

Dr. Orbán Zoltán előadása

FESZÍTETT SZERKEZETEK TERVEZÉSE I.

Igénybevételek számítása

Előfeszített tartó tervezése Magnel egyenesekkel

A hatásos feszítőerő

2. előadás

Feszített tartók igénybevételeinek számítása

Teherkombinációk

- Repedésmentességi követelmény ellenőrzése \Rightarrow ritka teherkombináció

$$F_{ser} = \sum G_{ki} "+" P_k "+" Q_{k1} "+" \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{ki}$$

F_{ser} - a használati állapot szempontjából mértékadó teher,

G_{ki} - az állandó terhek karakterisztikus értéke,

P_k - a feszítőerő karakterisztikus értéke,

Q_{k1} - a kiemelt esetleges teher karakterisztikus értéke,

Q_{ki} - a kiemelt teherrel egyidejű esetleges terhek karakterisztikus értékei,

$\psi_{0,i}$ - a kombinációs tényező.

- Teherbírási követelmény ellenőrzése \Rightarrow alapkombináció

$$F_{sd} = \sum \gamma_{Gi} \cdot G_{ki} "+" \gamma_P \cdot P_{m,t} "+" \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} "+" \sum \gamma_{Qi} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{ki}$$

F_{sd} - a mértékadó teher,

$P_{m,t}$ - a hatásos feszítőerő várható értéke

$\gamma_p = 1.00$ - a feszítőerő biztonsági tényezője.

Előfeszített tartó terhelési állapotai

Az előfeszített tartó terhei az időben változnak. A gerenda gyártástechnológiája jelentősen befolyásolja az igénybevételeket.



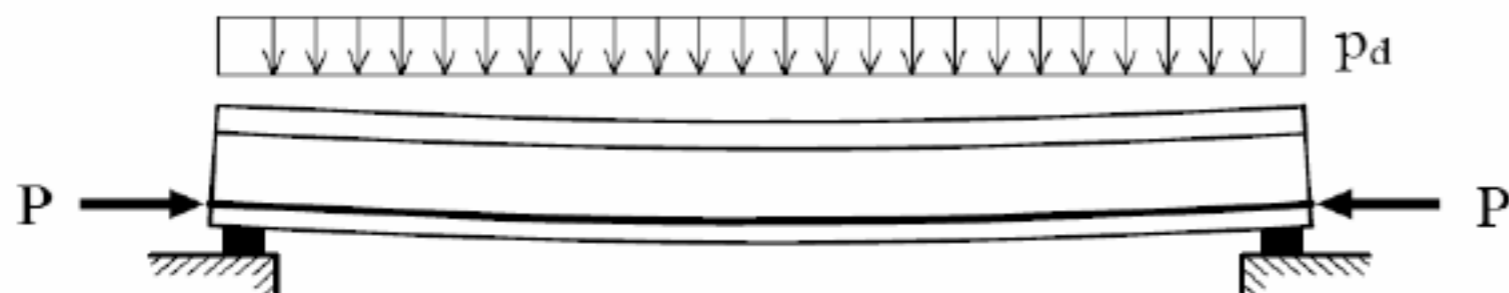
gyártás fázisa

t₁ időpont – a feszítőerő ráengedése



t₁ - feszítőerő ráengedése
(alacsonyabb betonszilárdság!)

t₃ időpont – végleges állapot



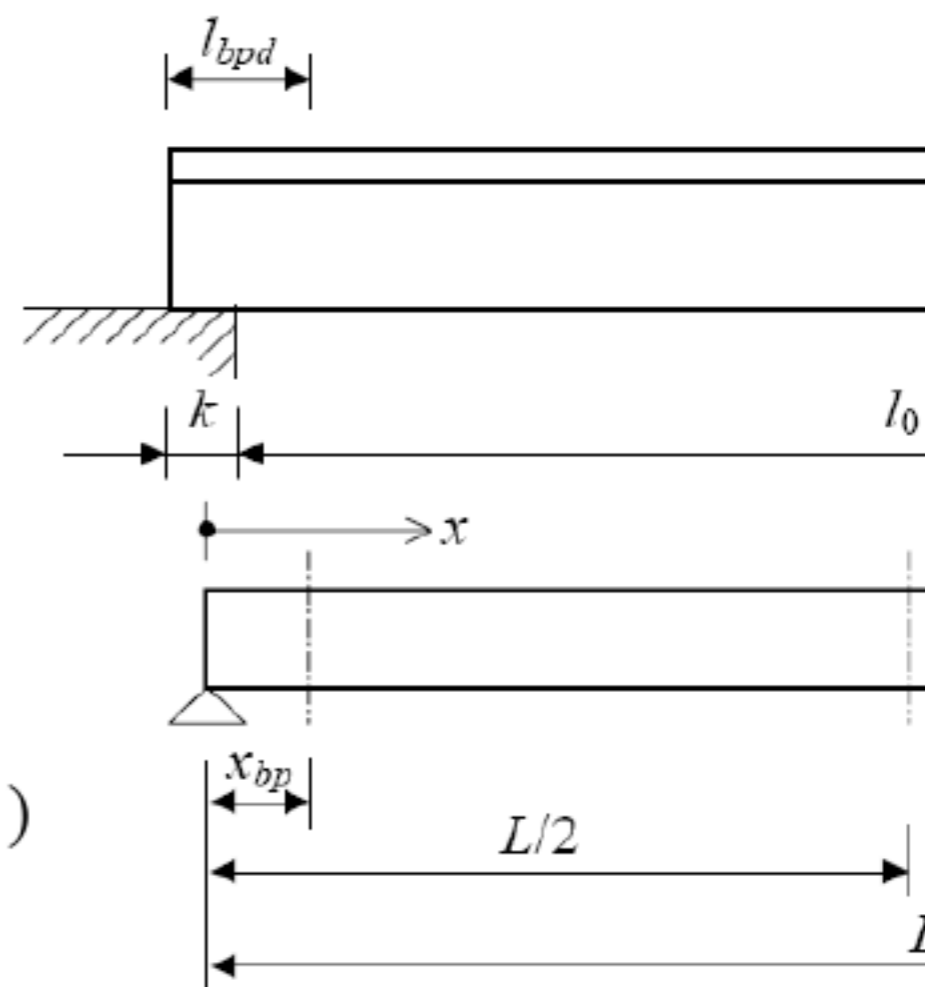
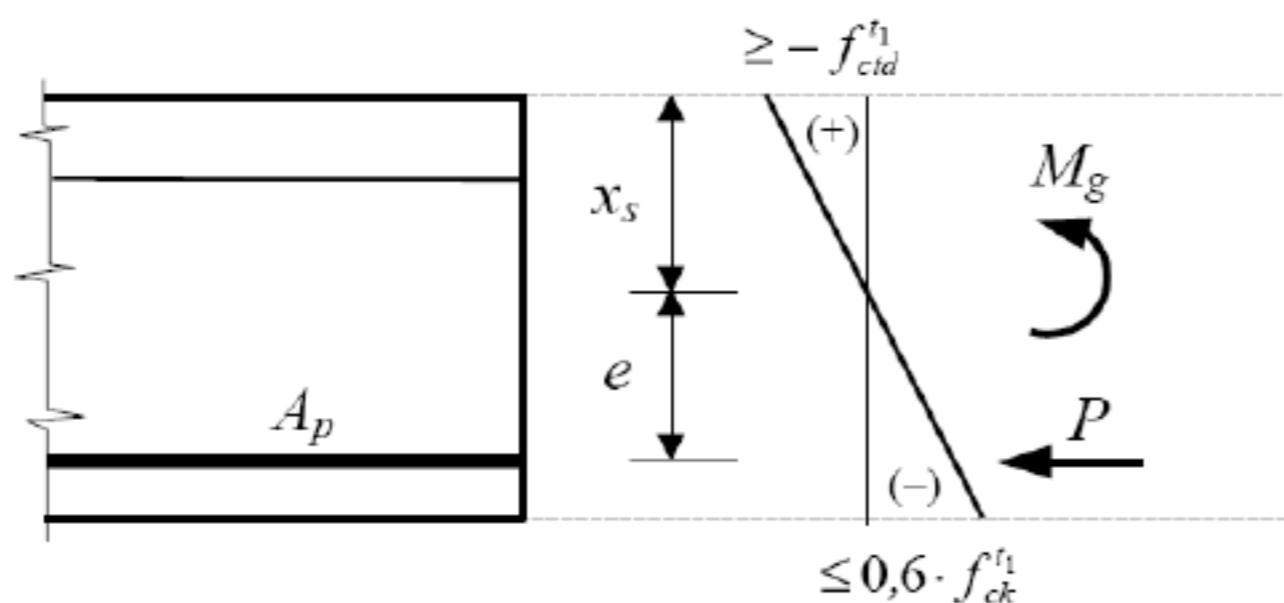
t₂ - szállítás, beépítés

t₃ - végleges állapot

Repedésmentességi követelmény teljesítése előtervezéssel

⇒ feszültségek korlátozása a keresztmetszet szélső szálaiban

t_1 – a feszítőerő ráengedésének pillanatában

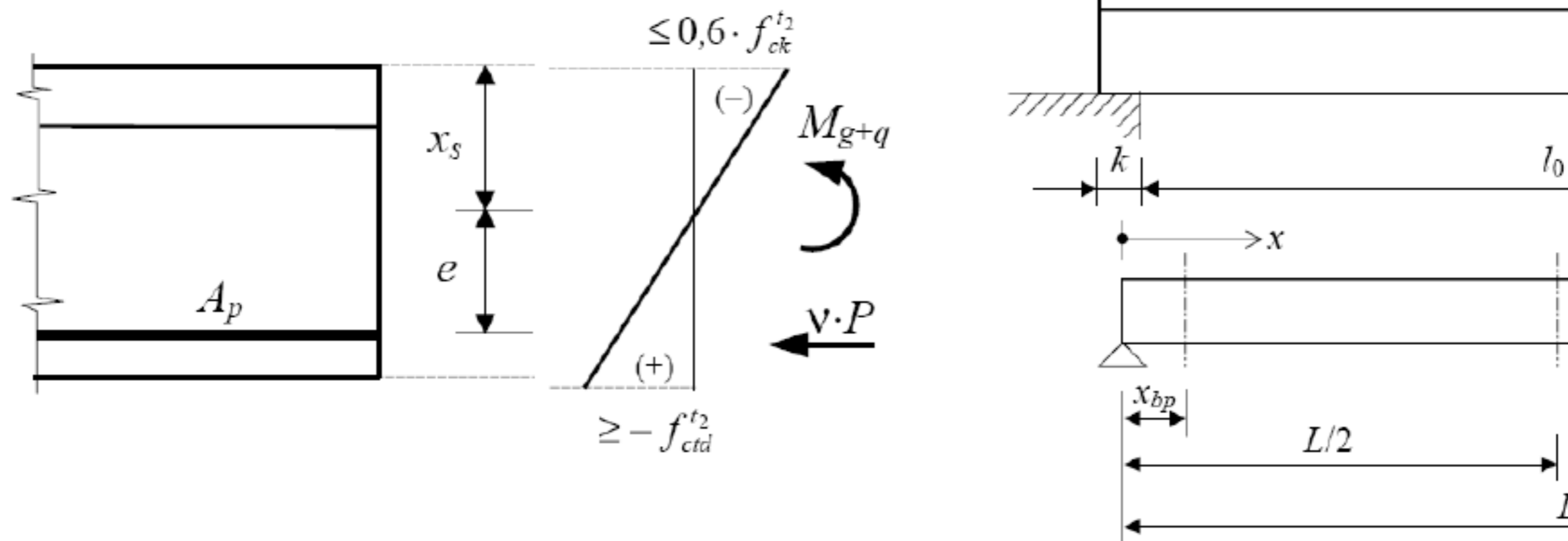


$$\sigma_{sup}^{t_1} = \frac{-M_g(x_{bp}) + P \cdot e}{I_{xi}} \cdot x_s - \frac{P}{A_i} \leq f_{ctd}^{t_1} \quad (1)$$

$$\sigma_{inf}^{t_1} = \frac{M_g(x_{bp}) - P \cdot e}{I_{xi}} \cdot (h - x_s) - \frac{P}{A_i} \geq -0.6 \cdot f_{ck}^{t_1} \quad (2)$$

Rugalmas-repedésmentes keresztmetszet

t_3 – végleges állapotban



$$\sigma_{sup}^{t_3} = \frac{-M_{g+q} (L/2) + v \cdot P \cdot e}{I_{xi}} \cdot x_s - \frac{v \cdot P}{A_i} \geq -0.6 \cdot f_{ck}^{t_3} \quad (3)$$

$$\sigma_{inf}^{t_3} = \frac{M_{g+q} (L/2) - v \cdot P \cdot e}{I_{xi}} \cdot (h - x_s) - \frac{v \cdot P}{A_i} \leq f_{ctd}^{t_3} \quad (4)$$

$v \cdot P$ – hatásos feszítőerő végleges állapotban a feszítési veszteségek figyelembe vételével

$v \approx 0,7$ – közelítő számításokban

Előtervezés Mager egyenesekkel /repedésmentességi követelményre/

A (3) egyenletből $\nu \cdot (1)$ kivonása

A (4) egyenletből $\nu \cdot (2)$ kivonása

$$W_{sup} = I_{xi}/x_s \quad \text{és} \quad W_{inf} = I_{xi}/(h - x_s) \quad \text{bevezetésével}$$

$$W_{sup} \geq \frac{M_{g+q}(L/2) - \nu \cdot M_g(x_{bp})}{0,6 \cdot f_{ck}^{t_3} + \nu \cdot f_{ctd}^{t_1}}$$

$$W_{inf} \geq \frac{M_{g+q}(L/2) - \nu \cdot M_g(x_{bp})}{\nu \cdot 0,6 \cdot f_{ck}^{t_1} + f_{ctd}^{t_3}}$$

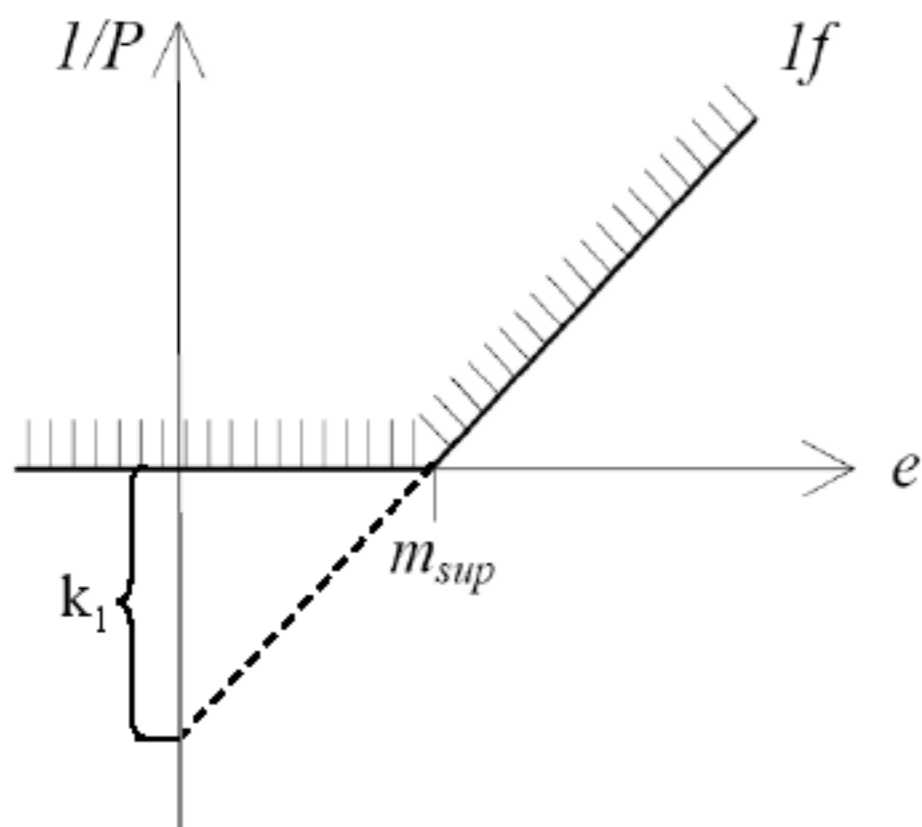
A repedésmentességi követelményeket kielégítő felső ill. alsó keresztmetszeti modulusok

\Rightarrow a felvett keresztmetszeti méretek ezek alapján ellenőrizhetők (a vasalás elhanyagolásával)

A tartó repedésmentességét négy, a keresztmetszet szélsőszál feszültségeire vonatkozó egyenlet kielégítésével biztosíthatjuk, lsd. (1) – (4) egyenletek.

⇒ az egyenleteket átalakítva és $1/P$ koordináta rendszerben ábrázolva:

- Felső szélsőszál, $t = t_1$, $x = x_{bp}$:

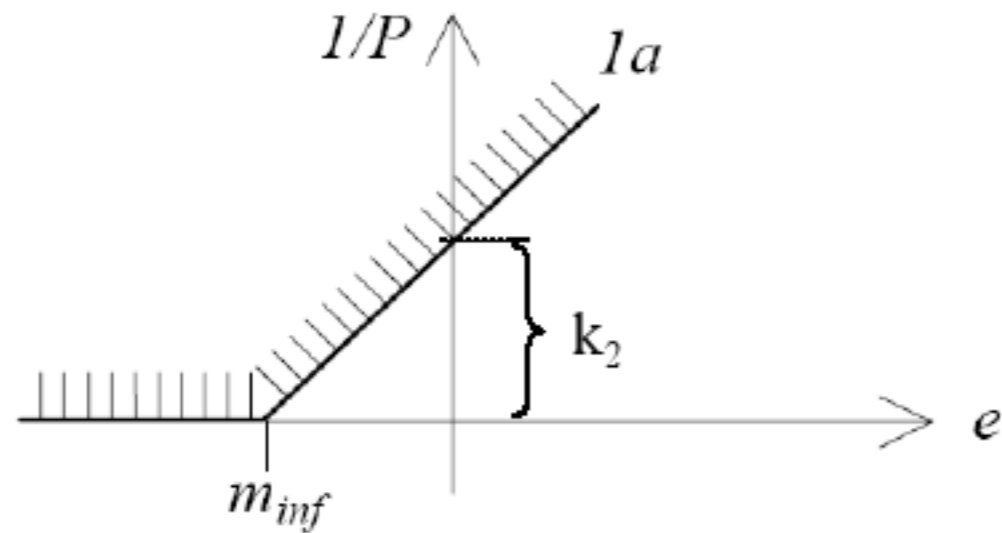


$$\frac{1}{P} \geq \frac{\frac{e}{m_{sup}} - 1}{A_i \cdot \left(f_{ctd}^{t_1} + \frac{M_g(x_{bp})}{W_{sup}} \right)}$$

$$m_{sup} = \frac{W_{sup}}{A_i} \quad \text{a felső szélsőszálhoz tartozó magpont távolsága a súlyponttól.}$$

$$k_1 = \frac{1}{A_i \cdot \left(f_{ctd}^{t_1} + \frac{M_g(x_{bp})}{W_{sup}} \right)}$$

- Alsó szélsőszál, $t = t_1$, $x = x_{bp}$:



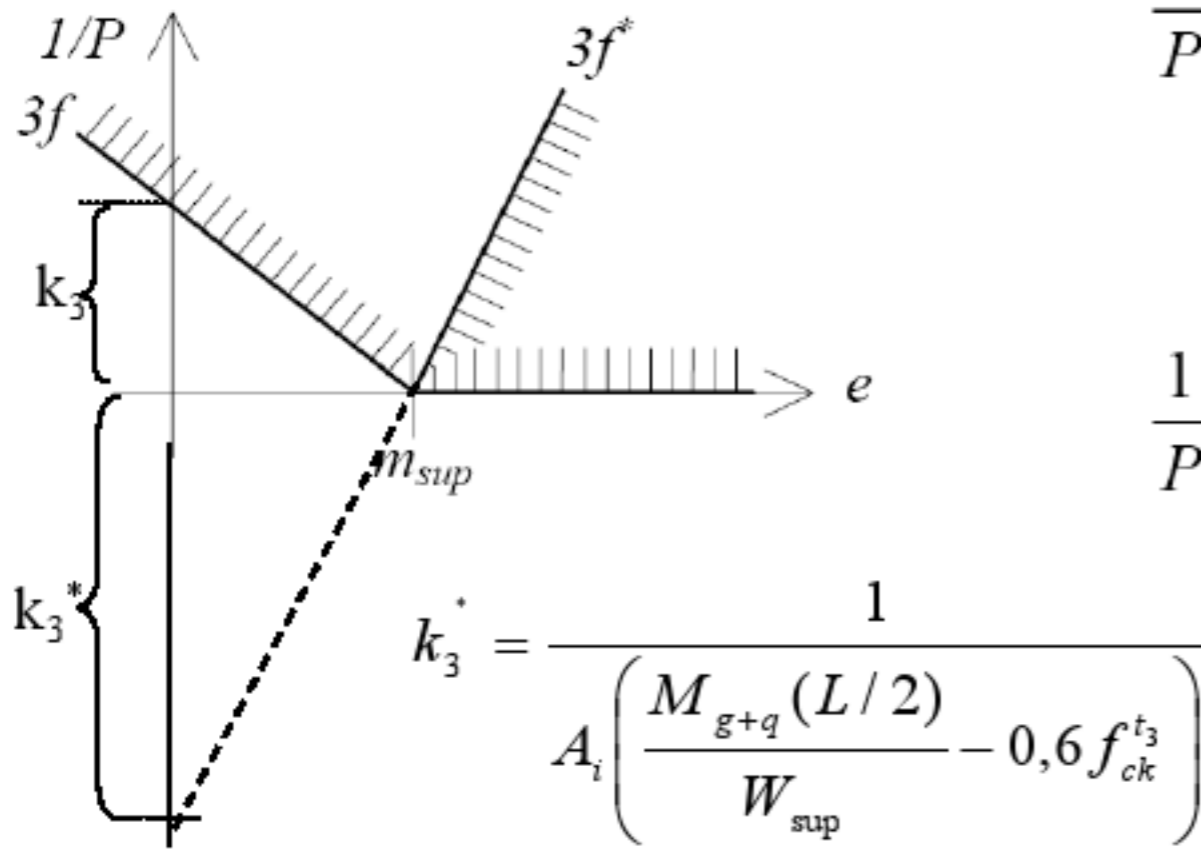
$$k_2 = \frac{1}{A_i \left(0,6 f_{ck}^{t_1} + \frac{M_g(x_{bp})}{W_{inf}} \right)}$$

$$\frac{1}{P} \geq \frac{\frac{e}{m_{inf}} + 1}{A_i \cdot \left(0,6 \cdot f_{ck}^{t_1} + \frac{M_g(x_{bp})}{W_{inf}} \right)}$$

$$m_{inf} = \frac{W_{inf}}{A_i}$$

alsó szélsőszálhoz tartozó
magpont távolsága a súlyponttól.

- Felső szélsőszál, $t = t_3, x = L/2$:

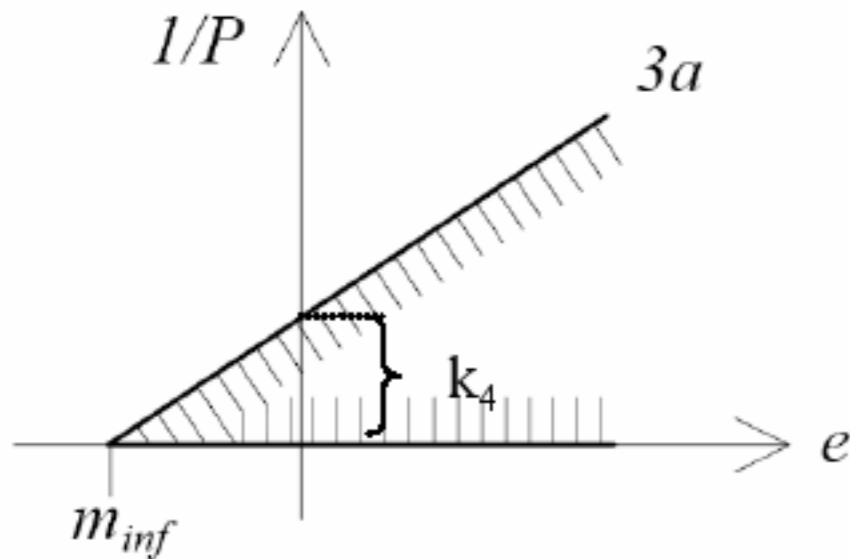


$$\frac{1}{P} \geq v \cdot \frac{\frac{e}{m_{sup}} - 1}{A_i \cdot \left(\frac{M_{g+q}(L/2)}{W_{sup}} - 0.6 \cdot f_{ck}^{t_3} \right)} \quad (3f)$$

$$\frac{1}{P} \leq v \cdot \frac{\frac{e}{m_{sup}} - 1}{A_i \cdot \left(\frac{M_{g+q}(L/2)}{W_{sup}} - 0.6 \cdot f_{ck}^{t_3} \right)} \quad (3f^*)$$

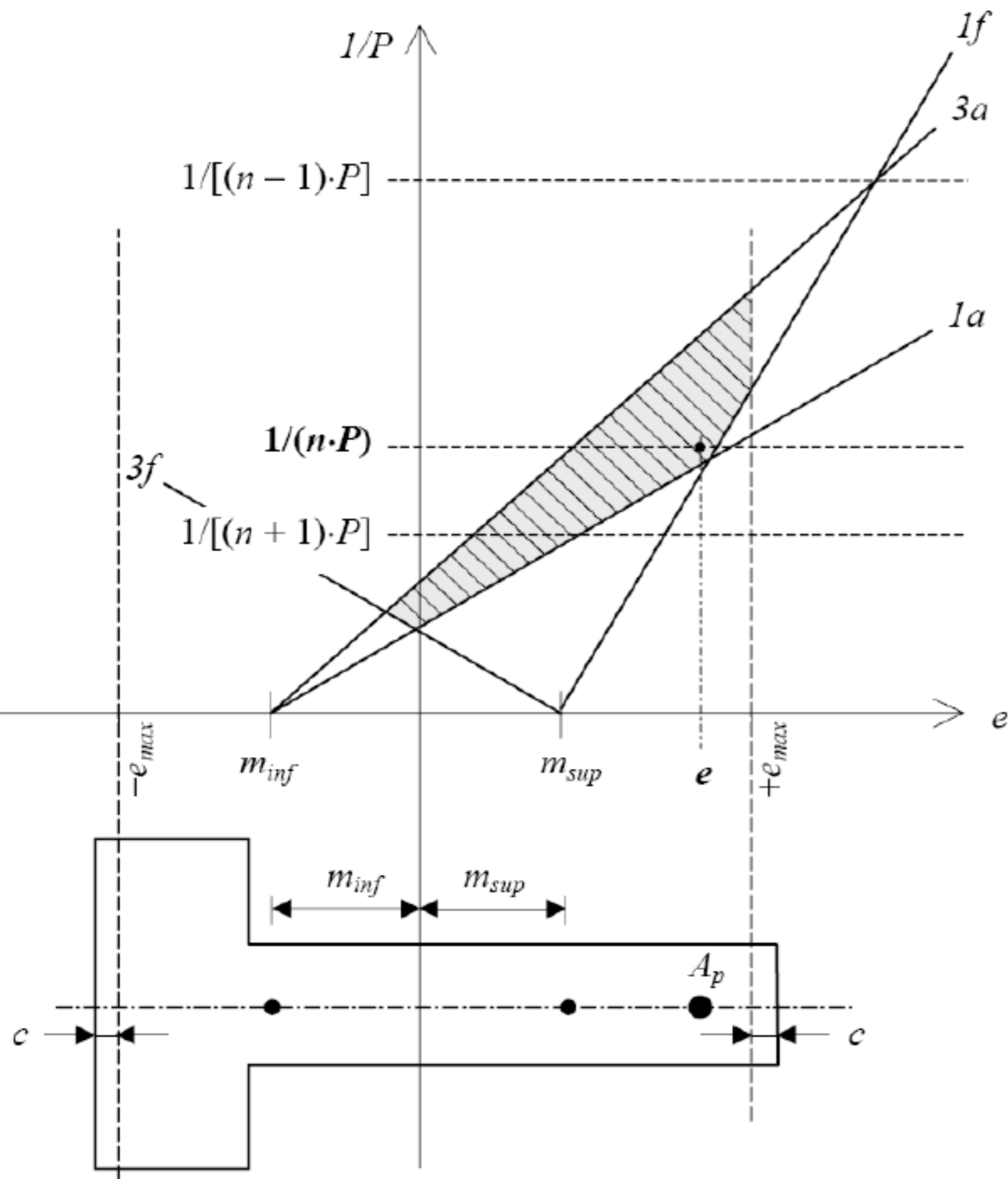
(a nevező előjele alapján)

- Alsó szélsőszál, $t = t_3, x = L/2$:



$$\frac{1}{P} \leq v \cdot \frac{\frac{e}{m_{inf}} + 1}{A_i \cdot \left(\frac{M_{g+q}(L/2)}{W_{inf}} - f_{ctd}^{t_3} \right)}$$

$$k_4^* = \frac{1}{A_i \left(\frac{M_{g+q}(L/2)}{W_{inf}} - f_{ctd}^{t_3} \right)}$$



A 4 db egyenes egy olyan alteret határoz meg, amelynek minden pontjában teljesülnek a feszültségekre megadott egyenlőtlenségek.

- c - betonfedés
- P - egy pászma feszítőereje
- n - pászma szám
- e - külpontosság
- m - magpont

A tervezés menete Magnel egyenesekkel

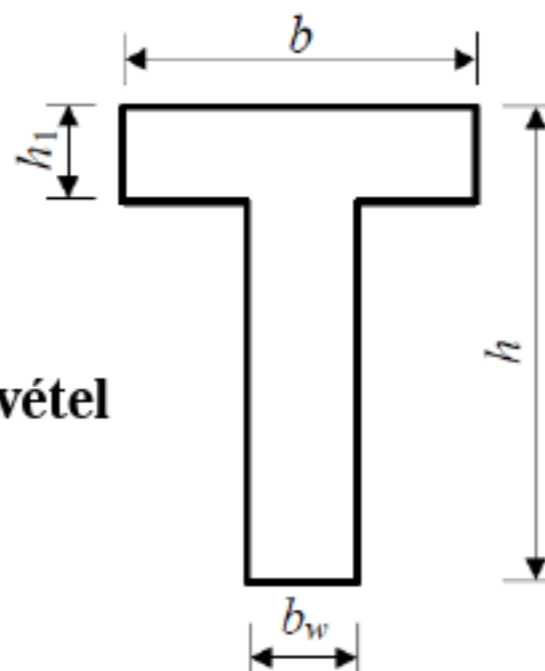
1. Megbecsüljük a feszítési veszteségeket ($v \approx 0,7$).
2. Meghatározzuk a közelítő Magnel-egyeneseket
3. Kiválasztunk egy olyan $[e; 1/P]$ pontot, ami a 4 darab Magnel-egyenes által határolt területen belülré esik.

A kezdeti feszítési feszültség ($\sigma_{p,m,0}$) és az alkalmazni kívánt feszítőpáaszma keresztmetszeti területe (A_p) függvényében kiszámítjuk, hogy a P erő biztosításához hány darab feszítőpáaszma van szükség: $n_{szüks} = P / (A_p \cdot \sigma_{p,m,0})$.

4. Az alkalmazott feszítőerő ($n_{alk} \cdot A_p \cdot \sigma_{p,m,0}$) és külpontosság (e) ismeretében kiszámítjuk a feszítési veszteség (v) pontosabb értékét
5. A pontosabb feszítési veszteség (v), valamint a feszítőpáaszma figyelembevételével meghatározott ideális keresztmetszeti jellemzők felhasználásával ellenőrizzük a tartó szélsőszál feszültségeit.
6. Ha a fenti feltétel nem teljesül, akkor a számítást a 3. ponttól meg kell ismételni, új feszítőerő és külpontosság értékek felvételével.

Néhány tervezési alapelv

- Az ábrából csak a feszítőbetétek súlypontjának külpontossága olvasható le. Ezt a több sorban elhelyezett betéteknél figyelembe kell venni.
- Ha az egyenlőtlen rendszer több különböző A_p feszítőbetét keresztmetszettel kielégíthető, akkor célszerű a legkevesebb betétet adó megoldás alkalmazása.
- A külpontosság "ingyen" van! A feszítőerő a húzófeszültségek szempontjából akkor a leghatékonyabb, ha a külpontosság maximális, a nyomófeszültségek szempontjából ez nyilván kedvezőtlen.
- Ha a Magnel-egyenesek által határolt altereknek nincs közös metszete, akkor a feladatnak nincs megoldása és a tervezést a keresztmetszeti méretek felvételétől újra kell kezdeni.
- Ha a választott feszítőpázmák által létrejövő feszítőerő egyenese nem metszi a megoldáshalmazt, akkor érdemes több, de kisebb keresztmetszeti területű pázsmát alkalmazni.



Közelítő méretfelvétel

$$h \approx L/10 + L/12$$

$$b \approx h/2 + 2/3 \cdot h$$

$$b_w \approx h/7 + h/6 \geq 120 \text{ mm (kifordulás veszélye miatt)}$$

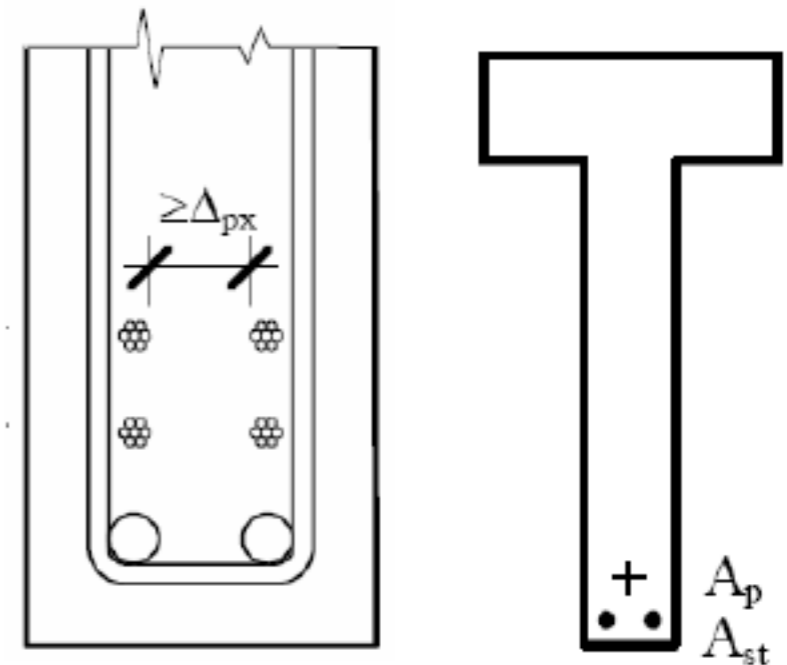
$$h_1 \approx \text{min. } 150 \text{ mm}$$

A vasalás (lágymasalás és feszítőbetétek) mennyiségének meghatározása

feszítési fok:
$$\chi = \frac{A_p \cdot f_{pd}}{A_p \cdot f_{pd} + A_{st} \cdot f_{yd}}$$

A_{st} lágymasalás területe
 A_p feszítőbetétek területe

$\chi = 0,7 \dots 0,8$ a leggazdaságosabb



Kezdeti feszítési feszültség:

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{A_p} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot f_{pk} \\ 0,85 \cdot f_{p0,1k} \end{array} \right\}$$

f_{pk} - a feszítőbetét szakítószilárdságának karakterisztikus értéke,

$f_{p0,1k}$ - a feszítőbetét 0,1%-os egyezményes folyáshatárához tartozó feszültség karakterisztikus értéke.

A hatásos feszítési feszültség

Definíció: Hatásos feszítési feszültségnek azt a feszültséget nevezzük, amely valamely időpontban a feszültségveszteségek lejátszódása után a kezdeti feszítőerőből megmarad.

Feszítési veszteségek

Csak előfeszített rendszernél

(tapadóbetétes)

- a hőérlelés során fellépő
hőmérséklet különbségekből

Csak utófeszített rendszernél

(csúszóbetétes)

- a súrlódásból,
- az ékcsúszásból

Mindkét rendszernél

- a beton rugalmas összenyomódásából,
- a beton zsugorodásából,
- a beton kúszásából,
- az acél relaxációjából,
- ismételt teherből származó maradó alakváltozásból
(pl. hidak, darupályatartók)

1. A beton hőérleléséből származó feszültségveszteség /csak előfeszítettnél/

Ha a betont gőzöléssel érleljük és a feszítőbetéteket ideiglenesen olyan szerkezethez (pl. feszítőpad bakja) horgonyozzuk ki, amely a hőközlés hatására nem végez ugyanolyan alakváltozást, mint a hőhatásnak a betonnal együtt kitett betétek, a hőmérséklet-különbség okozta veszteségeket figyelembe kell vennünk. A hőmérséklet különbség hatására létrejövő feszültségveszteség:

$$\Delta\sigma_{p,T} = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_p$$

$$\alpha_T = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T$$

$$E_p$$

- a feszítőbetétek hőtágulási együtthatója,
- a hőmérsékletkülönbség (pontosabb adatok hiányában $\Delta T = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ feltételezhető),
- a feszítőbetétek rugalmassági modulusa.

2. A zsugorodásból, kúszásból és relaxációból adódó feszültségveszteség

A beton zsugorodásából és lassú alakváltozásából (kúszás), valamint a feszítőbetétek lassú alakváltozásából (relaxáció) származó feszültségveszteség adott helyen és t időpontban:

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = -\frac{\varepsilon_{cs}(t,t_s) \cdot E_p + \Delta\sigma_{pr} + \alpha_p \cdot \phi(t,t_0) \cdot (\sigma_{cg} + \sigma_{cp0})}{1 + \alpha_p \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \phi(t,t_0))}$$

- $\varepsilon_{cs}(t,t_s)$ - a beton fajlagos zsugorodási alakváltozása
- $\Delta\sigma_{pr}$ - a feszítőbetétek relaxációjából származó feszültségváltozás
- $\alpha_p = E_p / E_{cm}$ - ahol E_{cm} a beton (szelő) rugalmassági modulusának várható értéke,
- $\phi(t,t_0)$ - a beton kúszási tényezője,
- σ_{cg} - az önsúly és állandó terhek alapértékéből származó betonfeszültség a feszítőbetétek vonalában,
- σ_{cp0} - a kezdeti feszítőerőből származó betonfeszültség a feszítőbetétek vonalában,
- A_p - a vizsgált magasságban található összes feszítőbetét keresztmetszet területe,
- A_c - a betonkeresztmetszet területe,
- I_c - a betonkeresztmetszet inercianyomatéka,
- z_{pc} - a betonkeresztmetszet súlypontja és a feszítőbetétek közötti távolság.

A beton zsugorodási alakváltozása

| | Normál testsűrűségű beton zsugorodási végértéke ϵ_{cs} [‰] | |
|--------------------------------|---|-------------|
| | $h_0 \leq 150$ | $h_0 = 600$ |
| $RH = 50 \%$ | -0,60 | -0,50 |
| $RH = 80 \%$ | -0,33 | -0,28 |

RH a relatív páratartalom, $h_0 = 2 \cdot A_c / u$ ahol u a keresztmetszet kerülete.

Közelítőleg: $\epsilon_{cs}(t, t_s) = -0,5 \text{ ‰}$

Pontosabb számítás:

A beton nyomószilárdságának átlagértéke:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [\text{N/mm}^2]$$

A cement fajtájától függő tényező:

$$\beta_{sc} \quad (\text{normál szilárdulású cement esetén } \beta_{sc} = 5)$$

A beton szilárdságát figyelembe vevő tényező:

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [250 + \beta_{sc} \cdot (90 - f_{cm})] \cdot 10^{-6}$$

A relatív páratartalom:

$$RH \text{ [‰]}$$

A relatív páratartalom hatását figyelembe vevő tényező:

$$\beta_{sRH} = 1 - (RH / 100)^3$$

Levegőn tárolt beton esetén:

$$\beta_{RH} = -1,55 \cdot \beta_{sRH}$$

A névleges zsugorodási tényező:

$$\epsilon_{cs0} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}$$

A betonkeresztmetszet területe:

$$A_c \text{ [mm}^2\text{]}$$

A tartó környezettel érintkező kerülete:

$$u \text{ [mm]}$$

A keresztmetszet névleges mérete:

$$h_0 = 2 \cdot A_c / u \text{ [mm]}$$

A beton kora a vizsgált időpontban:

$$t \text{ [nap]}$$

A beton kora a zsugorodás kezdetekor:

$$t_s \text{ [nap]}$$

A zsugorodás időbeli lefutását leíró tényező:

$$\beta_s(t - t_s) = (t - t_s) / (0,035 \cdot h_0^2 + t - t_s)$$

A beton zsugorodási alakváltozása:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s)$$

A beton kúszási tényezője

| A beton kora a megterhelés-kor t_0 [nap] | Normál testsűrűségű beton kúszási végértéke $\phi(\infty, t_0)$ | | | | | |
|---|---|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | $RH = 50 \%$ | | | $RH = 80 \%$ | | |
| | $h_0 = 50$ | $h_0 = 150$ | $h_0 = 600$ | $h_0 = 50$ | $h_0 = 150$ | $h_0 = 600$ |
| 1 | 5,5 | 4,6 | 3,7 | 3,6 | 3,2 | 2,9 |
| 7 | 3,9 | 3,1 | 2,6 | 2,6 | 2,3 | 2,0 |
| 28 | 3,0 | 2,5 | 2,0 | 1,6 | 1,7 | 1,5 |
| 90 | 2,4 | 2,0 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,2 |
| 365 | 1,8 | 1,5 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |

RH a relatív páratartalom, h_0 keresztmetszet névleges mérete.

Közelítőleg: $\phi(t, t_0) = 2,0$

Pontosabb számítás:

RH -tól és az elem névleges méretétől függő tényező:

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \quad \beta_H \leq 1500$$

A kúszás időbeli lefutását leíró tényező:

$$\beta_c(t - t_0) = [(t - t_0) / (\beta_H + t - t_0)]^{0,3}$$

A relatív páratartalom hatását figyelembe vevő tényező:

$$\phi_{RH} = 1 + (1 - RH / 100) \cdot (0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0})$$

A betonszilárdság hatását figyelembe vevő tényező:

$$\beta(f_{cm}) = 16,8 / \sqrt{f_{cm}}$$

A beton korának hatását figyelembe vevő tényező:

$$\beta_1(t_0) = 1 / (0,1 + t_0^{0,2})$$

A névleges kúszási tényező:

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta_1(t_0)$$

A kúszási tényező:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

A feszítőbetétek relaxációjából adódó feszültségveszteség

A kezdeti feszítőerőből, valamint az önsúly és állandó terhek alapértékéből származó feszültség a feszítőbetétekben:

$$\sigma_{pg0} = \sigma_{p,m,0} + \alpha_p \left(-\frac{P_0}{A_i} + \frac{M_g - P_0 \cdot e}{I_{xi}} e \right) \quad \alpha_p = E_p / E_{cm}$$

A feszítőbetétek kezdeti feszültsége a biztonság javára való közelítéssel:

$$\sigma_p = \sigma_{pg0}$$

Pontosabb számítás:

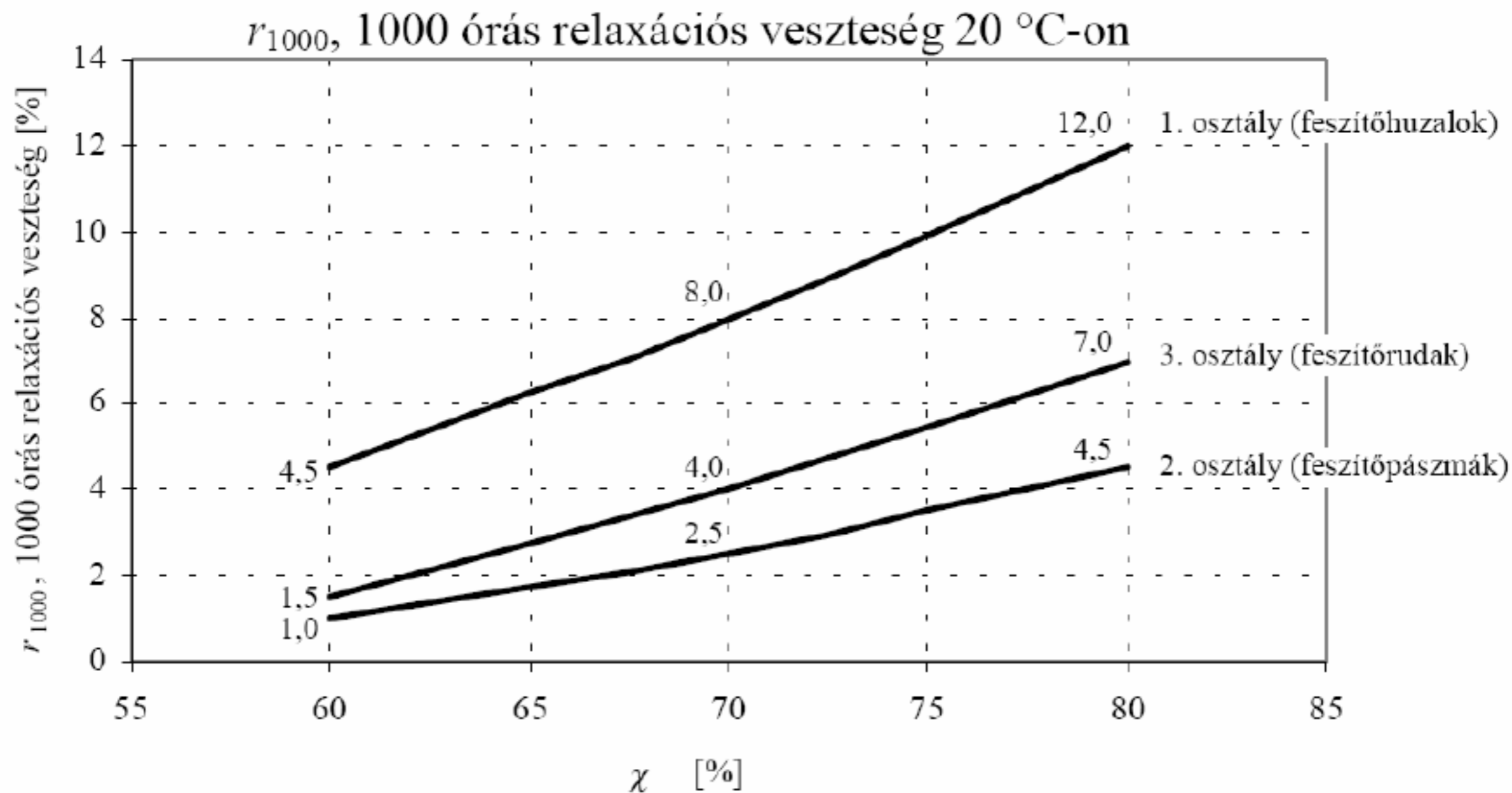
$$\sigma_p = \sigma_{pg0} - 0,3 \cdot \Delta\sigma_{p,c+s+r} \quad (\text{iteráció})$$

$$\sigma_p \approx 0,85 \sigma_{pg0}$$

A kezdeti feszítőbetét-feszültség és a feszítőpászma szakítószilárdság karakterisztikus értékének hányadosa:

$$\chi = 100 \cdot \sigma_p / f_{pk} \quad [\%]$$

20 °C hőmérsékletű tartó esetén a feszítőbetétek 1000 órás relaxációs vesztesége (r_{1000} [%]) a fenti χ hányados függvényében az alábbi diagramból határozható meg:



A relaxációból származó feszültségveszteség végértéke az 1000 órás relaxációs veszteség háromszorosára vehető fel:

$$\Delta\sigma_{pr} = - 3 \cdot r_{1000} \cdot \sigma_{p,m,0}$$

3. A beton rugalmas összenyomódásából származó feszültségcsökkenés

A beton rugalmas alakváltozása a feszítés hatására:

$$\varepsilon_c \approx 0,5P/(A_c E_c) \qquad \Delta\sigma_p = E_c \varepsilon_c = 0,5(E_s/E_c) \cdot \sigma_c \approx 3 \cdot \sigma_c$$

P – teljes feszítőerő A_c – beton km-i területe $\sigma_c = P/A_c$

Megj.: Amikor a feszítőerőt ráengedjük a tartóra, a beton összenyomódása folytán a feszítési feszültség csökken. Ez a feszültségcsökkenés **nem veszteség**, hiszen a feszítéskor éppen a beton összenyomása a célunk, s a huzalok megrövidülése ezzel jár.

Ideális keresztmetszeti jellemzőkkel végzett számítás során a feszítőbetétek feszültségének csökkenését nem kell külön figyelembe venni, mert az eredmény ezt már tartalmazza.

4. Veszteség az ismételt teherből származó maradó alakváltozásból

Sokszor ismétlődő nagy teherrel terhelt szerkezeteknél (pl. vasúti híd, darupályatartó) feszültségveszteség adódik a beton tehermentesítése után maradó alakváltozások halmozódásából is. A maradó alakváltozás egy-egy terhelés alkalmával függ a betonban fellépő feszültség nagyságától.

(Nehezen számszerűsíthető)

4. Súrlódásból származó veszteség /csak csúszóbetétesnél/

A feszítőbetétek egymást követő (nem egyszerre történő) megfeszítéséből és irányváltásából adódik.

A veszteség annál nagyobb, minél nagyobb távolságban van a vizsgált keresztmetszet az aktív lehorgonyzástól (x).

A súrlódási feszültség veszteség:

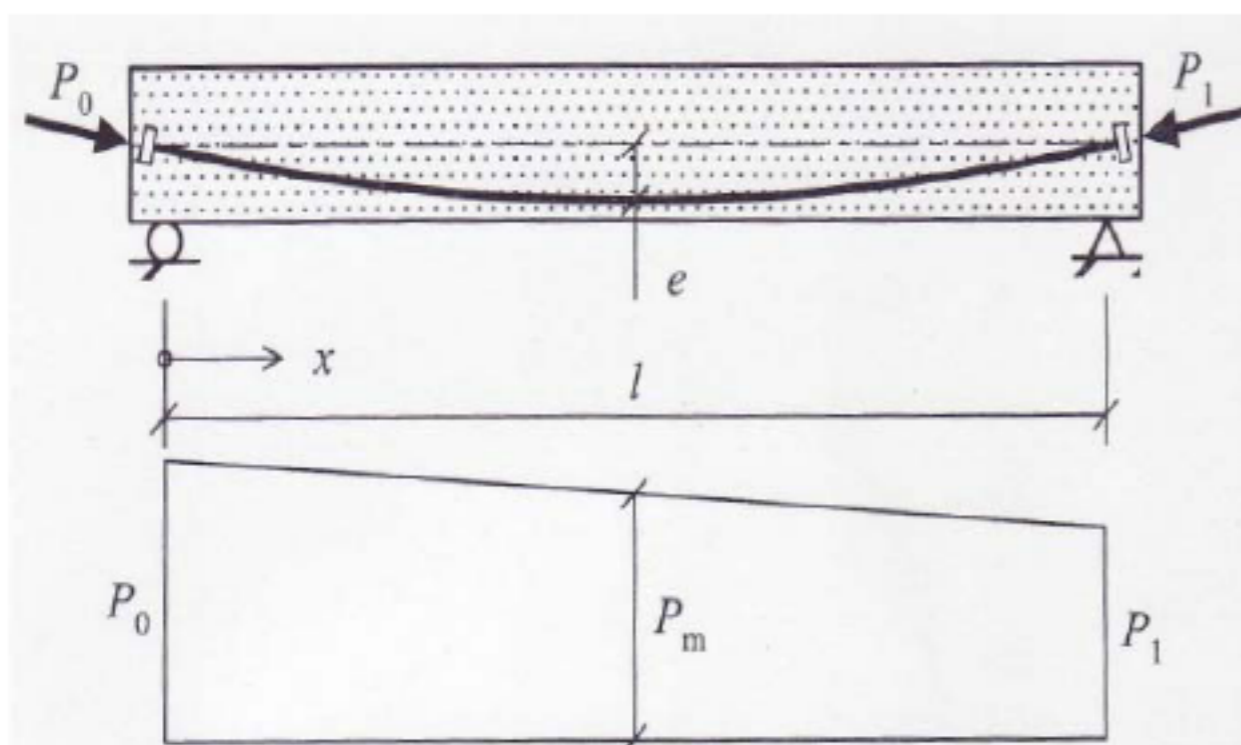
$$\Delta\sigma_{\mu}(x) = \sigma_0 \left[1 - e^{-\mu(\theta + kx)} \right]$$

σ_0 – kezdeti feszítési feszültség

$\mu = 0,17$ huzal - súrlódási tényező
 $0,19$ pászma
 $0,65$ bordázott feszítőrúd
 $0,33$ sima feszítőrúd

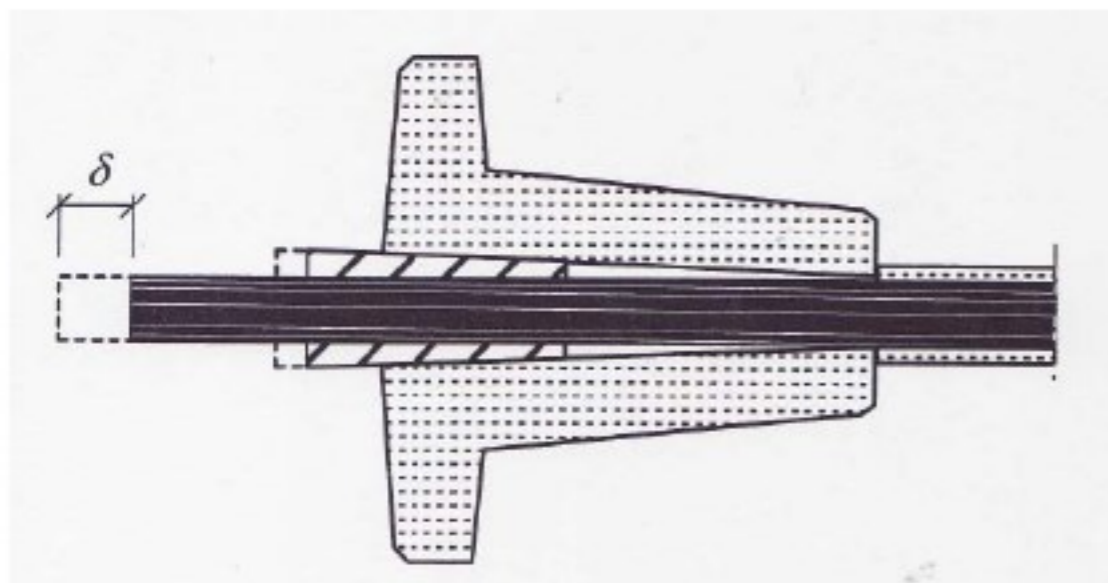
$k = 0,005 - 0,01$ gyári adat

$\theta =$ irányváltási szögek összege



A veszteség csökkentése: kétoldali feszítés, súrlódási együttható csökkentése (pl. zsírozással)

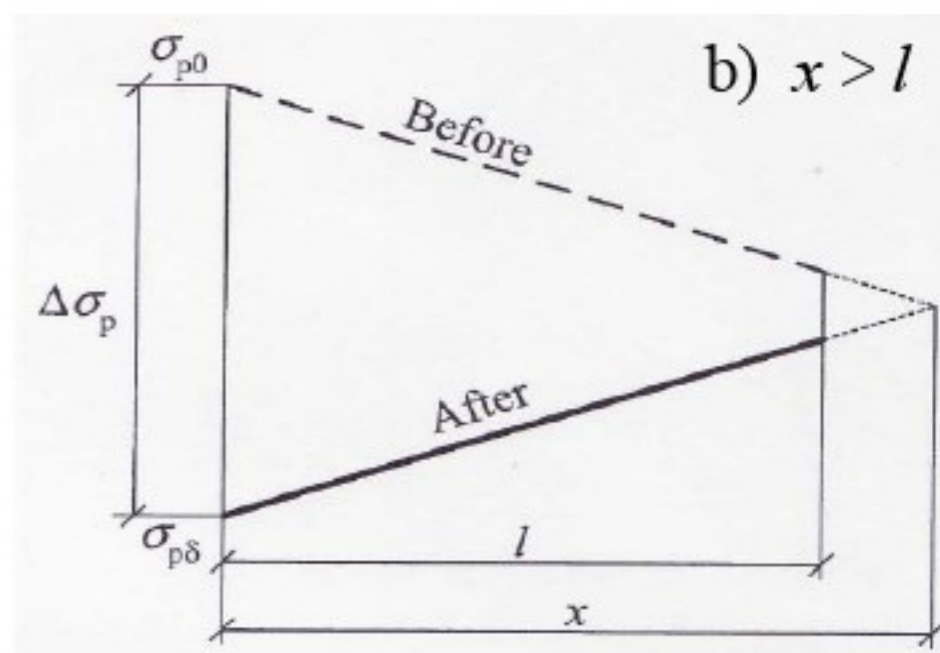
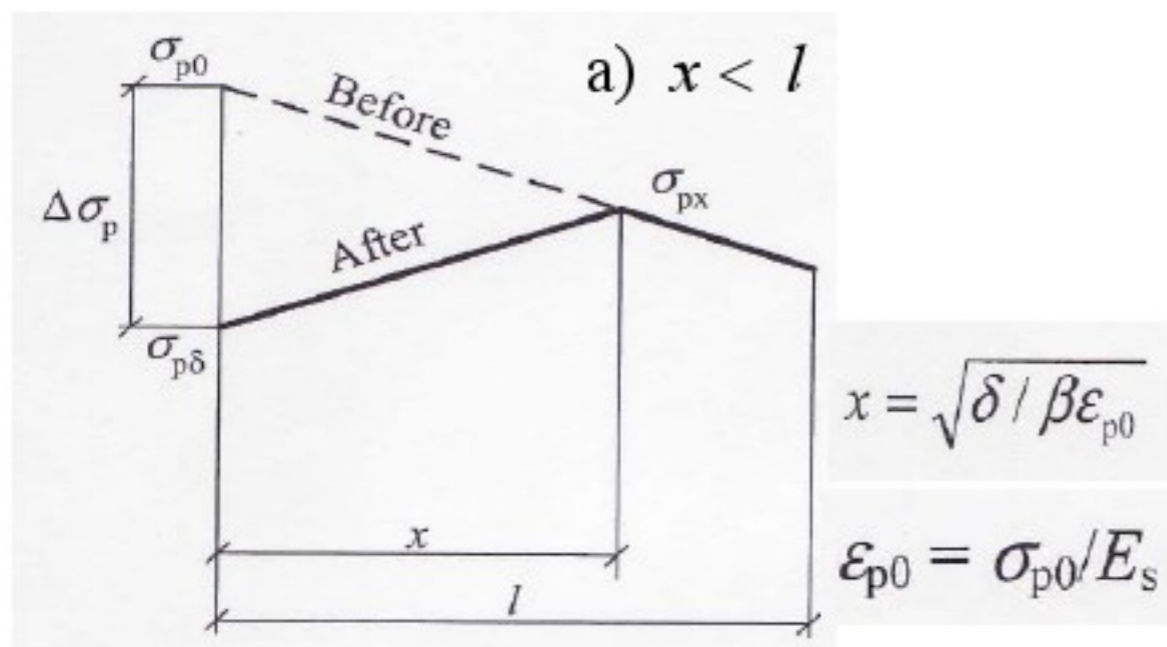
5. Ékcsúszásból származó veszteség /csak csúszóbetétesnél/



A lehorgonyzó elemnél keletkezik

$$\delta \approx 5\text{mm}$$

(a lehorgonyzófej típusától függően)



$$\Delta \sigma_{sl} = \sigma_{p0} - \sigma_{p\delta} \approx 2 \cdot \sigma_{p0} \cdot \mu(\theta + kx) = 2 \cdot \sigma_{p0} \cdot \beta \cdot x$$

$$\Delta \sigma_{sl} = E_s \cdot \delta / l + \sigma_{p0} \cdot \beta \cdot l$$

$$\beta = \mu \cdot \left(\frac{\theta}{x} + k \right) \quad \text{Parabola alakú kábelvezetésnél: } \theta/x = 8e/l^2$$

Hatásos feszítési feszültség, hatásos feszítőerő

Előfeszített tartó $\sigma_{p,m,t}$ hatásos feszítési feszültsége adott t időpontban:

$$\sigma_{p,m,t} = \sigma_{p,m,0} - \underbrace{\Delta\sigma_{p,T} - \Delta\sigma_{p,c+s+r}}_{\text{Feszítési veszteségek}}$$

$\sigma_{p,m,0}$ - kezdeti feszítési feszültség,

$\Delta\sigma_{p,c+s+r}$ - a zsugorodásból, kúszásból és relaxációból adódó feszültségveszteség (időtől függő veszteségek),

$\Delta\sigma_{p,T}$ - a beton hőérleléséből származó feszültségveszteség

Utófeszített tartó $\sigma_{p,m,t}$ hatásos feszítési feszültsége adott t időpontban:

$$\sigma_{p,m,t} = \sigma_{p,m,0} - \Delta\sigma_{p,c+s+r} - \Delta\sigma_{\mu} - \Delta\sigma_{sl}$$

$\Delta\sigma_{\mu}$ - súrlódásból származó veszteség

$\Delta\sigma_{sl}$ - ékcsúszásból származó veszteség

A hatásos feszítőerő hányad: $\nu = \frac{\sigma_{p,m,t}}{\sigma_{p,m,0}}$ **A hatásos feszítőerő:** $N_{pm,t} = \sigma_{p,m,t} \cdot A_p$