

## A PENTELE-HÍD MEDERHÍDJA BEÚSZTATÁSÁNAK ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA

NASZTANOVICS FERENC\*, FÜSTÖS ATTILA\*\*, SAPKÁS ÁKOS\*\*\*, NAGY ZSOLT\*\*,  
HORVÁTH ADRIÁN\*\*

\*doktorandusz. BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Főmterv Zrt. E-mail: naszta@mail.bme.hu

\*\*okleveles építőmérnök. Főmterv Zrt. E-mail: www.fomterv.hu

\*\*\*okleveles építőmérnök, PhD. Főmterv Zrt. www.fomterv.hu

Ebben a cikkben a dunaujvárosi Pentele-híd beúsztatásának érzékenységvizsgálatáról írtunk. A 8650 t tömegű, 312 m hosszú, 50 m magas és 40 m széles acél ívhidat 8 db 80 m hosszú, 10 m széles bárka beúsztatta a helyére 2006 decemberének első napjaiban. A hidat és a bárkákat 4 db 500 t-s acél rácsos tartó fogta össze. Az egyes szerkezeti elemek külön-külön már méretezve lettek a beúsztatáshoz, de a teljes beúsztatott rendszer egészét is meg kellett vizsgálni. Ennek a hajózásnak az előkészítésére a Főmterv Zrt. részletes érzékenységvizsgálatot készített a teljes úszószerkezetre. Ebből a vizsgálatból két részvizsgálatot írtunk meg ebben a cikkben: a hídakra vonatkozó vizsgálatot és a bárkában ébredő erők vizsgálatát. A modellek végeeselemes futtatásához az ANSYS 10-es változatát használtuk.

**Kulcsszavak:** híd, érzékenységvizsgálat, végeeselem, statika, beúsztatás

A 312 m-es acél ívhidat, a mederhidat a Duna folyásirányával párhuzamosan kialakított szerelőtéren épült. A híd a végleges helyére a 4 napos beúsztatási folyamat végén került. A beúsztatást két – egyenként négy bárkából álló – bárkacsoport végezte. Egy bárkacsoporton két állványszerkezet állt, melyek a híd hosszstartói alatt megfelelő elrendezésben a diafragmák mentén emelték a hidat (*1. ábra*). Az állványszerkezetek magassága a vízállás függvényében változtatható volt.

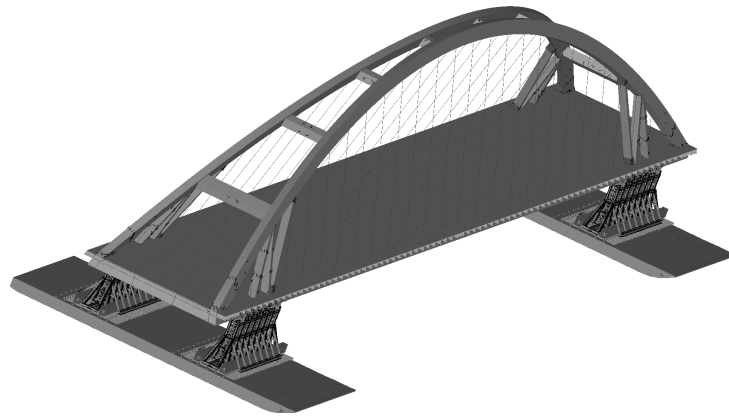
### AZ BEÚSZTATÁS MUNKAMENETE

A beúsztatás munkamenete lépcsőről lépcsőre:

1. Híd építése a parton fekvő járomrendszeren (feszítéssel és ideiglenes rácszással)  
A hídépítéshez – a hajóforgalom miatt – a Dunát lezárni nem lehetett, ezért a híd parti járomrendszeren épült fel. A kész acélszerkezetet egy darabban volt



a)



b)

- 1. ábra.** A teljes beúsztatási konfiguráció: híd, állványok és bárkák: a) híd az úsztatás közben; b) a teljes végeselemes hálózat

célszerű a helyére szállítani, így minimalizálva 3 napra a Duna hajóforgalmának leállítását.

2. A teljes hídszerkezet ideiglenes támaszokra helyezése a sarupontoknál  
A bárkarendszer szélessége körülbelül 40 m volt, ezért nem volt célszerű a híd tömegét egy ponton átadni a bárka- és állványrendszernek. Éppen ezért a mederhidat nem az ideális sarupontokon, hanem a lényegesen rosszabb hossz-tartó mentén emeltük fel. A kedvezőtlen geometriai elhelyezkedés miatt a

hídszerkezetnek igen szigorú peremfeltételeket írtunk elő. A hidat  $4 \times 16 (= 64)$  ponton *egyenlő erővel* kellett alátámasztani. Ez egyenként 1360 kN erőnek felel meg támaszonként. A beúsztatás minden pillanatában ezt a peremfeltételt teljesíteni nem volt egyszerű. Egy ideiglenes rácsoszás a feszítés után került beépítésre.

3. A járomrendszer elbontása, a híd alatti talaj elkostrása.
4. A bárkák beúszása állványrendszerrel együtt (bárkák vízzel elárasztva).
5. A híd emelése bárkákkal (a víz kiszivattyúzása és sajtókkal emelése).  
Az egyenletes erővel való alátámasztást olajsajtókkal oldottuk meg. A híd alatt négy olajkörön egyenként 16 db olajsajtó emelte a hidat. Az egy körön lévő sajtókban egyenlő volt a nyomóerő, a 4 támasz elég messze volt egymástól, így teljesült a peremfeltétel.  
A 30 cm átmérőjű sajtók lökethossza 30 cm volt, ezért az emelés során a bárkák balasztolásával is igazodtunk a híd megváltozott alakjához. Az olajsajtók sokszor meghibásodnak, ezért az emelés során acél alátétlemezekkel folyamatosan követtük az elmozdulásokat, a híd alakját az állványszerkezeten. Amikor a híd elemelkedett – tehát a teljes terhet a bárkák viselték – a híd elnyerte a beúsztatási alakját. Az olajsajtók biztonságos kezelése érdekében a beúsztatás alatt a híd tömegének a felét visszaengedtük a bejlagolt állványszerkezetre.
6. Beúsztatás.
7. Pillérekre helyezés.  
A hidat a pilléreknél az ideiglenes sarupontokra engedték le. A kibalasztolás és lerakás ugyanolyan érzékeny művelet, mint a híd felemelése. A hidat a lerakás előtt újra sajtóágyra emeltük. Az olajsajtók érzékenysége miatt itt is acél alátétlemezekkel követtük a híd alakváltozását a leeresztés során. Amikor az ideiglenes sarupontok teljesen átvették a terheket, a bárkacsoportokat kiúsztattuk a híd alól.

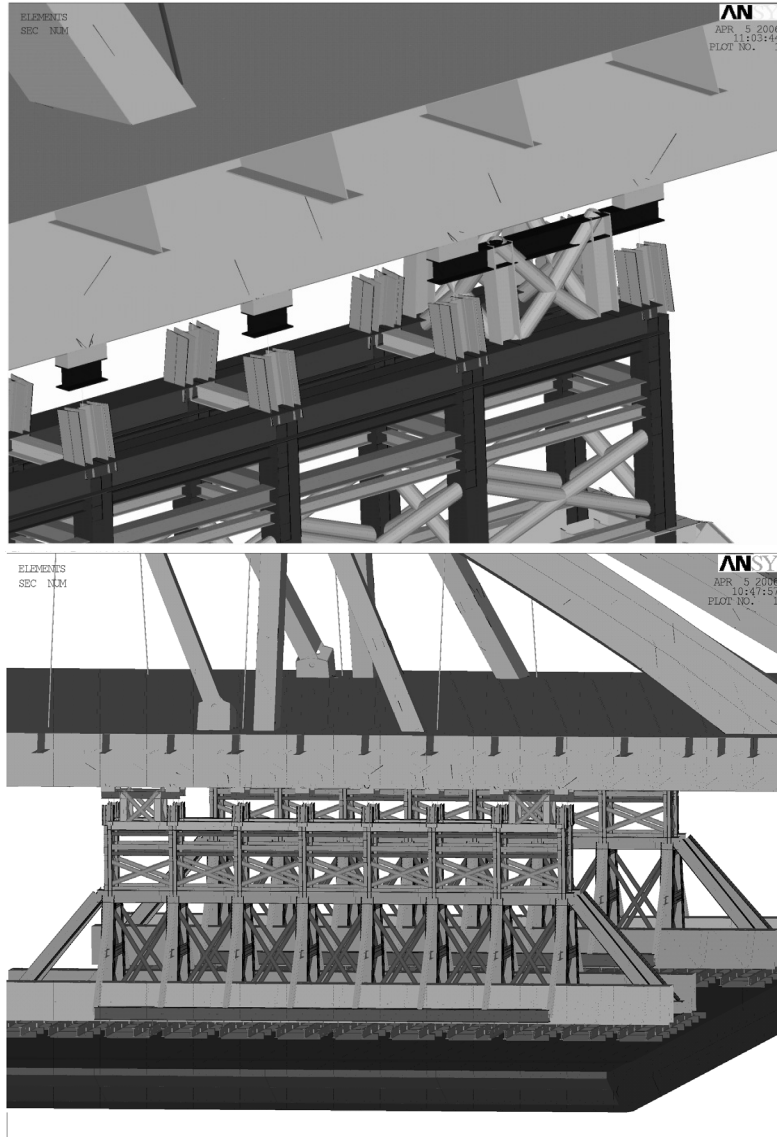
Az érzékenységvizsgálat során négy fő kérdésre kerestük a választ:

1. hídalak és a hídban keletkező feszültségek a beúsztatás során
2. a bárkákban ébredő erők, teherátadás a bárkákra
3. a beúsztatási alátét-lemezelés maximális hibájának a keresése (milyen pontosan kell követni a hídalakot)
4. esetleges nem várt eseményekkor a szerkezetekben, elsősorban a hídban keletkező feszültségek vizsgálata.

Ebben a cikkben csak az első két ponttal foglalkozunk részletesebben.

## MODELLALKOTÁS

Ezekhez a vizsgálatokhoz fel kellett építeni a teljes úszószerkezetek végelemes hálózatát a programok számára.



2. ábra. Az állvány és a híd találkozási pontja



3. ábra. Az úszó szerkezet

#### A MEDERHÍD MODELLJÉNEK MEGALKOTÁSA

A legnagyobb gonddal a különösen érzékeny mederhíd modelljét kellett felépíteni. A Joó Attila által készített végeelemes modellben két fontos részlet nem volt figyelembe véve:

- a feszítés hatása
- a túlemelés hatása.

Mivel egy 300 m-es híd komplex vizsgálatakor ezeket a részleteket nem hagyhattuk el, ezeket a hatásokat nekünk kellett a híd modelljébe beépíteni. A túlemelés – valódi geometria – hatását a végeelemes modell pontonkénti megváltoztatásával oldottuk meg. A modell 368 101 pontját a hídon lévő helyzetének a függvényében áthelyeztük. Mivel ilyen számú csomópont kézi mozgatása nem lehetséges, erre C++-ban programot írtunk. A program a csomópont térbeli koordinátája alapján, a valódi hídalak ismeretében a valódi alaknak megfelelő helyre módosította az aktuális pontot. Az így kapott hídalak gyakorlatilag meg-

egyezett a felépített híd alakjával. A feszítés hatását a feszítőkábelekre ható hőmérsékleti teherként vettük figyelembe.

#### AZ ÁLLVÁNYSZERKEZETI MODELL MEGALKOTÁSA

A rúdmodellt – manuális rajzolás helyett – az ANSYS saját scriptnyelvén írtuk. Erre azért volt szükség, mert így a nagyszámú futtatásokat könnyebb volt előkészíteni. A felvett geometria pontosan megegyezik a Poligon Kft. által tervezett állványszerkezettel.

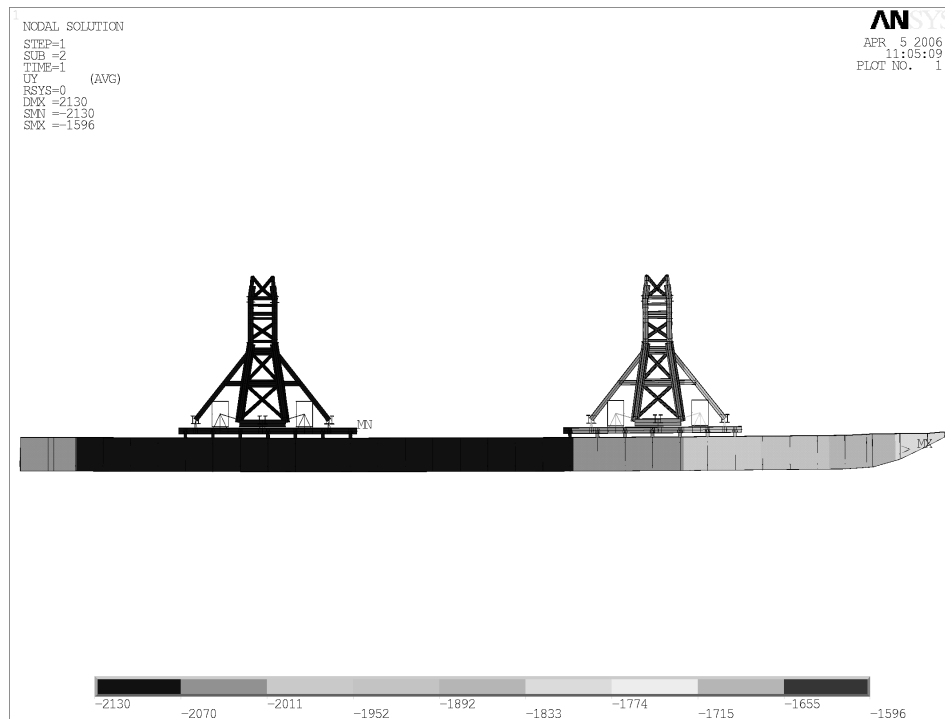
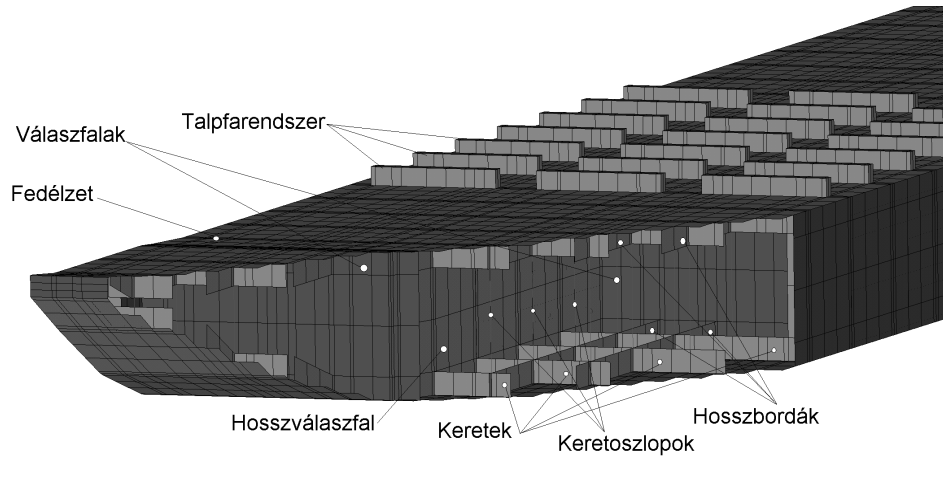
#### A BÁRKÁK MODELLJE

A bárkák modellezésére azért volt szükség, mert a bárkákat nem úgy terheltük, ahogy eredetileg méretezték őket, így kérdéses volt, hogy elbírák-e a rájuk ható hatalmas, a tervezetthez képest koncentrált erőket. A vizsgálat során kiderült, hogy a bárkákra ható terhek elsősorban a bárkáktól függttek, mivel a bárka volt a legpuhább szerkezet a többiekhez képest.

A bárkák pontos tömegét és geometriai modelljét megkaptuk. A gyors és paraméteres modellgenerálás érdekében a bárkákat is saját programmal építettük. Az általunk C++-ban írt program készítette el a 8 bárkát és a bárkán lévő puha-, illetve keményfa talpfarendszer modelljét (4. ábra).

#### SZÁMÍTÁSOK

A számításokhoz az ANSYS 10 végeelemes programrendszert használtuk. Jellemző a feladat méretére, hogy workstation kategóriájú számítógép nem volt alkalmas a futtatások elvégzéséhez. Számításainkat végül két AMD Opteron processzorú, 4 magos, 8 GB memóriával rendelkező belépő szintű szerveren futtattuk, openSuse Linux 10.0 operációs rendszerrel.



4. ábra. A hajó és az állványszerkezet

## HÍDALAK ÉS FESZÜLTSEGSZÁMÍTÁS

A tartó elmozdulásai a híd méreteihez képest kicsik voltak (maximum  $1/300$ ), ezért számolhattunk a kiselmozdulások módszerével. Az acél a vizsgált feszültségtartományban lineárisan rugalmas. Mivel a feladat geometriai értelemben (kiselmozdulások) és az anyagmodell szempontjából (Hooke-modell) is lineáris, használhattuk a szuperpozíció elvét. A híd beúsztatási állapotban történő modellezése a következő terhelési esetek összegeként adódott:

- Az ideiglenes támaszokon a híd a négy sarkában adta át a súlyának megfelelő függőleges terhelést, ekkor a feszítést is működtették a híd kábeleiben. Vízsztínesen statikailag határozott tartót feltételeztünk. Ekkor a feszítést a híd belső erőkkkel vette fel, a híd súlya függőleges reakcióként jelentkezett az (ideiglenes) támaszain. A szerkezet hasonlóan viselkedett, mint a végleges állapotában. Az ideiglenes szerkezet merevsége 0 volt, így a benne keletkező feszültség is 0 volt ebből a teheresetből.
- A hidat az emelési pontokon a saját súlyának megfelelő függőleges felfelé mutató emelő-erőrendszerrel terheltük. Ezt azért tehettük így meg, mert az állványszerkezeten a hidraulikus sajtók egy olajkörre lettek kötve, így az erők eloszlása egyenletes volt. A híd súlyát és a feszítést ebben a terhelési esetben nem vettük figyelembe. A kábelekben megengedtük a nyomóerőt is. Az ideiglenes támaszoknál az előző esethez hasonlóan támaszokat alkalmaztunk az ideiglenes támaszok helyén. Ennél a terhelési esethnél az emelési pontokon bevitt erőrendszert a híd a saját merevségével vezette le (fiktív) támaszaira. A reakció ebben az esetben a híd súlyának megfelelő, lefelé mutató erőrendszer volt, mert e számítás során a híd anyagának sűrűségét nullának tételeztük fel. Az ideiglenes szerkezet merevsége ebben a teheresetben valós volt, így csak az emelésből adódó feszültségek keletkeztek benne.

A két tehereset összege a híd beúsztatási alakját és feszültségét adta ki. Fontos volt, hogy ellenőrizzük, hogy a feszített kábelek megfelelően feszítettek maradjanak a beúsztatás során is.

### A BÁRKÁKBAN ÉBREDŐ ERŐK, TEHERÁTADÁS A BÁRKÁKRA

Az állványrendszer az egymás melletti bárkák összekapcsolására és a híd és az állvány közötti terhelés közvetítésére szolgált. Az állványrendszer különböző keresztmetszetű rudakból épített rácsos szerkezetű tartó. Az állványrendszer szerepe végleges modellünkben a teherelosztó hatás figyelembevételére volt. Az



állvány tervezése altervezői feladat volt. Vizsgálatunk nem volt alkalmas az állvány ellenőrzésére. A bárkarendszert terhelő erőrendszert azonban nagy biztonsággal és pontossággal tudtuk meghatározni.

Az állványszerkezetre a híd önsúlya hatott, abban a 64 pontban, ahol a hídmodellben is figyelembe vettük.

A beúsztatási szerkezet magassága az aktuális vízállás függvényében különböző magasságú modulárisan átalakítható állványszerkezettel befolyásolható volt. Az állványszerkezetet mi a legnagyobb magassággal vettük figyelembe (alacsony vízállás esete), mert az erőrendszer szempontjából ez tekinthető mértékadónak.

Az állványszerkezetet gerenda- (beam) elemekből építettük fel a modellben. Az elemek keresztmetszetét a tervek alapján vettük fel. Csomóponttól csomópontig az adott rúd keresztmetszetének megfelelően vettük figyelembe. Az elemek végein merev kapcsolatot tételeztünk fel. Az állványszerkezet a bárkához való csatlakozásánál függőleges értelemben nem volt összekapcsolva. Ezért modellünkben a bárka-állvány csatlakozó kapcsolata nem volt képes húzóerő felvételére, ezért az állvány egyes helyeken elemelkedhetett a talpfarendszerről.

A bárkákat a megkapott vázlatrajzok és konzultációk alapján épített héjmodellel vizsgáltuk. A héjmodell felépítése megegyezett a bárkák teherviselő szerkezeti elemeivel. A teherviselő elemeken kívüli bárkarészeket terhelésként vettük figyelembe. A teherátadó talpfarendszert azonos csomópontokkal egybeépítettük a bárkákkal. Ezek térfogati elemek voltak, könnyen változtatható anyagmodellel, melyek a puha- és keményfa rendszer függvényében változtak.

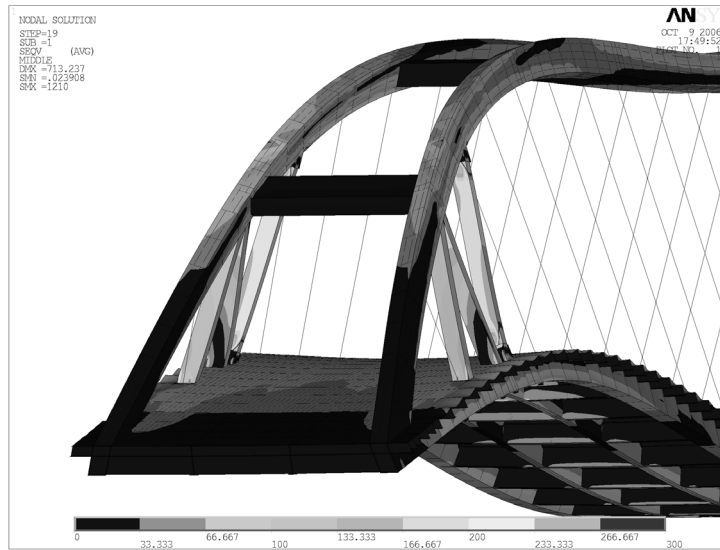
A bárkának függőleges értelemben a fenéklemez alatti víz jelentette a megtámasztást. A víz függőleges értelmű megtámasztó hatását a fenéklemez szerkezeti elemeinek felületi rugalmas támasztásával értük el. A vízbe merített testre ható felhajtóerő a kiszorított víz súlyával azonos. Az alsó síkon (fenéklemezen) levő elemek alatt felületen megoszló rugalmas megtámasztást vettünk figyelembe. Ezt úgy értelmeztük, hogy a vízbe merített bárka alsó síkját támasztó egy elem rúgófelületben keletkező felhajtóereje a következő három tényező szorzataként volt számítható:

- a víz fajsúlya
- az elemi felület súlypontjának függőleges merülése
- az elemi felület területe.

Ez az építőmérnöki gyakorlatban megszokott Winkler-féle rugalmas megtámasztásnak felelt meg. A bárkák oldalirányú elmozdulását a fedélzet síkjában statikailag határozott módon a vízszintes síkban megtámasztottuk.

## EREDMÉNYEK

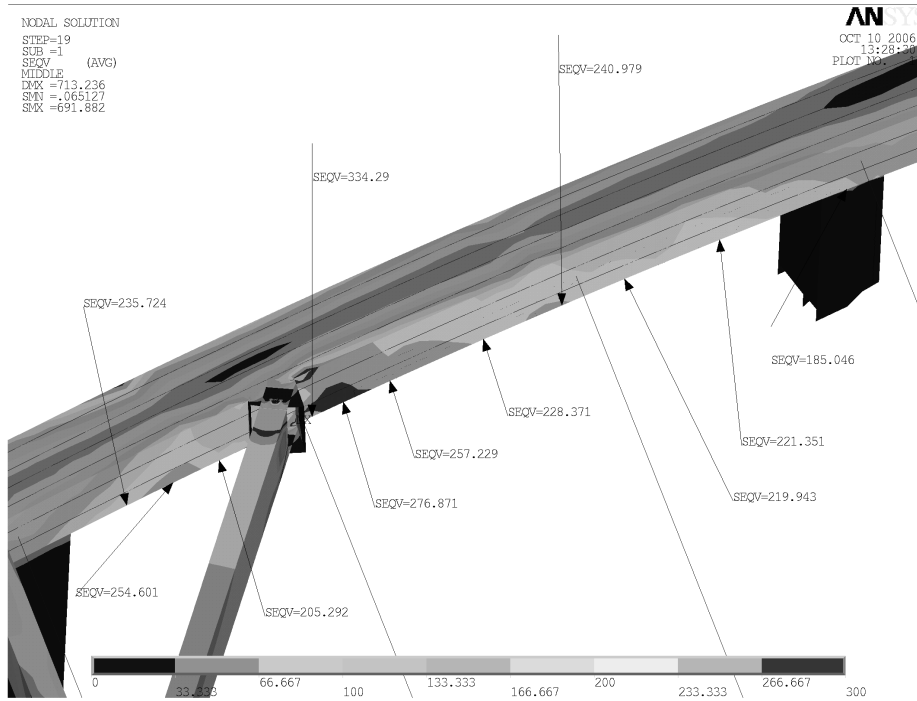
Vizsgálati eredményeink az 5–8. ábrákon láthatóak.



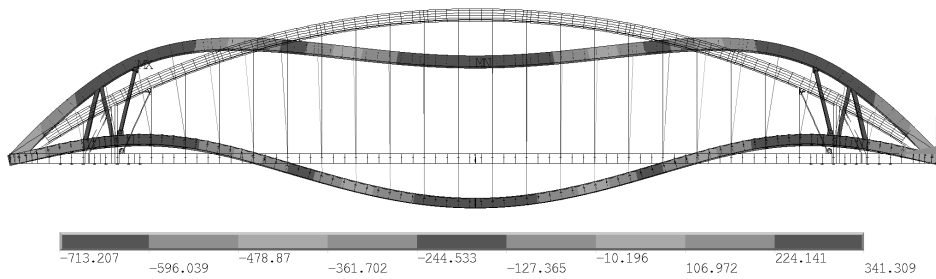
5. ábra. Von-Mises-feszültségek a hídban [ $\text{N/mm}^2$ ] (alakváltozott geometrián)



6. ábra. A híd alakja a beúsztatás közben (a feszítópásmákon a fekete gyűrűket érdemes figyelni)



7. ábra. Von-Mises-feszültségek az ívben [N/mm<sup>2</sup>]



8. ábra. A híd beúsztatási alakja [mm]

## HÍDALAK ÉS FESZÜLTSEGEK

A híd a beúsztatás során szemmel láthatóan alakváltozott. A hídsajtók környékén a megengedett 30 cm-es lökethosszon belül maradt, számításunkhoz képest a tényleges beúsztatáskor 1 mm volt a mért eltérés. A beúsztatásból és az önsúlyból adódó feszültségek csak az ideiglenes szerkezetekben közelítették meg a folyáshatárt.

### A BÁRKÁKBAN ÉBREDŐ ERŐK, TEHERÁTADÁS A BÁRKÁKRA

Az 1. táblázatban az állványszerkezet alatt lévő talpfarendszert terhelő erők megoszlása („erőtérkép”) tekinthető meg. A táblázatban az erők kN-ban szerepelnek. Jobboldalt a nyilak az állvány lábainak a helyét jelölik. A vízszintes szürke alap a lábakról átadott erő helyét jelenti, az erősebb színekhez közelebb vannak az állványlábak, a fehér sávok az állványok között vannak. A vastag vonalak a bárka gerinclemezének a helyét mutatják. Az „A” és az „F” oszlop alatt diafragmafal van a hajóba építve.

Eredményeinkből jól látszik, hogy az erőátadódás során a hajó merevsége a mértékadó. A beúsztatáshoz a talpfarendszert ennek alapján alakítottuk ki.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az érzékenységvizsgálat segítségével 2006 első napjaiban egy 312 m-es acél ívhídát biztonságosan beúszlattunk a helyére (9. ábra). Mérnökember a számításaira ennél szebb bizonyítékot igen ritkán tud felmutatni.

## KÖZREMŰKÖDŐ TERVEZŐK

A beúsztatásban részt vevő egyes szerkezeti elemeket külön szaktervező cégek készítették. Közreműködő tervezők:

Székely László (Hídépítő Speciál Kft.) – a bárkarendszer ellenőrzése és nautikai számítások

Poligon Kft. – az állványrendszer tervezése

Horváth Tibor – a bárkarendszerek ellenőrzése

Budapesti Műszaki Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék, Dunai László, Joó Attila László – a hídszerkezet merevítésének tervezése

A Főmterv Zrt. a beúsztatási művelethez tartozó számításokat hangolja össze, generáltervezőként fogja össze a tervezést.

Külön is szeretnénk Joó Attilának megköszönni a kiváló végeeselemes hálózatot.

1. táblázat. Erőmegoszlás az állványzat alatt

Erőmegoszlás a fartól az orr felé Bárka hossz tengely irányban (A → G)										
	A	B	C	D	E	F	G	Összeg	Minimum	Állványlábak
1	96	423	214	361	259	351	6	1709	423	↓
2	77	0	5	0	0	186	20	288	186	
3	73	205	107	125	129	179	24	842	205	
4	66	244	127	213	162	203	10	1025	244	↓
5	663	46	51	0	48	451	218	1549	663	
6	324	86	47	63	20	211	167	918	324	
7	357	58	40	59	18	242	179	952	357	↓
8	280	40	28	42	34	224	120	766	280	
9	476	162	77	125	94	408	208	1550	476	↓
10	369	143	67	95	82	324	184	1263	369	
11	350	53	35	66	44	288	136	971	350	↓
12	347	64	27	34	0	243	175	889	347	
13	350	67	24	33	1	234	171	879	350	↓
14	365	55	36	69	46	294	139	1004	365	↓
15	361	143	66	91	79	316	183	1240	361	
16	487	165	78	127	98	421	210	1587	487	↓
17	281	39	27	40	34	229	121	771	281	
18	344	59	44	63	13	244	180	947	344	↓
19	339	94	46	65	22	212	169	947	339	
20	664	45	50	67	45	446	217	1534	664	↓
21	66	254	133	231	170	212	10	1076	254	
22	74	211	109	121	128	181	24	847	211	
23	78	0	2	0	0	185	20	286	185	
24	97	429	223	379	255	352	6	1741	429	↓
Összeg	6986	3082	1662	2540	1779	6636	2896	25581		
Minimum	664	429	223	379	259	451	218	664		

Ertelmezés 4 bárka mentén keresztben



**9. ábra.** A beúsztatás



**10. ábra.** A kész híd

## IRODALOMJEGYZÉK

- Bojtár I. – Gáspár Zs.: *Végeselem módszer építőmérnököknek*. Terc, Budapest 2003.
- Dunai László – Joó Attila László: Ívhídmodell teherbírása: kísérleti, numerikus és szabványos eredmények. *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közlemények – Új Duna-hidak – kutatás, szakértés, tervezés*. Budapest 2004. 31–40.
- Holzapfel, G. A.: *Nonlinear solid mechanics*. John Wiley & Sons, Chichester 2001.
- Meyers, S.: *Effective C++*. Third edition. Addison-Wesley, New York 2005.
- Stroustrup, B.: *The C++ Programming Language*. Special Edition, AT&T, Indianapolis 2000.
- Zienkiewicz, O. C. – Taylor, R. L.: *The finite element method*. Fifth edition. Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.

## SENSITIVITY ANALYSIS OF PENTELE BRIDGE

*Summary*

In this letter we write about the Dunaújváros's new bridge, Pentele. The bridge is 8650 t weight, 312 m length, 50 m height and 40 m width. The bridge had lifted by eight 80 m length, 10 m width boat about begin of December 2006. The bridge and the boats had connected by four 500 t weight truss structure. The structures had sized separately for the drifting, but we had to check them in the full drifting system. The Főmterv ZRt. had made these calculations, sensitivity analysis for the full system. We public two of these simulations in this letter: the simulation of the bridge displacements and the simulation of the boat's payload and stresses. ANSYS 10 had been used for finite element simulations.

**Keywords:** bridge, Pentele, FEM, sensitivity analysis

