

A Bükkös patak boltozott kőhídjának vizsgálata

Bögöly Gyula
BME, bogoly@gmail.com

Görög Péter
Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, gorog.peter@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Boltozott hídjaink jelentős értéket képviselnek, megőrzésükhöz elengedhetetlen megértésük, modellezésük. Ezek a régi hidak új terheknek vannak kitéve, ezért szerkezeti stabilitásuk ellenőrzése sok esetben szükséges. A cikk röviden ismerteti az ehhez rendelkezésre álló vizsgálati módszereket; teherbírásuk számításának lehetőségét. A Bükkös patak hídjának vizsgálatán keresztül mutatja be a Mexe módszer és a támaszvonál-eljárás alkalmazását.

Kulcsszavak: boltozott kőhíd, teherbírás, Mexe-módszer, támaszvonál eljárás

1 BEVEZETÉS

Az első boltozott híd, amelyről több ókori történetírók (pl.: Herodotos, Diodorus) is megemlékeznek, a Kr. e. VII. században épült Babilonban az Eufratesz felett (Andai, 1959). A boltozott kőhidépítés története így az ókortól, a XIX. századi háttérbe szorulásokon keresztül, csaknem napjainkig nyúlik, szinte egy idős történelmünkkel. Bár mostanság már nem építenek új boltozatokat, de régi boltozatos kőhidak rekonstrukciója, újjáépítése különleges feladatot jelent. A legutolsó ilyen jelentős hidépítés Európában az 1993-ban tönkretett Mostari öreghíd újjáépítése volt (Berkó, 2003). Ezek a több száz éves építmények meghatározói voltak egy-egy birodalom, ország kereskedelmének, felvirágzásának, életének. Azon kívül, hogy őrzik történeti múltunk emlékeit, meghatározó kulturális és tájformáló jelentőséggel is bírnak. Az ókorban és a középkor elején tapasztalati ökölszabályokat alkalmaztak a boltozatok építésénél, később geometriai tervezést és ellenőrzést végeztek, melynek a lényege az volt, hogy a támaszvonál biztonsággal belül maradjon a keresztmetszeten (Huerta, 2006).

Hazánkban több mint 1500 boltozott kőhíd áll, melyek többnyire a XVIII-XIX. században épültek (Gáll, 1970). Nagy történelmi és kulturális jelentőségük ellenére sajnos csekély figyelmet kapnak boltozott hidaink. Sok esetben a tulajdonosi és fenntartói viszony nem tisztázott, ezért állaguk fokozatosan romlik. Fontos lenne ezek megvédése, karbantartása, amihez szükséges lenne egy átfogó összeírás, állaguk és teherbírásuk felmérésével. A közlekedés változásával mind a forgalom, mind a terhelés növekedett az elmúlt századokban (1. táblázat), így a hidaknak az új elvárásoknak kell eleget tenniük (Gálos & Vásárhelyi, 2005). Az új megnövekedett követelmények miatt ellenőrzésükhöz már nem elegendők ökölszabályok, illetve pusztán a geometriai méretezés, ezért boltozott hidak teherbírásának számítására, szerkezetük modellezésére több különböző módszer is kialakult.

1. táblázat. Közúti forgalom változása (Gáll, 1970)

Napóleon korában (150-200 éve)	ma	arány
hat lóval vontatott ágyú (~5 t)	„A” jelű terhelés (70 t)	14
kitérő szekerek (~2,53 m)	kitérő autóbuszok (~3,75 m)	1,5

2 VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A boltozott hidakra vonatkozó útügyi műszaki előírás a vizsgálatok három különböző szintjét határozza meg. Az első a közelítő erőtani számítások szintje, ahol általában a tapasztalati, főleg szemrevételezésen és egyszerű helyszíni méréseken alapuló módszer (MEXE módszer) alkalmazását javasolja. A szerkezeti analízis második szintjén az egyszerűbb kétdimenziós számítási módszerek alkalmazása célszerű, mint a támaszvonál eljárás és merev blokk módszer. A szerkezeti analízis harmadik szintjén pedig a bonyolultabb merev blokkos és az akár háromdimenziós modellezést is lehetővé tevő

végeselemes és driszkét elemes eljárásokkal kaphatunk pontos információt a szerkezet viselkedéséről (Magyar Útügyi Társaság 2005).

2.1 MEXE módszer

Ez a módszer a legáltalánosabban használt közelítő eljárás egynyílású hidak teherbírásának számítására, amit a II. világháború alatt Angliában fejlesztettek ki. A számítás tapasztalati összefüggésekre épül, és módosító tényezők segítségével veszi figyelembe a különböző hatásokat. Erősen közelítő jellegű, viszont gyorsan és egyszerűen számítható. Néhány alkalmazási korláton kívül, a módszer gyengesége, hogy nagy nyílású hidaknál alulértékeli, míg kis nyílásúaknál túlértékeli a teherbírást. A Mexe-módszer részletes leírását magyarul az útügyi műszaki előírás tartalmazza (Magyar Útügyi Társaság 2005).

2.2 Támaszvonala eljárás

Az eljárás a képlékeny határállapot-vizsgálaton alapszik. A számítás során azt kell igazolni, hogy a terheket egyensúlyozó támaszvonala mindig a boltozaton belül marad és legfeljebb a statikai határozottságnak megfelelő számú képlékeny csukló alakul ki. (Magyar Útügyi Társaság 2005) A támaszvonala tulajdonképpen az ívben haladó erő nyomvonala, a terheket ezen vonal mentén képes tiszta nyomás révén felvenni a szerkezet. Legszemléletesebben egy fordított kötélgörbéként lehet elképzelni. Vegyünk egy mindkét végén felfüggesztett kötelet, mivel hajlítást nem tud felvenni, ezért olyan alakba rendeződik, amely csak húzás felvételére képes. Elméletben ezt megfordítva egy olyan görbét kapunk, amiben csak nyomás keletkezik. (Huerta 2006) Ha a boltozat anyagát nem végtelen, hanem véges szilárdságúnak vesszük fel ez a támaszvonala egy meghatározott szélességű zónát alkot.

Ezt a módszert alkalmazza az ARCHIE-M nevű szoftver, amellyel grafikus úton könnyen igazolható egy híd teherbírásának megfelelősége adott terhelésre. A programmal figyelembe vehetünk egyszerű károsodásokat, ráfalazást, akár többnyílású hidaknál is alkalmazva, de a térbeli hatások figyelembe vételére nem alkalmas.

2.3 Merev-blokk módszer

A képlékenységtan határállapot vizsgálatával határozza meg a boltozat törőterhének értékét. A számítás során a blokkok közötti kapcsolatot véges értékű súrlódási tényezőkkel jellemezi, a szerkezet anyagára pedig tökéletesen képlékeny anyagmodellt feltételez. A képlékeny teherbírás határállapotban a szerkezet egy törési mechanizmust alkot, amely általában négycsuklós, vagy háromcsuklós mechanizmus oldalirányú elmozdulással, de kisebb nyílásoknál esetenként nyírási-jellegű tönkremenetel is szóba jöhet (Gilbert és Melbourne 1994). A vázolt módszerrel igen látványos képet kaphatunk a boltozat lehetséges tönkremeneteli folyamatairól.

A módszer számítógépes alkalmazása RING nevet viseli. Többnyílású hidak, háttöltés, ráfalazás, blokkok szilárdsága és kapcsolatuk minősége, talajfeszültségek és tehereloszlások, károsodások figyelembe vételére alkalmas.

2.4 Végeselemes és diszkrét elemes módszerek

Alkalmazásukra elsősorban a szerkezeti analízis legmagasabb szintjén van szükség. A szerkezettervezésben elsősorban lineáris modelleket alkalmaznak, a falazott boltozatok viszont sajátosságaik miatt teher alatt nemlineárisan viselkednek. A nemlineáris viselkedést leíró modellparaméterek meghatározása csak kifinomult vizsgálattal lehetséges, ennek hiányában pedig nagyfokú becslésekre kell hagyatkoznunk. Inhomogén anyagú falazott hidaknál a végeselemes modell megalkotására két lehetőség van. Az egyik változatban a falazóelemekre, a fugázatra különböző anyagmodelleket alkalmazunk, és ezek kölcsönhatását kontakt elemekkel írhatjuk le (micro-modell). Falazott szerkezetek mikro modelljének elkészítését tagolt végeselemes hálózat alkalmazásával mutatja be Pegon et al. (2001). A másik lehetőség, hogy a falazóelemek és a fugák jellemzőit átlagoljuk és egy fiktív homogén anyaggal helyettesítjük, ami a falazat egészére jellemző (macro-modell), amelynek felépítését Cavicchi és Gambarotta (2006) mutatja be.

A diszkrét elemek módszerével a nem-folytonos mikroszintű modellezés egyszerűbben lehetséges, mint a végeselemes mikro-modell felépítésével. A modell egymástól független helyváltoztatást végző, különálló elemekből épül fel. Az elemek közti kapcsolatot kontakt paraméterekkel írjuk le.

Mindkét típusú modellezésénél rendkívül nagy jelentőséget kap a modell helyes felvétele. A boltozat mögötti töltés megfelelő felvétele különösen fontos, ugyanis ez jelentősen befolyásolja a boltozat deformációit és stabilizáló hatása van. A végeselemes módszerrel a szerkezet teherbírása határozható

meg, míg a diszkrét elemes vizsgálattal inkább a tönkremeneteli folyamatok követhetőek nyomon és ezért hatékonyan elemezhetőek segítségével az egyes megerősítési megoldások.

A keresztirányú hatások és a boltozat-homlokfal merevséget befolyásoló kölcsönhatása kiemelten fontos a szerkezet használat közbeni viselkedésénél. Ezért a használhatósági vizsgálathoz és a használati terhek alatti szerkezeti viselkedés elemzéséhez térbeli számítási modell felvétele javasolt. Ezek kiválóan alkalmasak a viselkedés jellegének megállapítására, a használati terhek alatti deformációk és repedések meghatározására. A teherbírás kimerülésénél a keresztirányú hatások már kevésbé jelentősek, ilyenkor általában a kialakult repedések miatt a homlokfal és a boltozat sem dolgozik már együtt. Ezért a törőteher megállapítására síkbeli végeselemes modellek is alkalmazhatóak (Magyar Utügyi Társaság 2005).

3 A HÍD HELYSZÍNI VIZSGÁLATA

A Bükkös patakon átívelő 1900-ban épített boltozott kőhíd helyszíni vizsgálatát végeztük el, a teherbírásának meghatározásához. A híd Szentendrén a Lajos forráshoz vezető úton található, környezete folyamatosan nedves, a patak áradásakor a szárnyfalakat és a lábazatot is áztatja a víz. A nedvesség hatása jó látható a híd boltozatán és a gyámfalon egyaránt: felülete nagy részét mohá, néhol magasabb rendű növényzet nőtte be (1. ábra).



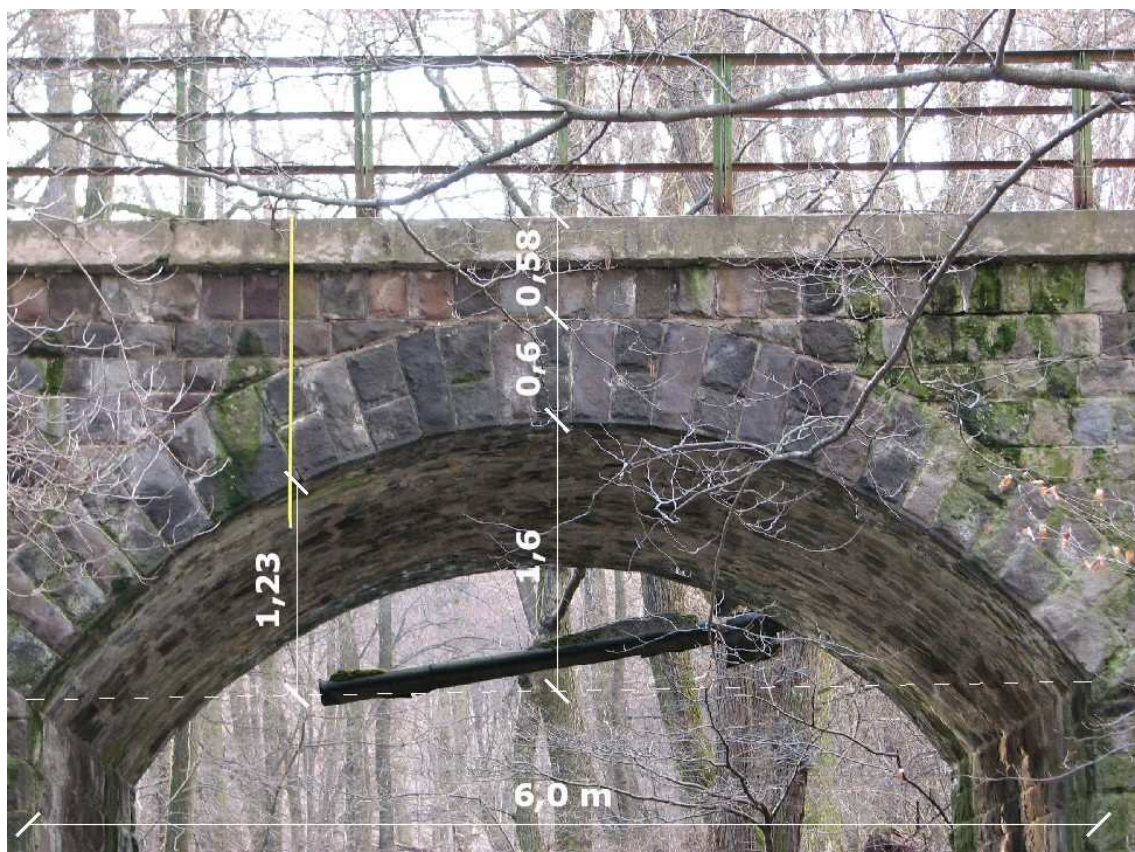
1. ábra. A híd oldalnézete a befolyási oldalról

Az egynyílású híd 6,0 m távolságot hidal át, 6,1 m-es szélessége csaknem megegyezik a nyílásával. A boltozat alakja 1,6 m ívmagasságú körszegmens, amely a lábazat aljához képest 3,0 m magasságú vállakra támaszkodik. A szárnyfalak a híd tengelyére közel merőlegesen állnak. Az ív vastagsága 0,6 m és a boltozat legmagasabb pontja közel ugyanilyen távolsággal van az útpályaszint alatt (2. ábra).

A híd kőanyaga a nedvesség hatására sok helyen elszíneződött és sókiválás is megfigyelhető a felületen (3. ábra). A faragott hárshegyi homokkő elemek ennek ellenére általában jó állapotban vannak csupán egy-két helyen lehetett észrevenni a kőanyag szilárdságának érzékelhető csökkenésével járó mállási nyomokat.

A szerkezeten a teherbírást jelentősen befolyásoló károsodásokat nem láttunk, az alapok károsodására, az alap alatti talaj kimosódására utaló nyomok nem észlelhetők, így alapsüllyedés miatt kialakuló teherbírás-csökkenés nem várható. A patak medre a híd környezetében betonnal burkolt, amely viszonylag jó állapotban van, bár a betonfelületen megfigyelhető a patak erodáló hatása. A boltozaton nem, csak a boltozat és a homlokfal között figyelhető meg az átfolyásra merőleges végigfutó repedés

(4. ábra), amely ilyen szerkezeteknél gyakori. Fugahiány általában nem jellemző, viszont a fugaanyag állapota kedvezőtlen, a fugaszélesség változó, de a boltozaton a legtöbb esetben 2,5 cm-nél szélesebb, míg a pilléreknél általában 1,5 – 2,5 cm közötti.



2. ábra. A boltozat főbb méretei



3. ábra. Sókiválás és elszíneződés



4. ábra. Homlokfal elválása

4 A TEHERBÍRÁS-SZÁMÍTÁS EREDMÉNYEI

4.1 MEXE módszer

A híd a módszer alapfeltételeinek megfelel. Egynyílású, 18 m-nél kisebb támaszközzel, a híd ferdesége nem nagyobb 15 foknál, nincs jelentős károsodás és az extradosz feletti feltöltés magassága nem nagyobb, mint 1 m.

A geometriai adatok:

Az ívnyílás: $L = 6,00$ m

Az ívmagasság: $r_c = 1,60$ m

Ívmagasság a boltozat negyedében: $r_q = 1,23$ m

A boltozat vastagsága: $d = 0,60$ m

A feltöltés és a burkolat vastagsága a középkeresztmetszetben: $h = 0,48$ m

Az idealizált tengelyteher számítása:

$$PAL = \left(\frac{7400 \times (d + h)^2}{L^{1,3}} \right) = 840,39 \text{ kN} \quad (1)$$

A módszer számításában ennek értékére maximálisan 70 tonna vehető fel, ezért :

$$PAL = 700 \text{ kN}$$

Módosító tényezők számítása:

- Nyílás/magasság tényező (F_{Lr}):

$L/r_c = 3,75$ mivel kisebb mint 4, a tényezőt 1,0-ra lehet választani.

- Alakot figyelembevevő tényező:

$$F_p = 2,3 \times \left[\frac{r_c - r_q}{r_c} \right]^{0,6} = 0,955 \quad (2)$$

- Anyag tényező:

Boltozat anyagától függő tényező táblázatból vett értéke: $F_b = 1,4$

A feltöltés anyagától függő tényező: $F_f = 0,7$

$$F_m = \frac{(F_b \times d) + (F_f \times h)}{d + h} = 1,089 \quad (3)$$

- Fugatényező:

A fugák szélességétől függő tényező, mivel a fuga 12,5 mm feletti: $F_w = 0,8$

A felületi fugahiány mértékétől függő tényező, mivel nincs fugahiány: $F_d = 1,0$

A habarcs állapotától függő tényező a fugahabarcs rossz állapota miatt: $F_{mo} = 0,9$

$$F_j = F_w \times F_d \times F_{mo} = 0,72 \quad (4)$$

- Az állapotot figyelembevevő tényező:

Mivel a szerkezetnek nincs a teherbírást csökkentő károsodása $F_{cm} = 1,0$

- A tengelyek számától függő tényező:

A nyílásköz mérete 6,0 m, ezért A_f grafikonról vett értéke 1,0.

A teherbírás számítása (módosított tengelyteher):

$$MAL = PAL \times F_{Lr} \times F_P \times F_m \times F_j \times F_{cm} \times A_f = 524,16kN \quad (5)$$

Tehát a módosított MEXE módszer szerint a megengedett tengelyteher: ~52,41 tonna

Ez mind a mai terhelési viszonyokat, mind a híddal szemben támasztott elvárásokat tekintve is elegendő és megfelelő.

4.2 Támaszvonala eljárás

Az ARCHIE-M szoftver segítségével vizsgáltuk meg a hidat. Az anyagjellemzőkre vonatkozóan jelenleg még nem áll rendelkezésre részletes felmérés és diagnosztikán alapuló adathalmaz, ezért a számítás során a következő feltevéseket használtuk:

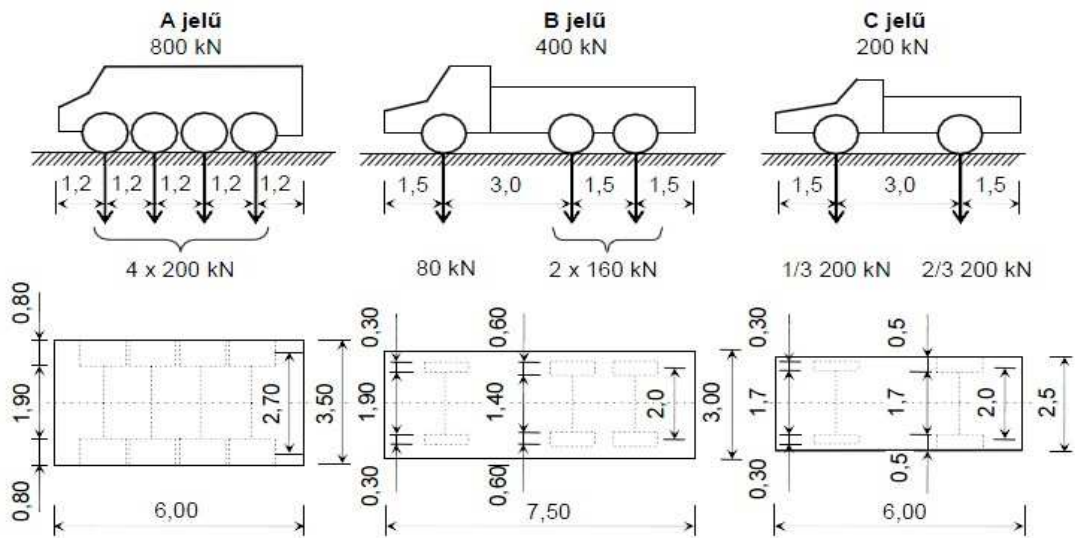
- A boltozat anyaga homokkő, súlya 22 kN/m^3 , nyomószilárdságának jellemző értéke 21 MPa. Az értékek felvételéhez hasonló adottságokkal bíró homokkő elemek vizsgálatának mért eredményit vettük alapul (Stöckert et al. 2008). A falazat nyomószilárdságának értékét 8 MPa-ban állapítottuk meg. A szilárdság bizonytalanságának figyelembe vételére egy $\gamma = 1,2$ értékű csökkentő tényezőt alkalmaztunk.

- A töltés általános anyagú, jól tömörített, súlya 20 kN/m^3 , belső súrlódási szögének értéke $\varphi = 30^\circ$

- Az útburkolat súlya 24 kN/m^3 , vastagsága 25 cm

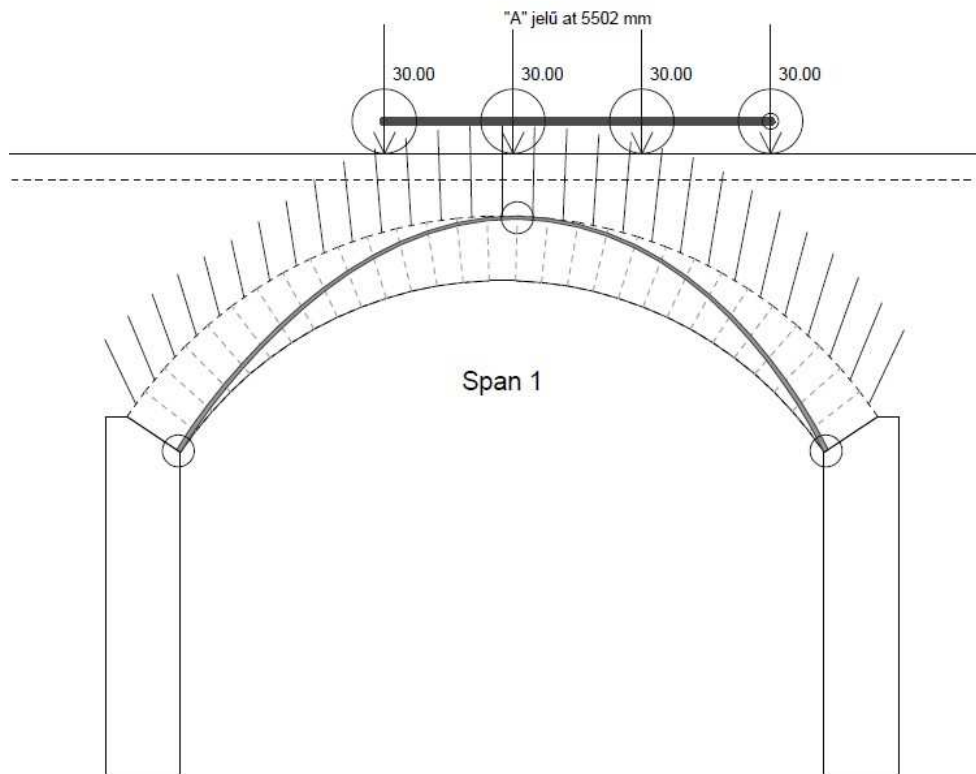
- Az önsúly tényleges értékének bizonytalanságát (esetleges növekedését) az Eurocode-ban általánosan használt $\gamma = 1,35$ biztonsági tényezővel vettük figyelembe. Az esetleges terhek értékét pedig $\gamma = 1,5$ biztonsági tényezővel.

A program adott terhelés, adott helyzete esetén meghatározza a támaszvonalat és ennek segítségével egyszerűen igazolható a híd teherbírásának megfelelősége.

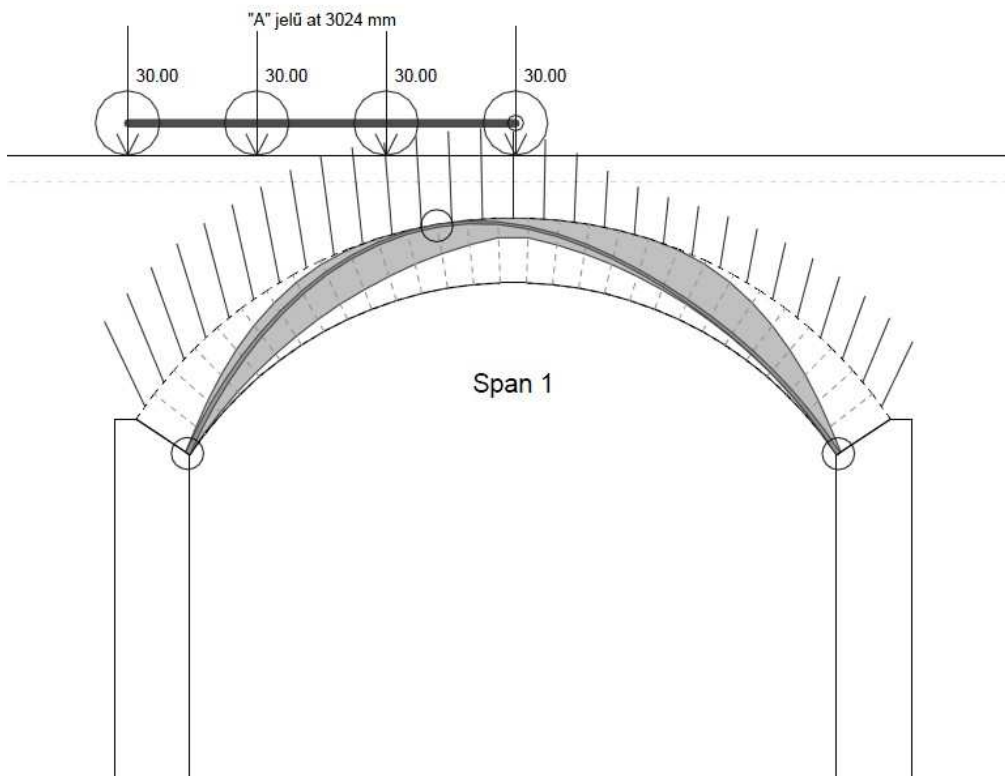


5. ábra. Járműterhek (Huszár et al. 2005.)

Az ARCHIE-M programban lehetőség van saját teheresetek létrehozására, illetve a terhek mértékadó helyének automatikus megkeresésére. Így egyszerűen ellenőrizhető a kiválasztott tehereset (5. ábra). A 6. és 7. ábrán láthatjuk, hogy a teherbírasi vonal sehol nem hagyja el a keresztmetszetet az „A” jelű teher $\gamma=1,5$ biztonsági tényezővel felszorozott értékénél sem. A boltozat teherbírasi megfelelés. Mivel a boltozat anyaga véges szilárdságú, valójában nem teherbírasi vonalról beszélünk, hanem egy sávról. Ezen sáv alsó és felső határát keresztmetszetenként számolja ki a program.



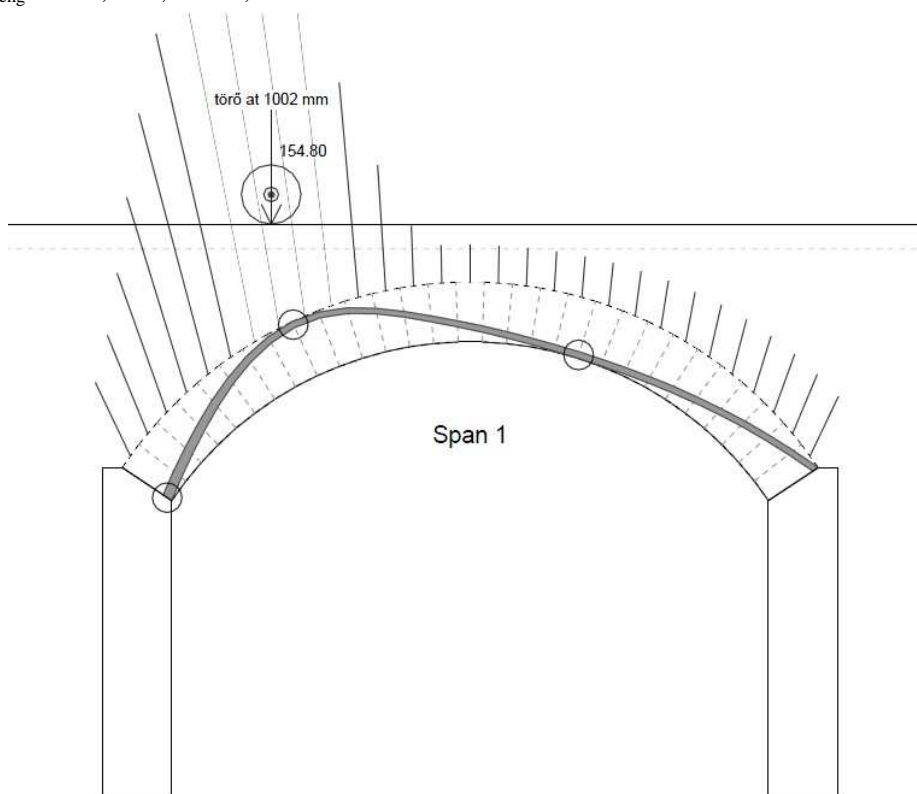
6. ábra. „A” jelű teher a mértékadó helyen



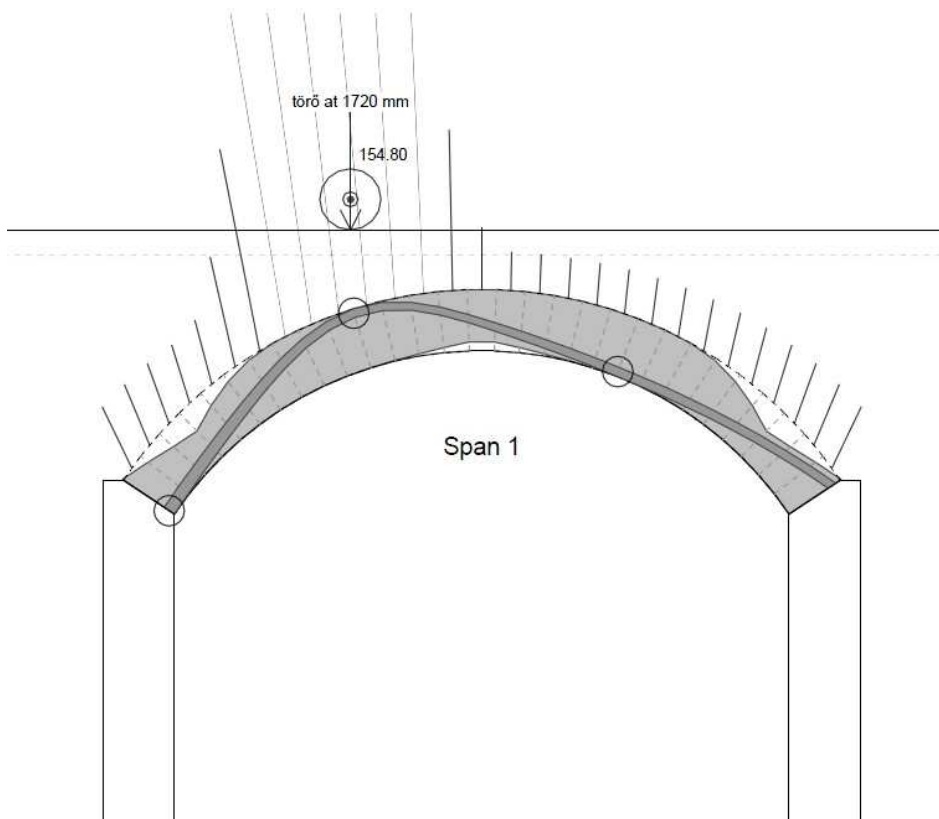
7. ábra. „A” jelű teher hatására dolgozó keresztmetszetek

A szoftver a törőteher értékét nem adja meg, de ha felvesszünk egy egytengelyű terhet a mértékadó helyen, ennek értékét növelve megkereshetjük azt az állapotot, amikor a teherbírási vonal épen belefér a keresztmetszetbe, ami azt jelenti, hogy ennél nagyobb terhet nem tud elviselni a szerkezet (8. és 9. ábra). Az így számolt eredmény a híd teherbírására egy felső korlátot ad (törőteherbírás). A megengedhető tengelyteher számításához a törőterhet egy biztonsági tényezővel kell osztani. Ennek értékét 2,0 és 3,0 között javasolt felvenni az útügyi műszaki előírás alapján. Esetünkben így a megengedhető tengelyteher értéke:

$$Q_{eng} = 154,80/3,0 = 51,60 \text{ tonna} = 516 \text{ kN}$$



8. ábra. Törőteher a mértékadó helyen



9. ábra. Törőteher hatására dolgozó keresztmetszetek

5 ÖSSZEFOGLALÁS

A Bükkös patak hídjának közelítő erőtani számítását és a támaszvonala eljárással a legegyszerűbb modellezését végeztük el, ennek eredményeként mindkét alkalmazott vizsgálati módszerekből kapott teherbírás jóval nagyobb, mint bármelyik járműteherből adódó terhelés, így a szerkezettel kapcsolatban teherbírás-probléma jelen állapotában nincs.

A MEXE módszer segítségével gyorsan meghatározható a híd teherbírása és az itt bemutatott példa is bizonyítja, hogy ilyen típusú híd teherbírását a biztonság javára közelíti. A támaszvonala eljárással a törőteher értékére csaknem háromszorosát kaptuk a MEXE módszerrel meghatározott teherbírásnak. A teherbírás-vonal meghatározásából adódó törőteher biztonsági tényezővel való csökkentése után közel ugyan azt a megengedhető terhet adta mindkét módszer.

A szerkezeti analízis következő szintjénél már ennél részletesebb helyszíni vizsgálatok és bonyolultabb modellek szükségesek, de ezekkel a híd teherbírása és viselkedése is jobban közelíthető. Az itt vizsgált híd állapota, ugyan nem indokolja a részletesebb vizsgálatokat, azonban az eredmények összehasonlíthatósága miatt a későbbiekben célszerű ezeket is elvégezni.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Andai P. 1959. *A mérnöki alkotás története*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p364.
- Berkó D. 2003. Boltozatos kőhidak, *Mélyépítés*, 2003. **5**: 16-20.
- Cavicchi A., Gambarotta L. 2006. Two-dimensional finite element upper bound limit analyses of masonry arch bridges, *Computers and Structures*, **84**: 2316-2328.
- Gáll I. 1970. *Régi magyar hidak*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 3-46.
- Gálos M., Vásárhelyi B. 2005. Közúti boltozott kőhidaink, *Kő*, **VII**(2): 21-25.
- Gilbert, M. and Melbourne, C. 1994. Rigid-block analysis of masonry structures, *The Structural Engineer*, **72**(21): 356-361.
- Huerta S. 2006. The Geometrical Design of Masonry Arches, *Nexus Network Journal*, **8** (2): 33-39.
- Huszár Zs., Kovács T., Péczely A. 2005. Bordás közúti vasbetonhíd számítása, *BME HSZT*, 5.
- Pegon P., Pinto V. A., Géradin M. 2001. Numerical modelling of stone-block monumental structures, *Computers and Structures*, **79**: 2165-2181.

- Stöckert F., Török Á., Görög P. 2008. Nógrád-megyei közúti hidak kőzetdiagnosztikája, *Kő*, **X**(1): 21-25.
- Útügyi Műszaki Előírás 813/2005. *Tégla- és kőboltozatos hidak állagmegóvása, korszerűsítése*, Magyar Útügyi Társaság, 61-108.