}{\gamma_M}$$

Arvestada võib ainult koormuse sihis olevate lamellidega

$$k_{sys,t,0} = \min \left\{ \frac{0,075 \cdot \ln(n) + 1}{1,2} \right\} : CL24h$$

$$k_{sys,t,0} = \min \left\{ \frac{0,130 \cdot \ln(n) + 1}{1,35} \right\} : CL28h$$



35

SURVE PLAADI TASAPINNAS

TUGEVUSTINGIMUS

$$\frac{N_d}{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1,0$$

Arvestada võib ainult koormuse sihis olevate lamellidega

36

SURUTUD ELEMENDI NÖTKUMINE

EKVIVALENTTALA MEETOD

$$\frac{N_d}{k_c \cdot A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1,0$$

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

$$\beta_c = 0,1$$

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

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

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

NB! Jäikused arvutada 5%-väärtusega

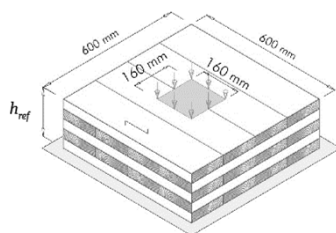
37

SURVE KOORMAMISEL PLAADI TASAPINNAST VÄLJA

TUGEVUSTINGIMUS

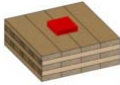


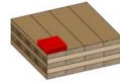
$$\sigma_{c,90,CLT,d} \frac{F_{c,90,d}}{A_{c,90}} \leq 1,0$$


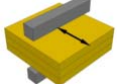
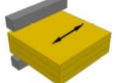
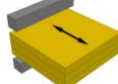
$$\sigma_{c,90,CLT,d} \leq k_{c,90,CLT} \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_M} = k_{c,90,CLT} \cdot f_{c,90,CLT,d}$$



38

$k_{C,90,CLT}$ VÄÄRTUSED

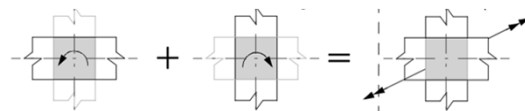
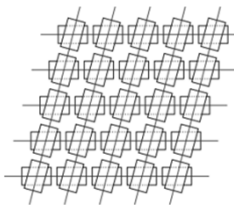
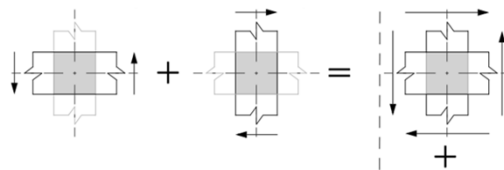
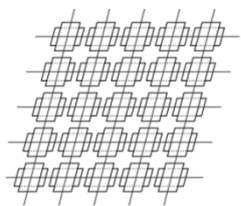
Koormusolukord		$k_{C,90,CLT}$
	keskel	1,8
	väliskihtide suunaga paralleelses servas	1,5
	väliskihtide suunaga risti olevas servas	1,5
	nurgas	1,3

Koormusolukord		$k_{C,90,CLT}$
	keskel paralleelselt töötamise suunaga	1,3
	keskel, töötamise suunaga risti	1,8
	servas, paralleelselt töötamise suunaga	1,0
	servas, töötamise suunaga risti	1,5

Märkus: tegurid baseeruvad reaalsel kontaktpinnal, st kontaktpikkust 30mm võrra suurendatud ei ole

39

NIHE PLAADI TASAPINNAS

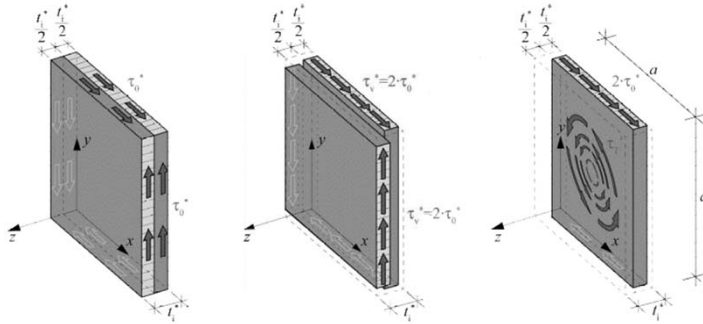


40

NIHE PLAADI TASAPINNAS

RVE – mahtelement (representative volume element)

RSVE – mahtelemendi alaelement (representative volume sub-element)



Servad liimitud

Mehhanism I

Mehhanism II

Alaelemendi küljemõõdud on prussi mõõdud (pilud sisse arvatud) ning ideaalpaksus vastavalt tabelile.

41

Sõlm 1 (=välimine sõlm)	Kiht 1 (väliskiht) Kiht 2 (sisekiht)	$t_1^* = \min (2 \cdot t_1, t_2)$
Sõlm i (=sisemine sõlm)	Kiht i (sisekiht) Kiht i+1 (sisekiht)	$t_i^* = \min (t_i, t_{i+1})$
Sõlm n-1 (=välimine sõlm)	Kiht n-1 (sisekiht) Kiht n (sisekiht)	$t_{n-1}^* = \min (t_{n-1}, 2 \cdot t_n)$

Summaarselt kehtib

$$t^* = \sum_{i=1}^{n-1} t_i^* \leq t_{CLT}$$

Proportsionaalne nihkejõud ühes alaelemendis:

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

Konstantne nominaalne nihkepinge alaelemendis avaldub:

$$\tau_{xy,RSVE(i)}^* = \frac{n_{xy,RSVE(i)}^*}{t_i^*} = \frac{n_{xy}}{t^*} = \tau_0^*$$

42

MEHCHANISM I

TUGEVUSTINGIMUS

$$|\tau_{v,d}^*| \leq f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,CLT,IP,k}}{\gamma_M}$$

Maksimaalne pingeleitakse:

$$\tau_v^* = 2 \cdot \tau_0^*$$

MEHCHANISM II

TUGEVUSTINGIMUS

$$|\tau_{T,d}^*| \leq f_{T,CLT,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{T,node,k}}{\gamma_M}$$

Maksimaalne väändepinge avaldub:

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

Polaarvastupanumoment avaldub:

$$W_p = \frac{I_p}{a/2} = \frac{a^3}{3}$$

$$I_p = I_y + I_z = \frac{a \cdot a^3}{12} + \frac{a^3 \cdot a}{12} = \frac{a^4}{6}$$

Liimitud ala suuruseks on eeldatud $a \cdot a$ ⁴³

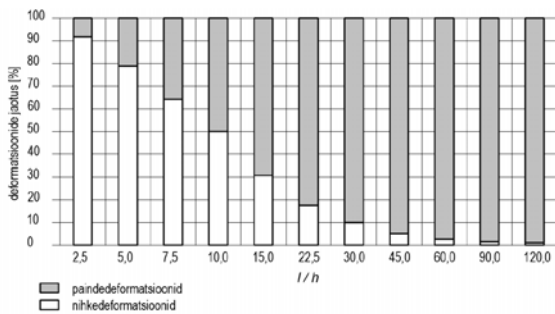
KASUTUSPIIRSEISUND

LÄBIPAININE

Lihttala läbipaine avaldub:

$$w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot K_{CLT}} + \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}}$$

Jäikusparameetrite K_{CLT} ja S_{CLT} arvutamisel tuleb kasutada elastusmoodulite keskvaärtusi



45

<https://www.costfp1402.tum.de/>
Publications



Proceedings of the Joint Conference
of COST Actions FP1402 & FP1404
KTH Building Materials, 10.3.2016

**Cross Laminated Timber – A competitive wood
product for visionary and fire safe buildings**

46

Kasutatud kirjandus

T. Bogensperger, G. Silly, G. Schickhofer. Comparison of Methods of **Approximate Verification Procedures for Cross Laminated Timber**, Research Report, holz. bau forschungs gmbh, 2012

R. Harris, A. Ringhofer, G. Schickhofer. **Focus Solid Timber Solutions. European Conference on Cross Laminated Timber**. Graz: s.n., 2013

G. Schickhofer, T. Bogensperger, T. Moosbrugger. **BS Phandbuch. Holz-Massivbauweise in Brettsperholz**. Graz : Verlag der Technischen Universität Graz, 2010

Proceedings of the Joint Conference of COST Action FP1402 & FP1404 KTH Building Materials, 10.3.2016
Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings
A.Falk, Philipp Dietsch & Joachim Schmid