



S V E U Č I L I Š T E U S P L I T U

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Dr. sc. Damir Jelaska, red. prof.

Dr. sc. Srđan Podrug, doc.

Dr. sc. Frane Vlak, doc.

**PRORAČUN INTEGRITETA PLINSKOG CJEVOVODA ZA CIJEV C3  
IZVEDBE SUSTAVA SEKUNDARNOG OTPRAŠIVANJA POGONA  
ČELIČANE ŽELJEZARE SPLIT**

Split, 4. studenog 2008.

## PROJEKTNI ZADATAK

### ZA IZRADU PRORAČUNA INTEGRITETA PLINSKOG CJEVOVODA FAZE II i III IZVEDBE SUSTAVA SEKUNDARNOG OTPRAŠIVANJA POGONA ČELIČANE ŽELJEZARE SPLIT

Za potrebe izvedbe novog cjevovoda za odvod plinova sustava sekundarnog otprašivanja pogona čeličane u sklopu Željezare Split, potrebno je izraditi kontrolni proračun integriteta cjevovoda, odnosno kontrolu naprezanja, krutosti i elastične stabilnosti istog.

Proračun je potreban radi definiranja moguće potrebnih dodatnih ukrućenja cjevovoda, radi uvjetovanog položaja oslonaca.

Cjelokupan cjevovod novog sustava sekundarnog otprašivanja sastoji se od tri cijevi: jedne cijevi unutarnjeg promjera  $D_{un}=1210$  mm (oznaka C1) i dvije cijevi unutarnjeg promjera  $D_{un}=2150$  mm (oznaka C2 i C3).

Budući da su cijevi konstrukcijski iste, za karakteristične elemente većih cijevi potrebno je izvršiti isti tip proračuna kao i za cijev C1:

- kontrolni proračun integriteta s obzirom na preliminarne konstrukcijske postavke i definirani razmak i tip oslonaca
- kontrolu naprezanja, krutosti i elastične stabilnosti
- kontrolu vijaka prirubnica
- kontrolu zavarenih spojeva

Projektni zadatak izrađen je prilikom definiranja potrebnih parametara za cijev C1 i načelno je važeći.

S obzirom na djelomično izmijenjene tehničke podatke za cijevi C2 i C3, važeći tehnički detalji koji se odnose na cijevi C2 i C3 su sljedeći:

- cijev
  - unutarnji promjer cijevi: 2150 mm
  - debljina stijenke cijevi: 5 mm
  - materijal cijevi: Č.0361
  - radna temperatura: 100 °C
  - zavari: 4 mm
- prirubnice
  - vanjski promjer: 2440 mm
  - unutarnji promjer: 2160 mm
  - debljina lima: 10 mm
  - materijal: Č 0361
  - radna temperatura: 100 °C
  - broj spojnih vijaka: 36 (rupa u prirubnici  $\varnothing$  22 mm)
  - vijci M20 prema HRN M.B1.054 (8.8)
  - zavari: 4 mm, kutni dvostrani
- ostali opterećujući elementi
  - izolacija cijevi: 75 kg/m
  - prašina u cijevi: 60 kg/m, nataloženo u dinjem kvadrantu
- ostali prateći detalji
  - završni međuprirubnički razmak: 4 mm
  - brtva: Teadit 2027, debljina prije montaže 8 mm

Karakteristični ravni segment cijevi izveden je kao element ukupne duljine 3050 mm, a izvodi se od dva ravna elementa duljine 1520 mm koji su po obodu čeonu zavareni, te od dvije prirubnice na krajevima. Maksimalni raspon točaka oslanjanja cijevi iznosi 20 m. Tip oslonaca i njihov položaj prikazani su u priloženom tlocrtu.

## 1. ULAZNI PODACI

### MATERIJALNE KARAKTERISTIKE Č0361 (St 37-2)

Specifična masa:  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Modul elastičnosti pri 20 °C:  $E_0 = 210 \text{ GPa}$

Promjena modula elastičnosti u ovisnosti o temperaturi:

$$E = E_0 + \beta \Delta T$$

$\beta$  – koeficijent promjene modula elastičnosti u ovisnosti o temperaturi

$\Delta T$  – temperaturna razlika u odnosu na referentnu temperaturu

Za čelik:  $\beta = -37 \text{ MPa}$

Referentna temperatura:  $T_0 = 20 \text{ °C}$

Temperatura cijevi:  $T = 100 \text{ °C}$

$$\Delta T = T - T_0 = 100 - 20 = 80 \text{ °C}$$

$$E = E_0 + \beta \Delta T = 210 + (-37) \cdot 10^{-3} \cdot 80 = 207 \text{ GPa}$$

### GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE CJEVOVODA

#### Cijevi

Vanjski promjer cijevi:  $D = 2160 \text{ mm}$

Unutarnji promjer cijevi:  $d = 2150 \text{ mm}$

Površina poprečnog presjeka:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 - d^2 = \frac{\pi}{4} 2160^2 - 2150^2 = 33851 \text{ mm}^2$$

Aksijalni moment tromosti:

$$I_y = \frac{\pi}{64} D^4 - d^4 = \frac{\pi}{64} 2160^4 - 2150^4 = 19,651 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Aksijalni moment otpora:

$$W_y = \frac{I_y}{z_{\max}} = \frac{I_y}{D/2} = \frac{1,9651 \cdot 10^{10}}{2160/2} = 18,195 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

#### Prirubnice

Vanjski promjer:  $D_p = 2440 \text{ mm}$

Unutarnji promjer:  $d_p = 2160 \text{ mm}$

Debljina lima prirubnice:  $t_p = 10 \text{ mm}$

Volumen lima prirubnice uz 6% povećanja (vijci, brtve, zavari,...)

$$V_p = 1,06 \cdot \frac{\pi}{4} D_p^2 - d_p^2 \cdot 2 \cdot t_p = 1,06 \cdot \frac{\pi}{4} 2440^2 - 2160^2 \cdot 2 \cdot 10 = 21,446 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

## OPTEREĆENJE

### - Vlastita težina cijevi:

$$q_c = \rho \cdot g \cdot A = 7850 \cdot 9,81 \cdot 33851 \cdot 10^{-6} = 2607 \text{ N/m}$$

### - Prašina:

Količina nataložene prašine u cjevovodu  $m_d = 60 \text{ kg/m}$

Težina prašine:

$$q_d = m_d \cdot g = 60 \cdot 9,81 = 589 \text{ N/m}$$

### - Izolacija:

Kontinuirano po cijelom obodu sa vanjske strane  $m_i = 75 \text{ kg/m}$

Težina izolacije:

$$q_i = m_i \cdot g = 75 \cdot 9,81 = 736 \text{ N/m}$$

### - Prirubnice:

Težina jedne prirubnice:

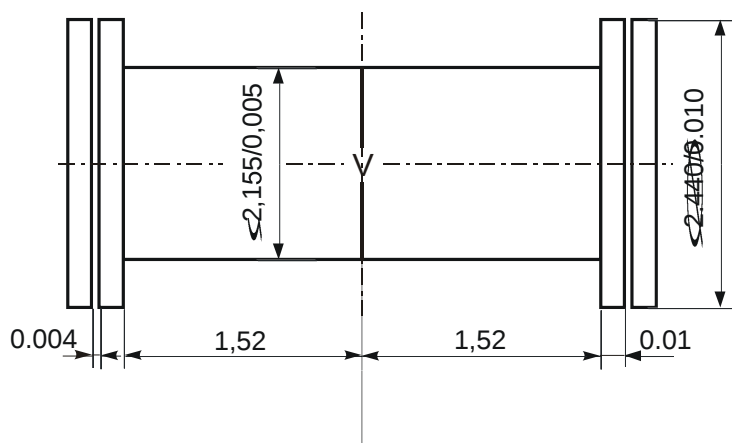
$$G_p = \rho_p \cdot V_p \cdot g = 7850 \cdot 21,446 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 1652 \text{ N}$$

## 2. STATIČKI PRORAČUN POMOĆU METODE KONAČNIH ELEMENATA

Korišteni tip konačnog elementa za modeliranje cijevi i prirubnica: ljuskasti (shell) konačni element (6 stupnjeva slobode gibanja-3 translacije i 3 rotacije)

### Geometrija ljuske

Geometrija ljuske se definira na osnovi srednje ravnine te odgovarajuće debljine.



Geometrija segmenta cijevi upotrebljena za model konačnih elemenata

- srednji polumjer cijevi:  $r_{sr} = \frac{(D+d)}{4} = \frac{2,160 + 2,150}{4} = 1,0775 \text{ m}$

- debljina cijevi:  $t_c = 0,005$  m
- duljina segmenta cijevi:  $l_{psr} = 1,520$  m
- usvojeni vanjski polumjer za model prirubnice:  $r_p = 1,22$  m
- usvojena debljina modela prirubnice:  $t_{pm} = 0,020$  m

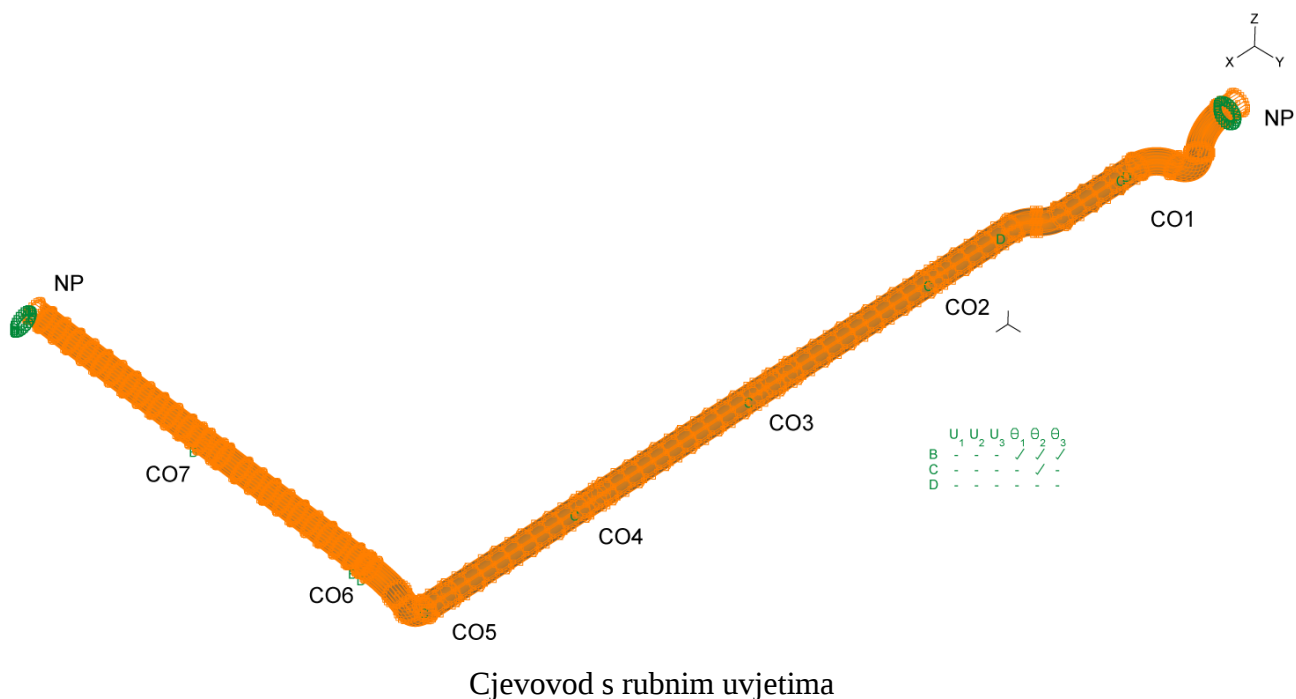


Geometrijski model cijevovoda

Globalni Kartezijev koordinatni sustav  $xyz$  postavljen je u točku čije koordinate odgovaraju početnom presjeku ravnog horizontalnog dijela cijevovoda na visini od 9,6 m. Horizontalna os  $x$  je u uzdužnoj presječnoj ravnini ravnog horizontalnog dijela cijevovoda usmjerena prema ulaznom dijelu cijevovoda, os  $z$  je vertikalna os dok je horizontalna os  $y$  postavljena okomito na te dvije osi i prema pravilu desnog vijka usmjerena kako je prikazano na slici. Rješenja za reakcije u čvrstim i kliznim osloncima prikazana su komponentama sila u tom globalnom sustavu.

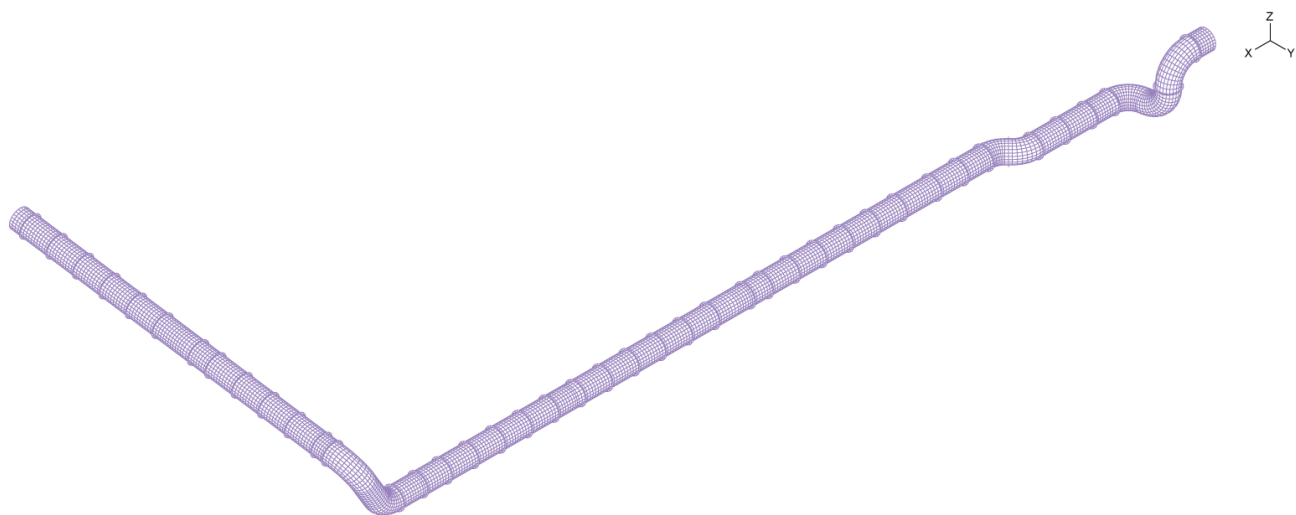
### Rubni uvjeti

- karakteristične točke na uzdužnoj osi cijevovoda - prikazane kao rubni uvjeti B na sljedećoj slici: spriječeni svi pomaci u smjeru uzdužne osi cijevovoda, dopuštene rotacije po poprečnom presjeku (definicije ovih točaka potrebne su zbog generiranja grednih konačnih elemenata na uzdužnoj osi cijevovoda)
- oslonci CO1...CO7 - čvrsti oslonci prikazani kao rubni uvjeti C na slici: dopuštene rotacije oko horizontalne poprečne osi cijevi; spriječeni pomaci i preostale rotacije u uzdužnoj osi poprečnog presjeka cijevi
- oslonci NP- prikazani kao rubni uvjeti D na slici: spriječeni svi pomaci i rotacije



### Materijal Č0361

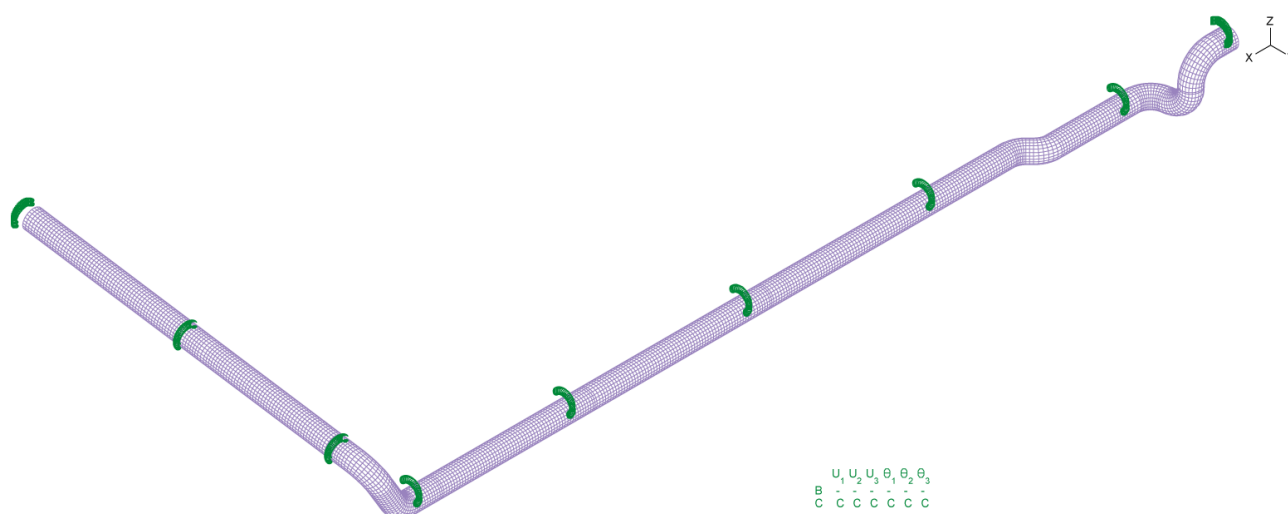
- modul elastičnosti:  $E = 207e9 \text{ Pa}$
- Poissonov koeficijent:  $\nu = 0,3$
- specifična masa:  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- koeficijent toplinskog širenja:  $\alpha = 0$



Mreža 9-čvornih ljuskastih konačnih elemenata cijevi i prirubnica

Pomoću krutih veza (rigid links) spriječena je ovalizacija cjevovoda na mjestima čvrstih oslonaca (CO1...CO7) na način da su te veze definirane između odgovarajućih čvorova grednih konačnih elemenata koji leže na uzdužnoj osi cjevovoda čiji su slobodni stupnjevi slobode definirani rubnim uvjetima B i C te čvorova ljuskastih konačnih elemenata koji leže na odgovarajućem poprečnom

presjeku cijevi. Ovaj tip rubnih uvjeta, odnosno ograničenja, zajedno s rubnim uvjetima za oslonce NP prikazan je na sljedećoj slici.



Cjevovod s prikazanim ograničenja krutih veza

### Opterećenje

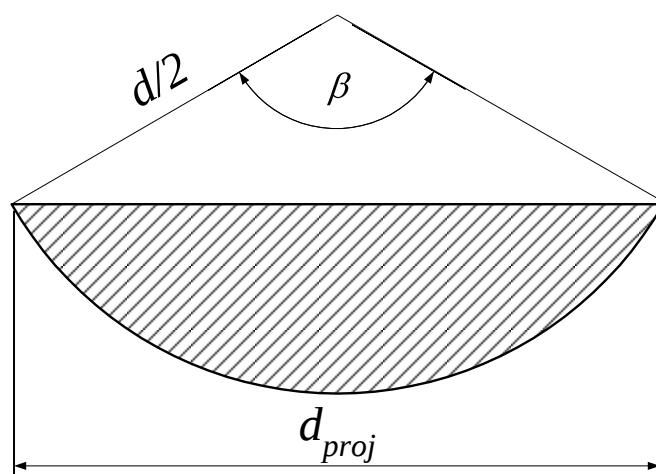
- cijevi i prirubnice: uslijed vlastite težine
- težina izolacije je uzeta na način da je specifičnoj masi cijevi pridodana specifična masa izolacije na osnovi projektne vrijednosti mase izolacije po jedinici duljine  $m_i = 75 \text{ kg/m}$

$$\rho_i = \frac{m_i}{A} = \frac{75}{33851 \cdot 10^{-6}} = 2216 \text{ kg/m}^3$$

čime je ukupna specifična masa uzeta u proračunu

$$\rho_t = \rho + \rho_i = 7850 + 2216 = 10066 \text{ kg/m}^3$$

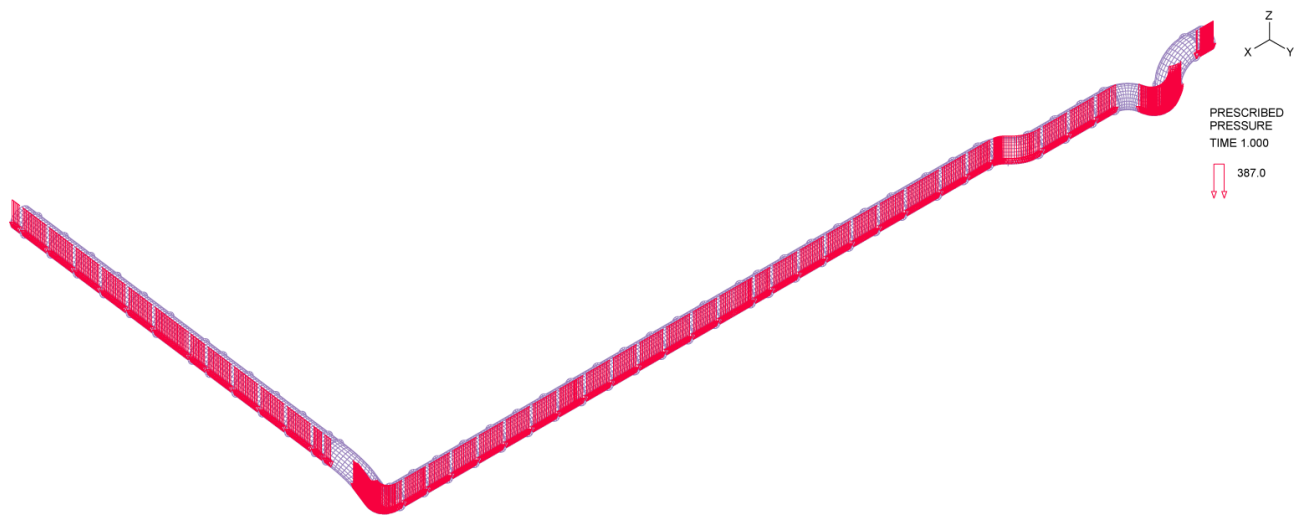
- prašina: utjecaj prašine prikazan je pritiskom po jedinici površine.



Dio presjeka cijevi na koji djeluje prašina ( $d = 2,15 \text{ m}$ ,  $\beta = 90^\circ$ )

$$\text{Projicirana duljina na kojoj djeluje prašina: } d_{proj} = d \sin \frac{\beta}{2} = 2,15 \sin \frac{90^\circ}{2} = 1,524 \text{ m}$$

Pritisak uslijed prašine:  $p_d = \frac{q_d}{d_{proj}} = \frac{589}{1,524} = 387 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$



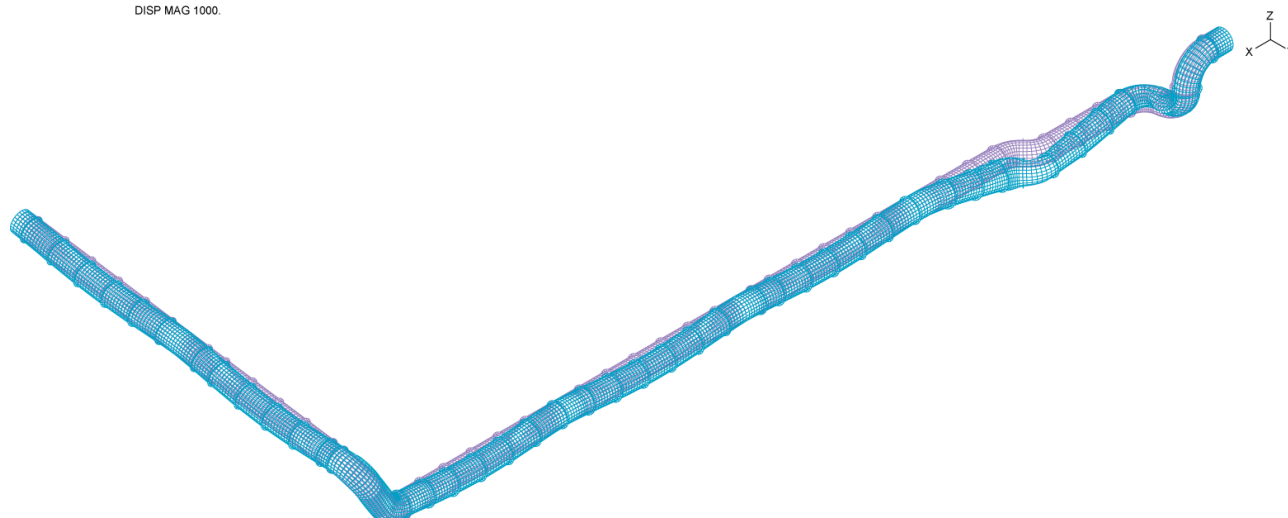
Opterećenje cjevovoda uslijed pritiska prašine



Opterećenje cjevovoda uslijed pritiska prašine (prikaz u ravnini x-y)

## Rezultati:

DISP MAG 1000.



Prikaz progiba cjevovoda (uvećanje progiba 1000 puta)

Maksimalni pomak:  $\delta_{\max} = 2,10 \text{ mm}$

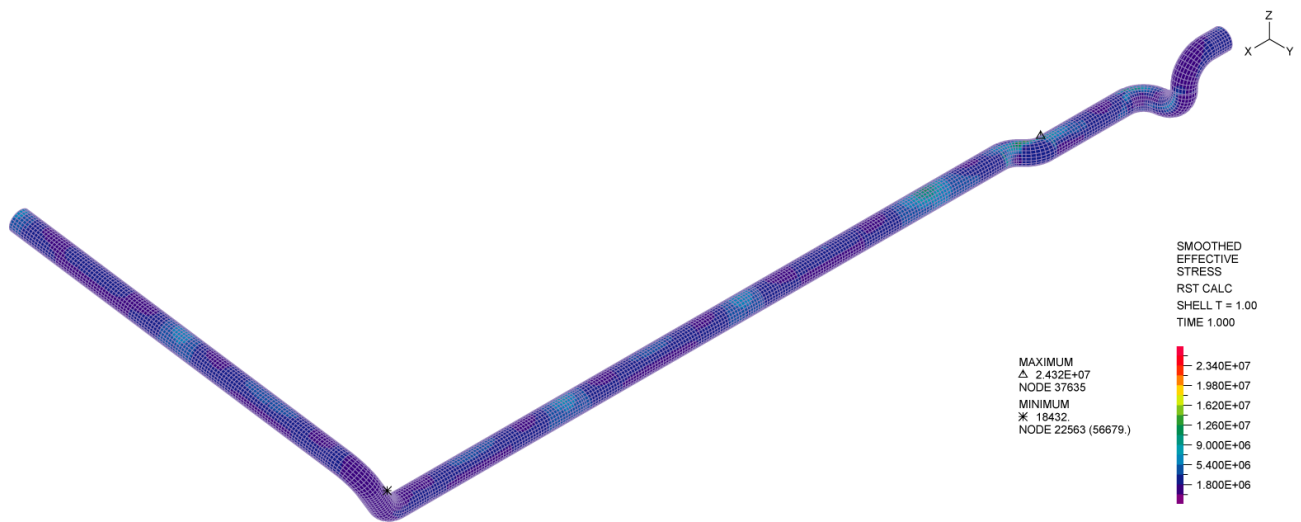
Maksimalni progib cjevovoda (u smjeru osi z):  $\delta_{z,\max} = w_{\max} = 2,08 \text{ mm}$

što je manje od dopuštenog progiba

$$w_{\text{dop}} = \frac{L}{1000} = \frac{20000}{1000} = 20 \text{ mm.}$$

Reakcije u čvrstim osloncima:

|     | $R_x$ , kN | $R_y$ , kN | $R_z$ , kN |
|-----|------------|------------|------------|
| CO1 | 2,40       | 2,43       | 70,00      |
| CO2 | 0,78       | -0,08      | 106,55     |
| CO3 | 0          | 0          | 91,81      |
| CO4 | 0          | 0          | 94,65      |
| CO5 | -2,97      | 1,22       | 52,58      |
| CO6 | 3,26       | -1,88      | 59,59      |
| CO7 | -0,13      | 0,97       | 88,72      |



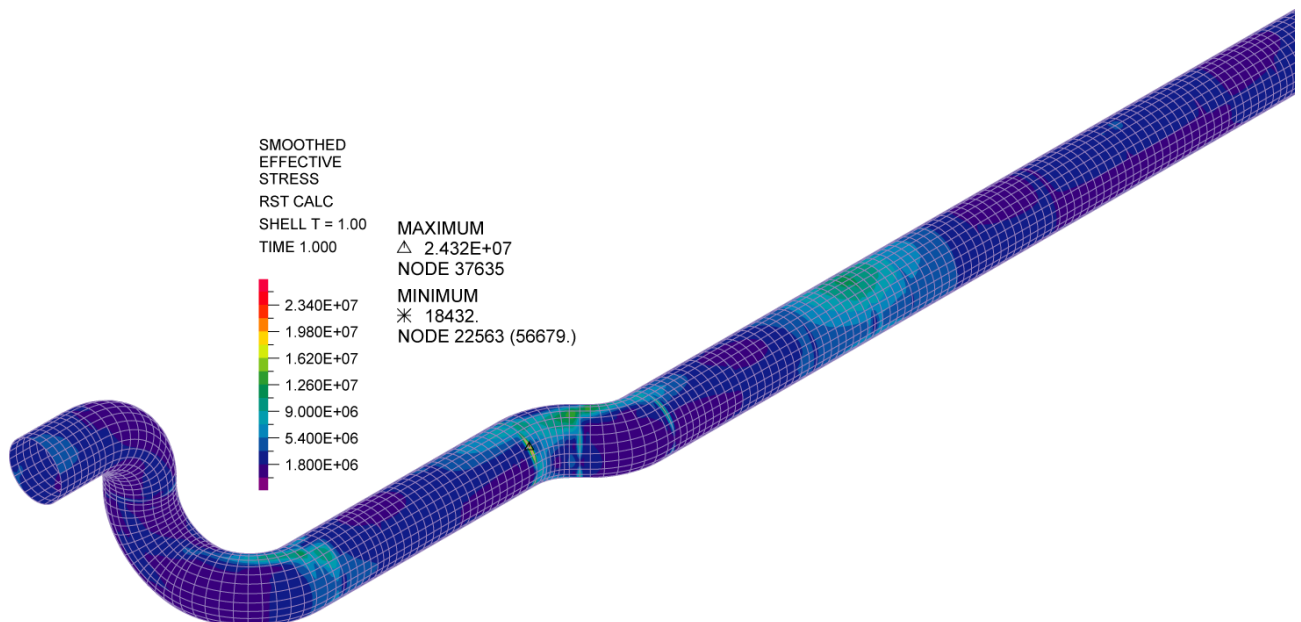
Vrijednosti ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu

Maksimalno ekvivalentno naprezanje

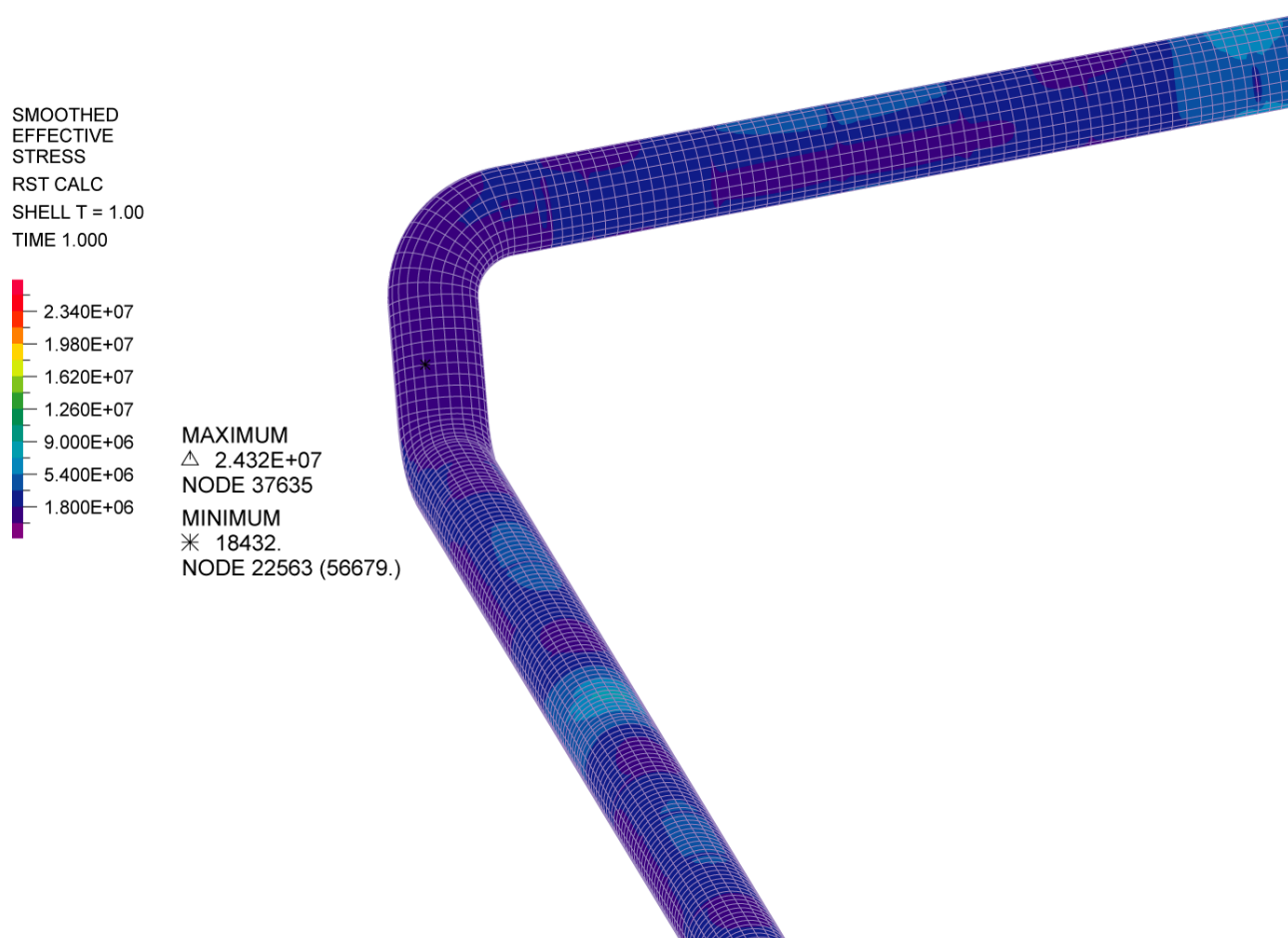
$$\sigma_{ekv,max} = 24,32 \text{ MPa}$$

manje je od dopuštenog naprezanja materijala cijevi iz Č 0361

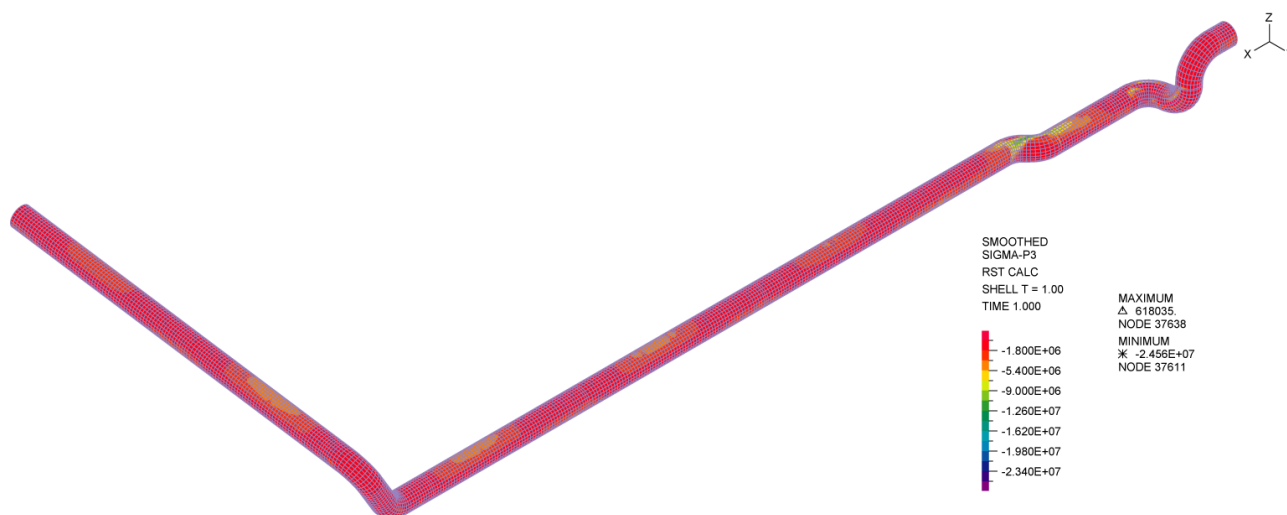
$$\sigma_{s,dop} = \frac{R_{es}}{\nu_{potr}} = \frac{300}{1,5} = 200 \text{ N/mm}^2.$$



Vrijednosti ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu (uvećan prikaz kritičnog detalja)

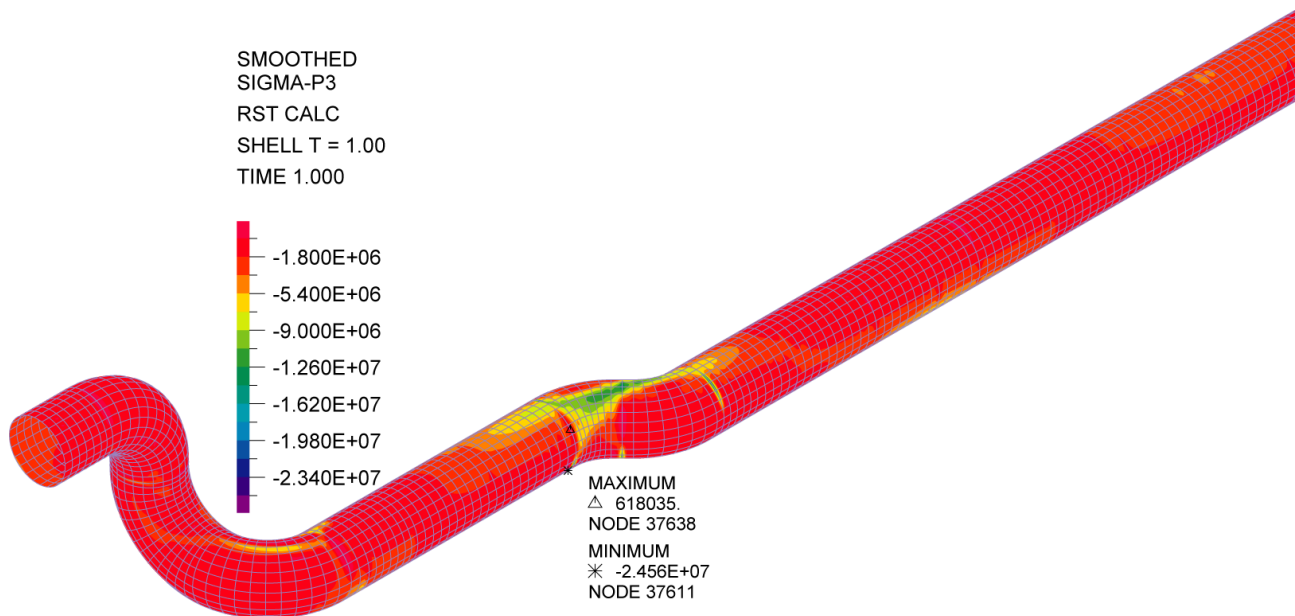


Vrijednosti ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu (uvećan prikaz kritičnog detalja)



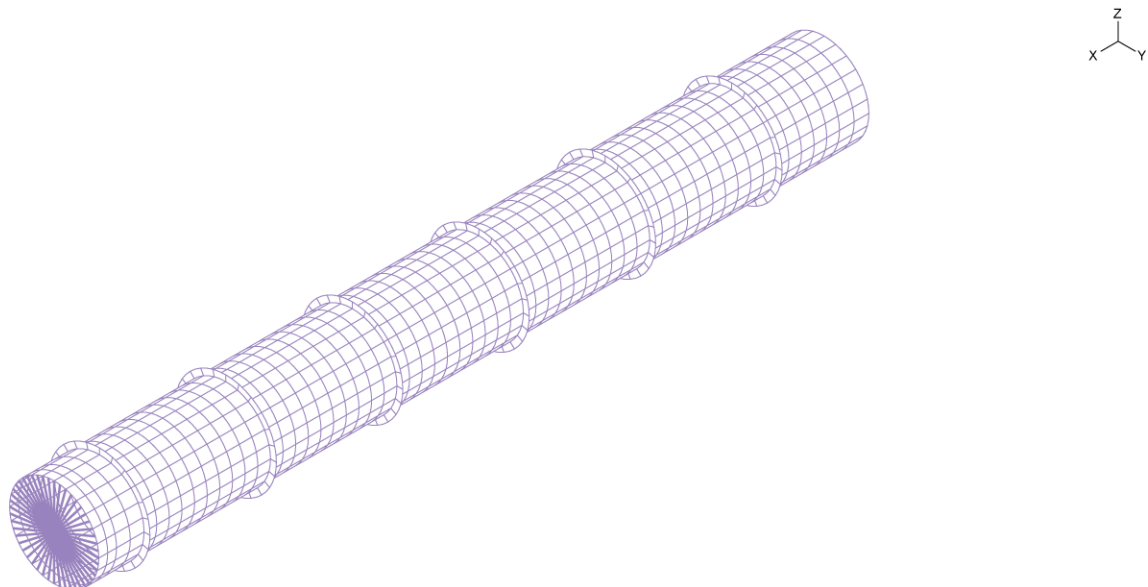
Vrijednosti najmanjih glavnih naprezanja

Maksimalno tlačno glavno naprezanje po apsolutnoj vrijednosti:  $\sigma_3 = 24,56 \text{ MPa}$ .



Vrijednosti najmanjih glavnih naprezanja (uvećan prikaz kritičnog detalja)

Kako bi se dobila detaljnija slika o progibu i naprezanjima cjevovoda, posebno je modeliran karakteristični ravni dio cjevovoda između čvrstog oslonca CO3 i sljedećeg kliznog oslonca (prije čvrstog oslonca CO4).

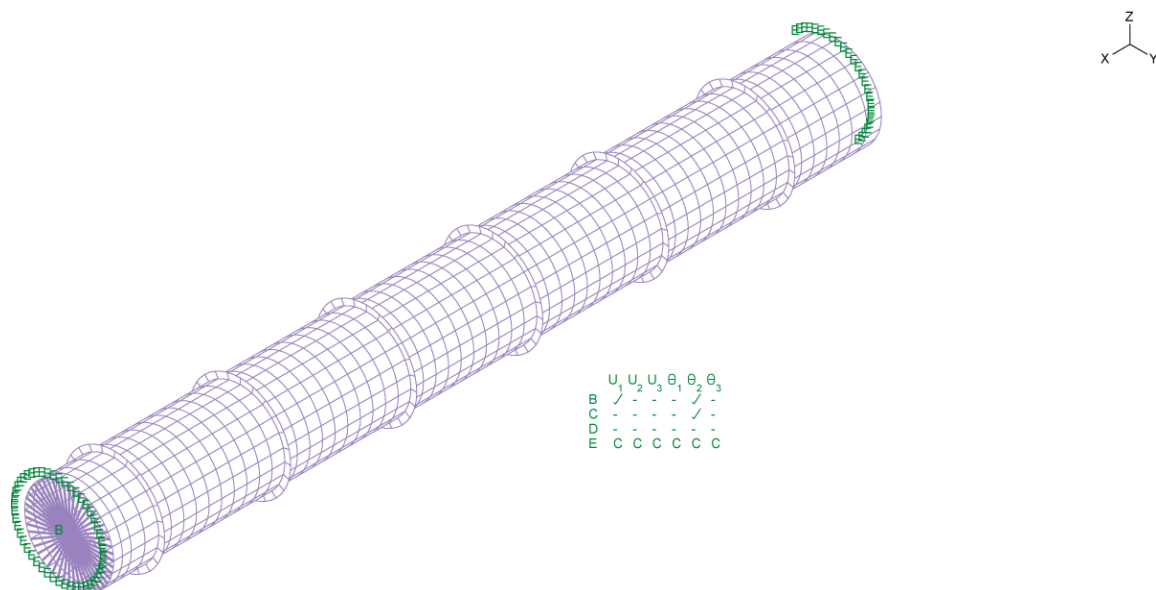


Geometrijski model ravnog dijela cjevovoda

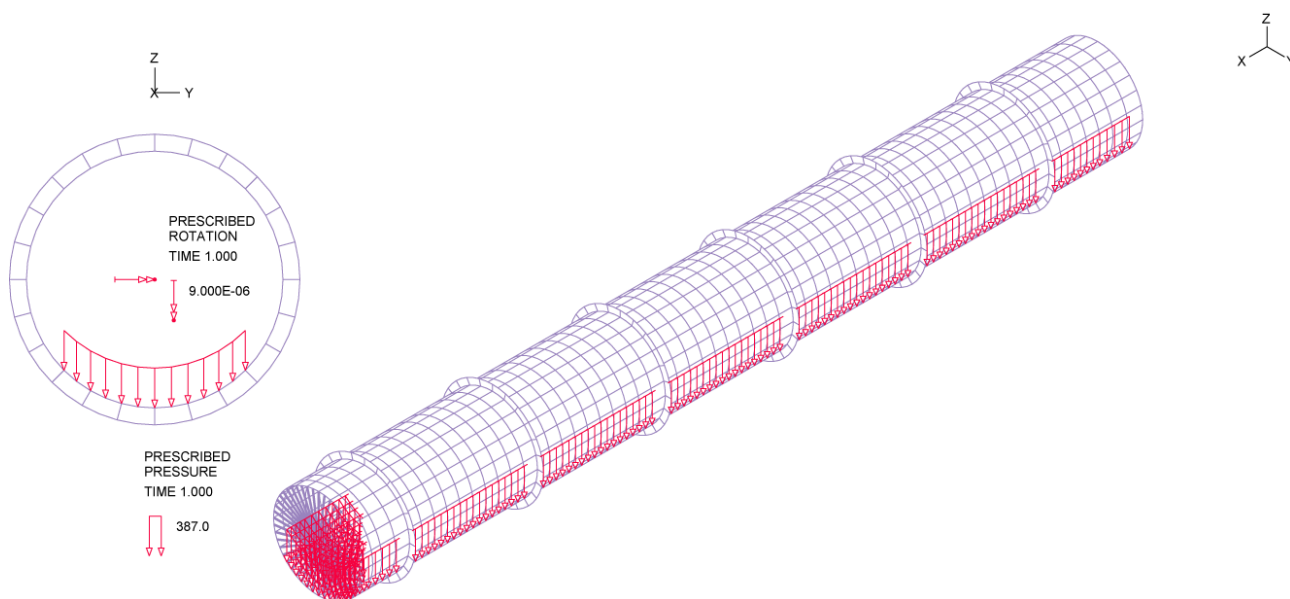
Rubni uvjeti za prikazani model:

- klizni oslonac - prikazan kao rubni uvjeti B na slici: dopušten pomak u smjeru uzdužne osi ravnog dijela cjevovoda, dopuštena rotacija oko osi y; spriječeni ostali pomaci i rotacije
- čvrsti oslonac - prikazan kao rubni uvjeti C na slici: spriječeni svi pomaci i rotacije osim rotacije oko osi y (vrijednost rotacije oko osi y je narinuta u obliku zadane vrijednosti)

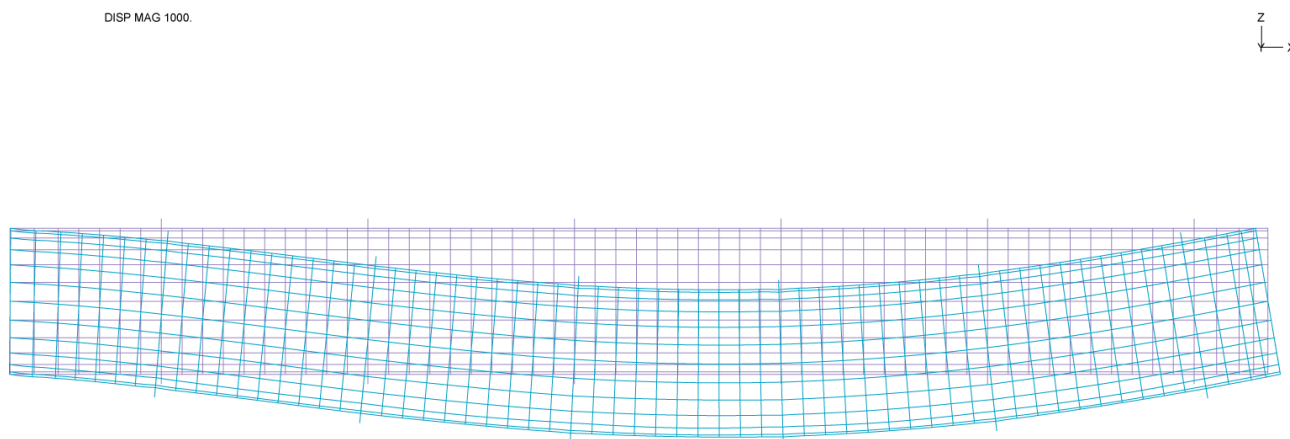
dobivene proračunom za kompletni cjevovod kako bi se što vjernije opisalo stvarno stanje, dobivena vrijednost od  $\Delta\beta = 9 \cdot 10^{-6}$  je dana na slici na sljedećoj strani)



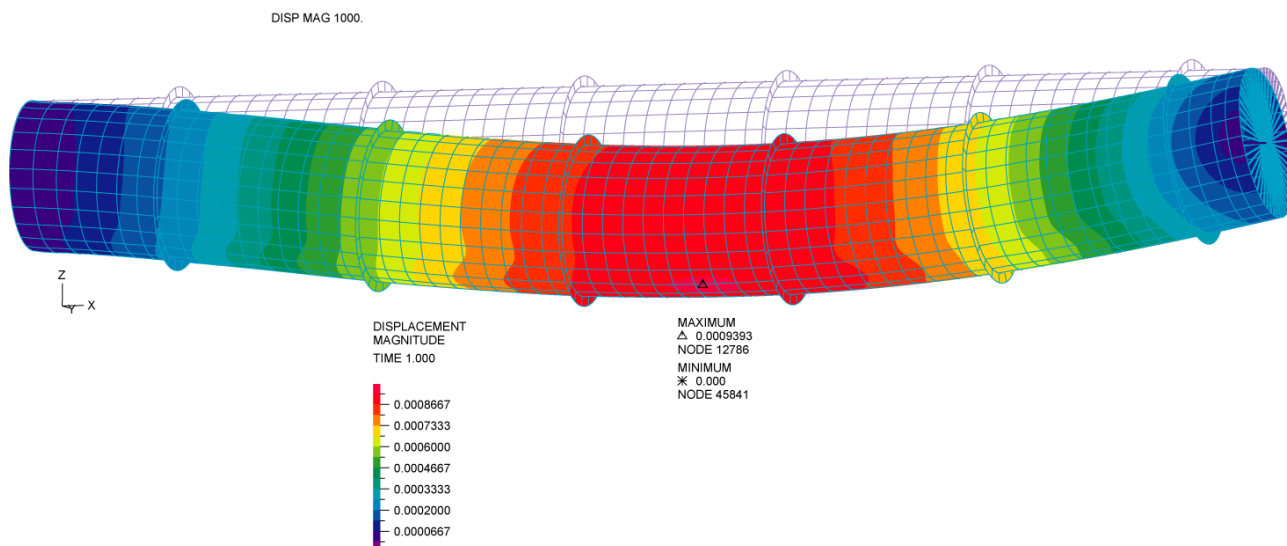
Modelirani dio cjevovoda s rubnim uvjetima



Opterećenje modeliranog dijela cjevovoda uslijed pritiska prašine



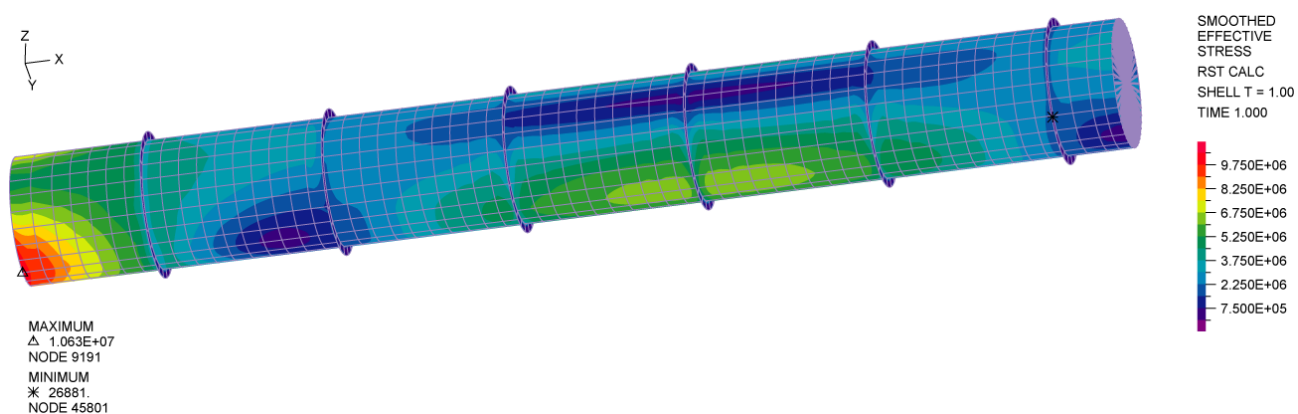
Prikaz progiba modeliranog dijela cjevovoda (uvećanje progiba 1000 puta)



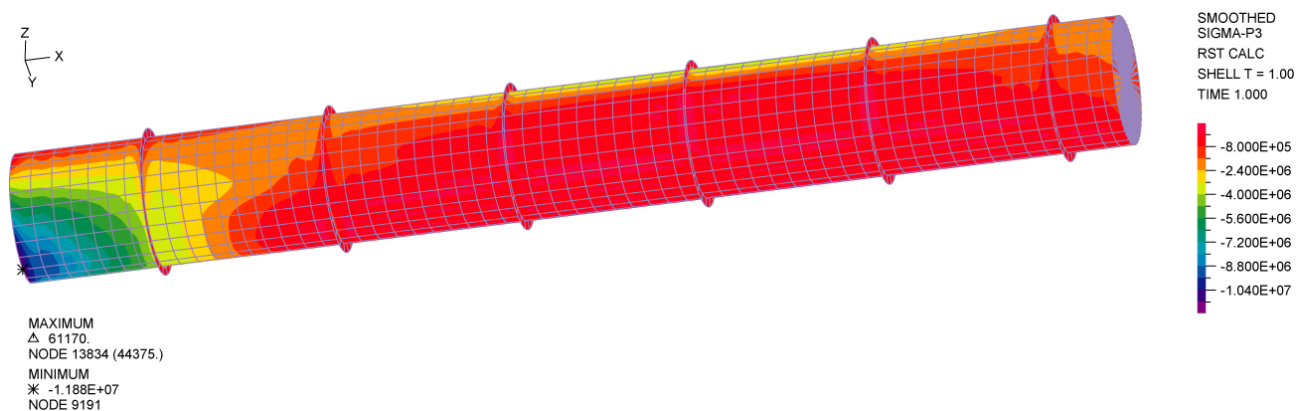
Prikaz položaja i iznosa maksimalnog progiba modeliranog dijela cjevovoda  
(uvećanje progiba 1000 puta)

Maksimalni progib cjevovoda (u smjeru osi z):  $\delta_{z,\max} = w_{\max} = 0,94 \text{ mm}$ .

Položaj maksimalnog progiba u odnosu na čvrsti oslonac  $x_{\max} = 10,331 \text{ m}$ .

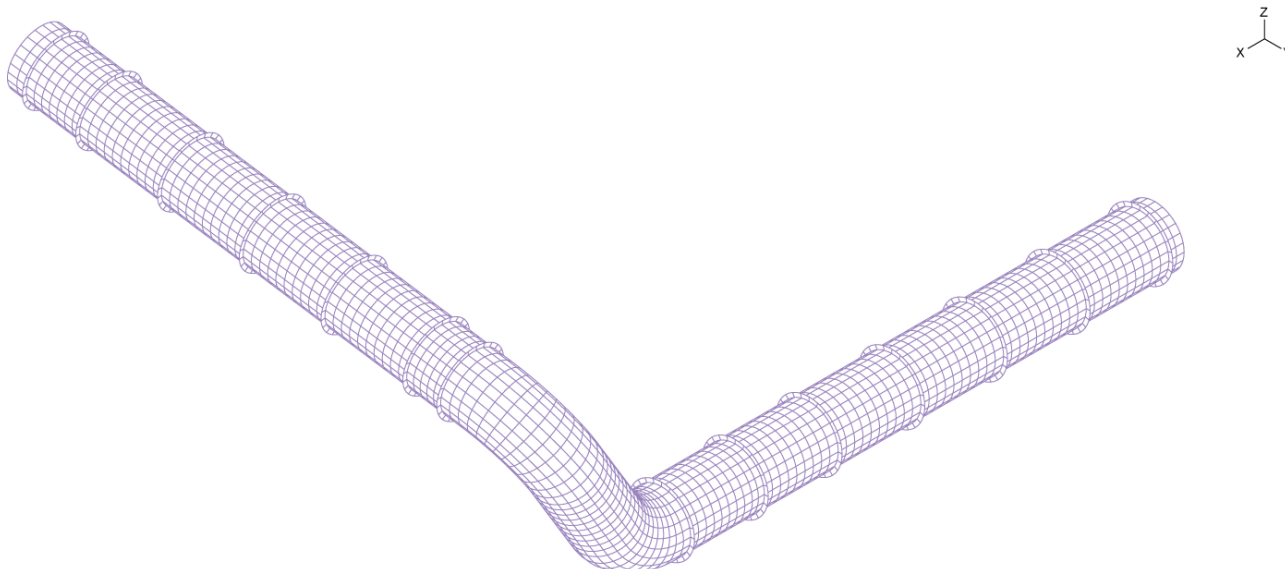


Vrijednosti ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu



Vrijednosti najmanjih glavnih naprezanja

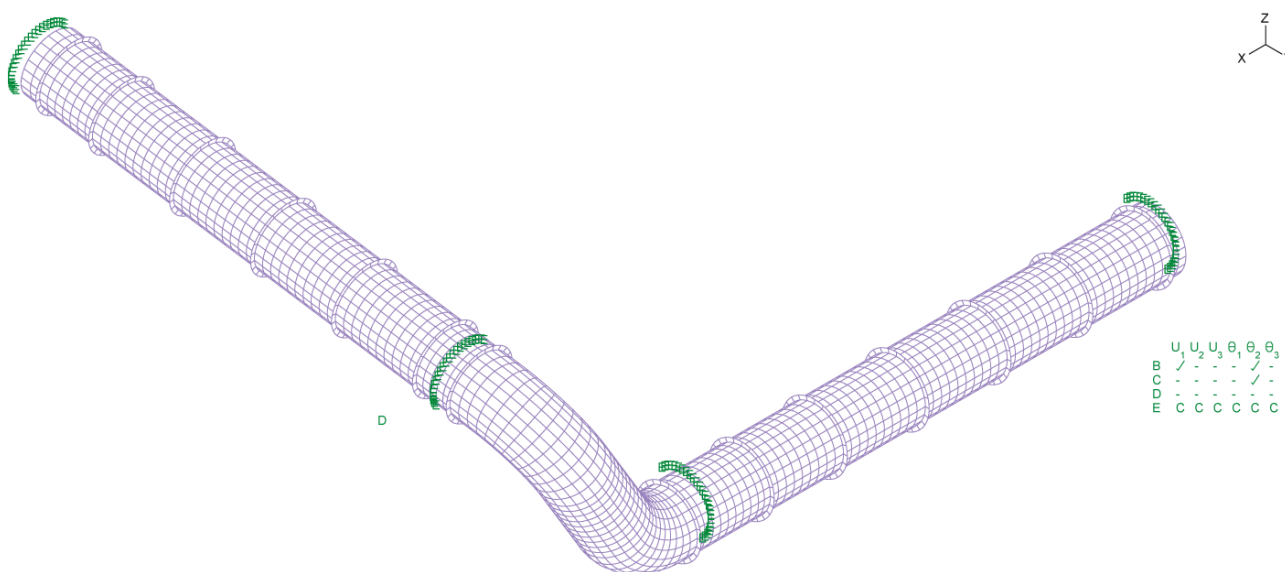
U nastavku je posebno analiziran dio cjevovoda koji se s ravnog horizontalnog dijela nastavlja na kosi dio postavljen iznad postrojenja talionice.



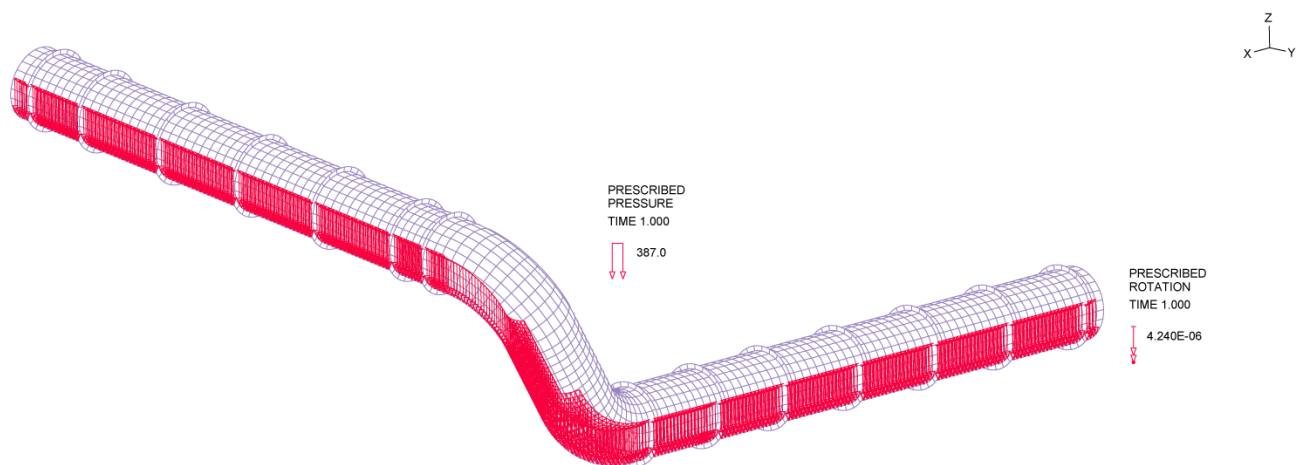
Geometrijski model dijela cjevovoda

Rubni uvjeti za prikazani model:

- klizni oslonac (krajnji lijevi presjek cijevi na slici) - prikazan kao rubni uvjeti B na slici: dopušten pomak u smjeru uzdužne osi ravnog dijela cjevovoda, dopuštena rotacija oko osi y; spriječeni ostali pomaci i rotacije
- čvrsti oslonci - prikazani kao rubni uvjeti C na slici: spriječeni svi pomaci i rotacije osim rotacije oko osi y (vrijednost rotacije oko osi y narinuta je na krajnji desni presjek cijevi na sljedećoj slici u obliku zadane vrijednosti dobivene proračunom za kompletni cjevovod analogno postupku provedenom za ravni dio cijevi)

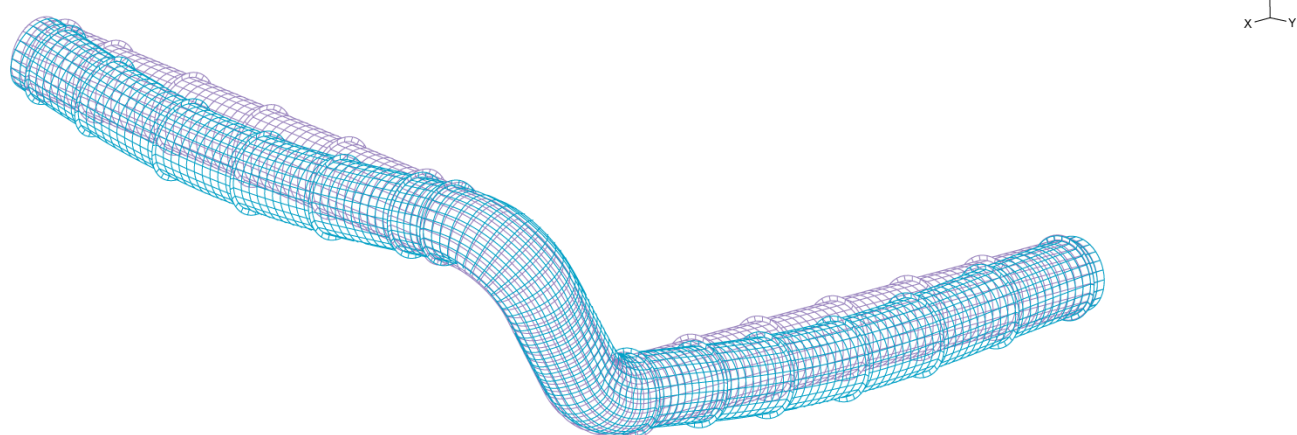


Modelirani dio cjevovoda s rubnim uvjetima



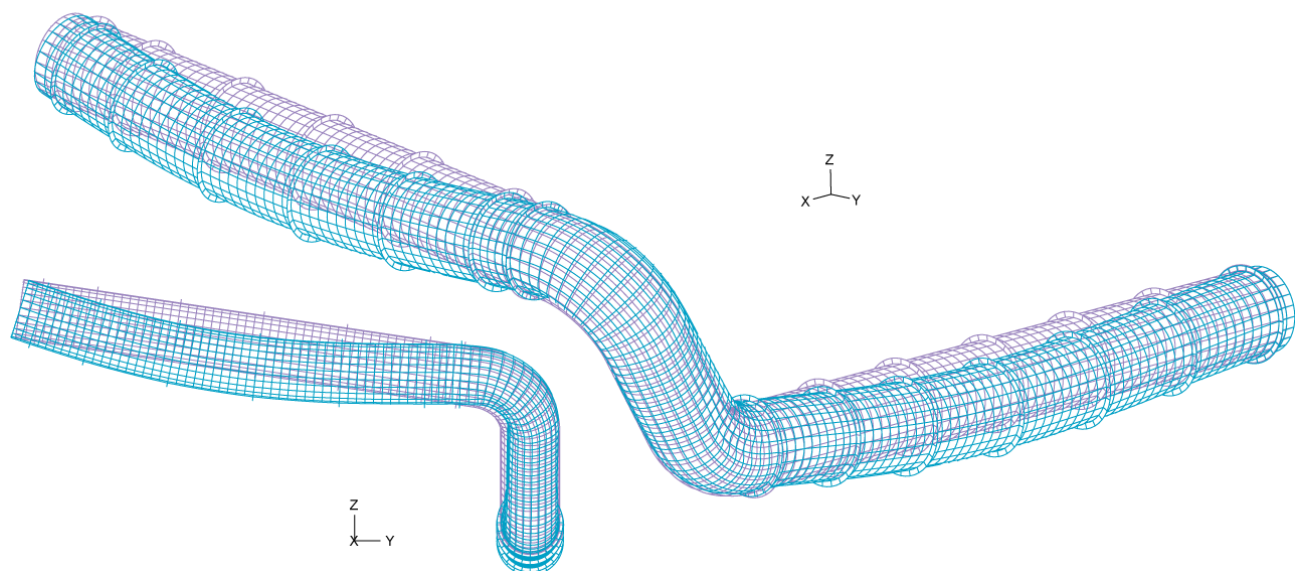
Opterećenje modeliranog dijela cjevovoda uslijed pritiska prašine

DISP MAG 1000.

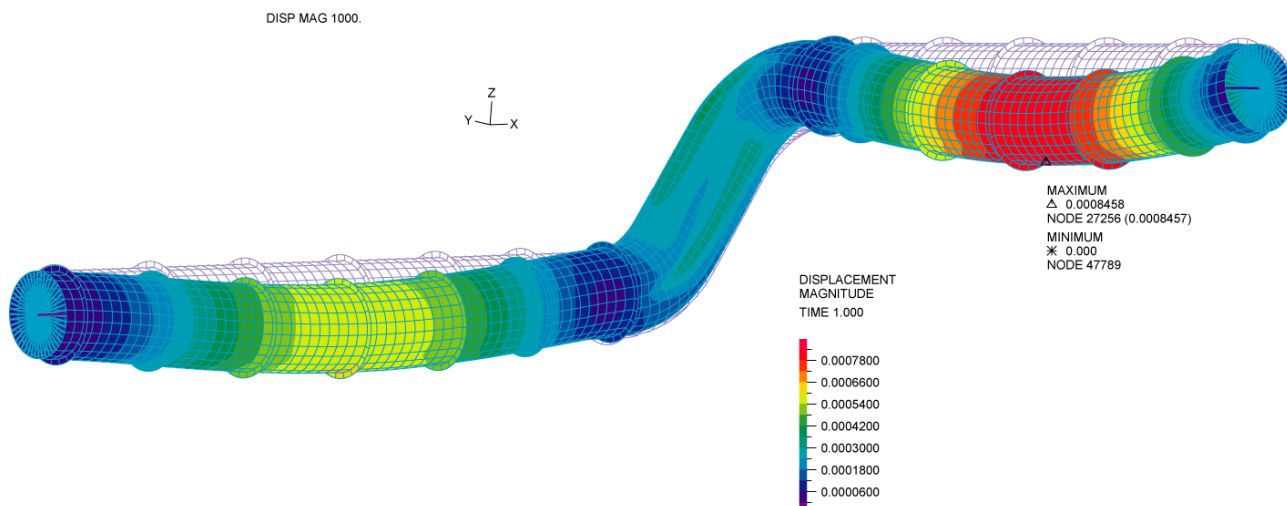


Prikaz progiba modeliranog dijela cjevovoda (uvećanje progiba 1000 puta)

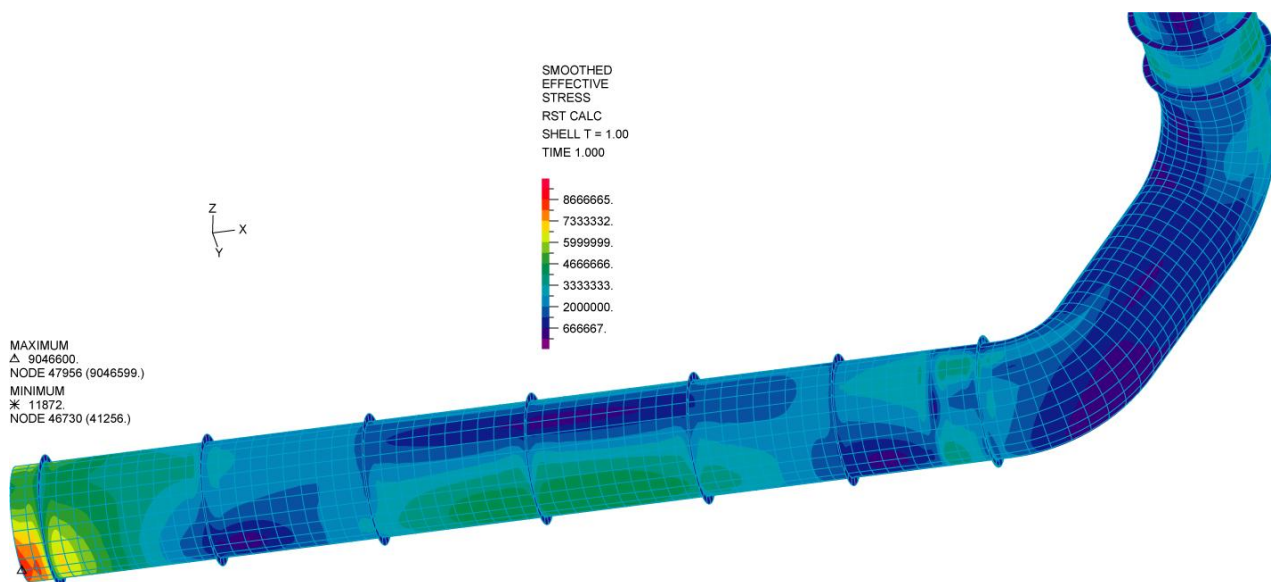
DISP MAG 1000.



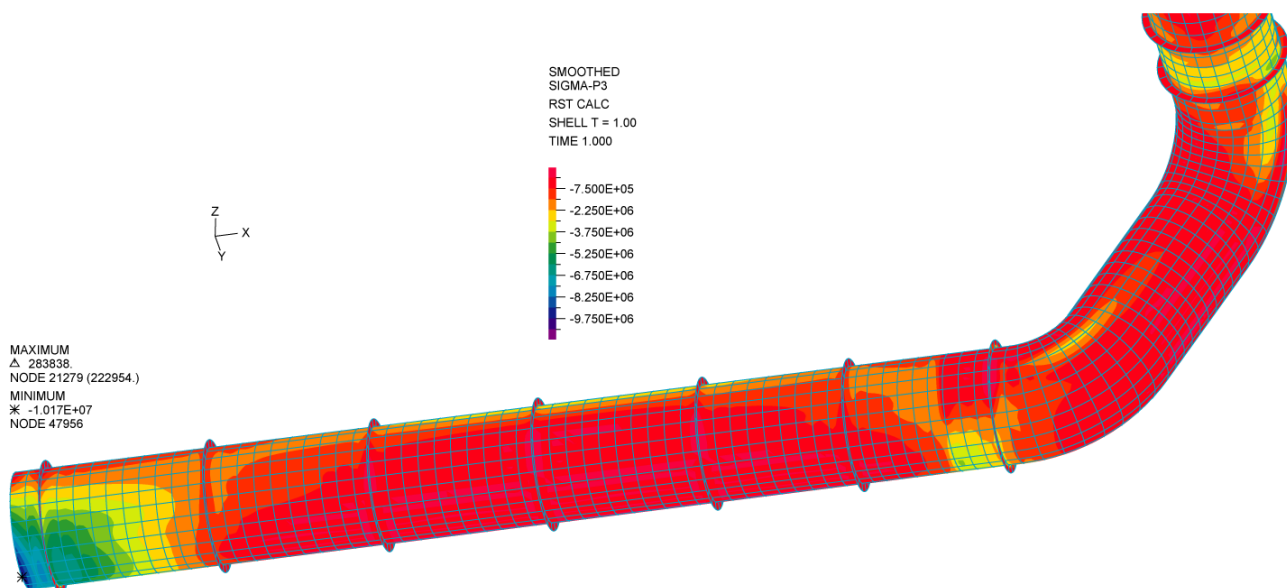
Prikaz progiba modeliranog dijela cjevovoda (uvećanje progiba 1000 puta)



Prikaz položaja i iznosa maksimalnog progiba modeliranog dijela cjevovoda  
(uvećanje progiba 1000 puta)



Vrijednosti ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu



Vrijednosti najmanjih glavnih naprezanja

### 3. PRORAČUN PROGIBA PREMA MEHANICI MATERIJALA

Radi kontrole rješenja dobivenog pomoću metode konačnih elemenata izračunat je prema [1] maksimalni progib cijevi za dio gdje maksimalni raspon točaka oslanjanja cijevi iznosi 20 m (ravni dio cijevi).

Kontinuirano opterećenje na promatranom rasponu iznosi:

$$q = q_c + q_d + q_i + \frac{6 \cdot G_p}{l} = 2607 + 589 + 736 + \frac{6 \cdot 1652}{20} = 4428 \text{ N/m}$$

Maksimalni progib na promatranom rasponu iznosi:

$$w = \frac{5ql^4}{384EI_y} = \frac{5 \cdot 4428 \cdot 20^4}{384 \cdot 207 \cdot 10^9 \cdot 19,651 \cdot 10^{-3}} = 2,268 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,268 \text{ mm}.$$

Ovo je manje od dopuštenog progiba koji iznosi

$$w_{\text{dop}} = \frac{L}{1000} = \frac{20000}{1000} = 20 \text{ mm}.$$

### 4. LOKALNA STABILNOST (SIGURNOST PROTIV GUŽVANJA STIJENKI CIJEVI U TLAČNOJ ZONI)

Kritično naprezanje prema Euleru:

$$\sigma_{kr} = 0,194 \cdot E \frac{D-d}{D} = 0,194 \cdot 207000 \cdot \frac{2160-2150}{2160} = 186 \text{ MPa}$$

Kako je pri analizi integriteta cijelog cjevovoda, na dijelu prije ulaza u stanicu za otprašivanje dobivena vrijednost najmanjeg glavnog naprezanja  $\sigma_3 = -24,56 \text{ MPa}$ , stupanj sigurnost protiv gužvanja stijenki cijevi iznosi:

$$\nu_i = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_3} = \frac{186}{24,56} = 7,6$$

### 5. PRORAČUN VIJAKA PRIRUBNICA

Potrebno je provjeriti čvrstoću vijaka prirubnica na mjestu maksimalnog momenta savijanja, jer je njihova čvrstoća kritična. Naime, vijci su na tom mjestu, pored prednaponske sile od pritezanja opterećeni dodatnom radnom silom zbog momenta savijanja. Ova sila je najveća u najniže položenom vijku i računa se prema izrazu:

$$F_d = F_{i,\text{max}} = \frac{M_{s,\text{max}} \cdot a_n}{a_1^2 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} a_i^2 + a_n^2}$$

gdje je  $n = z/2 + 1$ , a  $z = 36$  je broj vijaka, a  $a_i$  krak dodatne sile u pojedinom vijku. Za predmetnu prirubnicu je izračunato:

$$a_n = a_{17} = 2370 \text{ mm}$$

$$a_1 = 70 \text{ mm}$$

$$a_9 = 1220 \text{ mm}$$

itd.

$$F_d = \frac{173,200 \cdot 1,329}{0,07^2 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} a_i^2 + 2,370^2} = 10.000 \text{ N}$$

Za procijenjeni omjer krutosti podloge i vijka  $C_p/C_v = 1$  i za koeficijent hvatišta radne sile  $k_h = 0,5$ , dodatna sila u vijku je:

$$F_a = k_h \frac{F_d}{2} \frac{1}{1 + \frac{C_p}{C_v}} = 0,5 \frac{10000}{2} \frac{1}{1+1} = 1.670 \text{ N}$$

Maksimalno naprezanje je:

$$\sigma_u = \sigma_e + \sigma_a = \sqrt{\sigma_{pr}^2 + 3\tau_t^2} + \sigma_a \approx 1,3\sigma_{pr} + 2\sigma_a = 1,3 \frac{F_{pr}}{A_n} + 2 \frac{F_a}{A_n} \leq \sigma_{gr} = 0,7R_e$$

gdje je  $F_{pr}$  prednaponska sila u vijku,  $A_n$  nosiva površina presjeka vijka M20, a  $R_e = 640 \text{ N/mm}^2$  granica tečenja za odabranu 8.8 klasu čvrstoće materijala vijka.

Oдавде se računa potrebna vrijednost prednaponske sile za koju će naprezanje u vijku biti jednako dopuštenom:

$$F_{pr} = \frac{0,7A_nR_e - 2F_a}{1,3} = \frac{0,7 \cdot 157 \cdot 640 - 2 \cdot 1670}{1,3} = 83.150 \text{ N}$$

Da bi se ostvarila ovalika prednaponska sila, potrebno je pritegnuti vijke s momentom

$$T_K = F_{pr} \left[ \frac{d_2}{2} \tan \alpha + \rho' + \mu_p \frac{s + d_0}{4} \right] = 330 \text{ Nm.}$$

Maksimalno naprezanje u vijku će biti:

$$\sigma_{\max} = 0,7 R_e = 0,7 \cdot 640 = 448 \text{ N/mm}^2 \text{ što je manje od dopuštenog naprezanja}$$

$$\sigma_{\text{dop}} = 0,8R_e = 0,8 \cdot 640 = 512 \text{ N/mm}^2.$$

Ako se vijci pritegnu s momentom nešto manjim od 330 Nm, naprezanje u njima će se smanjiti i neće se dogoditi ništa što bi narušilo integritet konstrukcije, sve dok prednaponska sila ne padne ispod vrijednosti dodatne radne sile – jer u uobičajenim okolnostima krutost prirubničkog spoja neznatno utječe na krutost tj. integritet cjevovoda.

Za vijke manje klase čvrstoće od ovdje odabrane 8.8, treba ponoviti proračun.

## 6. KONTROLA ČVRSTOĆE ZAVARENOG SPOJA PRIRUBNICA

U (čeonoj) ravnini spajanja prirubnice i cijevi aksijalni moment otpora nosive površine zavora debljine 4 mm iznosi:

$$I_{y,zav} = \frac{D_v + 2a}{64} \pi \left[ 1 - \left( \frac{D_v}{D_v + 2a} \right)^4 \right]$$

gdje je  $D_v$  vanjski promjeri cijevi a  $a$  debljina zavora.

Nakon uvrštenja slijedi:

$$I_{y,zav} = \frac{2160 + 2 \cdot 4}{64} \pi \left[ 1 - \left( \frac{2160}{2160 + 2 \cdot 4} \right)^4 \right] = 7,34 \cdot 10^9 \text{ mm}^4.$$

Otporni moment je:

$$W_{y,zav} = \frac{I_{y,zav}}{(D_v + 2a) / 2} = \frac{7340 \cdot 10^6}{1084} = 6,76 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Kako je naprezanje u zavaru na mjestu najvećeg momenta savijanja

$$\sigma_{zav} = \frac{M_{s,max}}{W_{y,zav}} = \frac{221,4 \cdot 10^6}{6,76 \cdot 10^6} = 32,8 \text{ N/mm}^2$$

a dopušteno naprezanje u zavaru

$$\sigma_{zav,dop} = b_{st} b_{zav} \frac{R_e}{\nu}$$

gdje je:  $b_{st}$  - faktor slabljenja;  $b_{st} = 0,8$  za kutni zavar

$b_{zav}$  - faktor kvalitete zavora,  $b_{zav} = 0,8$  za 3. kvalitetu zavora

$R_e = 225 \text{ N/mm}^2$  - granica tečenja za Č 0361

$\nu = 1,5$  – potrebni stupanj sigurnosti

$$\sigma_{zav,dop} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot \frac{225}{1,5} = 96 \text{ N/mm}^2,$$

proizlazi da je čvrstoća zavora neupitna.

## 7. KONTROLA ČVRSTOĆE ZAVARENOG SPOJA CIJEVI

Najopterećeniji element cijevi trpi moment od  $M_{\max} = 221,4 \text{ kNm}$ . Površina zavora koja prenosi ovaj moment jednaka je poprečnom presjeku cijevi čiji je aksijalni moment otpora  $W_y = 18,2 \text{ mm}^3$ .

Naprezanje u zavaru je:

$$\sigma_{zav} = \frac{M_{\max}}{W_y} = \frac{221,4 \cdot 10^6}{18,2 \cdot 10^6} = 12,2 \text{ N/mm}^2$$

što je manje od dopuštene vrijednosti

$$\sigma_{zav,dop} = b_{st} b_{zav} \frac{R_{es}}{\nu} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot \frac{300}{1,5} = 128 \text{ N/mm}^2.$$

## 8. ZAKLJUČAK

**Budući da su dobivena naprezanja u cijevima, prirubnicama i njihovim zavarima, kao i vrijednosti progiba, daleko ispod dopuštenih vrijednosti, te da elastična stabilnost cijevi nije ugrožena, slijedi zaključak da je integritet predmetnog cjevovoda, po predvidivom stanju pogonskih opterećenja definiranih projektnim zadatkom, neupitan.**

Šef Katedre za Elemente strojeva:

Dekan FESB-a:

(Prof. dr. sc. Damir Jelaska)

(Prof. dr. sc. Tomislav Kilić)