



HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA

15. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva

Opatija, 2021.

# Numerička analiza mehaničkog ojačanja drvenog lameliranog nosača sportske dvorane Suhopolje

**Marko Ključanin**

**Mario Abramović**

Marko Ključanin, struč.spec.ing.aedif., Standing d.o.o., Virovitica

Mario Abramović, mag.ing.aedif., Drvene konstrukcije d.o.o., Voćin

# Cilj rada

- Na primjeru realnog nosača usvojiti metode mehaničkog ojačanja – ‘armiranja’ (uglavnom navojne šipke i nalijepljene furnirske ploče)
- Usporediti optimalnu tipologiju sedlastog radijalno zakrivljenog nosača (iznaći geometriju koja maksimalno reducira okomita vlačna naprezanja - povećanje zakrivljenosti intradosa)
- Ustanoviti optimalne numeričke modele kojima je cilj opisati rezidualna naprezanja okomito na vlakanca u zoni sljemenog volumena (nedostatak propisa...)
- Analizirati numerički model komercijalnim programskim paketom (analiza rezidualnih naprezanja)
- Usporediti rezultate rezidualnih naprezanja nosača nakon ojačanja

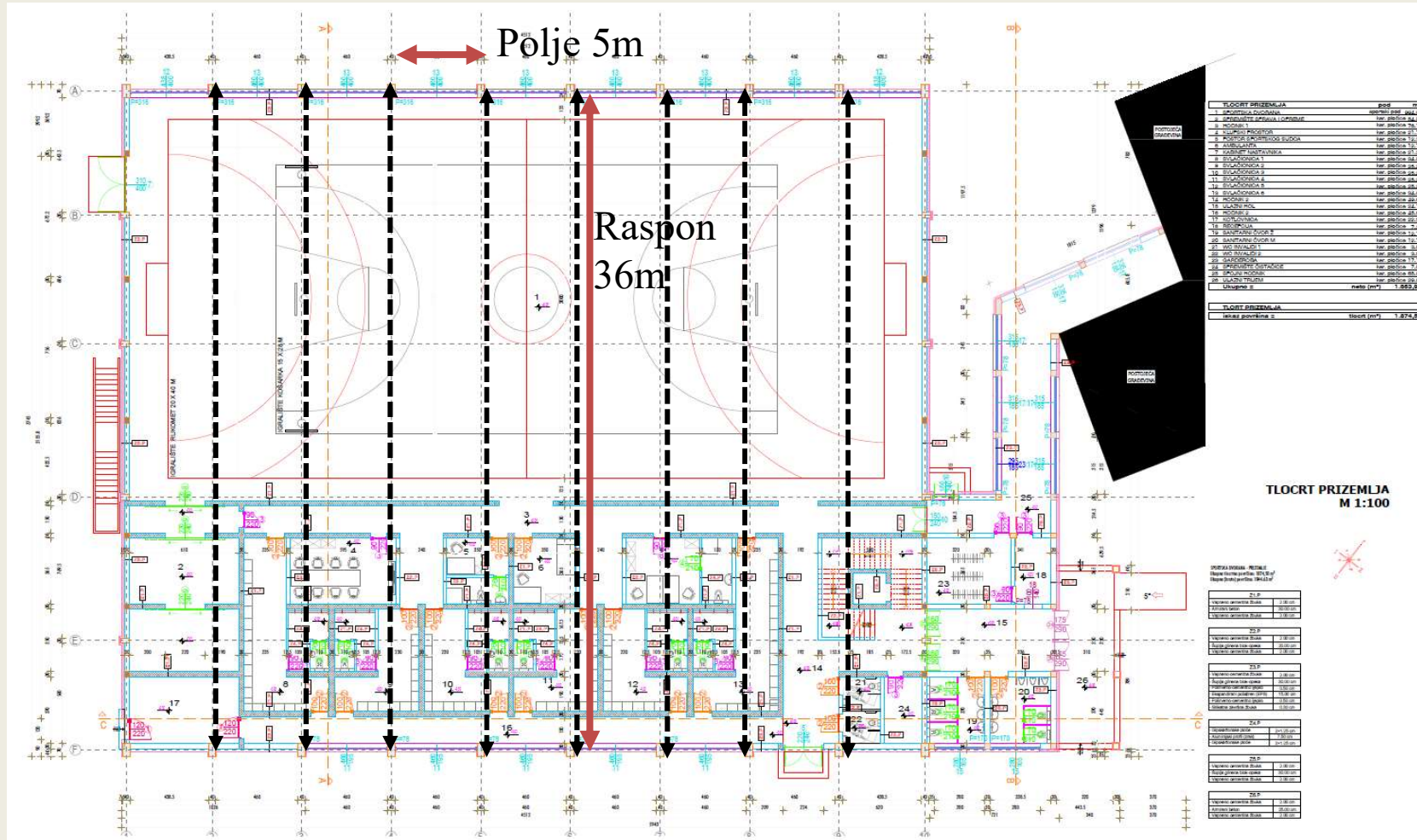


- Sportska dvorana Suhopolje (dvodjelna dvorana)

-Tlocrtne izmjere - 59.43m x 37.45m

-Visina u sljemenu - 11.95m

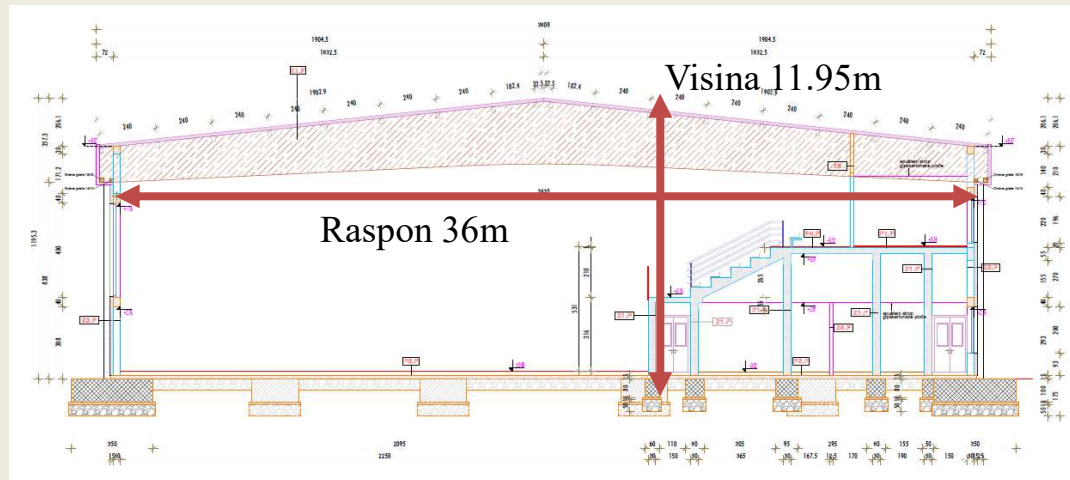
-8 glavnih nosača postavljani na AB konzolnim stupovima 40/70



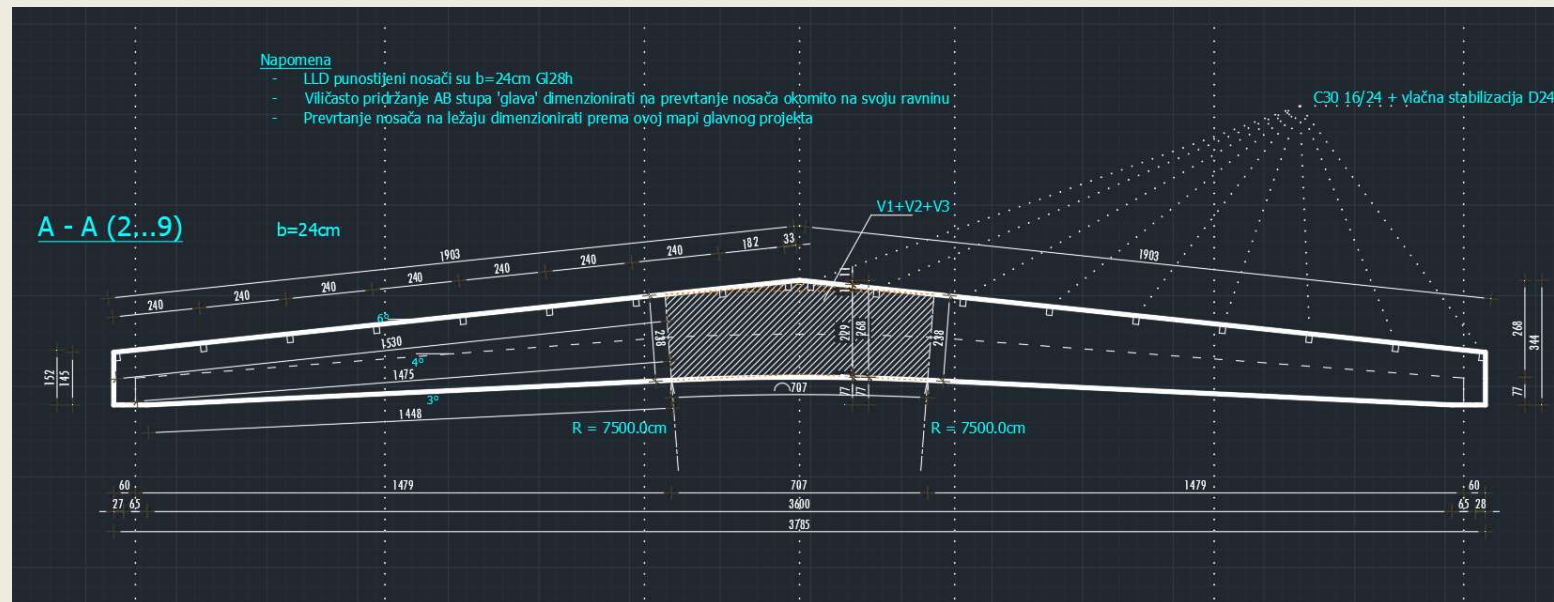
- Opis nosača

- Tipologija nosača – Sedlasti radialno zakrivljeni nosač ('srpasti')
- Raspon nosača - 36m
- Visina u sljemenu 268cm, visina na ležaju 152cm, zakrivljenost intradosa 75m, nagib gornje izvodnice 6°, nagib donje izvodnice 3°
- Dolje – dimenzionirani lamelirani nosač glavnog okvira građevine prema projektu drvene konstrukcije

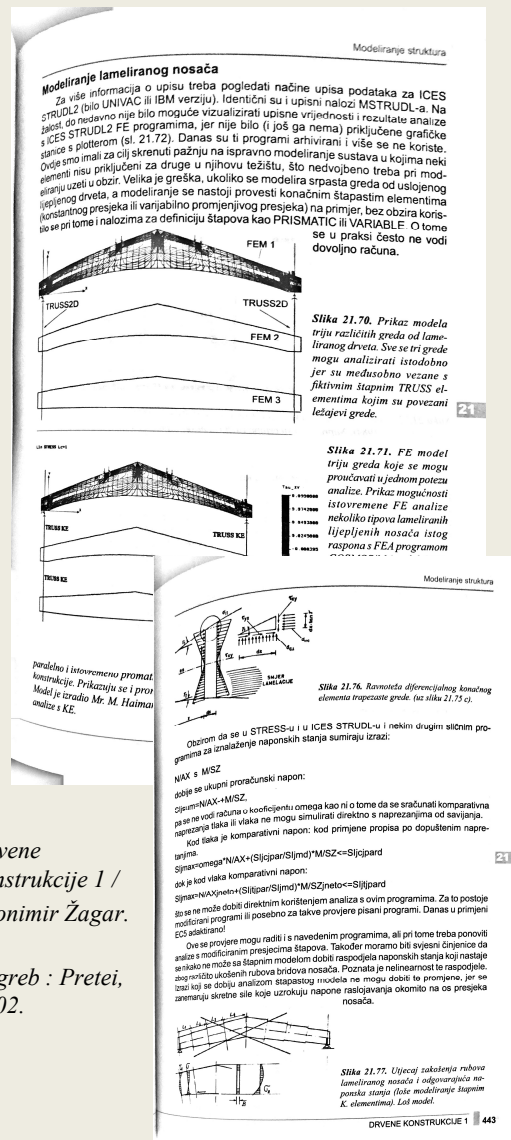
Presjek iz arhitektonskog projekta



Drveni lamelirani nosač



# Modeliranje nosača – anizotropne ploče opterećene u svojoj ravnini



Drvene konstrukcije 1 / Zvonimir Žagar.

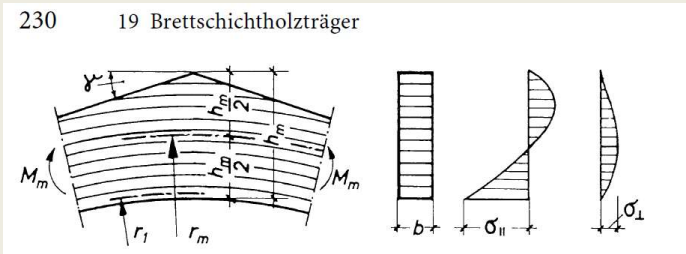
Zagreb : Pretei, 2002.

-Iz knjige prof. Žagara -

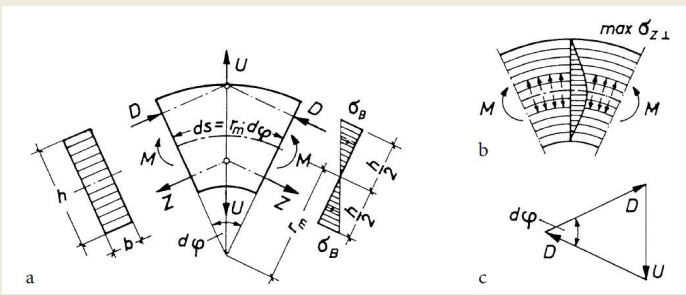
-‘Velika je greška, ukoliko se modelira srpasta greda od uslojenog lijepljenog drveta, a modeliranje se nastoji provesti konačnim elementima konstantnog presjeka ili varijabilno promjenjivog... O tome se u praksi često ne vodi dovoljno računa’

-‘Poznata je nelinearnost te raspodjele. Izrazi koji se dobiju analizom štapnog modela ne mogu dobiti te promjene (raspodjela naponskih stanja koji nastaje zbog različito ukošenih rubova bridova nosača), jer se zanemaruju skretne sile koje uzrokuju napone raslojavanja okomito na os nosača.’ – neispravno modeliranje rezultira izrazito netočnom raspodjelom naprezanja nosača!

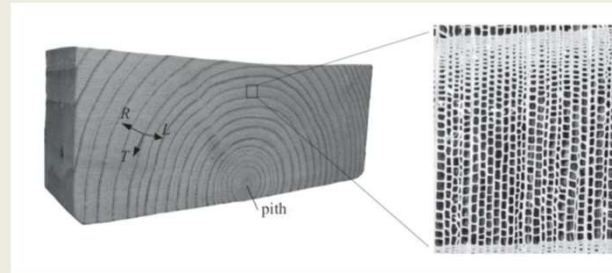
Ispravan prikaz raspodjele naprezanja u sljemenu srpastog nosača (Werner, Zimmer - Holzbau 2)



Prikaz okomitih naprezanja srpastog nosača (Werner, Zimmer - Holzbau 2)



# Modeliranje drva



- Karakteristične osi definirane su s tri (3) uzajamno okomite ravnine simetrije; uzdužna (L), radijalna (R) i tangencijalna (T). Prostorni prikaz materijala u kontinuumu na makro značaju - pretpostavljajući male deformacije i materijalnu ortotropiju s L, R i T ravninama glasi –

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

- Linearna elastičnost – matična formulacija
  - Koristeći zapis i svojstvo simetrije dobivamo matični zapis konstitutivnih odnosa –

$$[\sigma_{ij}] = [D_{ij11} D_{ij22} D_{ij33} D_{ij12} D_{ij13} D_{ij23}] \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{12} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{23} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1113} & D_{1123} \\ D_{2211} & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2213} & D_{2223} \\ D_{3311} & D_{3322} & D_{3333} & D_{3312} & D_{3313} & D_{3323} \\ D_{1211} & D_{1222} & D_{1233} & D_{1212} & D_{1213} & D_{1223} \\ D_{1311} & D_{1322} & D_{1333} & D_{1312} & D_{1313} & D_{1323} \\ D_{2311} & D_{2322} & D_{2333} & D_{2312} & D_{2313} & D_{2323} \end{bmatrix}$$

- Kako i zapis pokazuje, za potpun opis materijalne anizotropije matrica D je u potpunosti ispunjena, dakle 21 član je potreban za opis materijalne anizotropije.



- Određenim transformacijama iz literature (*Ottoson N., Ristinmaa M., The Mechanics of Constitutive Modeling, Elsevier, 2005*) završili bismo na jednakostima gdje svaka daljna transformacija sustava završava jednkim odnosima, tada za materijal koji posjeduje tri (3) ortogonalne ravnine elastične simetrije kažemo da je ortotropan.

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & 0 & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & D_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix}$$

- Iz zapisa možemo zaključiti da ortotropan materijal posjeduje devet (9) neovisnih elastičnih varijabli. Koristeći gore zapis dolazimo do zaključnog zapisa materijalne ortotropije -

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{12} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}$$

- Kako je matrica simetrična, možemo zapisati –

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1} \quad \frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2}$$



- Cijelovit skup elastičnih parametara za jelovinu i smreku sadržani su u tablici. Parametri autora Berbom, Dahl temeljeni su na recentnim istraživanjima mekih drva s gustoćom 398kg/m<sup>3</sup> i vlažnosti 12%.  
(Danielsson H., *Perpendicular to grain fracture analysis of Wooden structural elements - models and application, Lund University, 2013*)

Vrsta	$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$G_{RT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{RL}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{TL}$	$\nu_{RT}$	$\nu_{TR}$
Smreka	9040	790	340	640	580	30	0.5	0.11	0.66	0.06	0.84	0.34
Smreka	10700	710	430	500	620	23	0.38	0.03	0.51	0.03	0.51	0.31
Smreka	13500	890	480	500	700	30		0.03	0.54			0.6
Bor	11000	1000	500		680	70	0.46	0.03	0.44	0.02	0.61	0.31

- Os uzdužno na vlakanca EL u velikoj je mjeri veće krutosti u odnosu na ostale dvije osi. Zbog te pojave, često se materijalni modeli pretpostavljaju kao transverzno izotropni, tj. Postavlja se dioba između samo dvije međusobno okomita smjera; uzdužno na vlakanca i okomito na vlakanca. (Pojava se postavlja implicate u ravninskim materijalnim modelima, gdje je T=0)
- Ovakvo pojednostavljene označava pretpostavku homogenog materijalnog modela i ignoriranje cilindričnih godova rasta!
- Orijentacija vlakancaca unutar lamela ili nosača uobičajeno nije homogena, zbog cilindrične prirode rasta drva.





## • Weibull – teorija otpornosti drveta na okomita vlačna naprezanja

- Karakterističnosti mehanizma otkazivanja materijala temeljno su različiti od onih nađenih u teoriji metalne plastičnosti. Ponašanje u vlačnim naprezanjima najlakše je opisati kao krto ponašanje. Weibull-ova teorija omogućava probabilistički pristup analizi čvrstoće. (Thelandersson S., Larsen H.J., *Timber Engineering*, John Wiley & Sons Ltd, 2003) Općenito, čvrstoća okomito na vlakanca u velikoj mjeri ovisi o naprezanom volumenu - što je volumen veći, veća je vjerojatnost postojanja određenih materijalnih nepravilnosti (Weibull W., *A Statistical theory of the strenght of Materials*, Royal Technical University, 1939)
- Osnovna postavka teorije je da je materijal idealno krto u smislu da općeniti otkaz nosivosti nastupa kada je otpornost najslabije karike dosegnuta. Ovisnost čvrstoće o tzv. naprezanom volumenu gdje je ključan doprinos vlačnih naprezanja okomito na vlakanca čini teorijom vrlo pogodnom u analizi čvrstoće. Ovo čini teoriju izuzetno korisnom u primjeni u drvenim konstrukcijama s obzirom na kvrge, nepravilnosti godišnjeg rasta i slično. Teorija je osnova zbog koje je nosače nemoguće ispitivati u mjerilu!
- Weibull naprezanje je fiktivno homogeno naprezanje u volumenu 1 koji iskazuje jednaku vjerojatno otkazivanja kao stvarno heterogeno stanje naprezanja volumena i definirano kao

$$\omega_{wei} = \left( \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \lambda^m(x, y, z) d\Omega \right)^{\frac{1}{m}}$$

- Razina heterogenosti u distribuciji naprezanja možemo izratiti pomoću koeficijenta  $k_{dis}$  koji definiramo kao omjer između maksimalnog naprezanja tijela  $\sigma_{max}$  i Weibull naprezanja  $\sigma_{wei}$  pomoću izraza

$$k_{dis} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{wei}} = \left( \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \lambda^m(x, y, z) d\Omega \right)^{\frac{-1}{m}}$$

- Gdje je  $k_{dis} = 1$  za homogenu distribuciju naprezanja i  $k_{dis} > 1$  za sve ostale distribucije.
- Važno je prepoznati da niti jedan kriterij čvrstoće neće cjelovito zadovoljiti u zonama značajnog doprinosa naprezanja, jer uobičajeno pretpostavljaju da je materijal homogen. Kriteriji čvrstoće su nesposobni predstavljati distribuciju naprezanja koja se odvija u drvetu ili raznolikost svojstava unutar materijala. Dolična upotreba kriterija otkazivanja je predviđanje lokacije na kojoj se razvija lomna površina, nego li kao sredstvo predviđanja opterećenja pri kojem dolazi do sloma.



## Dimenzioniranje nosača prema HRN EN 1995 – provjera okomitih vlačnih naprezanja

- U trenutno važećoj eurocode normi HRN EN 1995 ne postoji postupak proračuna ojačanja na prekoračenje okomitih vlačnih naprezanja te je stoga potrebno razmotriti postupak opisan u njemačkom nacionalnom dodatku norme DIN EN 1995/NA
- Iz norme DIN EN 1995/NA 6.8.5. – dokaz navojne šipke (NŠ) na prekoračenje okomitih vlačnih naprezanja
  - Elemente ojačanja potrebno je postaviti simetrično, na jednolikom rasponu, na mjestima najvećih okomitih naprezanja, po cijeloj dužini kružnog luka (isključiti sam presjek u sljemenu iz ojačanja)
  - Ojačanja je potrebno rasporediti unutar jednakih segmenata (npr. duljina luka/4)
  - Ojačanja se nalazi na pravcu određenim radijusom zakrivljenosti (ne okomica na izvodnice nosača)

$$F_{t,90,d} = \frac{\sigma_{t,90,d} b^2 a_1}{640n}$$

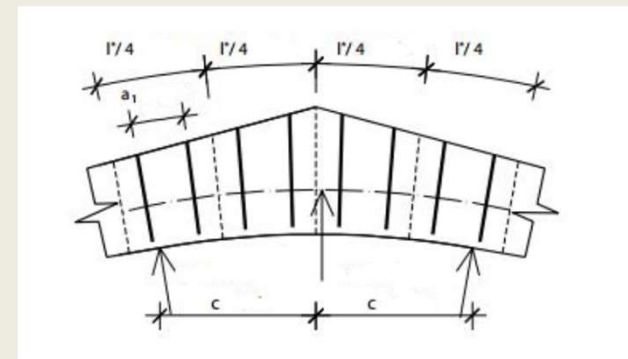
Maksimalna sila u elementu ojačanja

$$\tau_{ef,d} = \frac{2F_{t,90,d}}{\pi l_{add} d_r}$$

Uvjet otpornosti, posmično/granično naprezanje između ljepljenog spoja i NŠ

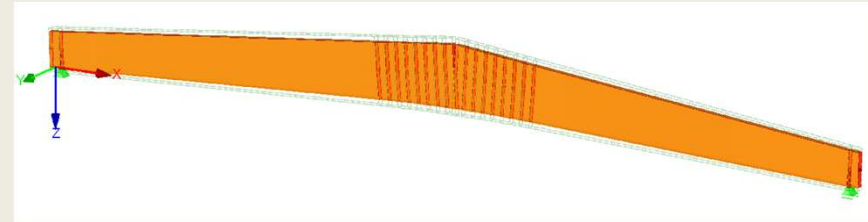
$$\frac{F_{t,90,d}}{R_{t,u,d}}$$

Dokaz NŠ



Geometrija ojačanja unutar  
sljemenog volumena sedlastog  
nosača

# Dimenzioniranje nosača prema HRN EN 1995 – provjera okomitih vlačnih napreznaja



Provjera okomitih vlačnih napreznaja u sljemenom volumena nosača – iz glavnog projekta

Otpornost  $N\check{S} = 75.28$  kN

DESIGN - ALL - DETAILS			
NA.6.8.5. Rods with wood screw thread			
Governing	Location	X	18.325 m
	Result Combinations	RC	RC10
Design Internal Forces	Normal Force	$N_d$	-0.02 kN
	Shear Force	$V_{z,d}$	-0.28 kN
	Moment	$M_{y,d}$	2669.01 kNm
Design	Beam Depth	$h_{ap}$	267.70 cm
	Arc Radius	$r_{in}$	75.000 m
	Arc Radius	$r$	76.339 m
	Inclination Angle	$\alpha_{ap}$	6.00 °
	Aux. Factor	$k_5$	0.021 Eq. (6.57)
	Aux. Factor	$k_6$	0.121 Eq. (6.58)
	Aux. Factor	$k_7$	0.177 Eq. (6.59)
	Factor	$k_p$	0.025 Eq. (6.56)
	Moment at Ridge Cross-Section	$M_{ap,d}$	2669.01 kNm
	Beam Width	$b_{ap}$	24.00 cm
	Transversal Tension Stress	$\sigma_{t,90,d}$	237.27 kN/m <sup>2</sup> Eq. (6.54)
	Steel Rod - Nominal Diameter	$d$	1.60 cm
	Steel Rod - Core Area	$A_s$	1.13 cm <sup>2</sup>
	Steel Rod - Tensile Strength	$f_{t,b,k}$	800.00 N/mm <sup>2</sup> EN 1993-1-8
Steel Rod - Ultimate Limit State	$F_{t,Rk}$	81.43 kN Calculated, Tab.3.4(EN 1993-1-8)	

Napreznaje okomito na vlakanca u sljemenom volumenu (apex volume) = 0.237 MPa

Steel Rod - Partial Factor	$\gamma_{Mc}$	1.250	EN 1993-1-8
Steel Rod - Tension Resistance (Failure)	$F_{t,Rk}$	65.14 kN	Tab.3.4(EN 1993-1-8)
Steel Rod - Withdrawal Parameter (Inside Quarters)	$f_{t1,k,i}$	3.70 N/mm <sup>2</sup>	DIN EN 1995-1-1/N A:2013-08, NA.6.8.5, NA.3
Steel Rod - Withdrawal Parameter (Outside Quarters)	$f_{t1,k,a}$	3.70 N/mm <sup>2</sup>	DIN EN 1995-1-1/N A:2013-08, NA.6.8.5, NA.3
Modification Factor	$K_{mod}$	0.900	Tab. 3.1
Partial Factor	$\gamma_M$	1.300	Tab. 2.3
Steel Rod - Withdrawal Parameter	$f_{t1,d,i}$	2.56 N/mm <sup>2</sup>	Eq. (2.14)
Steel Rod - Withdrawal Parameter	$f_{t1,d,a}$	2.56 N/mm <sup>2</sup>	Eq. (2.14)
Beam Height in Transversal Tension Area (Inside Quarters)	$h_{c,i}$	243.78 cm	
Beam Height in Transversal Tension Area (Outside Quarters)	$h_{c,a}$	237.98 cm	
Lamination Thickness	$t$	4.00 cm	
Steel Rod - Half of Withdrawal length (Inside Quarters)	$l_{ad,i}$	119.89 cm	DIN EN 1995-1-1/N A:2013-08, NA.6.8.5, NA.3
Steel Rod - Half of Withdrawal Length (Outside Quarters)	$l_{ad,a}$	116.99 cm	DIN EN 1995-1-1/N A:2013-08, NA.6.8.5, NA.3
Steel Rod - Withdrawal Resistance (Inside Quarters)	$R_{ak,F,i,d}$	77.14 kN	
Steel Rod - Withdrawal Resistance (Outside Quarters)	$R_{ak,F,a,d}$	75.28 kN	
Length of Transversal Tension Area	$l_{s1}$	7.195 m	
Number of Rods Within $a_1$	$n$	2	
Number of Rods (Inside Quarters)	$n_{a1,i}$	2	
Number of Rods (Outside Quarters)	$n_{a1,a}$	2	
Distance of Rods (Inside Quarter)	$a_{1,i}$	1.799 m	
Distance of Rods (Outside Quarter)	$a_{1,a}$	1.799 m	
Design Value of Tensile Force (Inside Quarters)	$F_{t,90,i,d}$	51.21 kN	DIN EN 1995-1-1/N A:2013-08, Eq. (NA.101)
Design Value of Tensile Force (Outside Quarters)	$F_{t,90,a,d}$	34.16 kN	DIN EN 1995-1-1/N A:2013-08, Eq. (NA.102)

Rezultantna sila u  $N\check{S} = 34.16$  kN



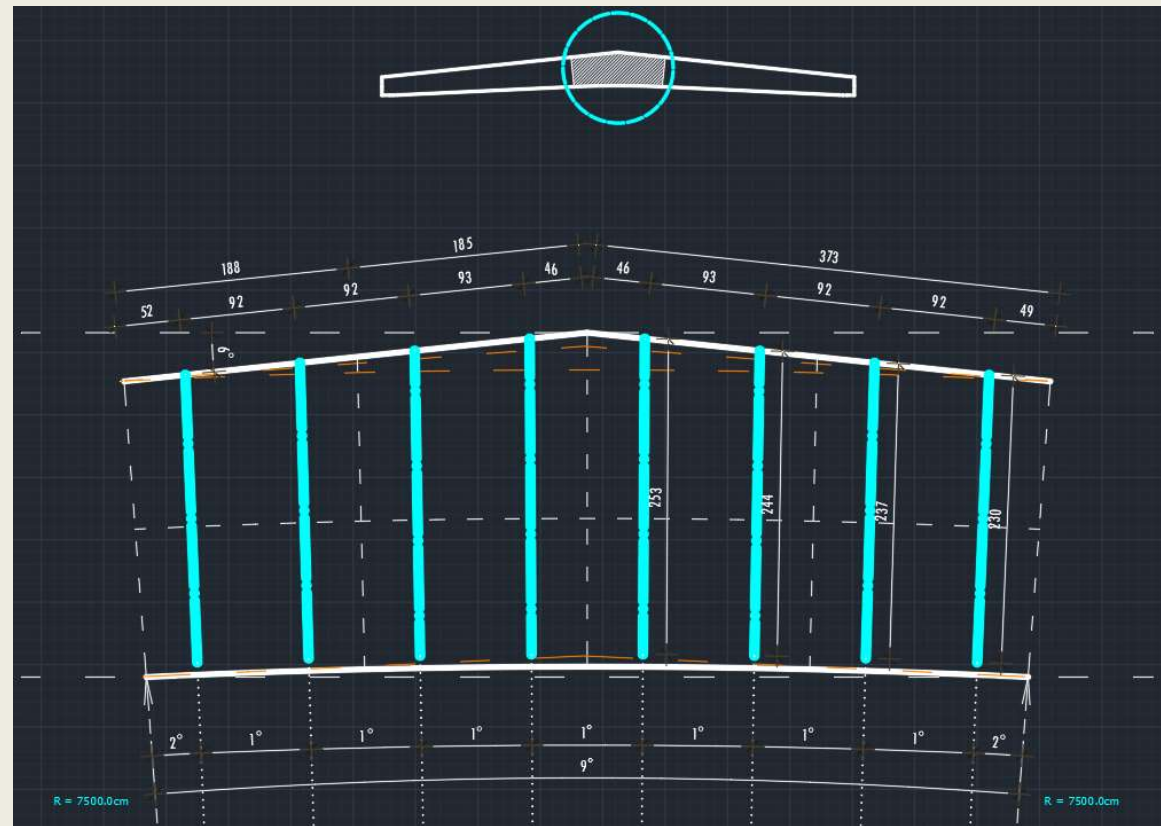
## Dimenzioniranje nosača prema HRN EN 1995 – provjera okomitih vlačnih napreznja

- NŠ se ugrađuju uvrtaњem u prethodno izbušene rupe  $\sim 0.8d$ . Uvrtaњe se izvodi pneumatskim ili mehaničkim uvrtačem.

- Navojna šipka SPAX GWS M16



### Raspored NŠ M16 za ojačanje nosača



# Numerički model drvenog nosača

Nosač je modeliran kao linearno elastičan s ortotropnim materijalnim karakteristikama pomoću 'inženjerskih konstanti'. (bez upisivanja kompletne matrice krutosti) Opisana su tri modula elastičnosti  $E_1; E_2; E_3$ , Poisson-ov omjer  $\nu_{12}; \nu_{13}; \nu_{23}$  i tri modula posmika  $G_{12}; G_{13}; G_{23}$  temeljem principijalnih materijalnih osi drva. Elastičnost materijala je definirana

Material Constants

Modulus of elasticity

$E_x$  : 10700.0 [MPa]

$E_y$  : 710.0 [MPa]

$E_z$  : 430.0 [MPa]

Shear modulus

$G_{yz}$  : 23.0 [MPa]

$G_{xz}$  : 620.0 [MPa]

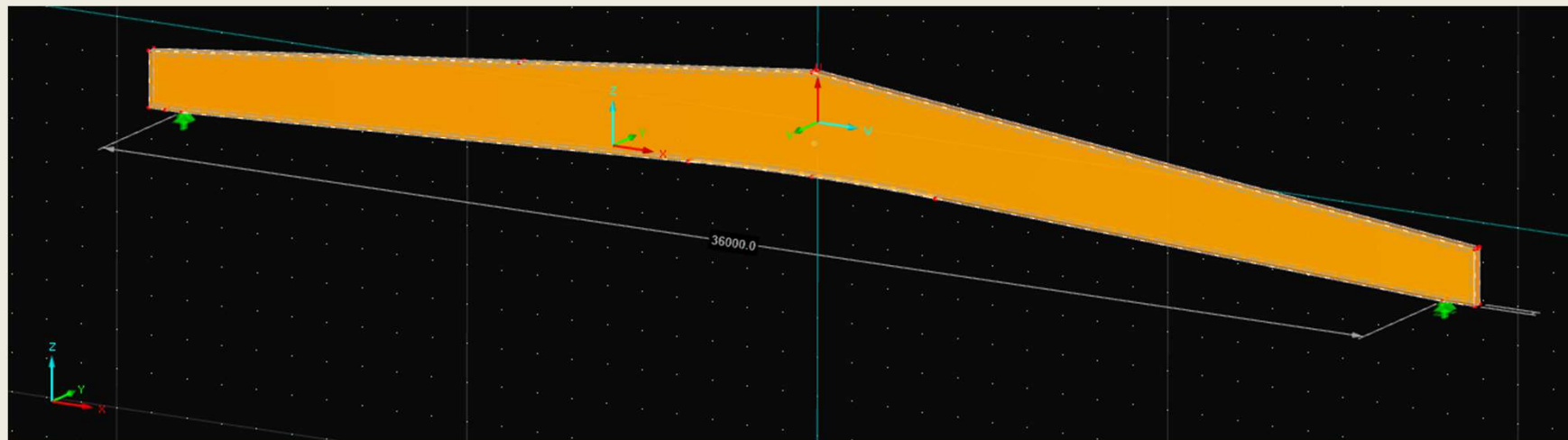
$G_{xy}$  : 500.0 [MPa]

Poisson's ratio

$\nu_{yz}$  : 0.510 [ ]      $\nu_{yz}$  : 0.309 [ ]

$\nu_{xz}$  : 0.510 [ ]     $\nu_{xz}$  : 0.020 [ ]

$\nu_{xy}$  : 0.380 [ ]     $\nu_{yx}$  : 0.025 [ ]



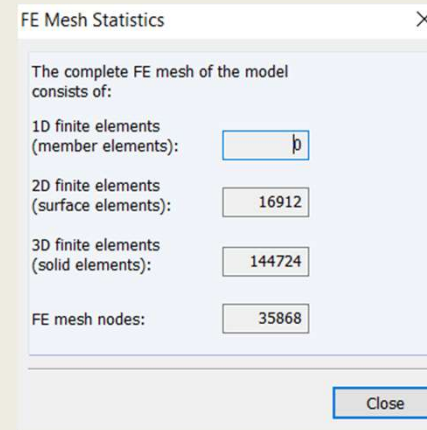
Materijalna ortotropija zadaje se pomoću elastičnih konstanti i lokalnog koordinatnog sustava upisanog u 3d SOLID element

Vrsta	$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$G_{RT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{RL}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{TL}$	$\nu_{RT}$	$\nu_{TR}$
Smreka	10700	710	430	500	620	23	0.38	0.03	0.51	0.03	0.51	0.31

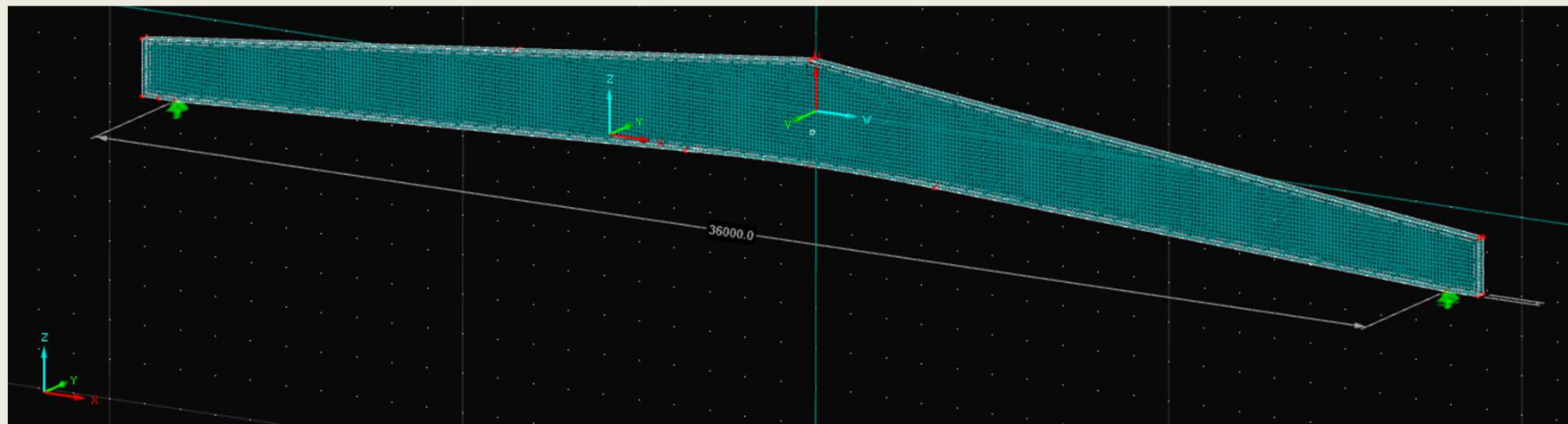


# Numerički model drvenog nosača

- Analiza se temelji isključivo na okomitim naprezanjima u sljemenom volumenu te isključujemo mogućnost sloma materijala
- Numerički model je u potpunosti homogen. Lamelle, doprinos vlažnosti i prirodne mane drva su izostavljene
- Numerički model modeliran je s pretpostavkom ortotropnog materijala
- Analiza se temelji na naprezanjima poprečno na vlakanca i utjecaj ojačanja na potencijalne promjene naponskog stanja



- Izrazito zahtjevna računalna analiza
- Nemoguće izraditi analizu s malim brojem MKE

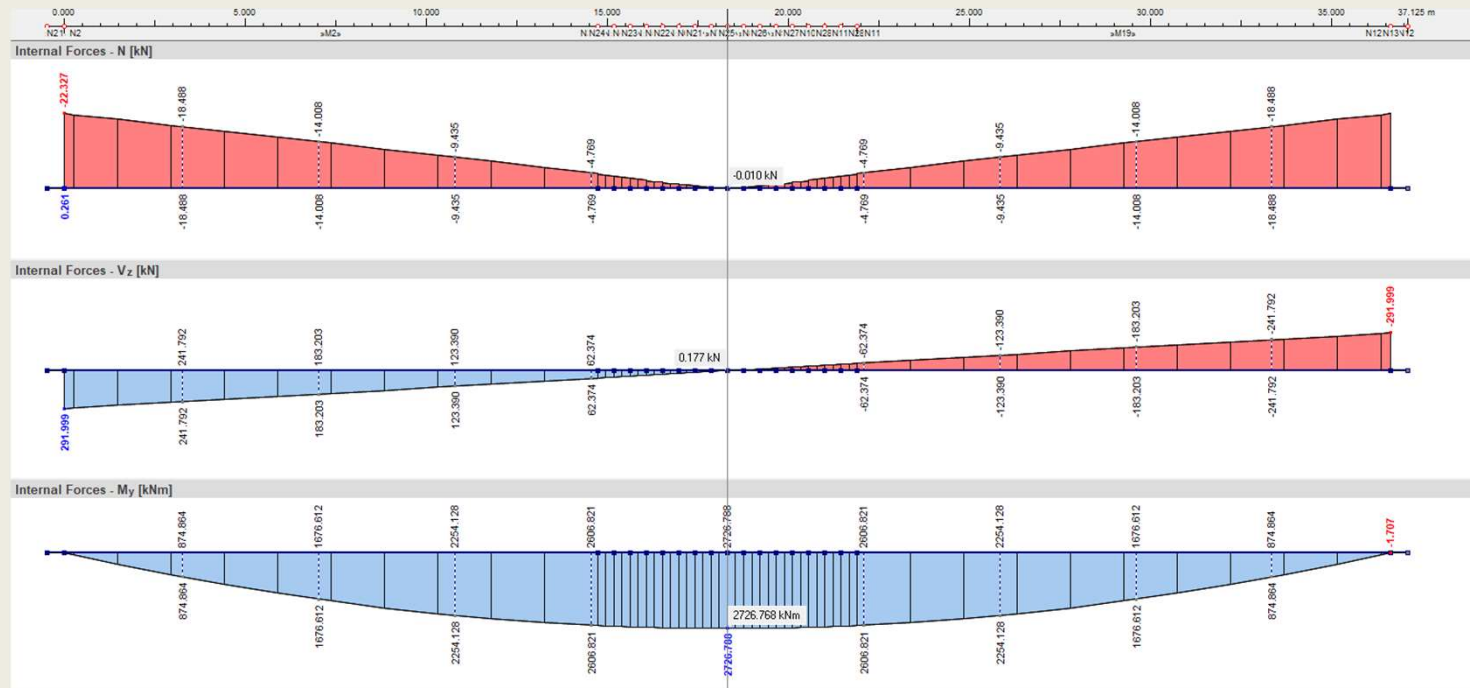


MKE nosača



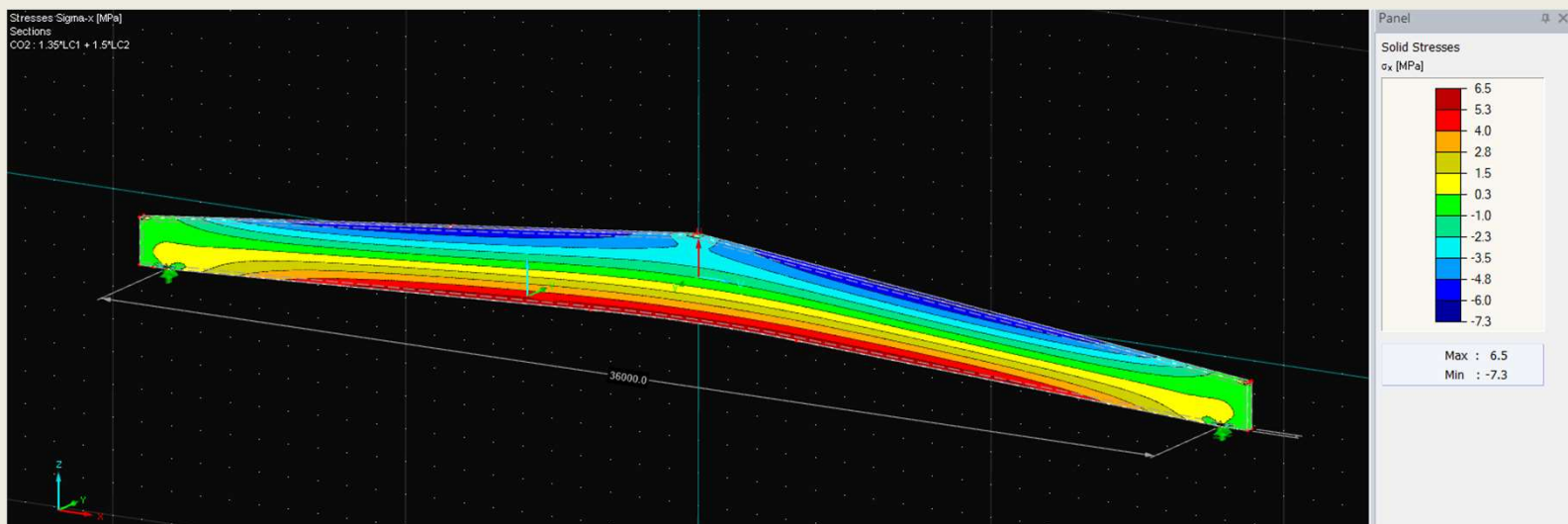
# Numerički model drvenog nosača

- Unutarnje sile u nosaču –
  - $M_{y,d} = 2726.768 \text{ kNm}$  (savijanje u području sljemenog volumena)
  - $V_{z,d} = 291.99 \text{ kN}$  (na ležaju)
  - $N = 22.33 \text{ kN}$
- Vlačno naprezanje okomito na vlakanca –
  - $s_{t,90,d} = 0.23 \text{ MPa} > f_{t,90,d} \sim 0.15 \text{ MPa}$

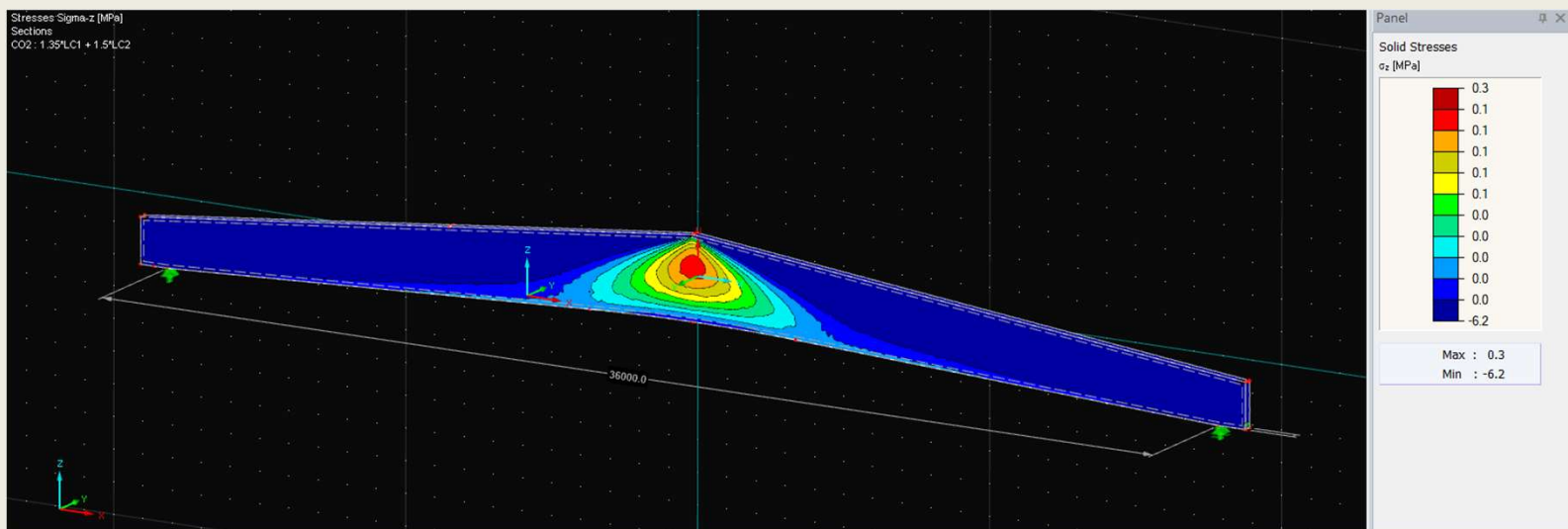


# Numerički model drvenog nosača – neojačan nosač

Naprezanje uzdužno na vlakanca



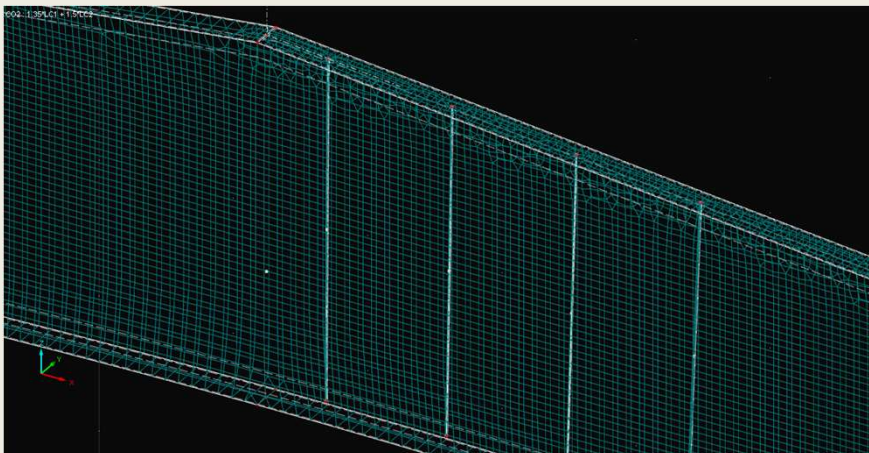
Naprezanje poprečno na vlakanca



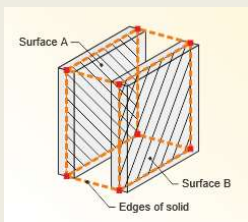
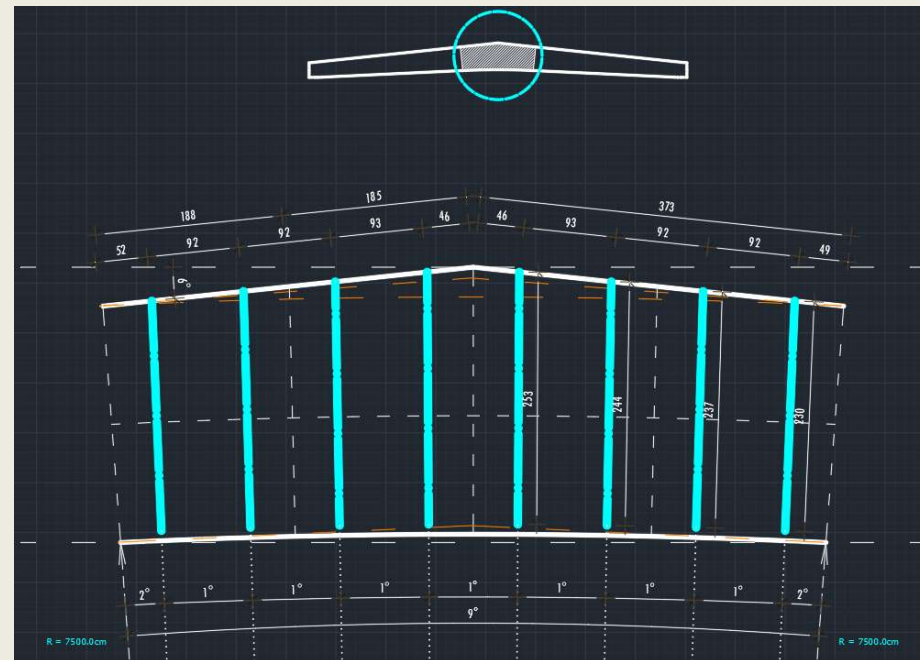


# Numerički model drvenog nosača – ojačanje nosača s NŠ

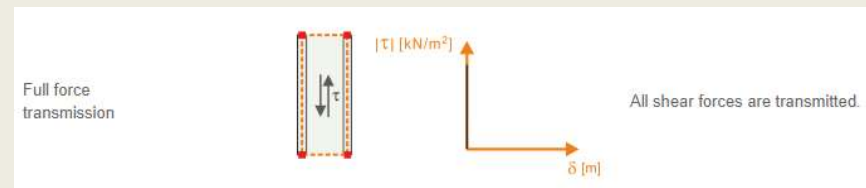
- Modelirana ojačanja u nosaču i MKE



- Geometrija postavljanja ojačanja u sljemenom volumenu nosača

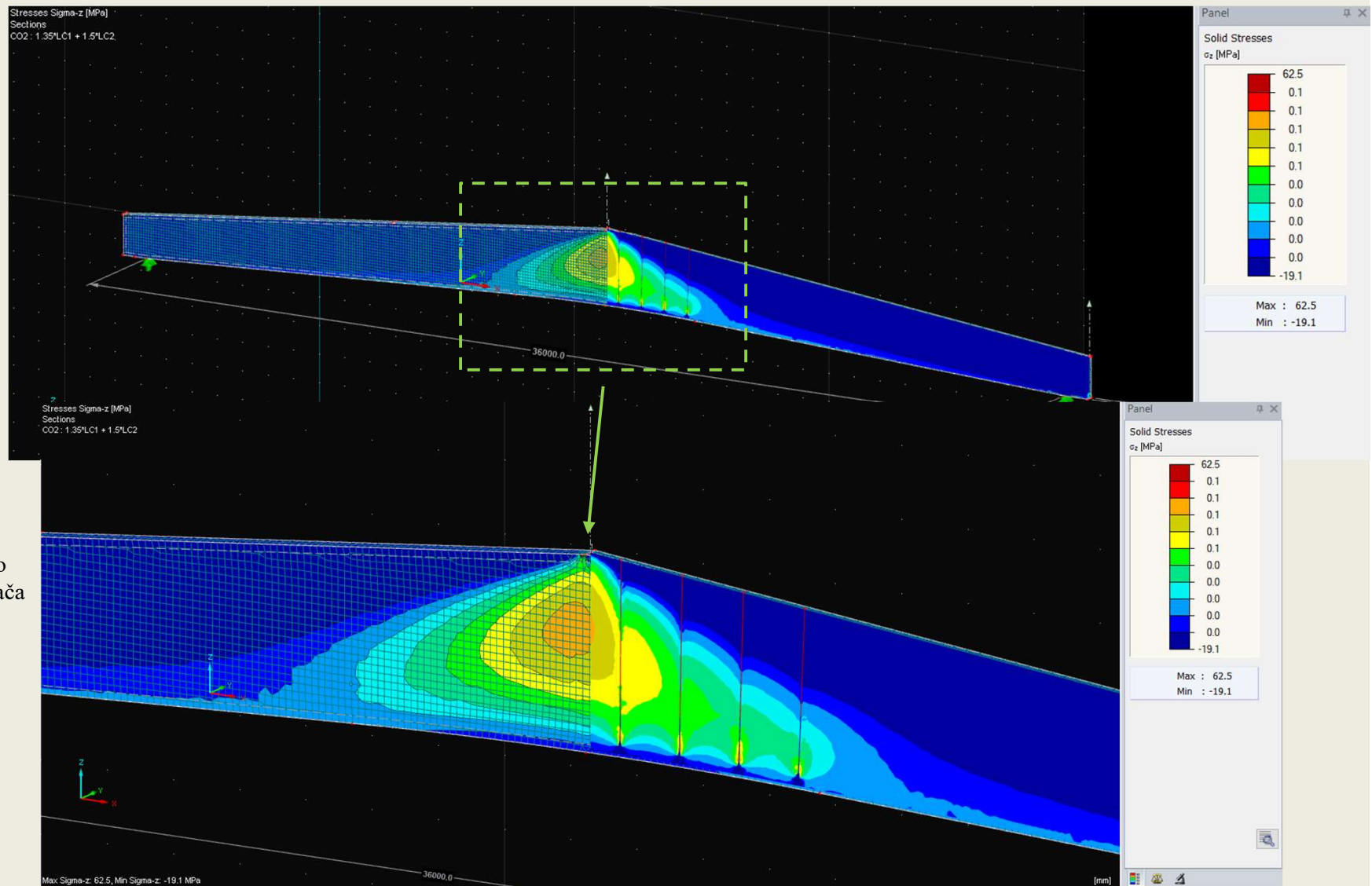


- Doprinos ljepila je izostavljen
- Izjednačeni stupnjevi slobode čvorova MKE s čvorovima NŠ
- Omogućen je 'Full-force transmission' između oboda plašta NŠ i izbušene rupe unutar nosača



# Numerički model drvenog nosača – ojačanje nosača s NŠ

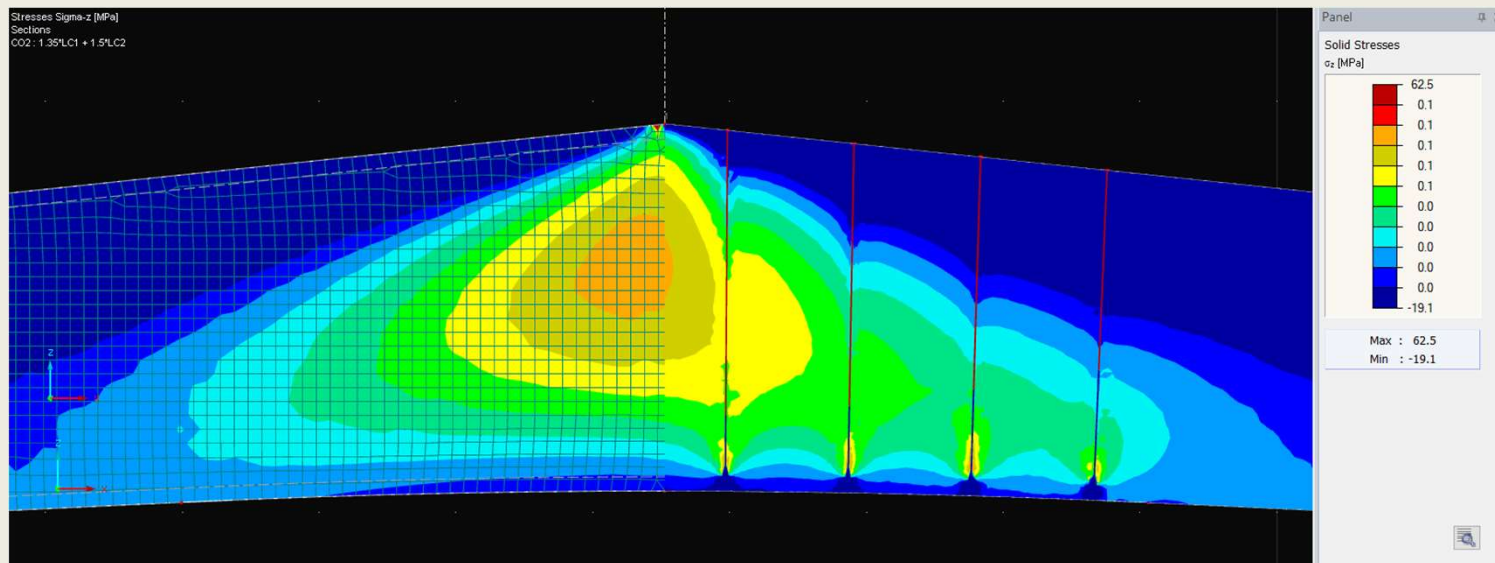
Naprezanje poprečno na vlakanca



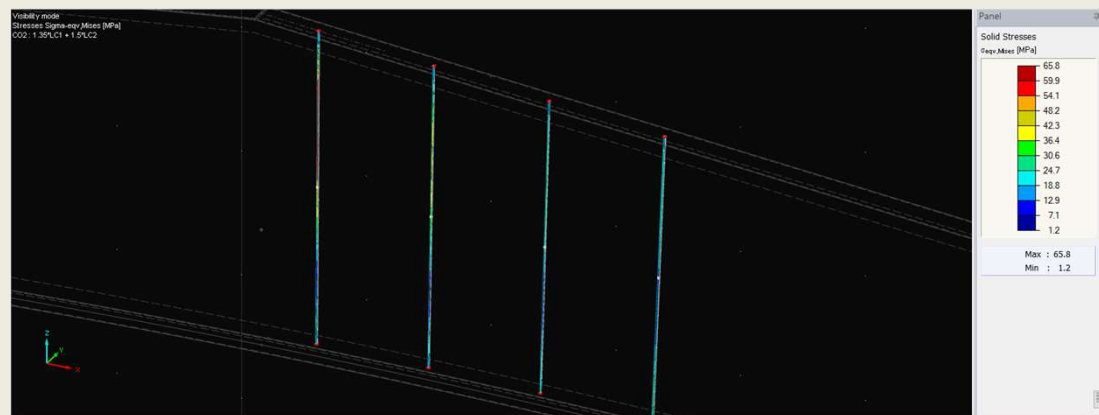
Modelirano ojačanje samo polovine nosača – ‘ušteta’ vremena računanja



# Numerički model drvenog nosača – ojačanje nosača s NŠ

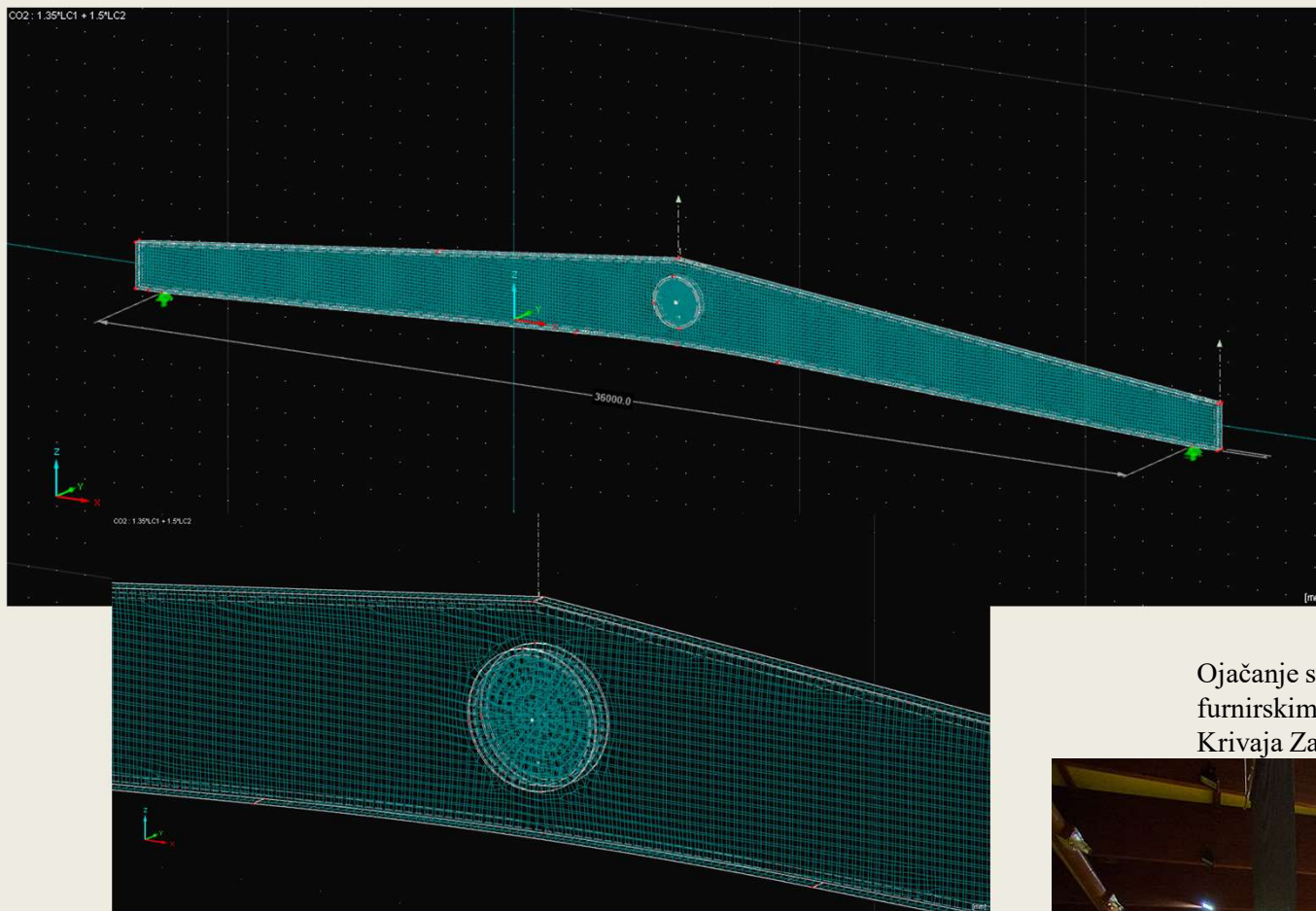


Prikaz uzdužnog presjeka nosača, ojačanja postavljena u sljemenom volumenu



Sx naprezanja NŠ – max 65.8 MPa

# Numerički model drvenog nosača – ojačanje nosača s furnirskim pločama (Baubuche LVL t=3cm)



MKE nosača ojačan s furnirskim pločama

Furnirske ploče lijepe se za nosač s rezorcinskim ljepilom, a pritisak za ljepljenje izvodi se čavljanjem. Prethodno, lice nosača potrebno je očistiti, poblanjati i otprašiti. Utrošak ljepila je otprilike 500 do 600 g/m<sup>2</sup>, dok je utrošak čavala 1/60cm<sup>2</sup> ljepljene površine.

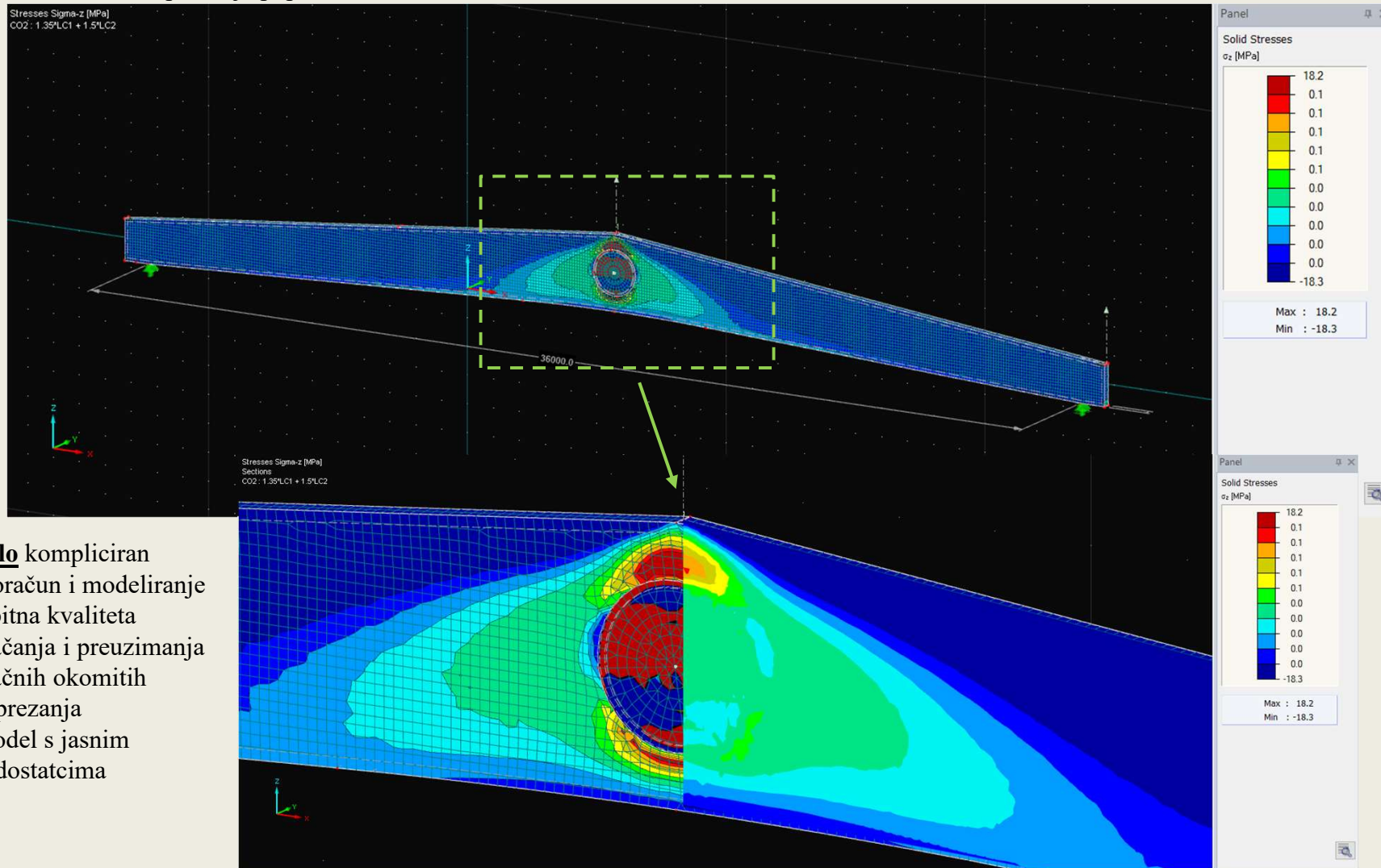


Ojačanje sljemenog volumena nosača furnirskim pločama u Virovitici, izvođač Krivaja Zavidovići d.o.o., cca 2004 godina



# Numerički model drvenog nosača – ojačanje nosača s furnirskim pločama

Naprezanje poprečno na vlakanca



- **Vrlo** kompliciran proračun i modeliranje
- Upitna kvaliteta ojačanja i preuzimanja vlačnih okomitih naprezanja
- Model s jasnim nedostacima



## Numerički model drvenog nosača – analiza

- Obzirom na prirodne karakteristike drva potrebni su relativno kompleksni modeli kojima bih bilo moguće opisati njegovo pravo ponašanje. Prirodno ponašanje uključuje, ne samo modeliranje linearnog ili nelinearnog materijalnog modela, već karakteristike prirodnih mana drva - čvorova, vlažnost, neujednačeno pružanja vlakana. – vrlo bitno
- U proračunskim situacijama u kojima su nosači zakrivljene geometrije većih raspona nezaobilazno je nosač opisati u jednom od računalnih programa te metodom konačnih elemenata dokazati naponsko stanje nakon postupka ojačanja.
- Možemo zaključiti da navojne šipke omogućavaju zadovoljavajuć stupanj redukcije okomitih vlačnih napreznja, iako je sam postupak dokazivanja rezidualnih napreznja vrlo složen i dugotrajan, ali nezaobilazan u dokazivanju globalne otpornosti nosača.
- Drvo ima izrazito drugačije karakteristike u smjeru paralelno i okomito na vlakana. Poprečno na vlakana drvo je slabo, u smislu vlačne čvrstoće i u odnosu na otvaranje pukotina. (Lom na prekoračenje vlačne otpornosti smatramo trenutnim otvaranjem pukotina – ‘krti lom’) Vlačna otpornost samo je nekoliko postotaka one paralelno na vlakana, te postoji značajna razlika u ponašanju loma elementa. Stoga je, u modeliranju konstrukcija, potrebno izbjeći vlačna napreznja okomito na vlakana i posmik. Unatoč jasnim opasnostima, nekada nije moguće izbjeći vlačna napreznja okomito na vlakana i jasno je da su havarije nastale upravo iz razloga što nije potpuna pozornost pridodana ovom fenomenu.
- Mogući razlog u nesigurnosti projektiranja jest manjak znanja ili nedostatak razumijevanja o potencijalnim opasnostima. Također, vrlo je mali broj relevantnih ispitivanja i sama metodologija eksperimentalnih testiranja je vrlo neprecizna. Upitna je, međutim, i inženjerska praksa pretpostavljanja podudarnosti vlakana i smjera vlakana samog elementa. Nerijetko, pretpostavlja se da se ove orijentacije podudaraju bez ispitivanja što pridodaje nesigurnosti u projektiranju.



# Fotografije ugradnje ojačanja – tvornica lijepljenih lameliranih nosača Drvene konstrukcije d.o.o., Voćin



# Fotografije ugradnje ojačanja – tvornica lijepljenih lameliranih nosača Drvene konstrukcije d.o.o., Voćin





# Hvala!

