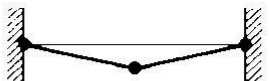

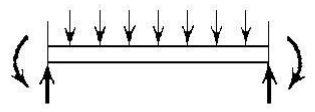
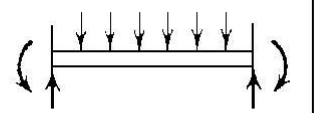
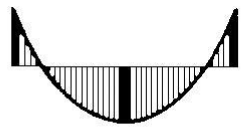
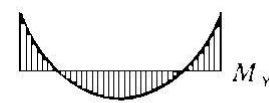


2. Előadás

Csarnokszerkezetek teherbírásvizsgálatai, elméleti háttér

- globális analízis és követelményei:
 rugalmas és képlékeny vizsgálatok
- szerkezeti elemek, keresztmetszetek teherbírás-vizsgálata
- kísérleti vizsgálatok eredményei

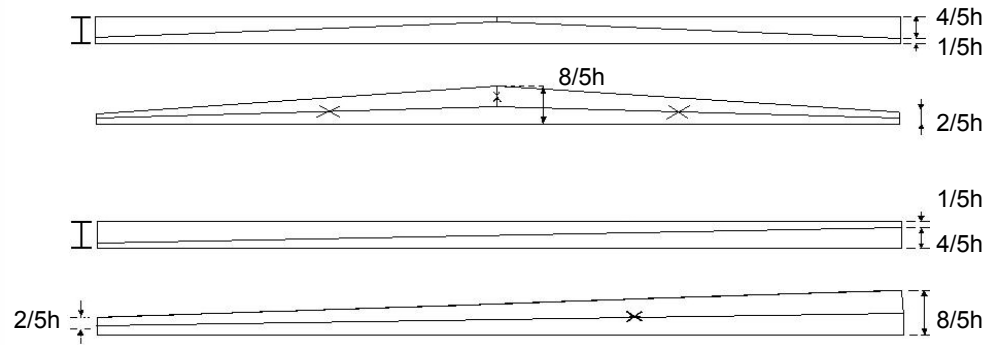
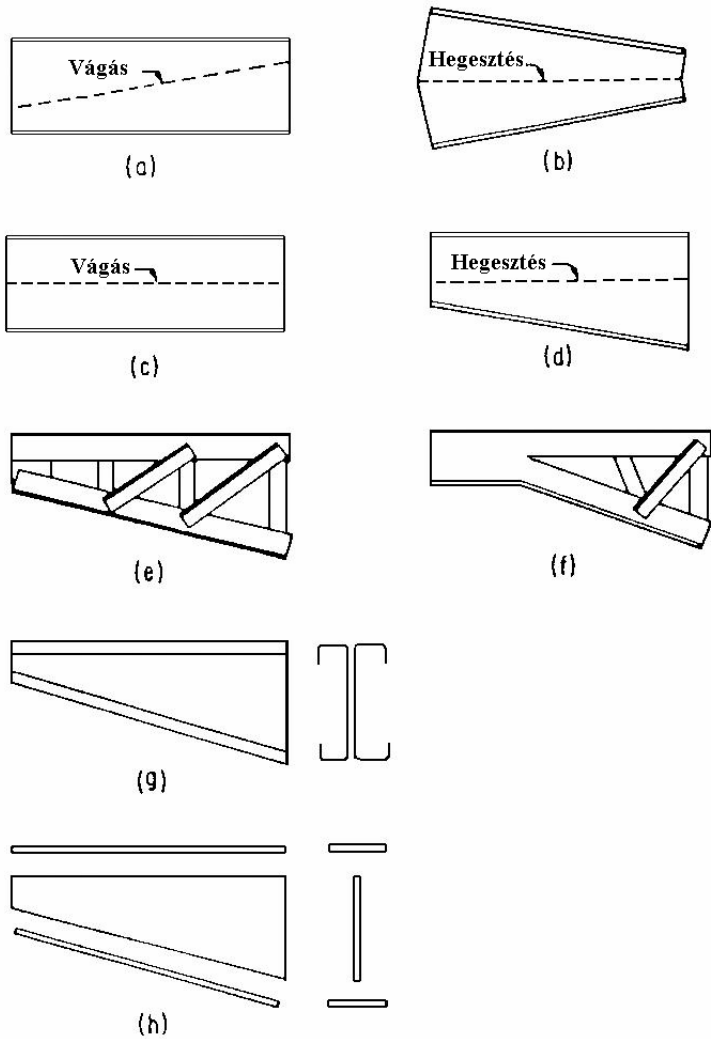
RUGALMAS ÉS KÉPLÉKENY ANALÍZIS

Képlékeny analízis		Rugalmas analízis	
	Mechanizmus	Folytonosság	
	Egyensúly		
	Képlékeny nyomaték	Folyás	 Kisebb mint M_y

Rugalmas analízis
Változó keresztmetszetű tartó
kialakítási lehetőségei:

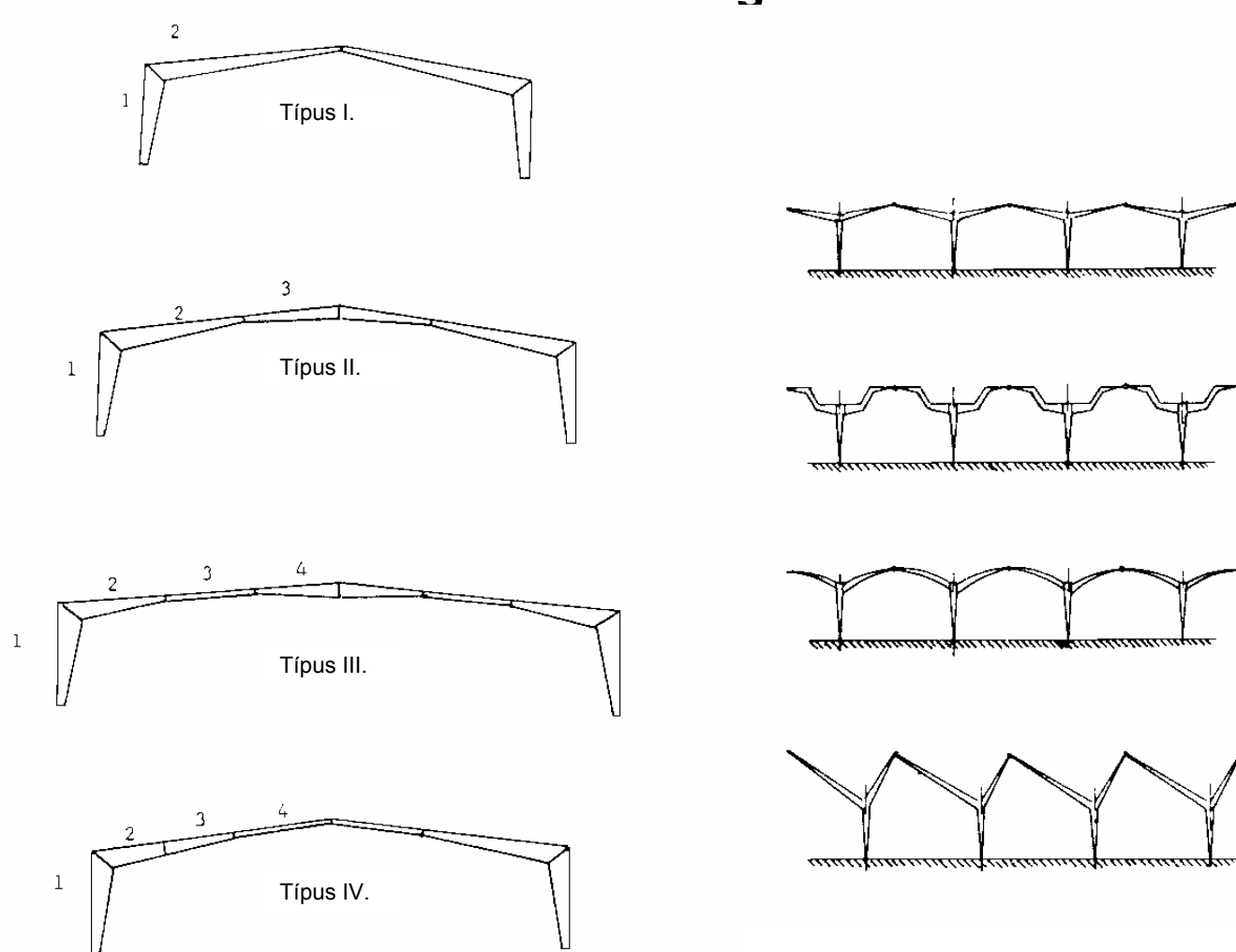


Változó keresztmetszetű tartó
Változó keresztmetszetű tartó
geometriai méretei:



Profil	$W_{el,y}$ [cm ³]	$\max w_{el,y}$ (változó magasság) [cm ³]	$\max h$ [cm]
IPE 400	1156,42	2110	640
HE 400B	2884,02	5160	640

Rugalmas analízis ↔ változó keresztmetszetű keretek kialakítási lehetőségei

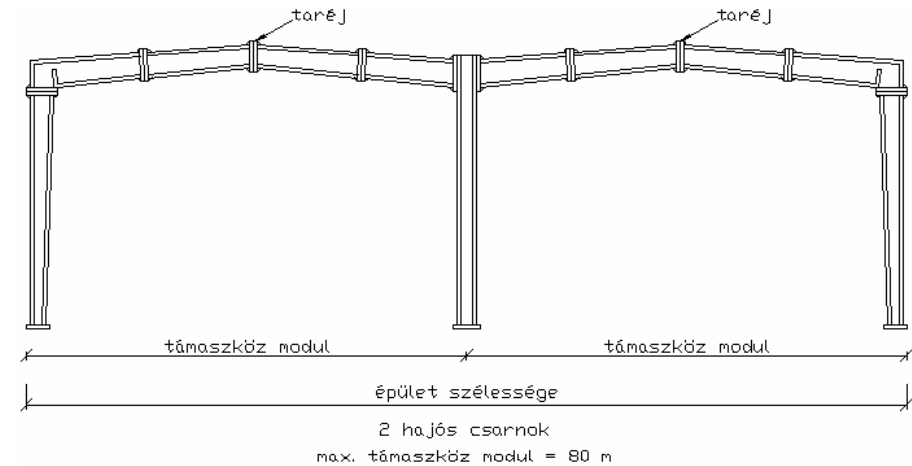
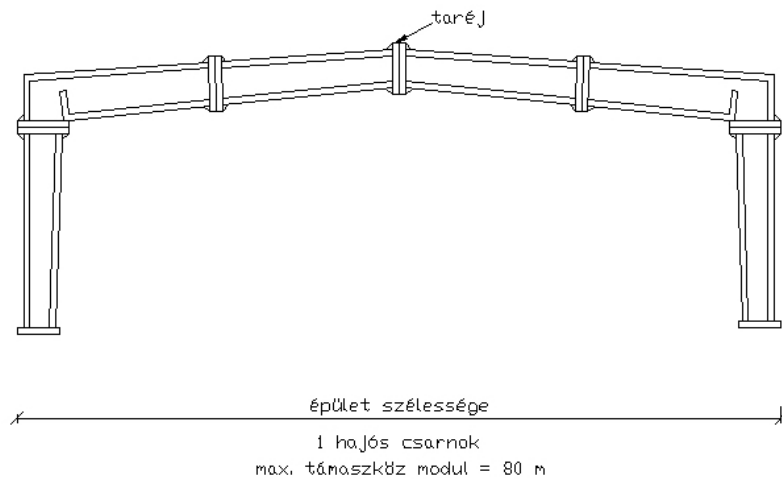


(a) Többszörösen változó keresztmetszetű ferde gerendás keret

(b) Többhajós változó keresztmetszetű keretek

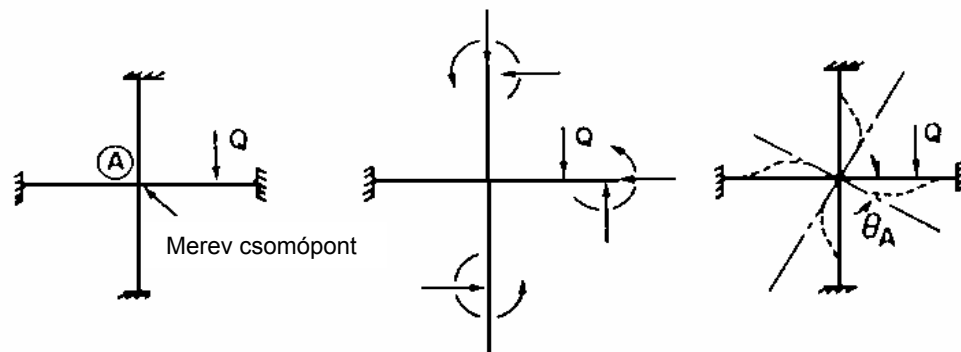
Rugalmas analízis: PEB-System [Stahlbau 1996] (Pre-Engineering Building-System)

- I. Acélananyag választék: - hengerelt lemezek
- hidegen alakított szelvények
- II. Gyártási folyamat: - hegesztett „I” szelvények
- hidegen alakított rúdszelvények
- hullámlemezek
- III. Tervezési folyamat: - „egységesített” szerkezeti megoldások
- komplex vizsgálatok



Rugalmas analízis

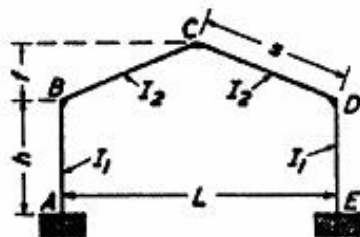
[Bojtár – Gáspár (2004)]



(a) Szerkezet és terhelés (b) Erő módszer (c) Elmozdulás módszer

Befogott keretek ferde keretgerendával [Kleinlogel, 1930]

Befogott keretek megoszló terheléssel



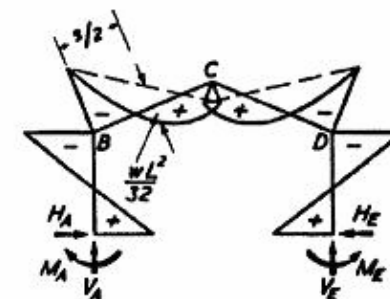
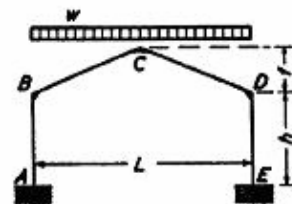
$$k = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{h}{s} \quad \phi = \frac{f}{h}$$

$$m = 1 + \phi$$

$$B = 3k + 2 \quad C = 1 + 2m$$

$$K_1 = 2(k + 1 + m + m^2) \quad K_2 = 2(k + \phi^2)$$

$$R = \phi C - k \quad N_1 = K_1 K_2 - R^2 \quad N_2 = 3k + B$$



$$M_A = M_E = \frac{wL^2}{16} \cdot \frac{k(8 + 15\phi) + \phi(6 - \phi)}{N_1}$$

$$M_B = M_D = -\frac{wL^2}{16} \cdot \frac{k(16 + 15\phi) + \phi^2}{N_1}$$

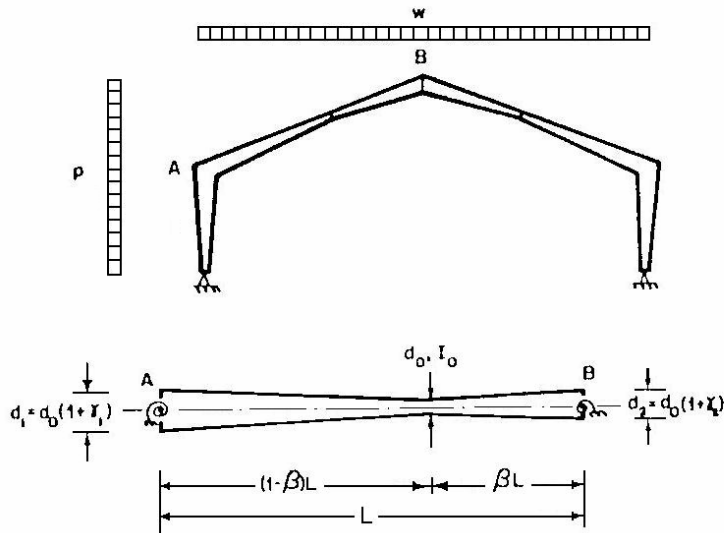
$$M_C = \frac{wL^2}{8} - \phi M_A + m M_B$$

$$V_A = V_E = \frac{wL}{2} \quad H_A = H_E = \frac{M_A - M_B}{h}$$

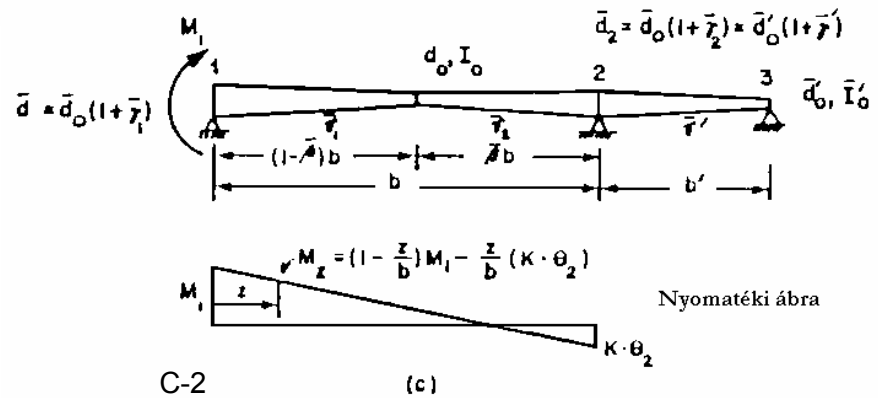
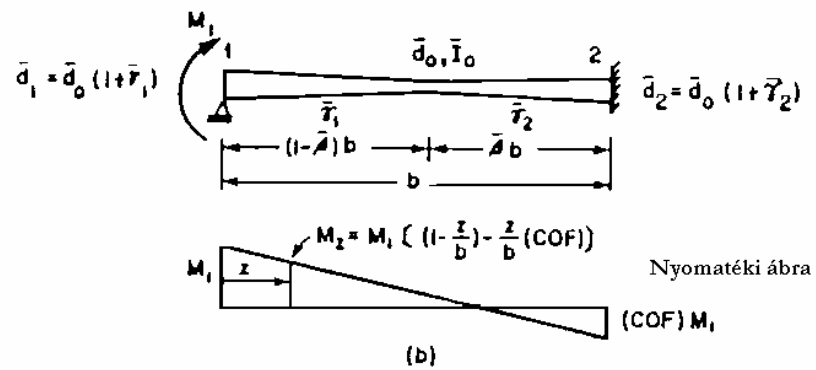
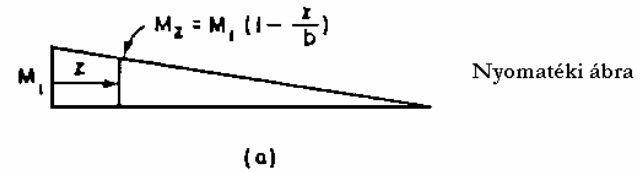
Rugalmas analízis:

Változó keresztmetszetű keretek: [Lee – Ketter – Hsu, 1981]

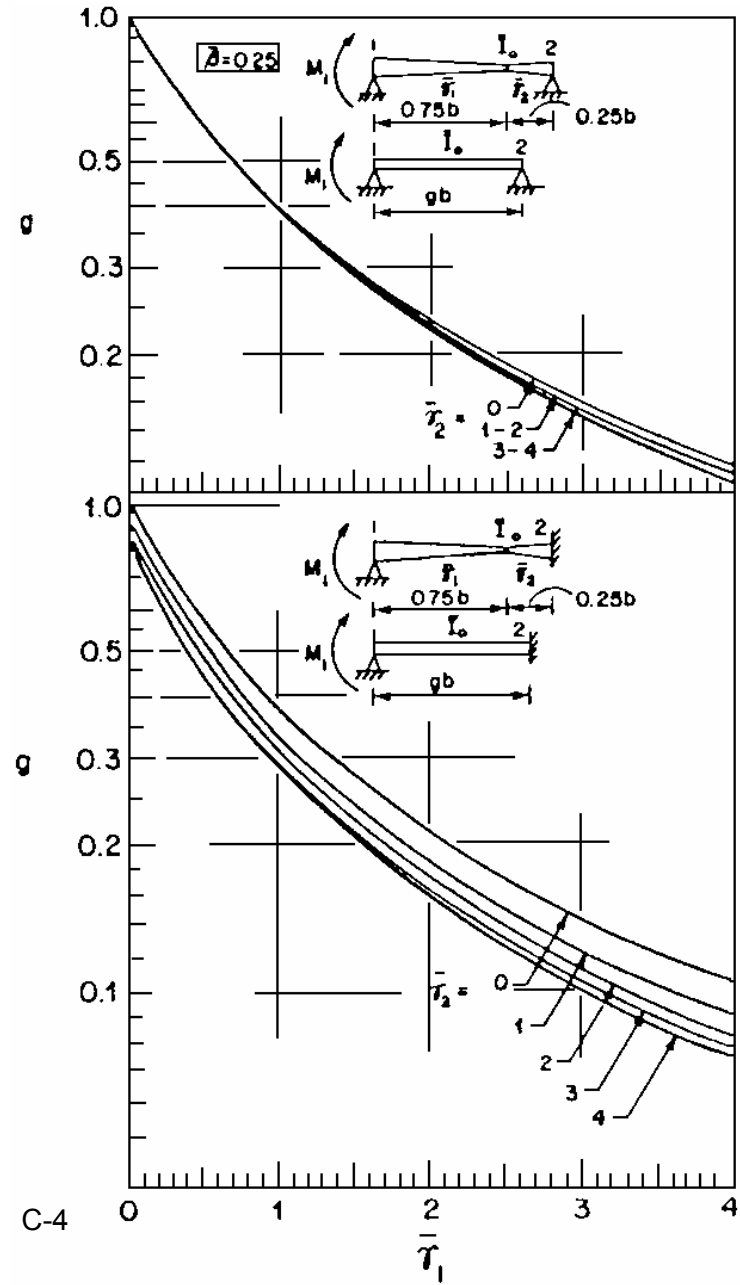
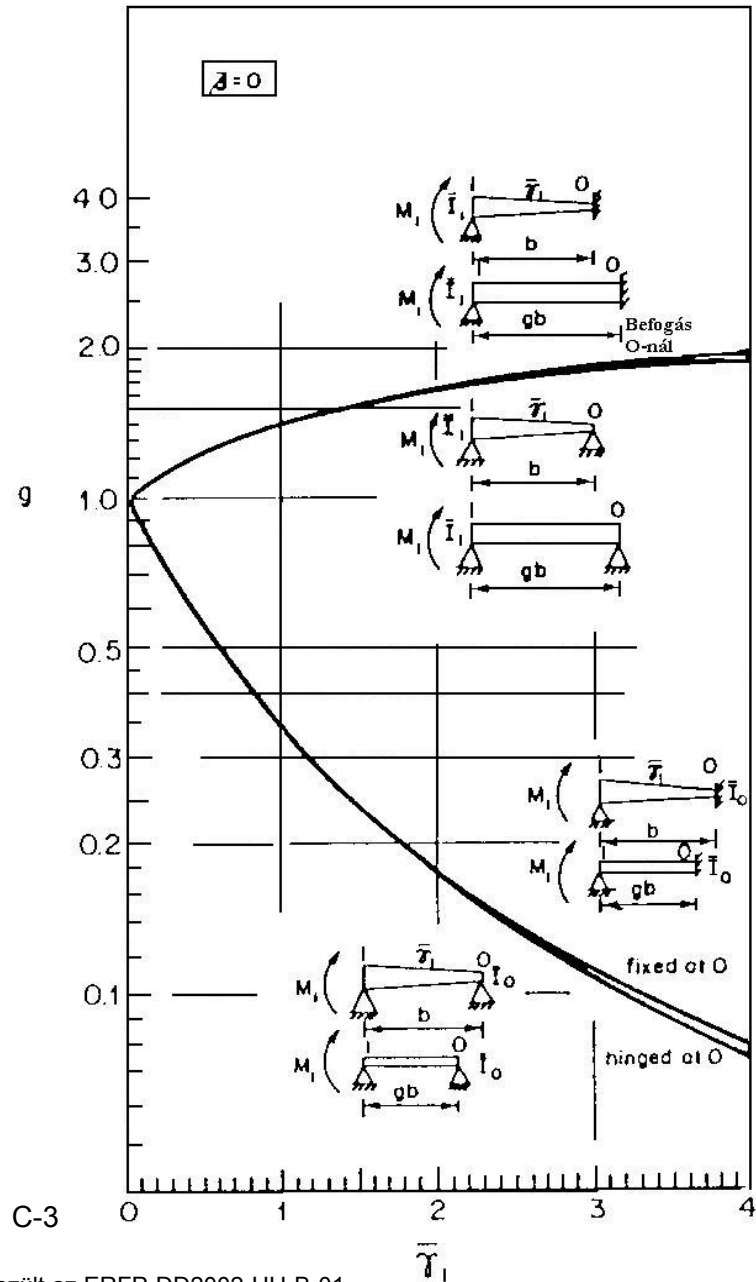
$$\gamma_1 = \frac{d_1}{d_0} - 1 \quad \gamma_2 = \frac{d_2}{d_0} - 1$$

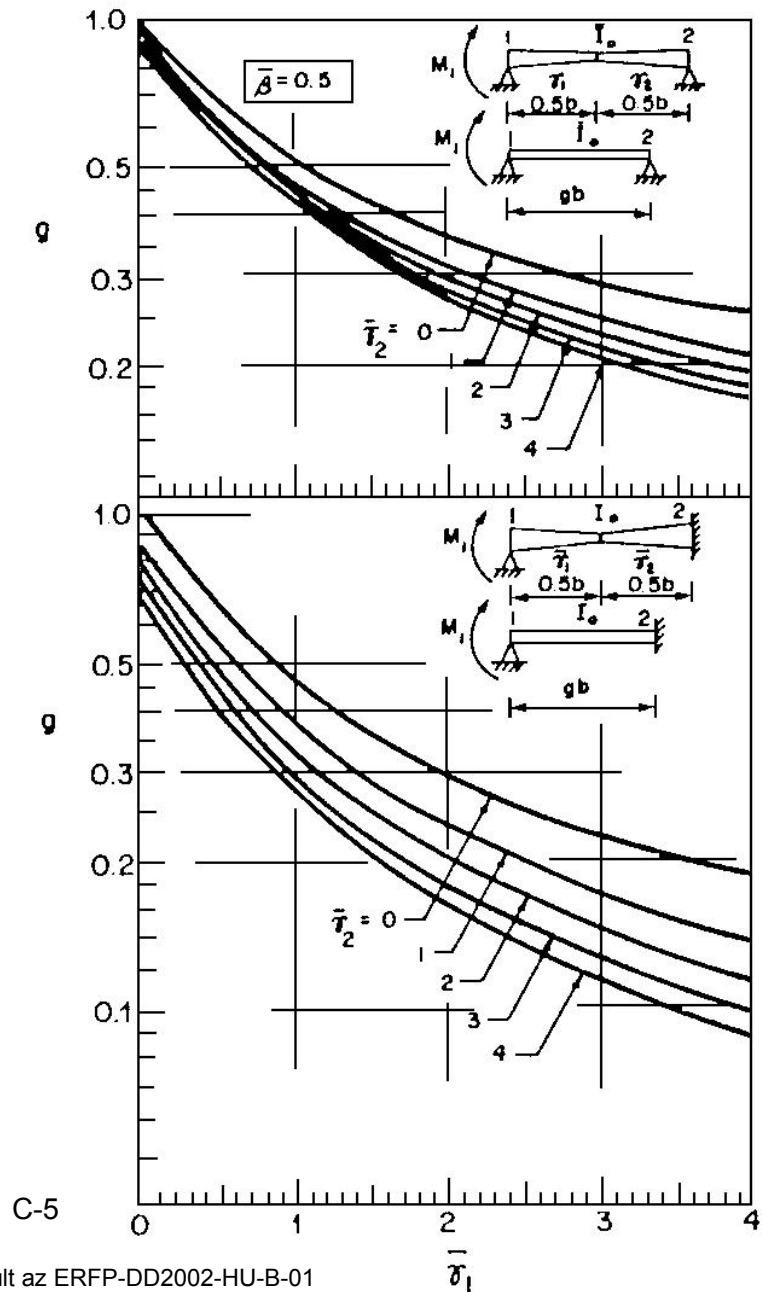


C-1

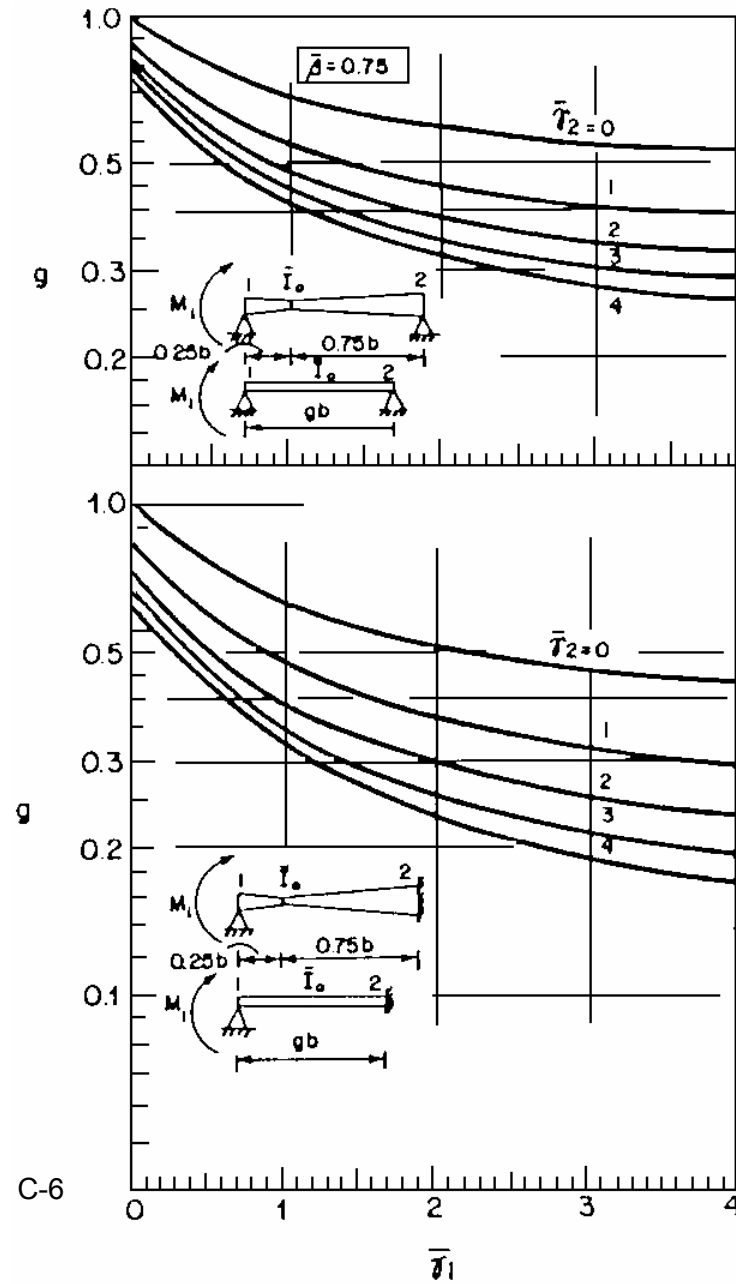


C-2





C-5

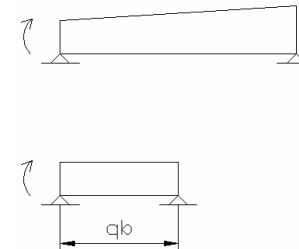


C-6

Felhasználási lehetőségek:

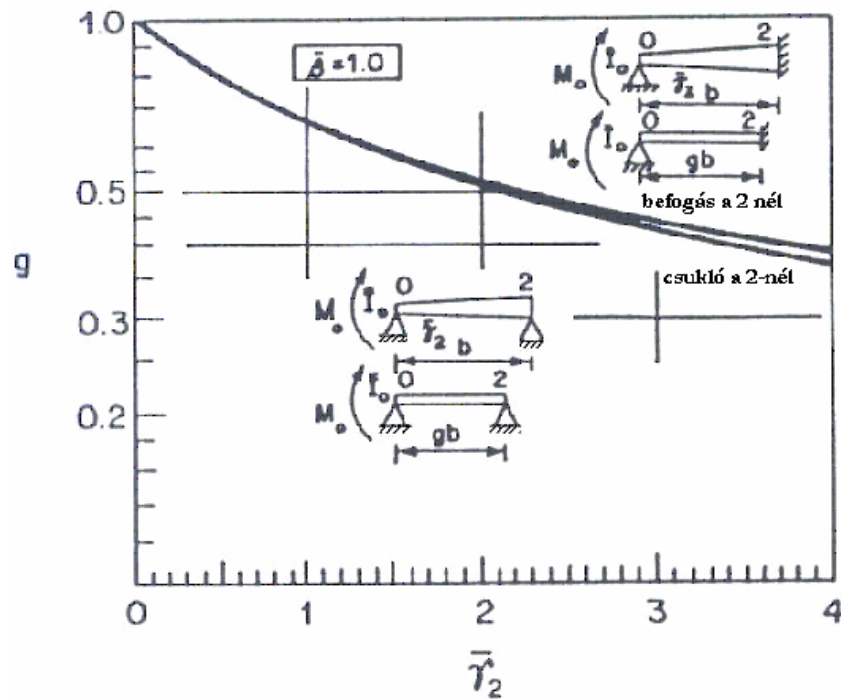
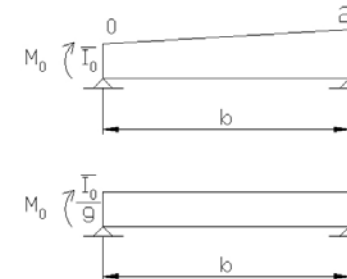
I. Ekvivalens hossz meghatározása

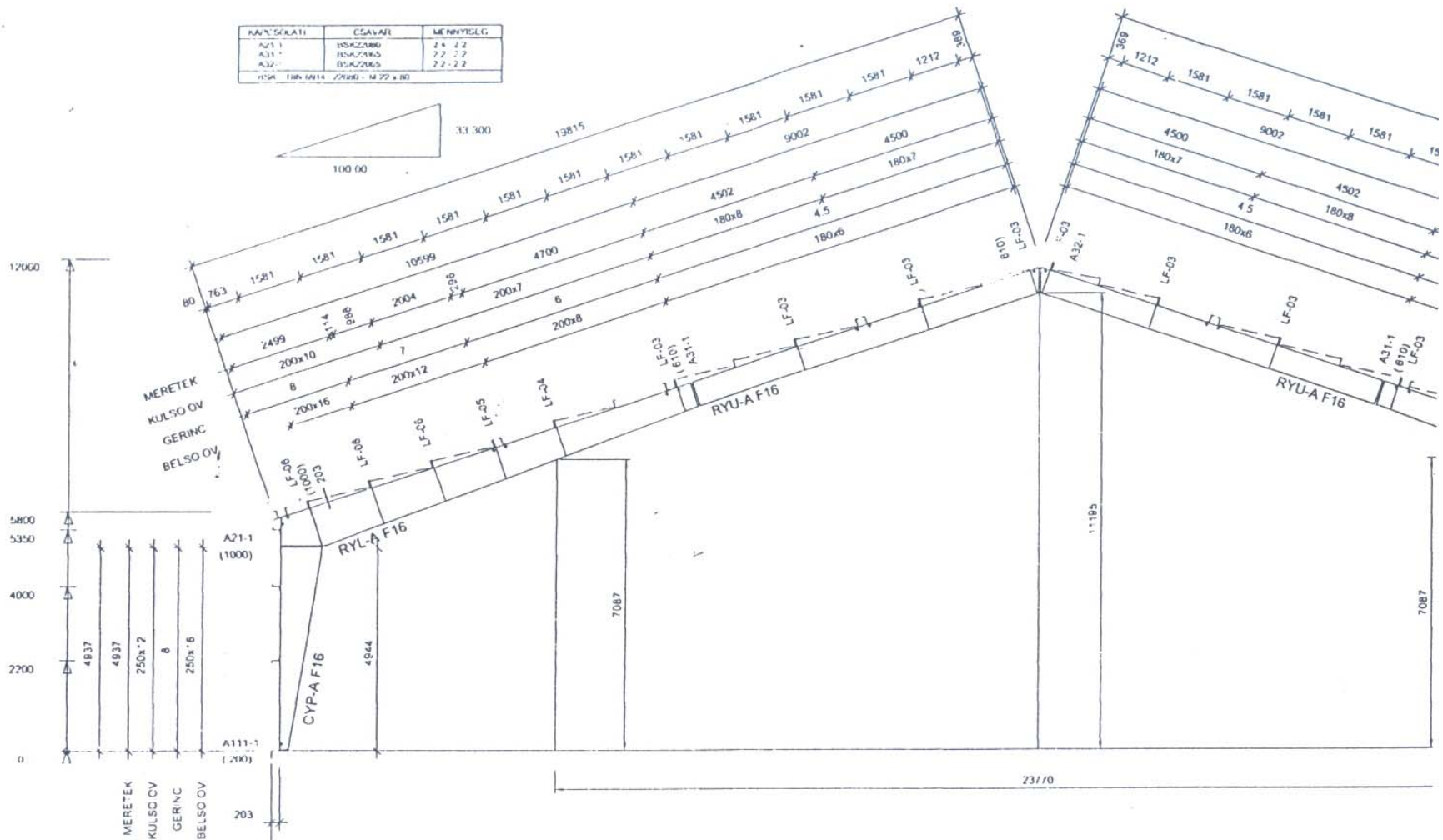
pl.:



II. Ekvivalens inercianyomaték meghatározása

pl.:

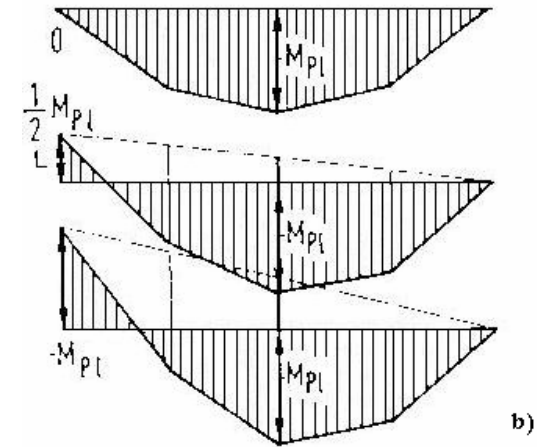
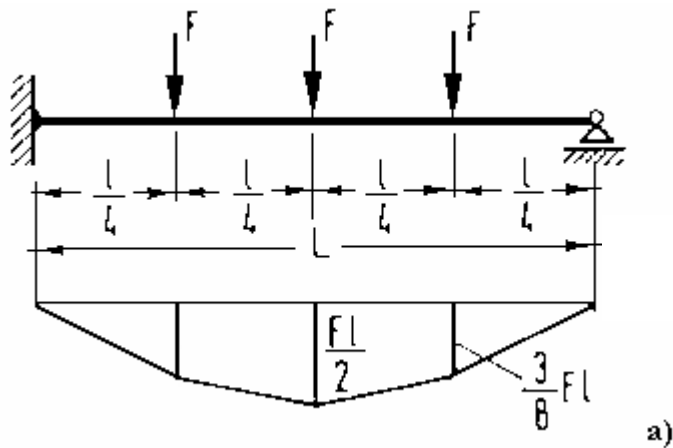




Képlékeny analízis:

Mechanizmus feltétel	}	Kinematikai módszer
Egyensúlyi feltétel		
Képlékeny nyomaték feltétel		

Statikai módszer:

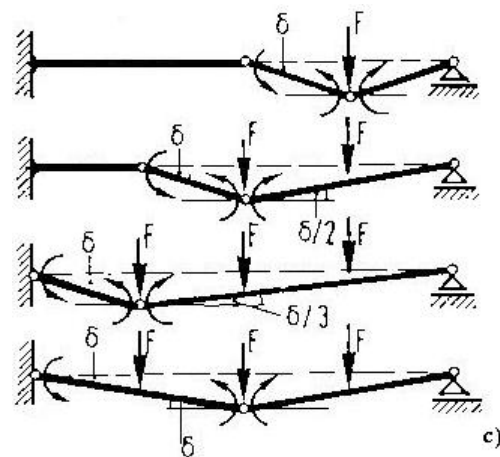


$$\frac{Fl}{2} = M_{pl} \Rightarrow F_{stat} = \frac{2M_{pl}}{l}$$

$$\frac{Fl}{2} = \left(1 + \frac{1}{4}\right)M_{pl} \Rightarrow F_{stat} = \frac{2.5M_{pl}}{l}$$

$$\frac{Fl}{2} = \left(1 + \frac{1}{2}\right)M_{pl} \Rightarrow F_{stat} = \frac{3M_{pl}}{l}$$

Kinematikai módszer:



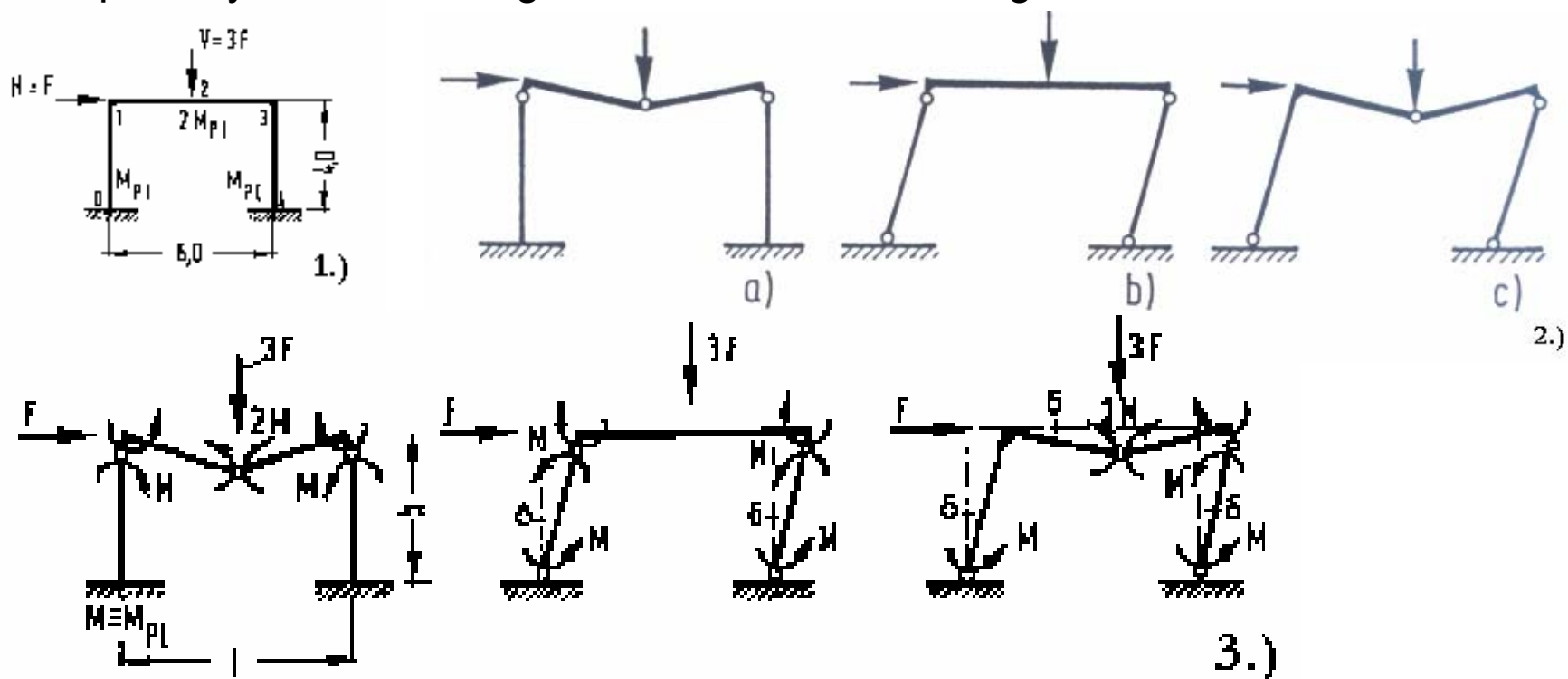
$$F\delta \frac{l}{4} - M_{Pl}(\delta + 2\delta) = 0 \rightarrow F_{kinem} = \frac{12M_{Pl}}{l}$$

$$F\delta \frac{l}{4} + F \frac{\delta}{2} * \frac{l}{4} + M_{Pl} \left(\delta + \delta + \frac{\delta}{2} \right) = 0 \rightarrow F_{kinem} = \frac{6,667M_{Pl}}{l}$$

$$F\delta \frac{l}{4} + F \frac{\delta}{3} * \frac{l}{2} + F \frac{\delta}{3} * \frac{l}{4} - M_{Pl} \left(\delta + \delta + \frac{\delta}{3} \right) = 0 \rightarrow F_{kinem} = \frac{4,667M_{Pl}}{l}$$

$$F\delta \frac{l}{2} + 2F\delta \frac{l}{4} - M_{Pl}(\delta + 2\delta) = 0 \rightarrow F_{kinem} = \frac{3M_{Pl}}{l}$$

Képlékeny analízis: befogott keret vízszintes keretgerendával



$$a): 3F \cdot \frac{l}{2} \delta - (M + 2 \cdot 2M + M) \delta = 0 \rightarrow \frac{3}{2} Fl = 6M \rightarrow F = \frac{4M}{l}$$

$$b): F \cdot h \delta - (M + M + M + M) \delta = 0 \rightarrow Fh = 4M \rightarrow F = \frac{4M}{h}$$

$$c): 3F \cdot \frac{l}{2} \delta + Fh \delta - (M + 2 \cdot 2M + M + M + M) \delta = 0 \rightarrow \frac{3}{2} Fl + Fh = 8M \rightarrow F = \frac{8M}{\frac{3}{2}l + h}$$

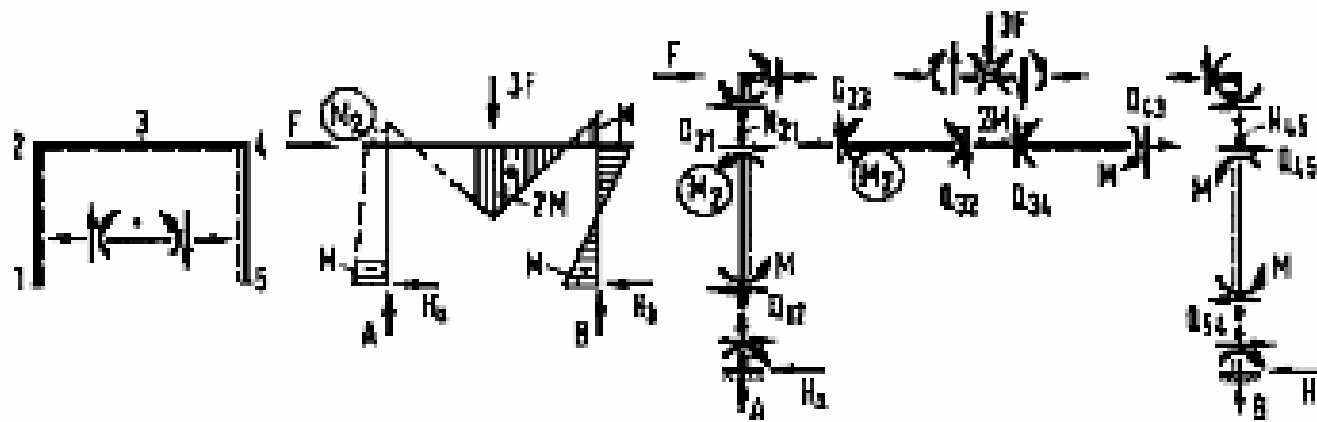
$$a): F = \frac{2}{3} M = 0,666M$$

$$b): F = M = 1,000M$$

$$c): F = \frac{8}{13} M = 0,615M$$

$$F_{Pl} = \frac{8}{13} M_{Pl}$$

4.)



5.)

$$Q_{45} = Q_{54}; \quad Q_{45}h - 2M = 0 \rightarrow Q_{45} = \frac{2M}{h} = \frac{2M}{4,0} = \frac{1}{2}M$$

$$H_b = Q_{54} = \frac{2M}{h} = \frac{1}{2}M; \quad H_a = F - H_b = \frac{8}{13}M - \frac{1}{2}M = \frac{3}{26}M;$$

$$Q_{12} = H_a = \frac{3}{26}M$$

$$M_2 + M - Q_{12} * h = 0 \rightarrow M_2 = Q_{12} * h - M = \frac{3}{26}M * 4,0 - M \rightarrow M_2 = -\frac{7}{13}M < |M_{pl}|$$

$$Q_{34} \frac{l}{2} + 2M + M = 0 \rightarrow Q_{34} = -\frac{6M}{l} = -M, \quad Q_{43} = Q_{34}$$

6.)

$$Q_{32} - Q_{34} - 3F = 0 \rightarrow Q_{32} = 3F + Q_{34} = 3 \frac{8}{13}M - M = \frac{11}{13}M$$

$$Q_{23} = Q_{32};$$

$$\text{Kontroll: } Q_{23} \frac{l}{2} + M_2 - 2M = 0 \rightarrow M_2 = 2M - Q_{23} \frac{l}{2} = -\frac{7}{13}M$$

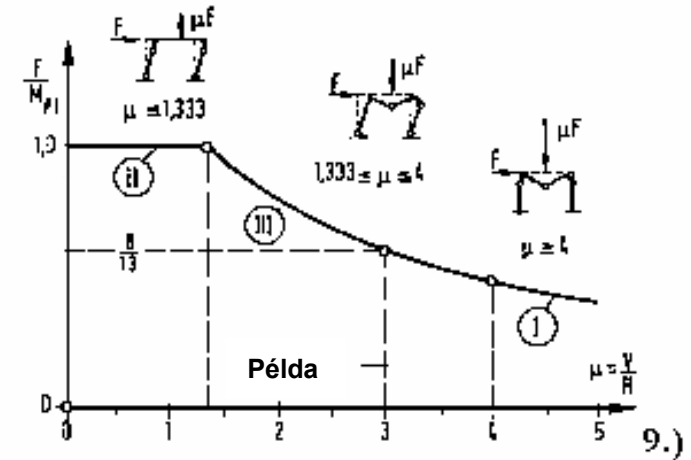
$$N_{21} + Q_{23} = 0 \rightarrow N_{21} = -Q_{23} = -\frac{11}{13}M;$$

$$N_{45} - Q_{43} = 0 \rightarrow N_{45} = Q_{43} = -M$$

$$N_{23} - Q_{21} + F = 0 \rightarrow N_{23} = \frac{3}{26}M - \frac{8}{13}M = -\frac{1}{2}M;$$

$$N_{34} = -\frac{1}{2}M$$

$$\text{Kontroll: } A * l + F * h - 3F * \frac{l}{2} - 2M = 0$$



7.)

Független mechanizmusok száma: $k = m - n$

m – a lehetséges képlékeny csuklók száma

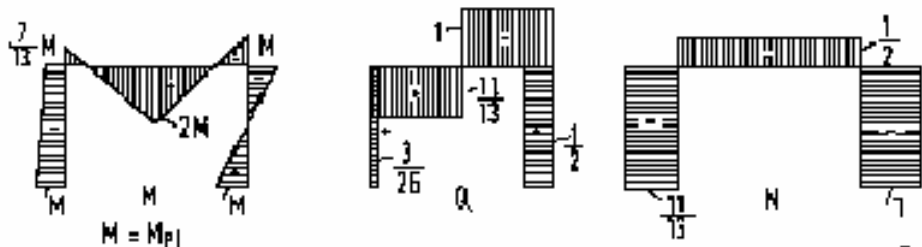
n – a statikai határozatlanság száma

anizmusok lehetséges kombinációi:

$$q = 2^k - 1$$

$$k = m - n = 5 - 3 = 2;$$

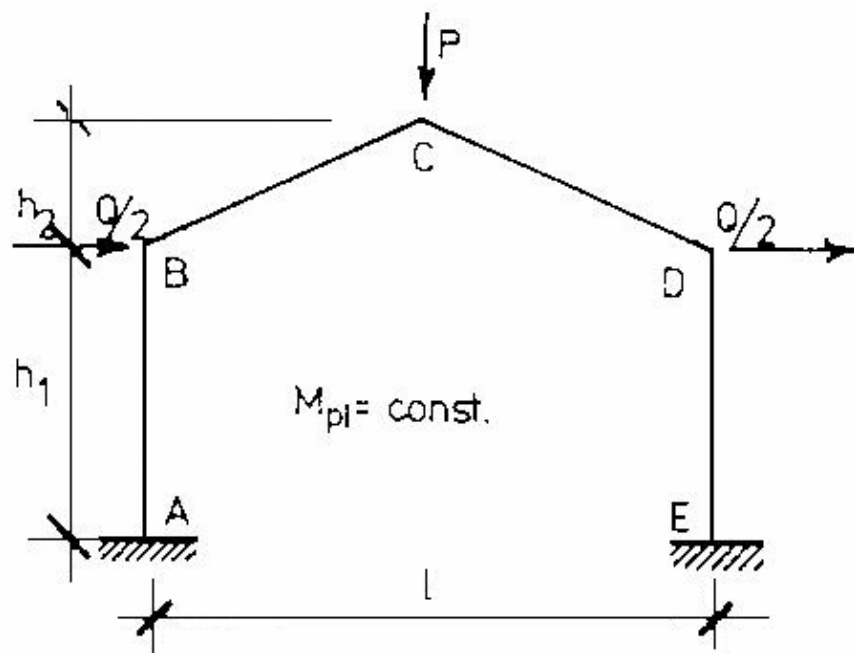
$$q = 2^k - 1 = 2^2 - 1 = 3$$



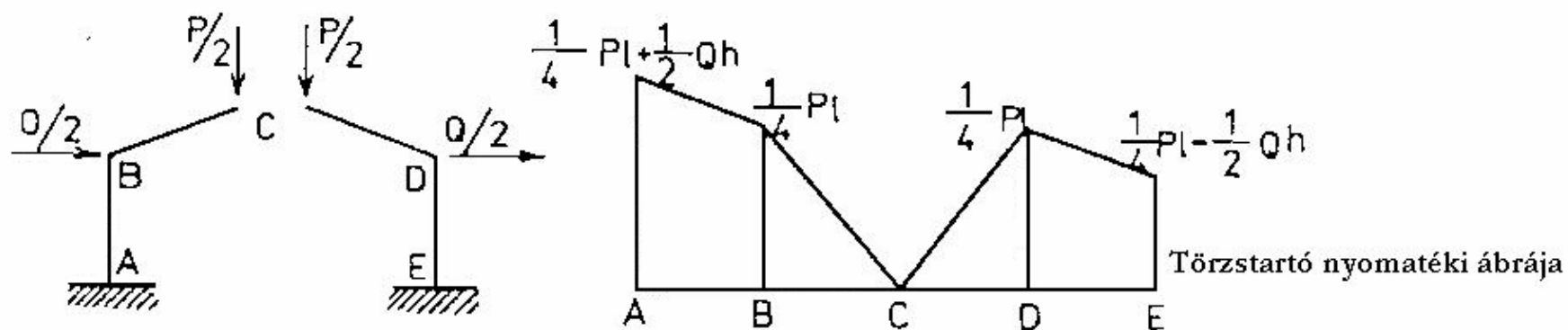
8.)

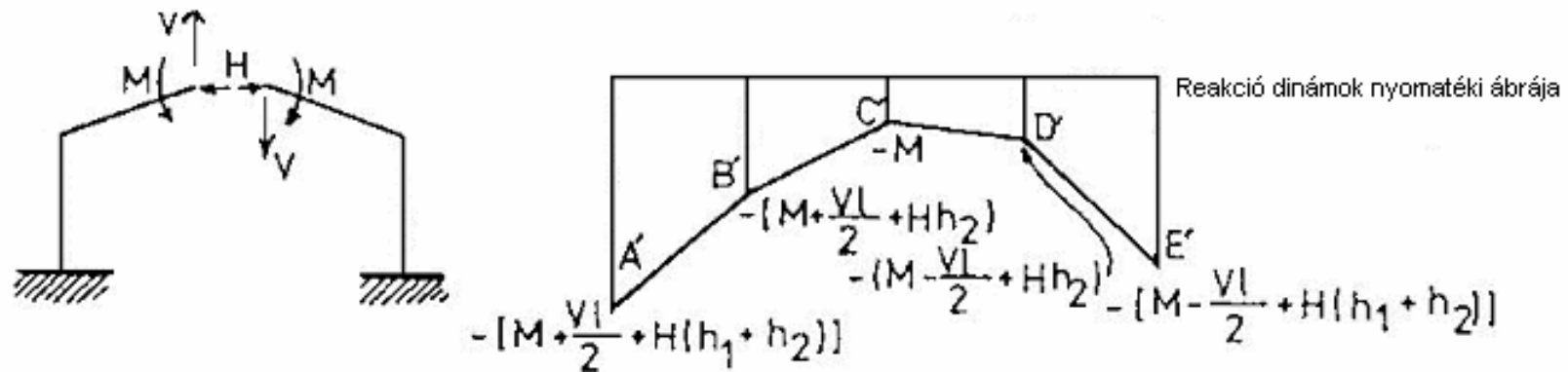
Képlékeny analízis

Példa: Befogott keret ferde keretgerendával



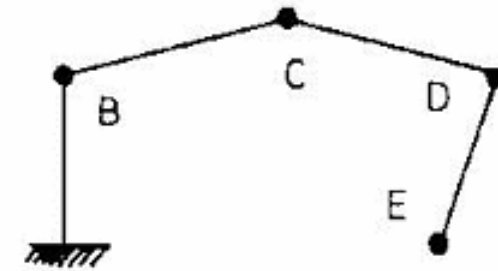
[Baker - Heyman, 1969]





Tönkremenetel nyomatéki ábrája

$$\left. \begin{aligned} B: & \left(\frac{1}{4}Pl\right) - \left(M + \frac{1}{2}Vl + Hh_2\right) = M_{pl} \\ C: & - (M) = -M_{pl} \\ D: & \frac{1}{4}Pl - \left(M - \frac{1}{2}Vl + Hh_2\right) = M_{pl} \\ E: & \left(\frac{1}{4}Pl - \frac{1}{2}Qh_1\right) - \left(M - \frac{1}{2}Vl + Hh_1 + Hh_2\right) = -M_{pl} \end{aligned} \right\}$$

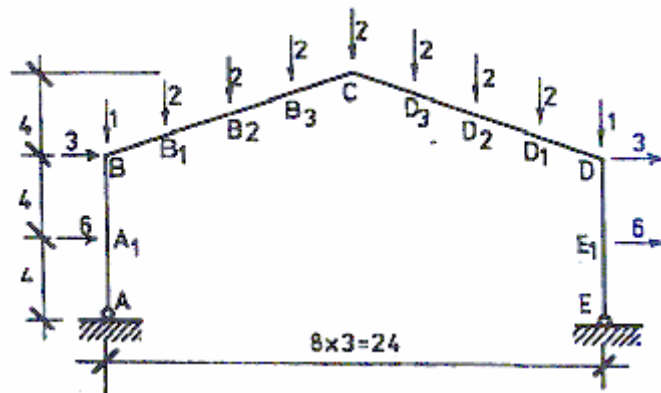


Megoldás:

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{pl} \\ V &= 0 \\ H(h_1 + h_2) &= \frac{1}{4}Pl - \frac{1}{2}Qh_1 \end{aligned} \right\}$$

Képlékeny analízis

Példa: Csuklós keret ferde keretgerendával [Baker-Heymann 1969]



Tönkrementel feltételi egyenletei

A: $96 - (M + 12V + 12H) = 0$

B2: $12 - (M + 6V + 2H) = -Mpl$

D: $48 - (M - 12V + 4H) = Mpl$

E: $0 - (M - 12V + 12H) = 0$

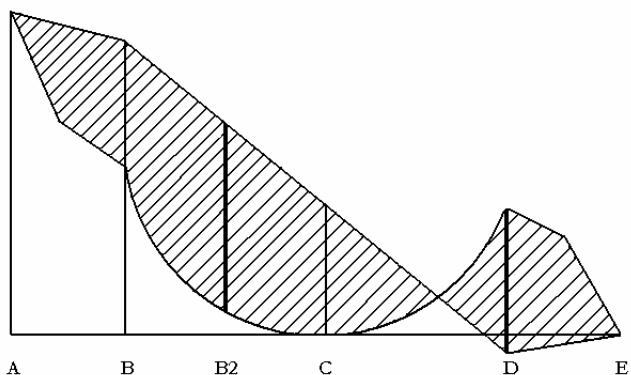
Megoldás:

$Mpl = 53,3$

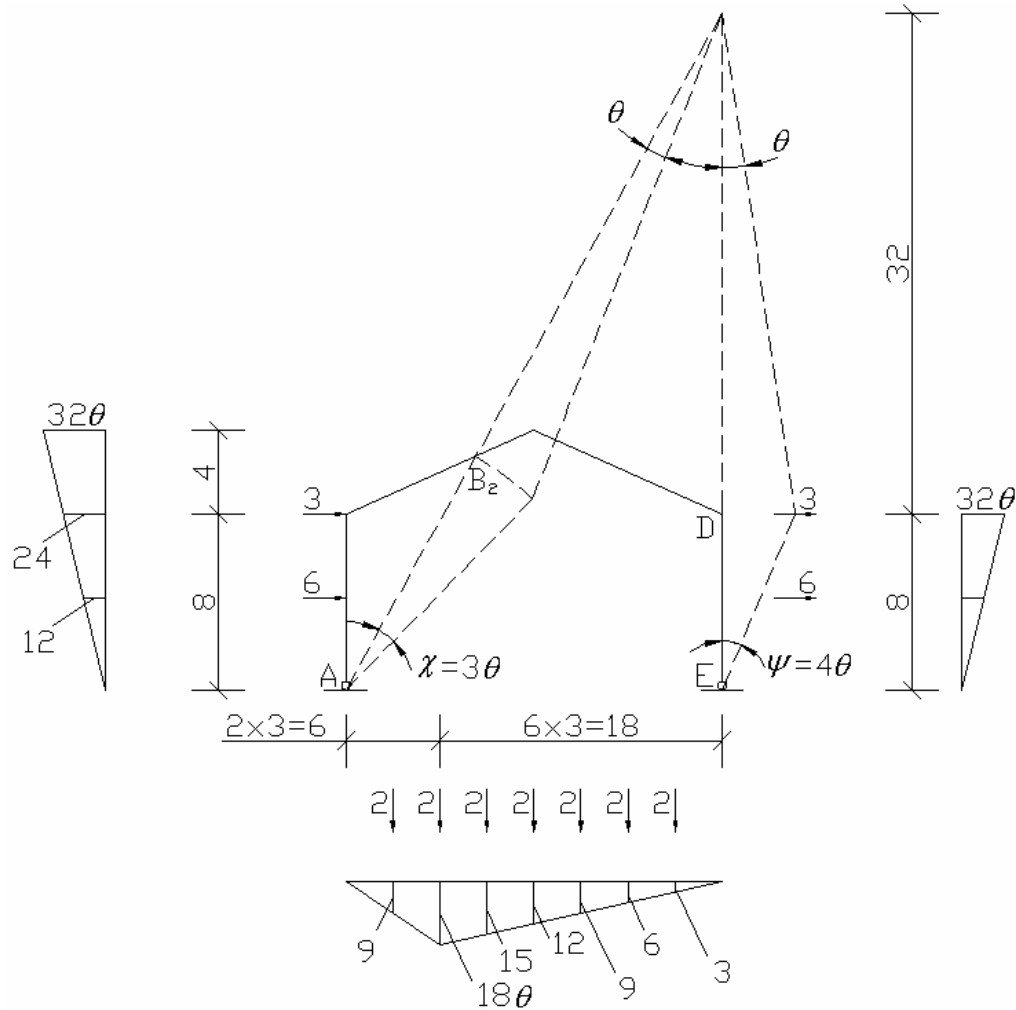
$M = 40$

$12V = 48$

$12H = 8$



Keresztmetszet	A	A ₁	B	B ₁	B ₂	B ₃	C	D ₃	D ₂	D ₁	D	E ₁	E
Törzstartó nyomatéki ábra	96	60	48	27	12	3	0	3	12	27	48	36	0
Reakció dinámok nyomatéki ábrája	-96	-93,3	-90,7	-78	-65,3	-52,7	-40	-28,7	-17,3	-6	5,3	2,7	0
Nyomatéki ábra	0	-33,3	-42,7	-51	-53,3	-49,7	-40	-25,7	-5,3	21	53,3	38,7	0



$$\sum P_i * V_i = \sum M_{pli} * Q_i$$

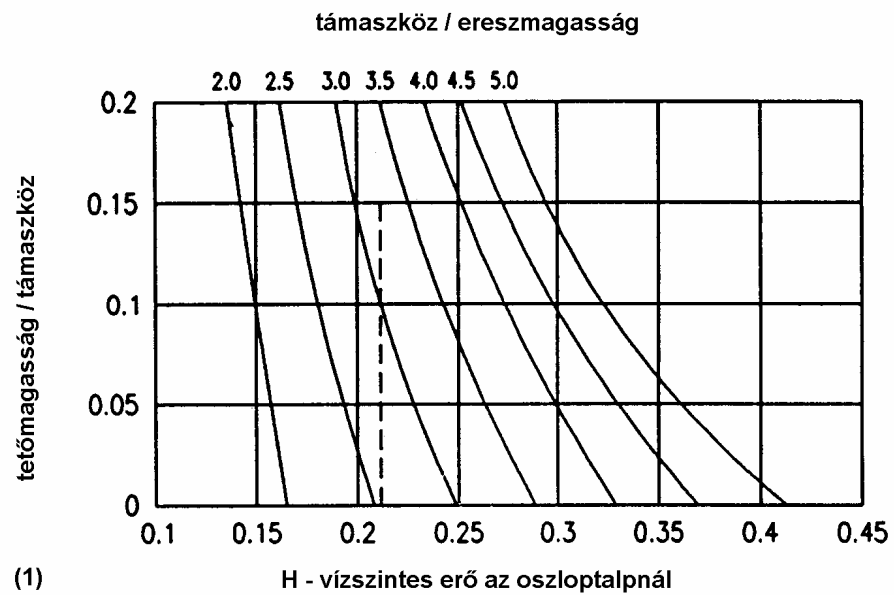
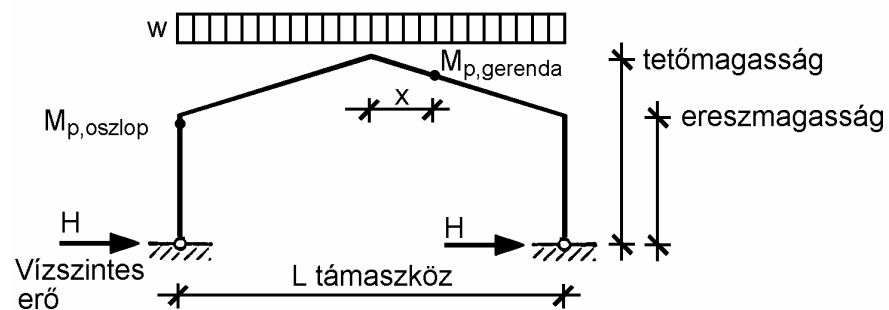
$$2(9+18+15+12+9+6+3)\theta + 32 * \theta * 3 + 16 * \theta * 6 + 24 * \theta * 3 + 12 * \theta * 6 = 480\theta$$

$$= M_{pl}(1+3+1+4)\theta = 9M_{pl} * \theta$$

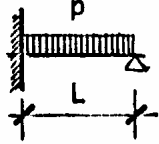
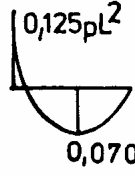

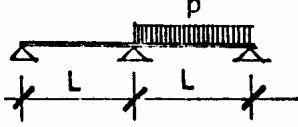
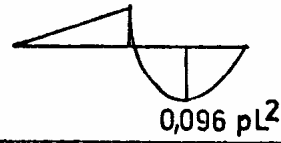

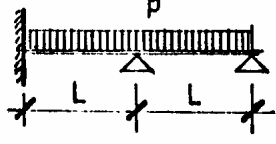
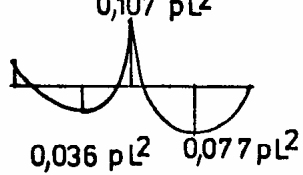
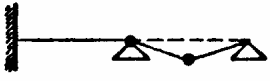
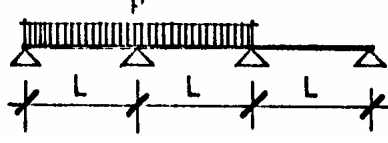
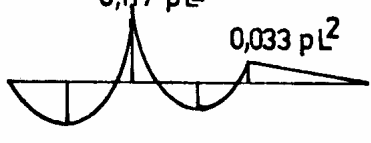

$$M_{pl} = 53.3$$

Képlékeny analízis: Előtervezés

Egyszerűsített eljárás keret szerkezeti rúdjaik tervezésére
 [Owens, Knowles, 1992]



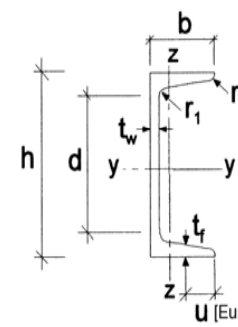
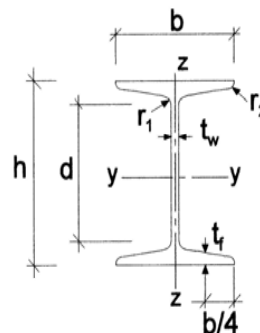
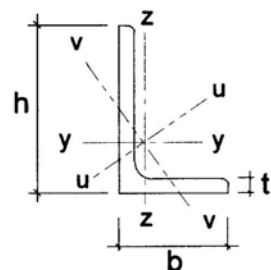
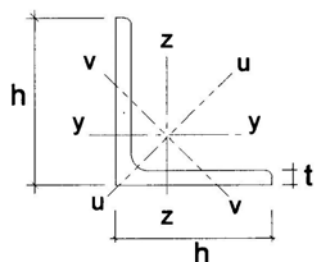
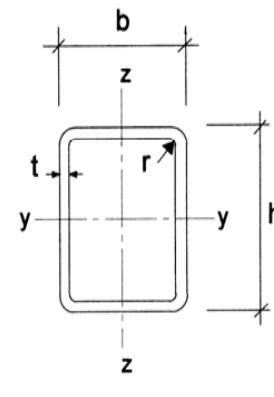
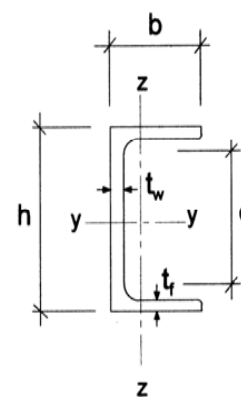
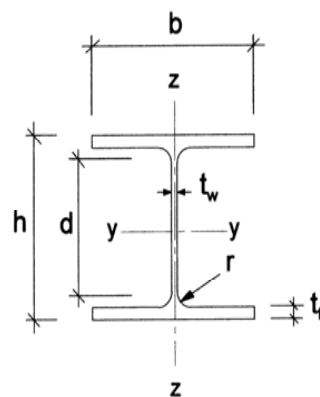
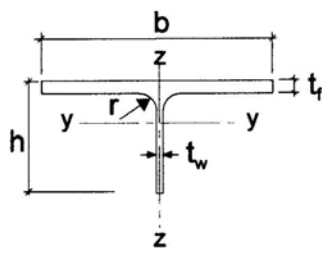
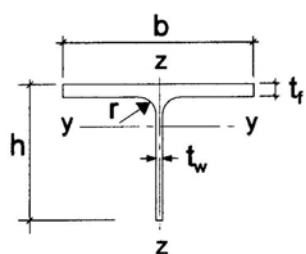
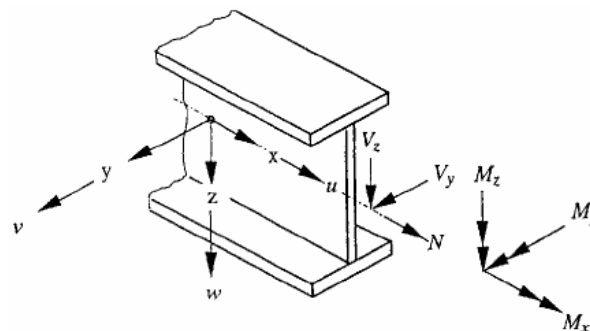
Rugalmas és képlékeny analízis

GERENDA	RUGALMAS NYOMATÉKI ÁBRA	$\frac{P_{el} L}{M_{pl}}$	FOLYÁSI MECHANIZMUS	$\frac{P_{pl} L}{M_{pl}}$	r
		8,00		11,656	1,46
		10,45		11,656	1,12
		9,33		11,656	1,25
		8,55		11,656	1,36

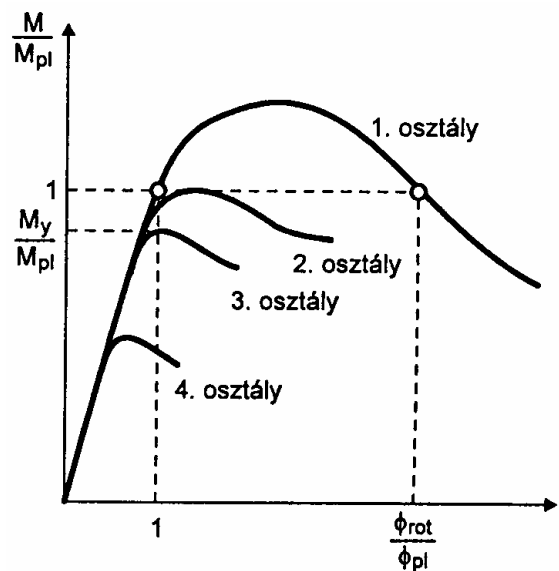
Szerkezeti elemek, keresztmetszetek teherbírásvizsgálata

1. Rúdtengelyekre vonatkozó szabályok [prEN 1993-1-1:2002; 1.7]

Koordináta tengelyek: x, y, z
 Eltolódások: u, v, w
 Igénybevételek:
 Nyíróerők: V_y, V_z
 Normálerő: N
 Hajlítónyomaték: M_y, M_z
 Csavarónyomaték: M_x



Keresztmetszetek osztályozása



Nyomaték-elfordulási görbék [Halász, Iványi, 2001]

Keresztmetszetek osztályozása a nyomatéki teherbírás és az elfordulási képesség alapján

A viselkedés modellje	Nyomatéki ellenállás	Elfordulási képesség	Osztály
	A teljes keresztmetszet képlékeny nyomatéka 	Elegendő 	1
	A teljes keresztmetszet képlékeny nyomatéka 	Korlátozott 	2
	A teljes keresztmetszet rugalmas nyomatéka 	Nincs 	3
	A hatékony keresztmetszet képlékeny nyomatéka 	Nincs 	4

M_{el} a keresztmetszet rugalmas nyomatéki ellenállása

M_{pl} a keresztmetszet képlékeny nyomatéki ellenállása

M a terhelő nyomaték

ϕ a szelvény elfordulása (görbülete)

ϕ_{pl} az az elfordulás (görbület), amely a képlékeny feszültségeloszlás kialakulásához szükséges

Maximális szélesség-vastagság arányok

Maximális szélesség-vastagság arány nyomott lemezekre
[prEN 1993-1-1:2002; 5.2 táblázat 1. része]

A hajlítás tengelyére merőleges belső lemezek (gerinclemezek)

Osztály	Lemezem. hajlított	Lemezem. nyomott	Lemezem. hajlított és nyomott			
Lemezek feszültség-eloszlása (nyomás pozitív)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$ha \alpha > 0,5 : c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $ha \alpha \leq 0,5 : c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$ha \alpha > 0,5 : c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $ha \alpha \leq 0,5 : c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Lemezek feszültség-eloszlása (nyomás pozitív)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$ha \psi > -1 : c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ $ha \psi \leq -1^*) : c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

^{*)} Ez a c/t érték a húzott zóna képlékeny tartalék alkalmazásának esetére vonatkozik, lásd. prEN 1993-1-1:2002; 5.5.4(5), ezért ψ a feszültségarányra vonatkozik.

Maximális szélesség-vastagság arány nyomott lemezekre
[prEN 1993-1-1:2002; 5.2 táblázat 2. része]

Szabad peremű öblemez elemek

Osztály	Lemezem nyomott	Lemezem hajlított és nyomott				
		szabad szél nyomott	szabad szél húzott			
Lemezek feszültség-eloszlása (nyomás pozitív)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Lemezek feszültség-eloszlása (nyomás pozitív)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$, k_σ [prEN 1993-1-5:2003] [ld. 2.2 pont]				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

4.osztályú keresztmetszetek hatékony (effektív) keresztmetszeti jellemzői [prEN 1993-1-5:2003; 4.4]

A ρ csökkentő tényező a következő lehet:

- belső nyomott lemezelemekre:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$$

- szabad peremű lemezelemekre:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0, \text{ ahol } \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

ψ feszültségarány

\bar{b} a vonatkozó szélesség [prEN 1993-1-1:2002, 5.2 táblázat] a következők szerint:

b_w a gerinclemez

b zárt szelvény belső övlemezének mérete (kivéve a derékszögű négyzet keresztmetszeteket)

$b-3t$ derékszögű zárt szelvény öveinek

c szabad peremű övelnek

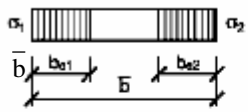
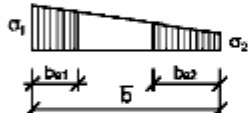
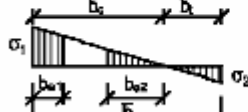
h egyenlő és egyenlőtlen szárú szögacélakra

k_σ a ψ feszültségaránytól függő horpadási tényező [prEN 1993-1-5:2003; 4.1 és 4.2 táblázatok]

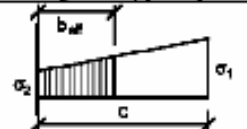
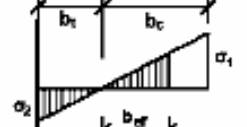
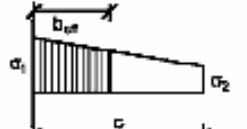
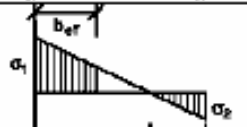
t lemeztasaság

σ_{cr} a lemezhorpadási rugalmas kritikus feszültség $\sigma_{cr,\psi}$ [prEN 1993-1-5:2003; A melléklet A.1(2)]

Belső nyomott lemezelemek [prEN 1993-1-5:2003; 4.1 táblázat]

Feszültségeloszlás (nyomás pozitív)	b_{eff} hatékony szélesség
	$\psi = 1$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1 $-1 > \psi > -2$
Horpadási tényező k_σ	4,0 $8,2 / (1,05 + \psi)$ 7,81 $7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$ 23,9 $5,98(1 - \psi)^2$

Szabad peremű nyomott lemezelemek [prEN 1993-1-1-5:2003; 4.2 táblázat]

Feszültségeloszlás (nyomás pozitív)	b_{eff} hatékony szélesség
	$1 > \psi \geq 0$ $b_{eff} = \rho c$
	$\psi < 0$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 0 -1 $-1 > \psi > -3$
Horpadási tényező k_σ	0,43 0,57 0,85 $0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$
	$1 > \psi \geq 0$ $b_{eff} = \rho c$
	$\psi < 0$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ 1
Horpadási tényező k_σ	0,43 $0,378 / (\psi + 0,34)$ 1,70 $1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$ 23,8

Keresztmetszetek ellenállása [prEN 1993-1-1:2002; 6.2]

3.1 Húzás [prEN 1993-1-1:2002; 6.2.3]

A húzóerő N_{Ed} tervezési értékének minden keresztmetszetben teljesítenie kell a következő feltételt:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

ahol $N_{t,Rd}$ a keresztmetszet húzási ellenállásának tervezési értéke, amely a következő két érték közül a kisebb:

(a) a teljes keresztmetszet képlékeny tervezési értéke

$$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M1}$$

(b) a kapcsolóelemek furatainál a hasznos szelvény tervezési

ellenállása

$$N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}$$

3.2 Nyomás [prEN 1993-1-1:2002; 6.2.4]

A nyomóerő N_{Ed} tervezési értékének minden keresztmetszetben teljesítenie kell a következő feltételt:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

ahol $N_{c,Rd}$ a keresztmetszet nyomási ellenállásának tervezési értéke:

$N_{c,Rd} = A f_y / \gamma_{M1}$ (1., 2. vagy 3. keresztmetszeti osztály esetén)

$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M1}$ (4. keresztmetszeti osztály esetén)

3.3 Hajlító nyomaték [prEN 1993-1-1:2002; 6.2.5]

A hajlító nyomaték M_{Ed} tervezési értékének minden keresztmetszetben teljesítenie kell a következő feltételt:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

ahol $M_{c,Rd}$ a keresztmetszet hajlítási ellenállásának tervezési értéke:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M1} \text{ (1. vagy 2. keresztmetszeti osztály esetén)}$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M1} \text{ (3. keresztmetszeti osztály esetén)}$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M1} \text{ (4. keresztmetszeti osztály esetén)}$$

ahol $W_{el,min}$ és $W_{eff,min}$ a maximális rugalmas feszültséget adó pontra vonatkozó keresztmetszeti tényezők.

Húzott övben levő lyukakat nem kell számításba venni, ha a húzott övre teljesül:

$$\frac{A_{f,net} \cdot 0,9f_y}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

ahol A_f a húzott öv területe.

3.4 Nyírás [prEN 1993-1-1:2002; 6.2.6]

A nyíróerő V_{Ed} tervezési értékének minden keresztmetszetben teljesítenie kell a következő feltételt:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0$$

ahol $V_{c,Rd}$ a keresztmetszet nyírási ellenállásának tervezési értéke:

(I) képlékeny méretezés esetén:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M1}}$$

ahol A_v a nyírt keresztmetszeti terület:

(a) hengerelt I és H szelvények, gerinccel párhuzamos erő esetén:

$$A - 2btf + (tw + 2r)tf, \text{ de nem kisebb, mint } h \cdot hw \cdot tw$$

(b) hengerelt U szelvények, gerinccel párhuzamos erő esetén:

$$A - 2btf + (tw + r)tf$$

(c) hengerelt T szelvények, gerinccel párhuzamos erő esetén:

$$0,9(A - btf)$$

(d) hegesztett I, H és zárt szelvények, gerinccel párhuzamos erő esetén:

$$hS(hw \cdot tw)$$

(e) hegesztett I, H és zárt szelvények, övvel párhuzamos erő esetén:

$$A - S(hw \cdot tw)$$

(f) állandó falvastagságú hengerelt zárt szelvények:

$$\text{magassággal párhuzamos erő esetén} \quad Ah/(b+h)$$

$$\text{szélességgel párhuzamos erő esetén} \quad Ab/(b+h)$$

(g) állandó falvastagságú kör alakú szelvények:

$$2A/p$$

ahol:

A	a keresztmetszet területe
b	a teljes szélesség
h	a teljes magasság
hw	a gerincmagasság
r	a hengerlési sugár
tf	az öv vastagsága
tw	a gerinc vastagsága (min)
h	lásd [prEN 1993-1-5:2003] vagy 1,0.

ahol

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t}$$

ahol

V_{Ed} a nyíróerő tervezési értéke
 S a vizsgált pont feletti terület elsőrendű nyomatéka
 I a teljes keresztmetszet másodrendű nyomatéka
 t a lemezvastagság a vizsgált pontnál.

ugyanakkor alkalmazva prEN 1993-1-5-nek a nyírási horpadásra vonatkozó feltételét

I és H szelvények esetén, ha a nyíróerő párhuzamos a gerinclemez középvonalával, a nyírófeszültség így is számítható:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \quad , \text{ ha } \quad A_f / A_w \geq 0,6$$

ahol

A_f az öv területe, $A_w = h_w t_w$ a gerinc területe

Emellett merevítés nélküli gerinc nyírási horpadási ellenállását is ellenőrizni kell a prEN 1993-1-5 szerint, ha

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta}$$

(II) rugalmas méretezés esetén $V_{c,Rd}$ -t abból a kritériumból határozzuk meg, hogy a kritikus pontban

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1})} \leq 1,0$$

3.5 Csavarás [prEN 1993-1-1:2002; 6.2.7]

Csavarással terhelt rudak esetében, amennyiben a torzítási deformációk hatása elhanyagolható, a T_{Ed} csavaró nyomaték tervezési értékének minden keresztmetszetben teljesítenie kell a következő feltételt:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0$$

A teljes belső csavaró nyomaték a különböző keresztmetszetekben két részből tevődik össze:

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed}$$

ahol

$$\begin{array}{ll} T_{t,Ed} & \text{St.Venant csavarás;} \\ T_{w,Ed} & \text{gátolt csavarás.} \end{array}$$

A T_{Ed} meghatározható rugalmas analízis segítségével a keresztmetszetek keresztmetszeti jellemzői, a megtámasztási viszonyok és a hatások eloszlásának figyelembevételével.

A következő feszültségek számítandók a csavarásból:

- $\tau_{t,Ed}$ nyírófeszültségek a $T_{t,Ed}$ St.Venant csavarásból
 - $\sigma_{w,Ed}$ normálfeszültségek a B_{Ed} kettős nyomatékból és $\tau_{w,Ed}$ nyírófeszültségek a $T_{w,Ed}$ gátolt csavarásból.
- Rugalmas méretezés esetén a folyási feltételt kell ellenőrizni. Képlékeny méretezés esetén a keresztmetszet képlékeny nyomatéki ellenállását csak a B_{Ed} –ből kell vizsgálni. B_{Ed} rugalmas analízissel határozható meg.

Zárt szelvények esetén a gátolt csavarási rész hatása elhanyagolható, nyitott keresztmetszetek esetén, pl. T vagy H, feltételezhető, hogy a St.Venant csavarási rész hatása elhanyagolható.

Nyíróerőkkel és csavaró nyomatékkal terhelt 1. és 2. keresztmetszeti osztály esetén a képlékeny nyírási feszültséget korlátozni kell a $V_{pl,TEd,Rd}$ nyírási és csavarási keresztmetszeti ellenállás figyelembevételével: lásd Táblázatok 16. oldal

Hajlítás, nyírás, normálerő és keresztirányú erők interakciója [prEN 1993-1-1:2002; 6.2.8; 6.2.9; 6.2.10]

Az 1. és 2. keresztmetszeti osztály esetén a képlekény ellenállás interakciós formulája a következő táblázatból vehető. A táblázatban szereplő $M_{N,V,Rd}$ értékek is a következő táblázatból vehetők.

Képlekény interakciós formula, ha nincs szűkség stabilitásvizsgálatra

$\left(\frac{M_{y,Rd}}{M_{N,V,y,Rd}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{z,Rd}}{M_{N,V,z,Rd}}\right)^{\beta} \leq 1$		
	α	β
I vagy II keresztmetszet	2	1
Zárt kör keresztmetszet	2	2
Zárt négyzet keresztmetszet	1,66	1,66
Tömör négyzet keresztmetszet és lemezek	1,73	1,73
A részletes vizsgálatot ld. az prEN 1993-1-1:2002; 6.2.9-ben.		

A 3. keresztmetszeti osztály esetén a rugalmas ellenállás interakciós formulája a következő táblázatból vehető.

Kéttengelyű (ferde) hajlítás interakciós formulái

Hengerelt vagy hegesztett szelvények	$V_{Ed} \leq 0,5 V_{Rd}$	$V_{Ed} > 0,5 V_{Rd}$
	$\frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Rd}}{M_{z,Rd}} \leq 1 - n$	$\frac{M_{y,Rd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Rd}}{M_{z,Rd}} \leq 1 - n - \rho$
Az n és ρ értékeket ld. a következő táblázatban.		

Emellett a szerkezeti elem kihajlása vagy elcsavrodó kihajlása ellenállását is igazolni kell.

Az $M_{N,V,Rd}$ redukált képlekény nyomtató ellenállás nyíró és tengelyirányú erők esetén

Hengerelt vagy hegesztett I szelvény	A normálerő nagysága ¹⁾	$V_{Ed} \leq 0,5 V_{Rd}$	$V_{Ed} > 0,5 V_{Rd}$
	kis	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1,0$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1 - \rho$
	nagy	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1,11(1 - n)$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1,11(1 - n - \rho)$
	kis	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = 1,0$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = 1 - \rho$
	nagy	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = -1,56(1 - n)(n + 0,6)$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = 1,56(1 - n - \rho)(0,6 + \frac{n}{1 - \rho})$

Zárt szelvények	A normálerő nagysága ¹⁾	$V_{Ed} \leq 0,5 V_{Rd}$	$V_{Ed} > 0,5 V_{Rd}$
	$N_{Ed} \leq 0,25 N_{Rd}$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1,0$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1 - \rho$
	$N_{Ed} > 0,25 N_{Rd}$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1,04(1 - n^{1,7})$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1,04(1 - \rho - \frac{n^{1,7}}{(1 - \rho)^{0,7}})$
	kis	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1,0$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1 - \rho$
	nagy	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1,26(1 - n)$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{Rd}} = 1,26(1 - n - \rho)$
	kis	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1,0$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1 - \rho$
	nagy	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1,33(1 - n)$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{y,Rd}} = 1,33(1 - n - \rho)$
	kis	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = 1,0$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = 1 - \rho$
	nagy	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = \frac{1 - n}{0,5 + \frac{h}{A}}$	$\frac{M_{N,V,Rd}}{M_{z,Rd}} = \frac{1 - n - \rho}{0,5 + \frac{h}{A}}$
¹⁾ kis normálerő szint esetén		nagy normálerő szint esetén	
$\begin{cases} N_{Ed} \leq 0,25 N_{Rd} \\ N_{Ed} \leq \frac{d t f_y}{2 \gamma_{M1}} \end{cases}$		$\begin{cases} N_{Ed} > 0,25 N_{Rd} \\ N_{Ed} > \frac{d t f_y}{2 \gamma_{M1}} \end{cases}$	
$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} - \frac{N_{Ed}}{A f_y \gamma_{M1}}$		$\rho = \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1\right)^2$	

Csavadás esetén $\rho = \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{Ed,TEd,Rd}} - 1\right)^2$ számítandó.

Szerkezeti rudak stabilitási ellenállása

Állandó keresztmetszetű nyomott rudak [prEN 1993-1-1:2002]

Nyomott rudak kihajlási ellenállását ellenőrizni kell: $\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$

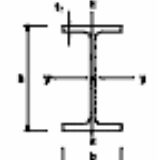
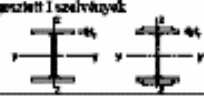

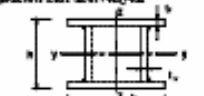


A nyomott rúd tervezési kihajlási ellenállása:

1., 2. és 3. keresztmetszeti osztály esetén $N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

4. keresztmetszeti osztály esetén $N_{b,Rd} = \chi A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

ahol χ a kihajlási módnak megfelelő csökkenítő tényező.

Kihajlási görbe kivételével a többi keresztmetszetben:

Keresztmetszet	Korlátozások	Kihajlási tengely	Kihajlási görbe	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
 Hegesztett I-szelvények	$h/b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	a	a ₀
		z-z	b	b ₀
	$h/b \leq 1,2$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	b	b
		z-z	c	c
 Hegesztett I-szelvények	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	b	b
	$t_f > 40 \text{ mm}$	z-z	c	c
 Zárt szelvények	széles csigaszek	bármelyik	a	a ₀
	vékony alakos	bármelyik	c	c
 Hegesztett zárt szelvények	átlósban (kivéve a körvesztőt)	bármelyik	b	b
	más irányban: $a > 0,5 t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_f < 30$	bármelyik	c	c
 U-, T- és vékonyfalú szelvények		bármelyik	c	c
 L-szelvény		bármelyik	b	b

Készült az ERFP-DD2002-HU-B-01 szerződés számú projekt támogatásával

Kihajlási görbék

Nyomóerő esetén a χ kihajlási csökkenítő tényező meghatározható a $\bar{\lambda}$ dimenzió nélküli karcsúság figyelembevételével:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ de } \chi \leq 1,0$$

ahol: $\Phi = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$

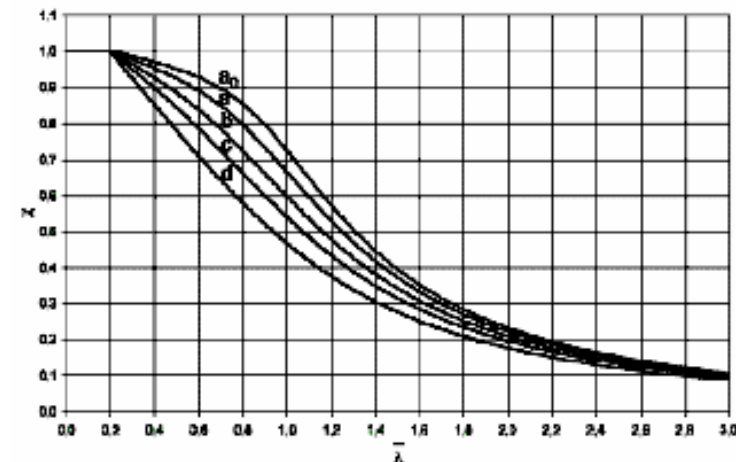
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{1., 2. és 3. keresztmetszeti osztályra}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad \text{4. keresztmetszeti osztályra}$$

α imperfekciós tényező
 N_{cr} a kihajlási módhoz tartozó nyugalmas kritikus erő
 $L_{cr} = \beta L$ kihajlási hossza vizsgált kihajlási ívbán
 β kihajlási hossz tényező
 i a megfelelő tengelyre vonatkozó inerciasugár, a teljes keresztmetszet

adatokból számolva $\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\epsilon$ $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ f_y N/mm²-ben

Kihajlási görbék:



Tiszta elcsavarodás és elcsavarodó kihajlás [prEN 1993-1-1:2002; Annex C]

A dimenzió nélküli karcsúság $\bar{\lambda}_T$

$$1., 2. \text{ és } 3. \text{ keresztmetszeti osztály esetén } \bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A f_T}{N_{cr}}} \quad 4. \text{ keresztmetszeti osztály esetén } \bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_T}{N_{cr}}}$$

ahol

$N_{cr} = N_{cr,TF}$, de $N_{cr} < N_{cr,I}$	
$N_{cr,TF}$	a rugalmas elcsavarodó kihajlásierő
$N_{cr,I}$	a rugalmas tiszta elcsavarodási kihajlásierő

A tiszta elcsavarodás és az elcsavarodó kihajlás eseteire a z-tengelyre vonatkozó megfelelő kihajlási görbék vehetők.

Nyomott rudak rugalmas elcsavarodó kihajlása

$N_{cr,TF}$ rugalmas elcsavarodó kihajlás hoz tartozó kritikus erő:

$$(N_{cr,y} - N)(N_{cr,z} - N)(N_{cr,T} - N)i_0^2 - z_0^2 N^2 (N_{cr,y} - N) - y_0^2 N^2 (N_{cr,z} - N) = 0$$

$N_{cr,y}$ azy-tengely körüli kihajlás hoz tartozó rugalmas kritikus erő

$N_{cr,z}$ a z-tengely körüli kihajlás hoz tartozó rugalmas kritikus erő

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left[GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{\ell_T^2} \right]$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2$$

G nyírási rugalmassági modulus

I_t a teljes szabadd keresztmetszet csavarási inercianyomatéka

I_w a teljes keresztmetszet gátlott csavarási inercianyomatéka

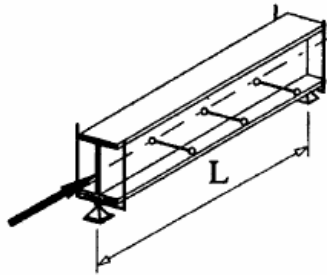
i_y azy-tengelyhez tartozó inerciasugár

i_z a z-tengelyhez tartozó inerciasugár

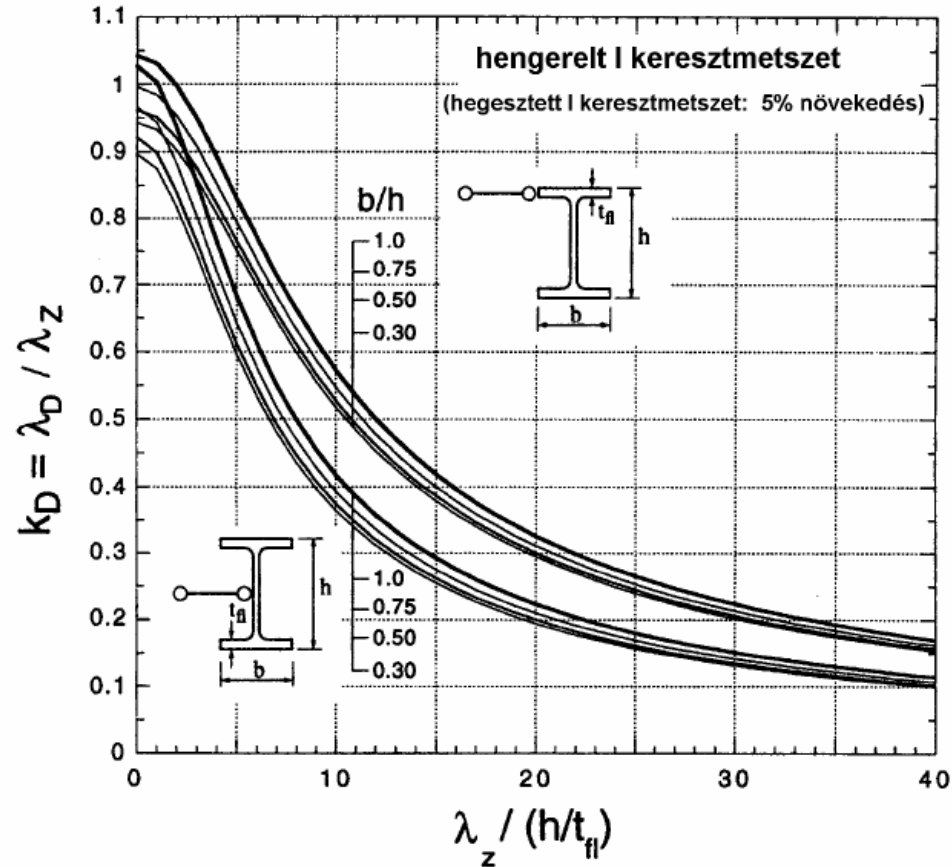
y_0, z_0 a nyírási középpont koordinátái a teljes keresztmetszet súlypontjához képest

ℓ_T rugalmas elcsavarodó kihajlási hossz

① Kétszeresen szimmetrikus keresztmetszet ($y_0 = z_0 = 0$) $N_{cr,TF} = N_{cr,I}$ feltéve, hogy $N_{cr,I} < N_{cr,y}$ és $N_{cr,z}$



$$\lambda_z = L/i_z$$



$$\lambda_D = \lambda_s \cdot \sqrt{\frac{i_p^2 + d^2}{c^2 + d^2}} \quad i_p = \sqrt{(I_y + I_z)/A}$$

$$c = \sqrt{\frac{I_\infty + GI_T}{I_s + N_{\alpha,s}}}$$

d = a megtámasztás távolsága a súlyponttól

(ii) Egyszeresen szimmetrikus keresztmetszet (pl. $\alpha = 0$)

$$N_{\alpha,T} = \frac{N_{\alpha,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{\alpha,T}}{N_{\alpha,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{\alpha,T}}{N_{\alpha,y}}\right)^2 + 4 \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \frac{N_{\alpha,T}}{N_{\alpha,y}}} \right]$$

ahol $\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2$

Különböző megtámasztású, keresztmetszetű, terhelésű rudak kihajlási hosszai

Állandó keresztmetszetű, különböző megtámasztású rudak

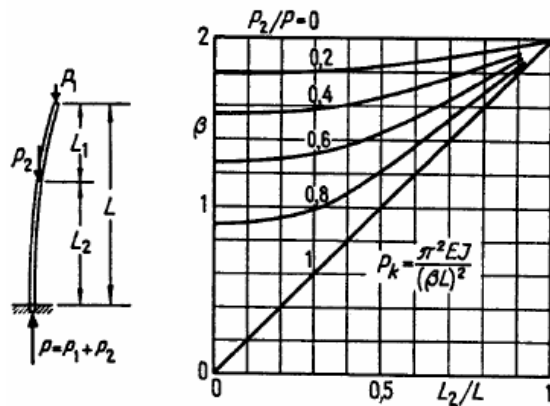
[Owens, Knowles, 1992]

oszlop	keret	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	a/L
		1,0	1,11	1,24	1,40	1,58	1,74	1,93	2,16	2,31	2,50	2,70	L_c / L
		2,0	2,07	2,13	2,20	2,27	2,34	2,41	2,48	2,55	2,62	2,70	L_c / L
		0,70	0,72	0,74	0,77	0,79	0,81	0,84	0,87	0,91	0,95	1,0	L_c / L
		0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,0	L_c / L
		0,50	0,53	0,57	0,61	0,65	0,70	0,75	0,81	0,87	0,93	1,0	L_c / L

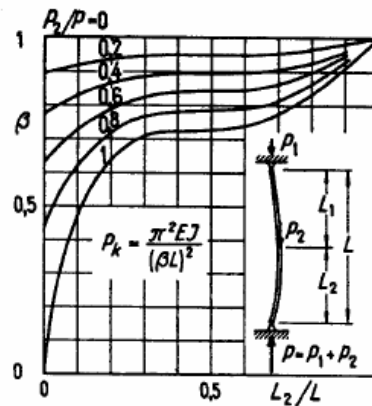
Állandó keresztmetszetű, változó normálerővel terhelt rúd

[Pettersson, 1971]

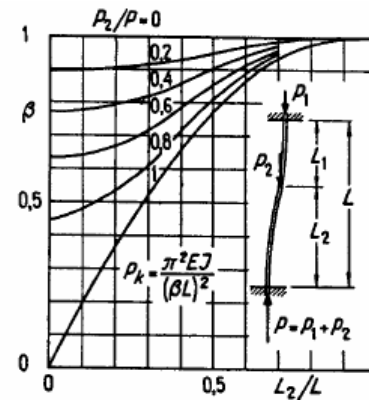
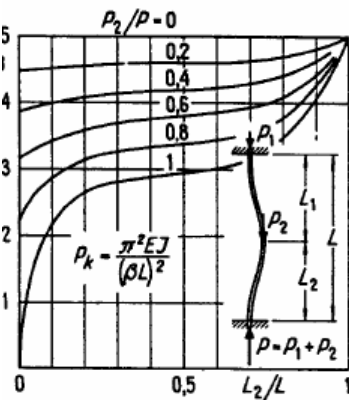
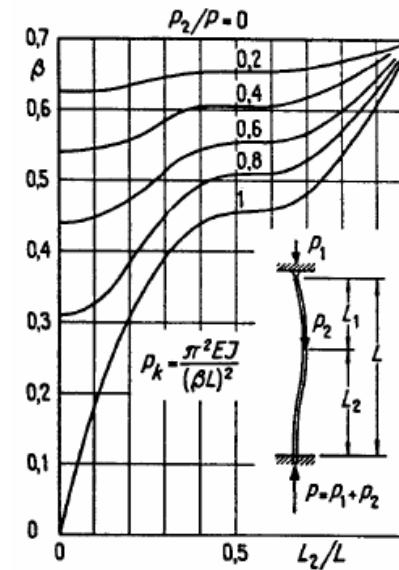
Szakaszonként változó normálerő



[Langendonck, 1954]



[Timoshenko, Gere, 1961]



[Langendonck, 1954]

Állandó keresztmetszetű hajlított rudak [prEN 1993-1-1:2002]

Oldalirányban nem megtámasztott, az erős tengely körül hajlított gerendák kifordulási ellenállását ellenőrizni kell:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

A hajlított rúd tervezési kifordulási ellenállása:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

ahol:

1. és 2. keresztmetszeti osztály esetén

$$W_y = W_{pl,y}$$

3. keresztmetszeti osztály esetén

$$W_y = W_{el,y}$$

4. keresztmetszeti osztály esetén

$$W_y = W_{eff,y}$$

(W_y meghatározásáról a gerendavégeken levő csavarlyukakat nem kell számításba venni.)

χ_{LT} a kifordulási csökkentő tényező.

Kifordulási görbék

Állandó keresztmetszetű hajlított rudak χ_{LT} kifordulási csökkentő tényezője:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad , \text{de } \chi_{LT} \leq 1,0$$

ahol: $\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

α_{LT} imperfekciós tényező

M_{cr} a rugalmas kifordulási kritikus nyomaték

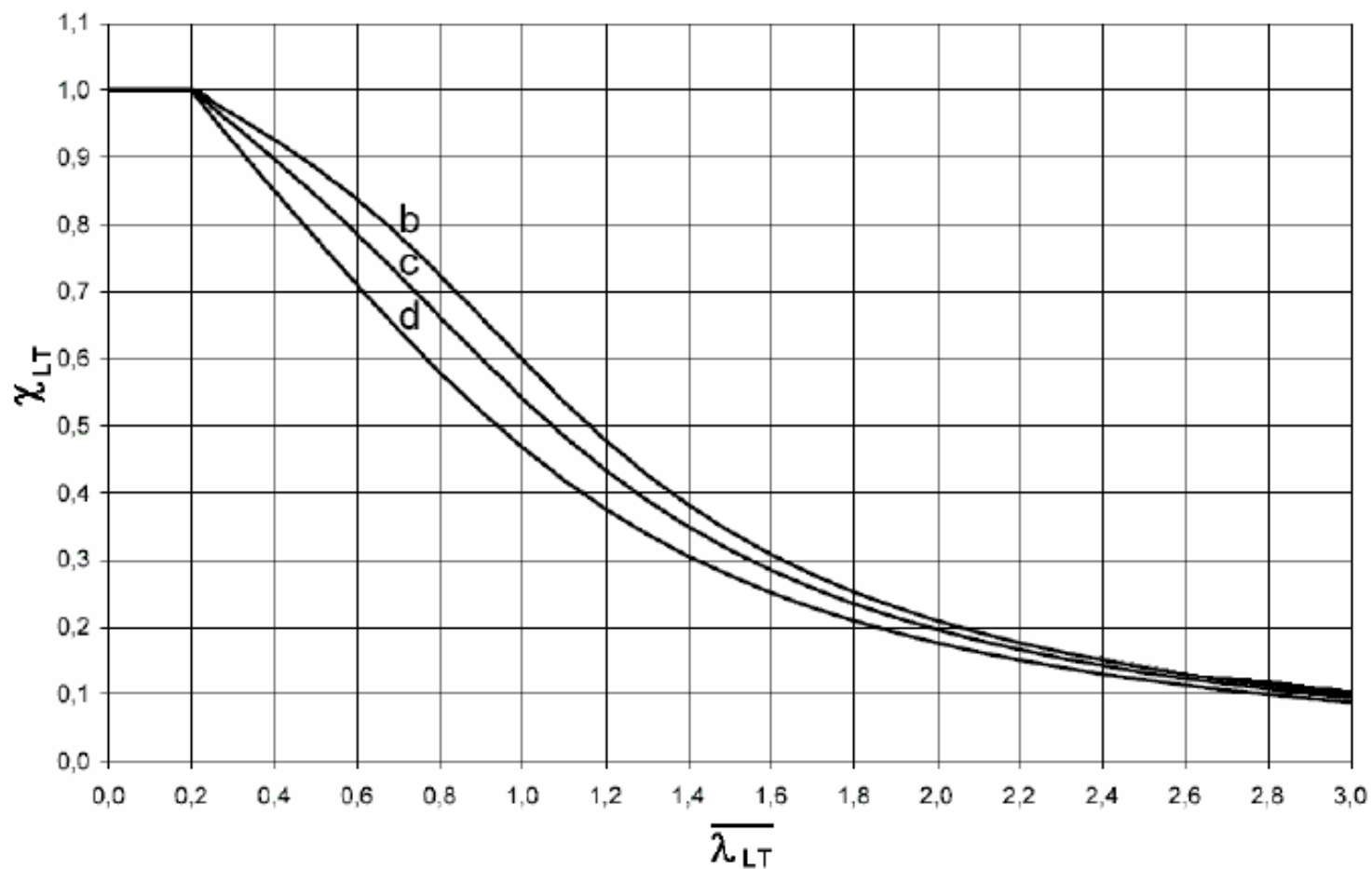
Adott kifordulási görbéhez tartozó imperfekciós tényezők:

Kihajlási görbe	b	c	d
Imperfekciós tényező α_{LT}	0,34	0,49	0,76

Kifordulási görbe kiválasztása adott keresztmetszethez:

Keresztmetszet	Korlátozások	Kihajlási görbe
Hengerelt I	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Hegesztett I	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Más keresztmetszet	-	d

Kifordulási görbék:











$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$, vagy $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,04$ esetén a kifordulási hatás elhanyagolható.

A rúd oldalirányú megtámasztásai közötti szakaszra a nyomaték megoszlás figyelembevételével χ_{LT} módosítható:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}, \text{ de } \chi_{LT,mod} \leq 1$$

ahol: $f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2]$,de $f \leq 1,0$

k_c korrekciós tényező értéke a következő táblázat szerint:

Nyomaték eloszlása	1., 2. és 3. osztályú keresztmetszet	4. osztályú keresztmetszet
	k_c	k_c
 $\psi = 1$	1,0	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94	1,0
	0,90	1,0
	0,91	1,0
	0,86	1,0
	0,77	1,0
	0,82	1,0

Hengerelt vagy azzal egyenértékű hegesztett szelvények esetében, ha $h \leq 400$ mm, χ_{LT} értéke:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^{-2}}} \quad , \text{de} \quad \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$
$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^{-2} \right]$$

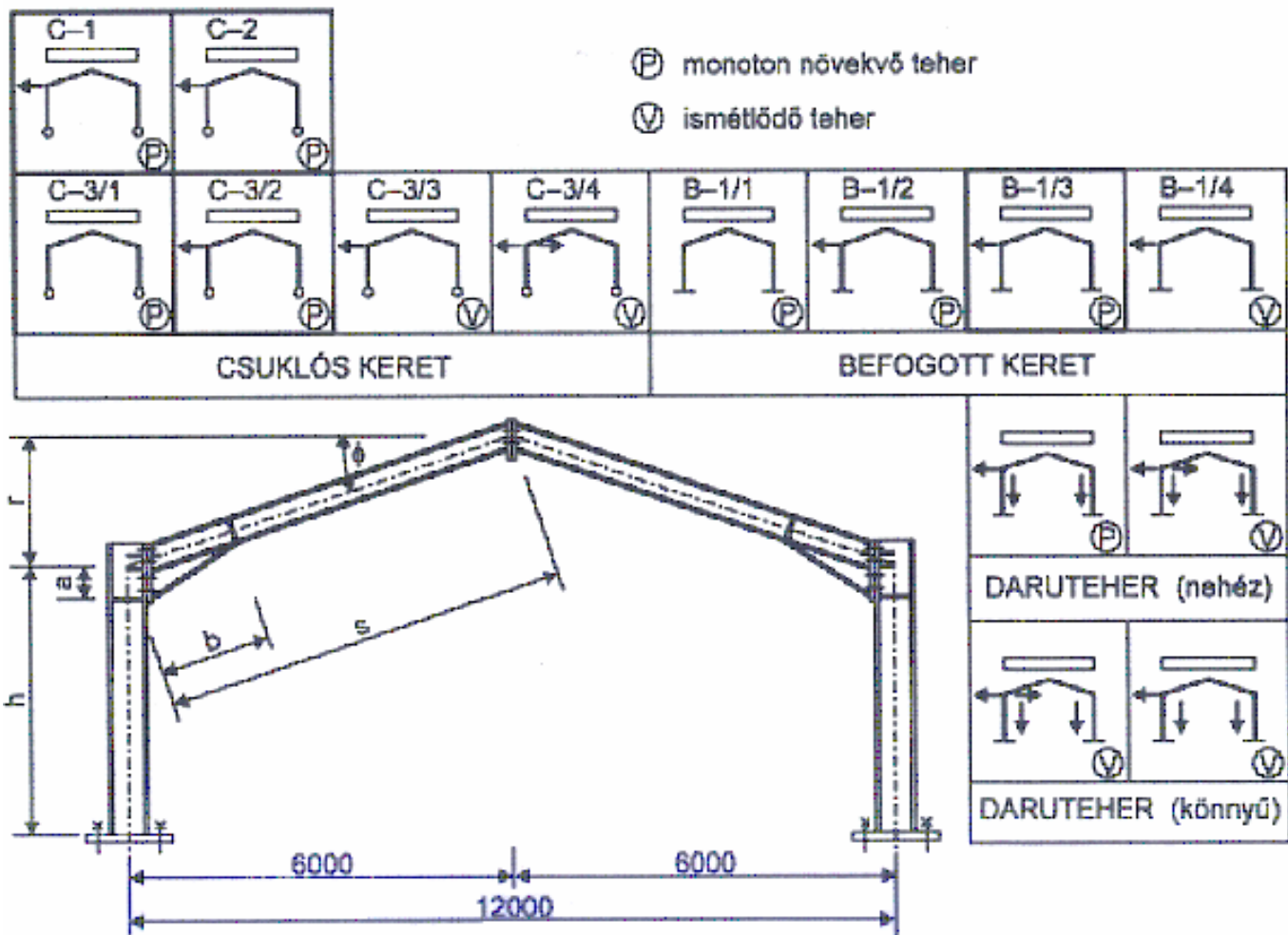
Az $\bar{\lambda}_{LT,0}$ és β paraméterek ajánlott értékei:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ (max. érték)}$$

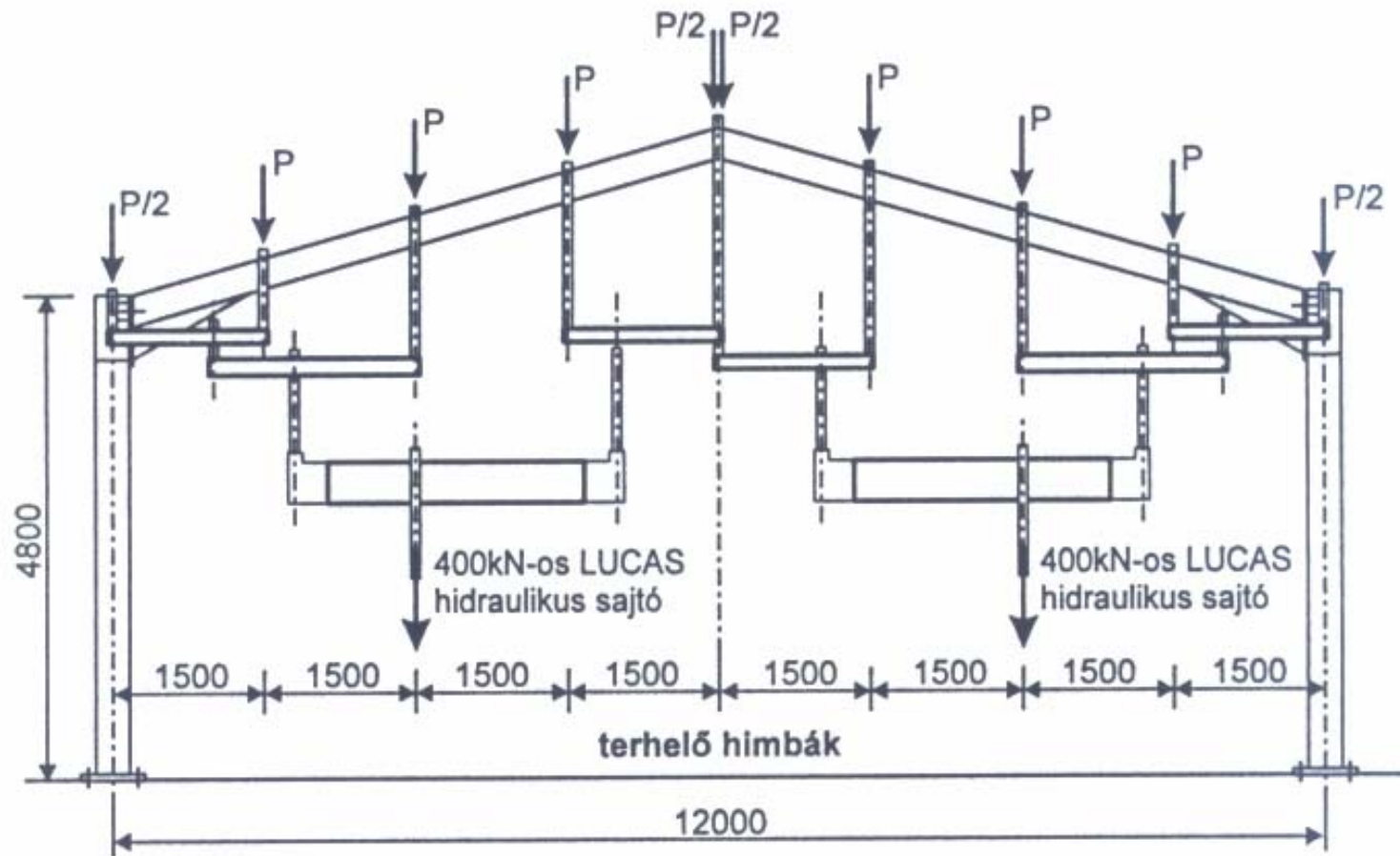
$$\beta = 0,75 \text{ (min. érték)}$$

$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$, vagy $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,15$ esetén a kifordulási hatás elhanyagolható.

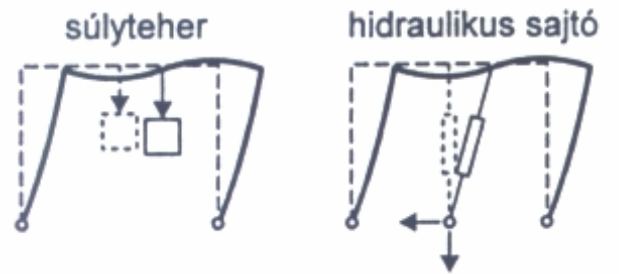
Kísérleti vizsgálatok eredményei



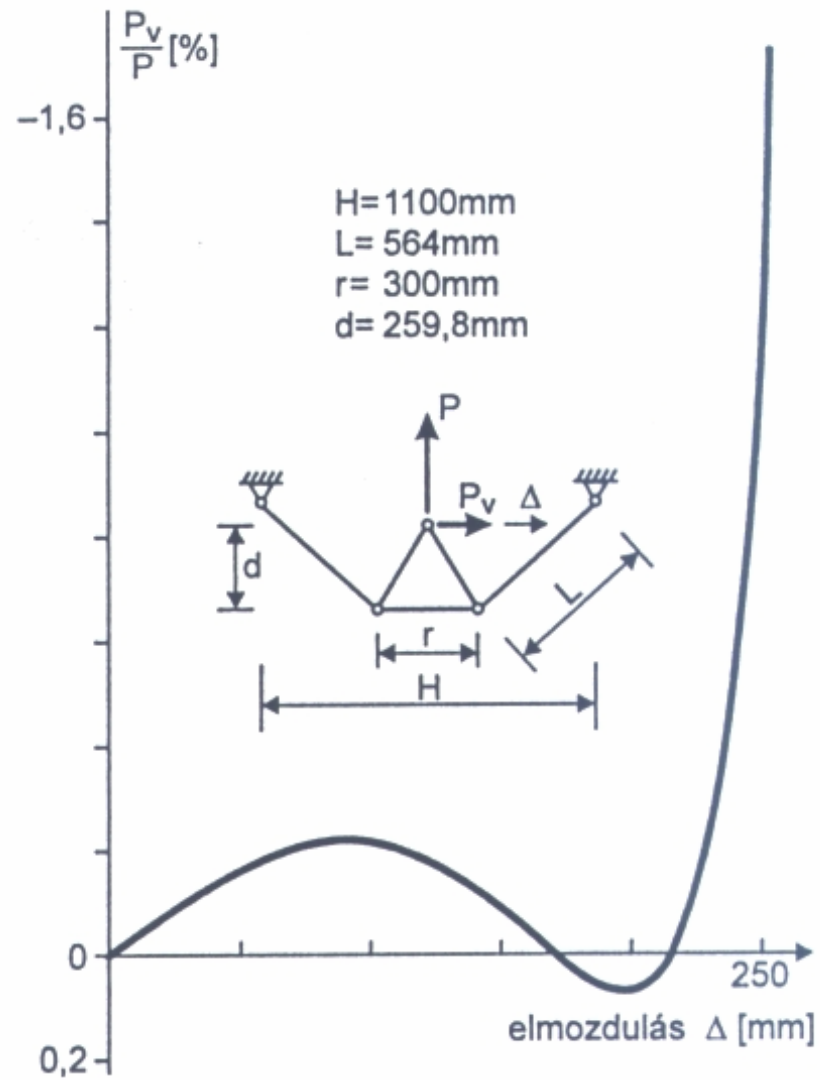
Kísérleti program statikailag határozatlan keretszerkezetek vizsgálatához



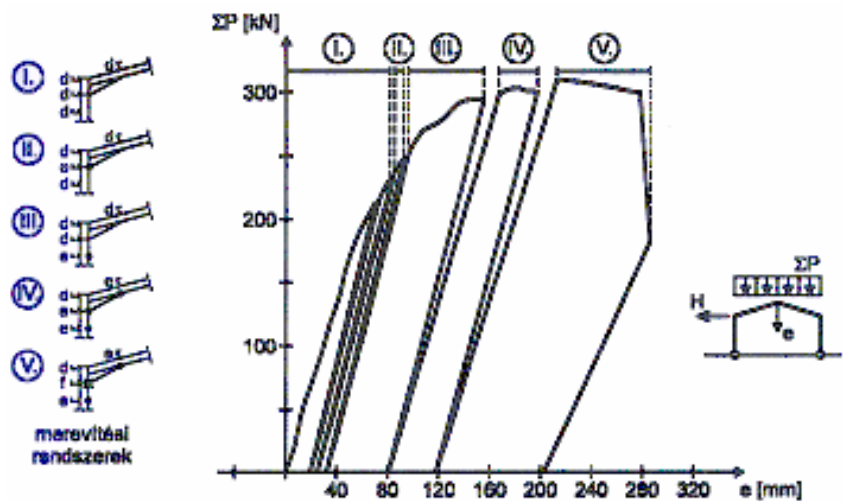
A keret függőleges terhelése



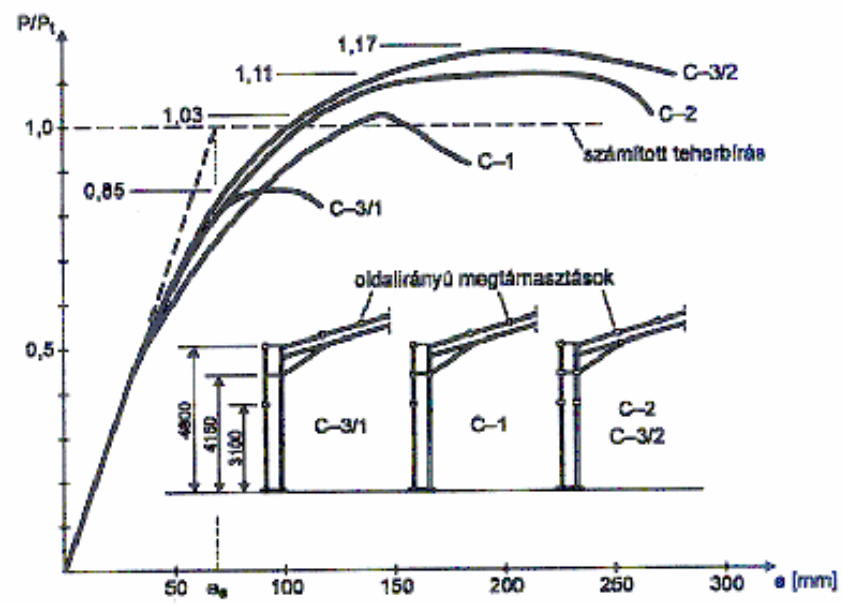
----- kiindulási helyzet
 ——— kimozdult helyzet



A gravitációsteher-szimulátor méretei és viselkedése



A C-3/2 keret teher-elmozdulás diagramja



Az oldalirányú megtámasztás hatása