

# LAGANE KONSTRUKCIJE

Priručnik iz predmeta Lagane Konstrukcije

**Autori:**

**Dean Čizmar, dipl. inž. građ.**

**Prof. dr sc. Vlatka Rajčić, dipl. inž. građ.**

Zavod za konstrukcije,  
Građevinski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu

ISBN 978-953-6272-28-0



Zagreb, 2008.

## **PREDGOVOR**

U proteklih nekoliko desetljeća popularnost stakla u građevinarstvu konstantno raste. Nažalost, dok su norme za proračun konstrukcija od čelika, betona, drva i aluminija vrlo detaljno razrađene (konstrukcijski Eurokodovi), proračun staklenih elemenata je još u začetku. Ovaj priručnik sastavljen je kao nastavni materijal dostupan online studentima koji slušaju predmet „Lagane konstrukcije“ na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

# SADRŽAJ

PREDGOVOR .....	2
<b>1. PRORAČUN STAKLENIH PANELA PREMA EUROPSKIM NORMAMA .....</b>	<b>4</b>
1.1. Uvod.....	4
1.2. Popis relevantnih normi vezanih uz proračun staklenih panela .....	6
1.3. Definicije i osnovni zahtjevi .....	8
Osnovne definicije .....	8
Osnovni zahtjevi .....	9
1.4. Proračun staklenih panela .....	10
Mehaničke karakteristike stakla .....	10
Djelovanja na konstrukciju.....	10
Određivanje otpornosti staklenih elemenata .....	12
Dokaz nosivosti .....	14
Dokaz nosivosti prema europskoj prednormi.....	15
Proračun laminiranog i laminiranog sigurnosnog stakla .....	18
1.5. Primjer proračuna staklenog panela .....	20
Proračun prema graničnim stanjima .....	20
Proračun pomoću računala .....	23
<b>2. PRORAČUN ALUMINIJSKIH ELEMENATA IZLOŽENIH DJELOVANJU TLAČNE SILE.....</b>	<b>25</b>
2.1. Uvod.....	25
2.2. Popis relevantnih normi vezanih uz proračun aluminijskih konstrukcija.....	26
2.3. Svojstva aluminija .....	31
2.4. Proračun aluminijskih elemenata opterećenih na tlak .....	34
Djelovanja na konstrukciju.....	34
Određivanje otpornosti .....	35
Lokalna otpornost na izvijanje.....	36
Tlačna otpornost elementa (bez dokaza izvijanja).....	37
Tlačna otpornost elementa (s dokazom izvijanja).....	37
2.5. Primjer proračuna tlačno opterećenog elementa.....	39
<b>3. PRORAČUN STAKLENIH ELEMENATA IZLOŽENIH DJELOVANJU TLAČNE SILE.....</b>	<b>41</b>
3.1. Jednoslojni stakleni element .....	41
Općenito .....	41
3.2. Djelovanja .....	42
3.3. Dokaz nosivosti na tlak .....	43
Djelovanje tlaka bez dokaza stabilnosti .....	43
Djelovanje tlaka s dokazom stabilnosti .....	43
3.4. Višeslojni stakleni element (laminirano staklo).....	47
3.5. Primjer proračuna tlačno opterećenog staklenog elementa .....	49

# 1. PRORAČUN STAKLENIH PANELA PREMA EUROPSKIM NORMAMA

## 1.1. Uvod

U okviru staklenih konstrukcija moramo razlikovati sekundarno staklenu konstrukciju (fasadni paneli, pregradni elementi, stakleni pokrov, staklene ograde itd.) i glavnu nosivu konstrukciju (staklene grede, stupovi, zidovi itd.).



Staklena fasade (Europski parlament, zgrada D3, Brisel)



Staklene grede i stupovi Broadfield Glass Museum, Engleska

Proračun sekundarnih elemenata od stakla definiran je nizom prednormi, ponajprije prednormom prEN 13474-3: Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing.

Proračun elemenata od stakla kao dio glavne nosive konstrukcije (grede, stupovi, tlačni i vlačni elementi itd) još uvijek je tema laboratorijskih i teoretskih analiza. Norme za ove elemente su trenutačno u fazi izrade.

## **1.2. Popis relevantnih normi vezanih uz proračun staklenih panela**

EN 572 Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products

EN 572-1 Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties EN 1036 Glass in building - Mirrors from silver coated float glass for internal use

EN 1096 Glass in building - Coated glass

EN 1296 Glass in building - Insulating glass units

EN 1748-1 Glass in Building - Basic borosilicate glass products

EN 1748-1-1 Glass in Building - Basic borosilicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties

EN 1748-2 Glass in Building - Basic glass ceramics products

EN 1748-2-1 Glass in Building - Basic glass ceramics products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties

EN 1863 Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass

EN 1863-1 Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description

EN 1990 Eurocode – Basis of structural design

EN 1991 Actions on structures

EN 1991-1-4 Wind actions

EN 1997 Geotechnical design

EN 1998 Design of structures for earthquake

EN 12150 Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass

EN 12150-1 Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description

EN 12337 Glass in building - Chemically strengthened soda lime silicate glass

EN 12337-1 Glass in building - Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description

EN ISO 12543 Glass in building - Laminated and laminated safety glass

EN ISO 12543-1 Glass in building - Laminated and laminated safety glass - Part 1: Definitions and description of component parts

EN 13024 Glass in building - Thermally toughened borosilicate safety glass

EN 13024-1 Glass in building - Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 1: Definition and description

prEN 13474-1 Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 1: Glass and glass products for fenestration

prEN 13474-2 Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 2: Common glass applications other than fenestration

prEN 13474-3: Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing.

EN 14178 Glass in Building - Basic alkaline earth silicate glass products

EN 14178-1 Glass in Building - Basic alkaline earth silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties

EN 14179 Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass

EN 14179-1 Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description  
EN 14321-1 Glass in building - Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass

EN 14321-1 Glass in building - Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 1: Definition and description

EN 14449 Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Evaluation of conformity/Product Standard

### 1.3. Definicije i osnovni zahtjevi

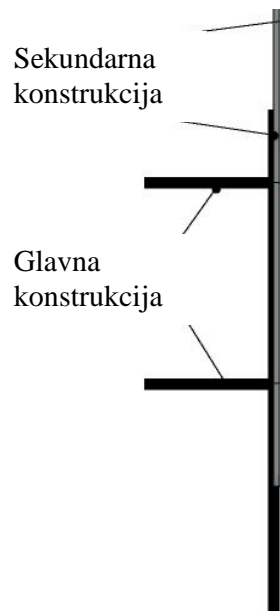
#### Osnovne definicije

Annealed glass (AN) – staklo u kojem su nizom procesa uklonjeni rezidualni naponi

Efektivna debljina – debljina koja se računa prema izrazima danim u normama. Uzima u obzir popustljivost i krutost PBV spoja između dva stakla

Glavna konstrukcija – grede, stupovi, podovi (pogledati sliku). Ukoliko dođe do otkazivanja ovih elemenata, konstrukcija dolazi u krajnje granično stanje. Ovi elementi moraju imati pouzdanost koja je propisana za nosive elemente.

Sekundarna konstrukcija – stakleni paneli. Otkazivanje panela dovodi do lokalnog otkazivanja elemenata (okvira). U ovom slučaju nema i ne smije biti utjecaja na glavnu konstrukciju. Elementi se mogu zamijeniti neovisno o glavnoj konstrukciji.



Sekundarna i glavna konstrukcija



## Osnovni zahtjevi

Definirani su kao prema EN 1990: Eurocode – Basis of structural design. Proračun se temelji na filozofiji graničnih stanja. Kada je dosegnuto granično stanje nosivosti dolazi do otkazivanja konstrukcije ili gubitka stabilnosti. Granično stanje uporabivosti je stanje nedopustivih deformacija ili progiba odnosno prekoračenje unaprijed definiranih kriterija. Tablica 1 definira krajnje granično stanje i granično stanja uporabivosti:

Tablica 1.

	Ultimate limit state	Serviceability limit state
<b>Requirement</b>	$E_{ULS;d} \leq R_d$ (1.a)	$E_{SLS;d} \leq C_d$ (1.b)
where the effect of the actions is:	$E_{ULS;d} = E\{F_{ULS;d}\}$ (2.a)	$E_{SLS;d} = E\{F_{SLS;d}\}$ (2.b)
in which:	$F_{ULS;d}$ is the Ultimate Limit State design value of a single action or of a combination of actions.	$F_{SLS;d}$ is the Serviceability Limit State design value of a single action or of a combination of actions.
and where:	$E_{ULS;d}$	is the design value of the effect of the action(s), expressed as calculated stress, caused by the action(s).
	$R_d$	is the design value of the corresponding resistance, expressed as maximum ultimate limit state allowable stress $f_{g;d}$ , taking into account the material partial factor for the ultimate limit state $\gamma_M$ (see 5.3).
	$E_{SLS;d}$	is the design value of the effect of the action(s), expressed as calculated stress or deflection, caused by the action(s).
	$C_d$	is the limiting design value of the relevant serviceability criterion, expressed as maximum serviceability limit state allowable stress $f_{g;d}$ , or limit on deflection, $w_d$ , taking into account the material partial factor for the serviceability limit state $\gamma_M$ (see 5.3).

U tablici 2 prikazane su predložene vrijednosti za parcijalne faktore na strani materijala ovisno o jednadžbi stanja:

Tablica 2.

	Ultimate limit state	Serviceability limit state
Annealed glass <sup>(1)</sup>	$\gamma_{M:A} = 1,8$	$\gamma_{M:A} = 1,5$
Surface prestress	$\gamma_{M:v} = 1,2$	$\gamma_{M:v} = 1,0$
Note (1). The material partial factor for annealed glass is also applied to a component of the strength of prestressed glass - see equation (7).		

## 1.4. Proračun staklenih panela

### Mehaničke karakteristike stakla

Staklo je homogen izotropan materijal s gotovo idealno plastičnim ponašanjem u cijelom vlačnom području. Staklo ima izrazito visoku tlačnu čvrstoću i teoretski vrlo veliku vlačnu čvrstoću, no površina stakla ima imperfekcije koje djeluju kao oslabljenja kada je staklo izloženo vlačnom naprezanju.

Teoretska razmatranja predviđaju vlačnu čvrstoću reda veličine do 10000 Mpa, no laboratorijska reda veličine 100 Mpa. Postojanje imperfekcija i djelovanje vanjskih čimbenika (pretežno vlage) izrazito smanjuju vlačnu čvrstoću.

Zbog vrlo velike tlačne otpornosti, staklu uvijek otkazuje uslijed vlačnih naprezanja. U konstrukcijama je staklo rijetko opterećeno na vlak, te je zbog toga obično mjerodavna čvrstoća na savijanje.

Glavni čimbenici koji utječu na otpornost staklenog elementa su:

- 1) trajanje opterećenja
- 2) površina presjeka naprezana na vlak
- 3) stanje površine stakla
- 4) temperatura (ponajprije kod laminiranog stakla spojenog s PVB međuslojem)

Mehaničke karakteristike je najbolje usvojiti od proizvođača (prema njegovom atestu ili ispitivanjima), s time da su ovom normom određene vrijednosti s kojima se može računati:

gustoća	$\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$ ;
modul elastičnosti	$E = 70\,000 \text{ MPa}$ ;
Poisson koeficijent	$\mu = 0,22$ ;

Ove vrijednosti se mogu koristiti za stakla s vrijednostima između:

gustoća	$\rho = 2250 - 2750 \text{ kg/m}^3$ ;
modul elastičnosti	$E = 63000 - 77000 \text{ MPa}$ ;
Poisson koeficijent	$\mu = 0,20 - 0,25$

### Djelovanja na konstrukciju

Sva djelovanja se određuju prema EN 1990 i EN 1991.

Projektirana (proračunska ili „design value“) vrijednost akcija se određuje za:

1. Krajnje granično stanje kao:

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

## 2. Granično stanje uporabivosti:

$$F_d = G + \psi_1 Q_{k,1} + \sum_i \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

gdje je

$F_d$	projektirana vrijednost djelovanja
$G$	stalna djelovanja
$Q_{k,1}$	karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja
$\gamma_i$	parcijalni faktori za djelovanja
$\psi_i$	faktori kombinacija

Detaljnije vrijednosti za parcijalne faktore dane su u tablici 3. Vidljiva je razlika ovisno o namjeni staklenog elementa (glavna ili sekundarna konstrukcija)

Tablica 3. Vrijednosti parcijalnih faktora za djelovanja

Type of element to be calculated	$\gamma_Q$	$\gamma_G^{(3)}$	
		favourable	unfavourable
Main structure <sup>(1)</sup>	see Eurocodes	see Eurocodes	see Eurocodes
Secondary structure <sup>(1)</sup>	1,3	1,0	1,20
Infill panel <sup>(2)</sup>	1,1	1,0	1,0
Notes.			
(1) Structural construction covered by Eurocodes			
(2) Non structural element not covered by Eurocodes			
(3) The lower value is used when the permanent action has a favourable effect in combination with other actions. The higher value is used when the permanent action is considered acting alone or has a unfavourable effect in combination with other loads.			

Tablica 4. Vrijednosti faktora kombinacije

		Main structure <sup>(1)</sup>	Secondary structure <sup>(1)</sup>	Infill panel <sup>(2)</sup>
Wind	$\psi_0$	see Eurocodes	0,6	0,6
	$\psi_1$	see Eurocodes	0,9	0,8
	$\psi_2$	see Eurocodes	0,2	0,2
Snow	$\psi_0$	see Eurocodes	0,6	0,6
	$\psi_1$	see Eurocodes	1,0	1,0
	$\psi_2$	see Eurocodes	0,2	0,2
Other	$\psi_0$	See Eurocodes or national annexes		
	$\psi_1$			
	$\psi_2$			
Notes.				
(1) Structural construction covered by Eurocodes				
(2) Non structural element not covered by Eurocodes				

## Određivanje otpornosti staklenih elemenata

Proračunska naprezanja na savijanje definiraju se kao (vrijedi za *annealed glass*):

$$f_{g;d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot k_{sp} \cdot f_{g;k}}{\gamma_{M,A}}$$

gdje su:

- $f_{g,k}$  karakteristična otpornost na savijanje (45 MPa)  
 $\gamma_{M,A}$  parcijalni faktor za staklo (tablica 2).  
 $k_{sp}$  faktor utjecaja površine  
 $k_{\text{mod}}$  faktor trajanja opterećenja

Faktor utjecaja površine je dan u tablici 5.

Tablica 5. Faktor utjecaja površine

Glass material (whichever glass composition)	Factor for the glass surface profile $k_{sp}$
Float glass	1,0
Drawn sheet glass	1,0
Enamelled float or drawn sheet glass <sup>(1)</sup>	(1,0)
Patterned glass	0,75
Enamelled patterned glass <sup>(1)</sup>	(0,75)
Polished wired glass	0,75
Patterned wired glass	0,6
Note 1. These glass types are not generally available as annealed glass, but the values of $k_{sp}$ are also required in the formulae for prestressed glass (see 8.2).	

Faktor trajanja opterećenja definiran je kao:

$$k_{\text{mod}} = 0,663t^{-\frac{1}{16}}$$

gdje je:

t trajanje opterećenja u satima.

Maksimalno vrijednost faktora trajanja opterećenja iznosi 1 a minimalna 0.25. U tablici 6 prikazane su vrijednosti faktora ovisno o tipu opterećenja.

Tablica 6. Faktor trajanja opterećenja

Action	Load duration	$k_{\text{mod}}$
personnel loads	5 seconds	1,00
wind	10 minutes (accumulated over 50 years)	0,74
snow	6 weeks	0,43
self weight	50 years	0,29
daily temperature variation 11 hours extreme peak duration	11 hours	0,57
yearly temperature variation 6 month extreme mean value duration	6 months	0,39
barometric pressure variation	4 days	0,50

Ukoliko se računa s toplinski (Heat strengthened, fully tempered) ili kemijski (chemically strengthened) ojačanim staklom mora se koristiti slijedeći izraz:

$$f_{g;d} = \frac{k_{\text{mod}} k_{sp} f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v (f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}}$$

gdje je

$\gamma_{M;v}$  parcijalni faktor za površinsko prenaprezanje  
 $f_{b;k}$  karakteristična otpornost na savijanje ojačanog stakla  
 $k_v$  faktor ojačanja  
 ostale varijable su ranije definirane.

U tablici 7 su prikazane karakteristične otpornost na savijanje ojačanog stakla ovisno o proizvodnom procesu i načinu ojačavanja.

Tablica 7.

Glass material per product (whichever composition)	Values for characteristic bending strength $f_{b,k}$ for prestressed glass processed from:		
	thermally toughened safety glass, and heat soaked thermally toughened safety glass	heat strengthened glass	chemically strengthened glass
float glass or drawn sheet glass	120 N/mm <sup>2</sup>	70 N/mm <sup>2</sup>	150 N/mm <sup>2</sup>
patterned glass	90 N/mm <sup>2</sup>	55 N/mm <sup>2</sup>	150 N/mm <sup>2</sup>
enamelled float or drawn sheet glass	75 N/mm <sup>2</sup>	45 N/mm <sup>2</sup>	
enamelled patterned glass	75 N/mm <sup>2</sup>	45 N/mm <sup>2</sup>	

Tablica 8 prikazuje faktor ojačanja ( $k_v$ ) u ovisnosti o proizvodnom procesu.

Tablica 8.

Manufacturing process	Strengthening factor, $k_v$
Horizontal toughening (or other process without the use of tongs or other devices to hold the glass)	1,0
Vertical toughening (or other process using tongs or other devices to hold the glass)	0,6

## Dokaz nosivosti

Proračun se mora provesti s obzirom na krajnje granično stanje i granično stanje uporabivosti.

Kod proračuna prema graničnom stanju nosivosti mora biti dokazano da je maksimalno naprezanje (projektirana vrijednost djelovanja) manje od dopuštenog naprezanje (projektirane vrijednosti otpornosti).

Proračunom prema graničnom stanju uporabivosti potrebno je dokazati da su računski progibi manji od unaprijed definiranih.

U pravilu, oba dokaza nosivosti mogu se provesti koristeći linearnu teoriju, uzimajući u obzir rubne uvjete i geometriju ploče. Ovaj dokaz je moguć koristeći gotove izraze iz literature ili modeliranjem konstrukcije metodom konačnih elemenata.

Dokaz prema graničnom stanju nosivosti:

$$\sigma_{\max} \leq f_{g;d}$$

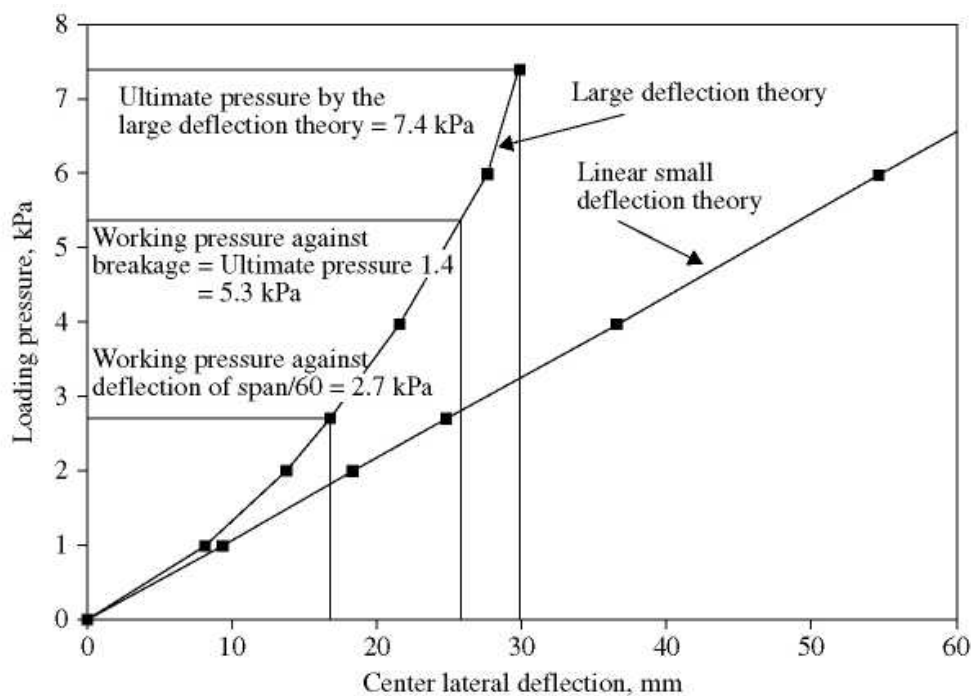
Dokaz prema graničnom stanju uporabivosti:

$$w_{\max} \leq w_d$$

Prema normama maksimalni dopušteni progib iznosi  $w_d=l/150$  gdje je  $l$  manja dimenzija panela. Ovaj zahtjev je vrlo strog i u praksi mjerodavan. Mnogi projektanti smatraju da ovakav strogi zahtjev nije racionalan iz razloga što je glavni uzrok progiba panela opterećenje vjetrom koje je prema normama dato za povratni period od 50 godina. Zbog ovih razloga mnogi projektanti uzimaju manje vrijednosti od ovih definiranih normama ( $l/100$ ).

## Dokaz nosivosti prema europskoj prednormi

Osim proračuna prema linearnoj teoriji, prednorma prEN 13474-1 nudi mogućnost proračuna prema nelinearnoj teoriji ploča (za jednostavno oslonjene panele sa sve četiri strane), odnosno prema teoriji velikih pomaka. Ove formule u pravilu omogućavaju bolje iskorištenje staklenih elemenata. Na slici su prikazane razlike između linearne i nelinearne teorije.



Usporedba teorije velikih i malih pomaka

Dimenzije  $a$  i  $b$  su stranice panela ( $a$  mora biti manja dimenzija). Površina panela  $A=a \cdot b$ . Debljina panela označava se s  $h$ .

Odnos stranica se definira kao:

$$\lambda = \frac{a}{b}$$

Maksimalno vlačno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{\max} = k_1 \cdot \frac{A}{h^2} \cdot F_d$$

Maksimalni progib iznosi:

$$w_{\max} = k_4 \cdot \frac{A^2}{h^3} \cdot \frac{F_d}{E}$$

Vrijednosti koeficijenata  $k_i$  se određuju prema tablicama, a ostale oznake su definirane prije.

Bezdimenzionalni koeficijent opterećenja se određuje prema:

$$p^* = \left( \frac{A}{4 \cdot h^2} \right)^2 \cdot \frac{F_d}{E}$$

U tablici 9 dane su vrijednosti bezdimenzionalnog koeficijenta  $k_1$

Tablica 9. Koeficijent  $k_1$  za proračun maksimalnog naprezanja

$\lambda=a/b$	$p^*$										
	0	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0.268	0.261	0.244	0.223	0.190	0.152	0.135	0.130	0.129	0.128	0.128
0,9	0.287	0.278	0.258	0.234	0.197	0.155	0.137	0.131	0.130	0.129	0.129
0,8	0.304	0.295	0.273	0.247	0.205	0.159	0.138	0.131	0.130	0.130	0.130
0,7	0.314	0.306	0.285	0.261	0.218	0.165	0.140	0.130	0.129	0.129	0.129
0,6	0.314	0.309	0.294	0.274	0.235	0.176	0.143	0.129	0.127	0.126	0.126
0,5	0.300	0.298	0.290	0.279	0.253	0.197	0.151	0.128	0.124	0.123	0.122
0,4	0.268	0.268	0.266	0.262	0.252	0.221	0.171	0.129	0.119	0.116	0.116
0,3	0.217	0.217	0.217	0.216	0.215	0.208	0.189	0.141	0.116	0.107	0.105
0,2	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.148	0.140	0.123	0.100	0.091
0,1	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.074	0.073

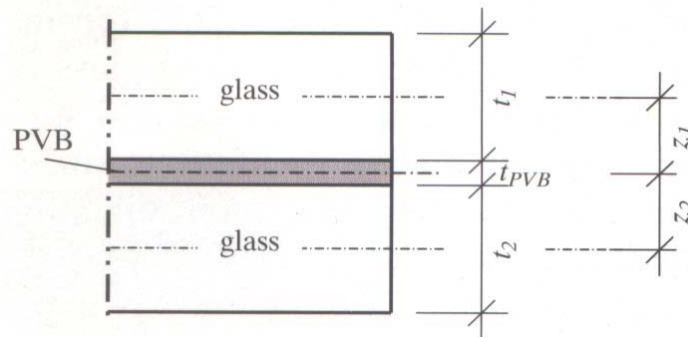
U tablici 10 dane su vrijednosti bezdimenzionalnog koeficijenta  $k_4$ .





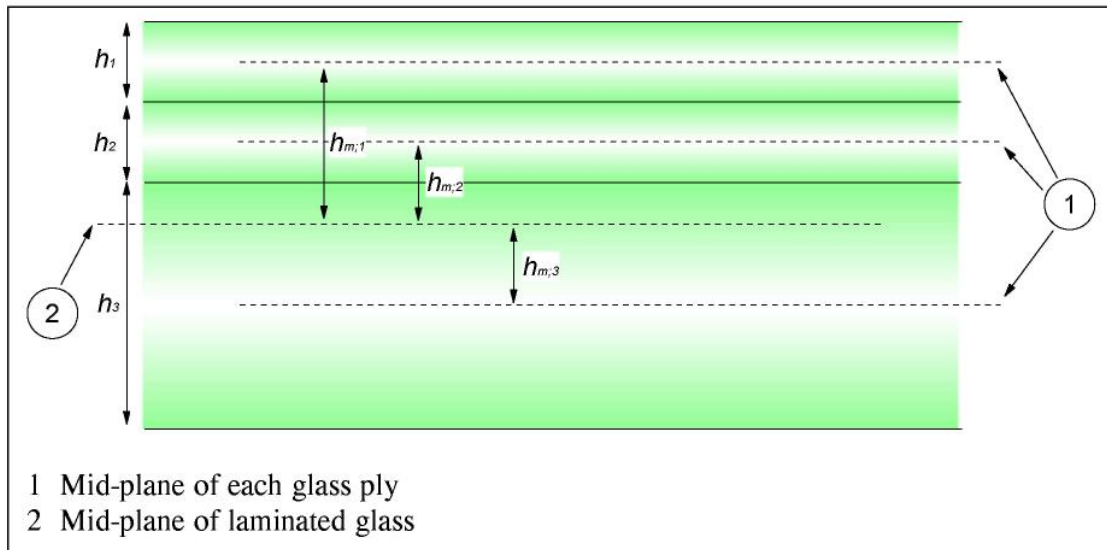
## Proračun laminiranog i laminiranog sigurnosnog stakla

Na slijedećoj slici prikazan je višeslojni (laminirani) stakleni element:



Laminirani element

U slučaju laminiranih elementa mora se uzeti u obzir PVB sloj čija je posmična čvrstoća bitno manja od čvrstoće stakla. U ovom slučaju govorimo o popustljivosti međusloja. Na slijedećoj slici prikazane su oznake debljine elemenata  $h_i$  za proračun prema europskim normama prema konceptu efektivne debljine.



- 1 Mid-plane of each glass ply
- 2 Mid-plane of laminated glass

Geometrijske oznake laminiranog elementa

Efektivna debljina za proračun progiba ( $h_{ef,w}$ ) se određuje prema:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{(1-\varpi)\sum_i h_i^3 + \varpi\left(\sum_i h_i\right)^3}$$

Efektivna debljina za proračun naprezanja u staklu  $j$  ( $h_{ef,\sigma,j}$ ) se određuje prema:

$$h_{ef,\sigma,j} = \sqrt{\frac{(h_{ef,w})^3}{(h_j + 2\varpi h_{m,j})}}$$

gdje je:

$\omega$  koeficijent koji se kreće u vrijednosti od 0 do 1. 0 znači da nema prijenosa posmičnih naprezanja (nema veze između dva panela), dok 1 označava potpuni prijenos posmičnih naprezanja (nema pomaka među panelima, kruti spoj). Za PVB se može usvojiti vrijednost  $\omega=0.2$ .

$h_i, h_j$  debljine staklenih elemenata (vidjeti prethodnu sliku)

$h_{m,j}$  udaljenost od srednjeg panela do središta cjelokupnog laminiranog elementa (pritom se ne uzima u obzir debljina međuslojeva)

Kao što je već ranije rečeno, s obzirom na većinu PVB spojeva i njihov sastav, ukoliko se radi o opterećenjima kraćeg trajanja (vjetar) može se usvojiti vrijednost od  $\omega=0.2$ . Ukoliko se radi o stalnom djelovanju uzima se vrijednost  $\omega=0$ .

U slijedećoj tablici prikazane su proračunate efektivne debljine laminiranog stakla sastavljenog od dva elementa iste debljine.

Tablica 11. Efektivne debljine laminiranog stakla

Glass thickness mm	Short duration loads ( $\varpi = 0.2$ )		Long duration loads ( $\varpi = 0.0$ )	
	$h_{ef,w}$ mm	$h_{ef,\sigma,j}$ mm	$h_{ef,w}$ mm	$h_{ef,\sigma,j}$ mm
3 + 3	4.42	4.90	3.78	4.24
4 + 4	5.89	6.53	5.04	5.66
5 + 5	7.34	8.17	6.30	7.07
6 + 6	8.84	9.80	7.56	8.49
8 + 8	11.79	13.06	10.08	11.31
10 + 10	14.74	16.33	12.60	14.14

## 1.5. Primjer proračuna staklenog panela

Zadatak je dimenzionirati vertikalni panel koji je dio staklene fasade (sekundarne konstrukcije). Visina panela je 3 metra a širina 4 metra. Staklo je Annealed (AN). Karakteristična vrijednost opterećenja vjetrom iznosi  $1.5 \text{ kN/m}^2$

### a) Proračun prema europskim prednormama

Prvi korak je odabir debljine stakla. Annealed staklo se proizvodi u debljinama od 10, 12, 15, 19 i iznimno 24 mm.

Za početnu provjeru, odabrana je debljina  $h=12 \text{ mm}$ .

Računska otpornost panela (vidjeti poglavlje 3 priručnika)

$$f_{g;d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot k_{sp} \cdot f_{g;k}}{\gamma_{M,A}} = \frac{0.74 \cdot 1 \cdot 45}{1.8} = 18.5 \text{ N/mm}^2 = 18.5 \text{ Mpa}$$

### Proračun prema graničnim stanjima

#### Granično stanje nosivosti:

Računsko opterećenje:

$$F_d = \gamma_q \cdot Q_k = 1.95 \text{ kN/m}^2$$

Uvjet nosivosti:

$$\sigma_{\text{max}} \leq f_{g;d}$$

Maksimalno vlačno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{\text{max}} = k_1 \cdot \frac{A}{h^2} \cdot F_d$$

Bezdimenzionalni koeficijent opterećenja se određuje prema:

$$p^* = \left( \frac{A}{4 \cdot h^2} \right)^2 \cdot \frac{F_d}{E} = \left( \frac{3000 \cdot 4000}{4 \cdot 12^2} \right)^2 \cdot \frac{1.95 \cdot 10^{-3}}{70000} = 12.09 = 12.1$$

Iz tablice 9 treba se očitati vrijednost koeficijenta  $k_1$

$$\lambda = \frac{3}{4} = 0.75$$

U pravilu vrijednosti koeficijenta  $\lambda$  se trebaju linearno interpolirati. Ovdje su očitane vrijednosti za  $\lambda=0.7$ , što je u svakom slučaju veća vrijednost pa smo time na strani sigurnosti (pogledati tablicu 9). Vrijednosti za  $p^*$  su linearno interpolirane.

$p^*=0.160$  (interpolirano iz tablice 9).

$$\sigma_{\max} = k_1 \cdot \frac{A}{h^2} \cdot F_d = 0.16 \cdot \frac{3000 \cdot 4000}{12^2} \cdot 1.95 \cdot 10^{-3} = 26 \text{ N/mm}^2 = 26 \text{ Mpa}$$

Iz priloženog je vidljivo da staklo odabrane debljine ne zadovoljava granično stanje nosivosti:

$$\sigma_{\max} \leq f_{g;d}$$

Na raspolaganju je mogućnost povećanja debljine stakla ili odabrati neki drugi tip stakla. U slijedećem koraku ćemo uzeti staklo debljine  $h=19$  mm.

Bezdimenzionalni koeficijent:

$$p^* = \left( \frac{A}{4 \cdot h^2} \right)^2 \cdot \frac{F_d}{E} = \left( \frac{3000 \cdot 4000}{4 \cdot 19^2} \right)^2 \cdot \frac{1.95 \cdot 10^{-3}}{70000} = 1.92$$

Kao što je već rečeno vrijednosti  $\lambda$  i  $p^*$  je potrebno linearno interpolirati, no ovdje će biti određena vrijednost koeficijenta  $k_1$  za  $\lambda=0.7$  i  $p^*=2$  koja iznosi  $k_1=0.285$ .

Izraz za maksimalno naprezanje:

$$\sigma_{\max} = k_1 \cdot \frac{A}{h^2} \cdot F_d = 0.285 \cdot \frac{3000 \cdot 4000}{19^2} \cdot 1.95 \cdot 10^{-3} = 18.47 \text{ N/mm}^2 = 18.47 \text{ Mpa}$$

Uvjet graničnog stanja nosivosti:

$$\sigma_{\max} = 18.47 \text{ Mpa} \leq f_{g;d} = 18.5 \text{ Mpa}$$

Vidimo da je na savijanje nosivost stakla u potpunosti iskorištena. U praksi je potrebno težiti tome da (u slučaju mjerodavnog graničnog stanja) ostvarimo iskoristivost veću od 75%.

**Granično stanje uporabivosti:**

$$w_{\max} \leq w_d$$

Maksimalni progib određujemo prema:

$$w_{\max} = k_4 \cdot \frac{A^2}{h^3} \cdot \frac{F_d}{E}$$

Za određivanje računskog opterećenja moramo koristiti izraz za granično stanje uporabivosti:

$$F_d = G + \psi_1 Q_{k,1} + \sum_i \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

$$F_d = 0.9 \cdot 1.5 = 1.35 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Dopušteni progib ćemo odrediti iz uvjeta:

$$w_d = \frac{a(b)}{100} = 3 \text{ cm}$$

Bezdimenzionalni koeficijent:

$$p^* = \left( \frac{A}{4 \cdot h^2} \right)^2 \cdot \frac{F_d}{E} = \left( \frac{3000 \cdot 4000}{4 \cdot 19^2} \right)^2 \cdot \frac{1.35 \cdot 10^{-3}}{70000} = 1.33$$

Za određivanje koeficijenta  $k_4$  za proračun maksimalnog progiba vrijednosti  $\lambda$  i  $p^*$  je potrebno linearno interpolirati, no ovdje će biti određena vrijednost koeficijenta  $k_4$  za  $\lambda=0.8$  (veća vrijednost koeficijenta). Za  $p^*=1.33$  provedena je linearna interpolacija i vrijednost koeficijenta iznosi:  $k_4=0.03815$ .

Maksimalni progib:

$$w_{\max} = k_4 \cdot \frac{A^2}{h^3} \cdot \frac{F_d}{E} = 0.03815 \cdot \frac{(3000 \cdot 4000)^2}{19^3} \cdot \frac{1.35 \cdot 10^{-3}}{70000} = 15.47 \text{ mm}$$

$$15.47 \text{ mm} \leq 30 \text{ mm}$$

**Iz ovoga je vidljivo da staklo AN, h=19 mm zadovoljava nosivost i uporabivost.**

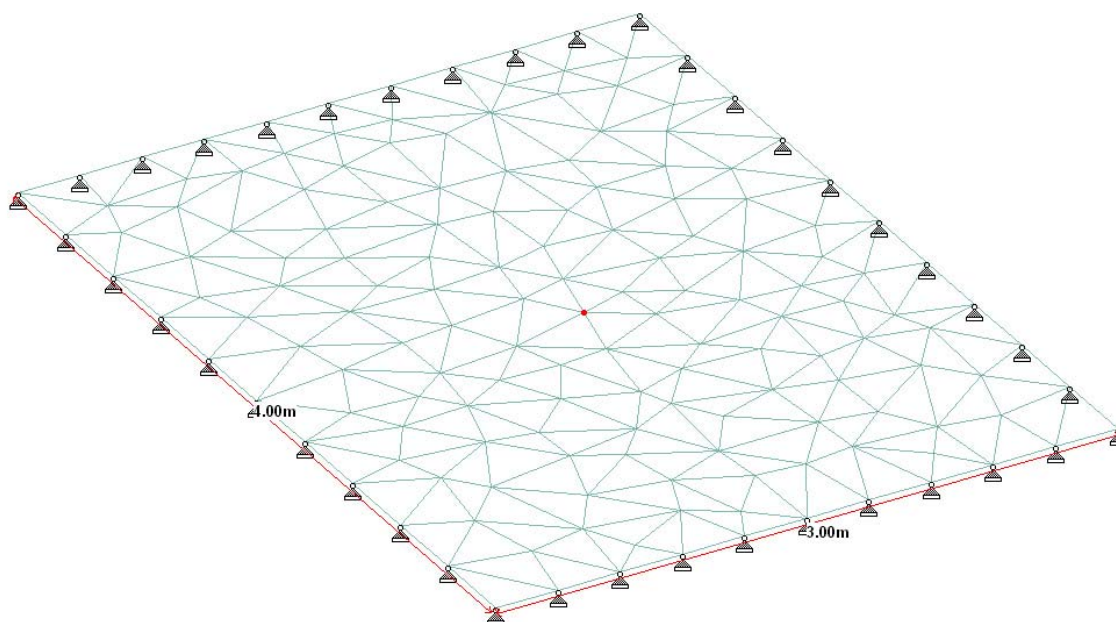
## Proračun pomoću računala

Osim ovih pojednostavljenih izraza za maksimalno naprezanje te progib moguće je oba dokaza nosivosti provesti koristeći linearnu teoriju te uzimajući u obzir rubne uvjete i geometriju ploče. Potrebno je napraviti numerički model panela te dobivene rezultate (maksimalno naprezanje i progib) uvrstiti u pripadajuće dokaze (granično stanje nosivosti te uporabivosti) te ih usporediti s računskim otpornostima odnosno dopuštenim progibom.

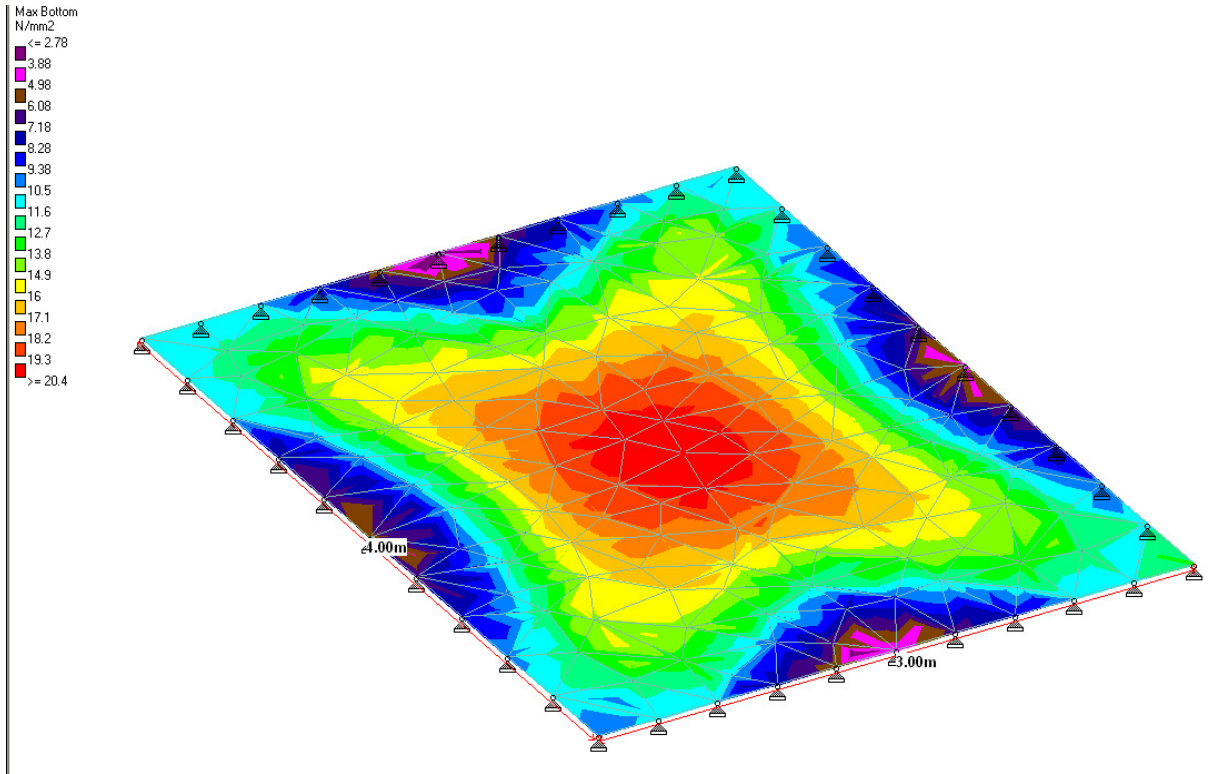
Ovaj primjer je modeliran u softveru prema linearnoj teoriji ploča. Sve dimenzije panela su kao u prethodnom primjeru.

Na slijedećoj slici je prikazan model zadanog panela s konačnim elementima (FEM).

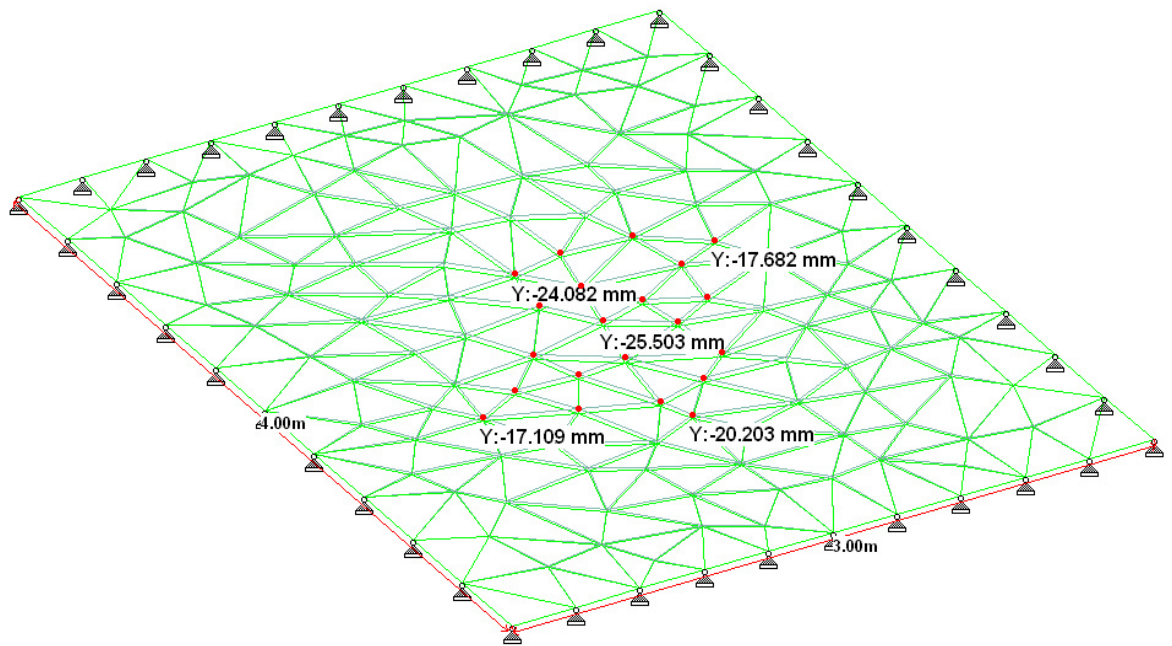
Iz slika je vidljivo da maksimalna vlačna naprezanja u panelu iznose oko 20.4 Mpa, dok je maksimalni progib 25.5 mm. Ove vrijednosti su u skladu s izračunatima prema normama.



Mreža konačnih elemenata (model panela)



Vlačna naprezanja (bottom stresses)



Progibi panela



## 2. PRORAČUN ALUMINIJSKIH ELEMENATA IZLOŽENIH DJELOVANJU TLAČNE SILE

### 2.1. Uvod

Aluminij je otkriven prije gotovo 200 godina. Srebrnaste je boje. Postoji u velikim količinama u različitim oksidnim i silikatnim mineralima ali glavna sirovina za proizvodnju aluminija je boksit. 90 % svjetskih rezervi boksita nalazi se u tropskom području. Razvoj industrije aluminija započinje tek početkom 20st. Velika cijena i prilično kompleksan proces proizvodnje uvjetuju spori razvoj industrije aluminija.

Prvu afirmaciju kao konstruktivni materijal aluminij doživljava u 2 Svjetskom ratu u izgradnji aviona. Danas se aluminij koristi kao prateći materijal, kao obloga te i kao konstruktivan materijal.



Most Arvida, Kanada (prvi aluminijski most)



Conference Centar, Glawgow, Australia

## **2.2. Popis relevantnih normi vezanih uz proračun aluminjskih konstrukcija**

prEN 1090-1: Execution of steel structures and aluminium structures - Part 1: Requirements for conformity assessment of structural components

prEN 1090-3: Execution of steel structures and aluminium structures - Part 3: Technical requirements for aluminium structures

EN 1990 Basis of structural design

EN 1991 Actions on structures – All parts

EN 1993-1-1 Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings

EN 1999-1-2 Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design

EN 1999-1-3 Design of aluminium structures - Part 1-3: Structures susceptible to fatigue

EN 1999-1-4 Design of aluminium structures - Part 1-4: Cold-formed structural sheeting

EN 1999-1-5 Design of aluminium structures - Part 1-5: Shell structures

EN 573-1:1994 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 1: Numerical designation system

EN 573-2:1994 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 2: Chemical symbol based designation system

EN 573-3:2003 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition in form of wrought products - Part 3: Chemical compositions

EN 573-4:1994 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 4: Forms of products

EN 485-1:1993 Aluminium and aluminium alloys - Sheet, strip and plate - Part 1: Technical Conditions for inspection and delivery

EN 586-1:1997 Aluminium and aluminium alloys - Forgings - Part 1: Technical conditions for Inspection and delivery

EN 754-1:1997 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery

EN 755-1:1997 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery

EN 1592-1:1997 Aluminium and aluminium alloys - HF seam welded tubes - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery

EN 12020-1:2001 Aluminium and aluminium alloys - Extruded precision profiles in alloys EN AW-6060 and EN AW-6063- Part 1: Technical conditions for inspection and delivery

EN 28839 Fasteners - Mechanical properties of fasteners - Bolts, screws, studs and nuts made from non-ferrous metals

EN ISO 898-1 Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs

EN ISO 3506-1 Mechanical properties of corrosion-resistant stainless-steel fasteners - Part 1: Bolts, screws and studs

EN 485-2:1994 Aluminium and aluminium alloys - Sheet, strip and plate - Part 2: Mechanical Properties

EN 485-3:2003 Aluminium and aluminium alloys - Sheet, strip and plate - Part 3: Tolerances on shape and dimensions for hot-rolled products

EN 485-4:1993 Aluminium and aluminium alloys - Sheet, strip and plate - Part 4: Tolerances on shape and dimensions for cold-rolled products

EN 508-2:2000 Roofing products from metal sheet - Specifications for self supporting products of steel, aluminium or stainless steel - Part 2: Aluminium

EN 586-2:1994 Aluminium and aluminium alloys - Forgings - Part 2: Mechanical properties and additional property requirements

EN 586-3:2002 Aluminium and aluminium alloys - Forgings - Part 3: Tolerances on dimension and form

EN 754-2:1997 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 2: Mechanical properties

EN 754-3:1995 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 3: Round bars, tolerances on dimension and form

EN 754-4:1995 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 4: Square bars, tolerances on dimension and form

EN 754-5:1995 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 5: Rectangular bars, tolerances on dimension and form

EN 754-6:1995 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 6: Hexagonal bars, tolerances on dimension and form

EN 754-7:1998 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 7: Seamless tubes, tolerances on dimension and form

EN 754-8:1998 Aluminium and aluminium alloys - Cold drawn rod/bar and tube - Part 8: Porthole tubes, tolerances on dimension and form

EN 755-2:1997 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 2: Mechanical properties

EN 755-3:1995 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 3: Round bars, tolerances on dimension and form

EN 755-4:1995 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 4: Square bars, tolerances on dimension and form

EN 755-5:1995 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 5: Rectangular bars, tolerances on dimension and form

EN 755-6:1995 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 6: Hexagonal bars, tolerances on dimension and form

EN 755-7:1998 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 7: Seamless tubes, tolerances on dimension and form

EN 755-8:1998 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 8: Porthole tubes, tolerances on dimension and form

EN 755-9:2001 Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles- Part 9: Profiles, tolerances on dimension and form

EN 12020-2:2001 Aluminium and aluminium alloys - Extruded precision profiles in alloys EN AW-6060 and EN AW-6063- Part 2: Tolerances on dimensions and form

EN 1592-2:1997 Aluminium and aluminium alloys - HF seam welded tubes - Part 2: - Mechanical properties

EN 1592-3:1997 Aluminium and aluminium alloys - HF seam welded tubes - Part 3: - Tolerance on dimensions and shape of circular tubes

EN 1592-4:1997 Aluminium and aluminium alloys - HF seam welded tubes - Part 4: - Tolerance on dimensions and form for square, rectangular and shaped tubes

EN 1559-1:1997 Founding - Technical conditions of delivery - Part 1: General

EN 1559-4:1999 Founding - Technical conditions of delivery - Part 4: Additional requirements for aluminium alloy castings

EN 1371-1:1997 Founding - Liquid penetrant inspection - Part 1: Sand, gravity die and low pressure die castings

EN 12681:2003 Founding – Radiographic inspection

EN 571-1:1997 Non destructive testing - Penetrant testing - Part 1: General principles

EN 13068-1:1999 Non-destructive testing - Radioscopic testing - Part 1: Quantitative measurement of imaging properties

EN 13068-2:1999 Non-destructive testing - Radioscopic testing - Part 2: Check of long term stability of imaging devices

EN 13068-3:2001 Non-destructive testing - Radioscopic testing - Part 3: General principles of radioscopic testing of metallic materials by X- and gamma rays

EN 444:1994 Non-destructive testing - General principles for radiographic examination of metallic materials by X- and gamma-rays

ISO 8062:1994 Castings -- System of dimensional tolerances and machining allowances

EN 1706:1998 Aluminium and aluminium alloys - Castings - Chemical composition and mechanical properties

EN 287-2:1997 Approval testing of welders - Fusion welding - Part 2: Aluminium and aluminium alloys

EN 288-4:1997 Specification and approval of welding procedures for metallic materials - Part 4; Welding procedure tests for the arc welding of aluminium and its alloys

EN 439:1994 Welding consumables - Shielding gases for arc welding and cutting.

EN 970:1997 Non destructive examination of welds - Visual examination

EN 1011-1:1998 Welding - Fusion welding of metallic materials - Part 1: General

EN 1011-4:2000 Welding - Requirements for fusion welding of metallic materials - Part 4: Aluminium and aluminium alloys

EN 1418:1997 Welding personnel. Approval testing of welding operators for fusion welding and resistance weld setters for fully mechanised and automatic welding of metallic materials

EN-ISO 10042 Arc-welded joints in aluminium and its weldable alloys - Guidance on quality levels for imperfections

ISO 18273:2002 Welding consumables - Wire electrodes, wires and rods for arc welding of aluminium and aluminium alloys. Classification

ISO 1000:1992 SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units

ISO 31-0:1992 Quantities and units – Part 0: General principles

ISO 3898:1997 Basis of design of structures – Notations – General symbols

ISO 8930:1991 General principles on reliability for structures - List of equivalent terms

ISO 11003-1:2001 Adhesives -- Determination of shear behaviour of structural adhesives -- Part 1: Torsion test method using butt-bonded hollow cylinders

ISO 11003-2:2001 Adhesives -- Determination of shear behaviour of structural adhesives -- Part 2: Tensile test method using thick adherents

EN ISO 1302:2002 Geometrical Product Specification (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation.

### 2.3. Svojstva aluminija

Konstrukcije od aluminija odlikuje mala vlastita težina, velika nosivost, otpornost na koroziju, lagano održavanje, duktilnost i plastičnost.

Mane aluminija su visoka cijena, utjecaj visokih temperatura (požar), oslabljenja kod zavarivanja, utjecaj zamora materijala i elektrolitska korozija.

Mehaničke karakteristike prema europskim normama su:

gustoća	$\rho = 2\,700 \text{ kg/m}^3$ ;
modul elastičnosti	$E = 70\,000 \text{ MPa}$ ;
modul posmika	$G = 27\,000 \text{ Mpa}$
Poissonov koeficijent	$\mu = 0,30$ ;

U tablici 11 prikazane su karakteristične vrijednosti čvrstoće  $f_0$  (0,2 proof strength), krajnje vlačne čvrstoće  $f_u$ , klase izvijanja itd u ovisnosti o tipu aluminijske legure.

Oznake s indeksom haz (heat affected zone) se odnose na elemente koji će se zavarivati. Pri dimenzioniranju zavarenih konstrukcija u obzir se mora uzeti i redukcija čvrstoće koja se pojavljuje u blizini varova. Kod dimenzioniranja pretpostavljamo da je čvrstoća reducirana do konstantne vrijednosti duž cijele topline zahvaćene zone (haz). Čak i vrlo mali zavari mogu značajno reducirati čvrstoću zbog osjetljivosti aluminija na utjecaj topline. U projektiranju greda stoga je nužno locirati varove i dodatke te pri dimenzioniranju uzeti u obzir redukciju čvrstoće koja se pojavljuje u blizini varova.

U našem slučaju stupovi neće biti zavarivani pa nećemo imati redukciju uslijed zavarivanja.

Tablica 11.

Alloy EN- AW	Temper <sup>1)</sup>	Thick- ness <sup>1)</sup> mm	$f_o$ <sup>1)</sup>	$f_u$	$A_{50}$ <sup>1)6)</sup>	$f_{o,haz}$ <sup>2)</sup>	$f_{u,haz}$ <sup>2)</sup>	HAZ-factor <sup>2)</sup>		BC <sup>4)</sup>	$n_p$ 1), 5)
			N/mm <sup>2</sup>		%	N/mm <sup>2</sup>		$\rho_{o,haz}$ <sup>1)</sup>	$\rho_{u,haz}$		
3004	H14   H24/H34	≤ 6   3	180   170	220	1   3	75	155	0,42   0,44	0,70	B	23   18
	H16   H26/H36	≤ 4   3	200   190	240	1   3			0,38   0,39	0,65	B	25   20
3005	H14   H24	≤ 6   3	150   130	170	1   4	56	115	0,37   0,43	0,68	B	38   18
	H16   H26	≤ 4   3	175   160	195	1   3			0,32   0,35	0,59	B	43   24
3103	H14   H24	≤ 25   12,5	120   110	140	2   4	44	90	0,37   0,40	0,64	B	31   20
	H16   H26	≤ 4	145   135	160	1   2			0,30   0,33	0,56	B	48   28
5005/ 5005A	O/H111	≤ 50	35	100	15	35	100	1	1	B	5
	H12   H22/H32	≤ 12,5	95   80	125	2   4	44	100	0,46   0,55	0,80	B	18   11
	H14   H24/H34	≤ 12,5	120   110	145	2   3			0,37   0,40	0,69	B	25   17
5052	H12   H22/H32	≤ 40	160   130	210	4   5	80	170	0,50   0,62	0,81	B	17   10
	H14   H24/H34	≤ 25	180   150	230	3   4			0,44   0,53	0,74	B	19   11
5049	O / H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6
	H14   H24/H34	≤ 25	190   160	240	3   6	100	190	0,53   0,63	0,79	B	20   12
5454	O/H111	≤ 80	85	215	12	85	215	1	1	B	5
	H14   H24/H34	≤ 25	220   200	270	2   4	105	215	0,48   0,53	0,80	B	22   15
5754	O/H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6
	H14   H24/H34	≤ 25	190   160	240	3   6	100	190	0,53   0,63	0,79	B	20   12
5083	O/H111	≤ 50	125	275	11	125	275	1	1	B	6
		50 < t ≤ 80	115	270	14 <sup>3)</sup>	115	270			B	
	H12   H22/H32	≤ 40	250   215	305	3   5	155	275	0,62   0,72	0,90	B	22   14
	H14   H24/H34	≤ 25	280   250	340	2   4			0,55   0,62	0,81	A	22   14
6061	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	95	150	0,86	0,73	B	8
	T6 / T651	≤ 12,5	240	290	6	115	175	0,48	0,60	A	23
	T651	12,5 < t ≤ 80	240	290	6 <sup>3)</sup>						
6082	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	100	160	0,91	0,78	B	8
	T61/T6151	≤ 12,5	205	280	10						
	T6151	12,5 < t ≤ 100	200	275	12 <sup>3)</sup>						
	T6/T651	≤ 6	260	310	6						
		6 < t ≤ 12,5	255	300	9						
	T651	12,5 < t ≤ 100	240	295	7 <sup>3)</sup>						
7020	T6	≤ 12,5	280	350	7	205	280	0,73	0,80	A	19
	T651	≤ 40			9 <sup>3)</sup>						
8011A	H14   H24	≤ 12,5	110   100	125	2   3	37	85	0,34   0,37	0,68	B	37   22
	H16   H26	≤ 4	130   120	145	1   2			0,28   0,31	0,59		33   33

1) If two (three) tempers are specified in one line, tempers separated by “|” have different technological values but separated by “/” have same values. (The tempers show differences for  $f_o$ ,  $A$  and  $n_p$ .)  
2) The HAZ-values are valid for MIG welding and thickness up to 15mm. For TIG welding strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A) up to 6 mm the same values apply, but for TIG welding precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and thickness up to 6 mm the HAZ values have to be multiplied by a factor 0,8 and so the  $\rho$ -factors. For higher thickness – unless other data are available – the HAZ values and  $\rho$ -factors have to be further reduced by a factor 0,8 for the precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and by a factor 0,9 for the strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A). These reductions do not apply in temper O.  
3) Based on  $A (= A_{5,65} \sqrt{A_o})$ , not  $A_{50}$ .  
4) BC = buckling class, see 6.1.4.4, 6.1.5 and 6.3.1.  
5)  $n$ -value in Ramberg-Osgood expression for plastic analysis. It applies only in connection with the listed  $f_o$ -value.  
6) The minimum elongation values indicated do not apply across the whole range of thickness given, but mostly to the thinner materials. In detail see EN 485-2.



Nastavak tablice 11.

Alloy EN-AW	Product form	Temper	Thick-ness $t$ mm 1) 3)	$f_o$ 1)	$f_u$ 1)	$A$ 5) 2)	$f_{o,haz}$ 4)	$f_{u,haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	$n_p$ 7)
				N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$			
5083	ET, EP, ER/B	O / H111, F, H112	$t \leq 200$	110	270	12	110	270	1	1	B	5
	DT	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	6	135	270	0,68	0,96	B	14
		H14/24/34	$t \leq 5$	235	300	4			0,57	0,90	A	18
6060	EP, ET, ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	8	50	80	0,42	0,50	B	17
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0,50	0,57	B	14
	ET, EP, ER/B	T6	$t \leq 15$	140	170	8	60	100	0,43	0,59	A	24
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0,38	0,47	A	16
	EP, ET, ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	12	60	100	0,50	0,56	A	12
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	8	65	110	0,41	0,51	A	16
EP	$3 < t \leq 25$		150	195	8	0,43			0,56	A	18	
6061	EP, ET, ER/B, DT	T4	$t < 25$	110	180	50	95	150	0,86	0,83	B	8
	EP, ET, ER/B, DT	T6	$t \leq 20$	240	260	8	115	175	0,48	0,67	A	55
6063	EP, ET, ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	8	60	100	0,46	0,57	B	16
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160	7			0,55	0,63	B	13
	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	8	65	110	0,41	0,56	A	24
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0,34	0,50	A	31
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	8	75	130	0,38	0,53	A	22
	EP		$10 < t \leq 25$	180	225	8			0,42	0,58	A	21
DT	$t \leq 20$		195	230	10	0,38			0,57	A	28	
6005A	EP/O, ER/B	T6	$t \leq 5$	225	270	8	115	165	0,51	0,61	A	25
			$5 < t \leq 10$	215	260	8			0,53	0,63	A	24
			$10 < t \leq 25$	200	250	8			0,58	0,66	A	20
	EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	215	255	8			0,53	0,65	A	26
			$5 < t \leq 10$	200	250	8			0,58	0,66	A	20
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20
6082	EP, ET, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0,91	0,78	B	8
	EP/O, EP/H	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	B	28
	EP/O, EP/H ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0,48	0,60	A	25
DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8	0,49			0,60	A	22	
		$5 < t \leq 20$	240	310	10	0,52			0,60	A	17	
7020	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 15$	290	350	10	205	280	0,71	0,80	A	23
	EP, ET, ER/B	T6	$15 < t < 40$	275	350	10			0,75	0,80	A	19
	DT	T6	$t \leq 20$	280	350	10			0,73	0,80	A	18

## Nastavak tablice 11.

Key:	EP	- Extruded profiles	EP/O	- Extruded open profiles
	EP/H	- Extruded hollow profiles	ET	- Extruded tube
	ER/B	- Extruded rod and bar	DT	- Drawn tube

1): Where values are quoted in **bold** greater thicknesses and/or higher mechanical properties may be permitted in some forms see ENs and prENs listed in 1.2.1.3. In this case the  $R_{p0,2}$  and  $R_m$  values can be taken as  $f_o$  and  $f_u$ . If using such higher values the corresponding HAZ-factors  $\rho$  have to be calculated acc. to expression (6.13) and (6.14) with the same values for  $f_{o,haz}$  and  $f_{u,haz}$ .

2): Where minimum elongation values are given in **bold**, higher minimum values may be given for some forms or thicknesses.

3): According to EN 755-2: following rule applies: "If a profile cross-section is comprised of different thicknesses which fall in more than one set of specified mechanically property values, the lowest specified value should be considered as valid for the whole profile cross-section." Exception is possible and the highest value given may be used provided the manufacturer can support the value by an appropriate quality assurance certificate.

4) The HAZ-values are valid for MIG welding and thickness up to 15mm. For TIG welding strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A) up to 6 mm the same values apply, but for TIG welding precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and thickness up to 6 mm the HAZ values have to be multiplied by a factor 0,8 and so the  $\rho$ -factors. For higher thickness – unless other data are available – the HAZ values and  $\rho$ -factors have to be further reduced by a factor 0,8 for the precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) alloys and by a factor 0,9 for strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A). These reductions do not apply in temper O.

5)  $A = A_{5,65} \sqrt{A_o}$

6) BC = buckling class, see 6.1.4.4, 6.1.5 and 6.3.1.

7)  $n$ -value in Ramberg-Osgood expression for plastic analysis. It applies only in connection with the listed  $f_o$ -value (= minimum standardized value).

8) If it is intended to use extruded or extruded and drawn semi-products in EN AW-5454 or EN AW-5754 in tempers O/H111 and F/H112 or H14/H24/H34 according to EN 755-2 or EN 754-2, the corresponding values of table 3.2.a may be applied for design with following changes:

- For EN AW-5454 temper O/H111 (includes F/H112) replace the values for  $f_u$  and  $f_{u,haz}$  by 200 N/mm<sup>2</sup>.
- For EN AW-5754 temper O/H111 (includes F/H112) replace the values for  $f_u$  and  $f_{u,haz}$  by 180 N/mm<sup>2</sup> (thickness of bars < 150 mm).
- For EN AW-5454 temper H14/H24/H34 replace the values for  $f_o$  by 180 N/mm<sup>2</sup> and for  $\rho_{o,haz}$  by 0,56.

## 2.4. Proračun aluminijskih elemenata opterećenih na tlak

### Djelovanja na konstrukciju

Sva djelovanja se određuju prema EN 1990 i EN 1991.

Projektirana (proračunska ili „design value“) vrijednost akcija se određuje za:

1. Krajnje granično stanje kao:

$$N_{Ed} = \sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{Q,i} \cdot Q_{k,i}$$

gdje je

$F_d$	projektirana vrijednost djelovanja
$G$	stalna djelovanja
$Q_{k,1}$	karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja
$\gamma_i$	parcijalni faktori za djelovanja
$\psi_{2,i}$	faktor kombinacije

## Određivanje otpornosti

Prilikom proračuna elemenata potrebno je provesti klasifikaciju poprečnog presjeka.

Postoje 4 klase poprečnih presjeka:

- 1) plastični poprečni presjeci s dovoljnim rotacijskim kapacitetom. Proračun se vrši bez smanjenja nosivosti.
- 2) poprečni presjeci u kojima može doći do plastifikacije, ali imaju ograničen rotacijski kapacitet.
- 3) poprečni presjeci u kojima je došlo do dosezanja granice popuštanja aluminija (*proof strength*) ali lokalno izvijanja ne dopušta dosezanje momenta plastičnosti.
- 4) poprečni presjeci u kojima dolazi do gubitka stabilnosti prije dosezanja granice popuštanja (vitki poprečni presjeci).

Detaljnije o klasifikaciji poprečnih presjeka može se naći u knjizi „Metalne konstrukcije“ (Androić, Dujmović, Džeba)

Klasifikacija poprečnog presjeka se vrši pomoću parametra vitkosti  $\beta$ .

Ukoliko vrijedi:

$\beta \leq \beta_1$	klasa 1
$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$	klasa 2
$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$	klasa 3
$\beta > \beta_3$	klasa 4

U tablici 12 za određivanje vitkosti su dani parametri vitkosti. Na priloženoj slici dana su objašnjenja o poprečnim presjecima.

Parametar vitkosti se određuje (za tlačno opterećene elemente) prema formuli:

$$\beta = \frac{b}{t}$$

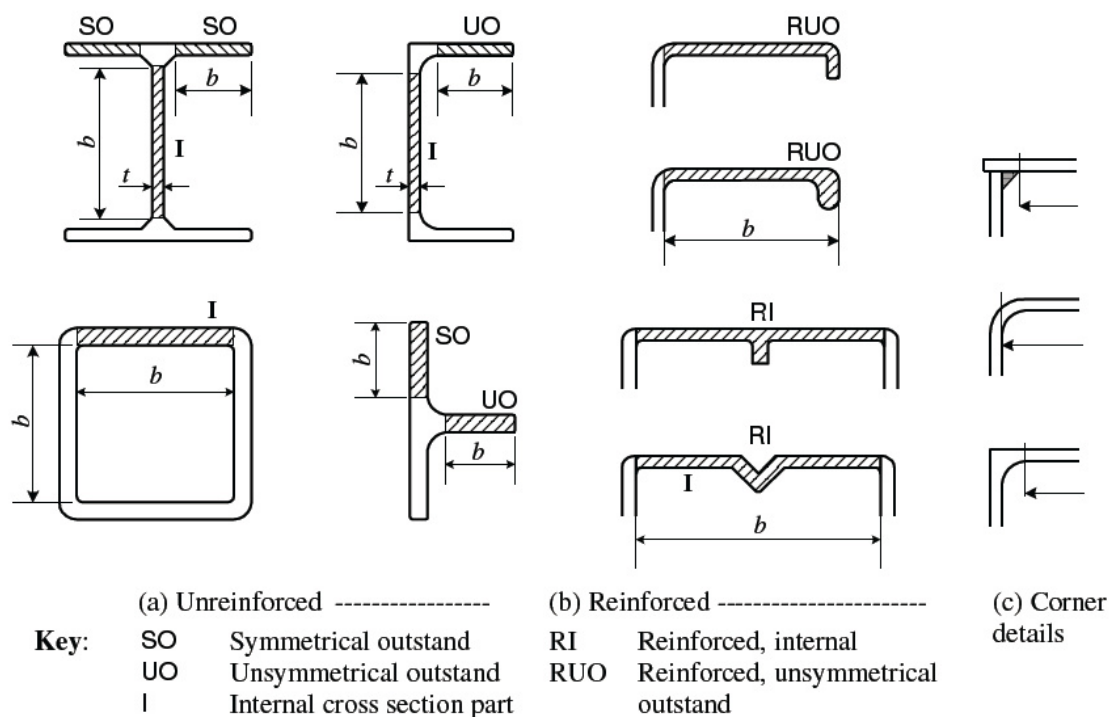
gdje je:

b	širina elementa poprečnog presjeka (vidjeti sliku)
t	debljina elementa poprečnog presjeka (vidjeti sliku)

Tablica 12.

Material classification according to Table 3.2	Internal part			Outstand part		
	$\beta_1/\varepsilon$	$\beta_2/\varepsilon$	$\beta_3/\varepsilon$	$\beta_1/\varepsilon$	$\beta_2/\varepsilon$	$\beta_3/\varepsilon$
Class A, without welds	11	16	22	3	4,5	6
Class A, with welds	9	13	18	2,5	4	5
Class B, without welds	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Class B, with welds	10	13,5	15	3	3,5	4

$\varepsilon = \sqrt{250/f_o}$ ,  $f_o$  in  $N/mm^2$



Tipovi i dijelovi poprečnih presjeka

### Lokalna otpornost na izvijanje

Elementima koji su klasificirani kao klasa poprečnog presjeka 4 moraju se veličine poprečnog presjeka umanjiti i svesti na efektivni poprečni presjek. Faktorom  $\rho_c$  se stvarne debljine poprečnog presjeka umanjuju (efektivna debljina poprečnog presjeka).

Faktor je definiran sljedećom formulom a u tablici 13 su prikazana potrebne konstante.

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{if } \beta \leq \beta_3$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta l \varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta l \varepsilon)^2} \quad \text{if } \beta > \beta_3$$

Tablica 13.

Material classification according to Table 3.2	Internal part		Outstand part	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
Class A, without welds	32	220	10	24
Class A, with welds	29	198	9	20
Class B, without welds	29	198	9	20
Class B, with welds	25	150	8	16

### Tlačna otpornost elementa (bez dokaza izvijanja)

$$N_{Ed} \leq N_{c.Rd}$$

gdje je

$N_{c.Rd}$  otpornost poprečnog presjeka koja se uzima kao:

$$N_{c.Rd} = \frac{A_{nett} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{za presjeka oslabljene spojinim sredstvima}$$

$$N_{c.Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}} \quad \text{za ostale presjeke}$$

gdje je

$A_{nett}$  neto površina poprečnog presjeka  
 $A_{eff}$  efektivna površina poprečnog presjeka  
 $f_u$  vlačna čvrstoća (*ultimate tensile strength*)  
 $f_o$  granica proporcionalnosti (*0,2 proof strength*)

### Tlačna otpornost elementa (s dokazom izvijanja)

$$N_{Ed} \leq N_{b.Rd}$$

$$N_{b.Rd} = \frac{\kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}}$$

gdje je

$N_{b.Rd}$  otpornost poprečnog presjeka na izvijanje  
 $\chi$  redukcijski faktor izvijanja

$\kappa$  faktor oslabljenja uslijed zavarivanja (u našem slučaju 1)  
 $A_{eff}$  efektivna površina poprečnog presjeka ( $A_{eff}=A$  za presjeke klase 1,2,3)

Redukcijski faktor uslijed izvijanja se uzima kao:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

gdje je:

$$\phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{A \cdot E}}$$

gdje je:

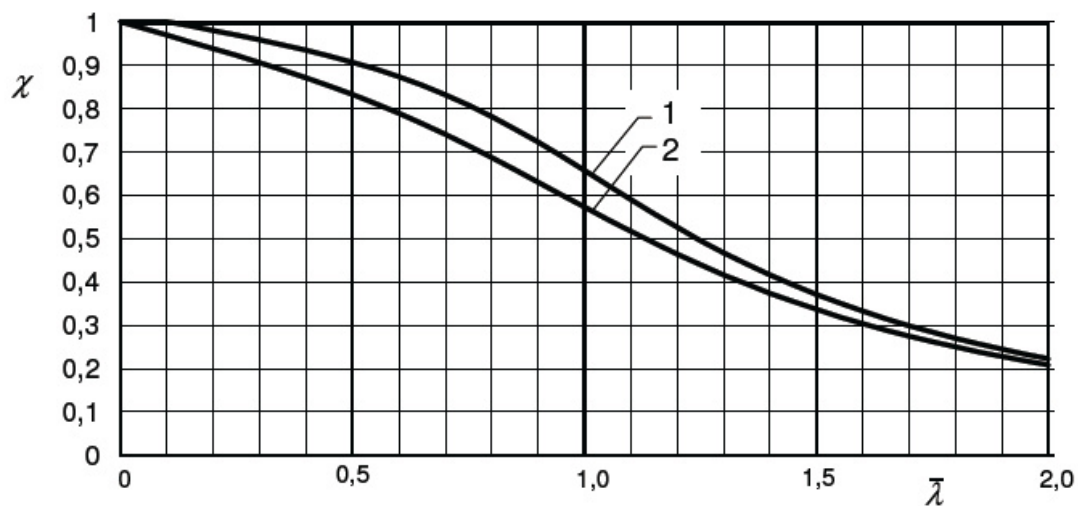
$L_{cr}$  duljina izvijanja (ovisno o pridržanjima)  
 $i$  radijus elipse tromosti

Vrijednosti  $\bar{\lambda}_0$  i  $\alpha$  dane su u tablici 14 (za materijalne karakteristike dane u tablici 11).

Tablica 14.

Material buckling class	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Class A	0,20	0,10
Class B	0,32	0,00

Redukcijski faktor se može i očitati (za kontrolu) sa slijedeće slike.



1 Class A material,  
 2 Class B material

Vrijednost redukcijskog faktora ovisno o relativnoj vitkosti

## 2.5. Primjer proračuna tlačno opterećenog elementa

Zadatak je proračunati tlačnu otpornost aluminijskog kvadratnog profila dimenzija 70x70x1.9mm ( $b \times b \times t$ ). Visina elementa je 1 metar. Aluminij je tipa AW 6063, T66. Element je kontinuiran (bez zavora). Stup je zglobno pridržan na krajevima.

Određivanje vitkosti poprečnog presjeka:

Prema prijašnjim skicama i izrazima vrijedi:

$$b_f = b - 2 \cdot t = 66.2 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.118$$

Određivanje klase poprečnog presjeka:

$$\beta_1 = 11 \cdot \varepsilon = 12.3$$

$$\beta_2 = 16 \cdot \varepsilon = 17.9$$

$$\beta_3 = 22 \cdot \varepsilon = 24.6$$

$$\beta = \frac{b_f}{t} = 34.8$$

Presjek je klase 4!

Lokalna otpornost na izvijanje (za klasu A, bez zavora):

$$\rho_c = \frac{C_1}{\frac{\beta}{\varepsilon}} - \frac{C_2}{\left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)^2} = \frac{32}{\frac{\beta}{\varepsilon}} - \frac{220}{\left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)^2} = 0.8$$

Efektivna debljina poprečnog presjeka:

$$t_{eff} = \rho_c \cdot t = 1.52 \text{ mm}$$

Efektivna površina:

$$A_{eff} = 4 \cdot (b - t) \cdot t_{eff} = 414.2 \text{ mm}^2$$

$$I = \frac{b^4}{12} - \frac{(b - 2 \cdot t)^4}{12} = 4.004 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_{eff}}} = 31.1 \text{ mm}$$

Proračun tlačne otpornosti:

Tlačna otpornost (bez dokaza stabilnosti):

$$N_{c.Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}} = 75.3 \text{ kN}$$

Tlačna otpornost (s dokazom stabilnosti):

$$N_{b.Rd} = \frac{\kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}}$$

$$\kappa = 1$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{A \cdot E}} = 0.490$$

Za ovaj profil je mjerodavna linija izvijanja A, dakle slijedi  $\bar{\lambda}_0 = 0.1$  i  $\alpha = 0.2$

$$\phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0.659$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.909$$

$$N_{b.Rd} = \frac{\kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}} = 68.48 \text{ kN}$$

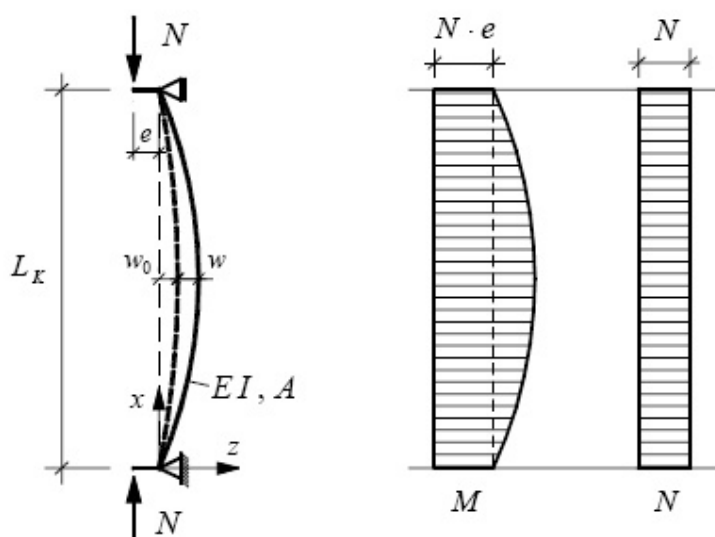


### 3. PRORAČUN STAKLENIH ELEMENATA IZLOŽENIH DJELOVANJU TLAČNE SILE

#### 3.1. Jednoslojni stakleni element

##### Općenito

Razmatra se djelovanje tlačne sile na stakleni element koji je prikazan na slici. Pretpostavlja se (u općem slučaju) da sila djeluje ekscentrično ( $e$ ) i da postoji inicijalni progib ( $w_0$ ).



Ekscentrično djelovanje sile

Postavljanjem i rješenjem diferencijalne jednačbe izvodi se izraz za ukupni progib na sredini stupa:

$$w = \frac{e}{\cos \frac{L_k}{2} \cdot \sqrt{\frac{N}{E \cdot I}}} + \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \approx \frac{e + w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

gdje je

$N$  uzdužna sila  
 $N_{cr}$  Eulerova kritična sila izvijanja

Ako drugačije nije zadano maksimalni progib iznosi  $l/100$  gdje je  $l$  duljina stupa.

Naprezanja u elementu se određuju prema izrazu:

$$\sigma = \frac{N - N_{cr}}{A} + \frac{N}{W} \cdot \left( \frac{e}{\cos L_k / 2 \cdot \sqrt{N / EI}} + \frac{w_o}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \right)$$

Ako definiramo relativnu vitkost stakla kao:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{p,t}}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{p,t}}{\sigma_{cr}}}$$

gdje je:

$\sigma_{p,t} = f_{g,d}$  maksimalno dopušteno (proračunsko) vlačno naprezanje u staklu  
 $\sigma_{cr}$  kritično naprezanje koje odgovara Eulerovoj kritičnoj sili

S obzirom na relativnu vitkost staklenog elementa možemo napisati da je maksimalno proračunsko naprezanje izvijanja:

$$\sigma_k = \chi_k \cdot \sigma_{p,t}$$

gdje je:

$\chi_k$  redukcijski koeficijent (koeficijent izvijanja)

### 3.2. Djelovanja

Sva djelovanja se određuju prema EN 1990 i EN 1991.

Projektirana (proračunska ili „design value“) vrijednost akcija se određuje za:

1. Krajnje granično stanje kao:

$$N_{Ed} = \sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{Q,i} \cdot Q_{k,i}$$

gdje je

$F_d$  projektirana vrijednost djelovanja  
 $G$  stalna djelovanja  
 $Q_{k,1}$  karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja  
 $\gamma_i$  parcijalni faktori za djelovanja  
 $\psi_{2,i}$  faktor kombinacije

### 3.3. Dokaz nosivosti na tlak

#### Djelovanje tlaka bez dokaza stabilnosti

Jednadžba graničnog stanja glasi:

$$N_{Ed} \leq N_{c.Rd} = \frac{\sigma_{c.d} \cdot A}{\gamma_k}$$

gdje je:

$\sigma_{c.d}$  tlačna otpornost (karakteristična vrijednost tlačne otpornosti se uzima 500 N/mm<sup>2</sup>)  
 $\gamma_k$  parcijalni koeficijent (vrijednost 1.8)

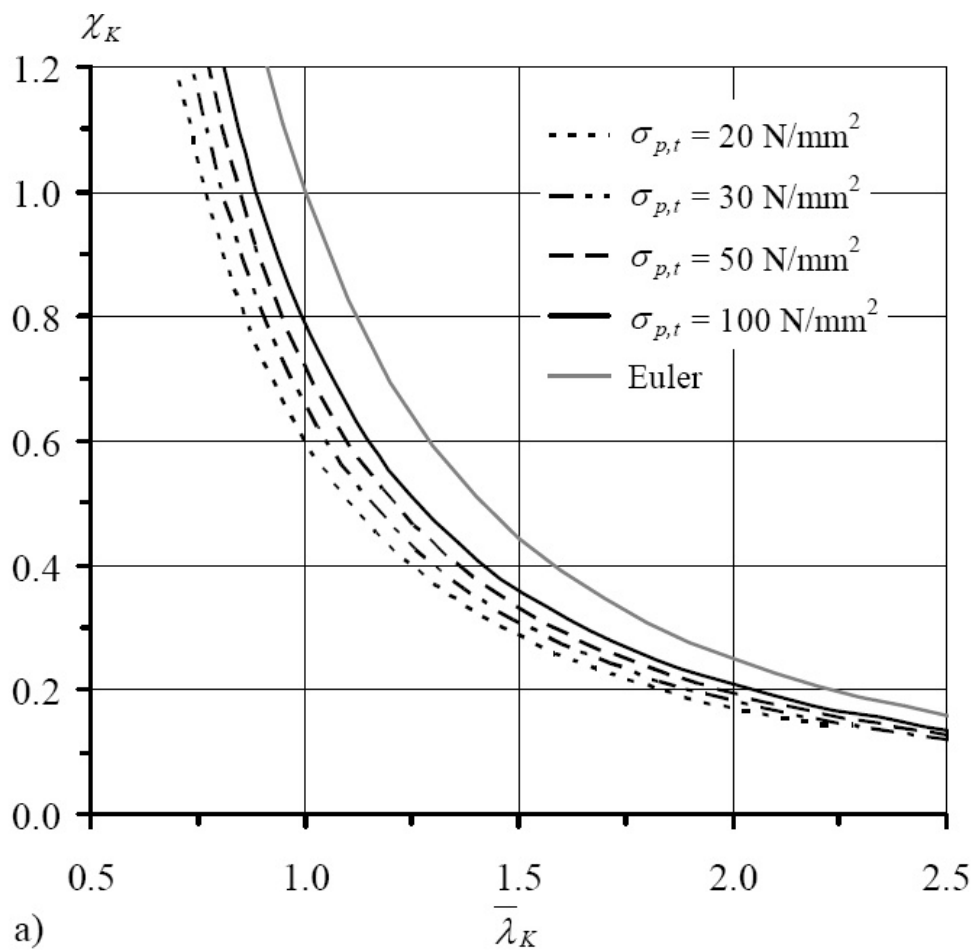
Ova jednadžba u pravilu nikada nije mjerodavna.

#### Djelovanje tlaka s dokazom stabilnosti

Jednadžba graničnog stanja glasi (uvažavajući poglavlje 3.1):

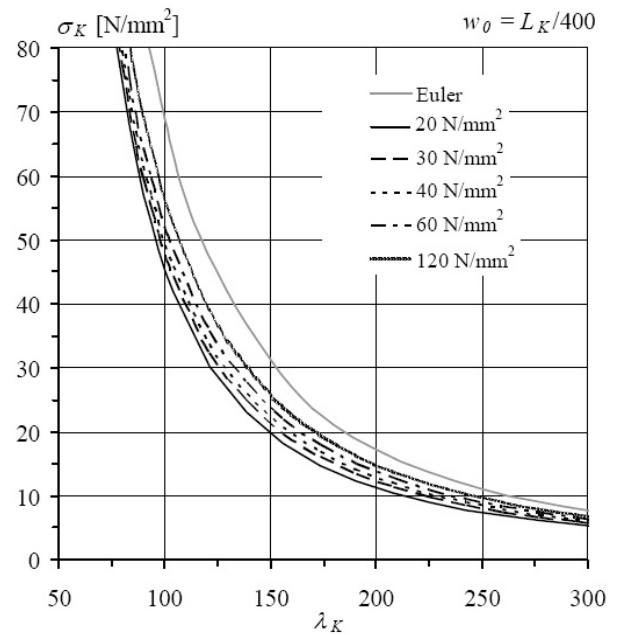
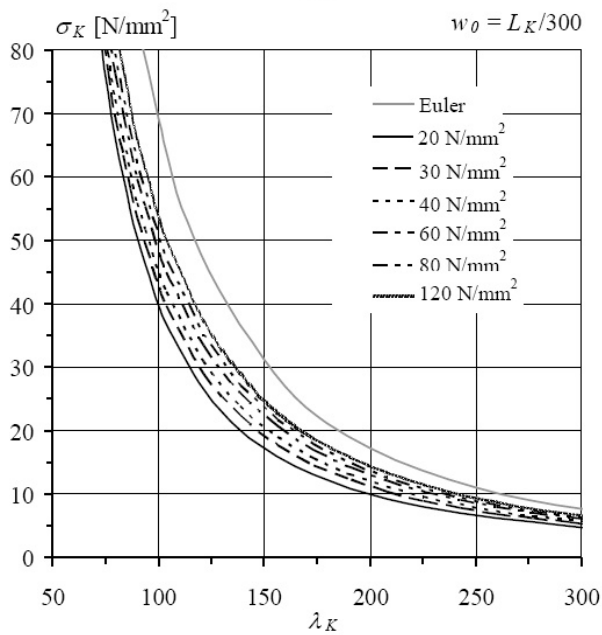
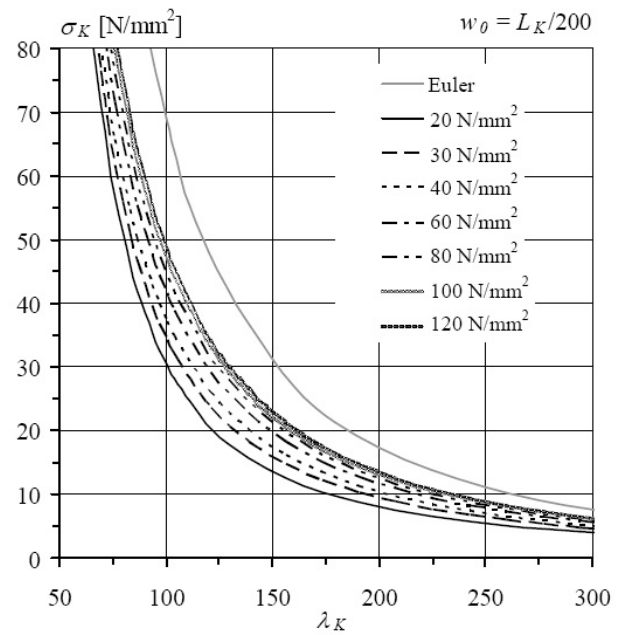
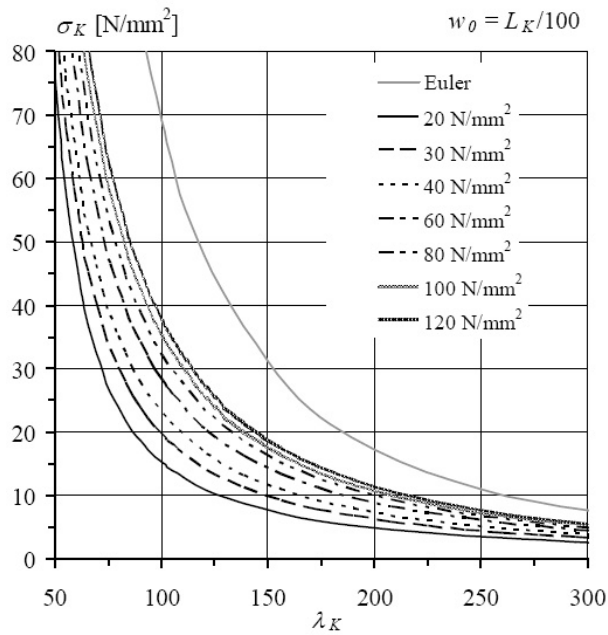
$$N_{Ed} \leq N_{c.Rd} = \frac{\sigma_k \cdot A}{\gamma_k} = \frac{\chi_k \cdot \sigma_{p,t} \cdot A}{\gamma_k}$$

Na slijedećoj slici prikazana je ovisnost relativne vitkosti i redukcijskog koeficijenta izvijanja. Ovdje je uzeta inicijalna imperfekcija  $w_0=L_k/300$ .

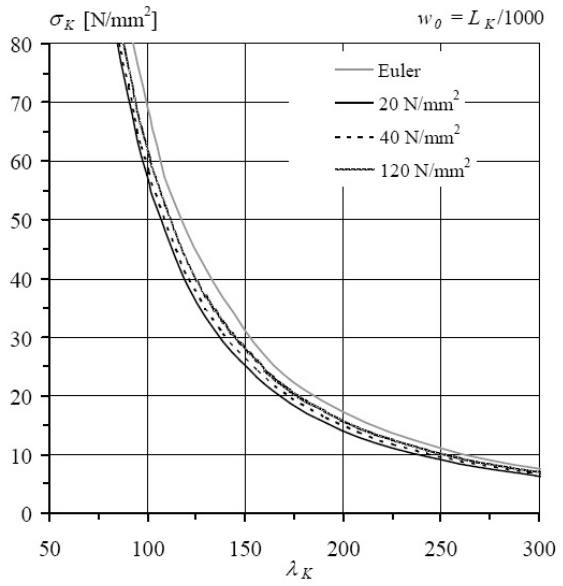
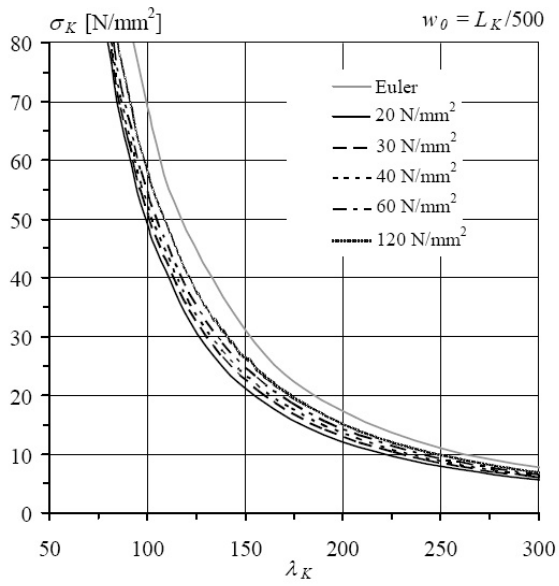


a)  
 Ovisnost relativne vitkosti i redukcijskog koeficijenta (vrijednosti vlačnih čvrstoća se mogu interpolirati)

Ukoliko su zadane drugačije vrijednosti imperfekcija, naprezanje izvijanja se određuje iz funkcionalne ovisnosti o vitkosti elementa. Na slijedećim slikama su prikazane spomenute krivulje izvijanja.



Maksimalno naprezanje izvijanja u ovisnosti o vitkosti elementa



Maksimalno naprezanje izvijanja u ovisnosti o vitkosti elementa



Provjera maksimalnih naprezanja u elementu se vrši prema istom izrazu kao za jednoslojne elemente s razlikom da se mora uzeti u obzir efektivna debljina poprečnog presjeka putem proračuna efektivne debljine :

$$t_{eff} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_s \cdot (1 + \alpha + \pi^2 \cdot \alpha \cdot \beta)}{b \cdot (1 + \pi^2 \cdot \beta)}}$$



### 3.5. Primjer proračuna tlačno opterećenog staklenog elementa

Statičkim proračunom dobivena je vrijednost proračunske uzdužne sile (od kombinacije stalnog opterećenja, snijega i vjetra)  $N=400$  kN. Visina elementa je 3 metra. Stup je bočno pridržan sa staklenim panelom. U ravnini je zglobovno pridržan na krajevima. Zadatak je provjeriti tlačnu otpornost staklenog elementa (float staklo) dimenzija 200x20 mm (bx t), te naprezanja i maksimalni progib.

Početna imperfekcija nije zadana pa ju možemo pretpostaviti kao  $l/300=w_0=1$  cm.

$$N_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} = 1023,12 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{\sigma_{c,k}}{\gamma_k} = 205,56 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{p,t} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_k} = 18,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{N}{W} \cdot \left( \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \right)$$

$$\sigma_1 = 149,2 \text{ Mpa} < 205,56 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 50,8 \text{ Mpa} < 205,56 \text{ Mpa}$$

Naprezanja zadovoljavaju!

Proračun progiba:

$$w \approx \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} = 1,64 \text{ cm} < w_{\text{max}} = 3 \text{ cm}$$

Djelovanje tlaka bez dokaza stabilnosti:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} = \frac{\sigma_{c,d} \cdot A}{\gamma_k} = 456,8 \text{ kN}$$

Zadovoljava!

Djelovanje tlaka s dokazom stabilnosti:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{p,t}}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{p,t}}{\sigma_{cr}}} = 0,27$$

Za relativnu vitkost dobivamo koeficijent izvijanja koji je veći od 1 te zaključujemo da izvijanje nije mjerodavno u ovom slučaju. Za staklene stupove je karakteristično da u područjima male vitkosti imaju koeficijent izvijanja koji je veći od 1. Za ostale materijale ovaj koeficijent može maksimalno iznositi 1.