

Debreceni Egyetem

Műszaki Kar

Építőmérnöki Tanszék



Acél oszloptalpak teherbírásának vizsgálata

Készítette: **Lehóczki Bettina**, Építőmérnök BSc hallgató

Témavezető: **Viczián Csaba**, Tanársegéd

Tanszékvezető: **Dr. Kovács Imre**, Főiskolai tanár

Debrecen

2013.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni Viczián Csaba témavezetőmnek a Tudományos Diákok Körének dolgozatom elkészítésében nyújtott magas szakmai színvonalú segítségéért és türelmes támogatásáért.

Köszönöm a DE MK Építőmérnöki Tanszékének, hogy véleményükkel és tanácsokkal láttak el a dolgozat megírásával kapcsolatban és, hogy munkámat mindenben segítették.

Szeretném kifejezni továbbá megbecsülésemet és köszönetemet a családtagjaimnak, akik szeretetükkel és segítségükkel mindvégig támaszt nyújtottak eddigi tanulmányaim során.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
1.1. Problémafelvetés - Célkitűzés	5
2. Irodalmi áttekintés	7
2.1. Négycsavaros oszloptalp teherbírásának meghatározása az egyensúlyi egyenletekkel előállítható teherbírási vonal segítségével	7
2.2. Négycsavaros oszloptalp teherbírásának meghatározása az Eurocode 3 szerint..	11
2.2.1. Helyettesítő húzott T-elem ellenállása ($F_{T,Rd}$)	11
2.2.2. A nyomott T-elem ellenállása (N_{Rd})	13
3. A szabványban szereplő összefüggések értelmezése	16
4. Példa oszloptalp teherbírásának meghatározására az egyensúlyi egyenletek, valamint az EC-3 szabvány segítségével.....	19
4.1. Talpcsomópont teherbírásának meghatározása HEA szelvényű oszlop esetén	19
4.1.1. Teherbírás meghatározása az egyensúlyi egyenletek felhasználásával.....	19
4.1.1.1.A számpélda ismertetése	19
4.1.1.2. A számítás lépéseinek ismertetése.....	20
4.1.1.2.1 A húzott T-elem effektív hossza	20
4.1.1.2.2. A nyomott T-elem ellenállása	20
4.1.1.2.3. Annak vizsgálata, hogy az emelőerő kialakulhat-e	22
4.1.1.2.4. A húzott T-elem ellenállása	23
4.1.1.3. A közelítő teherbírási vonal meghatározása 5 jellemző ponttal	24
4.1.1.4. Az eredmények összefoglalása.....	27
4.1.2. Teherbírás meghatározása az EC- 3 összefüggéseinek felhasználásával	28
4.1.2.1. A teherbírási vonal 5 jellemző pontjának a vizsgálata az EC- 3 alapján.	28
4.1.2.2. A teherbírási vonal jellemző pontjainak ellenőrzése az EC-3 szabványban szereplő összefüggésekkel	33

4.2. Talpcsomópont teherbírásának meghatározása IPE szelvényű oszlop esetén	36
4.3. Talpcsomópont teherbírása különböző méretű HEA és IPE szelvényű oszlopok esetén	38
5. Eredmények kiértékelése	43
6. Alkalmazott jelölések	47
7. Felhasznált irodalom.....	50

1. Bevezetés

„I” és „H” szelvényű acél rúdelemek korszerű kapcsolatai homloklemez kialakítással készülnek. Ezeknek a homloklemez kapcsolatoknak egy speciális fajtáját az oszloptalpak alkotják, mivel itt két eltérő mechanikai jellemzőkkel bíró anyag – acél és beton – megfelelő kapcsolatát szükséges biztosítani. A talpcsomópontok teherbírásának meghatározásával, kapcsolatos kérdéskörrel az Acélszerkezetek II. című tárgy keretein belül találkoztam először. Jelenleg a TDK dolgozatom tárgyát képezi, jövőbeni terveimben pedig az szerepel, hogy szakdolgozatomat is ezzel a témával összefüggésben készítem el.

1.1. Problémafelvetés - Célkitűzés

Az Eurocode szabvány acélszerkezetek tervezésére vonatkozó előírásaiban - beleértve a homloklemez kapcsolatok tervezését is - sok nem teljesen egyértelmű összefüggéssel találkozhatunk, főleg azok alkalmazására vonatkozóan. A szabványokban található összefüggések nagy része laboratóriumi kísérletek segítségével megalkotott paraméterek alapján lett létrehozva, ezért sok esetben meglehetősen nehéz azok fizikai tartalmának nyomon követése.

František Wald kutatómérnök a Prágai Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karának professzora hosszú éveken keresztül végzett kutatásokat négycsavaros talpcsomópontok teherbírásának meghatározására vonatkozóan. Kutatási eredményei - melyeket széles körben publikált - alapját képezték a későbbi Eurocode 3 szabványban szereplő eljárásnak (komponens módszer). Ilyen formában a szabványban található eljárás egy egyszerűsített formája a kutatásokban alkalmazott módszernek. Az Eurocode 3 szabvány (MSZ-EN 1993-1-8: Acélszerkezetek tervezése: Csomópontok tervezése) első pillantásra meglehetősen bonyolult összefüggéseket tartalmaz a talpcsomópontok nyomatéki ellenállásának ($M_{j,Rd}$) meghatározására, ugyanakkor a szabvány nélkülözi a nyomatéki ellenállással egyidejű nyomási ellenállás ($N_{j,Rd}$) meghatározására vonatkozó összefüggést. További nehézséget jelent az előírásokban definiált külpontosság (e), mivel értelmezésében szerepel az

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$$
 egyenlőség. Felvetődik az a kérdés, hogy ez az egyenlőség fennáll-e minden lehetséges esetben.

TDK dolgozatomban tehát arra a kérdésre keresem a választ, hogy vannak-e, és ha igen, akkor milyen mértékű eltérések lehetségesek egy négycsavaros oszloptalpak teherbírásában attól függően, hogy a szabványban található előírásokkal számolunk,

vagy pedig a csomópont egyensúlyi (vetületi és nyomatéki) egyenleteiből vezetjük le a teherbírás értékét képlékeny elven számolva, mellyel egyben előállíthatjuk a csomópont teherbírási vonalát is.

Természetesen egy merevsége szempontjából fél-merev kategóriába tartozó talpcsomópont viselkedését - így közvetetten a teherbírását is - nagymértékben befolyásolja maga a csomópont elfordulási merevsége, ebben a dolgozatban azonban csak a csomópontok teherbírásával foglalkozom. A jövőbeli terveim között szerepel, hogy a négycsavaros oszloptalpak mellett a kétszavaros oszloptalpak merevségi viszonyait is megvizsgáljam - melyre a szabványban konkrét előírás nem található - valamint számszerűen kimutassam, hogy ezek a merevségi viszonyok milyen mértékben befolyásolják a szerkezet igénybevételeit. A kutatási eredmények a gyakorló mérnökök számára is fontos és alkalmazható információkkal szolgálhatnak.

2. Irodalmi áttekintés

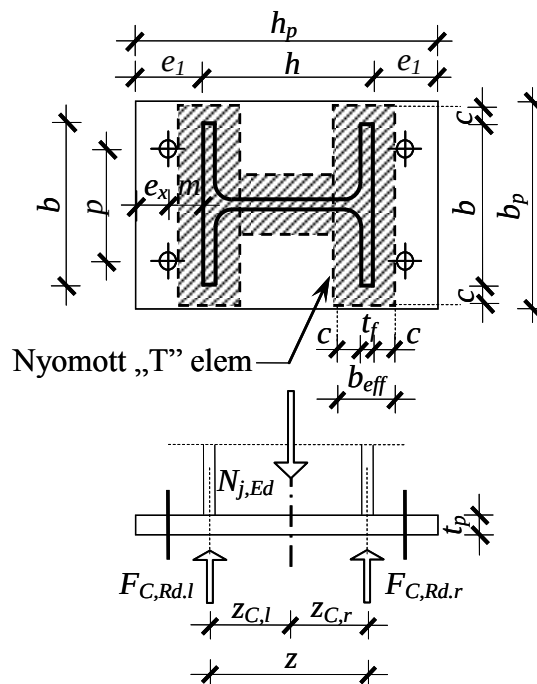
2.1. Négycsavaros oszloptalp teherbírásának meghatározása az egyensúlyi egyenletekkel előállítható teherbírási vonal segítségével

Az oszloptalpak általános esetben egyidejű hajlításnak és nyomásnak kitett csomópontok. A csomópontok vetületi és nyomatéki egyensúlyának képlékeny elven történő vizsgálatával előállítható a csomópont ellenállására vonatkozó teherbírási vonal, annak jellegzetes pontjainak értelmezésével. Az oszloptalp hajlításra és azzal egyidejű nyomásra vonatkozó ellenállása a csomópontra felírható vetületi és nyomatéki egyensúlyi egyenletek felhasználásával fejezhetők ki, képlékeny teherbírás feltételezése mellett. A teherbírási vonal jellegzetes pontjai és a hozzájuk tartozó összefüggések az alábbiak:

- **1. pont:** központos nyomás esete (1. ábra)

Vetületi egyenlet: $N_{Rd,1} = A_{eff} \cdot f_{jd}$

Nyomatéki egyenlet: $M_{Rd,1} = F_{C,l,Rd} \cdot z_{C,l} - F_{C,r,Rd} \cdot z_{C,r}$



1. ábra: Központos nyomás esete [4]

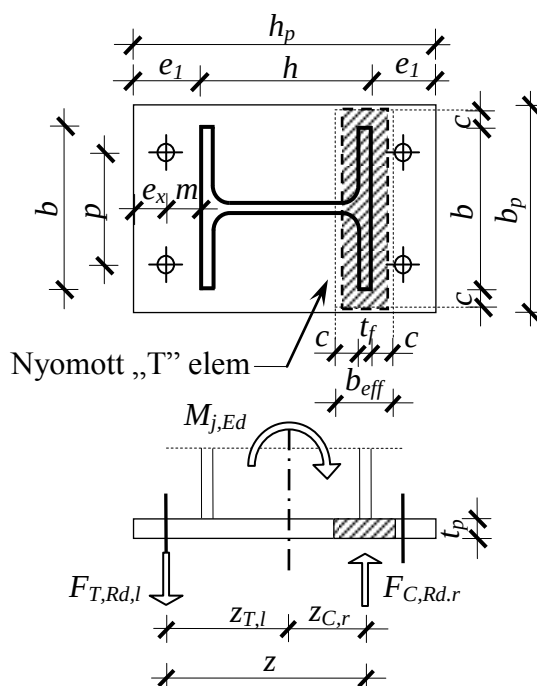
- **2. pont:** tiszta hajlítás esete (2. ábra)

Vetületi egyenlet: $N_{Rd,2} = 0 \text{ kN} \rightarrow F_{C,Rd} = F_{T,Rd}$

$$A_{\text{eff},1} \cdot f_{jd} = F_{T,Rd}$$

$$A_{\text{eff},1} = \frac{F_{T,Rd}}{f_{jd}}$$

Nyomatéki egyenlet: $M_{Rd,2} = A_{\text{eff},1} \cdot f_{jd} \cdot z_C + F_{T,Rd} \cdot z_T$



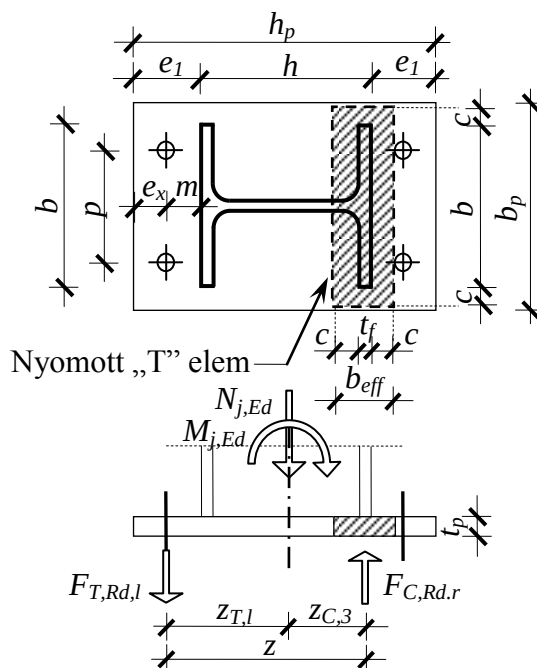
2. ábra: Tiszta hajlítás esete [4]

- **3. pont:** külpontos nyomás esete; a nyomott zóna kiterjedése megfelel az oszlop nyomott övlemeze alatti területnek (3. ábra)

Vetületi egyenlet: $N_{Rd,3} = F_{C,Rd,3} - F_{T,Rd}$

$$N_{Rd,3} = A_{\text{eff},3} \cdot f_{jd} - F_{T,Rd}$$

Nyomatéki egyenlet: $M_{Rd,3} = F_{C,Rd,3} \cdot z_{C,3} + F_{T,Rd} \cdot z_T$



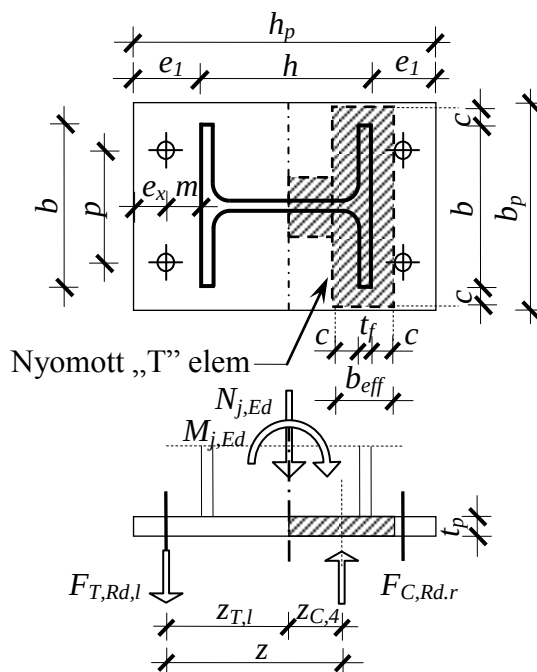
3. ábra: Külpontos nyomás esete [4]

- **4. pont:** külpontos nyomás esete; a nyomott zóna kiterjedése megfelel az oszlop szimmetriatengelyétől egyik oldalra eső nyomott alkotólemezek (gerinc és öv) alatti területnek (4. ábra)

Vetületi egyenlet: $N_{Rd,4} = F_{C,Rd,4} - F_{T,Rd}$

$$N_{Rd,4} = A_{eff,4} \cdot f_{jd} - F_{T,Rd}$$

Nyomatéki egyenlet: $M_{Rd,4} = F_{C,Rd,4} \cdot z_{C,4} + F_{T,Rd} \cdot z_T$



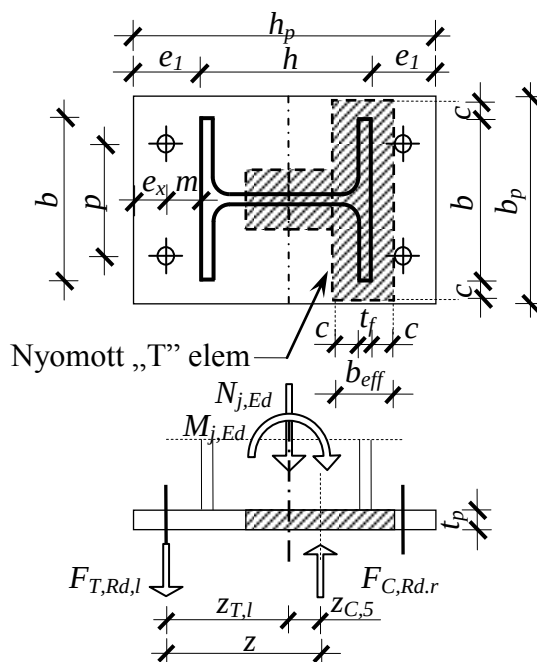
4. ábra: Külponos nyomás esete [4]

- **5. pont:** külponos nyomás esete; a nyomott zóna kiterjedése megfelel az oszlop nyomott övlemeze és teljes gerinclemeze alatti területnek (5. ábra)

Vetületi egyenlet: $N_{Rd,5} = F_{C,Rd,5} - F_{T,Rd}$

$$N_{Rd,5} = A_{eff,5} \cdot f_{jd} - F_{T,Rd}$$

Nyomatéki egyenlet: $M_{Rd,5} = F_{C,Rd,5} \cdot z_{C,5} + F_{T,Rd} \cdot z_T$



5. ábra: Külponos nyomás esete [4]

2.2. Négycsavaros oszloptalp teherbírásának meghatározása az Eurocode 3 szerint

2.2.1. Helyettesítő húzott T-elem ellenállása ($F_{T,Rd}$)

Általános esetben (oszlop-gerenda, gerenda-gerenda homloklemezcsatlakozás) a homloklemezcsatlakozások, valamint az oszlop övlemezének a rá merőlegesen ható terhelés hatására létrejövő igénybevételekre történő méretezése a helyettesítő T-elem alkalmazásával történik. A T-elem effektív hossza (l_{eff}) egy elméleti alapon meghatározott (számított) mennyiség. Nem azonos a figyelembe vett szerkezeti rész valóságos (fizikai) hosszával. Oszloptalpak esetén a helyettesítő T-elem effektív hosszának meghatározására vonatkozó összefüggéseket az 1. táblázat tartalmazza.

A fellépő húzóerő (F) hatására – az esetek nagy részében – a T-elemet alkotó homloklemez végén Q „emelőerő” keletkezik, ennek megfelelően a helyettesítő T-elem tönkremenetele három módon következhet be:

1. az öv teljes folyása (ehhez tartozó ellenállás: $F_{T,1,Rd}$),
2. a csavar törése és az öv folyása (ehhez tartozó ellenállás: $F_{T,2,Rd}$),
3. a csavar törése (ehhez tartozó ellenállás: $F_{T,3,Rd}$). [2]

Talpcsomópontok esetében azonban az 1. és 2. tönkremeneteli mód megegyezik, ha az emelőerő nem alakul ki. Ebben az esetben a húzott T-elem ellenállását a következő módon számíthatjuk:

$$F_{T,Rd} = \min \left\{ \begin{matrix} F_{T,1-2,Rd} \\ F_{T,3,Rd} \end{matrix} \right\}$$

Ahol az ellenállásértékek az alábbi összefüggésekkel határozhatók meg:

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot \sum l_{eff} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad [2].$$

„D” és „E” osztályú húzott csavarok tönkremenetele abban az esetben következik be, ha a csavarra ható húzóerő meghaladja:

- a csavar húzási ellenállását ($F_{b,t,Rd}$)
- a csavar kigombolódási ellenállását ($B_{p,Rd}$).

$$F_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{matrix} F_{b,t,Rd} \\ B_{p,Rd} \end{matrix} \right\}$$

$$F_{b,t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Ahol f_{ub} a csavar szakítószilárdságának karakterisztikus értéke

A_s a csavar húzási keresztmetszete

γ_{M2} a parciális biztonsági tényező szilárdsági vizsgálatokhoz- képlékeny törés esetén.

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad [1].$$

Ahol d_m a csavarfej vagy csavaranya alatti rész átmérője

t_p a csavarfej, illetve csavaranya alatti kisebbik lemez vastagsága

f_u a szakítószilárdság karakterisztikus értéke

γ_{M2} a parciális biztonsági tényező szilárdsági vizsgálatokhoz- képlékeny törés esetén.

Annak vizsgálata, hogy az emelőerő (Q) létrejön-e, a csavar „nyúlási” hossza alapján történik. A csavar nyúlási hosszát a talplemez vastagsága, az ágyazó habarcs vastagsága, és a csavar átmérő határozza meg:

$$L_b = t_p + t_h + \frac{m}{2} + 8 \cdot d \quad [2].$$

Az emelőerő kialakulásával abban az esetben számolhatunk, ha a csavar nyúlási hossza nem halad meg egy szabványban meghatározott értéket:

$$L_b \leq \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{eff} \cdot t_p^3} \quad [3].$$

Emelőerő nélküli esetben:	Emelőerő működésének esetében:
$l_1 = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x$	$l_1 = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x$
$l_2 = 4 \cdot \pi \cdot m_x$	$l_2 = 2 \cdot \pi \cdot m_x$
$l_3 = 0,5 \cdot b_p$	$l_3 = 0,5 \cdot b_p$
$l_4 = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x$	$l_4 = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x$
$l_5 = e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x$	$l_5 = e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x$
$l_6 = 2 \cdot \pi \cdot m_x + 4 \cdot e$	$l_6 = \pi \cdot m_x + 2 \cdot e$
$l_7 = 2 \cdot (\pi \cdot m_x + p)$	$l_7 = \pi \cdot m_x + p$
$l_{eff,1} = \min(l_1; l_2; l_3; l_4; l_5; l_6; l_7)$	$l_{eff,1} = \min(l_1; l_2; l_3; l_4; l_5; l_6; l_7)$
$l_{eff,2} = \min(l_1; l_3; l_4; l_5)$	$l_{eff,2} = \min(l_1; l_3; l_4; l_5)$

1. táblázat: T-elem effektív hossza oszlopok talplemeze esetén [4];[5].

2.2.2. A nyomott T-elem ellenállása (N_{Rd})

Az oszlopot alkotó lemezek alatt kialakuló nyomott zóna (nyomott T-elem) méreteit a szabvány előírásai szerint úgy határozhatjuk meg, hogy a lemezek méreteit növeljük mindkét irányban egy meghatározott (c) értékkel:

$$c = t_p \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}}$$

Ahol:

$$f_{jd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{F_{Rdu}}{b_{eff} \cdot l_{eff}} = 2 \cdot f_{cd} \quad [2]$$

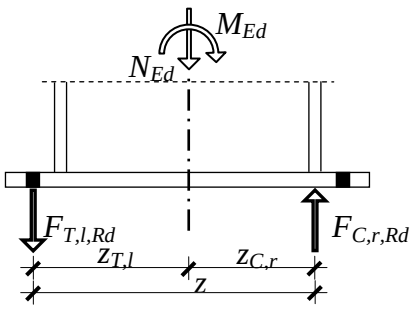
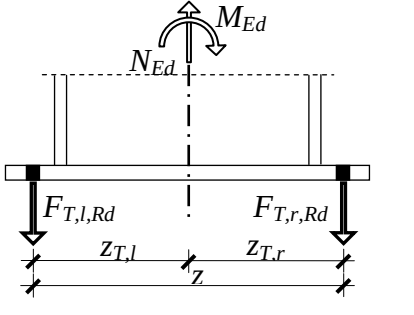
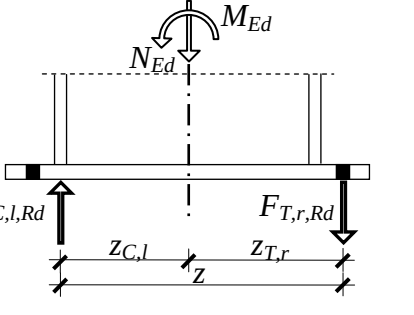
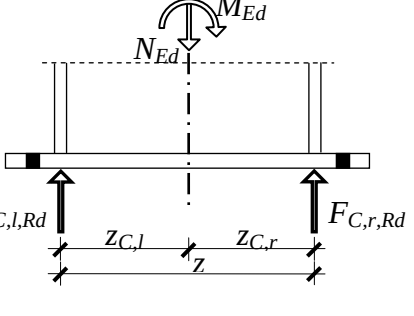
$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad [8].$$

Az Eurocode 3 szabvány a nyomott zóna teherbírása szempontjából egyszerűsítést alkalmaz, mivel csak az oszlop nyomott övlemeze alatt kialakuló nyomott zóna (nyomott T-elem) teherbírását veszi figyelembe. Ennek megfelelően a nyomott T-elem méreteinek ismeretében annak ellenállása egyszerűen meghatározható [3]:

$$F_{C,Rd} = f_{jd} \cdot A_{eff}$$

2.2.3. Hajlított és nyomott talplemez ellenállása

A húzott helyettesítő T-elem, és a nyomott T-elem teherbírásának ismeretében a talpcsomópont nyomatéki ellenállása a terheléstől függően eltérő összefüggésekkel határozható meg, melyeket a 2. táblázat foglal össze. [3]

Terhelési eset	Erőkar	Nyomatéki ellenállás ($M_{l,Rd}$)	
	$z = z_{T,l} + z_{C,r}$	$N_{Ed} > 0$ és $e > z_{T,l}$	$N_{Ed} \leq 0$ és $e \leq -z_{C,r}$
		$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -F_{C,r,Rd} \cdot z \\ \frac{z_{T,l}}{e} - 1 \end{array} \right\}$	
	$z = z_{T,l} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ és $0 < e < z_{T,l}$	$N_{Ed} > 0$ és $-z_{T,r} < 0 < e$
		$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,r}}{e} + 1} \\ F_{T,r,Rd} \cdot z \\ \frac{z_{T,l}}{e} - 1 \end{array} \right\}$	$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,r}}{e} + 1} \\ \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\}$
	$z = z_{C,l} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ és $e \leq -z_{T,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ és $e > z_{C,l}$
		$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{-F_{C,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,r}}{e} + 1} \\ F_{T,r,Rd} \cdot z \\ \frac{z_{C,l}}{e} - 1 \end{array} \right\}$	
	$z = z_{C,l} + z_{C,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ és $0 < e < z_{C,l}$	$N_{Ed} \leq 0$ és $-z_{C,r} < e \leq 0$
		$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{-F_{C,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -F_{C,r,Rd} \cdot z \\ \frac{z_{C,l}}{e} - 1 \end{array} \right\}$	$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{-F_{C,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -F_{C,r,Rd} \cdot z \\ \frac{z_{C,l}}{e} - 1 \end{array} \right\}$

2. táblázat: A nyomatéki ellenállás meghatározása talpcsomópontok esetében különböző teherelrendezések mellett [3];[6].

A táblázatban szereplő külpontosság értéke a következő összefüggésből határozható meg:

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} \quad [3].$$

3. A szabványban szereplő összefüggések értelmezése

Ebben a fejezetben arra a kérdésre keresem a választ, hogy a szabványban található, talpcsomópontok teherbírásának meghatározására vonatkozó összefüggések milyen módon vezethetők vissza a csomópontok egyensúlyi egyenleteiből kifejezhető összefüggésekre.

A legáltalánosabb esetben - külpontosan nyomott oszloptalpnál, melynél az egyik zóna húzott a másik zóna pedig nyomott - az oszloptalpak hajlítási ellenállása két kifejezés minimumaként számítható (lásd. 2. táblázat) [3].

A két kifejezés közül az egyik az alábbi:

$$M_{j,Rd} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z}{\frac{z_C}{e} + 1} \quad [3].$$

A kifejezés átalakításánál alkalmazható összefüggések (figyelembe véve, hogy a normálerő negatív, vagyis nyomásról van szó):

$$\text{Külpontosság:} \quad e = \frac{M_{Ed}}{-N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{-N_{Rd}} \quad (1)$$

$$\text{Vetületi egyenlet:} \quad N_{Rd} = -F_{C,Rd} + F_{T,Rd} \quad (2)$$

$$\text{Nyomatéki egyenlet:} \quad M_{Rd} = F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C \quad (3)$$

$$\text{Geometriai összefüggés az erőkarokra vonatkozóan:} \quad z = z_T + z_C \quad (4)$$

A csomópont hajlítási ellenállására ($M_{j,Rd}$) vonatkozó összefüggésbe az „e” helyére behelyettesítjük a külpontosságra érvényes kifejezést (1), mellyel az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\begin{aligned} M_{j,Rd} &= \frac{F_{T,Rd} \cdot z}{\frac{z_C}{\frac{M_{Rd}}{-N_{Rd}}} + 1} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z}{\frac{z_C \cdot (-N_{Rd})}{M_{Rd}} + 1} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z}{\frac{z_C \cdot (-N_{Rd})}{M_{Rd}} + \frac{M_{Rd}}{M_{Rd}}} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z}{\frac{z_C \cdot (-N_{Rd}) + M_{Rd}}{M_{Rd}}} = \\ &= \frac{F_{T,Rd} \cdot z \cdot M_{Rd}}{z_C \cdot (-N_{Rd}) + M_{Rd}} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{z_C \cdot (-F_{C,Rd} + F_{T,Rd}) + F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C} = \\ &= \frac{F_{T,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{-F_{C,Rd} \cdot z_C + F_{T,Rd} \cdot z_C + F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C} \end{aligned}$$

Ez az összefüggés egyszerűsíthető $F_{C,Rd} \cdot z_C$ szorzattal:

$$M_{j,Rd} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{F_{T,Rd} \cdot z_C + F_{T,Rd} \cdot z_T} = \frac{F_{T,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{F_{T,Rd} \cdot (z_C + z_T)} =$$

$$= \frac{F_{T,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{F_{T,Rd} \cdot z}$$

A fenti kifejezés tovább egyszerűsíthető $F_{T,Rd} \cdot z$ szorzattal, így visszakapjuk a teherbírási vonal meghatározásánál alkalmazott nyomatéki egyenletet:

$$M_{j,Rd} = F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C.$$

A két kifejezés közül a másik az alábbi:

$$M_{j,Rd} = \frac{-F_{C,Rd} \cdot z}{\frac{z_T}{e} - 1} \quad [3].$$

A kifejezés átalakításánál alkalmazható összefüggések (figyelembe véve, hogy a normálerő negatív, vagyis nyomásról van szó):

$$\text{Külpontosság:} \quad e = \frac{M_{Ed}}{-N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{-N_{Rd}} \quad (1)$$

$$\text{Vetületi egyenlet:} \quad -N_{Rd} = F_{C,Rd} - F_{T,Rd} \quad (2)$$

$$\text{Nyomatéki egyenlet:} \quad M_{Rd} = -F_{T,Rd} \cdot z_T - F_{C,Rd} \cdot z_C \quad (3)$$

$$\text{Geometria összefüggés az erőkarokra vonatkozóan:} \quad z = z_T + z_C \quad (4)$$

A csomópont hajlítási ellenállására ($M_{j,Rd}$) vonatkozó összefüggésbe az „e” helyére behelyettesítjük a külpontosságra érvényes kifejezést (1), mellyel az alábbi összefüggést kapjuk:

$$M_{j,Rd} = \frac{-F_{C,Rd} \cdot z}{\frac{z_T}{\frac{M_{Rd}}{-N_{Rd}}} - 1} = \frac{-F_{C,Rd} \cdot z}{\frac{z_T \cdot (-N_{Rd})}{M_{Rd}} - 1} = \frac{-F_{C,Rd} \cdot z}{\frac{z_T \cdot (-N_{Rd})}{M_{Rd}} - \frac{M_{Rd}}{M_{Rd}}} = \frac{-F_{C,Rd} \cdot z}{\frac{z_T \cdot (-N_{Rd}) - M_{Rd}}{M_{Rd}}} =$$

$$= \frac{-F_{C,Rd} \cdot z \cdot M_{Rd}}{z_T \cdot (-N_{Rd}) - M_{Rd}} = \frac{-F_{C,Rd} \cdot z \cdot (-F_{T,Rd} \cdot z_T - F_{C,Rd} \cdot z_C)}{z_T \cdot (F_{C,Rd} - F_{T,Rd}) - (-F_{T,Rd} \cdot z_T - F_{C,Rd} \cdot z_C)}$$

A zárójelek felbontása után, az alábbi kifejezést kapjuk:

$$= \frac{F_{C,Rd} \cdot z \cdot F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z \cdot F_{C,Rd} \cdot z_C}{F_{C,Rd} \cdot z_T - F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C} = \frac{F_{C,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{F_{C,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C} =$$

$$= \frac{F_{C,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{F_{C,Rd} \cdot (z_T + z_C)} = \frac{F_{C,Rd} \cdot z \cdot (F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C)}{F_{C,Rd} \cdot z}$$

A fenti kifejezést egyszerűsítve az $F_{C,Rd} \cdot z$ szorzattal, visszkapjuk a teherbírasi vonal meghatározásánál alkalmazott nyomatéki egyenlet összefüggését:

$$M_{j,Rd} = F_{T,Rd} \cdot z_T + F_{C,Rd} \cdot z_C.$$

Fentiek alapján megállapítható, hogy a szabványban található kifejezés gyakorlatilag a teherbírasi vonal meghatározásánál is alkalmazott összefüggés.

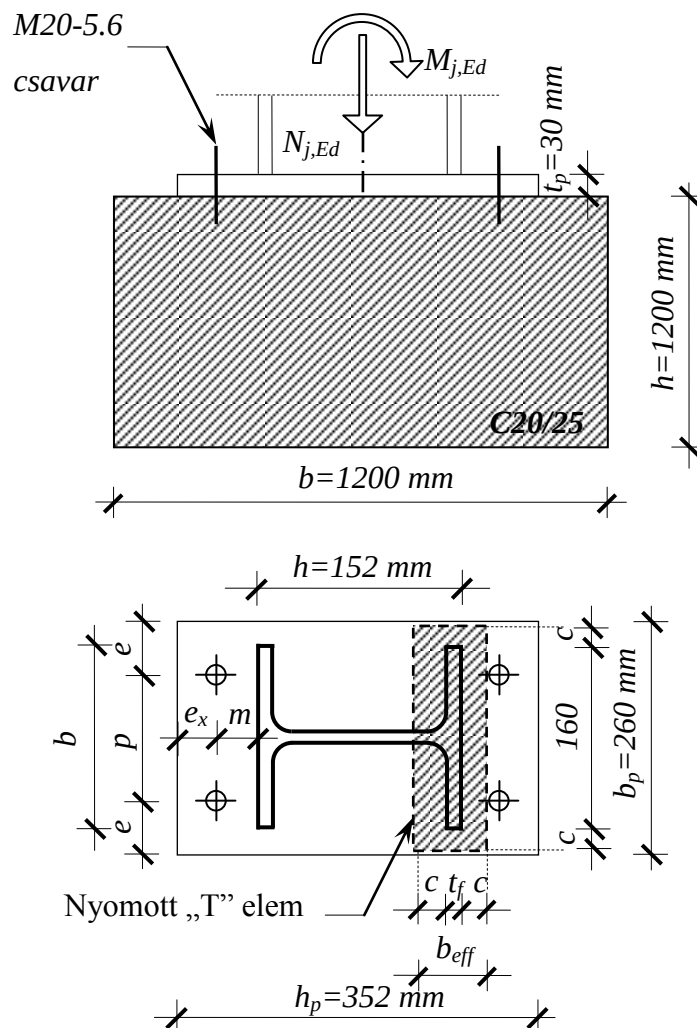
4. Példa oszloptalp teherbírásának meghatározására az egyensúlyi egyenletek, valamint az EC-3 szabvány segítségével

4.1. Talpcsomópont teherbírásának meghatározása HEA szelvényű oszlop esetén

4.1.1. Teherbírás meghatározása az egyensúlyi egyenletek felhasználásával

4.1.1.1.A számpélda ismertetése

Ebben a fejezetben egy HEA 160 szelvényű oszlopot vizsgálunk, S235 anyagminőséggel. Az oszlopszelvény 4 db M20-5.6. anyagminőségű lehorgonyzó-csavarral van rögzítve a $t_p=30$ mm vastagságú talplemezen keresztül a négyszög keresztmetszetű alaptesthez. Az alaptest C20/25 minőségű betonból készül, befoglaló méretei: $1200 \times 1200 \times 1200$ mm. Feladatom, hogy meghatározzam a talpcsomópont teherbírási vonalát az egyensúlyi (vetületi és nyomatéki) egyenletek segítségével, feltételezve, hogy az emelőerő (Q) nem jön létre.



6. ábra: A talpcsomópont kialakítása

4.1.1.2. A számítás lépéseinek ismertetése

4.1.1.2.1 A húzott T-elem effektív hossza

A húzott T-elem effektív hosszának meghatározásához, az 1. táblázatban lévő kifejezésekbe kell behelyettesíteni. A táblázatban szereplő összefüggésekhez szükséges mennyiségeket a 6. ábra foglalja össze:

$$e_x = 50 \text{ mm}$$

$$e = 90 \text{ mm}$$

$$m = 50 \text{ mm}$$

$$p = 80 \text{ mm}$$

Az m_x értéke a szabványban szereplő összefüggés alapján a következő módon határozható meg az m ismeretében, hegesztett kapcsolat esetén [3]:

$$m_x = m - (0,8 \cdot a_c \cdot \sqrt{2}) = 50 - (0,8 \cdot 4 \cdot \sqrt{2}) = 45,47 \text{ mm}$$

Ahol a_c a varrat magassága.

Az effektív hossz lehetséges értékei [4]:

$$l_1 = 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x = 4 \cdot 45,47 + 1,25 \cdot 50 = 244,38 \text{ mm}$$

$$l_2 = 4 \cdot \pi \cdot m_x = 4 \cdot \pi \cdot 45,47 = 571,39 \text{ mm}$$

$$l_3 = 0,5 \cdot b_p = 0,5 \cdot 260 = 130 \text{ mm}$$

$$l_4 = 0,5 \cdot p + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x = 0,5 \cdot 80 + 2 \cdot 45,47 + 0,625 \cdot 50 = 162,19 \text{ mm}$$

$$l_5 = e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x = 90 + 2 \cdot 45,47 + 0,625 \cdot 50 = 212,19 \text{ mm}$$

$$l_6 = 2 \cdot \pi \cdot m_x + 4 \cdot e = 2 \cdot \pi \cdot 45,47 + 4 \cdot 90 = 645,70 \text{ mm}$$

$$l_7 = 2 \cdot (\pi \cdot m_x + p) = 2 \cdot (\pi \cdot 45,47 + 80) = 445,70 \text{ mm}$$

$$l_{\text{eff},1} = \min(l_1; l_2; l_3; l_4; l_5; l_6; l_7) = 130 \text{ mm}$$

$$l_{\text{eff},2} = \min(l_1; l_3; l_4; l_5) = 130 \text{ mm}$$

4.1.1.2.2. A nyomott T-elem ellenállása

A nyomott T-elem ellenállásának meghatározásához szükségünk van a c tényezőre, mely a következőképpen számítható [3]:

$$c = t_p \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{235}{3 \cdot 26,66 \cdot 1,0}} = 51,42 \text{ mm}$$

Ahol a pecsétnyomás (f_{jd}) értéke megegyezik a beton nyomószilárdság tervezési értékének kétszeresével [3].

$$f_{jd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{F_{Rdu}}{b_{eff} \cdot l_{eff}} = 2 \cdot f_{cd} = 2 \cdot 13,33 = 26,66 \text{ N/mm}^2$$

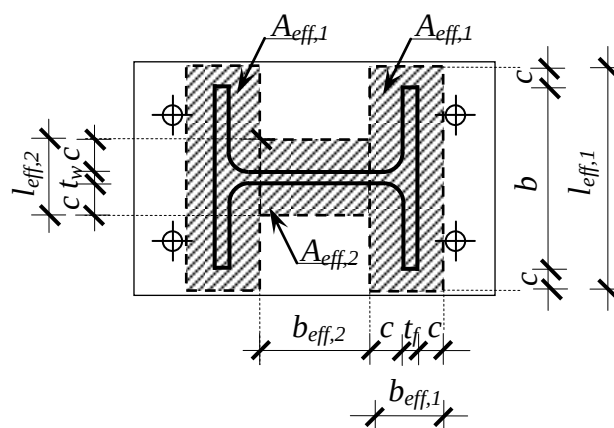
A beton nyomószilárdságának tervezési értéke: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1,50} = 13,33 \text{ N/mm}^2$ [8].

S 235 anyagminőségű acél esetén:

a folyáshatár karakterisztikus értéke: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

a szakítószilárdság karakterisztikus értéke: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ [1].

A továbbiakban a nyomott T-elem méreteit határozom meg a 7. ábrán látható módon.



7. ábra: A nyomott T-elem méreteinek meghatározása

A nyomott öv alatti effektív keresztmetszeti terület ($A_{eff,1}$) az effektív keresztmetszeti szélesség ($b_{eff,1}$) és effektív keresztmetszeti hossz ($l_{eff,1}$) ismeretében számítható:

$$A_{eff,1} = b_{eff,1} \cdot l_{eff,1}$$

$$b_{eff,1} = t_f + 2 \cdot c = 9 + 2 \cdot 51,42 = 111,84 \text{ mm}$$

$$l_{eff,1} = 260 \text{ mm}$$

$$A_{eff,1} = 111,84 \cdot 260 = 29078,40 \text{ mm}^2$$

A nyomott gerinclemez alatti effektív keresztmetszeti terület ($A_{\text{eff},2}$) az effektív keresztmetszeti szélesség ($b_{\text{eff},2}$) és effektív keresztmetszeti hossz ($l_{\text{eff},2}$) ismeretében az alábbi eredményt adja:

$$A_{\text{eff},2} = b_{\text{eff},2} \cdot l_{\text{eff},2}$$

$$b_{\text{eff},2} = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot c = 152 - 2 \cdot 9 - 2 \cdot 51,42 = 31,16 \text{ mm}$$

$$l_{\text{eff},2} = t_w + 2 \cdot c = 6 + 2 \cdot 51,42 = 108,84 \text{ mm}$$

$$A_{\text{eff},2} = 31,16 \cdot 108,84 = 3391,45 \text{ mm}^2$$

A nyomott keresztmetszeti terület meghatározható az $A_{\text{eff},1}$ és $A_{\text{eff},2}$ ismeretében.

$$A_{\text{eff}} = 2 \cdot A_{\text{eff},1} + A_{\text{eff},2} = 2 \cdot 29078,40 + 3391,45 = 61548,25 \text{ mm}^2$$

A csomópont nyomási ellenállása (központos nyomás esetén):

$$N_{\text{C,Rd}} = F_{\text{C,Rd}} = f_{\text{jd}} \cdot A_{\text{eff}} = 26,66 \cdot 61548,25 = 1640,88 \text{ kN} \quad [2].$$

4.1.1.2.3. Annak vizsgálata, hogy az emelőerő kialakulhat-e

A csavar nyúlási hossza szükséges az emelő erő kialakulásának ellenőrzéséhez. [3]

$$L_b = t_p + t_h + \frac{m}{2} + 8 \cdot d = 30 + 30 + \frac{16}{2} + 8 \cdot 20 = 228 \text{ mm}$$

A csavar anyagjellemzői:

- csavar átmérő: $d = 20 \text{ mm}$
- furatátmérő: $d_0 = 22 \text{ mm}$
- keresztmetszeti terület: $A = 314 \text{ mm}^2$
- húzási keresztmetszet: $A_s = 245 \text{ mm}^2$
- átmérő kigombolódásnál: $d_m = 32,40 \text{ mm}$

A csavar szilárdsági jellemzői:

- folyáshatár karakterisztikus értéke: $f_{yb} = 480 \text{ N/mm}^2$
- szakítószilárdság karakterisztikus értéke: $f_{ub} = 600 \text{ N/mm}^2 \quad [1].$

Az emelő erő kialakul, ha:

$$L_b \leq \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{\text{eff}} \cdot t_p^3}$$

$$L_b = 228 \text{ mm} > \frac{8,8 \cdot 45,47^3 \cdot 245}{130 \cdot 30^3} = 57,75 \text{ mm}$$

Mivel a nyúlási hossz jelentősen meghaladja az előírásban szereplő értéket, a feltételezés helyes volt, az emelőerővel nem számolhatunk. [3]

4.1.1.2.4. A húzott T-elem ellenállása

Mivel az emelő erő (Q) hatását nem vesszük figyelembe, a csomópont esetében kétféle tönkremeneteli mód lehetséges. [2]

$$F_{T,Rd} = \min \left\{ \begin{matrix} F_{T,1-2,Rd} \\ F_{T,3,Rd} \end{matrix} \right\}$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot \sum l_{eff} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 130 \cdot 30^2 \cdot 235}{1,0} = 6,874 \text{ kNm}$$

Az 1. és 2. tönkremeneteli módhoz (öv teljes folyása és csavartörés) tartozó ellenállás értéke:

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot 6873750}{45,47} = 302,34 \text{ kN}$$

A 3. tönkremeneteli módhoz (csavartörés) tartozó ellenállás értékét az alábbi módon határozhatjuk meg:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$$

Ahol $F_{t,Rd}$ a lehorgonyzó csavar húzási ellenállása.

„D” és „E” osztályú húzott csavarok tönkremenetele bekövetkezhet akkor, ha a csavarra ható húzóerő meghaladja:

- a csavar húzási ellenállását ($F_{b,t,Rd}$)
- a csavar kigombolódási ellenállását ($B_{p,Rd}$) [1].

$$F_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{matrix} F_{b,t,Rd} \\ B_{p,Rd} \end{matrix} \right\}$$

$$F_{b,t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

A kifejezések ismeretében egy csavar húzási ellenállása a következő:

$$F_{b,t,Rd} = \frac{0,9 \cdot 500 \cdot 245}{1,25} = 88,20 \text{ kN}$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

A kifejezések ismeretében egy csavar kigombolódási ellenállása:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 32,40 \cdot 30 \cdot 360}{1,25} = 527,67 \text{ kN}$$

Egy csavar húzási ellenállása a fentiek alapján:

$$F_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{matrix} F_{b,t,Rd} \\ B_{p,Rd} \end{matrix} \right\} = \min \left\{ \begin{matrix} 88,20 \text{ kN} \\ 527,67 \text{ kN} \end{matrix} \right\} = 88,20 \text{ kN}$$

A 3. tönkremeneteli módhoz (csavartörés) tartozó ellenállás:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 \cdot 88,20 = 176,40 \text{ kN}$$

A húzott T-elem ellenállásának értéke:

$$F_{T,Rd} = \min \left\{ \begin{matrix} F_{T,1-2,Rd} \\ F_{T,3,Rd} \end{matrix} \right\} = \min \left\{ \begin{matrix} 302,34 \text{ kN} \\ 176,40 \text{ kN} \end{matrix} \right\} = 176,40 \text{ kN}$$

4.1.1.3. A közelítő teherbírási vonal meghatározása 5 jellemző ponttal

- **1. pont:** központos nyomás esete

A talpcsomópontra kizárólag normálerő (nyomóerő) hat. Ebben az esetben a teljes szelvény nyomott lesz. A tisztán nyomott talpcsomópont esetén a nyomási ellenállás értéke a nyomott T-elemek teherbírásának összegeként határozható meg. [4]

$$\text{Vetületi egyenlet:} \quad N_{Rd,1} = A_{eff} \cdot f_{jd}$$

$$N_{Rd,1} = 61548,25 \cdot 26,66 = 1640,88 \text{ kN}$$

$$\text{Nyomatéki egyenlet:} \quad M_{Rd,1} = F_{C,l,Rd} \cdot z_{C,l} - F_{C,r,Rd} \cdot z_{C,r}$$

$$M_{Rd,1} = 820,44 \cdot 10^3 \cdot 71,50 - 820,44 \cdot 10^3 \cdot 71,50 = 0 \text{ kNm}$$

- **2. pont:** tiszta hajlítás esete

A 2. pont meghatározásához felhasználtam František Wald egyik publikációjában található összefüggést, miszerint a hajlítónyomatékot helyettesítjük egy erőpárral. A csavarok húzási ellenállása meghatározható, így az $F_{T,Rd}$ ismeretében a talpcsomópont nyomási ellenállása ($F_{C,Rd}$) megegyezik a csavar húzási ellenállásával, melyből az effektív keresztmetszeti terület (A_{eff}) könnyen visszaszámolható. [4].

$$\begin{aligned} \text{Vetületi egyenlet: } N_{Rd,2} &= 0 \text{ kN} \rightarrow F_{C,Rd} = F_{T,Rd} \\ A_{eff,2} \cdot f_{jd} &= F_{T,Rd} \\ A_{eff,2} &= \frac{F_{T,Rd}}{f_{jd}} \end{aligned}$$

Ennek alapján: $F_{T,Rd} = F_{C,Rd} = 176,40 \text{ kN}$

$$A_{eff,2} = \frac{F_{T,Rd}}{f_{jd}} = \frac{176,40 \cdot 10^3}{26,66} = 6616,65 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,2} = 6616,65 \text{ mm}^2 < A_{eff,1} = 29078,40 \text{ mm}^2$$

Tehát az öv alatti effektív keresztmetszeti területtel kell számolni.

$$\begin{aligned} \text{Nyomatéki egyenlet: } M_{Rd,2} &= A_{eff,2} \cdot f_{jd} \cdot z_C + F_{T,Rd} \cdot z_T = F_{C,Rd} \cdot z_C + F_{T,Rd} \cdot z_T \\ M_{Rd,2} &= 6616,65 \cdot 26,66 \cdot 71,50 + 176,40 \cdot 10^3 \cdot 126 = 34,84 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- **3. pont:** külpontos nyomás esete (hajlítónyomatékkal egyidejűleg működő normálerő)

Külpontos nyomás esetében jellemzően effektív keresztmetszeti területekkel számolok. A 3. pont meghatározásánál a nyomott öv alatt megnövelt (c) keresztmetszeti területet vettem figyelembe. [4]

$$\begin{aligned} \text{Vetületi egyenlet: } N_{Rd,3} &= F_{C,Rd,3} - F_{T,Rd} = A_{eff,3} \cdot f_{jd} - F_{T,Rd} \\ F_{C,Rd,3} &= A_{eff,3} \cdot f_{jd} = 29078,40 \cdot 26,66 = 775,23 \text{ kN} \\ N_{Rd,3} &= 775,23 \cdot 10^3 - 176,40 \cdot 10^3 = 598,83 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nyomatéki egyenlet: } M_{Rd,3} &= F_{C,Rd,3} \cdot z_{C,3} + F_{T,Rd} \cdot z_T \\ M_{Rd,3} &= 775,23 \cdot 10^3 \cdot 71,50 + 176,40 \cdot 10^3 \cdot 126 = 77,66 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- **4. pont:** külpontos nyomás esete [4].

$$\text{Vetületi egyenlet: } N_{Rd,4} = F_{C,Rd,4} - F_{T,Rd} = A_{eff,4} \cdot f_{jd} - F_{T,Rd}$$

$$A_{\text{eff},4} = A_{\text{eff},1} + \frac{A_{\text{eff},2}}{2} = 29078,40 + \frac{3391,45}{2} = 30774,125 \text{ mm}^2$$

$$F_{\text{C,Rd},4} = A_{\text{eff},4} \cdot f_{\text{jd}} = 30774,125 \cdot 26,66 = 820,44 \text{ kN}$$

Nyomatéki egyenlet: $M_{\text{Rd},4} = F_{\text{C,Rd},4} \cdot z_{\text{C},4} + F_{\text{T,Rd}} \cdot z_{\text{T}}$

$$M_{\text{Rd},4} = 820,44 \cdot 10^3 \cdot 67,99 + 176,40 \cdot 10^3 \cdot 126 = 78,01 \text{ kNm}$$

A $z_{\text{C},4}$ meghatározása:

$$z_{\text{C},4} = \frac{A_{\text{eff},1} \cdot z_{\text{C},1} + \frac{A_{\text{eff},2}}{2} \cdot z_{\text{C},2}}{A_{\text{eff},4}}$$

$$z_{\text{C},4} = \frac{29078,40 \cdot 71,50 + \frac{3391,45}{2} \cdot 7,79}{30774,125} = 67,99 \text{ mm}$$

- **5. pont:** külpontos nyomás esete [4].

Vetületi egyenlet: $N_{\text{Rd},5} = F_{\text{C,Rd},5} - F_{\text{T,Rd}} = A_{\text{eff},5} \cdot f_{\text{jd}} - F_{\text{T,Rd}}$

$$A_{\text{eff},5} = A_{\text{eff},1} + A_{\text{eff},2} = 29078,40 + 3391,45 = 32469,85 \text{ mm}^2$$

$$F_{\text{C,Rd},5} = A_{\text{eff},5} \cdot f_{\text{jd}} = 32469,85 \cdot 26,66 = 865,65 \text{ kN}$$

$$N_{\text{Rd},5} = 865,65 \cdot 10^3 - 176,40 \cdot 10^3 = 689,25 \text{ kN}$$

Nyomatéki egyenlet: $M_{\text{Rd},5} = F_{\text{C,Rd},5} \cdot z_{\text{C},5} + F_{\text{T,Rd}} \cdot z_{\text{T}}$

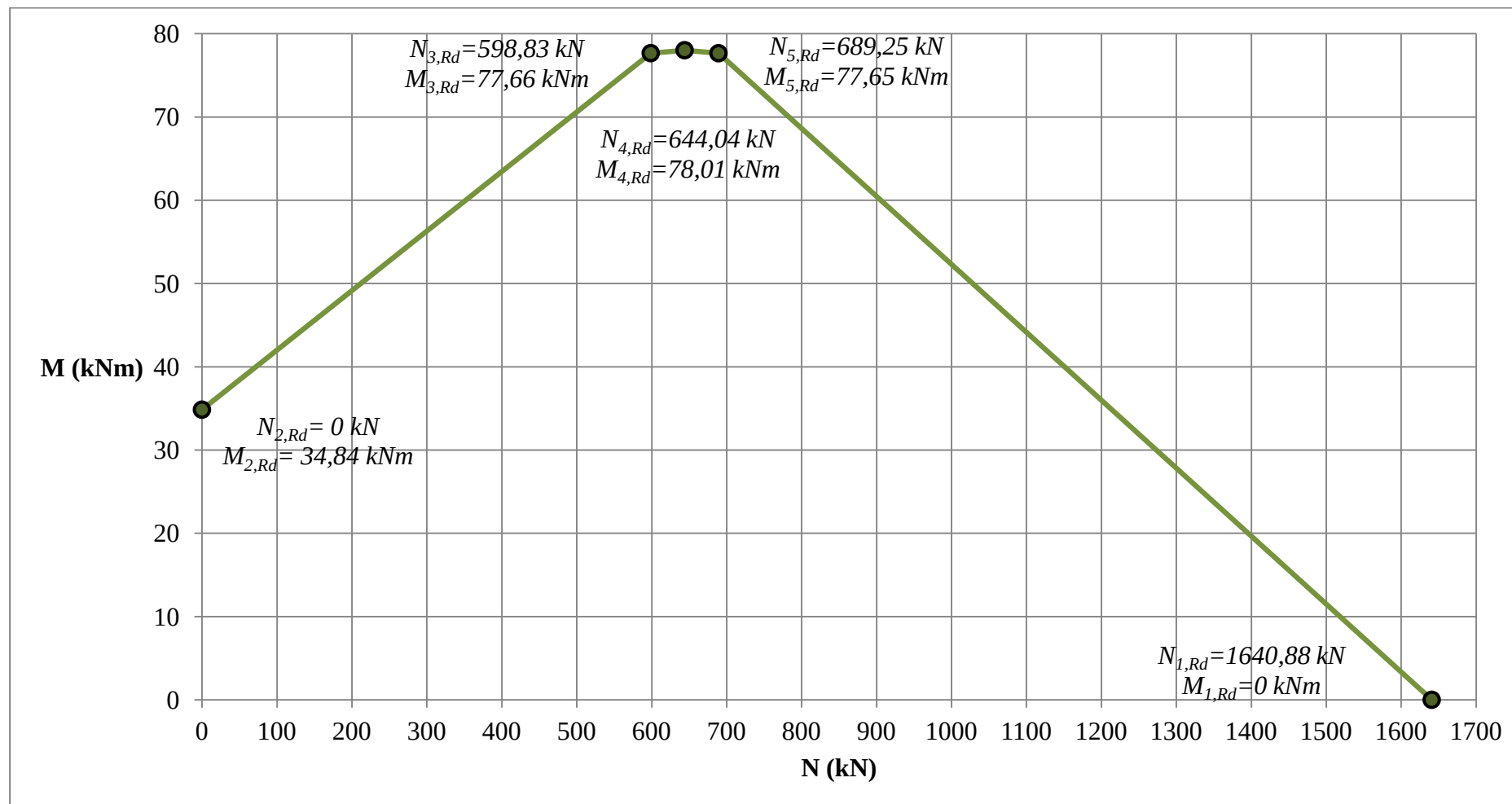
$$M_{\text{Rd},5} = 865,65 \cdot 10^3 \cdot 64,03 + 176,40 \cdot 10^3 \cdot 126 = 77,65 \text{ kNm}$$

A $z_{\text{C},5}$ meghatározása:

$$z_{\text{C},5} = \frac{A_{\text{eff},1} \cdot z_{\text{C},1} + \frac{A_{\text{eff},2}}{2} \cdot z_{\text{C},2} - \frac{A_{\text{eff},2}}{2} \cdot z_{\text{C},2}}{A_{\text{eff},5}} = \frac{A_{\text{eff},1} \cdot z_{\text{C},1}}{A_{\text{eff},5}}$$

$$z_{\text{C},5} = \frac{29078,40 \cdot 71,50}{32469,85} = 64,03 \text{ mm}$$

4.1.1.4. Az eredmények összefoglalása



8. ábra: HEA 160 szelvényű talpcsomópont teherbírási vonala az egyensúlyi egyenletek alapján

4.1.2. Teherbírás meghatározása az EC- 3 összefüggéseinek felhasználásával

4.1.2.1. A teherbírasi vonal 5 jellemző pontjának a vizsgálata az EC- 3 alapján

- **1. pont:** központos nyomás esete

Az előző fejezetben egyensúlyi egyenletek alapján kapott eredmények a következők:

$$N_{Ed} = -1640,88 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 0 \text{ kNm}$$

A külpontosságra vonatkozó összefüggés:
$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} \quad [3]$$

$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{0}{-1640,88} = 0 \text{ mm}$$

A továbbiakban azt vizsgálom, hogy a külpontosságot értelmezve, a szabvány és a teherbírasi vonal alapján kapott értékek mennyire ekvivalensek.

$$e_{Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}}$$

Az EC-3 szabvány csak a nyomatéki ellenállásra ($M_{j,Rd}$) vonatkozó összefüggést tartalmazza (2.táblázat), azonban a nyomási ellenállás ($N_{j,Rd}$) meghatározására nincs útmutató.

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{-F_{C,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ \frac{-F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{-775,23 \cdot 10^3 \cdot 143}{\frac{71,50}{0} + 1} = 0 \\ \frac{-775,23 \cdot 10^3 \cdot 143}{\frac{71,50}{0} - 1} = 0 \end{array} \right\} = 0 \text{ kNm}$$

$$F_{C,l,Rd} = F_{C,r,Rd} = A_{eff,1} \cdot f_{jd}$$

$A_{eff,1}$: a nyomott keresztmetszeti terület

A szabványban lehetőség van annak az egyszerűsítésnek az alkalmazására, miszerint minden esetben csak a nyomott öv alatti teljes keresztmetszeti területet vesszük figyelembe, ha a tényleges keresztmetszeti terület kisebb illetve nagyobb annál.

$$A_{eff,1} = b_{eff,1} \cdot l_{eff,1}$$

- 1. eset: a tényleges keresztmetszeti terület kisebb a nyomott öv alatti keresztmetszeti területnél $A_{\text{eff}} < A_{\text{eff},1}$
- 2. eset: a tényleges keresztmetszeti terület megegyezik a nyomott öv alatti keresztmetszeti területtel $A_{\text{eff}} = A_{\text{eff},1}$
- 3. eset: a tényleges keresztmetszeti terület nagyobb a nyomott öv alatti keresztmetszeti területnél $A_{\text{eff}} > A_{\text{eff},1}$

A szabványban található egyszerűsítést alkalmazva, meghatározható a bal és jobb oldali nyomott talplemezek nyomási ellenállása.

$$F_{C,l,Rd} = F_{C,r,Rd} = A_{\text{eff},1} \cdot f_{jd} = 29078,40 \cdot 26,66 = 775,23 \text{ kN}$$

$$z = z_{C,l} + z_{C,r} = 71,50 + 71,50 = 143 \text{ mm}$$

A nyomási ellenállást ($N_{j,Rd}$) a vetületi egyenlet segítségével határozzuk meg.

$$N_{j,Rd} = F_{C,l,Rd} + F_{C,r,Rd} = 775,23 + 775,23 = 1550,46 \text{ kN} \quad [3].$$

A nyomatéki és nyomási ellenállás értékének ismeretében a külpontosság (e_{Rd}) számítható.

$$e_{Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} = \frac{0}{1550,46} = 0 \text{ mm}$$

Az eredmények igazolják, hogy az **1. pont**, azaz a központos nyomás esetében az alábbi

egyenlőség teljesül:

$$e_{Ed} = e_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}}.$$

- **2. pont:** tiszta hajlítás esete

Az egyensúlyi egyenletek alapján kapott eredmények a következők:

$$N_{Ed} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 34,84 \text{ kNm}$$

A külpontosságra vonatkozó összefüggés:

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} \quad [3]$$

$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{34,84}{0} = \infty$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározásához a 2. táblázatban a tiszta hajlítás esetében a következő összefüggés szerepel:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -\frac{F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{71,50}{\infty} + 1} = 34,84 \\ -\frac{775,23 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{126}{\infty} - 1} = 153,11 \end{array} \right\} = 34,84 \text{ kNm}$$

A nyomási ellenállást a vetületi egyenlet alapján határozzuk meg.

$$N_{j,Rd} = F_{C,Rd} - F_{T,Rd} = 176,40 - 176,40 = 0 \text{ kN} \quad [3].$$

A nyomatéki és nyomási ellenállás ismeretében számítható az EC-3 szerint értelmezett külpontosság:

$$e_{Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} = \frac{34,84}{0} = \infty$$

Az eredmények igazolják, hogy a **2. pont**, azaz a tiszta hajlítás esetében az alábbi egyenlőség

$$\text{teljesül:} \quad e_{Ed} = e_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}}.$$

- **3. pont:** külpontos nyomás esete

Az egyensúlyi egyenletek alapján kapott eredmények a következők:

$$N_{Ed} = -598,83 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 77,66 \text{ kNm}$$

$$\text{A külpontosságra vonatkozó összefüggés:} \quad e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} \quad [3]$$

$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{77,66}{-598,83} = -129,68 \text{ mm}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározásához a 2. táblázatban külpontos nyomás esetében a következő összefüggés szerepel:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -\frac{F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{71,50}{-129,68} + 1} = 77,66 \\ -\frac{775,23 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{126}{-129,68} - 1} = 77,66 \end{array} \right\} = 77,66 \text{ kNm}$$

A nyomási ellenállást ($N_{j,Rd}$) a vetületi egyenlet alapján határozzuk meg.

$$N_{j,Rd} = F_{C,Rd} - F_{T,Rd} = 775,23 - 176,40 = 598,83 \text{ kN} \quad [3].$$

A nyomatéki és nyomási ellenállás értékének ismeretében a külpontosság számítható:

$$e_{Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} = \frac{77,66}{-598,83} = -129,68 \text{ mm}$$

Az eredmények igazolják, hogy a **3. pont**, azaz a külpontos nyomás esetében az alábbi

egyenlőség teljesül:
$$e_{Ed} = e_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}}.$$

- **4. pont:** külpontos nyomás esete

Az egyensúlyi egyenletek alapján kapott eredmények a következők:

$$N_{Ed} = -644,04 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 78,01 \text{ kNm}$$

A külpontosságra vonatkozó összefüggés:
$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} \quad [3]$$

$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{78,01}{-644,04} = -121,13 \text{ mm}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározásához a 2. táblázatban külpontos nyomás esetében a következő összefüggés szerepel:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -F_{C,r,Rd} \cdot z \\ \frac{z_{T,l}}{e} - 1 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{71,50}{-121,13} + 1} = 85,03 \\ -775,23 \cdot 10^3 \cdot 197,50 \\ \frac{126}{-121,13} - 1 \end{array} \right\} = 75,04 \text{ kNm}$$

A nyomási ellenállás értékét ($N_{j,Rd}$) a vetületi egyenlet alapján határozzuk meg.

$$N_{j,Rd} = F_{C,Rd} - F_{T,Rd} = 775,23 - 176,40 = 598,83 \text{ kN} \quad [3].$$

A nyomatéki és nyomási ellenállás értékének ismeretében a külpontosság számítható.

$$e_{Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} = \frac{75,04}{-598,83} = -125,31 \text{ mm}$$

Az eredmények azt mutatják, hogy a **4. pont**, azaz a külpontos nyomás esetében az alábbi

egyenlőség nem teljesül:
$$e_{Ed} = e_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}}.$$

- **5. pont:** külpontos nyomás esete

Az egyensúlyi egyenletek alapján kapott eredmények a következők:

$$N_{Ed} = -689,25 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 77,65 \text{ kNm}$$

A külpontosságra vonatkozó összefüggés:
$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} \quad [3]$$

$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{77,65}{-689,25} = -112,66 \text{ mm}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározásához a 2. táblázatban külpontos nyomás esetében a következő összefüggés szerepel:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ - \frac{F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{71,50}{-112,66} + 1} = 95,36 \\ - \frac{775,23 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{126}{-112,66} - 1} = 72,27 \end{array} \right\} = 72,27 \text{ kNm}$$

A nyomási ellenállás értékét ($N_{j,Rd}$) a vetületi egyenlet alapján határozzuk meg.

$$N_{j,Rd} = F_{C,Rd} - F_{T,Rd} = 775,23 - 176,40 = 598,83 \text{ kN} \quad [3].$$

A nyomatéki és nyomási ellenállás értékének ismeretében a külpontosság számítható.

$$e_{Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}} = \frac{72,27}{-598,83} = -120,68 \text{ mm}$$

Az eredmények azt mutatják, hogy az **5. pont**, azaz a külpontos nyomás esetében az alábbi

egyenlőség nem teljesül:
$$e_{Ed} = e_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{j,Rd}}{N_{j,Rd}}.$$

4.1.2.2. A teherbírési vonal jellemző pontjainak ellenőrzése az EC-3 szabványban szereplő összefüggésekkel

A 9. ábrán jól látható, hogy a vizsgált talpcsomópont teherbírása a legtöbb esetben nem egyezik meg attól függően, hogy az egyensúlyi egyenletek vagy az Eurocode 3 szabvány előírásai alapján számítjuk. Az eredmény természetesen nem meglepő, hiszen a szabvány egyszerűsített eljárást alkalmaz, csak a nyomott öv alatti nyomott zóna teherbírását veszi figyelembe.

Ebben a fejezetben azt bizonyítom számításokkal alátámasztva, hogy ha a szabványban található összefüggéseket alkalmazzuk, és a ténylegesen kialakuló nyomott zónát vesszük figyelembe, akkor a két eljárás teljesen egyező eredményt ad.

Teherbírás értéke a jellemző pontokban:

- **3. pont:** külpontos nyomás

$$N_{3,Ed} = -598,83 \text{ kN}$$

$$M_{3,Ed} = 77,66 \text{ kNm}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározására az Eurocode 3 szabványban az alábbi összefüggés található a külpontos nyomás esetén (2.táblázat):

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ - \frac{F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} \quad \text{ha, } N_{Ed} \leq 0 \text{ és } e \leq -z_{C,r}$$

A külpontosság értéke:
$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{77,65}{-598,83} = -129,67 \text{ mm}$$

Az erőkarokra vonatkozó összefüggés:
$$z = z_{T,l} + z_{C,r} = 126 + 71,50 = 197,50 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = -598,83 \text{ kN} < 0 \quad \text{és} \quad e = -129,67 \text{ mm} < -z_{C,r} = -71,50 \text{ mm}$$

A nyomott T-elem ellenállása:

$$F_{C,Rd} = A_{eff} \cdot f_{jd} = 29078,40 \cdot 26,66 = 775,23 \text{ kN}$$

A húzott T-elem ellenállása:

$$F_{T,Rd} = 176,40 \text{ kN}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) a húzott és nyomott T-elemek ellenállásának ismeretében az alábbi:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{71,50}{-129,67} + 1} = 77,65 \\ \frac{-775,23 \cdot 10^3 \cdot 197,50}{\frac{126}{-129,67} - 1} = 77,65 \end{array} \right\} = 77,65 \text{ kNm} \quad [3].$$

A két kifejezés azonos eredményt ad a szilárdságtani összefüggések (egyensúlyi egyenletek) alapján meghatározott nyomatéki ellenállással.

- **4. pont:** külpontos nyomás

$$N_{Ed,4} = -644,04 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,4} = 78,01 \text{ kNm}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározására vonatkozó összefüggés a következő:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ -\frac{F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} \quad \text{ha, } N_{Ed} \leq 0 \text{ és } e \leq -z_{C,r}$$

A külpontosság értéke:
$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{78,01}{-644,04} = -121,13 \text{ mm}$$

Az erőkarokra vonatkozó összefüggés:
$$z = z_{T,l} + z_{C,r} = 126 + 67,99 = 193,33 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = -644,04 \text{ kN} < 0 \quad \text{és} \quad e = -121,13 \text{ mm} < -z_{C,r} = -67,99 \text{ mm}$$

A nyomott T-elem ellenállása:

$$F_{C,Rd} = A_{eff} \cdot f_{jd} = 30774,125 \cdot 26,66 = 820,44 \text{ kN}$$

A húzott T-elem ellenállása:

$$F_{T,Rd} = 176,40 \text{ kN}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) a húzott és nyomott T-elemek ellenállásának ismeretében az alábbi:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 193,99}{\frac{67,99}{-121,13} + 1} = 78,01 \\ \frac{-820,44 \cdot 10^3 \cdot 193,99}{\frac{126}{-121,13} - 1} = 78,01 \end{array} \right\} = 78,01 \text{ kNm} \quad [3].$$

A két kifejezés azonos eredményt ad a szilárdságtani összefüggések (egyensúlyi egyenletek) alapján meghatározott nyomatéki ellenállással.

- **5. pont:** külpontos nyomás

$$N_{Ed,5} = -689,25 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,5} = 77,65 \text{ kNm}$$

A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) meghatározására a szabványban szereplő összefüggés a következő:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1} \\ - \frac{F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \end{array} \right\} \quad \text{ha, } N_{Ed} \leq 0 \text{ és } e \leq -z_{C,r}$$

A külpontosság értéke:
$$e_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{77,65}{-689,25} = -112,65 \text{ mm}$$

Az erőkarokra vonatkozó összefüggés:
$$z = z_{T,l} + z_{C,r} = 126 + 64,03 = 190,03 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = -689,25 \text{ kN} < 0 \quad \text{és} \quad e = -112,65 \text{ mm} < -z_{C,r} = -64,03 \text{ mm}$$

A nyomott T-elem ellenállása:

$$F_{C,Rd} = A_{eff} \cdot f_{jd} = 32469,85 \cdot 26,66 = 865,65 \text{ kN}$$

A húzott T-elem ellenállása:

$$F_{T,Rd} = 176,40 \text{ kN}$$

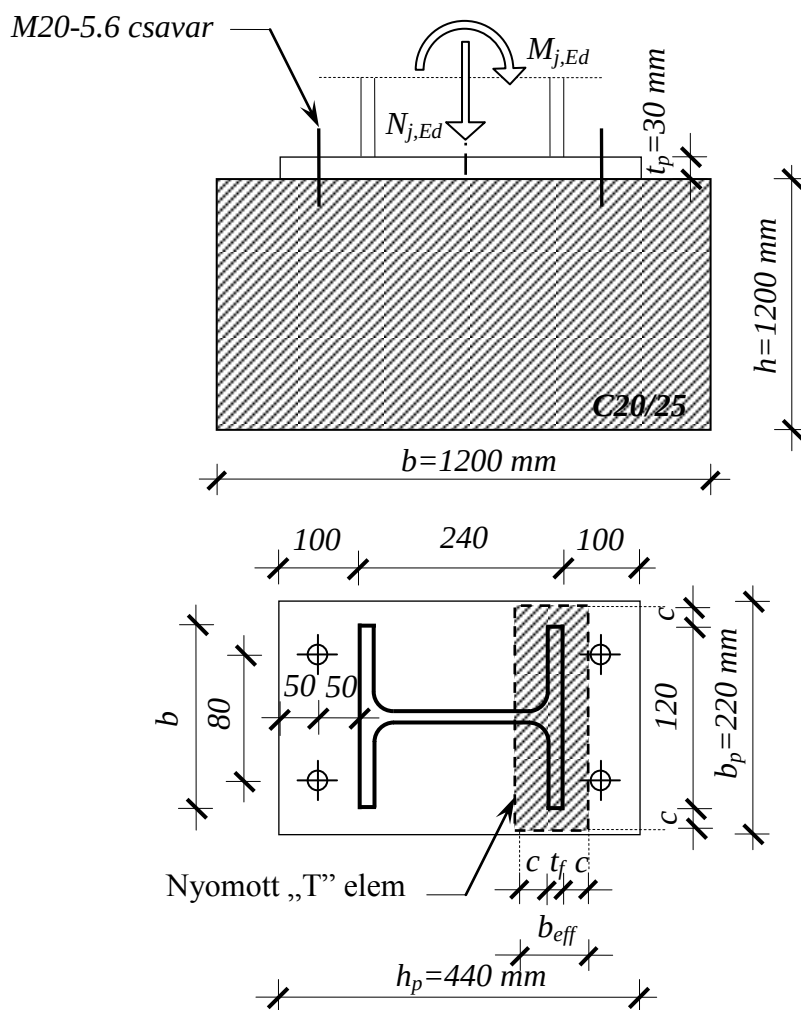
A nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) a húzott és nyomott T-elemek ellenállásának ismeretében az alábbi:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{176,40 \cdot 10^3 \cdot 190,03}{\frac{64,03}{-112,65} + 1} = 77,65 \\ - \frac{865,65 \cdot 10^3 \cdot 190,03}{\frac{126}{-112,65} - 1} = 77,65 \end{array} \right\} = 77,65 \text{ kNm} \quad [3].$$

A két kifejezés azonos eredményt ad a szilárdságtani összefüggések (egyensúlyi egyenletek) alapján meghatározott nyomatéki ellenállással. Fenti egyezések alapján következtettem kutatásaim elején arra, hogy a szabványban szereplő „bonyolultnak tűnő” összefüggés a teherbírasi vonal meghatározásához kapcsolódó egyensúlyi egyenletek átalakításából jött létre.

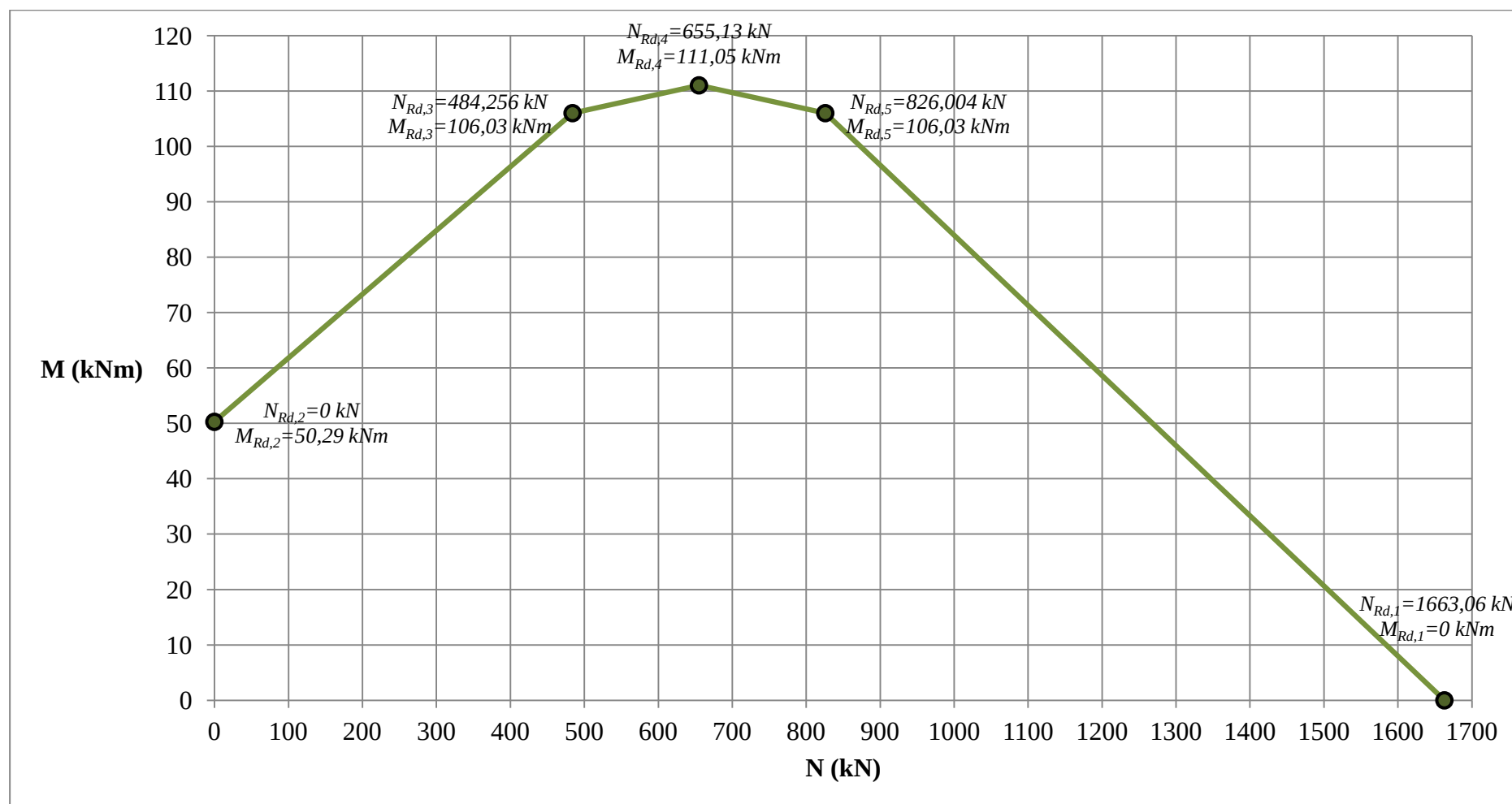
4.2. Talpcsomópont teherbírásának meghatározása IPE szelvényű oszlop esetén

Ebben a fejezetben egy IPE 240 szelvényű oszlopot vizsgálunk, S235 anyagminőséggel. Az oszlopszelvény 4 db M20-5.6. anyagminőségű lehorgonyzó-csavarral van rögzítve a $t_p=30$ mm vastagságú talplemezen keresztül a négyszög keresztmetszetű alaptesthez. Az alaptest C20/25 minőségű betonból készül, befoglaló méretei: $1200 \times 1200 \times 1200$ mm. Feladatom, hogy meghatározzam az oszloptalp teherbírását, az emelőerő (Q) hatásának elhanyagolásával.



9. ábra: A talpcsomópont kialakítása

A számítások mellőzésével a kapott eredményeket a 10. ábrán látható teherbírási vonal foglalja magában.

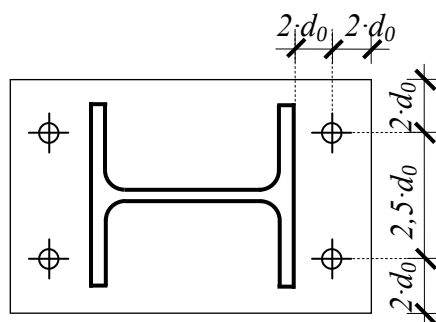


10. ábra: IPE 240 szelvényű oszlop talpcsomópontjának teherbírási vonala, egyensúlyi egyenletek alapján

4.3. Talpcsomópont teherbírása különböző méretű HEA és IPE szelvényű oszlopok esetén

A 3. és 4. táblázatban összefoglaltam különböző szelvényméretű melegen hengerelt HEA és IPE szelvényű oszlopok talpcsomópontjainak teherbírására kapott értékeket, mind az egyensúlyi egyenletek segítségével, mind a szabvány előírásai alapján; továbbá a táblázat tartalmazza a két számítási eljárással kapott eredmények közötti eltéréseket is.

A számítások során az egyes talpcsomópontoknál állandó értéknek tekintettem a talplemez vastagságát (30 mm), valamint a lehorgonyzó-csavarok övlemeztől mért, és talplemez szélétől mért távolságát a csavarátmérő függvényében egységesen $2 \cdot d_0$ értékre választottam (11. ábra). Az egységesen 5.6 minőségű csavarok átmérőjét úgy választottam ki, hogy a helyettesítő húzott T-elem teherbírása közelítőleg egyezzen meg a húzott csavarok teherbírásával. Ebben a vizsgálatban a HEA 160, valamint az IPE 240 szelvényű oszlophoz tartozó talpcsomópont kialakítása nem teljesen azonos a korábbi fejezetekben szereplő kialakítással, ennek megfelelően a kapott teherbírási értékek sem teljesen azonosak.



11. ábra: A talpcsomópontok kialakítása

Szelvény megnevezése	Teherbírási vonal értékei		EC-3 szabvány értékei		% -os eltérés	
HEA 160	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{j,Rd}$	$M_{j,Rd}$	N	M
1. pont	1658,13	0	1567,68	0	6	0
2. pont	0	50,7	0	50,7	0	0
3. pont	529,68	88,58	529,68	88,58	0	0
4. pont	574,91	88,93	529,68	85,57	9	4
5. pont	620,13	88,58	529,68	82,47	17	7
HEA 180	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{j,Rd}$	$M_{j,Rd}$	N	M
1. pont	1837,21	0	1694,52	0	8	0
2. pont	0	55,47	0	55,47	0	0
3. pont	593,1	103,36	593,1	103,36	0	0
4. pont	664,44	104,24	593,1	98,54	12	0

A táblázat a következő oldalon folytatódik.

5. pont	735,79	103,36	593,1	93,45	24	11
HEA 200	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2018,24	0	1822,42	0	11	0
2. pont	0	74,73	0	74,73	0	0
3. pont	606,2	129,28	606,2	129,28	0	0
4. pont	704,12	130,93	606,2	121,75	16	8
5. pont	802,03	129,28	606,2	113,81	32	14
HEA 220	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2209,43	0	1959,99	0	13	0
2. pont	0	85,72	0	85,72	0	0
3. pont	655,93	150,98	655,93	150,98	0	0
4. pont	780,65	153,64	655,93	141	19	9
5. pont	905,37	150,98	655,93	130,29	38	16
HEA 240	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2403,24	0	2099,7	0	14	0
2. pont	0	93,86	0	93,86	0	0
3. pont	719,37	172,27	719,37	172,27	0	0
4. pont	871,14	176,18	719,37	159,84	21	10
5. pont	1022,91	172,27	719,37	146,22	42	18
HEA 260	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2591,31	0	2231,87	0	16	0
2. pont	0	100,38	0	100,38	0	0
3. pont	785,45	193,66	785,45	193,66	0	0
4. pont	965,17	199,14	785,45	178,72	23	11
5. pont	1144,89	193,66	785,45	161,9	46	20
HEA 280	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2782,33	0	2365,1	0	18	0
2. pont	0	106,91	0	106,91	0	0
3. pont	852,07	216,4	852,07	216,4	0	0
4. pont	1060,68	223,76	852,07	198,8	24	13
5. pont	1269,3	216,4	852,07	178,45	49	21
HEA 300	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2982,69	0	2510,14	0	19	0
2. pont	0	113,35	0	113,35	0	0
3. pont	924,59	240,95	924,59	240,95	0	0
4. pont	1160,87	250,35	924,59	220,7	26	13
5. pont	1397,14	240,95	924,59	196,69	51	23
HEA 320	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3067,74	0	2542,37	0	21	0
2. pont	0	119,72	0	119,72	0	0
3. pont	940,7	258,23	940,7	258,23	0	0
4. pont	1203,39	269,8	940,7	235,07	28	15
5. pont	1466,07	258,23	940,7	207,37	56	25
HEA 320	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3067,74	0	2542,37	0	21	0
2. pont	0	119,72	0	119,72	0	0

A táblázat a következő oldalon folytatódik.

3. pont	940,7	258,23	940,7	258,23	0	0
4. pont	1203,39	269,8	940,7	235,07	28	15
5. pont	1466,07	258,23	940,7	207,37	56	25
HEA 340	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3145,49	0	2563,85	0	23	0
2. pont	0	126,16	0	126,16	0	0
3. pont	951,45	275,3	951,45	275,3	0	0
4. pont	1242,27	289,42	951,45	248,95	31	16
5. pont	1533,09	275,3	951,45	217,21	61	27
HEA 360	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3223,73	0	2585,34	0	25	0
2. pont	0	132,61	0	132,61	0	0
3. pont	962,19	292,57	962,19	292,57	0	0
4. pont	1281,38	309,5	962,19	262,9	33	18
5. pont	1600,58	292,57	962,19	226,93	66	29
HEA 400	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3373,93	0	2617,56	0	29	0
2. pont	0	145,58	0	145,58	0	0
3. pont	978,3	327,05	978,3	327,05	0	0
4. pont	1356,48	350,61	978,3	290,21	39	21
5. pont	1734,67	327,05	978,3	245,07	77	33
HEA 450	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3560,47	0	2660,53	0	34	0
2. pont	0	161,77	0	161,77	0	0
3. pont	999,79	371,23	999,79	371,23	0	0
4. pont	1449,75	404,43	999,79	324,98	45	24
5. pont	1899,72	371,23	999,79	267,65	90	39
HEA 500	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3712,92	0	2660,53	0	40	0
2. pont	0	178,29	0	178,29	0	0
3. pont	999,79	412,74	999,79	412,74	0	0
4. pont	1525,98	485,15	999,79	356,01	53	36
5. pont	2052,17	412,74	999,79	285,19	105	45
HEA 550	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3921,9	0	2724,99	0	44	0
2. pont	0	194,32	0	194,32	0	0
3. pont	1032,01	460,58	1032,01	460,58	0	0
4. pont	1630,47	518,81	1032,01	393,28	58	32
5. pont	2228,93	460,58	1032,01	308,49	116	49
HEA 600	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	4096,84	0	2746,47	0	49	0
2. pont	0	210,68	0	210,68	0	0
3. pont	1042,76	505,26	1042,76	505,26	0	0
4. pont	1717,94	579,05	1042,76	426,37	65	36
5. pont	2393,13	505,26	1042,76	326,48	129	55

3. táblázat: HEA szelvényű talpcsomópontok teherbírásának számítása során kapott eredmények

Szelvény megnevezése	Teherbírési vonal értékei		EC-3 szabvány értékei		% -os eltérés	
IPE 160	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	1168,32	0	1046,5	0	12	0
2. pont	0	44,23	0	44,23	0	0
3. pont	306,76	67,63	306,76	67,63	0	0
4. pont	367,67	68,28	306,76	63,28	20	8
5. pont	428,58	67,63	306,76	59,02	40	15
IPE 180	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	1281,77	0	1105,39	0	16	0
2. pont	0	48,87	0	48,87	0	0
3. pont	334,54	77,64	334,54	77,64	0	0
4. pont	422,72	78,99	334,54	71,21	26	11
5. pont	510,91	77,64	334,54	64,88	53	20
IPE 200	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	1395,63	0	1163,82	0	20	0
2. pont	0	53,18	0	53,18	0	0
3. pont	363,75	88,01	363,75	88,01	0	0
4. pont	479,65	90,33	363,75	79,42	32	14
5. pont	595,56	88,01	363,75	70,87	64	24
IPE 220	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	1517,27	0	1230,89	0	23	0
2. pont	0	57,46	0	57,46	0	0
3. pont	397,28	99,34	397,28	99,34	0	0
4. pont	540,47	102,87	397,28	88,58	36	16
5. pont	683,66	99,34	397,28	77,66	72	28
IPE 240	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	1680,44	0	1338,61	0	26	0
2. pont	0	71,63	0	71,63	0	0
3. pont	419,82	119,95	419,82	119,95	0	0
4. pont	590,74	124,97	419,82	105,99	41	18
5. pont	761,66	119,95	419,82	91,85	81	31
IPE 270	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	1862,09	0	1433,79	0	30	0
2. pont	0	80,54	0	80,54	0	0
3. pont	462,74	140,65	462,74	140,65	0	0
4. pont	676,89	148,51	462,74	122,65	46	21
5. pont	891,04	140,65	462,74	103,99	93	35
IPE 300	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	2046,24	0	1530,96	0	34	0
2. pont	0	88,1	0	88,1	0	0
3. pont	511,32	162,07	511,32	162,07	0	0
4. pont	768,96	173,39	511,32	139,97	50	24
5. pont	1026,59	162,07	511,32	116,41	101	39
IPE 330	N_{Rd}	M_{Rd}	$N_{i,Rd}$	$M_{i,Rd}$	N	M
1. pont	2203,44	0	1602,73	0	37	0

A táblázat a következő oldalon folytatódik.

2. pont	0	95,63	0	95,63	0	0
3. pont	547,2	182,77	547,2	182,77	0	0
4. pont	847,56	198,1	547,2	156,35	55	27
5. pont	1147,91	182,77	547,2	127,6	110	43
IPE 360	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2366,17	0	1681,17	0	41	0
2. pont	0	103,1	0	103,1	0	0
3. pont	586,42	204,93	586,42	204,93	0	0
4. pont	928,93	224,78	586,42	174,08	58	29
5. pont	1271,43	204,93	586,42	139,78	117	47
IPE 400	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2557,68	0	1754,86	0	46	0
2. pont	0	129,6	0	129,6	0	0
3. pont	591,49	243,91	591,49	243,91	0	0
4. pont	992,9	271,02	591,49	203,68	68	33
5. pont	1394,31	243,91	591,49	159,95	136	52
IPE 450	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	2785,73	0	1834,08	0	52	0
2. pont	0	148,53	0	148,53	0	0
3. pont	621,57	283,85	621,57	283,85	0	0
4. pont	1097,39	321,67	621,57	233,74	77	38
5. pont	1573,21	283,85	621,57	178,71	153	59
IPE 500	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3020,03	0	1919,32	0	57	0
2. pont	0	168,36	0	168,36	0	0
3. pont	654,66	326,79	654,66	326,79	0	0
4. pont	1205,01	377,03	654,66	266,09	84	42
5. pont	1755,36	326,79	654,66	198,76	168	64
IPE 550	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3256,81	0	2002,72	0	63	0
2. pont	0	189,16	0	189,16	100	0
3. pont	686,83	372,13	686,83	372,13	100	0
4. pont	1313,87	436,84	686,83	299,97	91	46
5. pont	1940,91	372,13	686,83	219,21	183	70
IPE 600	N_{Rd}	M_{Rd}	N_{i,Rd}	M_{i,Rd}	N	M
1. pont	3503,82	0	2097,73	0	67	0
2. pont	0	210,81	0	210,81	0	0
3. pont	724,8	421,36	724,8	421,36	0	0
4. pont	1427,84	502,06	724,8	337,13	97	49
5. pont	2130,88	421,36	724,8	241,9	194	74

4. táblázat: IPE szelvényű talpcsomópontok teherbírásának számítása során kapott eredmények

5. Eredmények kiértékelése

A HEA 160 és IPE 240 szelvényméretű oszlop talpcsomópontjának teherbírására vonatkozó számításaim során kapott eredményeket táblázatban foglaltam össze (5. és 6. táblázat). További számításokat végeztem HEA és IPE szelvényű oszlopok talpcsomópontjainak teherbírására vonatkozóan, melynek eredményeit a 3. és 4. táblázat tartalmazza.

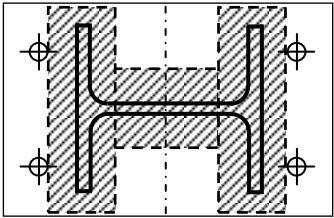
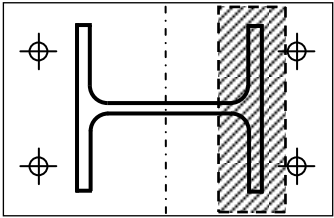
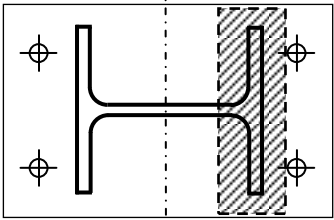
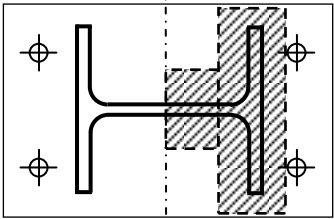
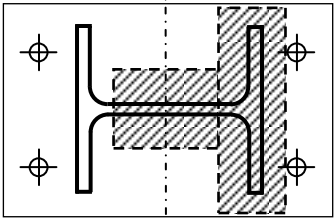
Az **1. pont** (központos nyomás) esetében a nyomási ellenállás ($N_{j,Rd}$) értékében tapasztalható differencia abból ered, hogy a szabvány egyszerűsítésből, csak az övek alatt kialakuló nyomott zóna nyomási teherbírásával számol, a gerinc alatti nyomott zónát elhanyagolja az effektív keresztmetszeti terület meghatározásánál. Az eltérés a HEA 160 szelvény esetén nem jelentős (6%), a szelvényméret növelésével azonban már számottevő eltéréseket kapunk, HEA 600 szelvény esetén közel 50%-os eltérés tapasztalható. IPE szelvények esetén az eltérés jelentősebb, ami azzal magyarázható, hogy a gerinclemez alatti nyomott zóna nagyobb kiterjedésű, mint a HEA szelvényeknél. Itt az eltérés 12-67% közötti, a két eljárással kapott nyomási ellenállás értékeiben.

A **2. pont** (tisztá hajlítás) és a **3. pont** (külpontos nyomás) esetében a nyomási ellenállás ($N_{j,Rd}$) és nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) értékei azonosra adódnak az egyensúlyi egyenletek, valamint az Eurocode szabvány összefüggései alapján. A **2. pont** (tisztá hajlítás) esetében az egyezés azzal magyarázható, hogy a húzott T-elem teherbírása mindig kisebbre adódik a nyomott T-elem teherbírásánál, ennek megfelelően a nyomatéki ellenállást a húzott T-elem határozza meg, vagyis független a nyomott zóna méretétől. A **3. pont** a külpontos nyomás triviális esete, a kialakuló nyomott zóna kiterjedése éppen megegyezik az egyik öv alatti effektív területtel, egyben megegyezik azzal a nyomott zónával, mely figyelembe vételét a szabvány előírja; az ekvivalencia tehát egyértelmű.

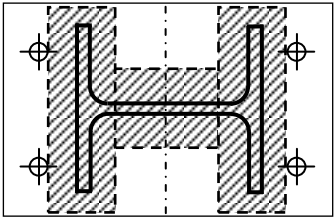
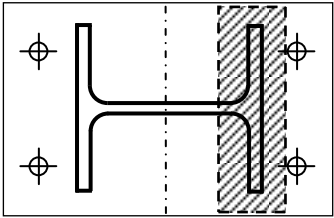
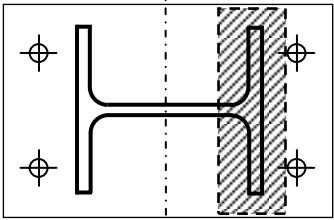
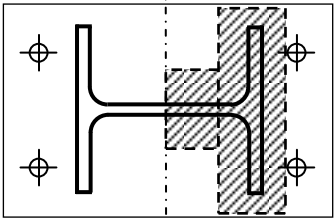
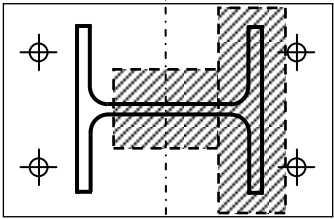
A 4. és 5. pont (külpontos nyomás) eseteiben már a nyomatéki ellenállásban ($M_{j,Rd}$) is tapasztalhatók eltérések, mely abból ered, hogy a szabványban található egyszerűsítést felhasználva, elhanyagoljuk a gerinc alatti nyomott zónát. A **4. pont** (külpontos nyomás) esetében a nyomatéki ellenállás ($M_{j,Rd}$) értékében az eltérés HEA 160 szelvény esetén még nem jelentős (4%), azonban HEA 600 szelvényénél már 36%-ra adódik. IPE szelvényeknél a nyomatéki ellenállás értékében az eltérések, a szelvény gerinclemezének kiterjedéséből eredően, 8-49% közötti értékekre adódik.

Az **5. pont** (külpontos nyomás) esetében a nyomatéki ellenállás értékében mutatkozó eltérés HEA 160 szelvény esetében 7%, HEA 600 szelvény esetén 55%. IPE szelvényeknél ez a nyomatéki ellenállás különbség akár 15-74 % lehet.

Az eredményekből megállapítható, hogy a szabványban szereplő egyszerűsített eljárás sok esetben túlságosan is a biztonság javára közelít, ugyanakkor alkalmazhatóságát tekintve nem nevezhető sokkal egyszerűbb számítási folyamatnak, mint az egyensúlyi egyenletek alkalmazása. A talpcsomópontok teherbírásának egyensúlyi egyenletekkel történő meghatározásának tehát létjogosultsága van.

Szelvény	A teherbírési vonal 5 jellemző pontjának ábrázolása (egyensúlyi egyenletek alapján)	Teherbírési vonal eredményei		EC-3 szabvány eredményei		Eltérés %-ban
HEA 160		N_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kNm]	$N_{j,Rd}$ [kN]	$M_{j,Rd}$ [kNm]	
1. pont: központos nyomás		1640,88	0	1550,46	0	N
						5,8
						M
						0
2. pont: tiszta hajlítás		0	34,84	0	34,84	N
						0
						M
						0
3. pont: külpontos nyomás		598,83	77,65	598,83	77,65	N
						0
						M
						0
4. pont: külpontos nyomás		644,04	78,01	598,83	75,04	N
						7,6
						M
						4,0
5. pont: külpontos nyomás		689,25	77,65	598,83	72,27	N
						15,1
						M
						7,4

5. táblázat: HEA 160 szelvényű oszloptalpak teherbírásának számítási eredményei

Szelvény	A teherbírési vonal 5 jellemző pontjának ábrázolása (egyensúlyi egyenletek alapján)	Teherbírési vonal eredményei		EC-3 szabvány eredményei		Eltérés %-ban
IPE 240		N_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kNm]	$N_{j,Rd}$ [kN]	$M_{j,Rd}$ [kNm]	
1. pont: központos nyomás		1663,06	0	1321,312	0	N
						25,9
						M
						0
2. pont: tiszta hajlítás		0	50,29	0	50,29	N
						0
						M
						0
3. pont: külpontos nyomás		484,256	106,03	484,256	106,03	N
						0
						M
						0
4. pont: külpontos nyomás		655,13	111,05	484,256	94,04	N
						35,3
						M
						18,1
5. pont: külpontos nyomás		826,004	106,03	484,256	81,03	N
						70,6
						M
						30,9

6. táblázat: IPE 240 szelvényű oszloptalpak teherbírásának számítási eredményei

6. Alkalmazott jelölések

a_c	a varrat magassága
A_{eff}	effektív keresztmetszeti terület
$A_{eff,1}$	T-elem 1 effektív keresztmetszeti területe
$A_{eff,2}$	T-elem 2 effektív keresztmetszeti területe
A_s	csavar húzási keresztmetszete
b_{eff}	T-elem effektív szélessége, hatékony szélesség
$b_{eff,1}$	T-elem 1 effektív szélessége
$b_{eff,2}$	T-elem 2 effektív szélessége
$B_{p,Rd}$	a csavar és lemez együttes kigombolódási ellenállása
d	csavar átmérő
d_m	a kigombolódásnál figyelembe vehető átmérő
e	külpontosság
$F_{b,t,Rd}$	a csavar húzási ellenállása
$F_{c,Rd}$	T-elem nyomási ellenállása
f_{cd}	az alaptest (beton) nyomószilárdságának tervezési értéke
f_{ck}	az alaptest (beton) nyomószilárdságának karakterisztikus értéke
f_{jd}	kapcsolódó rész terhelhetősége
$F_{Rd,u}$	alap(test) koncentrált teherként értelmezett ellenállásának értéke
$F_{T,3,Rd}$	T-elem húzási ellenállása a csavarok törése esetén
$F_{T,Rd}$	T-elem húzási ellenállása
$F_{t,Rd}$	csavar húzásra való tönkremeneteléhez tartozó ellenállás

$F_{T1-2,Rd}$	T-elem húzási ellenállása az öv teljes folyása és a csavarok törése esetén
f_u	szakítószilárdság karakterisztikus értéke
f_{ub}	csavar szakítószilárdságának karakterisztikus értéke
f_y	folyási feszültség karakterisztikus értéke
L_b	csavar nyúlási hossza
l_{eff}	T-elem effektív hossza
$l_{eff,1}$	T-elem 1 effektív hossza
$l_{eff,2}$	T-elem 2 effektív hossza
m	anya magasságának fele
M_{Ed}	nyomaték tervezési értéke
$M_{j,Rd}$	nyomatéki ellenállás értéke talpcsomópontok esetében
$M_{pl,1,Rd}$	T-elem képlékeny nyomatéki ellenállása az öv teljes folyása esetén
M_{Rd}	nyomatéki ellenállás értéke
N_{Ed}	normálerő tervezési értéke
$N_{j,Rd}$	nyomási ellenállás értéke talpcsomópontok esetében
N_{Rd}	nyomási ellenállás értéke
Q	emelőerő
t_h	az ágyazó habarcs vastagsága
t_p	homloklemez (talplemez) vastagsága
z_C	a nyomott zóna súlypontjának a szimmetriatengelytől mért távolsága – a nyomott keresztmetszeti területhez tartozó erőkar
$z_{C,l}$	a bal oldali nyomott keresztmetszeti területhez tartozó erőkar

$z_{C,r}$	a jobb oldali nyomott keresztmetszeti területéhez tartozó erőkar
z_T	a húzott keresztmetszeti területéhez tartozó erőkar
$z_{T,l}$	a bal oldali húzott keresztmetszeti területéhez tartozó erőkar
$z_{T,r}$	a jobb oldali húzott keresztmetszeti területéhez tartozó erőkar
γ_c	beton parciális biztonsági tényező, értéke: 1,15
γ_{M2}	parciális biztonsági tényező szilárdsági vizsgálatokhoz- képlékeny törés esetén- értéke: 1,25
γ_{Mo}	parciális biztonsági tényező szilárdsági vizsgálatokhoz-első folyás és korlátolatlan folyás esetén- értéke: 1,0

7. Felhasznált irodalom

- [1] Ádány S., Dulácska E., Dunai L., Fernezelyi S., Horváth L., Acélszerkezetek, 1.Általános eljárások, Tervezés az Eurocode alapján, Springer Média Magyarország kiadó, 2007.
- [2] Ádány S., Dulácska E., Dunai L., Fernezelyi S., Horváth L., Acélszerkezetek, 2.Speciális eljárások, Tervezés az Eurocode alapján, Springer Média Magyarország kiadó, 2007.
- [3] MSZ-EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-8. rész: Csomópontok tervezése
- [4] František Wald, Patky sloupů -Column Bases, ČVUT, Prague 1995, ISBN 80-01-01337-5.
- [5] F. Wald, Z. Sokol, C.M. Steenhuis, J.P. Jaspart, Component method for steel column bases, HERON Volume 53,issue 1/2, Special Issue: Steel column bases, 2008.
- [6] F. Wald, Z. Sokol, J.P. Jaspart, Base plate in bending and anchor bolts in tension, HERON Volume 53,issue 1/2, Special Issue: Steel column bases, 2008.
- [7] C.M. Steenhuis, F. Wald, Z. Sokol, J.W.B. Stark, Concrete in compression and base plate in bending, HERON Volume 53,issue 1/2, Special Issue: Steel column bases, 2008.
- [8] MSZ-EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok