

# STATICKÝ VÝPOČET

Vodojem na 1000 m<sup>3</sup> vody

investor :

objednatel : KONEKO , spol. s r.o.

vypracoval: ing. Jan Crhán

datum: květen 2008

### Normy :

- EN 1993-1-1 Navrhování ocelových konstrukcí.
  - Část 1-1 : Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- EN 1993-4-1 Navrhování ocelových konstrukcí
  - Část 4-1 : Zásobníky, nádrže a potrubí.
- EN 1993-1-6 Navrhování ocelových konstrukcí
  - Část 1-6 : Obecná pravidla- Doplnující pravidla pro skořepinové konstrukce
- EN 1991-4 Zásady navrhování a zatížení konstrukcí -
  - Část 4 : Zatížení zásobníků a nádrží
- ČSN 731401/99 Navrhování ocelových konstrukcí

### Počítačový program :

IDA NEXIS 32 - SCIA CZ. s.r.o. ( [www.scia.cz](http://www.scia.cz) )

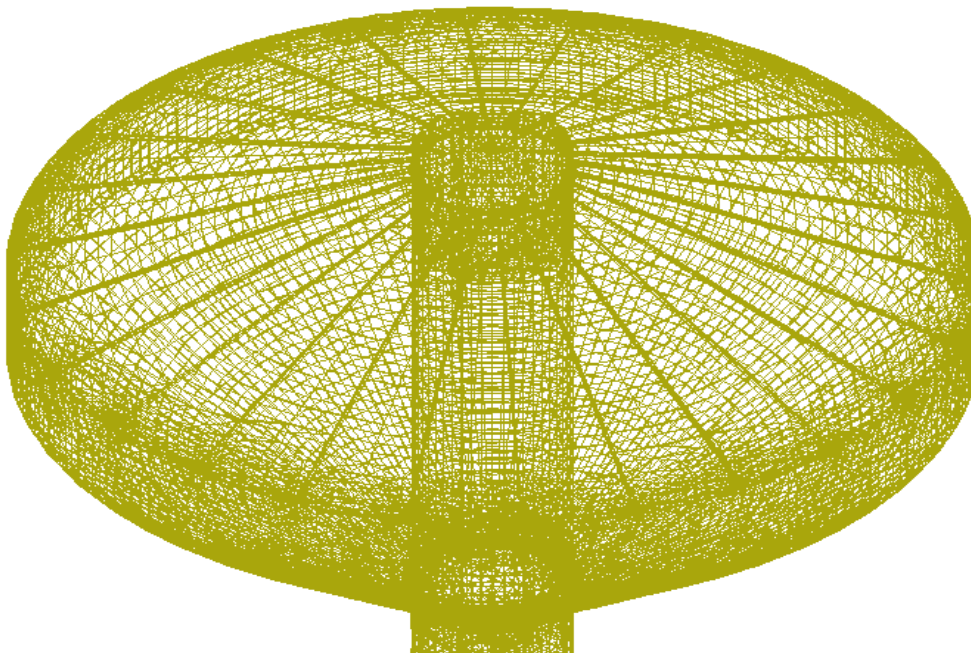
### Základní popis:

Průměr vodojemu 18000 mm , výška vodojemu cca 39,600 m

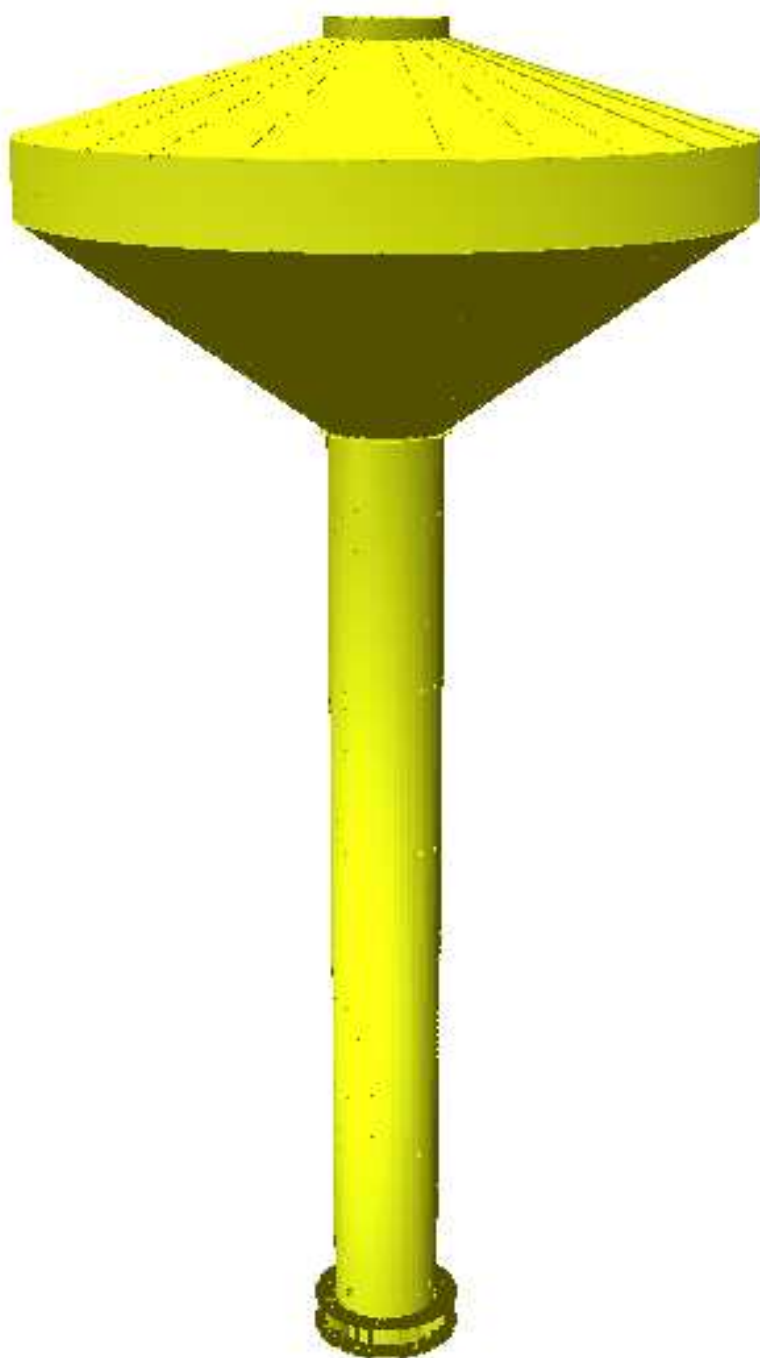
Objem vodojemu 1000 m<sup>3</sup>

Podklady :                      Výkresy Vítkovic : 0-96-66 ; 0-960-372/a ; 1-960-472

### Statický model vodojemu :



Vodojem na 1000 m3



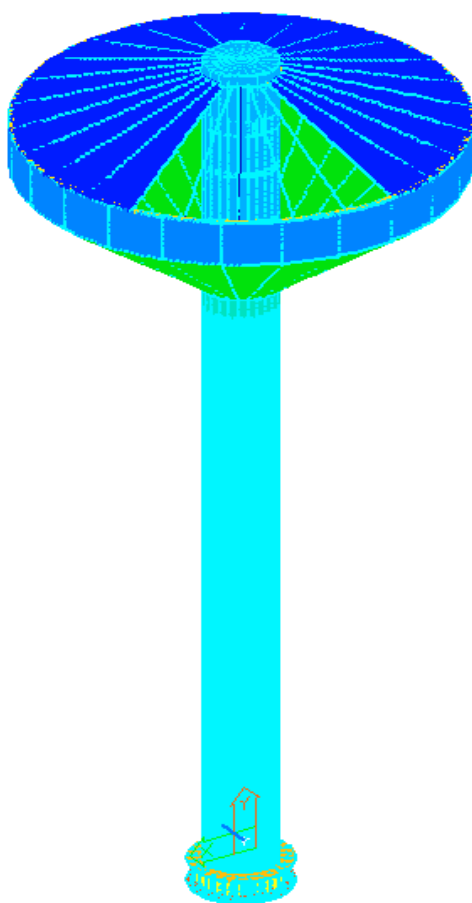
Material :

Plechý S235

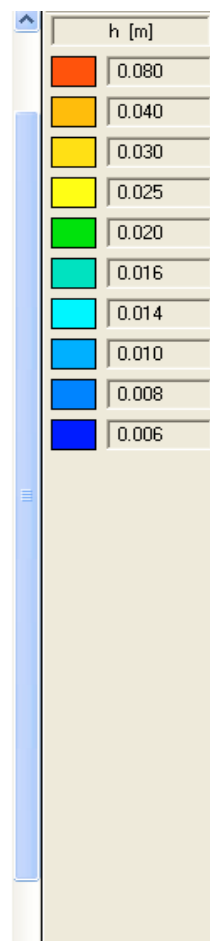
$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

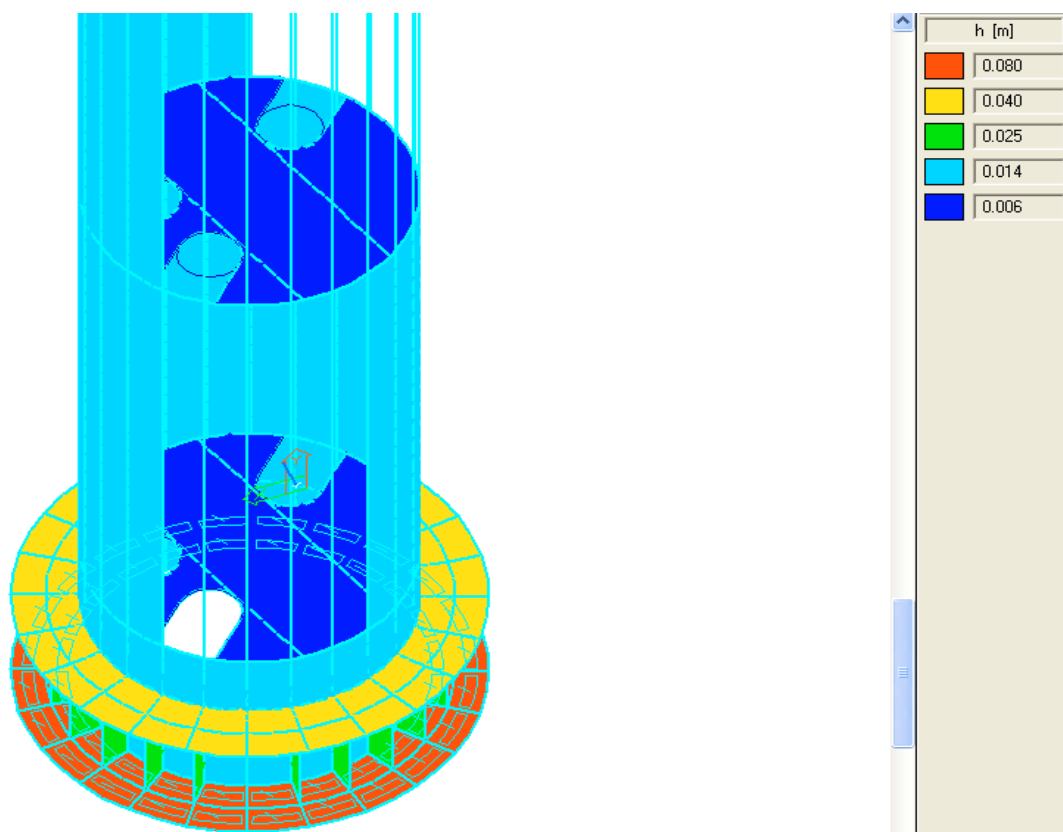
$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_M = 1,15$



Tloušťky plechů skořepin



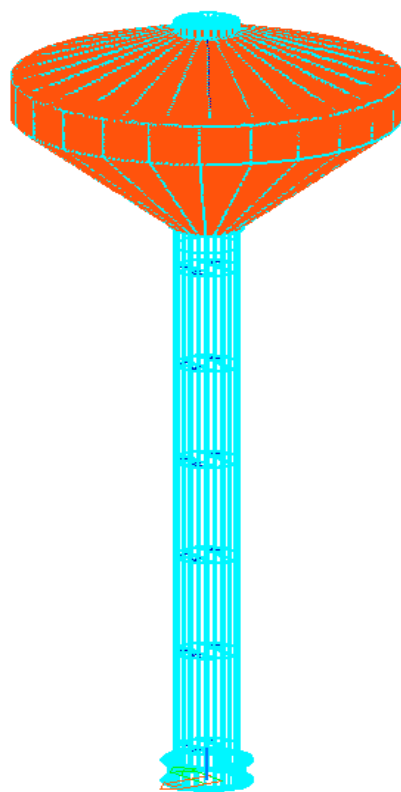


Tloušťky plechů skořepin - detail

## Zatížení :

Zatěžovací stavy :

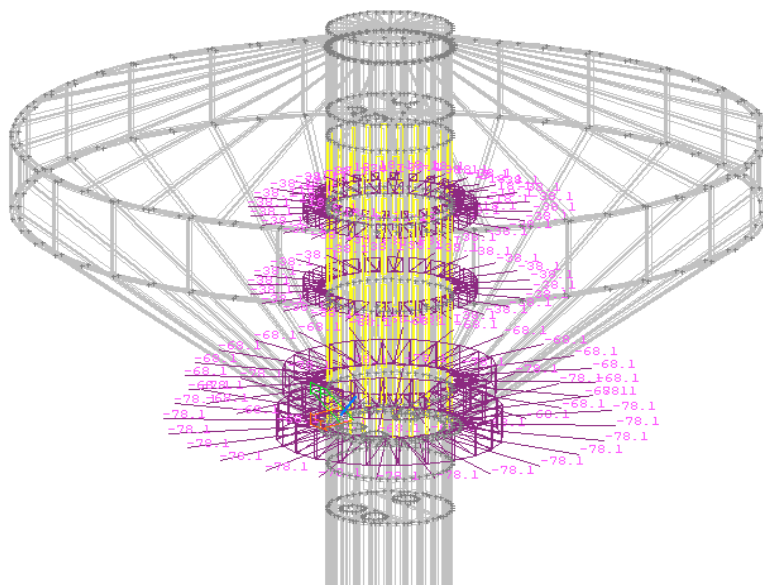
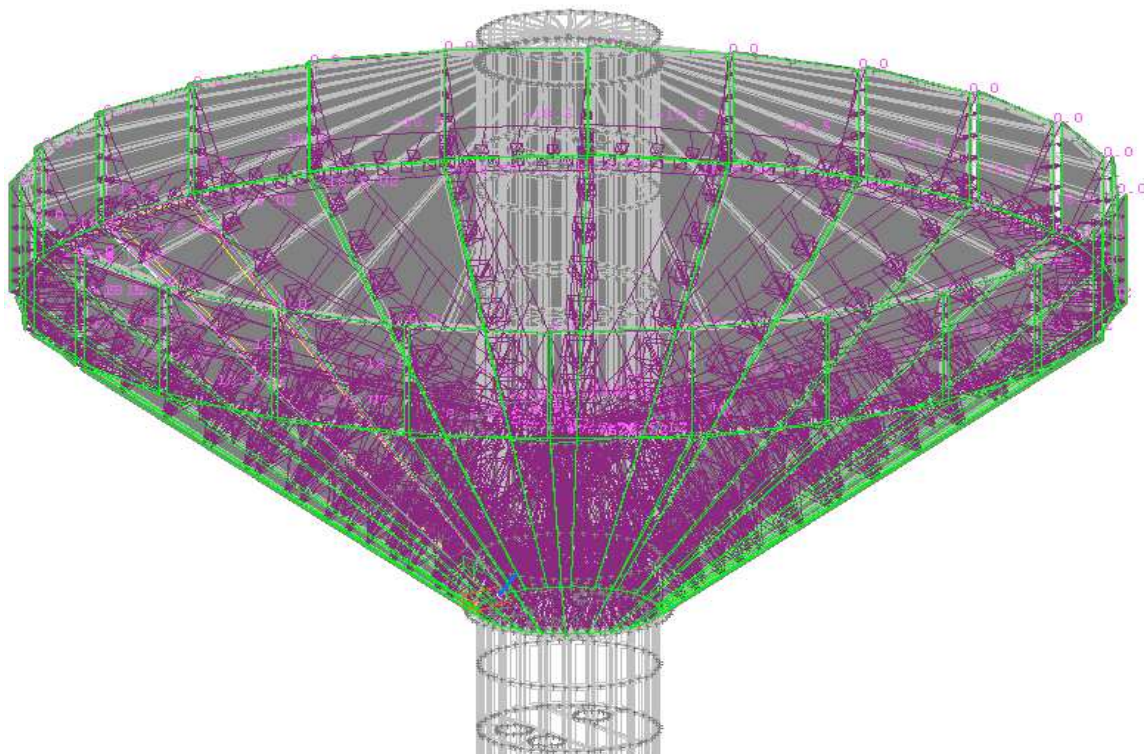
Stav	Jméno	souč,	Popis
1	Vlastní tíha	1,1	Vlastní váha, Směr -Z
2	Stálé část 2	1,3	Stálé - Zatížení
3	Voda	1,1	Nahodilé - voda
4	Sníh	1,4	Nahodilé - Sníh
5	Vítr	1,3	Nahodilé - Vítr Výběr,
6	Vítr - příčné kmitání	1,3	Nahodilé - Vítr Výběr,



ZS 2 Zatížení vlastní tíhou tepelné izolace a klempířský plech.

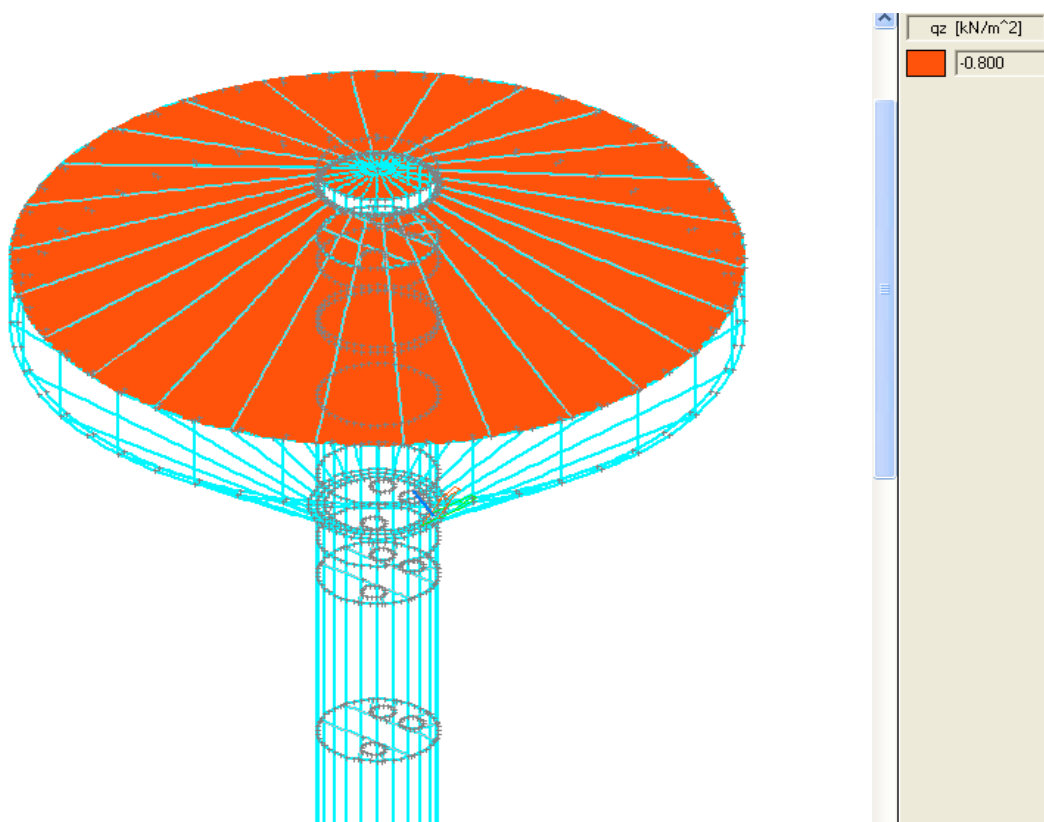


Vodojem na 1000 m<sup>3</sup>



ZS 3 Užité zátížení - voda - max hydrostatický tlak  $q_h = 78,1 \text{ kN/m}^2$





ZS 4 Zatížení sněhem  $q_s = 0,8 \text{ kN/m}^2$

DIN 1055 díl 4

$$C_f = C_{f0} \cdot \psi =$$

$$d = 3,0 \text{ m}$$

$$l = 30 \text{ m}$$

$$k = 0,001 \quad \text{pro ocel}$$

$$q = 1,1 \text{ kN/m}^2 \quad \text{tlak větru}$$

$$v = 40\sqrt{q} = 42,0 \text{ m/s}$$

$$Re = v \cdot d / 1e-5 = 12585706$$

$$C_{f0} = 1,2 + (0,18 \cdot \log(10 \cdot k/d)) / (1 + 0,4 \cdot \log(Re/10^4)) = 1,001$$

$$\lambda = 14,0$$

$$\varphi = 1$$

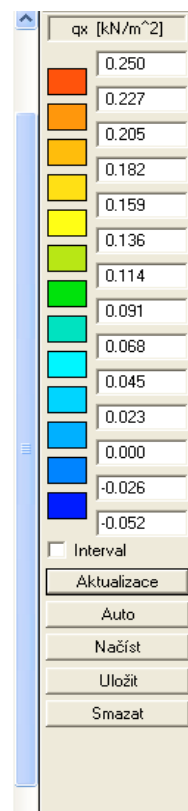
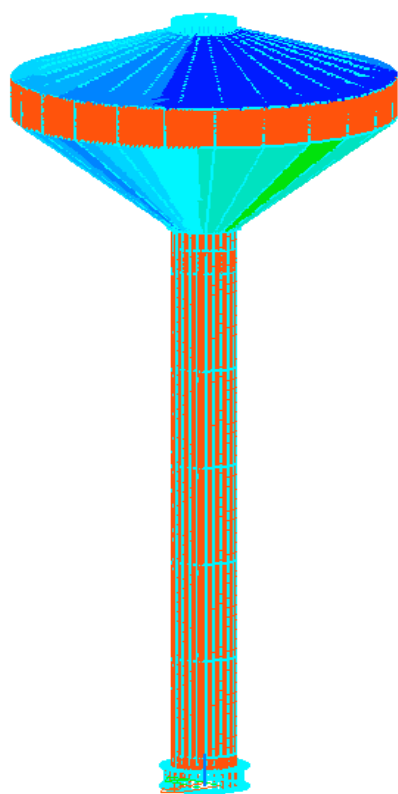
$$\psi = 0,711$$

$$C_f = C_{f0} \cdot \psi = 0,712$$

$$q_w = 2,35 \text{ kN/m}$$

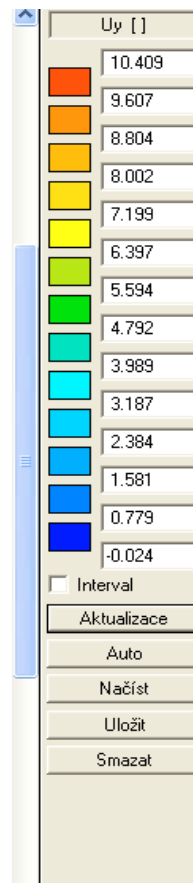
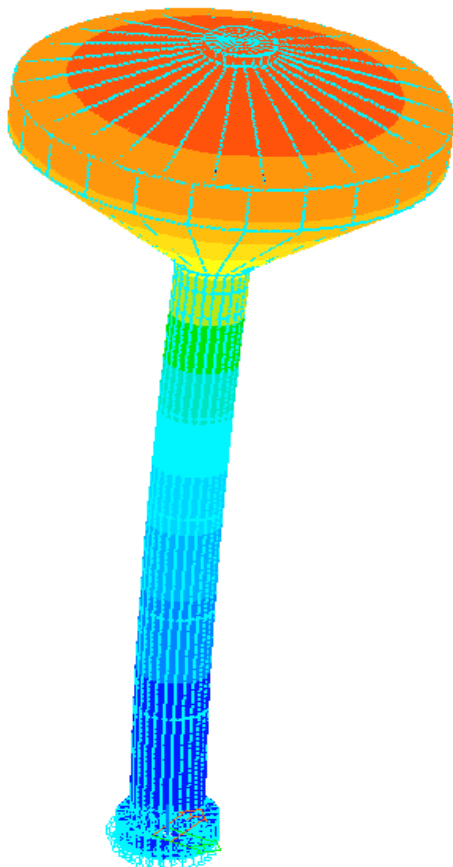
$$p_w = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

Vodojem na 1000 m3



ZS 5 Zatížení větrem ve směru x

## Účinek příčného kmitání



Směr x -první tvar vlastního kmitání

d = 18,0 m průměr válce horní části vodojemu

f = 0,205 vlastní frekvence

$\delta$  = 0,03 logaritmický dekrement útlumu

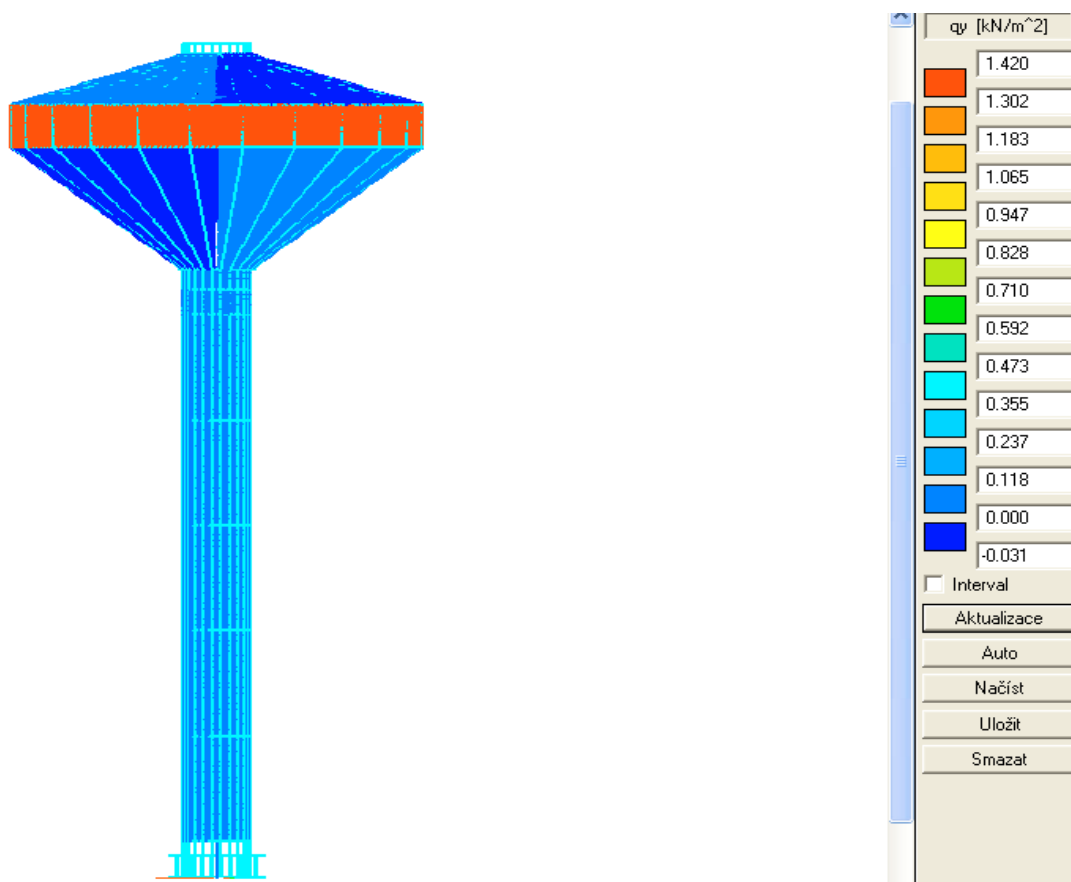
$v_{crit} = f \cdot d / S_h = 5 \cdot f \cdot d = 18,45$  m/s

$C_y = 0,2$

$q_{crit} = v_{crit}^2 / 1600 \cdot d \cdot C_y \cdot \pi / \delta = 80,21$  kN/m  $pw = 1,42$  kN/m<sup>2</sup>

Zatížení dříku vodojemu

$qw = 0,45$  kN/m  $pw = 0,05$  kN/m<sup>2</sup>



ZS 6 Zatížení větrem příčně (ve směru y)

## Vliv imperfekcí.

Při rekonstrukci střechy byla měřena kruhovitosť prstence na úrovni střechy.

Byly naměřeny imperfekce - max odchylka od kruhovitosti +135 mm  
 - min odchylka od kruhovitosti -61 mm

Konstrukce bude zadána s geometrickými imperfekcemi.

## Kombinace zatěžovacích stavů :

Základní pravidla pro generování kombinací na únosnost.

- 1 : 1,10\*ZS1 / 1,30\*ZS2 / 1,10\*ZS3 / 1,40\*ZS4 / 1,30\*ZS5  
 2 : 1,10\*ZS1 / 1,30\*ZS2 / 1,10\*ZS3 / 1,40\*ZS4 / 1,30\*ZS6  
 3 : 1,10\*ZS1 / 1,30\*ZS2 / 1,10\*ZS3 / 1,40\*ZS4 / -1,30\*ZS5  
 4 : 1,10\*ZS1 / 1,30\*ZS2 / 1,10\*ZS3 / 1,40\*ZS4 / -1,30\*ZS6

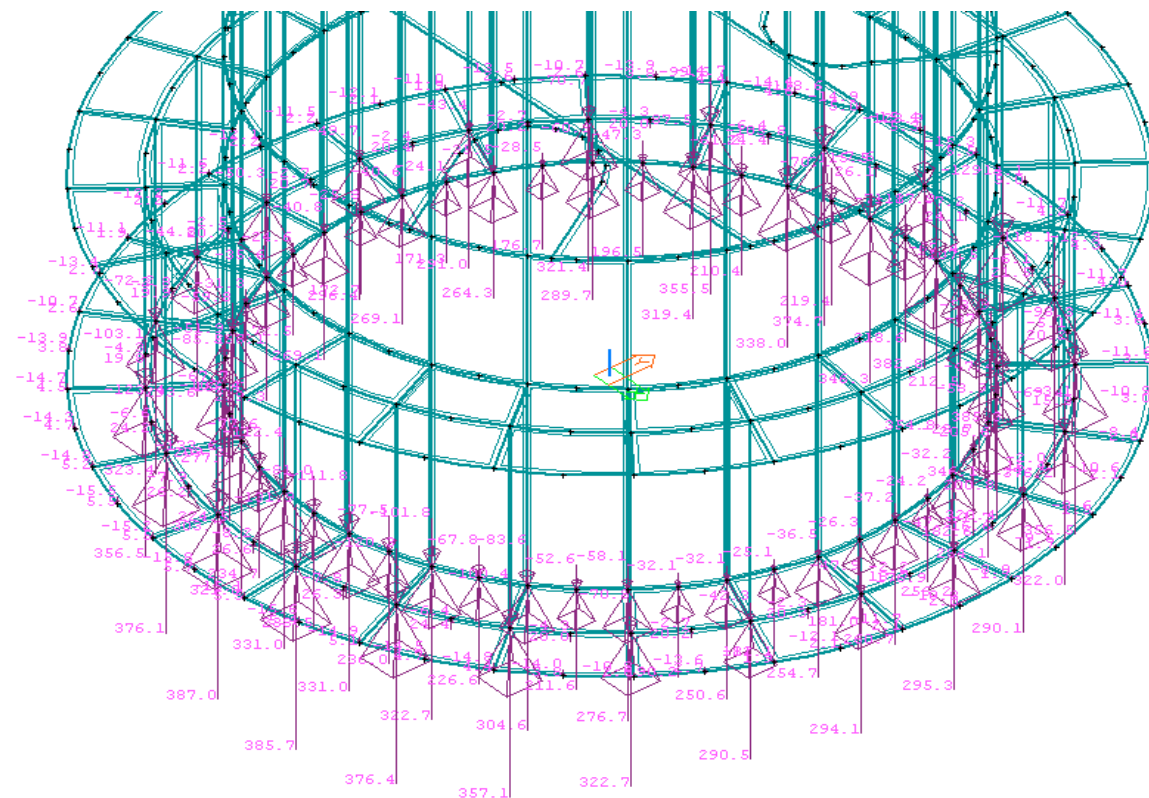
Výpis nebezpečných kombinací na únosnost

- 1/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2  
 2/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3  
 3/ 3 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2-1,30\*ZS5  
 4/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,30\*ZS5  
 5/ 2 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,30\*ZS6  
 6/ 4 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2-1,30\*ZS6  
 7/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,40\*ZS4  
 8/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,30\*ZS5  
 9/ 3 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3-1,30\*ZS5  
 10/ 4 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3-1,30\*ZS6  
 11/ 2 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,30\*ZS6  
 12/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,40\*ZS4  
 13/ 3 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,40\*ZS4-1,30\*ZS5  
 14/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,40\*ZS4+1,30\*ZS5  
 15/ 4 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,40\*ZS4-1,30\*ZS6  
 16/ 2 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,40\*ZS4+1,30\*ZS6  
 17/ 1 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,40\*ZS4+1,30\*ZS5  
 18/ 3 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,40\*ZS4-1,30\*ZS5  
 19/ 4 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,40\*ZS4-1,30\*ZS6  
 20/ 2 : +1,10\*ZS1+1,30\*ZS2+1,10\*ZS3+1,40\*ZS4+1,30\*ZS6

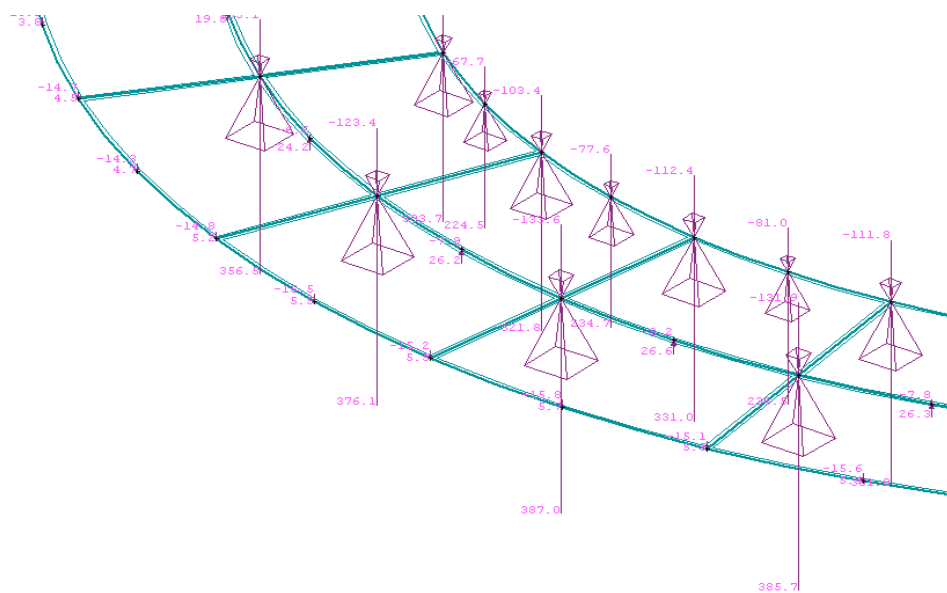
Výslednice zatížení působícího na konstrukci podle zatěžovacích stavů :

Zatěžovací stav	Rx [kN]	Ry [kN]	Rz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	0	0	1261,98	0,59	-0,35	0
2	0	0	360,01	29,39	-16,52	0
3	0	0	10065,67	-0,02	-0,02	614,53
4	0	0	213,17	0	0	0
5	-116,09	0	-33,98	0	-2794,31	0
6	0	-174,83	-23,06	5958,57	0,07	0,06

## Vodojem na 1000 m3



### Rozdělení reakcí - mezní stav únosnosti - kombinace



Síla na kotevní šroub M80x4

$$\min N_{Sd} = 363,625 \text{ kN}$$

$$\text{Kotevní šrouby} \quad A_{Sp} = 4566 \text{ mm}^2$$

$$N_{Rd} = 4566 \cdot 0,5 \cdot 400 / 1,45 / 1000 = 629,8 \text{ kN} > \min N$$

$$\max N_{Sd} = 1425,3 \text{ kN}$$

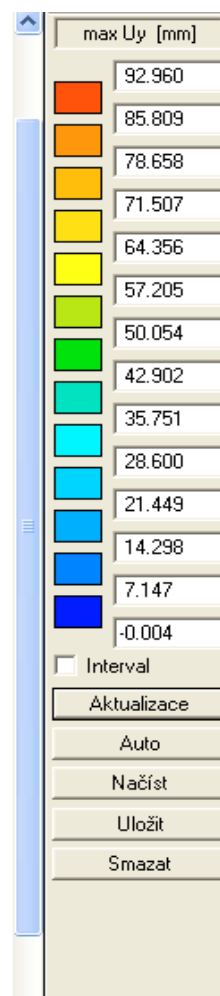
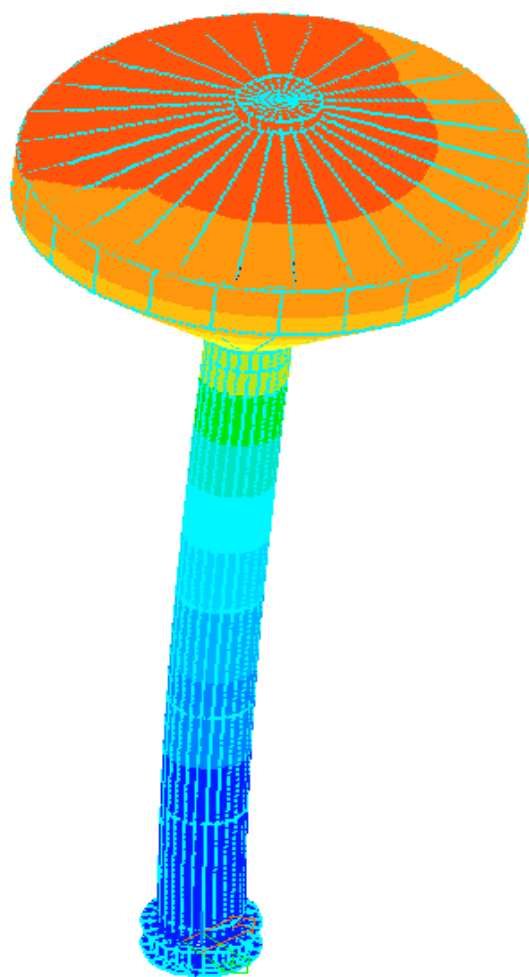
$$\sigma_c = N_{Sd} / 900 / 900 = 1,8 \text{ MPa} < 0,85 \cdot 20 / 1,5 = 11,3 \text{ MPa}$$

$$\text{Pateční plech } t = 80 \quad I_k = 600 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Sd} = \sigma_c \cdot I_k^2 / 2 = 316733,3 \text{ Nmm}$$

$$M_{pl,Rd} = 341818,2 \text{ Nmm} > M_{pl,Sd}$$

## Vodorovná deformace od větru

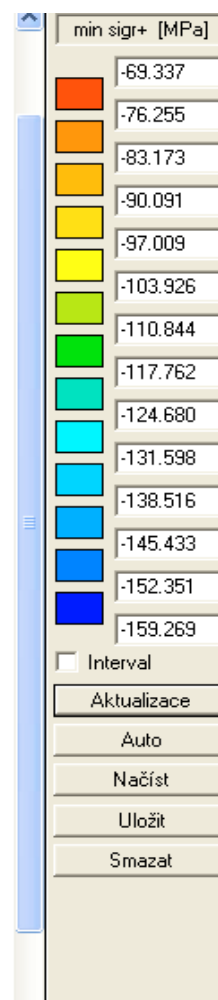
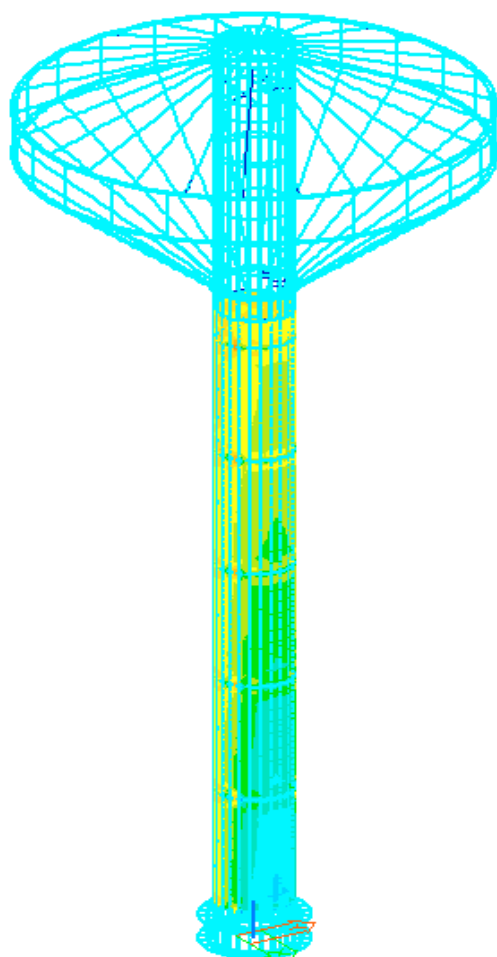


Max, vodorovný posun od větru



## Posouzení skořepin

Skořepina  $t = 14 \text{ mm}$



### Průběh axiálních napětí

#### Posouzení stability skořepin

$r = 1500 \text{ mm}$

$t = 14 \text{ mm}$

$w_{ok} = t / Q \cdot \sqrt{r/t} = 5,80 \text{ mm}$

$r \Delta O = 4 \sqrt{r \cdot t} = 579,7 \text{ mm}$

Z výpočtu MKP

$\sigma_{x\theta,Ed} = 159,30 \text{ MPa}$

$\sigma_{x1,Ed} = 152,30 \text{ MPa}$

podle ENV 1993-4-1

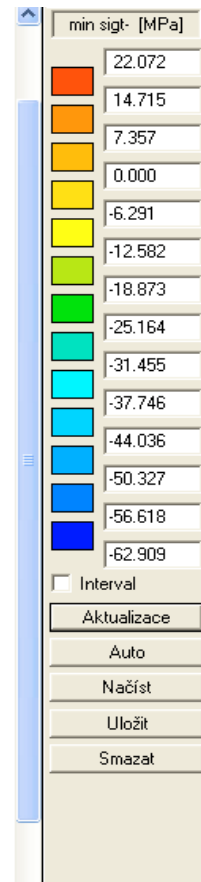
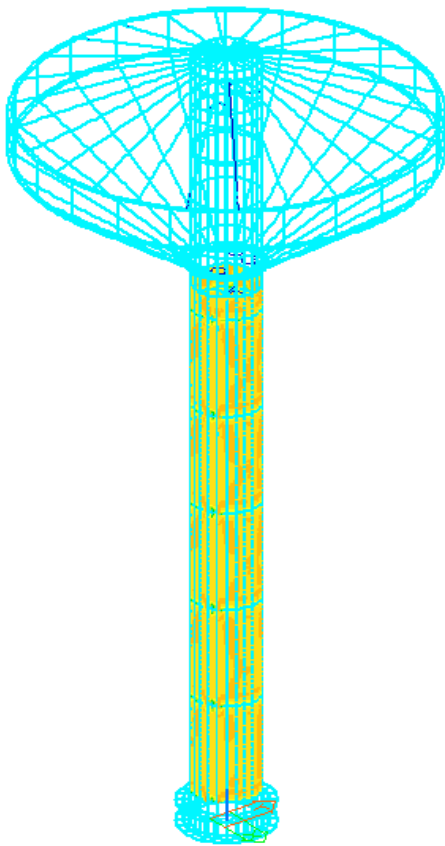
$j = 0,25 \cdot \sqrt{r/t} \cdot (\cos(\sigma_{x1,Ed} / \sigma_{x\theta,Ed}))^{-1} = 4,4868112$

$b_1 = 0,5 \cdot \sqrt{t/r} = 0,0483046$

$\psi_b = 0,4$

# Vodojem na 1000 m3

$b_2=(1-b_1)/\psi_b-1 =$	1,3792385		
$\psi = (1-b_1^*)/(1+b_2^*) =$	0,1089628		
$\alpha_0=0,62/(1+1,91*\psi(w_{ok}/t)^{1,44})=$	0,5857572		
$\sigma_{xRc}=0,605*E*t/r=$	1185,80	Mpa	
$f_y=$	235	Mpa	
$\lambda'_p=\sqrt{(2,5*\alpha_0)}=$	1,1880657		
$\lambda'_x=\sqrt{(f_y/\sigma_{xRc})}=$	0,445		
pro $\lambda'_p \leq \lambda'_x$ ; $\chi_x=0,7*\alpha_0/\lambda'^2_x$ ; for $\lambda'_x \leq \lambda'_p$ ; $\chi_x=(1-0,6*(\lambda'_x-0,2)/(\lambda'_p-0,2))$			
$\chi_x=$	0,8511		
$\sigma_{xRd}=\sigma_{xRc}/\gamma_{M3}=\chi_x*f_y/1,1=$	181,83	Mpa	Vyhovuje

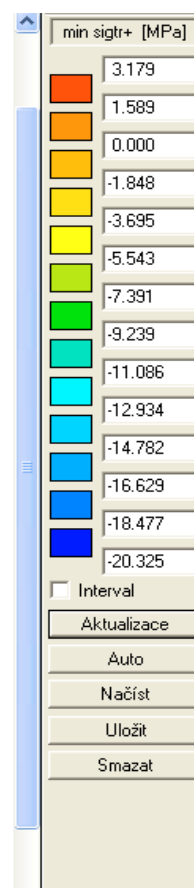
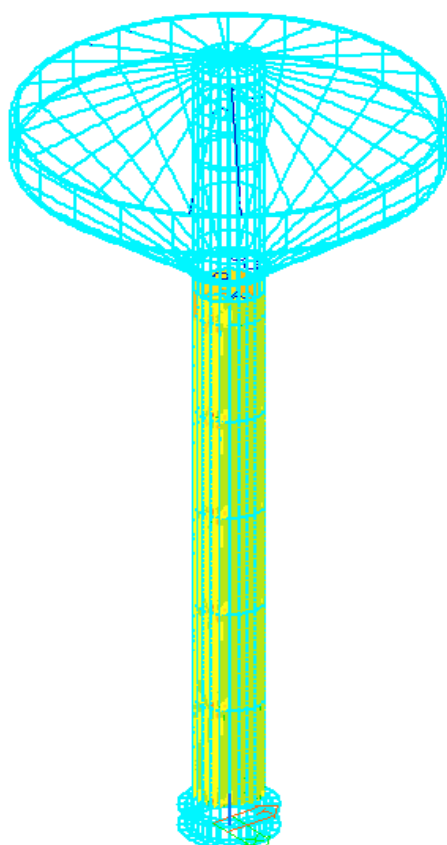


## Průběh obvodových napětí

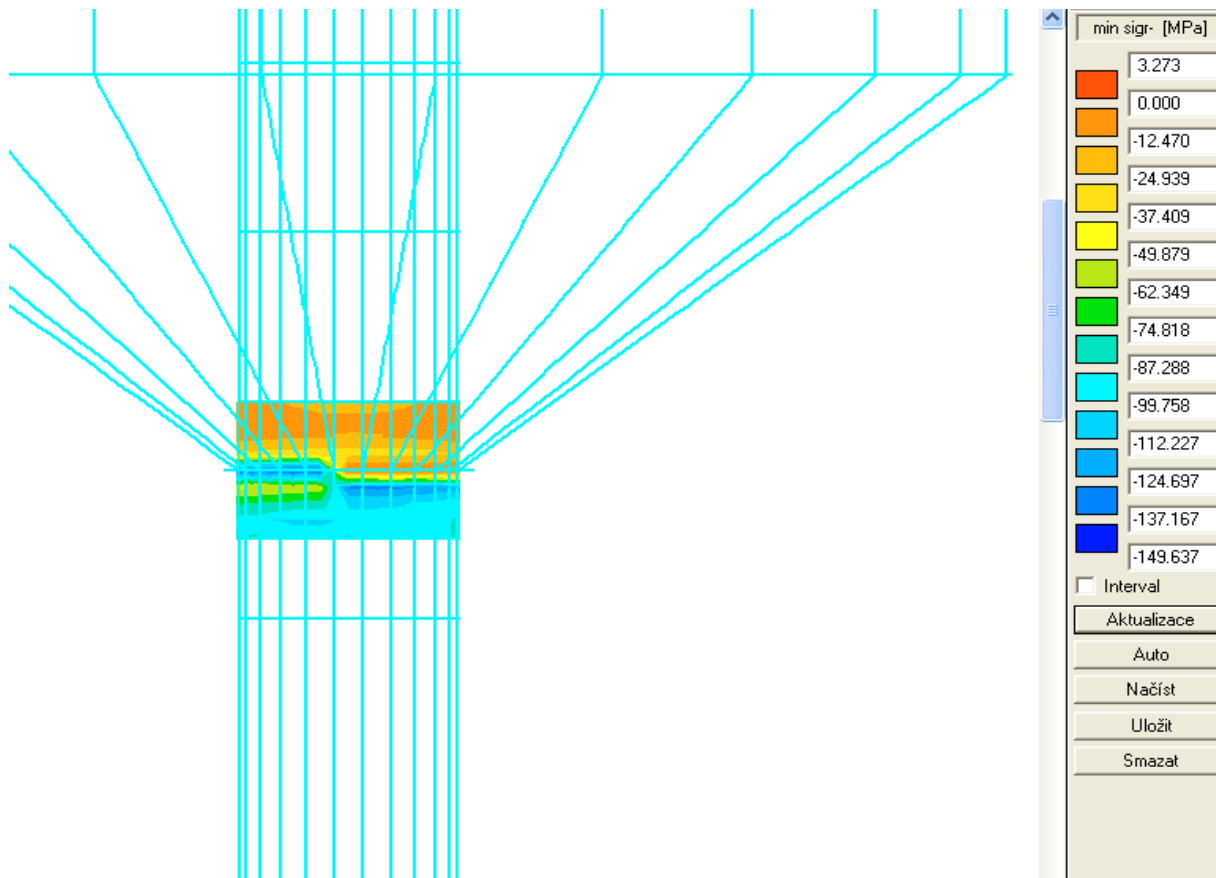
Poloměr skořepiny r=	1500	mm	
Tloušťka skořepiny	14	mm	
Mez kluzu $f_{y,k}=$	235	MPa	
Délka skořepiny=	5400	mm	
Délkový parametr $\omega=l/\sqrt{(r*t)}=$	37,3		
$0,5*r/t=$	53,6		
Okrajové podmínky skořepiny :		Přípustné okrajové podmínky :	
Okraj 1	BC1	BC1 - vetknutí	BC1 - vetknutí
Okraj 2	BC1	BC1 - vetknutí	BC2 - kloub
Circumferential pressure :		BC2 - kloub	BC2 - kloub
C0 =	1,5	BC1 - vetknutí	BC3 - volný okraj

$1,63 \cdot r/t =$	174,6429	
$\omega/C0 =$	24,8	$\omega/C0 < 20$ krátká skořepina
		$\omega/C0 < 1,63 \cdot r/t$ střední skořepina
		$\omega/C0 > 1,63 \cdot r/t$ dlouhá skořepina
$\sigma_{ORc} = 0,92 \cdot E / ((\omega/C0) \cdot t/r) =$	72,6	MPa
$\alpha_0(0,75; 0,65; 0,50) =$	0,65	
$\lambda'_{x0} =$	0,4	
$\beta =$	0,6	
$\eta =$	1	
$\lambda'_x = \sqrt{(f_y / \sigma_{xRc})} =$	1,799	
$\lambda'_p = \sqrt{(\alpha / (1 - \beta))} =$	1,275	
$\chi_x =$	0,200769	
$\sigma_{xRk} = \chi_x \cdot f_{y,k} =$	47,181	MPa
Smyk :		
$C_T = \sqrt{(1 + 42/\omega^3)} =$	1,000406	
$\tau_{Rc} = 0,75 \cdot E \cdot C_T \cdot \sqrt{(1/\omega) \cdot (t/r)} =$	240,9081	MPa

Průběh smykových napětí



# Skořepina t = 16 mm



Průběh axiálních napětí

## Posouzení stability skořepin

r= 1500 mm

t= 16 mm

$w_{ok} = t / \sqrt{Q \cdot (r/t)} = 6,20$  mm

$r \Delta O = 4 \sqrt{r \cdot t} = 619,7$  mm

Z výpočtu MKP

$\sigma_{x\theta,Ed} = 149,60$  MPa

$\sigma_{x1,Ed} = 137,20$  MPa

podle ENV 1993-4-1

$j = 0,25 \cdot \sqrt{r/t} \cdot (\cos(\sigma_{x1,Ed} / \sigma_{x\theta,Ed}))^{-1} = 3,9805205$

$b_1 = 0,5 \cdot \sqrt{t/r} = 0,0516398$

$\psi_b = 0,4$

$b_2 = (1 - b_1) / \psi_b - 1 = 1,3709006$

$\psi = (1 - b_1 \cdot j) / (1 + b_2 \cdot j) = 0,1230385$

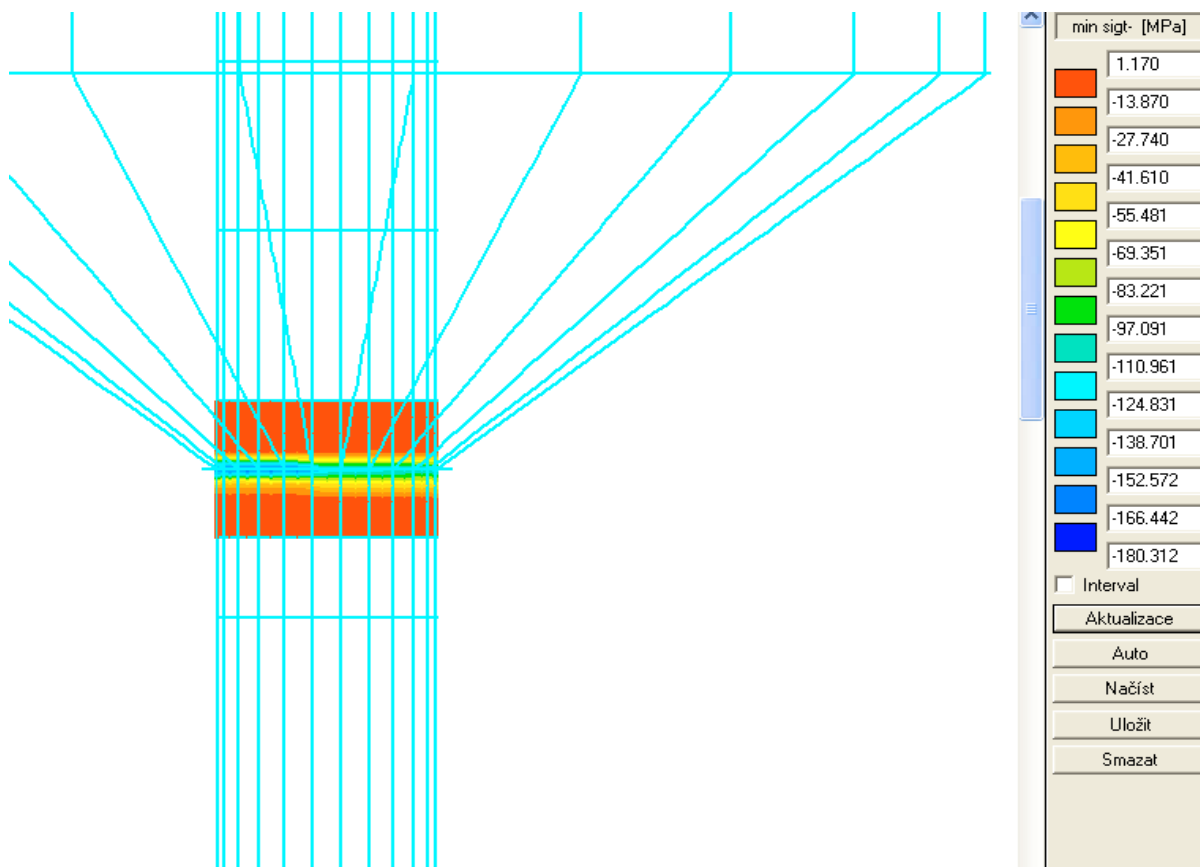
$\alpha_0 = 0,62 / (1 + 1,91 \cdot \psi \cdot (w_{ok}/t)^{1,44}) = 0,5849279$

$\sigma_{xRc} = 0,605 \cdot E \cdot t / r = 1355,20$  Mpa

$f_y = 235$  Mpa

Vodojem na 1000 m3

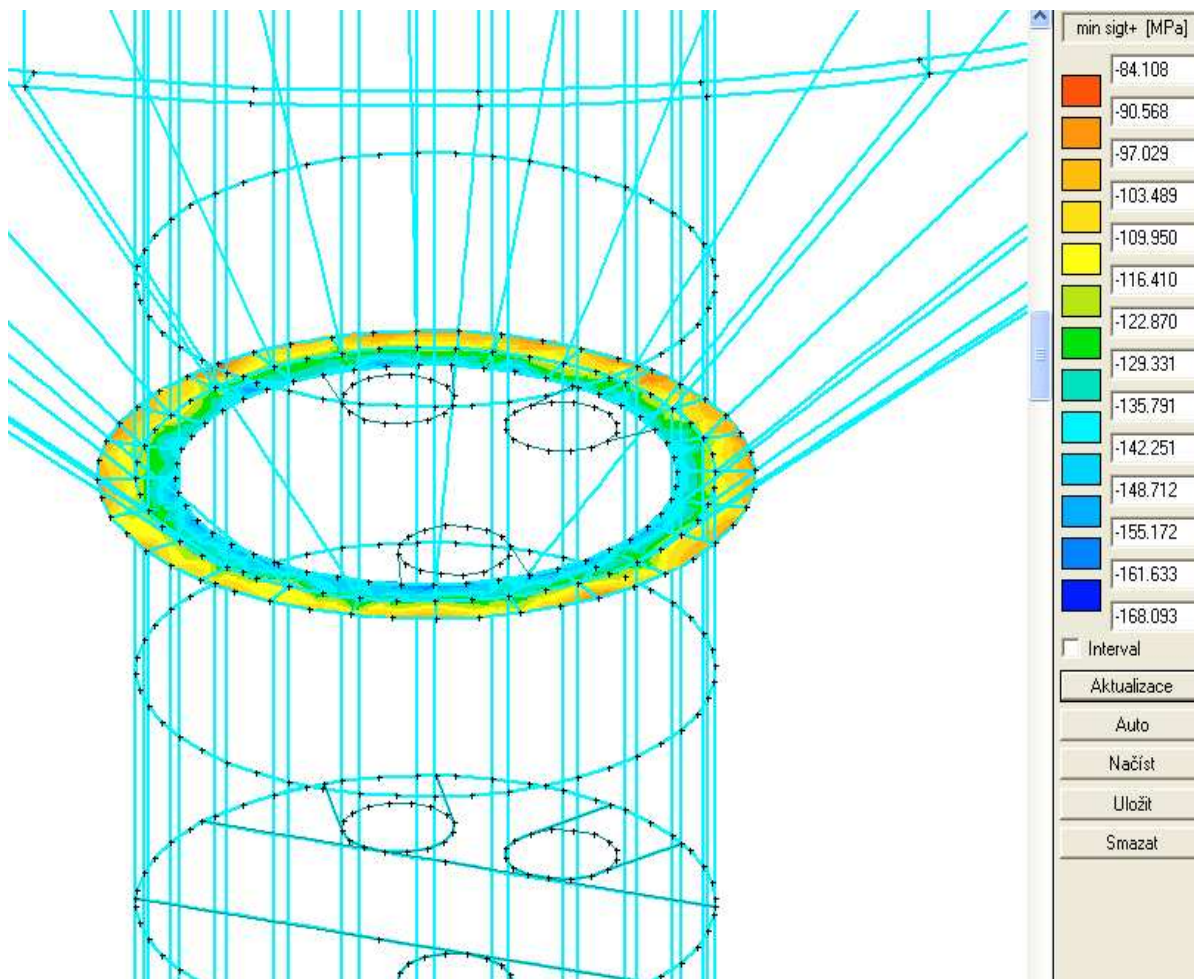
$$\begin{aligned}\lambda'_p &= \sqrt{(2,5 \cdot \alpha_0)} = 1,1880657 \\ \lambda'_x &= \sqrt{(f_y / \sigma_{xRc})} = 0,416 \\ \text{pro } \lambda'_p \leq \lambda'_x; \quad \chi_x &= 0,7 \cdot \alpha_0 / \lambda'^2_x; \quad \text{for } \lambda'_x \leq \lambda'_p; \quad \chi_x = (1 - 0,6 \cdot (\lambda'_x - 0,2) / (\lambda'_p - 0,2)) \\ \chi_x &= 0,8686 \\ \sigma_{xRd} &= \sigma_{xRx} / \gamma_{M3} = \chi_x \cdot f_y / 1,1 = 185,56 \text{ Mpa} \quad \text{Vyhovuje}\end{aligned}$$



Průběh obvodových napětí

Maximální napětí  $\sigma_{Ed} = 180,3 \text{ MPa} < 235/1,15 = 204 \text{ MPa}$  Vyhovuje

Skořepina  $t = 30 \text{ mm}$



Průběh obvodových napětí

Maximální napětí  $\sigma_{Ed} = 180,3 \text{ MPa} < 235/1,15 = 204 \text{ MPa}$  Vyhovuje

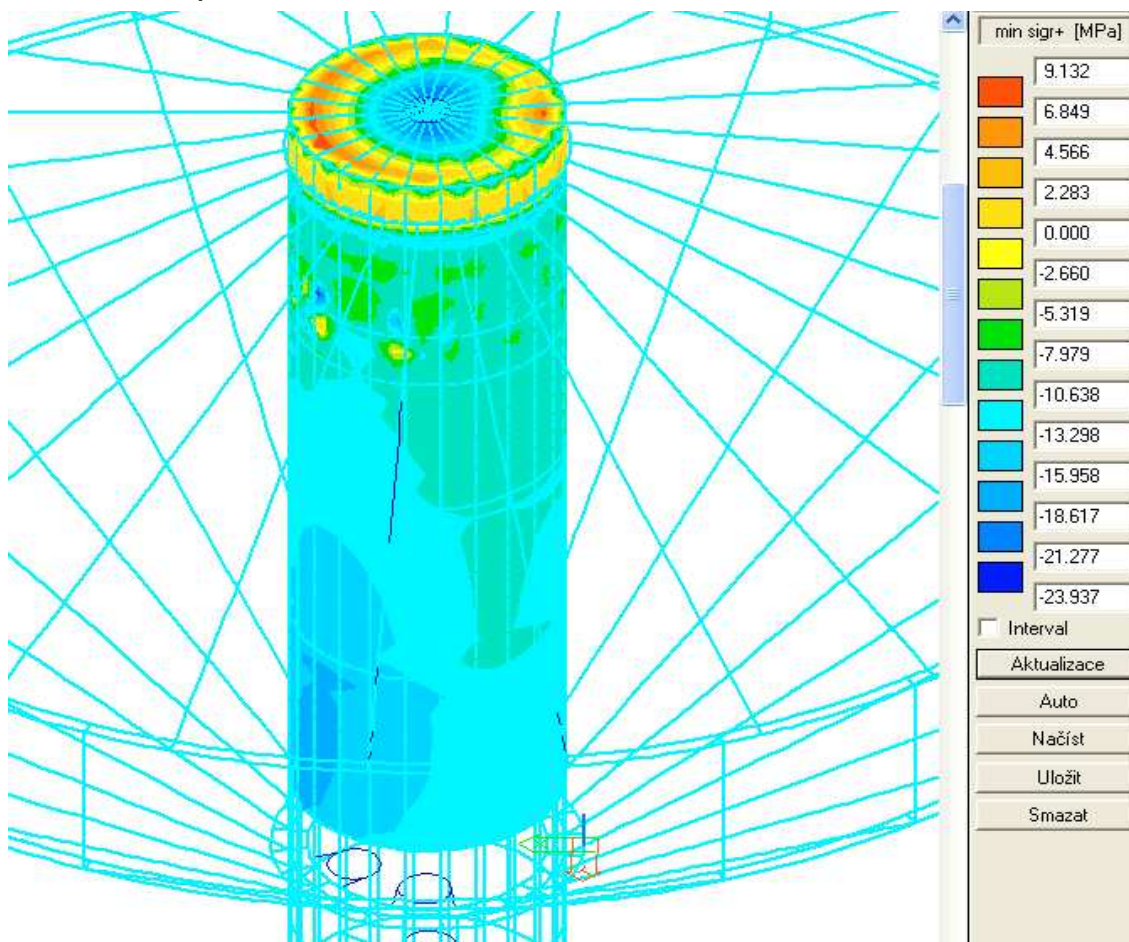
Material: S235  $f_y = 235 \text{ MPa}$   $\gamma_M = 1,15$   
 $A = 12000,0 \text{ mm}^2$   $i_z = 115,47 \text{ mm}$   $i_\xi = 115,47 \text{ mm}$

Vzpěrná délka:  $N_{cr} = 4EI/r^2$   $l_y = \sqrt{(\pi^2 \cdot E \cdot I / N_{cr})} = \pi \cdot r / 2$   
 $l_x = 2356 \text{ mm}$   $l_y = 2356 \text{ mm}$   $l_z = 2356 \text{ mm}$

Vzpěr:  
 $\lambda_{y1} = 0,217308$   $\alpha_1 = 0,49$   $\Phi = 0,527852$   $\chi_y = 0,991181$   
 $\lambda_{z1} = 0,21729$   $\alpha_1 = 0,49$   $\Phi = 0,527844$   $\chi_z = 0,99119$

Prstenec je stabilní

Skořepina t = 10 mm



Průběh axiálních napětí

Posouzení stability skořepin

r= 1500 mm

t= 10 mm

$w_{ok} = t/Q \cdot \sqrt{r/t} = 4,90$  mm

$r\Delta O = 4 \sqrt{r \cdot t} = 489,9$  mm

Z výpočtu MKP

$\sigma_{x0,Ed} = 23,90$  MPa

$\sigma_{x1,Ed} = 21,20$  MPa

podle ENV 1993-4-1

$j = 0,25 \cdot \sqrt{r/t} \cdot (\cos(\sigma_{x1,Ed}/\sigma_{x0,Ed}))^{-1} = 4,8468836$

$b_1 = 0,5 \cdot \sqrt{t/r} = 0,0408248$

$\psi_b = 0,4$

$b_2 = (1 - b_1)/\psi_b - 1 = 1,3979379$

$\psi = (1 - b_1 \cdot j)/(1 + b_2 \cdot j) = 0,1031589$

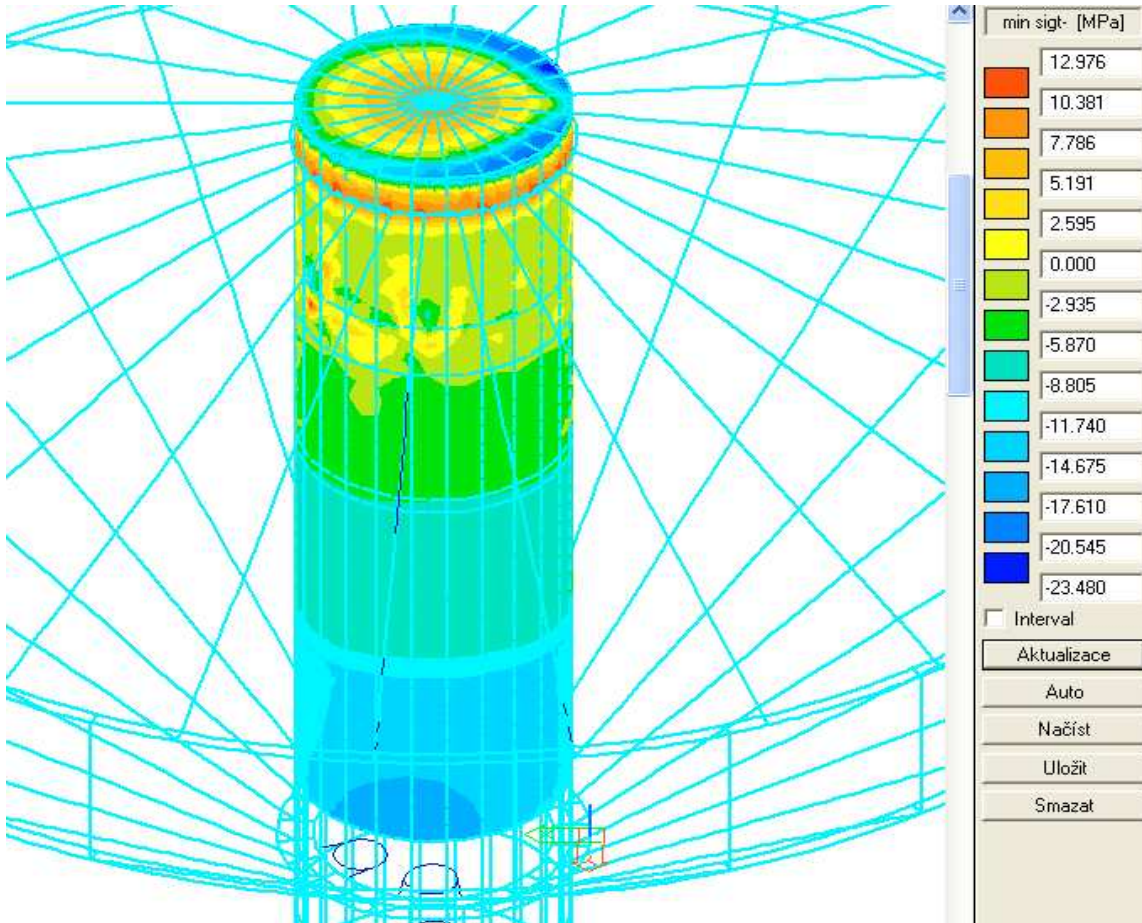
$\alpha_0 = 0,62 / (1 + 1,91 \cdot \psi \cdot (w_{ok}/t)^{1,44}) = 0,5791596$

$\sigma_{xRc} = 0,605 \cdot E \cdot t/r = 847,00$  Mpa



# Vodojem na 1000 m3

$f_y = 235$  Mpa  
 $\lambda'_p = \sqrt{(2,5 \cdot \alpha_0)} = 1,1880657$   
 $\lambda'_x = \sqrt{(f_y / \sigma_{xRd})} = 0,527$   
 pro  $\lambda'_p \leq \lambda'_x$ ;  $\chi_x = 0,7 \cdot \alpha_0 / \lambda'^2_x$ ; for  $\lambda'_x \leq \lambda'_p$ ;  $\chi_x = (1 - 0,6 \cdot (\lambda'_x - 0,2) / (\lambda'_p - 0,2))$   
 $\chi_x = 0,8016$   
 $\sigma_{xRd} = \sigma_{xRx} / \gamma_{M3} = \chi_x \cdot f_y / 1,1 = 171,25$  Mpa Vyhovuje



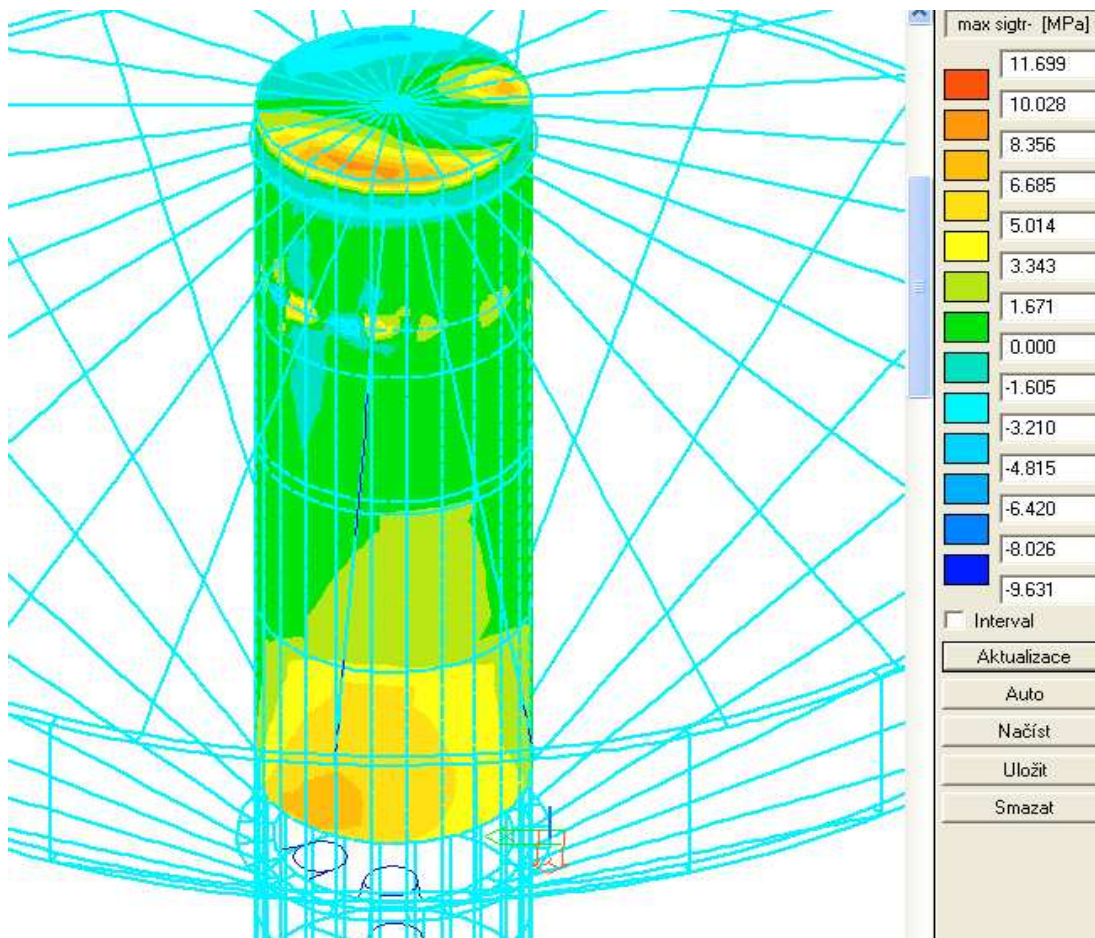
## Průběh obvodových napětí

Poloměr skořepiny r=	1500	mm
Tloušťka skořepiny	10	mm
Mez kluzu $f_{y,k}$ =	235	MPa
Délka skořepiny=	5400	mm
Délkový parametr $\omega = l / \sqrt{(r \cdot t)}$ =	44,1	
$0,5 \cdot r / t =$	75,0	
Okrajové podmínky skořepiny :		Přípustné okrajové podmínky :
Okraj 1	BC1	BC1 - vetknutí
Okraj 2	BC1	BC1 - vetknutí
Circumferential pressure :		BC2 - kloub
C0 = 1,5		BC2 - kloub
$1,63 \cdot r / t =$	244,5	BC1 - vetknutí
		BC3 - volný okraj



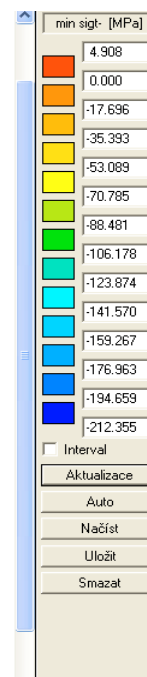
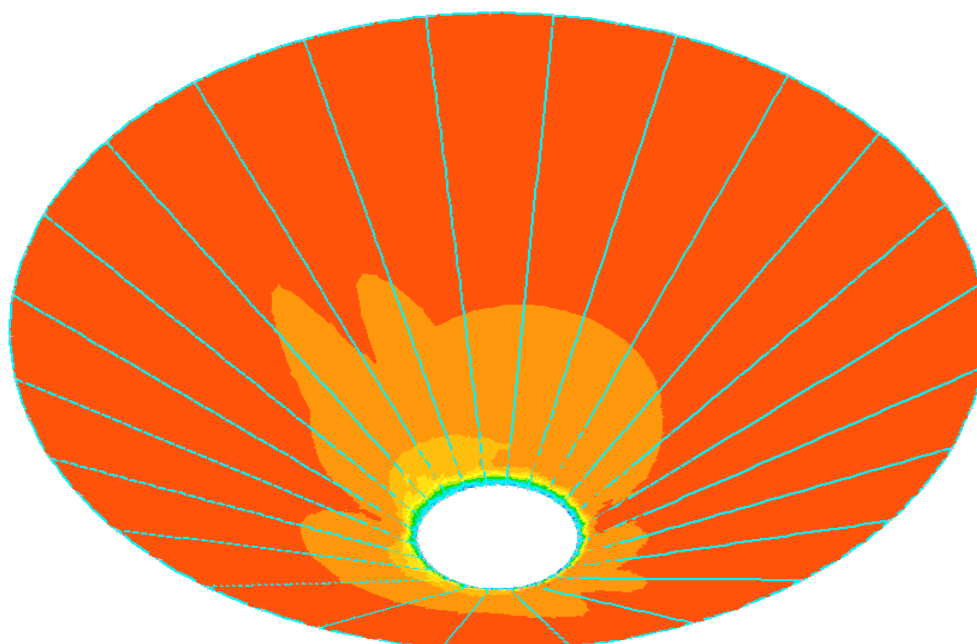
# Vodojem na 1000 m3

$\omega/C0 =$	29,4	$\omega/C0 < 20$	krátká skořepina
		$\omega/C0 < 1,63 \cdot r/t$	střední skořepina
		$\omega/C0 > 1,63 \cdot r/t$	dlouhá skořepina
$\sigma_{ORc} = 0,92 \cdot E / (\omega/C0) \cdot t/r =$	43,8	MPa	
$\alpha_0 (0,75; 0,65; 0,50) =$	0,65		
$\lambda'_{x0} =$	0,4		
$\beta =$	0,6		
$\eta =$	1		
$\lambda'_x = \sqrt{(f_y / \sigma_{xRc})} =$	2,316		
$\lambda'_p = \sqrt{(\alpha / (1 - \beta))} =$	1,275		
$\chi_x =$	0,121201		
$\sigma_{xRk} = \chi_x \cdot f_{y,k} =$	28,482	MPa	> 23,48 MPa

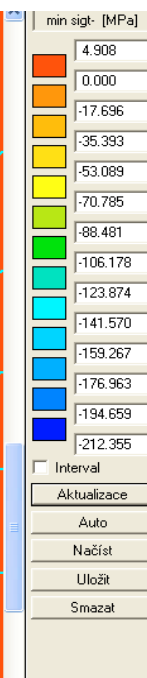
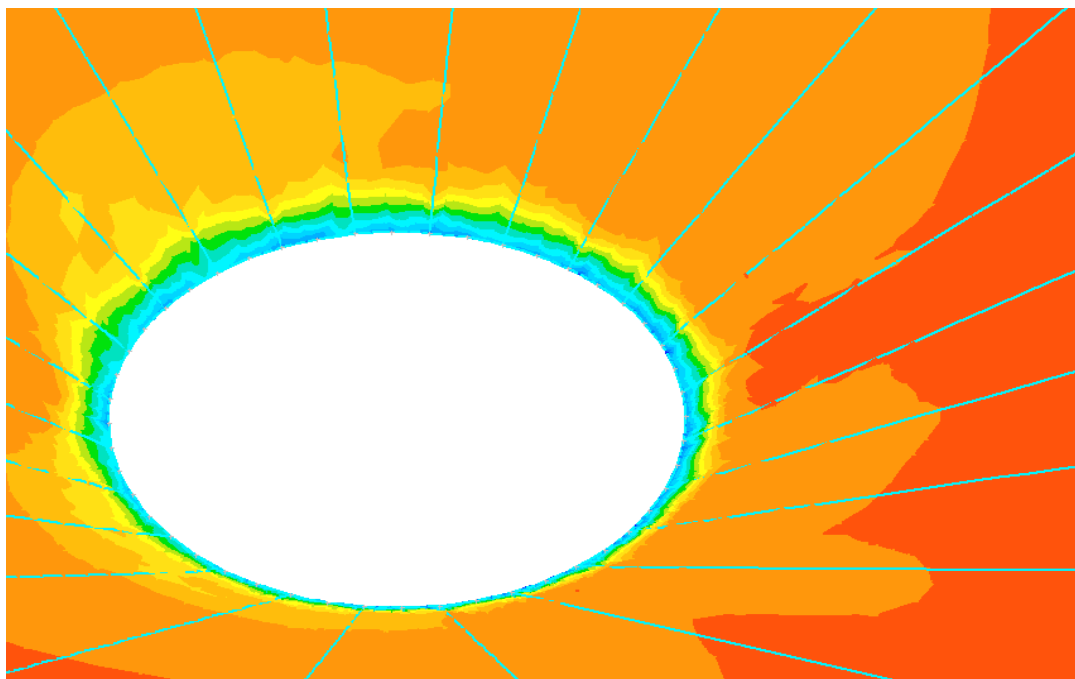


Smyk :		
$Ct = \sqrt{(1 + 42/\omega^3)} =$	1,000245	
$\tau_{Rc} = 0,75 \cdot E \cdot Ct \cdot \sqrt{(1/\omega)} \cdot (t/r) =$	158,1691	MPa

Skořepina t = 20 mm

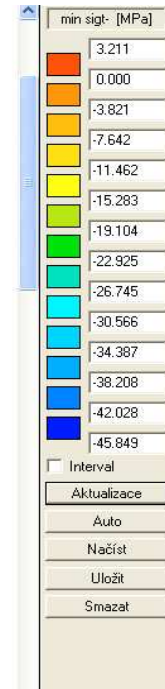
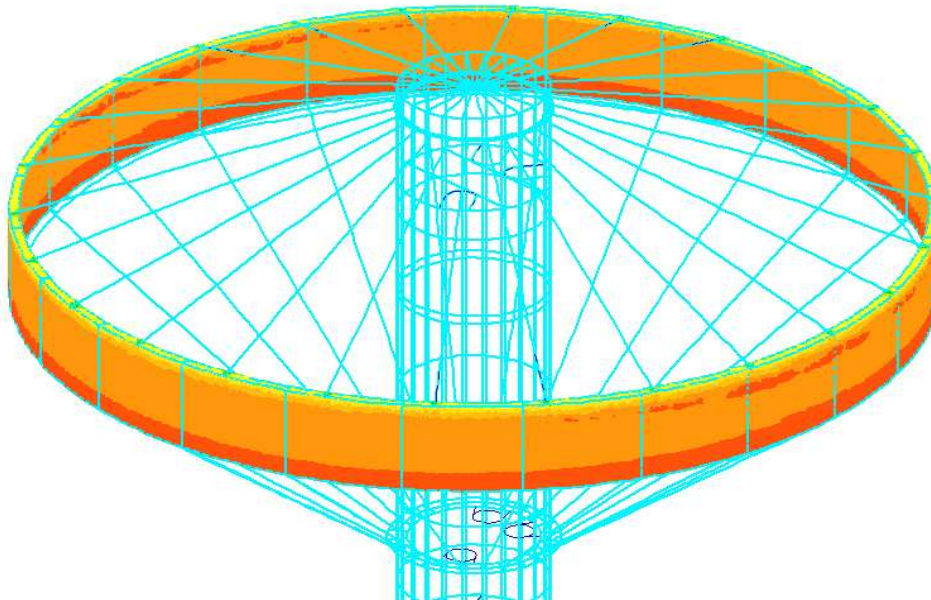


Průběh obvodových napětí



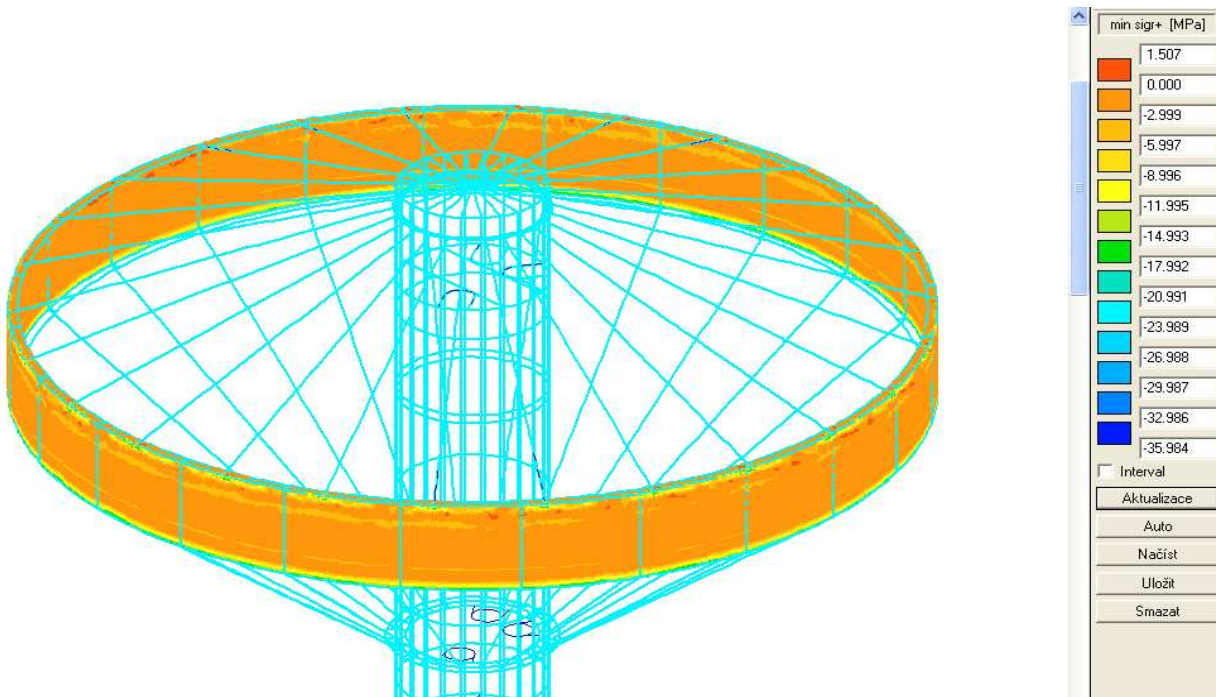
Maximální napětí  $\sigma_{Ed} = 212,3 \text{ MPa} \approx 235/1,15 = 204 \text{ MPa}$  Vyhovuje  
Mírné překročení účinku sekundárního napětí (složka od ohybového momentu) vyhovuje,  
primární napětí v plechu je 196 MPa.

Skořepina  $t = 8 \text{ mm}$



Průběh obvodových napětí

Poloměr skořepiny $r =$	9000	mm		
Tloušťka skořepiny	8	mm		
Mez kluzu $f_{y,k} =$	235	MPa		
Délka skořepiny $=$	2000	mm		
Délkový parametr $\omega = l/\sqrt{(r \cdot t)} =$	7,5			
$0,5 \cdot r/t =$	562,5			
Okrajové podmínky skořepiny :		Přípustné okrajové podmínky :		
Okraj 1	BC1	BC1 - vetknutí	BC1 - vetknutí	
Okraj 2	BC1	BC1 - vetknutí	BC2 - kloub	
Circumferential pressure :		BC2 - kloub	BC2 - kloub	
$C0 =$	1,5	BC1 - vetknutí	BC3 - volný okraj	
$1,63 \cdot r/t =$	1833,75			
$\omega/C0 =$	5,0	$\omega/C0 < 20$	krátká skořepina	
		$\omega/C0 < 1,63 \cdot r/t$	střední skořepina	
		$\omega/C0 > 1,63 \cdot r/t$	dlouhá skořepina	
$\sigma_{ORc} = 0,92 \cdot E / ((\omega/C0) \cdot t/r) =$	34,6	MPa		
$\alpha_0(0,75; 0,65; 0,50) =$	0,65			
$\lambda'_{x0} =$	0,4			
$\beta =$	0,6			
$\eta =$	1			
$\lambda'_x = \sqrt{(f_y / \sigma_{xRc})} =$	2,608			
$\lambda'_p = \sqrt{(\alpha / (1 - \beta))} =$	1,275			
$\chi_x =$	0,095593			
$\sigma_{xRk} = \chi_x \cdot f_{y,k} =$	22,464	MPa	> 7,6	MPa



#### Průběh axiálních napětí

Posouzení stability skořepin

$r = 9000$  mm

$t = 8$  mm

$w_{ok} = t/Q \cdot \sqrt{r/t} = 10,73$  mm

$r \Delta O = 4 \sqrt{r \cdot t} = 1073,3$  mm

Z výpočtu MKP

$\sigma_{x0,Ed} = 9,00$  MPa

$\sigma_{x1,Ed} = 9,00$  MPa

podle ENV 1993-4-1

$j = 0,25 \sqrt{r/t} \cdot (\cos(\sigma_{x1,Ed}/\sigma_{x0,Ed}))^{-1} = 15,519562$

$b_1 = 0,5 \sqrt{t/r} = 0,0149071$

$\psi_b = 0,4$

$b_2 = (1 - b_1)/\psi_b - 1 = 1,4627322$

$\psi = (1 - b_1 \cdot j)/(1 + b_2 \cdot j) = 0,0324311$

$\alpha_0 = 0,62/(1 + 1,91 \cdot \psi \cdot (w_{ok}/t)^{1,44}) = 0,5664282$

$\sigma_{xRc} = 0,605 \cdot E \cdot t/r = 112,93$  Mpa

$f_y = 235$  Mpa

$\lambda'_p = \sqrt{2,5 \cdot \alpha_0} = 1,1880657$

$\lambda'_x = \sqrt{f_y/\sigma_{xRc}} = 1,443$

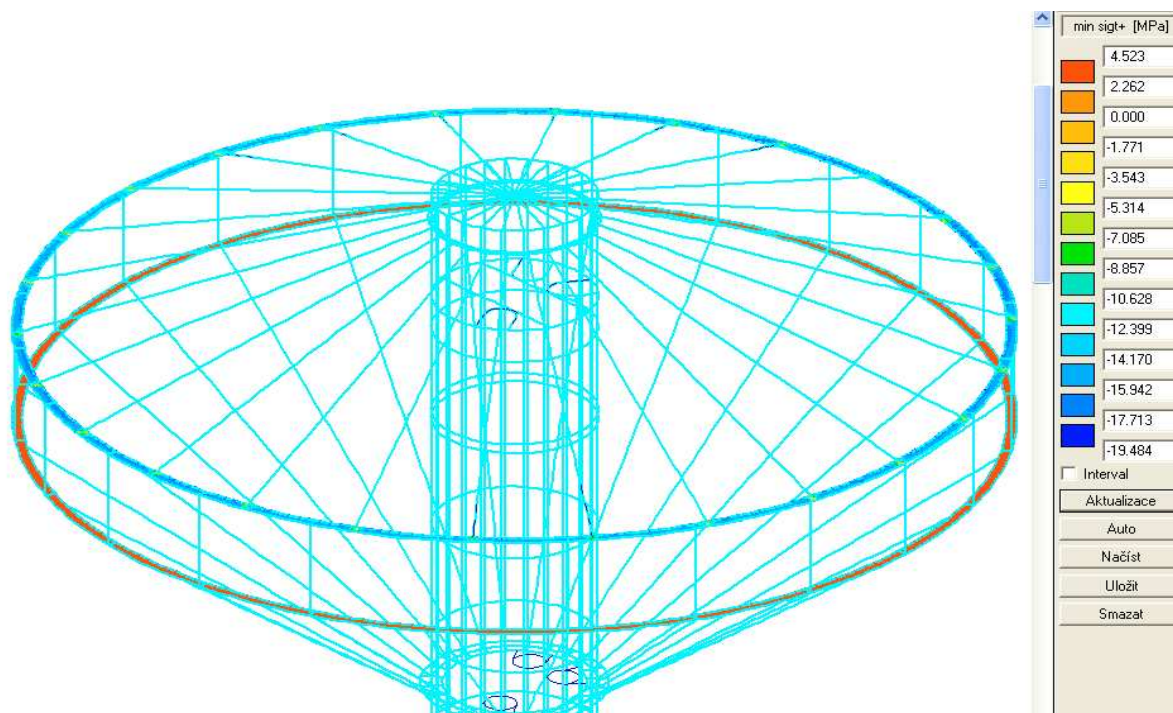
pro  $\lambda'_p \leq \lambda'_x$ ;  $\chi_x = 0,7 \cdot \alpha_0 / \lambda'^2_x$ ; for  $\lambda'_x \leq \lambda'_p$ ;  $\chi_x = (1 - 0,6 \cdot (\lambda'_x - 0,2)/(\lambda'_p - 0,2))$

$\chi_x = 0,1905$

$\sigma_{xRd} = \sigma_{xRc} / \gamma_{M3} = \chi_x \cdot f_y / 1,1 = 40,71$  Mpa Vyhovuje



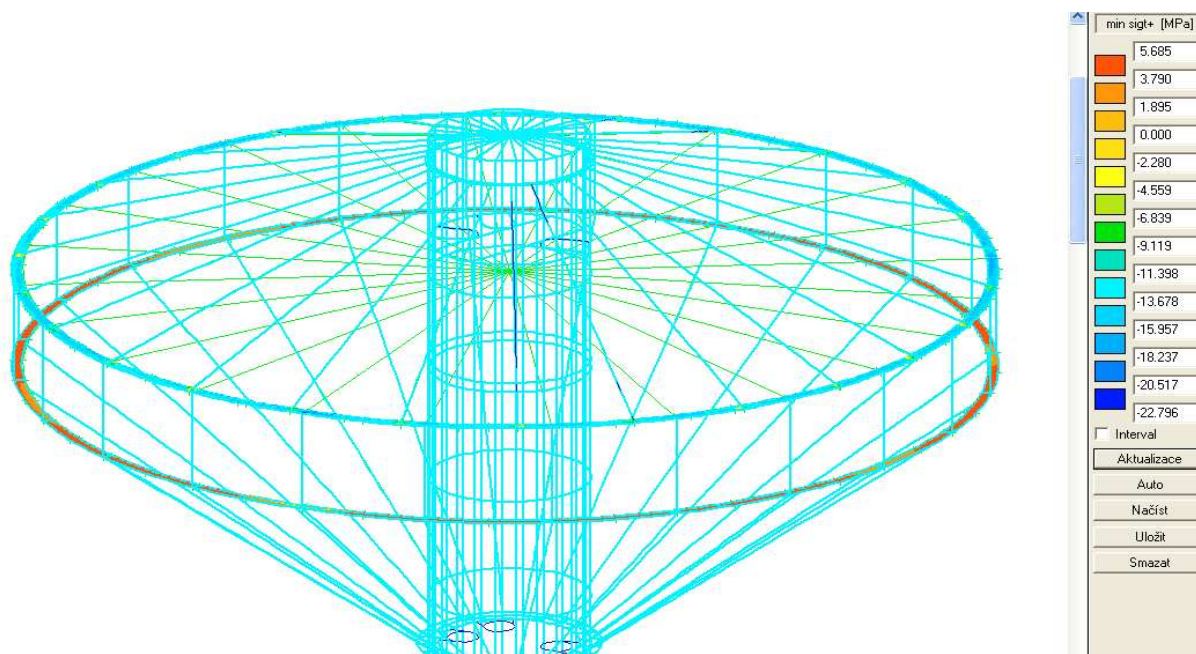
## Prstence P 30x180



Napětí na konstrukci bez imperfekcí

Maximální napětí  $\sigma_{Ed} = -19,5 \text{ MPa} < 235/1,15 = 204 \text{ MPa}$  Vyhovuje

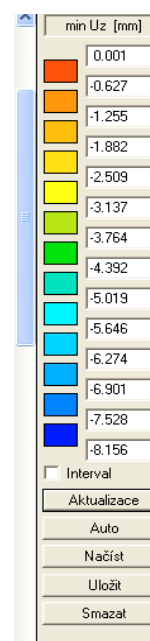
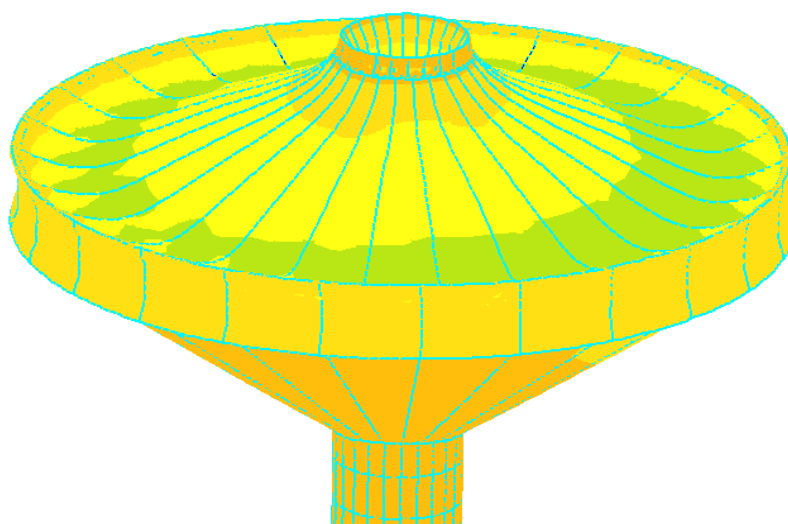
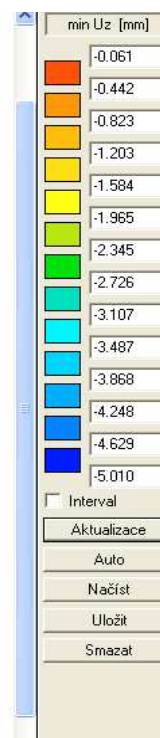
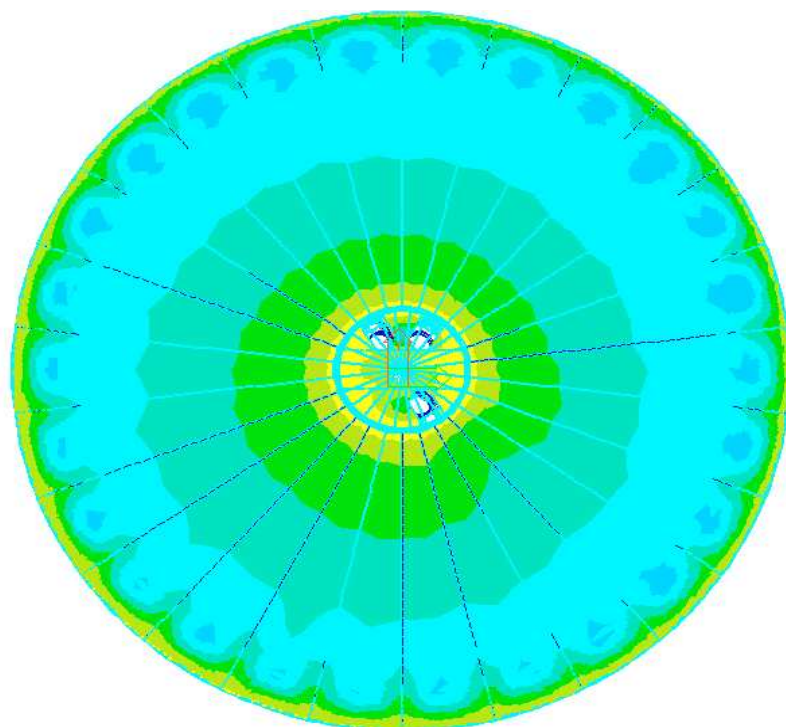
Prstence jsou drženy proti vybočení ve dvou směrech , vzpěr se neprojeví.



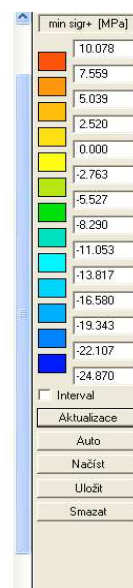
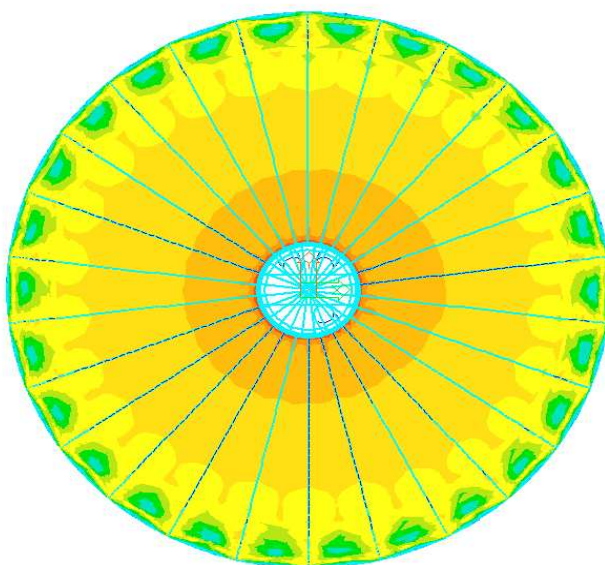
Napětí na konstrukci s imperfekcemi podle skutečného zaměření  
 Maximální napětí  $\sigma_{Ed} = -22,8 \text{ MPa} < 235/1,15 = 204 \text{ MPa}$  Vyhovuje  
 Prstence jsou drženy proti vybočení ve dvou směrech , vzpěr se neprojeví.

## Deformace střechy

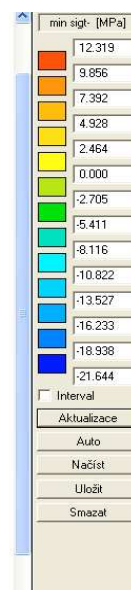
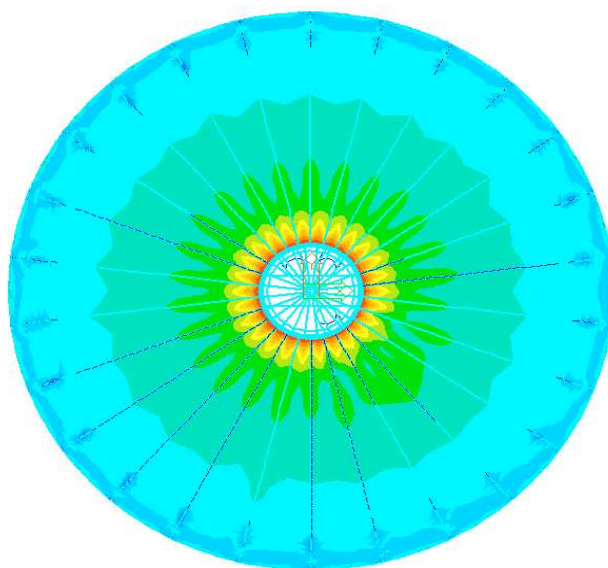
Svislý průhyb od stálých zatížení a sněhu - mezní stav použitelnosti.



Skořepina střechy t = 6 mm



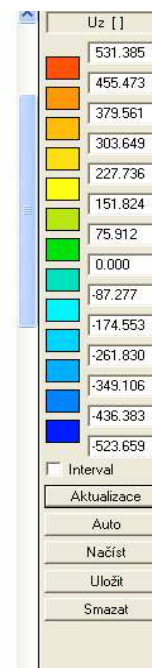
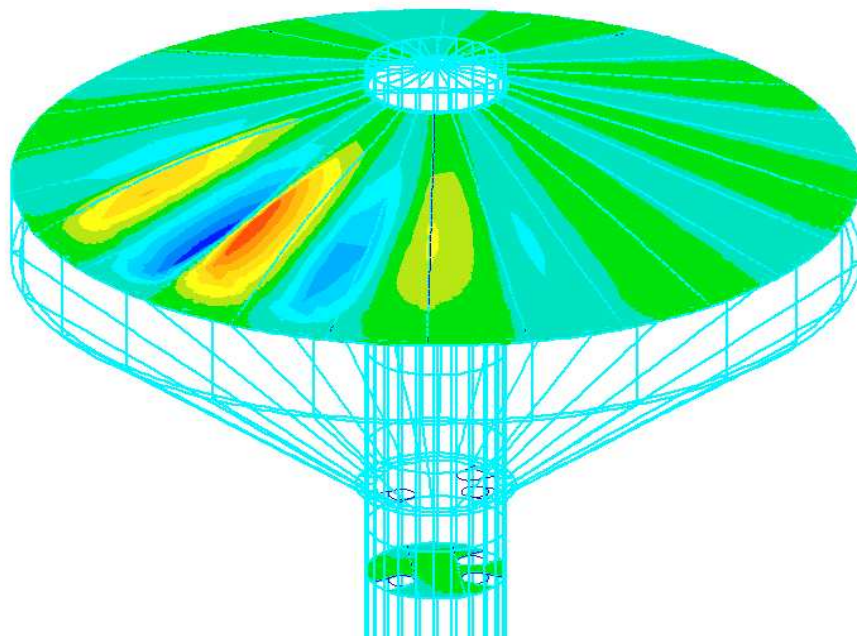
Průběh radiálního napětí  $\sigma_{rEd}$



Průběh obvodového napětí  $\sigma_{tEd}$



## Posouzení stability plechu střechy

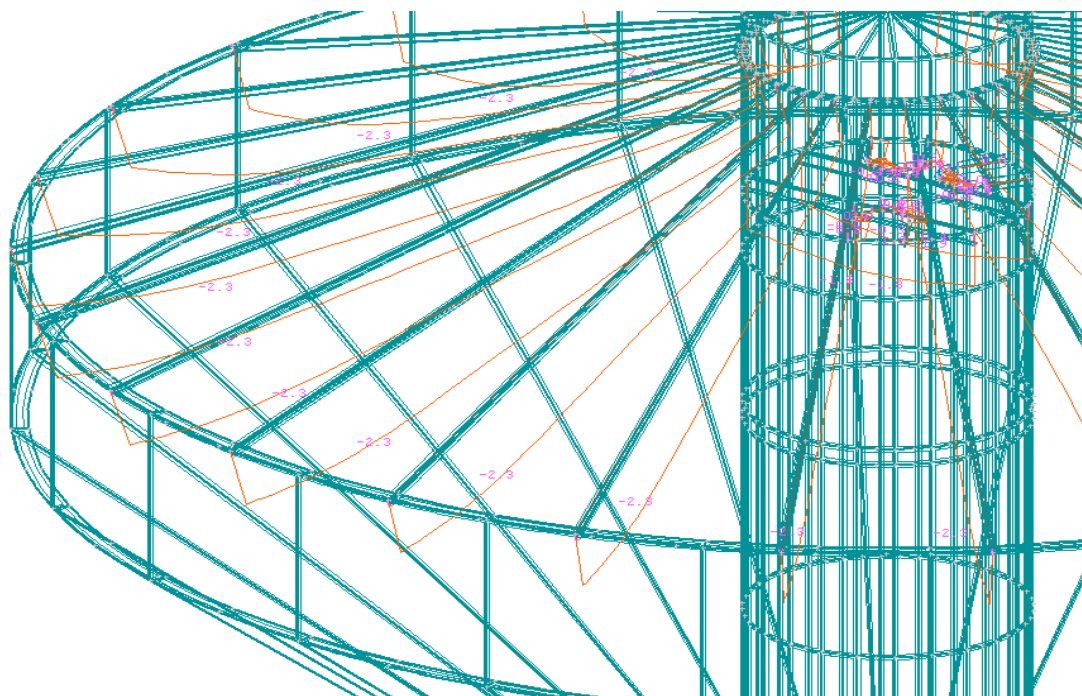


Tvar vybočení plechů střechy .

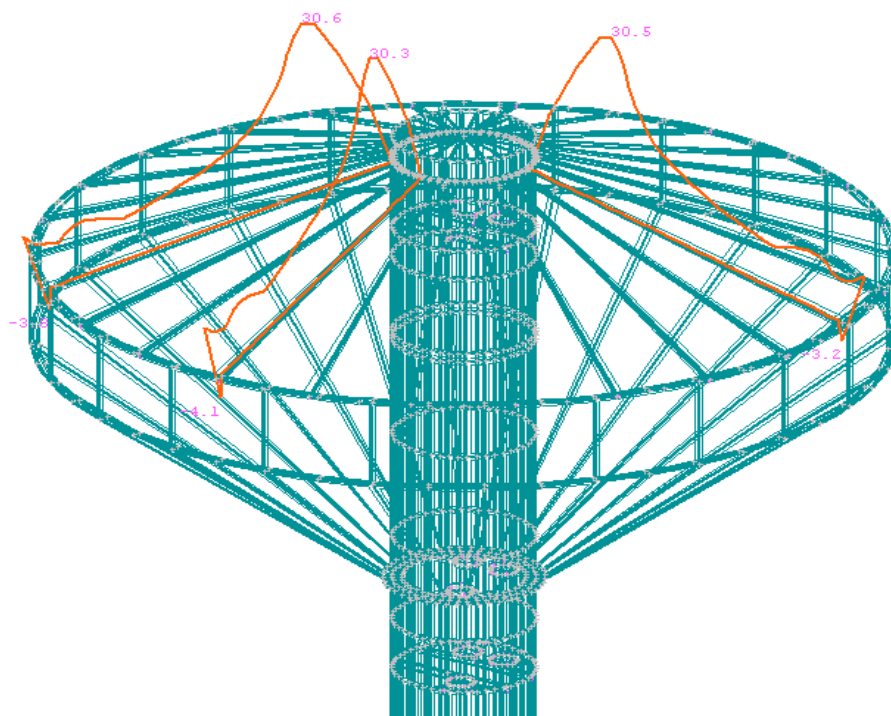
Součinitel kritického zatížení 1,215

$$\begin{aligned}
 \sigma_{cr,p} &= 21,6 \cdot 1,215 = 26,2 \text{ MPa} \\
 \lambda_p &= \sqrt{f_y / \sigma_{cr}} = 2,99 \\
 \sigma_{ORc} &= 26,2 \text{ MPa} \\
 \alpha_0(0,75; 0,65; 0,50) &= 0,65 \\
 \lambda'_{x0} &= 0,4 \\
 \beta &= 0,6 \\
 \eta &= 1 \\
 \lambda'_x &= \sqrt{(f_y / \sigma_{xRc})} = 2,992 \\
 \lambda'_p &= \sqrt{(\alpha / (1 - \beta))} = 1,275 \\
 \chi_x &= 0,07259 \\
 \sigma_{xRk} &= \chi_x \cdot f_{y,k} = 17,059 \text{ MPa} > 16,2 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

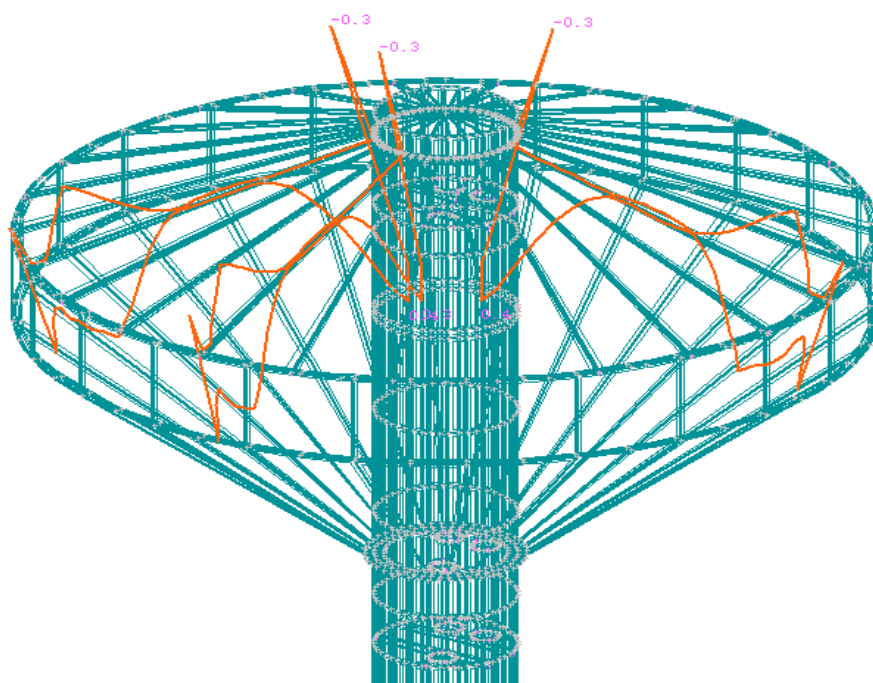
## Posouzení žeber střechy



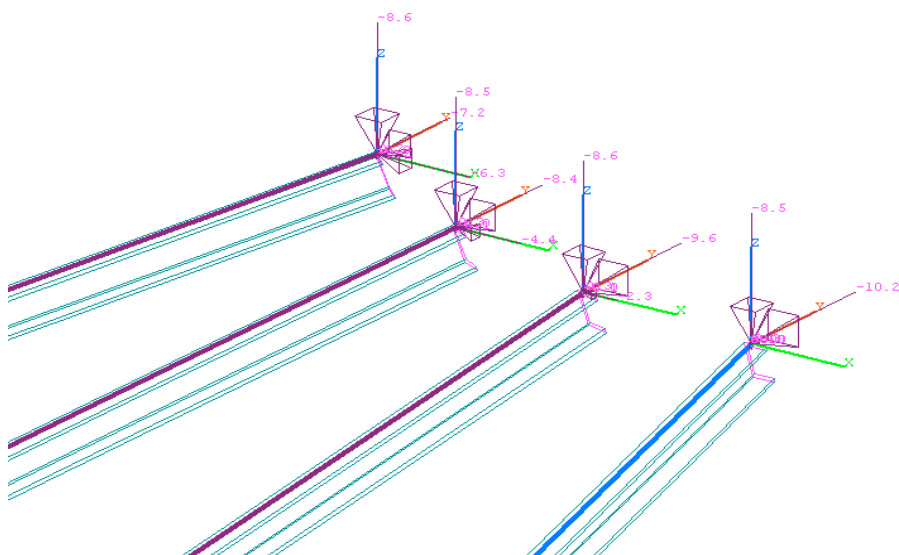
Průhyb uz = 2,3 mm - mezní stav použitelnosti



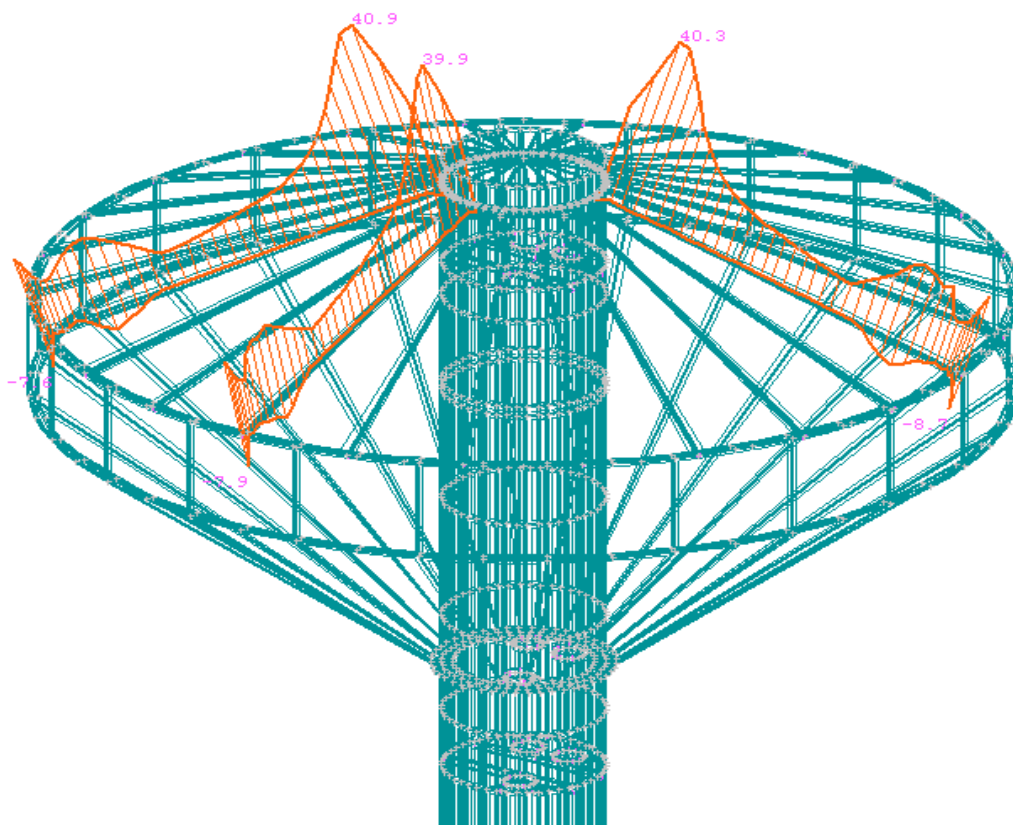
Průběh normální síly v žebrech - mezní stav únosnosti



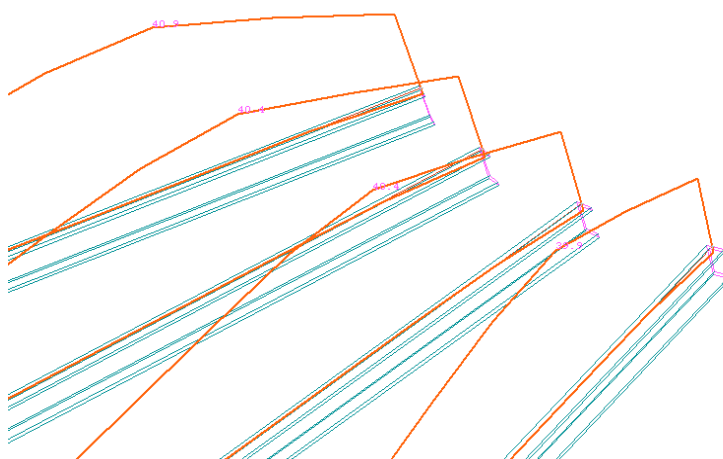
Průběh ohybového momentu v žebří - mezní stav únosnosti



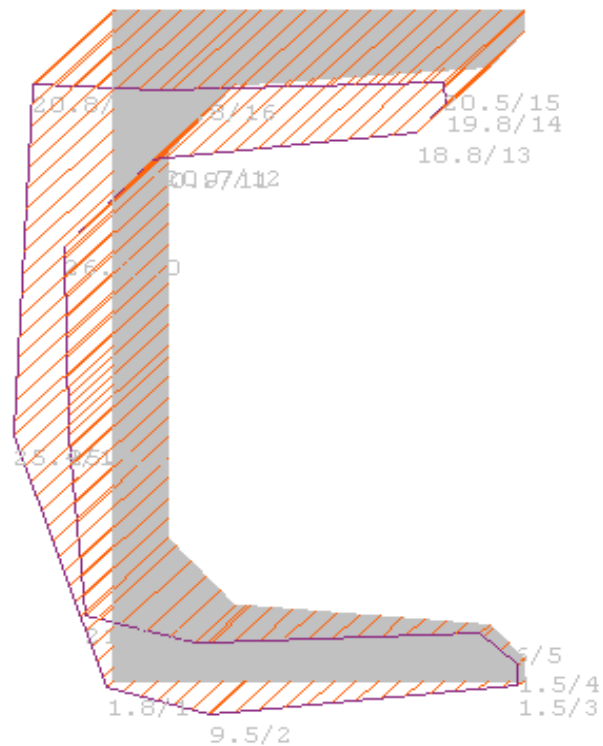
Přípoje na horní prstenec - připojeno koutovým svarem ovařeným dokola profilu



Průběh napětí max  $\sigma_{Ed} = 40,9$  MPa - mezní stav únosnosti



Průběh napětí max  $\sigma_{Ed} = 40,9$  MPa - mezní stav únosnosti (detail )



Průběh napětí ( von Misses ) - mezní stav únosnosti v přípoji  
Je zřejmé , že napětí je hluboko pod návrhovými hodnotami.

## Závěr :

Konstrukce vodojemu je navržena bezpečně a vyhovuje normám navrhování tohoto typu konstrukcí.

Havárie střechy byla pravděpodobně důsledkem montážních nedodělků a koroze plechu konstrukce střechy .

Konec statického výpočtu , květen 2008 , Ing.Crhán