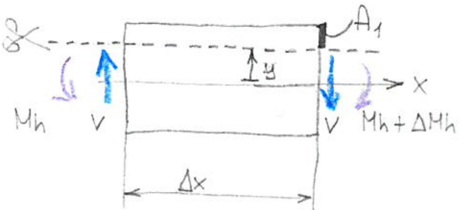
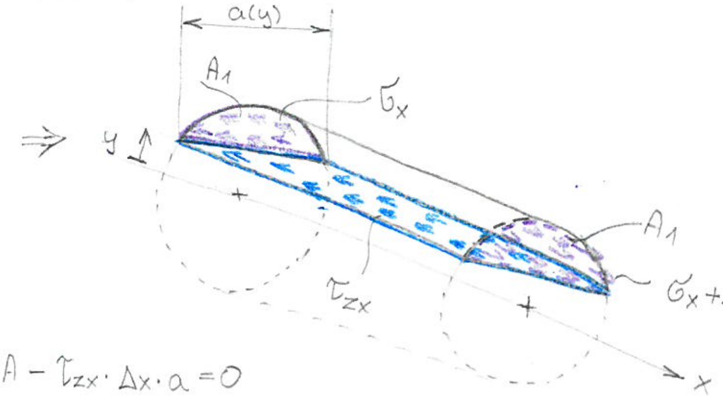
Szilárdságtan – 4. gyakorlat

Nyírásból adódó feszültségek:

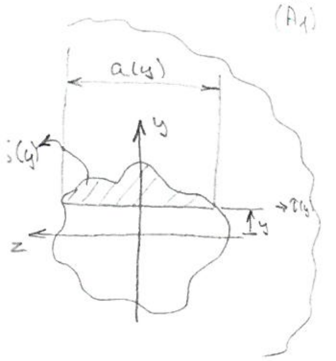
• Vegyünk ki a rúdból egy kicsiny darabot (V(x) áll.)



$\Rightarrow$



$\Sigma F_x = 0$: $\quad \int\limits_{(A_1)} -\sigma_x \, dA + \int\limits_{(A_1)} (\sigma_x + \Delta\sigma_x) \, dA - \tau_{zx} \cdot \Delta x \cdot a = 0$



$$\tau_{zx} = \frac{1}{a \cdot \Delta x} \cdot \int\limits_{(A_1)} \Delta\sigma_x \, dA \underset{\uparrow}{=} \frac{\Delta M_h}{\Delta x} \cdot \frac{1}{I_z \cdot a} \cdot \overbrace{\int\limits_{(A_1)} y \, dA}^{S(y)}$$

$$\sigma_x = \frac{M_h}{I_z} \cdot y \Rightarrow \Delta\sigma_x = \frac{\Delta M_h}{I_z} \cdot y$$

Ha most $\Delta x \to 0$:

$$\tau_{zx}(y) = \tau_{xz}(y) = -\frac{V \cdot S(y)}{I_z \cdot a(y)}$$

→ Ez így előjel helyes, mutatja az irányt is!

S(y): Az A_1 km. stat. nyom.-a a z tengelyre! Nem a teljes km.-é (az amúgy is 0, mivel z átmegy a súlyponton!)

Ha az előjeleket nem vesszük figyelembe:

$$\tau(y) = \frac{V \cdot S(y)}{I_z \cdot a(y)}$$

⇝ adott y koordináta feletti rész stat. nyom.-a

Csavarásból adódó feszültségek: - csak körszimm. km. esetén, mert azok nem vetemednek!

Csavarás

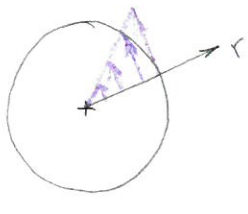
Fajl. elcsavarodás:

$$\vartheta = \frac{d\varphi}{dx} \underset{\uparrow}{=} \frac{\Delta\varphi}{L_0}, \quad \varphi: \text{szögelf.}$$

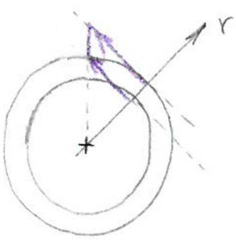
konst. M_t igbv.

$$\vartheta = \frac{M_t}{I_p \cdot G} \Big\} \text{ csavarómerevség}$$

A fesz. eloszlás: $\tau = \frac{M_t}{I_p} \cdot r$



megj.:



Húzás

Fajl. alakváltozás

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad u: \text{elmozdulás}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A E} \Big\} \text{ húzómerevség}$$

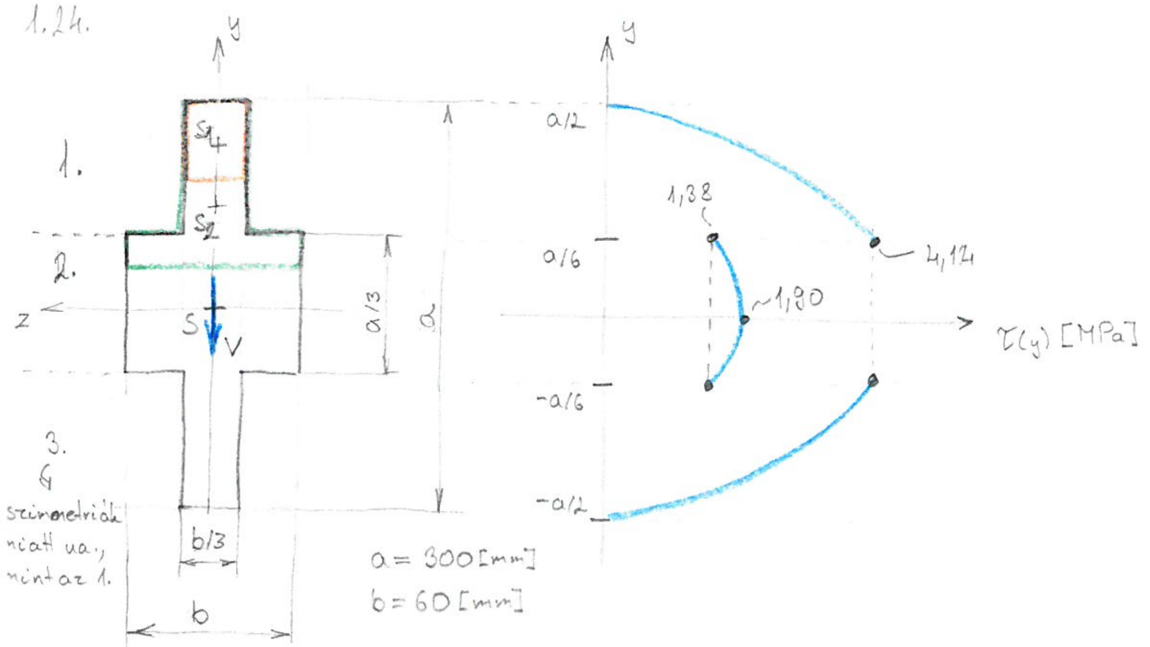
megj.: hajlítás ↔ görbület

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M_h}{I_z \cdot E} \Big\} \text{ h.m.}$$

megj.: Bredt-képlet: vékonyfalú csőre

$$\tau \approx \frac{M_t}{\underbrace{d_k}_{F_k}} / A$$

1.24.



a = 300 [mm]
b = 60 [mm]

V = 20 [kN]

Határozzuk meg a csúsztató feszültség eloszlását: τ(y)?
Hol van, és mekkora a maximum?

A km. másodrendű nyomatéka:

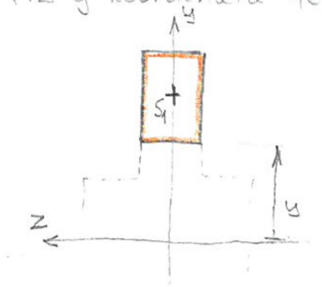
$$I_z = 2\cdot\frac{b/3\cdot(a/3)^3}{12} + \frac{b/3\cdot a^3}{12} = \frac{ba^3}{486} + \frac{ba^3}{36} = ba^3\,\frac{2+27}{972} = \frac{29ba^3}{972} = 48,\dot{3}\cdot 10^6\ [mm^4]$$

A km. az I. és II. részekre bontható.

1. $a/6 < y < \frac{a}{2}$, (azaz: $50 < y < 150$ [mm])

A húsvastagság: $a_1(y) = \frac{b}{3}$ ($= 20$ [mm])

Az y koordináta feletti rész: – súlypontja: $y_{S1} \overset{\text{átlagolás!}}{=} \frac{a/2 + y}{2}$ $\left(= \frac{150+y}{2}\ [mm]\right)$



– területe: $A_1 = \frac{b}{3}\cdot\left(\frac{a}{2} - y\right)$ ($= 20\cdot(150-y)$ [mm²])

– statikai nyomatéka a z tengelyre:

$$S_1(y) = y_{S1}\cdot A_1 = \frac{b}{6}\left(\frac{a^2}{4} - y^2\right)$$

$$\left(= 225000 - 10y^2\ [mm^3]\right)$$

Az ébredő feszültség:

$$\tau_1(y) = \frac{V\cdot S_1(y)}{I_z\cdot a_1(y)} = \frac{V}{I_z}\cdot\frac{\frac{b}{6}\left(\frac{a^2}{4}-y^2\right)}{\frac{b}{3}} = \underbrace{\frac{V}{2I_z}}_{\text{konstans}}\cdot\underbrace{\left(\frac{a^2}{4}-y^2\right)}_{}\left(= 4,65517 - 0,000206897\cdot y^2\ [MPa]\right)$$

hasonló az $1-y^2$ fv.-hez ⇒ parabolikus eloszlás

A jellegzetes pontokban számolt függvényértékek:

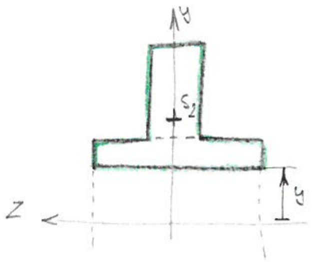
$$\tau_1\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{V}{2I_z}\cdot 0 = 0\ [MPa]$$

$$\tau_1\left(\frac{a}{6}\right) = \frac{V}{2I_z}\cdot\underbrace{\left(\frac{a^2}{4} - \frac{a^2}{36}\right)}_{\frac{8a^2}{36}} = \frac{Va^2}{9I_z} = \frac{20\cdot 10^3\cdot 300}{9\cdot 48,\dot{3}\ 10^6} = 4,14\ [MPa]$$

2. $-a/6 < y < a/6$, azaz: $-50 < y < 50$ [mm]

A húsvastagság: $a_2(y) = b$

Az y koordináta feletti rész: – statikai nyomatéka a z tengelyre:



$$S_2(y) = \underbrace{\frac{a/2 + a/6}{2}}_{a/3} \cdot \underbrace{\frac{a}{3} \cdot \frac{b}{3}}_{ab/9} + \frac{a/6 + y}{2} \cdot \left(\frac{a}{6} - y\right) \cdot b =$$

súlypont terület

$$= \frac{a^2 b}{27} + \frac{b}{2}\left(\frac{a^2}{36} - y^2\right) \quad \left(= 275000 - 30y^2 \text{ [mm}^3]\right)$$

Az ébredő feszültség:

$$\tau_2(y) = \frac{V \cdot S_2(y)}{I_z \cdot a_2(y)} = \frac{V}{I_z} \cdot \left[\frac{a^2}{27} + \frac{1}{2}\left(\frac{a^2}{36} - y^2\right)\right] \quad \left(= (\ldots) - (\ldots)y^2\right)$$

A jellegzetes pontokban:

$$\tau_2\left(\frac{a}{6}\right) = \tau_2\left(-\frac{a}{6}\right) = \frac{V}{I_z}\left[\frac{a^2}{27} + 0\right] = \frac{Va^2}{27 I_z} = 1{,}38 \text{ [MPa]}$$

megj.: $\tau_2\left(\frac{a}{6}\right) = \frac{\tau_1\left(\frac{a}{6}\right)}{3}$

3-szorosára nőtt a húsvast.!

$$\tau_2(0) = \frac{Va^2}{I_z}\underbrace{\left(\frac{1}{27} + \frac{1}{72}\right)}_{} = \frac{Va^2}{9 I_z}\underbrace{\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{8}\right)}_{3/24 + 8/24} = \underbrace{\frac{11}{24}}_{>1/3} \cdot \frac{Va^2}{9 I_z} = 1{,}90 \text{ [MPa]}$$

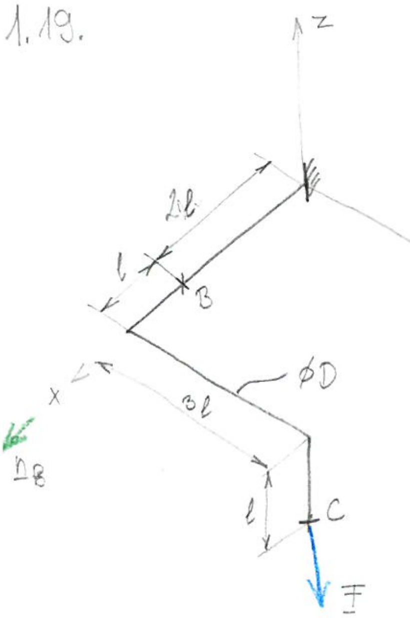
Megjegyzések: – Hajlított tartóknál gyakran elhanyagoljuk a nyírásból eredő feszültségeket

Oka: – (Általában kicsi az értéke ....)

– A km. szélső szálaiban az értéke 0, ahol a σ maximuma van! (hajlításnál)

– Nagyobb értéket a km. középső részén vesz fel τ, ahol viszont σ kicsi.

1.19.

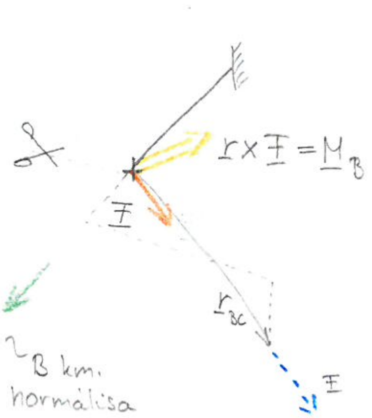


$$F = \begin{bmatrix} 300 \\ 400 \\ -200 \end{bmatrix} \text{ [N]} \qquad D = 50 \text{ [mm]}, \quad l = 1 \text{ [m]}$$

Adjuk meg a B km.-ben a csavarásból adódó feszültség eloszlását!

Az F erő redukciója az igénybevételhez: ($r \times F$ vagy $F \times r$?)

$$M_B = r_{BC} \times F = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 300 \\ 400 \\ -200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -200 \\ -100 \\ -500 \end{bmatrix} \text{ [Nm]}$$



$$r_{BC} = r_C - r_B = \begin{bmatrix} 3l \\ 3l \\ -l \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = l \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix} \text{ [m]}$$

A B km. csavaró igénybevétele:

$$M_t = M_B \cdot \underbrace{n_B}_{i} = -200 \text{ [Nm]}$$

megj.: a hajlító igbv. vektora:

$$M_h = M_B - \underbrace{M_t \cdot i}_{M_t}, \text{ de ez most nem kell...}$$

A B km. poláris másodrendű nyomatéka:

$$I_p = \frac{D^4\pi}{32} = 613{,}6\cdot 10^3 \ [mm^4]$$

A feszültség eloszlása:

$$\tau(r) = \frac{|M_t|}{\underbrace{I_p}_{konst.}}\cdot r \Rightarrow \text{lin. fv.!}$$

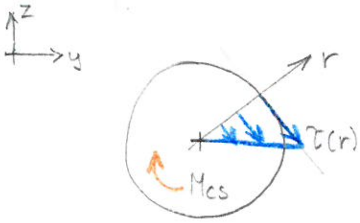
A maximális feszültség: a legnagyobb sugáron

$$\tau_{max} = \frac{\overbrace{|M_t|}^{[Nmm]}}{\underbrace{I_p}_{[mm^4]}}\cdot \underbrace{\frac{D}{2}}_{[mm]} = 8{,}15 \ [MPa]$$

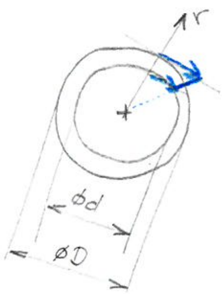
VAGY:

$$\tau_{max} = \frac{|M_t|}{K_p} \leadsto \text{poláris keresztmetszeti tényező}$$

$$K_p = \frac{I_p}{D/2}$$



Megj.: És ha csőből lenne? $D = 50$ [mm], $d = 40$ [mm]



$$I_p = \frac{(D^4-d^4)\pi}{32}$$

$$\tau_{max} = \frac{|M_t|}{I_p}\cdot\frac{D}{2} = 13{,}8 \ [MPa] \qquad (169\%)$$

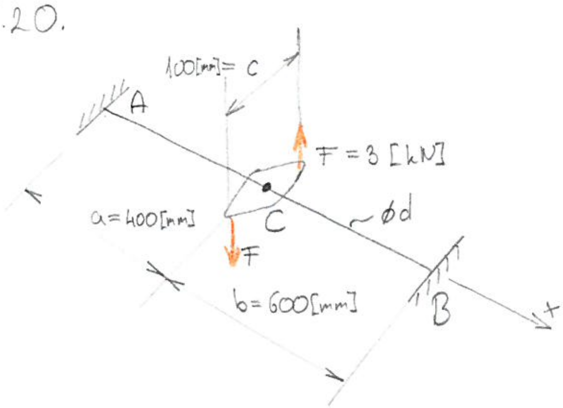
A térfogatok, amik arányosak a tömeggel:

$$V_{tömör} = 7\ell\cdot\frac{D^2\pi}{4} = \dots$$

$$V_{cső} = 7\ell\cdot\frac{(D^2-d^2)\pi}{4} = \dots$$

$$\frac{V_{cső}}{V_{tömör}} = \frac{D^2-d^2}{D^2} = \frac{25-16}{25} = \frac{9}{25} = 36\,\%$$

1.20.



$E = 70$ [GPa] ← alu...

$\nu = 0{,}34$ [-]

$\tau_{meg} = 100$ [MPa]

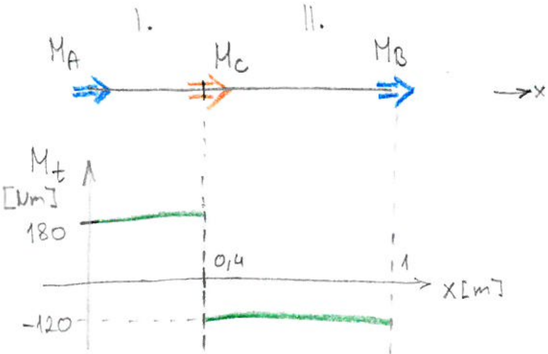
Méretezzük a tengelyt! Mennyit fordul el a C km.?

A terhelő nyomaték: $M_C = F\cdot c = 0{,}3 \ [kNm] = 3\cdot 10^5 \ [Nmm]$

A reakciók meghatározása:

$\sum M_x = 0$: $M_A + M_C + M_B = 0$ (1) ⇒ statikailag határozatlan

SZTÁ:



Az alakváltozási feltétel:

$$\underbrace{\varphi_A}_{\text{befogás} \leftarrow 0} + \Delta\varphi_{AC} + \Delta\varphi_{CB} = \underbrace{\varphi_B}_{0 \rightarrow \text{befogás}}$$

$$\underbrace{\frac{\overbrace{M_{t,AC}}^{M_B+M_C}}{I_p\cdot G}}_{\vartheta_{AC}}\cdot a + \underbrace{\frac{\overbrace{M_{t,CB}}^{M_B}}{I_p\cdot G}}_{\vartheta_{CB}}\cdot b = 0$$

fajl. elcsav. [rad/m] ⇐ ϑ_{AC}

$$(M_B+M_C)\cdot a + M_B\cdot b = 0 \qquad (2)$$

(2): $M_B = -M_C \cdot \frac{a}{a+b} = -1{,}2 \cdot 10^5$ [Nmm]

(1): $M_A = -M_C - M_B = -1{,}8 \cdot 10^5$ [Nmm]

A tengely méretezése:

- A maximális igbv.: $M_{max} = 180$ [Nm] (előjel most nem kell, a fesz iránya most nem számít)
- Határesetben (tönkremenetel előtt):

$$\tau_{max} = \frac{M_{max}}{\underbrace{I_p}_{d^4\pi/32}} \cdot \frac{d}{2} = \frac{16 M_{max}}{d^3 \pi} = \tau_{meg}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{max}}{\pi \cdot \tau_{meg}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 180 \cdot 10^3}{\pi \cdot 100}} = 20{,}92 \text{ [mm]} \approx 21 \text{ [mm]}$$

megj.: Legyen cső, úgy hogy $d = \frac{8D}{10}$ $\left(t = \frac{D}{10}\right)$ falvastagság

$$I_p = \frac{(D^4 - d^4)\pi}{32} = \frac{369}{625} \cdot \frac{D^4 \pi}{32}$$

$$\tau_{meg} = \frac{16 M_{max}}{D^3 \pi} \cdot \frac{625}{369} \Rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{625}{369}} \cdot \sqrt[3]{\frac{16 M_{max}}{\pi \cdot \tau_{meg}}} = 24{,}94 \text{ [mm]} \approx 25 \text{ [mm]}$$

Ekkor a belső átmérő: $d = 20$ [mm]

A tömegek aránya:

$$\frac{m_{cső}}{m_{tömör}} = \frac{A_{cső}}{A_{tömör}} = \frac{25^2 - 20^2}{20^2} = 0{,}5625 = 56{,}25\,\%$$

Majdnem fele akkora lesz a tengely tömege!

A C km. szögelfordulása:

$$\varphi_C = \underbrace{\varphi_A}_{0} + \varphi_{AC} = \frac{M_{t,AC}}{I_p \cdot G} \cdot a =$$

$$= \frac{M_B + M_C}{I_p \cdot G} \cdot a = +0{,}1463 \text{ [rad]} = 8{,}38 \text{ [°]}$$!

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} = 26{,}12 \text{ [GPa]}$$

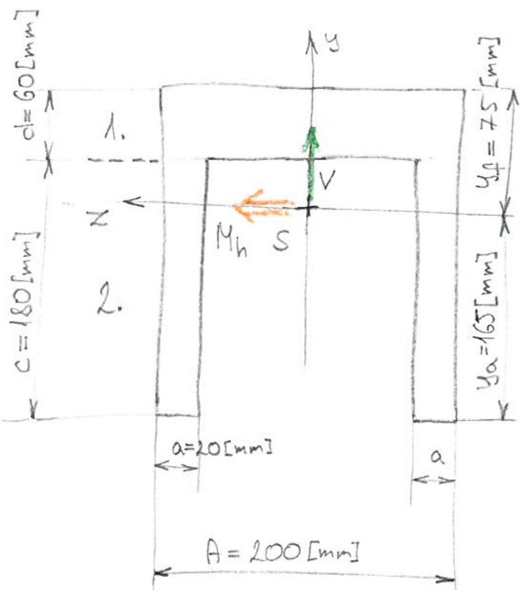
$$I_p = \frac{d^4 \pi}{32} = 18{,}84 \text{ [mm}^4\text{]}$$

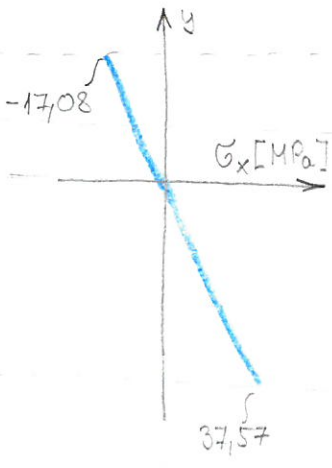
1.23.

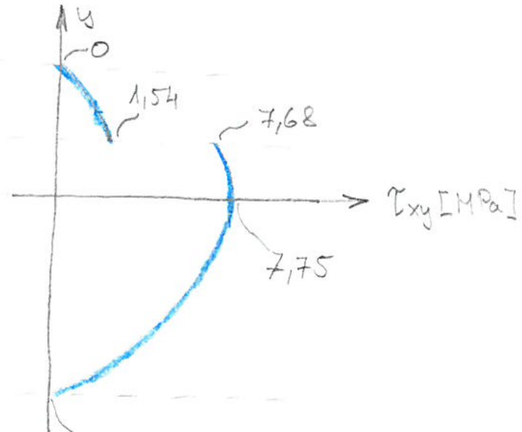
$\underline{M}_h = 20\underline{k}$ [kNm] $\Rightarrow M_h = 20$ [kNm]

$\underline{V} = 50\underline{j}$ [kN] $\Rightarrow V = 50$ [kN]

$I_z = 8784$ [cm^4]







0, ha a fene fenét eszik, a szélén akkor is 0 !

Megj.: Szépen látszik, hogy most például:
- ahol τ maximális, ott $\sigma = 0$
- ahol σ maximális, ott $\tau = 0$

} nem mindig igaz!

→ τ elhanyagolható sokszor

A hajlításból származó feszültség:

$$\sigma(y) = \underbrace{-\frac{M_h}{I_z}}_{\text{konst.}} \cdot y$$

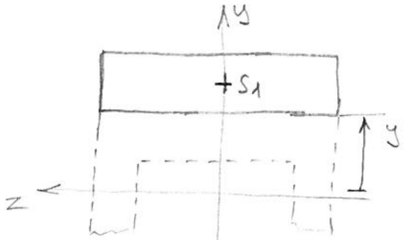
Értéke a jellegzetes helyeken:

$\sigma(y_f) = -17{,}08$ [MPa] $\qquad \sigma(0) = 0$ [MPa]

$\sigma(-y_a) = 37{,}57$ [MPa]

A nyírásból származó feszültség:

1., $y_f - d < y < y_f$, azaz: $15 < y < 75$ [mm]



A húsvastagság:

$$a_1(y) = A = 200\,[\text{mm}]$$

A statikai nyomaték:

$$S_1(y) = \frac{y_f + y}{2} \cdot \left[(y_f - y) \cdot A\right] = \frac{A}{2}\left(y_f^2 - y^2\right)$$

A feszültség eloszlása:

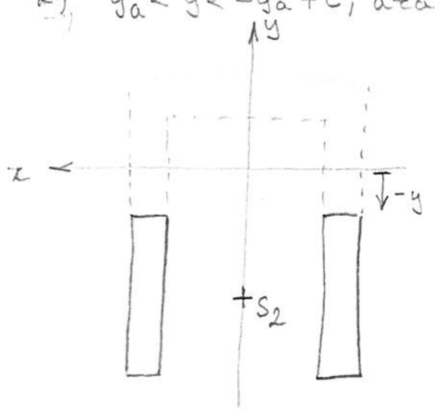
$$\tau_1(y) = \frac{V \cdot S_1(y)}{I_z \cdot a_1(y)} = \frac{V}{2I_z} \cdot \left(y_f^2 - y^2\right) = (\ldots) - (\ldots)y^2$$

Értékek a jellegzetes helyeken:

$\tau_1(y_f) = 0$ [MPa]

$\tau_1(y_f - d) = 1{,}54$ [MPa]

2., $-y_a < y < -y_a + c$, azaz: $-165 < y < 15$ [mm]



A húsvastagság:

$$a_2(y) = 2 \cdot a$$

A statikai nyomaték:

$$S_2(y) = -\frac{y_a - y}{2} \cdot \left[(y_a + \underbrace{y}_{<0}) \cdot 2a\right] = \overbrace{\frac{-2a}{2}}^{<0} \cdot \left(y_a^2 - y^2\right)$$

de most az előjel nem számít

A feszültség eloszlása:

$$\tau_2(y) = \frac{V \cdot S_2(y)}{I_z \quad a_2(y)} = \frac{V}{2I_z} \cdot \left(y_a^2 - y^2\right)$$

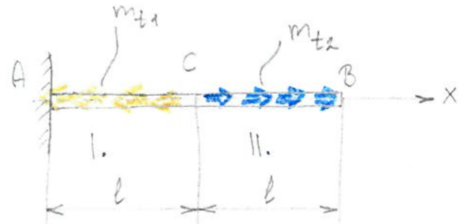
Értékek a jellegzetes helyeken:

$\tau_2(y_f - d) = 7{,}68$ [MPa]

$\tau_2(0) = \tau_{max} = 7{,}75$ [MPa]

$\tau_2(-y_a) = 0$ [MPa]

1.21.



Megoszló csavaró erőrendszer:

$m_{t1} = 500 \left[\frac{Nm}{m}\right]$ és $m_{t2} = 1000 \left[\frac{Nm}{m}\right]$

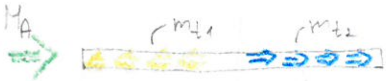
A többi adat:

$\tau_{meg} = 150$ [MPa] $\qquad l = 0{,}5$ [m]

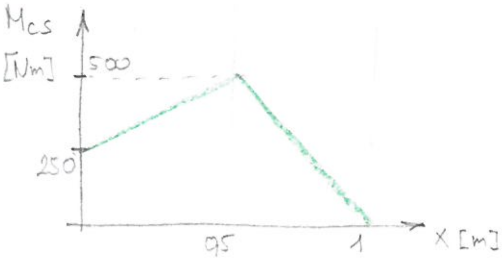
$G = 70$ [GPa]

- Méretezzük a tartót: - tömör ϕD km.-ből,
  - $\phi d / \phi D$ csőből! $\rightarrow \frac{d}{D} = 0{,}6$

SZTA'



- Adjuk meg a $\varphi(x)$ függvényt! (tömör km. esetére)



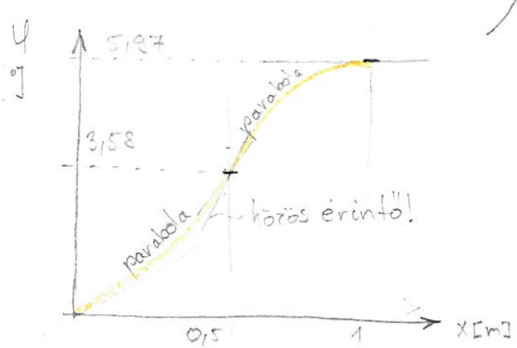
$\sim \frac{d}{dx}(\dots)$

Az igénybevételek:

II. $l < x < 2l$: $\quad M_{cs}(x) = m_{t2} \cdot (2l - x) = m_{t2} \cdot 2l - m_{t2} x$

I. $0 < x < l$: $\quad M_{cs}(x) = m_{t2} \cdot l - m_{t1}(l - x) =$

$= (m_{t2} - m_{t1}) \cdot l + m_{t1} \cdot x$



Értékei a jellegzetes helyeken: $M_{cs}(0) = M_A = (m_{t2} - m_{t1}) \cdot l$ $\rightarrow$ ez a reakció

$= 250$ [Nm]

$M_{cs}(l) = m_{t2} \cdot l = 500$ [Nm]

$M_{cs}(2l) = 0$ [Nm]

Az $x = l$ helyen a legnagyobb az értéke: $M_{cs,max} = M_{cs}(l) = 500$ [Nm]

Méretezés: kör km.-re: $\quad \tau(r) = \frac{M_{cs,max}}{\underbrace{I_p}_{\frac{D^4 \pi}{32}}} \cdot r$

A szélső pontokban: $r = D/2$

$\tau_{max} = \frac{32 M_{cs,max}}{D^4 \pi} \cdot \frac{D}{2} = \tau_{meg}$ ← A teherbírás határán

Ebből: $\quad D = \sqrt[3]{\frac{16 M_{cs,max}}{\pi \cdot \tau_{meg}}} = 25{,}7$ [mm] ≈ 26 [mm]

- cső esetén: $\quad I_p = \frac{D^4 \pi}{32} - \frac{d^4 \pi}{32} \underset{d = 0{,}6D}{=} \frac{D^4 (1 - 0{,}6^4) \pi}{32}$

Hasonlóan, mint előbb:

$$D = \sqrt[3]{\frac{16 M_{cs,max}}{(1 - 0{,}6^4) \pi \cdot \tau_{meg}}} = 26{,}9 \text{ [mm]} \approx 27 \text{ [mm]}$$

megj.: Mennyi anyagot (tömeget) spórolhatunk?

$\frac{A_{cső}}{A_{tömör}} = \frac{D^2 \cdot (1 - 0{,}6^2)}{D^2} =$

$= 1 - 0{,}36 = 0{,}64 = 64\%$

Adott x km. mekkora szöggel fordul el? $\Rightarrow \varphi(x)$

Fajlagos szögelfordulás: $\quad \vartheta = \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \underset{\text{ha } \Delta x \to 0}{\longrightarrow} \frac{d\varphi}{dx}$

Integrálással meghatározható az elcsavarodás fv.-e:

$$\varphi(x) = \underbrace{\varphi(x_0)}_{x_0\text{-ban ismerni kell az elcsavarodást}} + \int_{x_0}^{x} \vartheta(\xi)\, d\xi$$

I. $0<x<l$:

$$\vartheta(x)=\frac{M_{cs}(x)}{I_p\cdot G}=\frac{1}{I_p\cdot G}\left[\overbrace{(m_{t2}-m_{t1})\cdot l}^{M_A}+m_{t1}\cdot x\right]=\frac{1}{I_p\cdot G}\left[M_A+m_{t1}\cdot x\right]$$

$$\varphi(x)=\underbrace{\varphi(0)}_{\text{0, hiszen ez be van fogva}}+\int_0^x\vartheta(\xi)\,d\xi=\frac{1}{I_p\cdot G}\cdot\int_0^x(M_A+m_{t1}\cdot\xi)\,d\xi=\frac{1}{I_p\cdot G}\left[M_A\xi+\frac{m_{t1}}{2}\xi^2\right]_{\xi=0}^{\xi=x}=$$

$$=\frac{1}{I_p\cdot G}\left(M_A x+\frac{m_{t1}}{2}x^2\right)\quad\Rightarrow$$

A jellegzetes helyeken:

A: $\varphi(0)=0$ [rad]

C: $\varphi(l)=0{,}0625$ [rad] $=3{,}58$ [°]

II. $l<x<2l$

$$\vartheta(x)=\frac{1}{I_p\cdot G}\cdot(m_{t2}\cdot 2l-m_{t2}\cdot x)$$

$$\varphi(x)=\varphi(l)+\int_l^x\vartheta(\xi)\,d\xi=\frac{1}{I_p\cdot G}\left(M_A\cdot l+\frac{m_{t1}}{2}l^2\right)+\frac{1}{I_p\cdot G}\cdot\underbrace{\int_l^x(m_{t2}\cdot 2l-m_{t2}\cdot\xi)\,d\xi}_{m_{t2}\cdot\underbrace{\left[2l\xi-\frac{\xi^2}{2}\right]_{\xi=l}^{\xi=x}}_{2lx-\frac{x^2}{2}-\frac{3}{2}l^2}}$$

$$=\frac{1}{I_p\cdot G}\left(\underbrace{\overbrace{M_A}^{(m_{t2}-m_{t1})\cdot l}\cdot l+\frac{m_{t1}}{2}\cdot l^2-\frac{3m_{t2}}{2}l^2}_{\left(\frac{-m_{t2}}{2}-\frac{m_{t1}}{2}\right)l^2=-\frac{m_{t1}+m_{t2}}{2}l^2}+2m_{t2}lx-m_{t2}\frac{x^2}{2}\right)=$$

$$=\frac{1}{I_p\cdot G}\left(-m_{t2}\frac{x^2}{2}+2m_{t2}l\cdot x-\frac{m_{t1}+m_{t2}}{2}\cdot l^2\right)$$

A jellegzetes helyeken: C: ua. mint előbb (nem töri el a rúd, φ nem ugorhat sehol sem...)

B: $$\varphi(2l)=\frac{l^2}{I_p\cdot G}\cdot\left(-2m_{t2}+4m_{t2}-\frac{m_{t1}+m_{t2}}{2}\right)$$

$$=\frac{l^2}{I_p\cdot G}\left(\frac{3m_{t2}}{2}-\frac{m_{t1}}{2}\right)=$$

$$=\frac{0{,}5^2}{\frac{25{,}7^4\pi}{32}\cdot 10^{-12}\cdot 70\cdot 10^9}\cdot\underbrace{\left(\frac{3\cdot 1000}{2}-\frac{500}{2}\right)}_{1250}=0{,}104\text{ [rad]}$$

$$=5{,}97\,[°]$$