

# Hagyományos- és feszített öszvérszerkezetű hidak számítása L=45m

## Calculation of conventional- and prestressed composite bridges L = 45m

MOLNÁR Lajos, doktorandusz

Kolozsvári Műszaki Egyetem – Közlekedésépítő szak

### ABSTRACT

*The material describes the theoretical approach to the calculation of conventional- and prestressed composite bridge structures and its use through practical examples*

**Keywords:** civil engineering, steel-concrete composite bridges, tensioning

### KIVONAT

*Az anyag ismerteti a hagyományos- és feszített öszvérszerkezetű hidak számításának elméleti megközelítését és ezen felhasználását gyakorlati példákon keresztül*

**Kulcsszavak:** közlekedésépítés, öszvérszerkezetű hidak, feszítések

### 1. BEVEZETÉS

Célunk a hagyományos acél-beton öszvérszerkezetű hidak fel-szerkezete súlyának és magasságának csökkentése, ezáltal csökkentve az alapok méretét valamint a felhajtók töltés magasságát, kábel, rúd felhasználásával külső feszültségeket vezetve az öszvérszerkezet szerkezeti acél elemébe.

A következőkben a hagyományos, minimális költségekkel legyártott hengerelt I tartókat felhasználva, mutatjuk be a szerkezeti elemek legyártásával és a híd építésével kibocsájtott szén-dioxid mennyiség csökkenését az új technológia felhasználásával.

### 2. AZ ÖSZVÉRSZERKEZETŰ TARTÓK SZÁMÍTÁSÁHOZ HASZNÁLT MÓDSZEREK BEMUTATÁSA

A számítási módszerek kialakításakor a következő lépéseket veszik figyelembe:

a). meghatározzuk a karakterisztikus és a számítási hatásokat:

- közvetlen hatások: a karakterisztikus hatások értéke megegyezik a terhelések névleges értékeivel a szabványok figyelembevételével;
- közvetett hatások: hosszú ideig tartó állandó vagy ideiglenes alakváltozások - a támaszok elmozdulásai, az acélgerenda előhajlításának deformációi, a beton összehúzódása, a beton lassú folyása- illetve ideiglenesen, rövid ideig tartó hőmérsékletváltozások.

b). módszer:

- A kompozit szerkezetű hidakhoz ajánlott, a Megengedett Szilárdság Módszere, a felhasznált anyagok rugalmas viselkedésén alapul, és ezt a következő módon hajtják végre:
  - a normál egység feszültségek ellenőrzése rövid, illetve hosszú távú hatásokra
  - a tangenciális egység feszültségek ellenőrzése,
  - ismételt terhelések ellenőrzése,
  - kiszámítják a hajlítási alakváltozásokat.
- A polgári és ipari építményekhez ajánlott, a Határállapot Módszer, a felhasznált anyagok rugalmas-plasztikus viselkedésén alapul, és a következőket végzik:
  - ellenőrzés a teherbírás határállapotánál - ellenállás, alakstabilitás, fáradtság-
  - hitelesítés a működési határállapotnál - lehajlás, specifikus kritikus alakváltozás-

### 3. A FESZÍTÉS ALKALMAZÁSA AZ EUROCODE SZERINT

A modern európai tervezési keretben az EUROCODE, nevezetesen az EC4 - öszvér acél / beton kompozit szerkezetek, nem utal az előfeszítés vagy az utófeszítés lehetőségének alkalmazására. Az egyetlen mód az EC3.1.11 – feszítés alatt álló elemekkel ellátott (fém) szerkezetek tervezése – figyelembevétele, ezek a követelmények főleg a feszített kábelekre / rudakra vonatkoznak, amelyeket fém vagy vegyes / kompozit szerkezetű hidakhoz használnak a pályalemez alátámasztására (függesztett vagy ferdekábeles hidak esetében).

A feszített kábeleket a következők szerint ellenőrzik:

#### 3.1. Teherbírási határállapot (ULS)

##### 3.1.1. Húzott rudas rendszerek

A húzott rudas rendszereket teherbírási határállapotra általában a felhasznált acél típusától függően az EN 1993-1-1 vagy az EN 1993-1-4 szerint kell megtervezni.

##### 3.1.2. Feszítőrudak, valamint B és C osztályú elemek

(1) P Teherbírási határállapotban a következőt kell igazolni:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} < 1 \quad (3.1)$$

ahol:

$F_{Ed}$  a kötélben fellépő húzóerő tervezési értéke;

$F_{Rd}$  a húzási ellenállás tervezési értéke.

(2) A húzási ellenállás  $F_{Rd}$  tervezési értékét általában a következőképpen kell felvenni:

$$F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5 \gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R} \right\} \quad (3.2)$$

ahol:

$F_{uk}$  a szakítóerő karakterisztikus értéke;

$F_k$  a húzott elem névleges folyáshatárához tartozó erő karakterisztikus értéket;

$\gamma_R$  a parciális tényező.

1. Megjegyzés: Az  $F_{uk}$  a húzószilárdság karakterisztikus értékéhez tartozó erő.
2. Megjegyzés: Az  $F_k$  figyelembevételével végzett ellenőrzés biztosítja, hogy az elem rugalmas marad, ha a hatások elérik a tervezési értéküket. Az olyan elemek (pl. zárt spirális kötelek) esetén, melyekre  $F_k \geq F_{uk}/1,5$ , ezt az ellenőrzést nem szükséges elvégezni.
3. Megjegyzés: Az átvételi vizsgálatok során azt igazolják, hogy az  $F_{uke}$  és az  $F_{ke}$  mért értékek kielégítik-e a következő követelményeket:  
 $F_{uke} > F_{uk}$ ,  $F_{ke} > F_k$ .
4. Megjegyzés: A  $\gamma_R$  parciális tényező értéke a nemzeti mellékletben írható elő. Az érték attól függ, hogy a kötélvégeknél alkalmaznak-e a kábel elfordulásából származó hajlítónyomatékokat csökkentő be-  
rendezéseket,

(3) Feszítőrudak és C osztályú húzott elemek esetén a szakítóerő karakterisztikus értéke általában a következőképpen határozható meg:

$$F_{uk} = A_m f_{uk} \quad (3.3)$$

ahol:

$A_m$  a fémkeresztmetszet;

$f_{uk}$  a feszítőrúd, a huzal vagy a (feszítő) pászma húzószilárdságának karakterisztikus értéke a vonatkozó szabvány szerint.

(4) A B osztályú húzott elemek esetén az  $F_{uk}$  általában a következőképpen határozható meg:

$$F_{uk} = F_{min} k_e \quad (3.4)$$

ahol:

$F_{min}$  értéke az EN 12385-2 szerint a következő:

$$F_{min} = \frac{K d^2 R_r}{1000} [kN] \quad (3.5)$$

ahol:

$K$  a sodrási veszteséget figyelembe vevő minimális szakítóerő tényező;

$d$  a kötélnévleges átmérője [mm];

$R_r$  a kötélzilárdsági osztály [ $N/mm^2$ ];

$k_e$  a veszteségtényező.

### 3.2. Használhatósági határállapot (SLS)

#### 3.2.1. Használhatósági követelmények

(1) A következő használhatósági követelményeket kell figyelembe venni:

1. Alakváltozások vagy rezgések;

2. Rugalmas állapot üzemi körülmények esetén.

1. MEGJEGYZÉS: Az alakváltozásokra és rezgésekre vonatkozó korlátozások egy olyan merevségi követelményt eredményezhetnek, mely a szerkezeti rendszertől, a méretektől, a nagyszilárdságú húzott elemek előterhelésének mértékétől és a csatlakozások megcsúszással szembeni ellenállásától függ.

2. MEGJEGYZÉS: A rugalmas állapot fenntartására és a tartósságra vonatkozó korlátozások a használhatósági teherkombinációkból számított feszültségek legkisebb és legnagyobb értékeivel kapcsolatosak.

(2) A kábel hajlítása miatt a lehorgonyzásban fellépő feszültségek megfelelő eszközökkel (pl. a keresztirányú terhelés felvételére alkalmazott neopren zsámolyokkal) csökkenthetők.

#### 3.2.2. Feszültségkorlátok

(1) Feszültségkorlátok a karakterisztikus teherkombinációra vonatkozóan írhatók elő a következők okokból:

- a feszültségek rugalmas tartományban tartása a vonatkozó tervezési állapotokban az építés vagy az üzemszerű működés során;
- az alakváltozások korlátozása olyan mértékűre, hogy túlzott korróziós veszélyeztetettség, pl. védőcsövek, szilárd kitöltő anyagok megrepedése, hézagok megnyílása stb. miatti intézkedésekre ne legyen szükség, továbbá, hogy korlátozza a bizonytalanságok kedvezőtlen hatásait a fáradásra való tervezés során;
- rugalmas és rugalmashoz közeli szerkezeti válaszokra vonatkozó igazolások teherbírasi határállapotban.

(2) A feszültségkorlátokat általában a szakítószilárdság bizonyos hányadában kell megadni, a következők szerint:

$$\sigma_{uk} = \frac{F_{uk}}{A_m} \quad (3.6)$$

lásd a 3.3 összefüggést

1. Megjegyzés: Az  $f_{const}$  és  $f_{SLS}$  feszültségkorlátok értékeit a nemzeti mellékletben lehet megadni

2. Megjegyzés: A feszültségkorlát a következő összefüggésből származik:

$$f_{const} = \frac{\sigma_{uk}}{1,5 \gamma_r \gamma_f} = \frac{0,66 \sigma_{uk}}{\gamma_r \gamma_f} \quad (3.7)$$

ahol:

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,1 = 1,1 \text{ rövid időtartamú esetekre;}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,2 = 1,2 \text{ hosszú időtartamú esetekre.}$$

3. Megjegyzés: A feszültségkorlát a következő összefüggésből származik:

$$f_{SLS} = \frac{\sigma_{uk}}{1,5 \gamma_r \gamma_f} = \frac{0,66 \sigma_{uk}}{\gamma_r \gamma_f} \quad (3.8)$$

ahol:

$$\gamma_R \times \gamma_F = 0,9 \times 1,48 = 1,33 \text{ a hajlításból származó feszültségek figyelembevételével;}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,48 = 1,48 \text{ a hajlításból származó feszültségek figyelmen kívül hagyásával.}$$

$$\gamma_F \approx \gamma_Q = 1,50 \approx 1,48.$$

4. Megjegyzés: Kísérletek végrehajtása során  $f_{SLS} = 0,45 \sigma_{uk}$  feszültségkorlátot alkalmazunk.

### 3.3. Az erőtani követelmények - EUROCODE 0 szerint

Az erőtani (teherbírasi, használhatósági) követelmény teljesülésének vizsgálatára szolgáló kiinduló adatok

a). a teherbírasi ellenőrzéséhez (3.1 ábra)

- a hatás  $F_k$ , illetve az ellenállás  $R_k$  karakterisztikus értékeiből számítható  $E_d(ME_d, NE_d, VE_d, TE_d)$  igénybevételek, továbbá a szilárdsági, vagy a másodrendű hatásokból származó stabilitásvesztési ellenállás  $R_d(MR_d, NR_d, VR_d, TR_d)$  tervezési értéke,
- a szerkezet helyzeti állékonyságát (elcsúszását, felborulását, felúszását) destabilizáló ( $E_d, d_{st}$ ), illetve stabilizáló ( $E_d, stb$ ) állapotjellemzők,
- a fáradás következtében kialakuló törési állapothoz tartozó  $D_d$  tönkremeneteli állapotjellemző,
- a tűzállósággal kapcsolatban a TR ellenállás-megmaradási és TE értékmentési idő.

A teherbírasi követelmények teljesülnek, ha az

$$E_d(ME_d, NE_d, VE_d, TE_d) \leq R_d(MR_d, NR_d, VR_d, TR_d), \quad (3.9)$$

$$E_{d, d_{st}} \leq E_{d, stb}, \quad (3.10)$$

$$D_d \leq 1,0, \quad (3.11)$$

$$TE \leq TR, \quad (3.12) \text{ feltételek teljesülnek.}$$

Megjegyzés: 1) Az  $MR_d$ ,  $NR_d$ ,  $VR_d$  és  $TR_d$  (hajlító nyomaték, normálerő, nyírási erő, csavaró nyomaték) ellenállások képzésének módját a vonatkozó anyagszabványok tartalmazzák.

2) A helyzeti állékonyságra, a fáradási és tűzállósági vizsgálatokra a továbbiakban nem térünk ki, e feladatokkal más kiadványok és az egyes anyagszabványokkal foglalkozó dolgozatok tárgyalják.

b). a használhatóság ellenőrzéséhez

A tehercsoportosítások szerint számítható hatások:

$\sigma E_{,ser}$  - normálfeszültségek,

$y E_{,ser}$  – alakváltozások, eltolódások és

$w E_{,ser}$  - repedésmentességi, repedészáródási vagy repedésmegnyílási állapotjellemzők.

A használhatósági követelmények teljesülnek, ha az állapotjellemzők nem nagyobbak, mint a vonatkozó előírásokban található esztétikai, üzemeltetési, vagy korrózióvédelmi szempontból előírt, a tartós használhatóságot biztosító vonatkozó ( $\sigma_{adm}$ ,  $y_{adm}$ ,  $w_{adm}$ ) korlátértékek, azaz

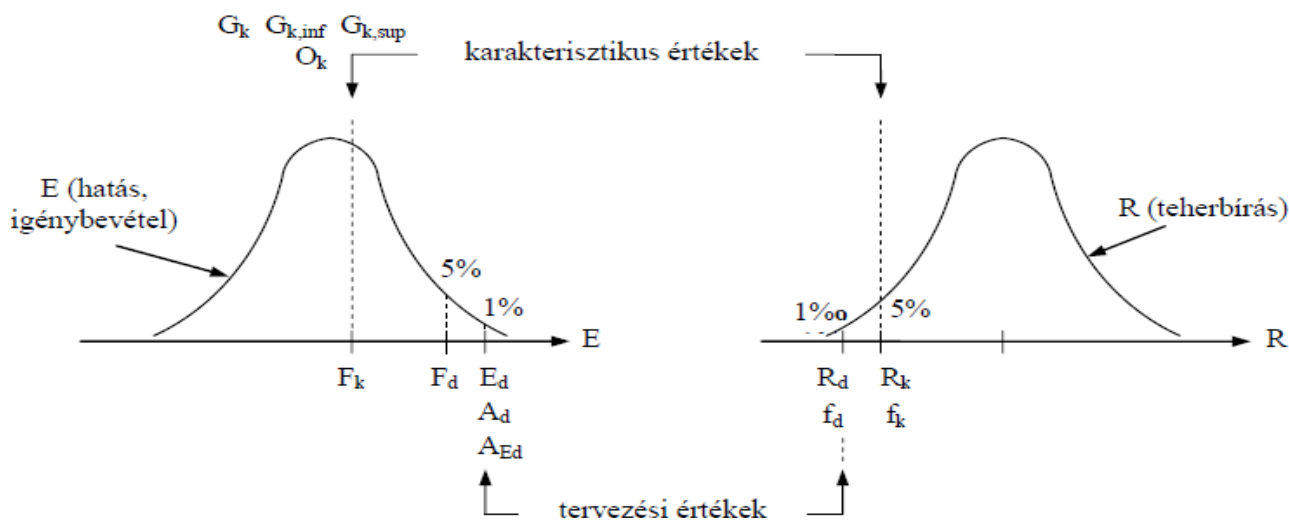
$$\sigma E_{,ser} \leq \sigma_{adm}, \quad (3.13)$$

$$y E_{,ser} \leq y_{adm}, \quad (3.14)$$

$$w E_{,ser} \leq w_{adm},$$

(3.15) feltételek, teljesülnek.

Megjegyzés: A  $\sigma E_{,ser}$ ,  $y E_{,ser}$  és  $w E_{,ser}$  (a normálfeszültség, alakváltozás, repedéstágasság)



3.1 ábra  
A méretezés alapelve

Az ábrában, a fentiekben nem szereplőkön kívüli jelölések:

$G_k$ , - az állandó teher karakterisztikus értéke (50%-os valószínűségi (átlag) érték),

$Q_k$  - a esetleges teher karakterisztikus értéke (adott referencia időszakra vonatkoztatott adott %-os küszöbérték),

$F_k$  - az egyedi hatás karakterisztikus értéke,

$F_d$  ( $G_d$ ,  $Q_d$ ) – az egyedi hatás tervezési értéke ( $\approx 5\%$ ),

$E_d$  - a hatás-, vagy teher-csoport tervezési értéke ( $\approx 99\%$ ),

$A_d$  – a rendkívüli hatás (pl. ütközés, rendkívüli meteorológiai hatás (pl. hóteher) tervezési értéke,

$A_{Ed}$  – a földrengési hatás tervezési értéke,

$R_k$ ,  $f_k$  - a teherbírás, a szilárdság karakterisztikus értéke (5%)

$R_d$ ,  $f_d$  - a teherbírás, a szilárdság tervezési értéke ( $\approx 1\%$ )

### 3.4. Lehajlások

#### a). Követelmények

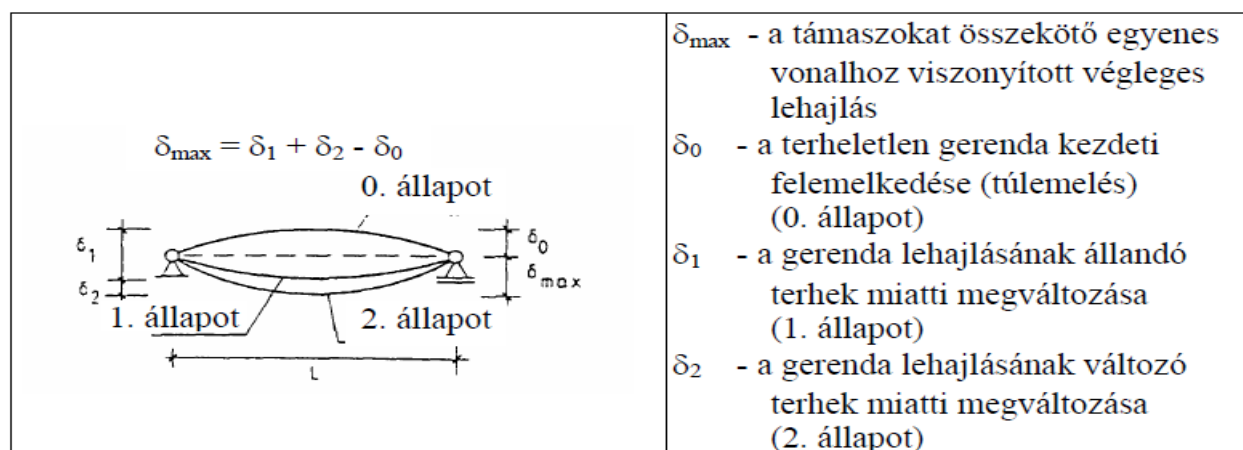
(1) Az acélszerkezeteket és alkotóelemeiket úgy kell kialakítani, hogy a lehajlások azon határon belül legyenek, amelyben a megbízó, a tervező és az illetékes hatóságmegegyezett, és amely megfelel az épület tervezett használatának és használóinak, továbbá az alátámasztott anyagok természetének.

(2) A szabályzatban lévő adatok tapasztalati értékek. Ezek a számítási eredményekkel való összevetés céljára alkalmazandók, így nem értelmezhetők erőtani követelményként.

(3) A lehajlásokat a másodrendű hatásokra és a lehetséges képlékeny alakváltozásokra vonatkozóan tett megfelelő közelítésekkel kell számolni.

#### b). Határértékek

A függőleges lehajlások alakulását a 3.2 Ábra mutatja.



3.2 ábra

Figyelembe vett függőleges lehajlások

### 3.5. Kiegyenlítési tényezők / együtthatók

A kiegyenlítési (ekvivalencia) együtthatók megállapításához az EUROCODE 0-ban megadott variációs együtthatókat és variabilitási indexeket kell használni valószínűségi megfogalmazásban.

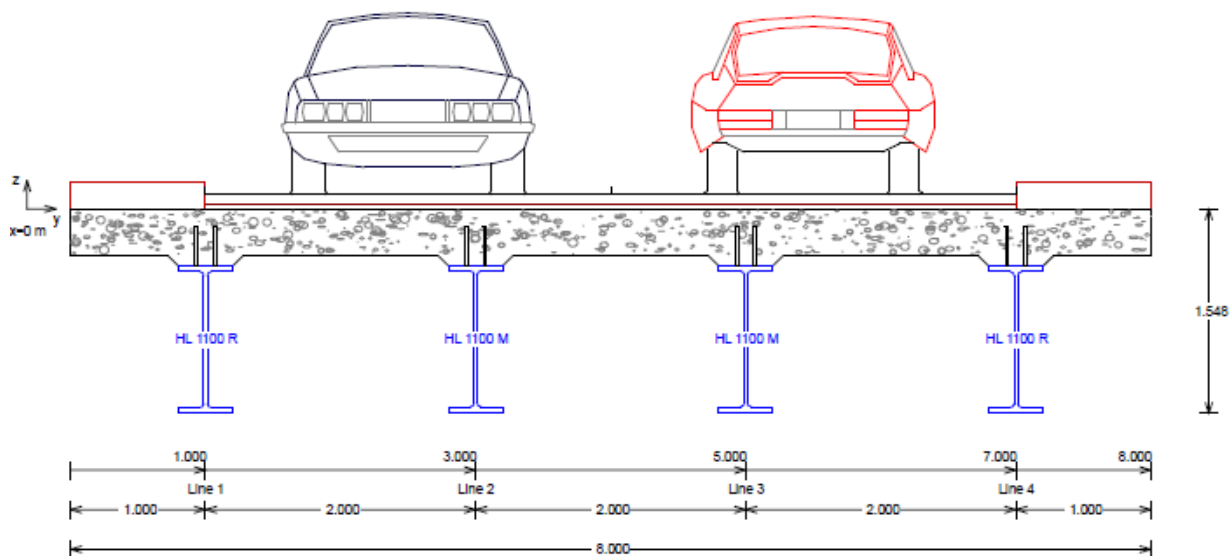
Biztonsági ellenőrzésekre van szükség ahhoz, hogy jelteni lehessen a cselekvések teljes hatását (amely magában foglalja az állandó tevékenységeket is). A biztonsági ellenőrzéseket a következő hipotézisek elfogadásával lehet végrehajtani:

- Gauss eloszlás az ellenálló képesség esetében;
- Gauss eloszlás az állandó terhek esetében;
- Gumble-Max eloszlás változó (hasznos) terhek esetében;
- Ellenálló képesség változási együtthatói 15%
- Szerkezeti súly változási együttható: 10%
- A nem szerkezeti súly változási együttható: 15%;
- Hasznos terhek variációs együtthatója: 25%;
- Biztonsági modell: különbségmodell;
- Megbízhatósági index  $\beta = 3,80$  az Eurocode-ban;
- A meghibásodás valószínűsége (Eurocode 0),  $P_f = 10^{-4}$ .

## 4. ÖSZVÉRSZERKEZETŰ HIDAK FELSZERKEZETÉNEK IGÉNYBEVÉTELE

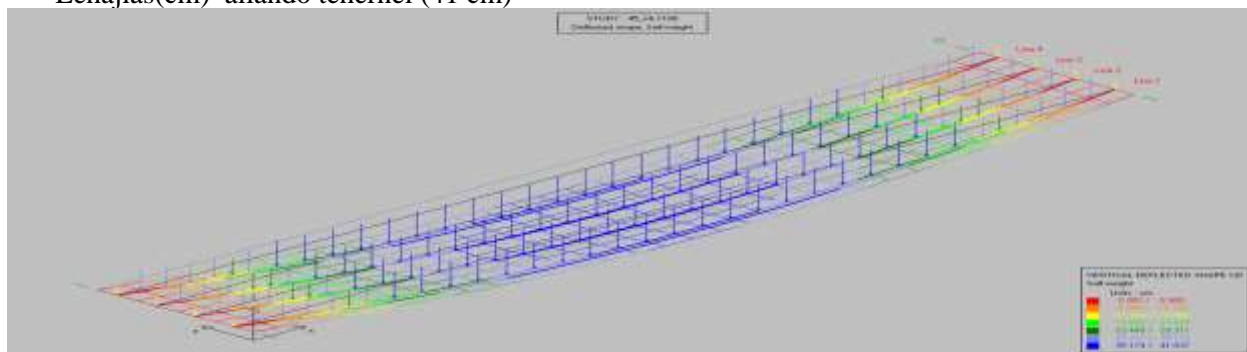
### 4.1. 4 db. acéltartós hagyományos öszvérszerkezetű híd

Az -  $L=45,0$  m  $B= 8,0$  m, 2x HL1100R(külső) + 2x HL1100M(belső) tartó,  $L=35$  m, 380x45 mm acél alsó talp vastagítással Histar S460 (ArcelorMittal) minőséggel ( $\varnothing 22 \times 250$  mm függőleges csapolással) valamint C40/50, 35 cm vastag ( $\varnothing 20$ mm vasalással) öntött beton lemez 8 cm ékeléssel - felszerkezetű híd előméretezéséhez az ACOBRI 5.08 előméretező programot használtuk.:



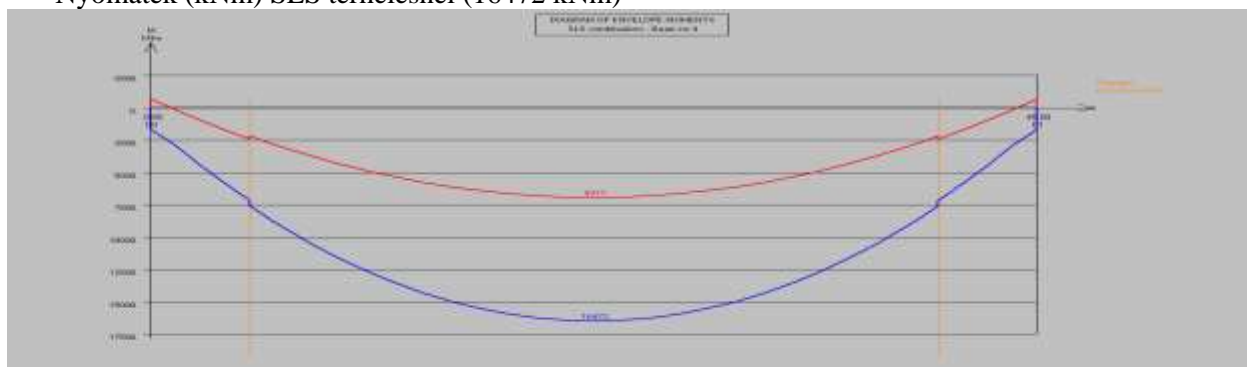
4.1 ábra  
ACOBRI program felület, szerkezet keresztmetszet

Lehajlás(cm) állandó tehernél (41 cm)



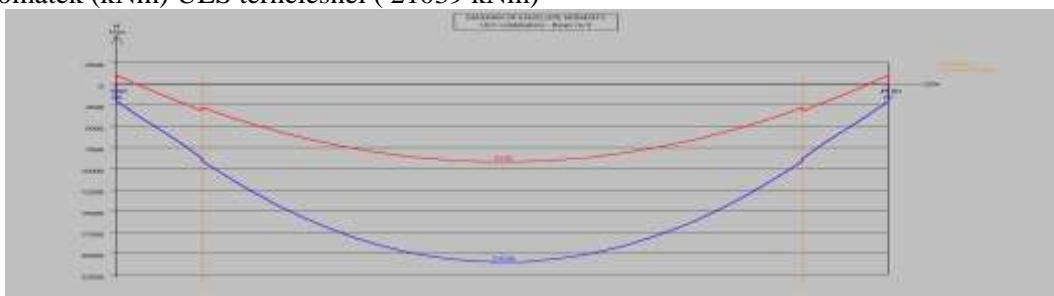
4.2 ábra  
Lehajlási ábra

Nyomaték (kNm) SLS terhelésnél (16472 kNm)



4.3 ábra  
Nyomaték ábra SLS

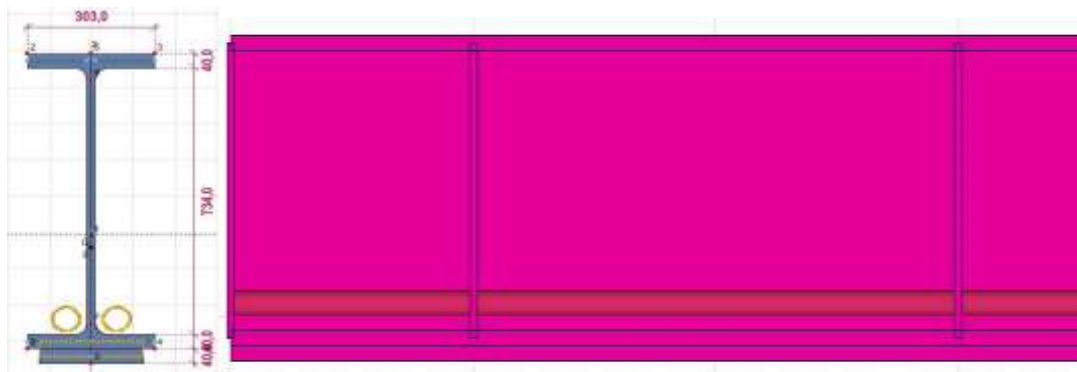
Nyomaték (kNm) ULS terhelésnél ( 21039 kNm)



4.4 ábra  
Nyomaték ábra ULS

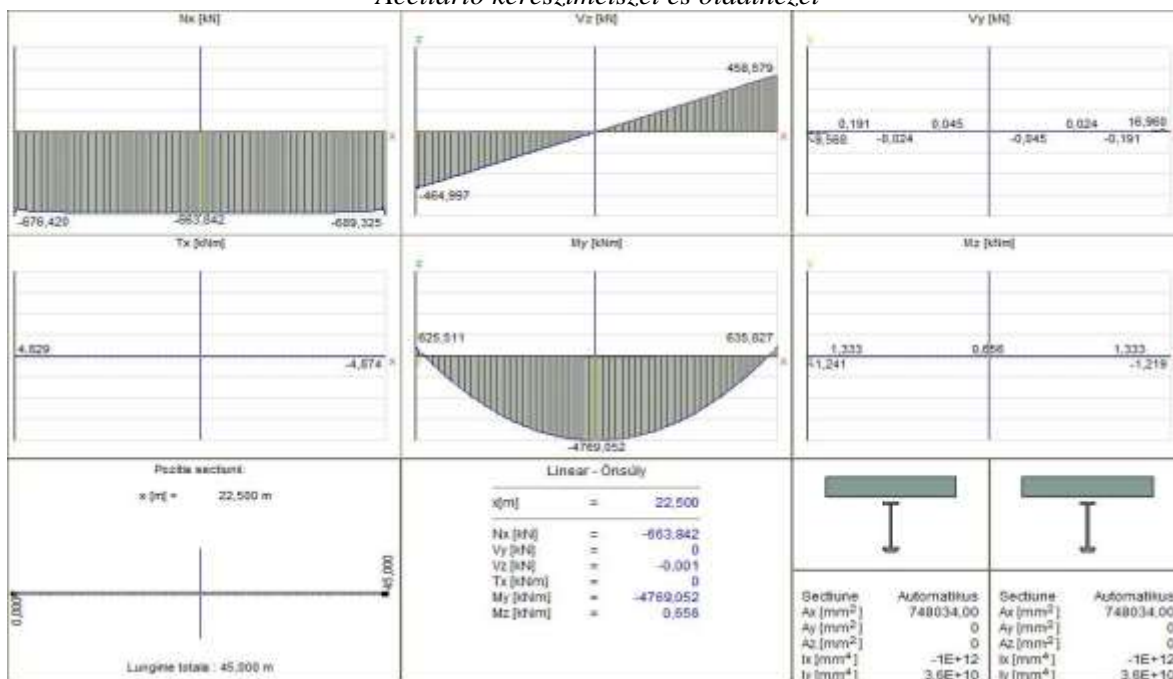
#### 4.2. 4 db. acéltartós feszített öszvérszerkezetű híd

A híd felszerkezete a következő paraméterekkel rendelkezik -  $L=45,0$  m  $B= 8,0$  m, 4x HE800M tartó,  $L=35$  m, 250x40 mm acél alsó talp vastagítással Histar S460 (ArcelorMittal) minőséggel ( $\varnothing 22 \times 250$  mm függőleges csapolással) valamint C40/50, 35 cm vastag ( $\varnothing 20$ mm vasalással) öntött beton lemez 8 cm ékeléssel. Feszítéshez BBR-VT CONA 24T15S pászmákat (CME n016-150 kábelekkel) használtunk tartónként két darabot az alsó talpak felső felületére helyezve és ezzel párhuzamosan a tartó teljes hosszában, pászmánként 3700 KN feszítő erővel. Méretezéséhez az InterCad Kft AXIS VM X5 végeelem méretező programot használtuk. Az alábbiakban néhány kiemelt adat grafikus ábrázolása:



4.5 ábra

Acéltartó keresztmetszet és oldalnézet



4.6 ábra

Szerkezet megterhelés önsúlyból

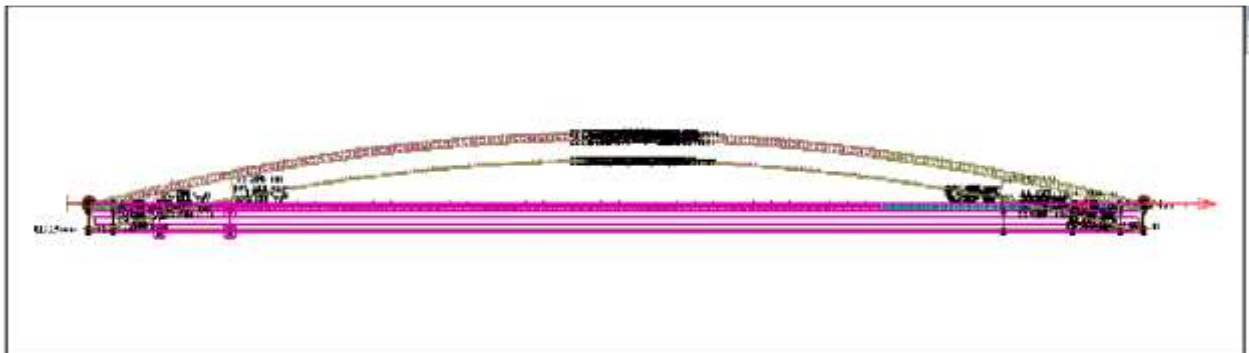




4.7 ábra  
Lehajlás önsúlyból, 19,7 cm

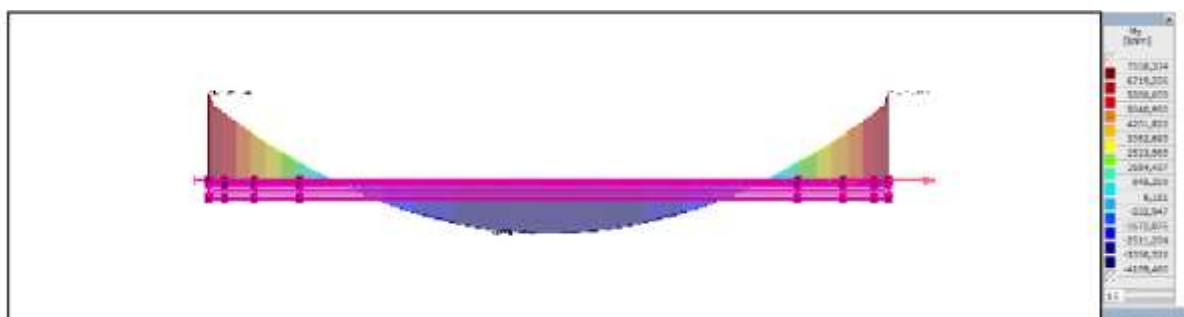


4.8 ábra  
Szerkezet megterhelés feszítésből



4.9 ábra Fe  
szítési kihajlás 22,5 cm





4.10 ábra  
Nyomaték ábra ( - 4189,4 KNm / 7558,2 KNm)

### 4.3. Adatok elemzése

A fenti példákban nyert adatok alapján megállapíthatjuk, hogy feszítéssel, külső erő bevezetésével a rendszerbe, megváltoztatható a szerkezet mérete, súlya, időbeni viselkedése

	HL1100 R/M	HE800 M	HE/HL %
Szerkezet magassága (mm) – ebből acél tartók (mm)	1 703 (1 158)	1 394 (854)	82 (74)
Szerkezet súlya (to) – ebből acél tartók (to)	487,3 (103,1)	463,6 (79,3)	95 (77)
Szerkezet lehajlás SLS terhelésnél (mm)	89	87,1	97
Terhelésből adódó nyomaték a 22,5 m metszetben (KNm)			
önsúly (SW)	-6 420,7	-4 769,1	
hasznos (1 UDL)	-2 814,8	-2 614,2	
használhatósági határállapot (SLS)	-13 689,0	-2 450,8	
teherbírási határállapot (ULS)	-21 038,9	-4 189,4	
Terhelésből adódó nyomaték a 0 és a 45 m metszetben, a támaszokon (KNm)			
önsúly (SW)	0	635,8	
hasznos (1 UDL)	0	348,4	
használhatósági határállapot (SLS)	0	6 690,1	
teherbírási határállapot (ULS)	0	7 558,2	

4.1 Táblázat Összehasonlító adatok

Az első lépésben végzett számításokból nyert eredmények alapján sikerült elérni egy 18 % felszerkezet magasság csökkentést (309 mm) az acél tartók, egyenként, 2x3700 kN megfeszítésével. SLS terhelés alatt a tartók 89/87 mm függőleges elmozdulással teljesítették a max. L/500 (90 mm) lehajlási korlátot – az acéltartók gyártása közben, túlelemeléssel, kiküszöbölhető az önsúly által okozott lehajlást.

A HL 1100 R/M tartókat HE800M tartókkal helyettesítve a felszerkezet súlyát sikerült 5%-al míg a szerkezeti acél súlyát 23%-al csökkenteni. A tervezett ökológiai lábnyom csökkentés elérése érdekében további számításokat tervezünk végezni.

### SZAKIRODALOM

- [1] Structuri compuse otel-beton, Stefan I. Gutiu, Catalin Moga - Editura UT Press 2014
- [2] Metodologie de evaluare a aptitudinii de exploatare a podurilor rutiere corespunzatoare cerintelor clasei „E” de incarcare conform Eurocod-ului - Redactarea II / Betarmex 2017
- [3] Együttműködő acél-beton öszvérhídszerkezetek, Dr. Köllő Gábor Kolozsvári Műszaki Egyetem, Műszaki Szemle 9-10, 2000
- [4] Hidak utófeszítése csúszópásmás kábelekkkel – tervezési elvek, Dr. Kovács Tamás BME, Tatabánya, 2017
- [5] Acélszerkezetek tervezése az EUROCODE szerint, Dr. Iványi Miklós
- [6] A Tartószerkezeti tervezés alapjai az EUROCODE szerint, Farkas György, Lovas Anta, Szalai Kálmán
- [7] ArcelorMittal - Long Carbon Europe - Sections and Merchant Bars – Bridges with rolled sections, Dennis Rademacher, bridge development leader
- [8] ArcelorMittal - Acobri 5.08 – User Manual, 2020
- [9] InterCAD Kft – AxisVM Statikai méretező és számító programrendszer, Deim Tamás, ügyvezető
- [10] Inter-CAD Kft – Axis VM X5 R3 e2 – Felhasználói Kézikönyv, 2020
- [11] EUROCODE EC0, EC3, EC4