

DIMENZIONIRANJE NOSILNIH ELEMENTOV LESENIH KONSTRUKCIJ

Jože Lopatič



Pri **izbiri in projektiranju** nosilnega sistema konstrukcije gre za **večplastno prepletanje in vzajemno obravnavanje**:

- o arhitektonskih,
- o gradbeno-konstrukcijskih,
- o gradbeno-fizikalnih in
- o ostalih funkcionalnih zahtev.

Gradbeno-konstrukcijske zahteve:

- **uporabnost, nosilnost in stabilnost konstrukcij** v **trajnih projektnih stanjih**, ki ustrezajo pogojem normalne uporabe,
- **ustrezna nosilnost oziroma odpornost** konstrukcij v primeru **nezgodnih projektnih stanj** kot sta npr. **požar in potres**.

Uvod

- o Les kot naraven material je **dimenzijsko omejen**
 - o glede dimenzij prečnega prereza in
 - o glede razpoložljive dolžine elementov
- o Razvoj lesnih proizvodov $\leftrightarrow$ Razvoj nosilnih sistemov
- o **Prednosti** lahko izkoristimo, če se pri **projektiranju** zavedamo "slabosti"



JL, OLJK 2016/17

Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Klasičen masivni les vse pogosteje nadomeščajo prefabricirani **lesni proizvodi**, ki napram žaganemu lesu prinašajo dodatne prednosti:

- izločitev oziroma razpršitev napak v lesu,
- v konkretnim potrebam prirejenih mehanskih lastnostih,
- ter boljši dimenzijski in oblikovni stabilnosti.

Glede na geometrijo ločimo:

- linijske elemente in
- ploščaste elemente.

Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Linijski elementi:

Gre za tako imenovani **konstrukcijski kompozitni les** (Structural composite lumber – SCL)

Po posebnih postopkih so pri tem lahko zlepljeni:

- o furnirji s čemer dobimo **slojnat furnirni les** (Laminated veneer lumber – LVL),
- o na **pasove razrezani furnirji** (Parallel strand lumber – PSL) ali
- o **dolge tanke usmerjene iveri** (Laminated strand lumber – LSL).



JL, OLJK 2016/17

Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Konstruktivski kompozitni les - SCL:

- o Laminated veneer lumber – LVL,
- o Laminated strand lumber – LSL,
- o Parallel strand lumber – PSL.



Glej še: <https://www.youtube.com/watch?v=37FBUNvegHQ>

JL, OLJK 2016/17

Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Linijski elementi:

Med kompozitni konstrukcijski les lahko v širšem smislu uvrstimo tudi ravne linijske elemente dobljene z medsebojnim lepljenjem **manjšega števila sestavnih delov (dveh, treh ali štirih)** in



in tudi pri nas že več desetletij dobro uveljavljen **lameliran lepljeni les** pri katerem gre za lepljenje večjega števila razmeroma tankih lamel.

Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Linijski elementi - lamelirani lepljeni elementi:



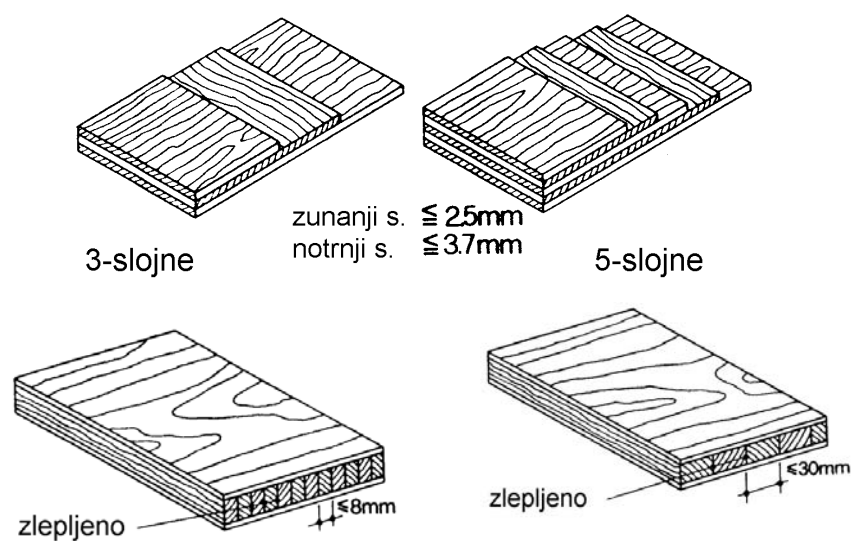
JL, OLJK 2016/17

Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Ploščasti elementi:

Tanjši – nosilna funkcija le v kombinaciji z drugimi deli

- vezane plošče (Plywood) ter
- plošče z usmerjenim iverjem (Oriented strand boards - OSB)
- uporabljamo pri panelnih montažnih sistemih ali za stojine lepljenih nosilcev, kot so npr. »I« in »škatlasti« nosilci

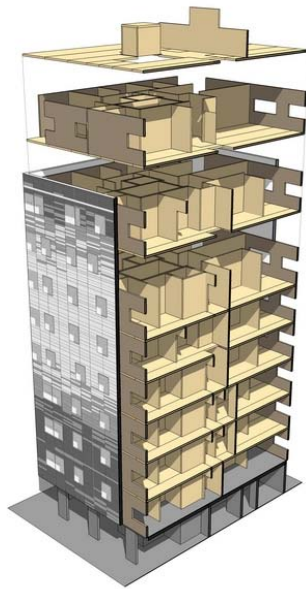


Lesni proizvodi primerni za izdelavo nosilnih elementov

Ploščasti elementi:

Debelejši – samostojno opravljajo nosilno funkcijo

- o lamele iz masivnega lesa, ki so s pomočjo mehanskih veznih sredstev ali lepila na različne načine povezane v ploskovne – masivne panelne elemente npr. elementi iz križno lepljenega lameliranega lesa (Cross laminated timber–CLT)



Ploščasti elementi z nosilno funkcijo



Tipologija konstrukcij iz lesa

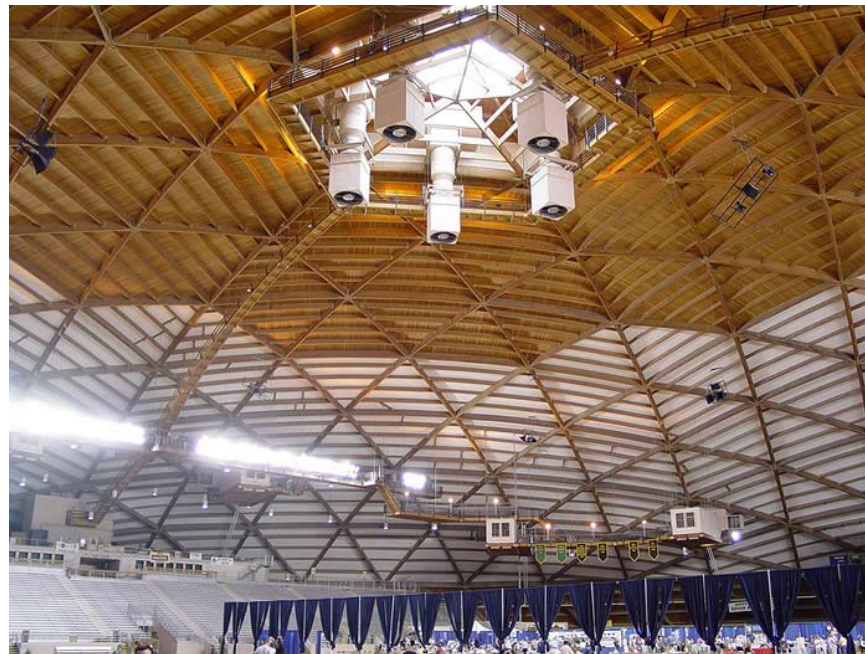
- o Stebri, vešalke, nosilci
- o Strešni nosilci
- o Paličja
- o Okvirji
- o Lokovi
- o Kupole



JL, OLJK 2016/17

Tipologija konstrukcij iz lesa

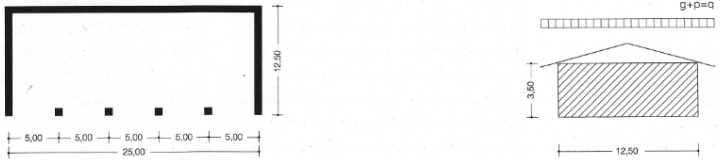
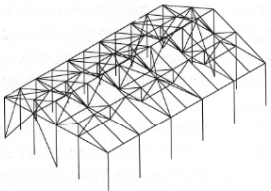
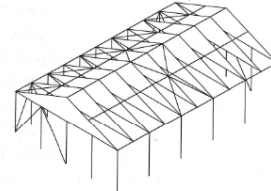
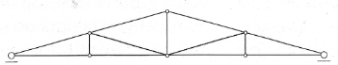
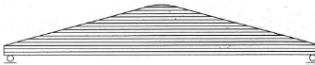
- o Stebri, vešalke, nosilci
- o Strešni nosilci
- o Paličja
- o Okvirji
- o Lokovi
- o **Kupole**



JL, OLJK 2016/17

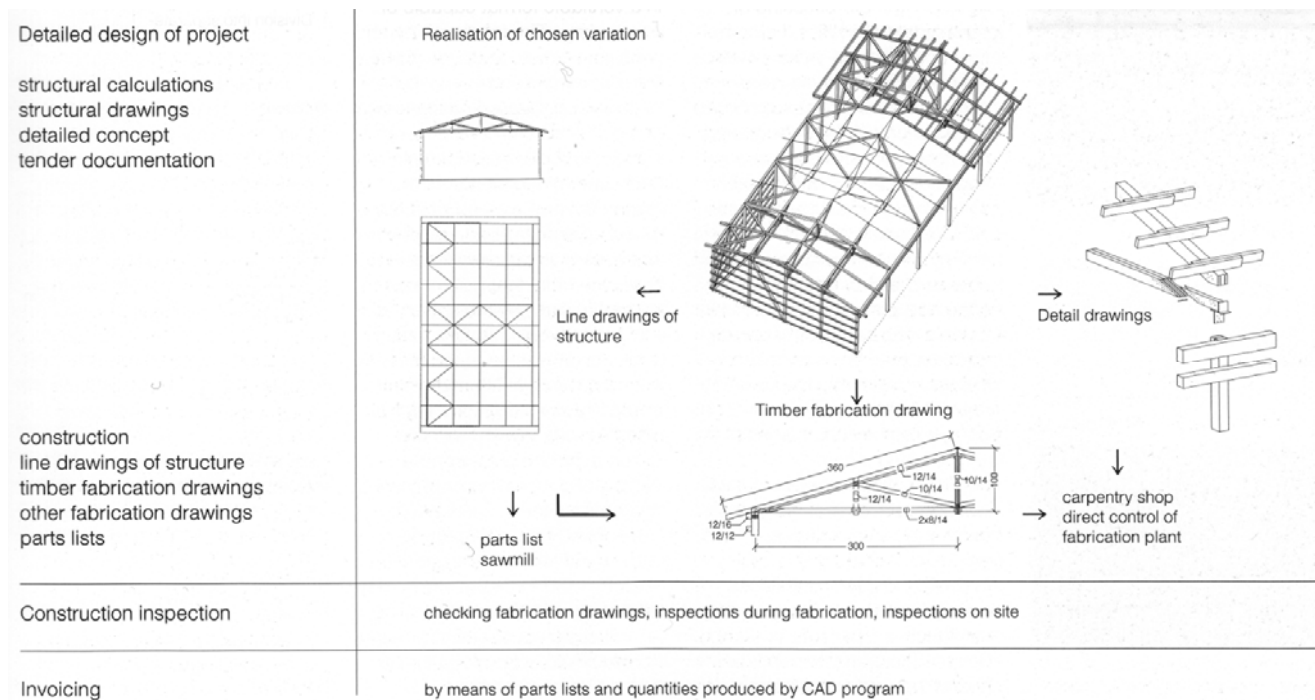
Postopek projektiranja (1.korak):

Snovanje konstrukcije - izbiranje med različnimi možnostmi:

Design process Investigation of boundary conditions Plan dimensions Openings Clear space Roof pitch Loading assumptions	CAD-assisted design procedure 	
Investigation of variations using isometric drawings for: columns primary structural system secondary structural system bracing system building envelope (roof, wall)	Variation 1 	Variation 2 
Preliminary dimensions and realisation of spatial concept in: squared timber glued laminated timber	structural system variation 1 	structural system variation 2 
Decision	based on various comparisons	design material costs economic efficiency

Postopek projektiranja (2. korak):

Podrobno projektiranje: Vsi potrebni računski dokazi, izvedbeni (delavniški) načrti z vsemi detajli, izvlečki materiala, popisi del in predračun :



EVROPSKI STANDARDI ZA PROJEKTIRANJE GRADBENIH KONSTRUKCIJ - EVROKODI

KONSTRUKCIJA MORA BITI KONSTRUIRANA IN ZGRAJENA NA TAK NAČIN, DA:

- o s primerno stopnjo zanesljivosti, **prestane vse obtežbe in njihove učinke**, ki lahko nastopijo v času gradnje in uporabe ter ima primerno **trajnost** z ozirom na stroške vzdrževanja
- o je s sprejemljivo verjetnostjo **sposobna za namenjeno uporabo** glede na predvideno življenjsko dobo in ceno

→ **METODA MEJNIH STANJ**

MEJNA STANJA:

Mejna stanja nosilnosti (stanja porušitve različnih vrst, ki lahko ogrozijo življenja):

- izguba ravnotežja konstrukcije ali dela konstrukcije kot togega telesa
- pretirane deformacije, porušitev ali nestabilnost konstrukcije ali njenega dela

Mejna stanja uporabnosti (stanja pri katerih konstrukcija ne izpolnjuje pogojev uporabnosti)

- deformacije in pomiki, ki onemogočajo normalno uporabo konstrukcije
- vibracije, ki povzročajo neugodno počutje uporabnikov in škodijo objektom

NADOMESTNA OBTEŽBA, KI USTREZA

MEJNIM STANJEM UPORABNOSTI - **MSU** MEJNIM STANJEM NOSILNOSTI - **MSN**



NADOMESTNA OBTEŽBA, KI USTREZA

MEJNIM STANJEM UPORABNOSTI - **MSU** MEJNIM STANJEM NOSILNOSTI - **MSN**



Projektiranje lesenih konstrukcij - Evrokod 5

SIST EN 1995-1-1: 2005

Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij –
Del 1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1995-1-2: 2005

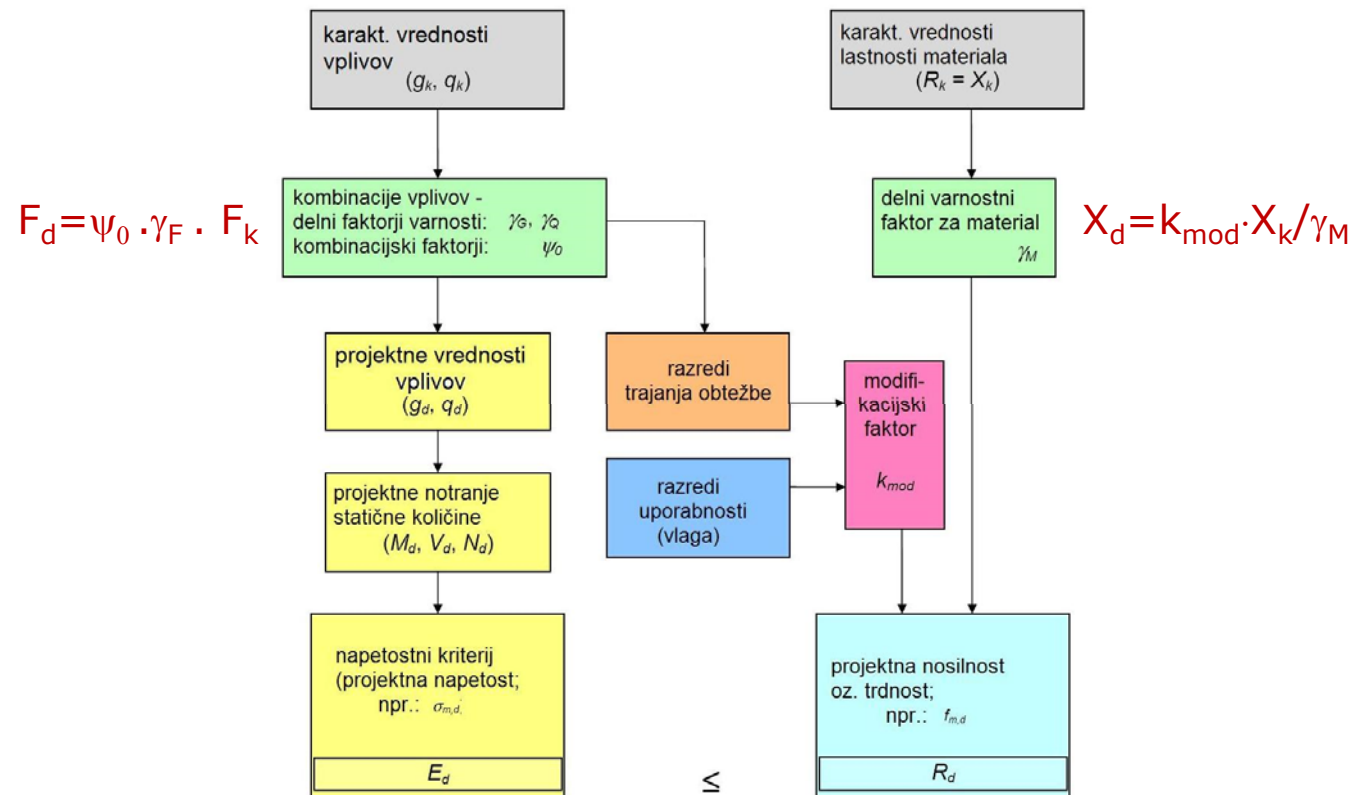
Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij –
Del 1-2: Splošna pravila – Projektiranje požarnovarnih konstrukcij.

SIST EN 1995-2: 2005

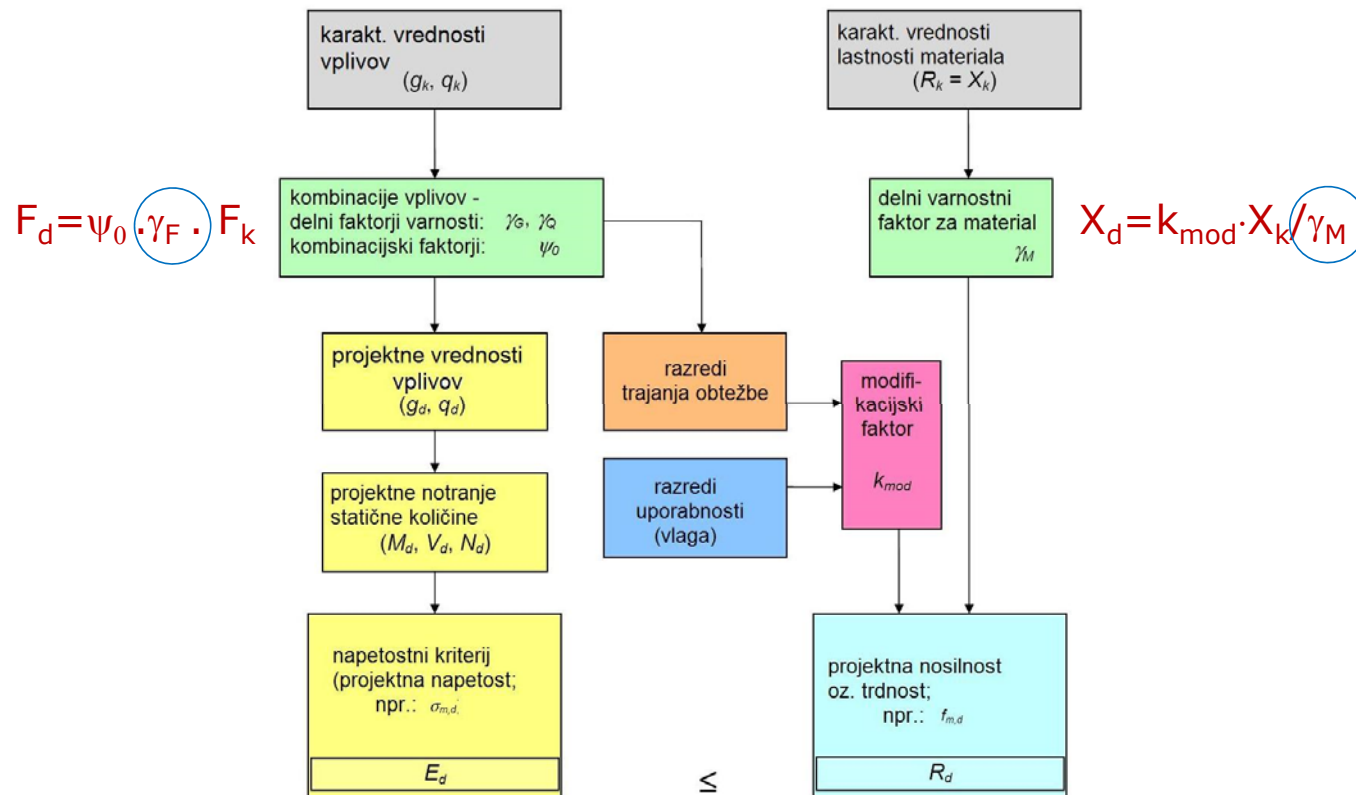
Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij –
2. del: Mostovi.

- o nacionalni dodatek: SIST EN 1995-1-1:2005/A101:2006

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje



Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje



Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

Osnovne kombinacije vplivov (trajne in prehodne situacije):

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Delni varnostni faktorji za vplive (osnovne kombinacije):

	Stalni vplivi	Spremenljivi vplivi	
		Prevladujoč	Preostali (kombinacijska vrednost)
Ugoden vpliv $\gamma_{F,inf}$	1,00*	0,00	0,00
Neugoden vpliv $\gamma_{F,sup}$	1,35*	1,50	1,50

Projektni učinek vpliva:

$$E_d = E_d \left(\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right)$$

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

Delni varnostni faktorji za materiale - γ_M

Osnovne kombinacije:	
Masivni les	1,3
Lepljeni lamelirani les	1,25
LVL, vezani les, OSB	1,2
Iverne plošče	1,3
Vlaknene plošče, trde	1,3
Vlaknene plošče, srednje trde	1,3
Vlaknene plošče, MDF	1,3
Vlaknene plošče, mehke	1,3
Zveze	1,3
Kovinske ježaste plošče	1,25

Projektna trdnost:

$$f_d = k_{\text{mod}} \frac{f_k}{\gamma_M}; \quad k_{\text{mod}} = k_{\text{mod}}(v, t)$$

Projektna odpornost

$$R_d = R(f_d, a_d)$$

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

v - razredi uporabe:

1.razred: določen je z vsebnostjo vlage, ki odgovarja $T=20^{\circ}\text{C}$ in relativni vlagi zraka, ki prekorači 65% le v nekaj tednih na leto ($v<12\%$)

2.razred: določen je z vsebnostjo vlage, ki odgovarja $T=20^{\circ}\text{C}$ in relativni vlagi zraka, ki prekorači 85% le v nekaj tednih na leto ($v<20\%$)

3.razred: je določen s klimatskimi pogoji, ki povzročajo **vlažnost lesa večjo kot pri razredu 2** (pokrite konstrukcije le izjemoma v tem razredu)

t-razredi trajanja obtežbe:

Razred trajanja obtežbe	Kumulativno trajanje karakteristične obtežbe	Primer obtežbe
Trajna	> 10 let	lastna teža
Dolgotrajna	6 mesecev do 10 let	koristna v skladiščih
Srednje dolga	1 teden do 6 mesecev	vsiljena obtežba
Kratkotrajna	< 1 teden	sneg*, veter
Trenutna		nezgodna obtežba

Modifikacijski faktor k_{mod} :

Razred trajanja obtežbe	Razred uporabe		
	1	2	3
Trajna	0,60	0,60	0,50
Dolgotrajna	0,70	0,70	0,55
Srednje dolga	0,80	0,80	0,65
Kratkotrajna	0,90	0,90	0,70
Trenutna	1,10	1,10	0,90

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

Osnovni dokazi v MSN: $E_d \leq R_d$

E_d – učinek vpliva (notranja statična količina ali napetost!)

Osnovni zapis uporabljamo v različnih oblikah, kot npr.:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} ; \quad \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} ; \quad \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

Upoštevamo linearno obnašanje materiala – **Hook-ov zakon**:

→ preprosti izrazi za račun napetosti, npr.:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{neto}}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{neto}}$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W}$$

→ možna **superpozicija učinkov** izračunanih za posamezne vplive:

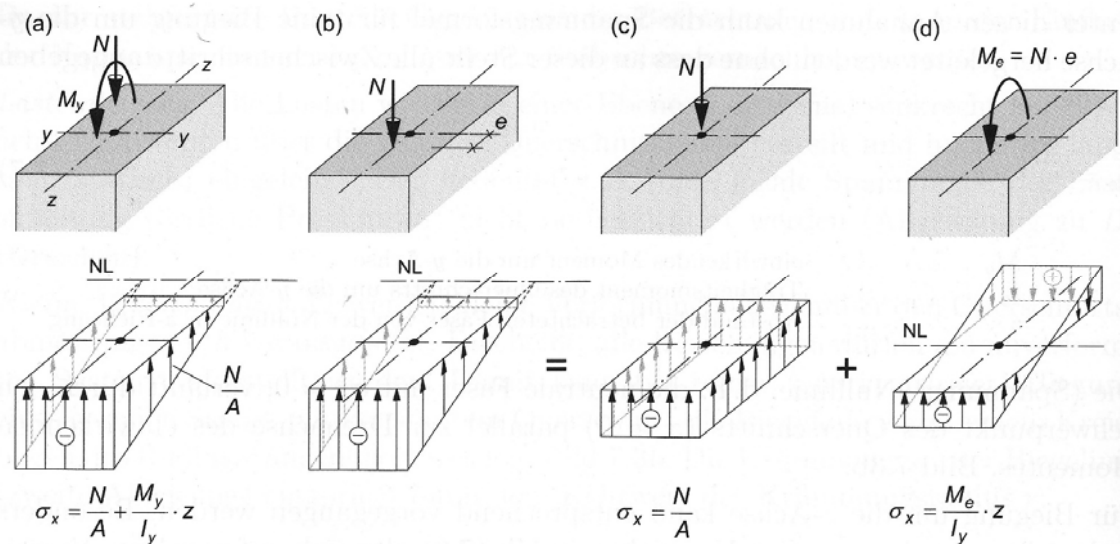
- notranjih statičnih količin,
- napetosti,
- pomikov...

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

Upoštevamo linearno obnašanje materiala – **Hook-ov zakon**:

→ **preprosti izrazi za račun napetosti**:

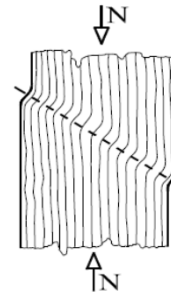
→ možna **superpozicija učinkov** izračunanih za posamezne vplive:



Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje

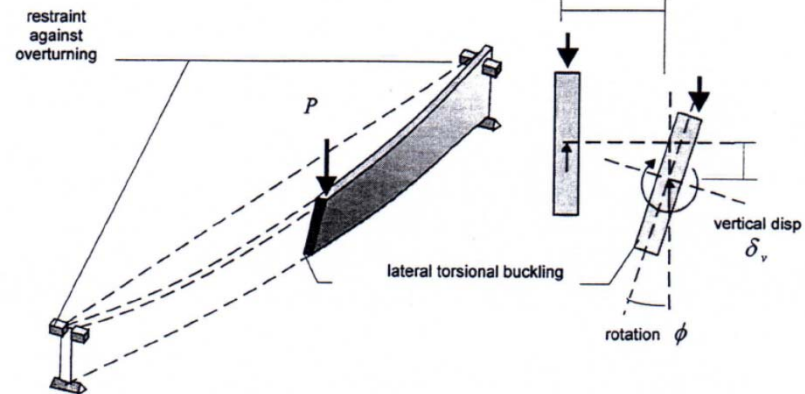
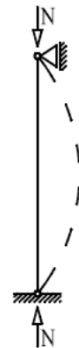
Mejno stanje nosilnosti lahko dosežemo zaradi:

→ izčrpanja **trdnosti materiala**



→ izgube **stabilnosti** elementa zaradi

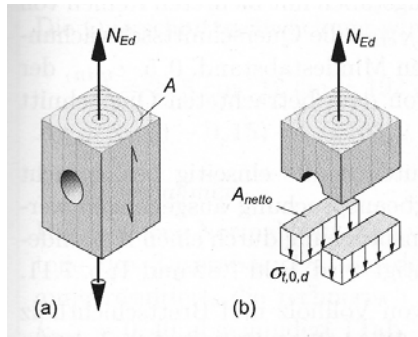
- uklona,
- bočne zvrnitve



JL, OLJK 2016/17

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje – Osnovna sila N_{Ed}

Centrični nateg v smeri vlaken:

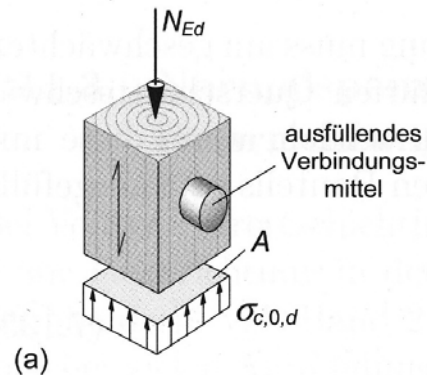


$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad \text{ozioroma} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

- Projektna napetost: $\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{netto}}$
- Projektna natezna trdnost: $f_{t,0,d} = k_{mod} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M}$

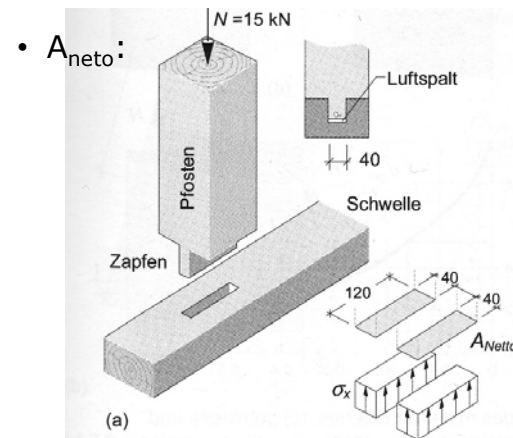
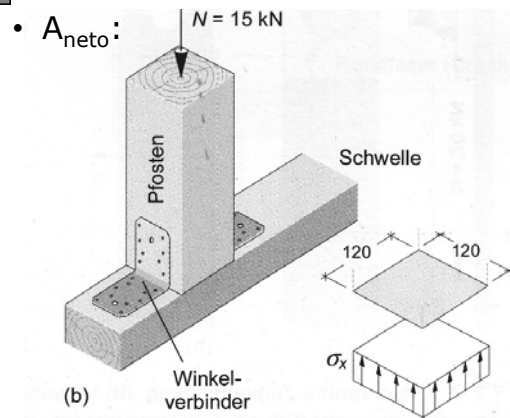
Evrokod 5 – MSN – Dimensioniranje – Osnova sila N_{Ed}

Centrični tlak v smeri vlaken - ni nevarnosti uklona:



$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad \text{oziroma} \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1$$

- Projektna napetost: $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{neto}}$
- Projektna tlačna trdnost: $f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M}$

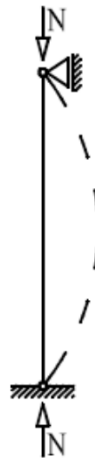


Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje – Osnovna sila N_{Ed}

Centrični tlak v smeri vlaken – nevarnost uklona: $\lambda_{rel,y} \geq 0,3$ $\lambda_{rel,z} \geq 0,3$

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

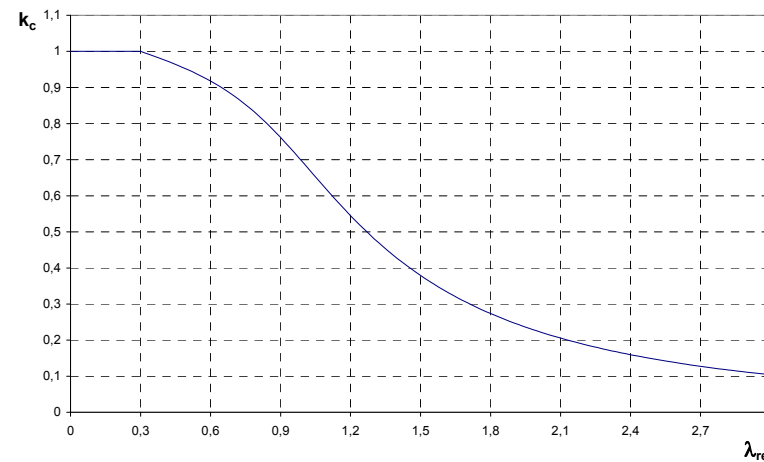
$$\lambda_{y(z)} = \frac{l_{0,y(z)}}{i_{y(z)}}$$



$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} \quad \text{in}$$

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$$

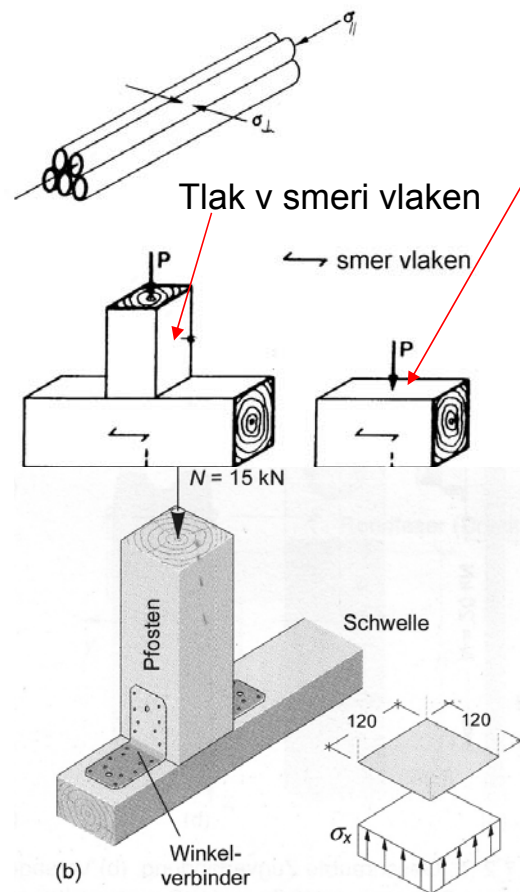
Projektna napetost: $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{neto}}$



JL, OLJK 2016/17

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje – Kontaktne napetosti

Les je **izrazito anizotropen material** – to je potrebno upoštevati pri projektiranju:



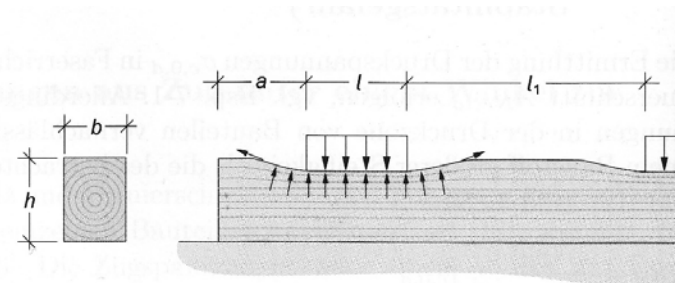
Tlak pravokotno na vlakna:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{kont}}$$

$$f_{c,90,d} = k_{mod} \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M}$$

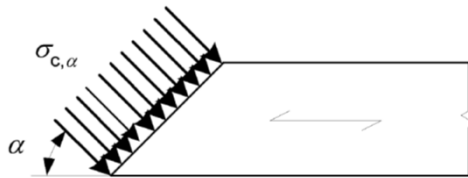
$$1 \leq k_{c,90} \leq 1,75$$



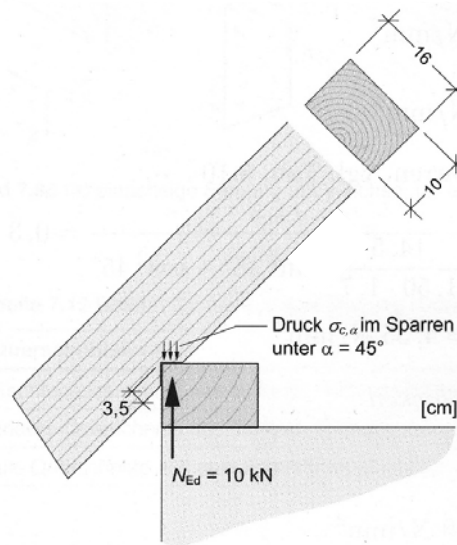
Evrokod 5 – MSN – Dimensioniranje – Kontaktne napetosti

Les je **izrazito anizotropen material** – to je potrebno upoštevati pri projektiranju:

Tlak pod poljubnim kotom α na smer vlaken



$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$



$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{kont}}$$

$$k_{c,90} \geq 1$$

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje – Upogibni moment

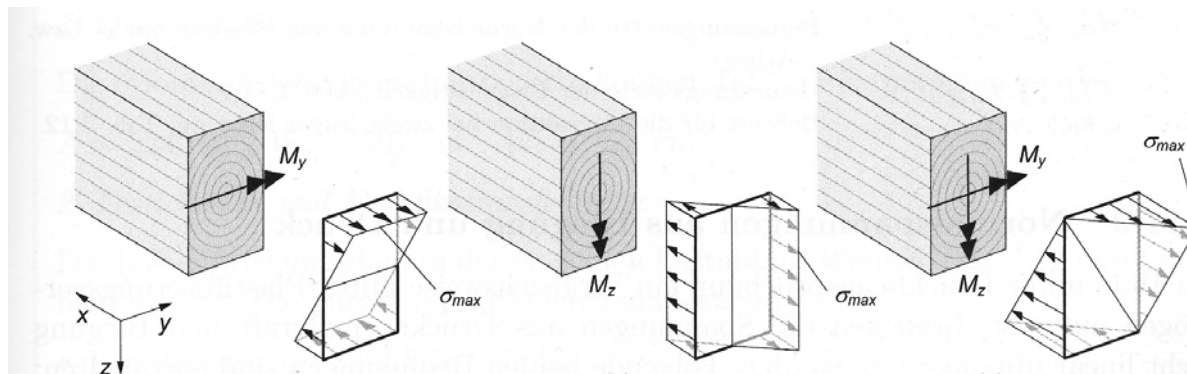
Dvoosni upogib-bočno podprti elementi:

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

in

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

- Projektne napetosti: $\sigma_{m,y,d}(z) = \frac{M_{y,d}}{I_y} z$ $\sigma_{m,z,d}(y) = -\frac{M_{z,d}}{I_y} y$
- Projektna up. trdnost: $f_{m,y,d} = f_{m,z,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M}$
- $k_m = 0,7$ za pravokotne prereze, sicer 1,0



Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje – Upogibni moment

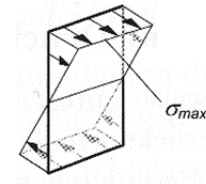
Enoosni upogib:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

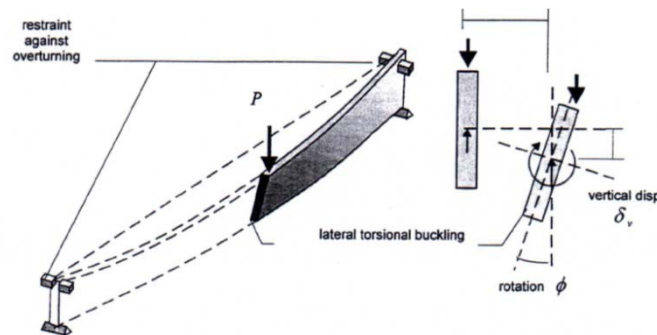
• Projektne napetosti:

$$\sigma_{m,d}(z) = \frac{M_{y,d}}{I_y} z \quad \text{ali} \quad \sigma_{m,d}(y) = -\frac{M_{z,d}}{I_y} y$$

• Projektna up. trdnost: $f_{m,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M}$

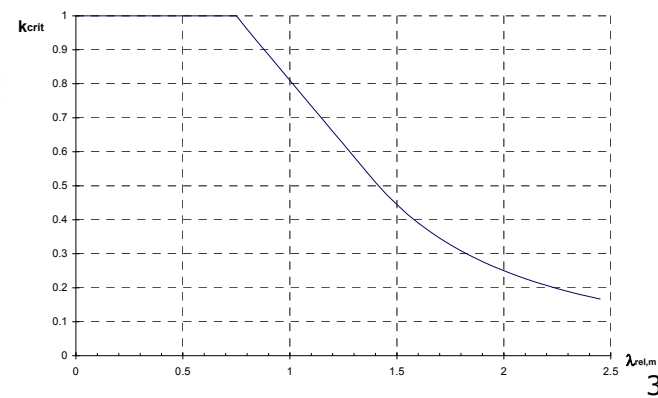


Problem stabilnosti - bočna zvrnitev (uklon izven ravnine obremenjevanja):



$$\sigma_{m,d} \leq k_{\text{crit}} \cdot f_{m,d}$$

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,\text{crit}}}} \rightarrow k_{\text{crit}}$$



JL, OLJK 2016/17

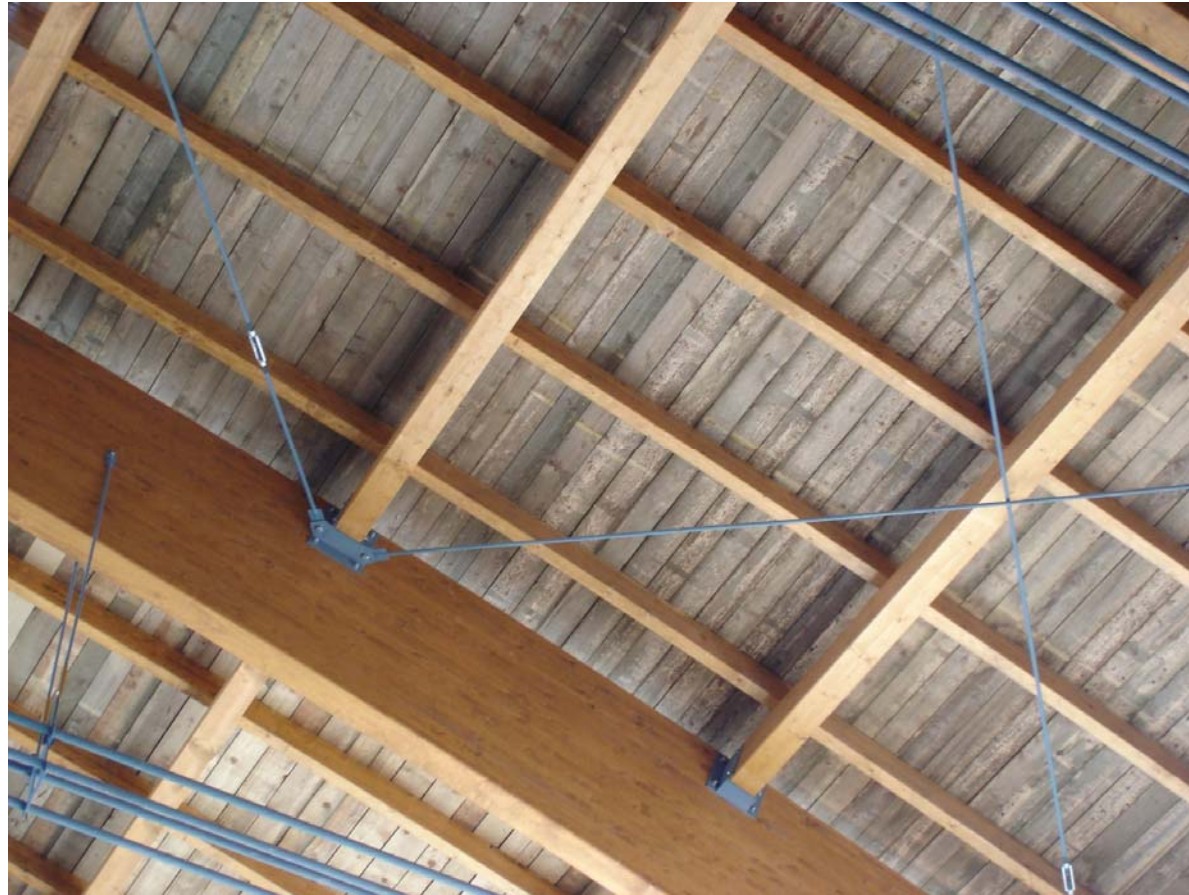
ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

37

ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

38

ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

39

ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

40

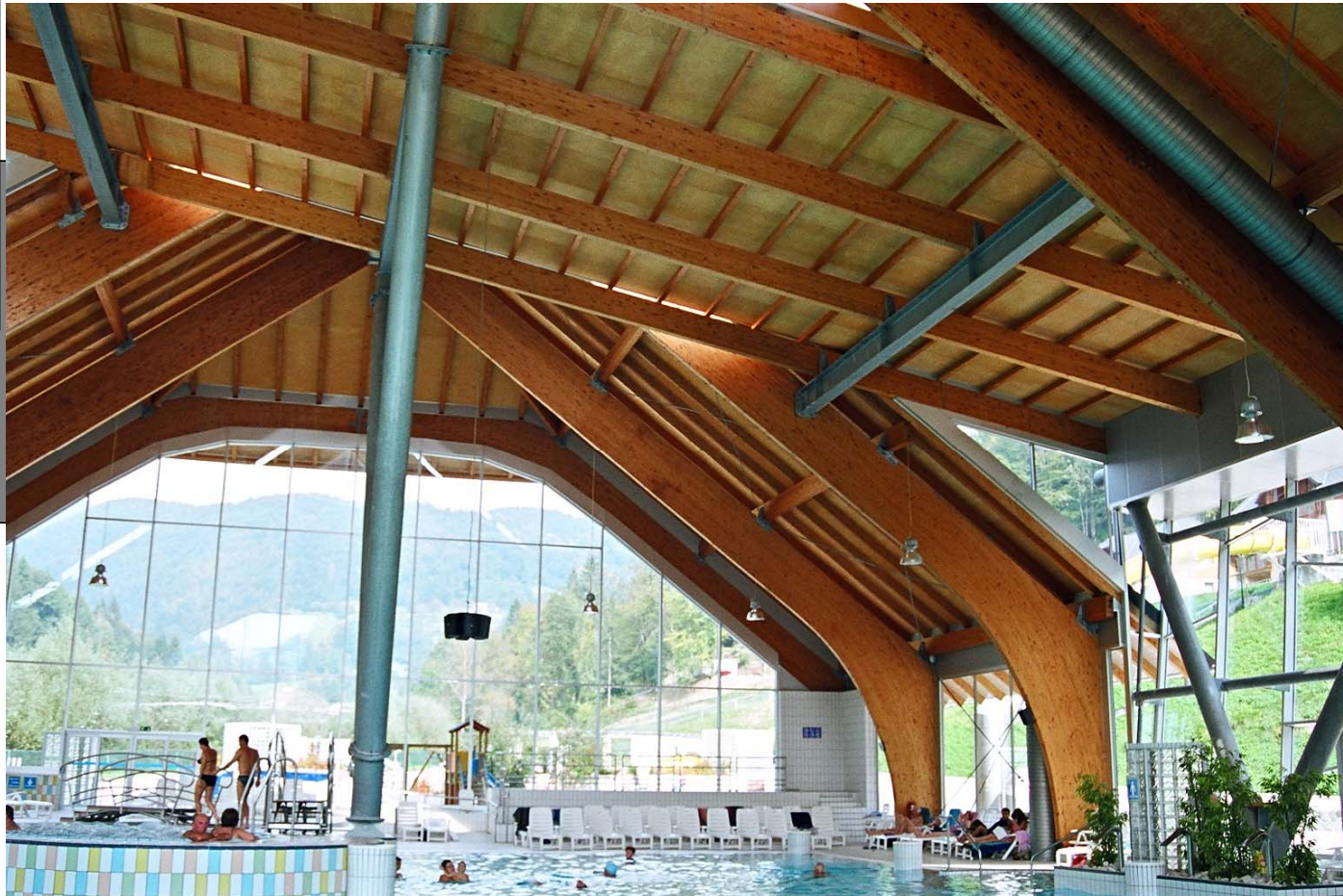
ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

41

ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

42

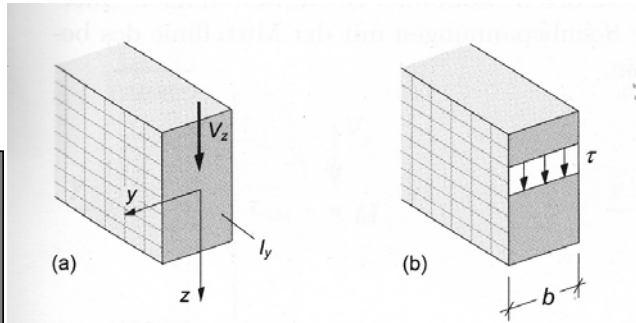
ZAGOTAVLJANJE STABILNOSTI- Zavarovalne konstrukcije



JL, OLJK 2016/17

43

Evrokod 5 – MSN – Dimenzioniranje – Prečna sila



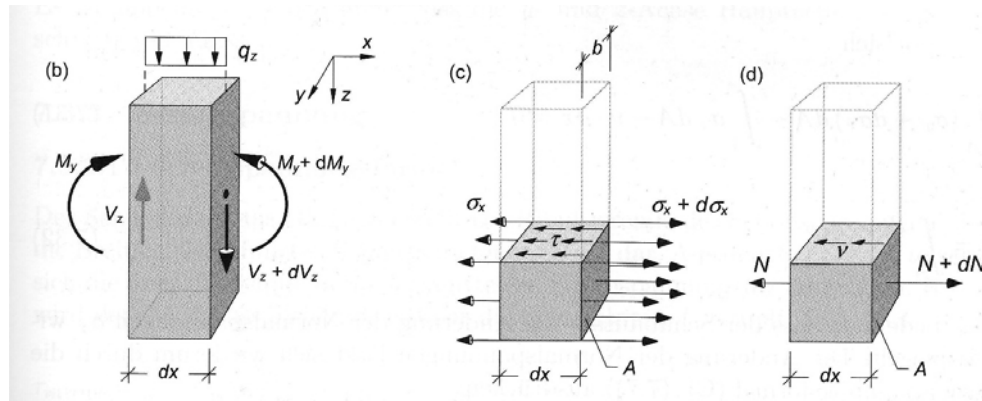
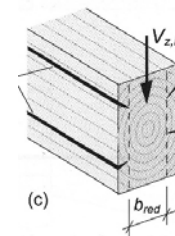
$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

• Splošno $\tau_d(z) = \frac{V_d \cdot S_y(z)}{I_y \cdot b(z) \cdot k_{cr}}$

• Pravokotni prerez: $\max \tau_d = \frac{V_d}{A^* \cdot k_{cr}}$

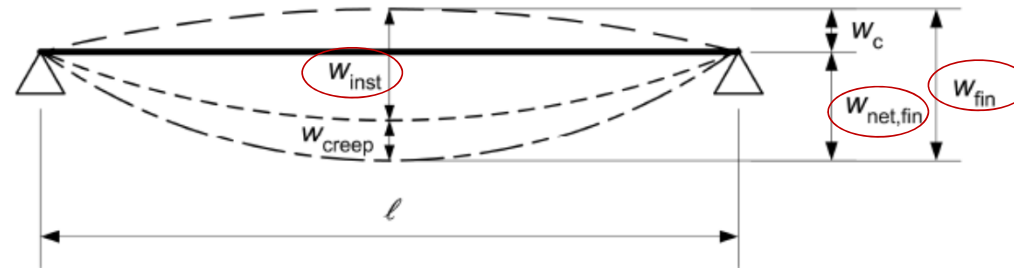
$$A^* = \frac{2}{3} A = \frac{2}{3} b \cdot h$$

$$k_{cr} = \frac{2}{3} \text{ vpliv razpok}$$



JL, OLJK 2016/17

Evrokod 5 – MSU – Kontrola povsesov



Začetni pomiki: $w_{inst} = \sum w_{inst}(G_{k,j}) + w_{inst}(Q_{k,1}) + \sum_{i>1} w_{inst}(\psi_{0,i} Q_{k,i}) \leq w_{inst,lim}$

Končni pomiki: $w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + \sum_{i>1} w_{fin,Q_i} \leq w_{fin,lim}$

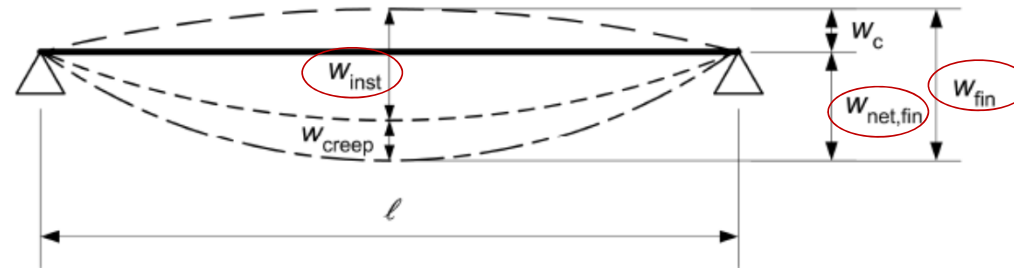
$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def})$ končni pomik zaradi stalnih vplivov G

$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} \cdot (1 + \psi_{2,1} k_{def})$ končni pomik zaradi prevladujočega spremenljivega vpliva Q_1

$w_{fin,Q_i} = w_{inst,Q_i} \cdot (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def})$ končni pomiki zaradi spremljajočih sprem. vplivov Q_i ($i > 1$)

$k_{def} = k_{def}(v)$ – koeficient lezenja

Evrokod 5 – MSU – Kontrola povsesov



	$w_{inst,lim}$	$w_{net,fin,lim}$	$w_{fin,lim}$
Nosilci na dveh podporah	$l/500$ do $l/300$	$l/350$ do $l/250$	$l/300$ do $l/150$
Konzolni nosilci	$l/250$ do $l/150$	$l/175$ do $l/125$	$l/150$ do $l/75$



Hvala za pozornost!