



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR, GEOTECHNIKA ÉS MÉRNÖKGEOLÓGIA TANSZÉK**

## **KŐBOLTOZATOK MÉRNÖKGEOLÓGIAI JELLEMZÉSE ÉS NUMERIKUS MODELLEZÉSE**

**PhD tézisek**

*(készült a nyilvános védésre)*

**Bögöly Gyula**

okl. építőmérnök, okl. közgazdász

Tudományos vezető:

Dr. Görög Péter  
adjunktus

Budapest, 2016.

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés, előzmények .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Az értekezés célkitűzései.....</b>	<b>2</b>
<b>3. Rövid irodalmi áttekintés .....</b>	<b>3</b>
<b>4. A kutatás módszere .....</b>	<b>4</b>
4.1. <i>Boltozott hidak teherbírásának vizsgálata .....</i>	<i>4</i>
4.2. <i>Falazott ívek laboratóriumi és numerikus modellezése .....</i>	<i>5</i>
<b>5. Új tudományos eredmények.....</b>	<b>8</b>
5.1. <i>Boltozott hidak teherbírásának vizsgálata tétiscsoport .....</i>	<i>8</i>
1. Tézis [5, 6] .....	8
2. Tézis [11] .....	9
3. Tézis [11] .....	9
5.2. <i>Falazott ívek laboratóriumi és numerikus modellezése tétiscsoport .....</i>	<i>10</i>
4. Tézis [7, 9, 11, 14] .....	10
5. Tézis [13, 14] .....	14
<b>6. Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei, további kutatási kitekintés .....</b>	<b>16</b>
<b>7. Hivatkozások a tétisfüzetben .....</b>	<b>17</b>
<b>8. Az értekezés témakörében készült publikációim .....</b>	<b>20</b>
<b>9. Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>21</b>

## 1. BEVEZETÉS, ELŐZMÉNYEK

A mérnöki építmények egyik legősibb szerkezeti formái a kőszerkezetű boltozatok. Ma már igen ritkán készülnek kőboltozatok, viszont a meglévők rendkívül nagy építészeti és örökségvédelmi értéket képviselnek. Őrzik történeti múltunk emlékeit, meghatározó kulturális jelentőséggel bírnak. Az ókor óta a világ minden részén szerkezetek széles körében alkalmazták őket, ennek ellenére modellezésük még napjainkban is sok kérdést vet fel. Ellenőrzésükre hazánkban sincs kiforrottan használt módszer, szabvány, ezért gyakran problémát okoz az ilyen szerkezetek teherbírásának ellenőrzése. Mivel építésük óta számottevő idő telt el, így sok esetben állapotuk leromlott, illetve jelentősen megnövekedtek a rájuk ható forgalmi és terhelési viszonyok is. Ezért teherbírásuk megfelelőségének igazolása sok esetben szükségessé vált.

Az egyik leggyakrabban vizsgált kőszerkezetek a boltozott kőhidak. Csupán az Egyesült Királyságban körülbelül 40000 (McKibbins et al., 2006), de hazánkban is több mint 1500 boltozott kőhíd áll (Gálos & Vásárhelyi, 2005). Ezért kutatásom elsődlegesen a kőboltozott hidak teherbírás vizsgálatára koncentrálok a mérnökgeológia oldaláról. Első lépésként több különböző kőanyagú boltozott kőhíd felmérését és vizsgálatát végeztem el a helyszíni diagnosztikától a laboratóriumi vizsgálatokon keresztül a különböző módszerekkel végzett teherbírás ellenőrzéséig. Vizsgálataim rámutattak, hogy meglévő, kőanyagú szerkezetek esetén a roncsolásos vagy roncsolásmentes módszerrel mérhető paramétereiből sokszor igen nehéz a hatékony modellezéshez szükséges bemenő adatokat előállítani, és ezen tényezők bizonytalanságából adódó hatások nagysága sem teljesen tisztázott. Továbbá a szerkezeti viselkedés elemzése is számos kérdést vet fel.

## 2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI

A fentiek alapján dolgozatomban két fő kérdéskörrel foglalkoztam a kőboltozatok mérnökgeológiai jellemzését és numerikus modellezését illetően: boltozott kőhidak teherbírás vizsgálataival és azok bemenő paramétereivel, illetve a bonyolultabb numerikus módszerek alkalmazásával a szerkezeti viselkedés vizsgálatában. A kutatás térbeli viselkedések elemzésével, fáradással, ferde vagy többgyűrűs boltozatokkal, szerkezet-háttöltés kapcsolatának vizsgálatával és vízszintes terhek hatásával nem foglalkozik. Az értekezés céljai a két területen belül a következők:

- a különböző teherbírás vizsgálatok (MEXE módszer, támaszvonala eljárás, merev-blokk módszer) eredményeinek összevetése, következtetések levonása
- a teherbírás számításához szükséges paraméterek hatásának értékelése érzékenységvizsgálat segítségével
- a szerkezeti viselkedés elemezhetőségének vizsgálata laboratóriumi modellkísérletek és hibrid – az elemek szétválását lehetővé tevő - végeselemes modellezés összehasonlításával
- a szén-szál-erősítésű polimer (CFRP) szalagos megerősítés számíthatóságának és a tönkremeneteli forma modellezhetőségének ellenőrzése

### 3. RÖVID IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Mivel a boltozott kőhidak és egyéb kőszerkezetek kulturális jelentősége nagy és szerkezeti viselkedésük egyedi, így számos hazai és külföldi cikk, tanulmány és kutatás foglalkozott és napjainkban is foglalkozik ezekkel. Boltozott szerkezetek mai modern egyensúlyi vizsgálatait Heyman (1966) munkája alapozta meg. Cikkei a 60as, 70es évektől kezdve jelentek meg, amikkel a boltozatok képlékenységtani vizsgálatainak alapjait is meghatározta. Munkásságát Heyman (1995) foglalja össze. Nemzetközi szinten rengeteg kutatója van a témának, közülük Harvey (1988), Page (1988), Gilbert & Melbourne (1994), Vermeltfoort (2001), Fanning & Boothby (2001) Cavicchi & Gambarotta (2006), Milani et al. (2008), Gibbons & Fanning (2010), munkáit és egyéb műveit mindenképp ki kell emelni. A boltozott hidak ellenőrzését a diagnosztikától a modellezésig McKibbins et al. (2006) munkája mutatja be a legátfogóbban, ajánlásokat megfogalmazva az egyes vizsgálatokra. A CFRP szalagos megerősítés alkalmazása boltozatoknál viszonylag új területnek számít. A témában Foraboschi (2004), Oliveira et al. (2010), Oliveira et al. (2011), Basílio et al. (2014), Maruccio et al. (2014) munkái adnak áttekintést.

A hazai szakirodalomban Kalinszky (1961), Dulácska (1994a), Peck (2003), Czeglédi (2005), Peck & Sajtos (2005), Déry (2010), Pattantyús-Ábrahám (2011), Hegyi (2012) foglalkozik a boltozatok különböző aspektusaival. Falazott ívek modellezésének különböző lehetőségeivel pedig Ther et al. (2010), Ther & Kollár (2014), Bagi (2014), Simon & Bagi (2014), Lengyel & Bagi (2015) foglalkoznak. Falazott szerkezetekkel kapcsolatos egyéb átfogó és újabb munkákra Dulácska (1994b), Sajtos (2001), Sajtos (2004), Földi (2011), Haris & Hortobágyi (2012) adnak példát. Falazatok szénszál-erősítésű polimer (CFRP) szalagos megerősítésével a hazai szakirodalomban Kiss et al. (2002a), Kiss et al. (2002b) foglalkozik.

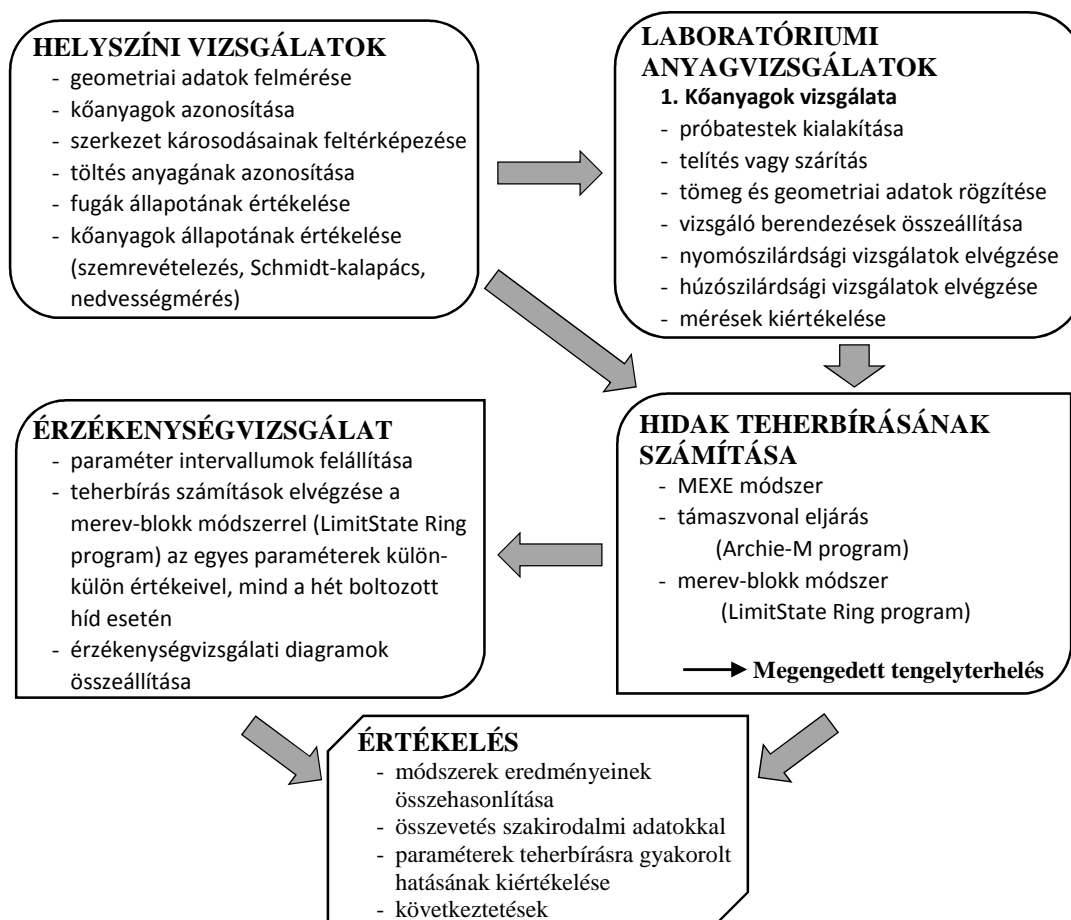
A boltozott kőszerkezetek egyik speciális területe a boltozott kőhidak vizsgálata. Magyarországon a boltozott hidak vizsgálataival a legátfogóbban Orbán (2006a), Orbán (2006b), Orbán (2008), Orbán & Lenkei (2009), Orbán & Gutermann (2009), Orbán (2014), (Orbán & Juhász, 2016) munkái foglalkoznak. A legteljesebb összefoglalást a Magyar Útügyi Társaság (2006) adja. Kőhidakkal kapcsolatos áttekintésekre és vizsgálatokra adnak még példát Berkó (2003), Gálos & Vásárhelyi (2005), Gubányi-Kléber & Vásárhelyi (2004), Tóth et al. (2009), Turi et al. (2013) munkái. A hazai boltozott kőhíd állományt Gáll (1970) és Imre et al. (2009) művei mutatják be.

Boltozatok laboratóriumi kísérleteiről és azzal párhuzamos numerikus vizsgálatáról nem áll rendelkezésre korábbi hazai kutatás.

## 4. A KUTATÁS MÓDSZERE

### 4.1. Boltozott hidak teherbírásának vizsgálata

A teherbírás ellenőrzés folyamatának és gyakorlati nehézségeinek teljes körű áttekintése érdekében hét boltozott híd (Sóskúti Benta-patak híd, Sóskúti Malom-híd, Szentendrei Bükkös-patak híd, Pataki Derék-patak híd, Romhányi Lókos-híd, Héhalmi Bér-patak híd, Gyöngyöspatai Rédei-Nagy-patak híd) felmérését és vizsgálatát végeztem el. A hidak teherbírásának vizsgálatával összevettem a legismertebb közelítő számítási módszer - a MEXE módszer (MEXE, 1963) - eredményeit a támaszvonala eljárás és a merev-blokk módszer eredményeivel. A számításokhoz az ARCHIE-M nevű szoftvert (Obvis, 2016) és a scheffieldi egyetem által fejlesztett LimitState Ring (LimitState Ltd, 2011) programot használtam. Az eredményeket felhasználva megvizsgáltam a MEXE módszer adaptálhatóságát zömök pillérű, többnyílású hidak esetére. Az elemzésben Melbourne et al. (1997) és Magyar Útügyi Társaság (2006) munkájára támaszkodtam. Végezetül a vizsgált köhidakon a merev-blokkos módszer segítségével érzékenységvizsgálatot készítettem, hogy ellenőrizzem az egyes bemenő paraméterek teherbírásra gyakorolt hatását. A kutatás egyes lépéseit az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra Boltozott hidak teherbírásának vizsgálatával kapcsolatos kutatás folyamatábrája

A helyszíni vizsgálatok során az egyes mállási formák osztályozása Fitzner et al. (1995), Török (2002) és ICOMOS (2008) alapján történt. A kőanyagok állapotának értékeléséhez N-34 típusú Schmidt-kalapácsot használtunk. A laboratóriumi mérések és vizsgálatok a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Mérnökgeológia laboratóriumában készültek. A méréseket kalibrált és a Nemzeti Akkreditáló Testület (NAT) által akkreditált eszközökön végeztük. A testsűrűség vizsgálata az MSZ EN 1936:2007 szabvány alapján, a közvetett húzószilárdság meghatározása az MSZ 18285/2-79 szabvány szerint, az egyirányú nyomószilárdság mérése pedig az MSZ EN 1926:2007 szabvány előírásai szerint történt. A rugalmassági modulus és Poisson tényező meghatározása az (ISRM, 2014) ajánlása alapján készült.

Boltozatok különböző károsodási formáinak figyelembe vételére jelenleg nincs kiforrott és egységes eljárás. A különböző módszerek különböző mértékben és módon képesek néhány károsodás figyelembe vételére. Jelen számítások tartalmazzák a fugahiányok hatását, illetve a boltozat dolgozó szélességének csökkentésével számításba vett hosszirányú repedések hatását. Támaszelmozdulások, alapsüllyedések, esetleges belső mögéfalazások, a homlokfal merevítő hatása, kihullott blokkok, utólagos megerősítések, beszakadások nincsenek figyelembe véve.

#### **4.2. Falazott ívek laboratóriumi és numerikus modellezése**

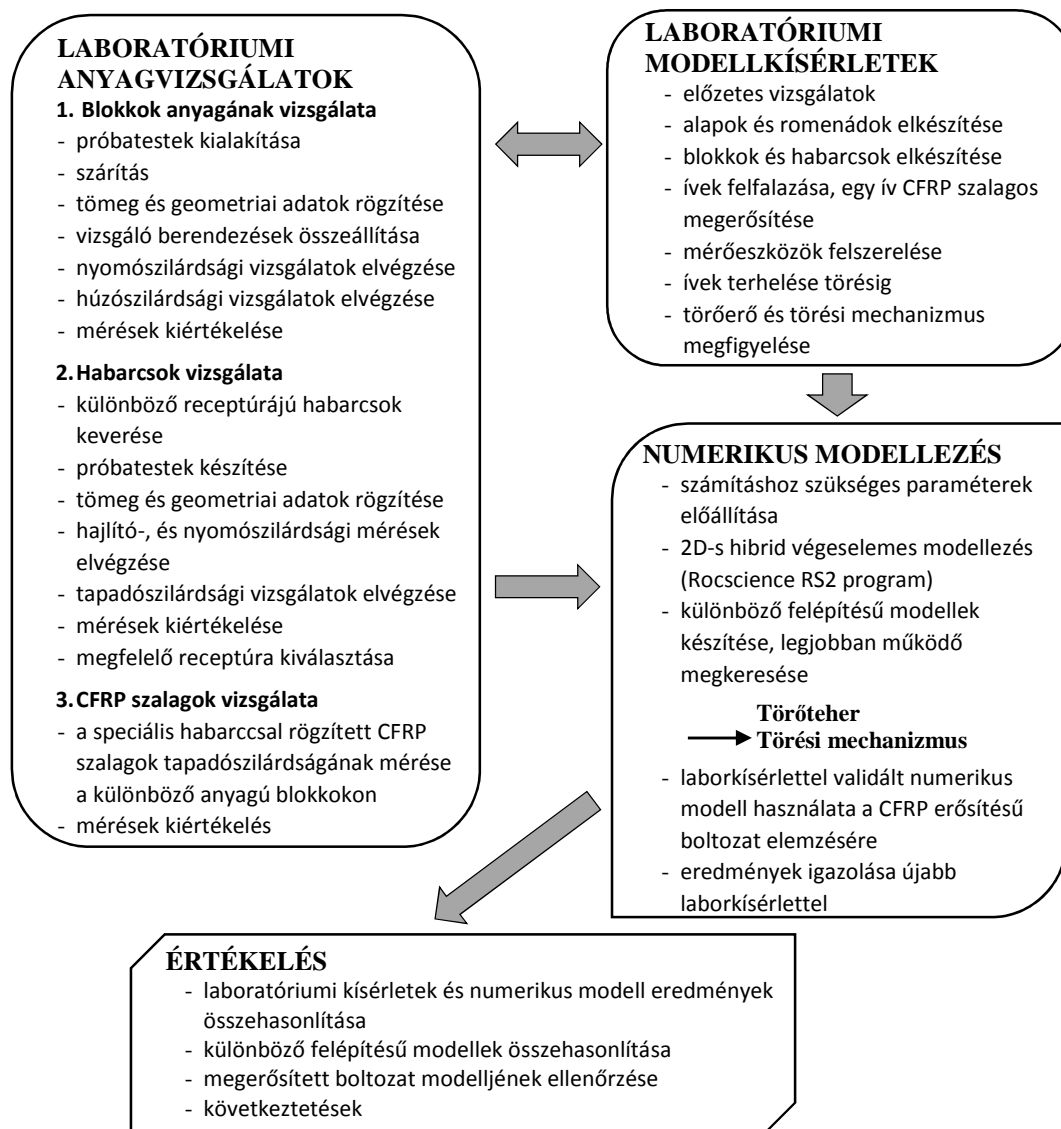
A nemzetközi gyakorlatban bevett szokás, hogy egy-egy új módszer vagy szoftver működését és pontosságát laboratóriumi kísérletekkel validálják. Ilyen kutatásokra adnak példát Melbourne & Gilbert (1995), Vermeltoort (2001), Milani et al. (2008) munkái. Jelen kutatás a nemzetközi példákat követve egy közetmechanikai problémák megoldására fejlesztett hibrid végeselemes program (Rocscience RS2) eredményeit validálja laboratóriumi kísérletekkel, vizsgálva, hogy az adott módszer mennyire alkalmas kupás falazású dongaboltozatok vagy boltívek szerkezeti viselkedésének elemzésére, illetve megfelelően becsli-e a teherbírást. A kutatás egyes lépéseit a 2. ábra összegzi.

A kísérlethez felhasznált építőanyagok laboratóriumi vizsgálata a már előzőekben (4.1. fejezet) bemutatottak szerint történt. A habarcsokra vonatkozó hajlító- és nyomószilárdsági mérések az MSZ EN 1015-11:2000 számú szabvány szerint, a habarcsok felületre merőleges tapadószilárdságának vizsgálatait az e-ÚT 07.03.21:2000 [ÚT2-3406] szabvány alapján készült.

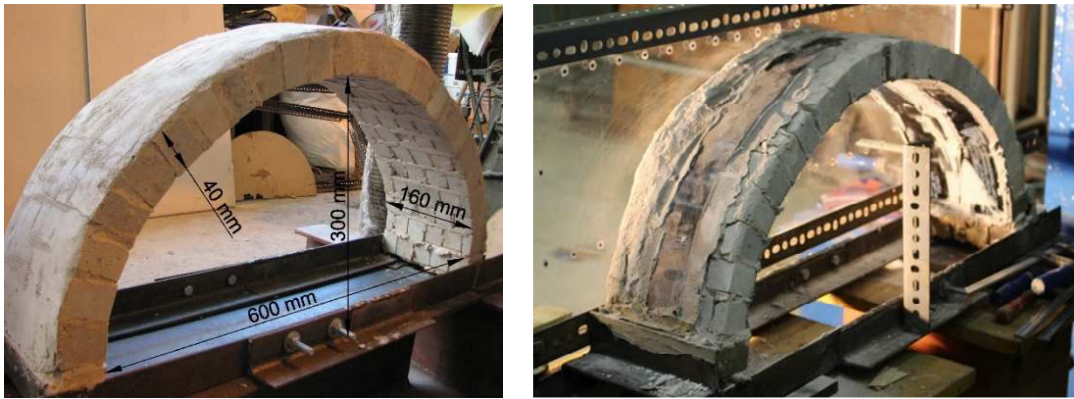
A kísérletekhez két egyforma méretű, kupás falazású, kicsinyített dongaboltozat (3. ábra); illetve egy boltív (4. ábra) épült. A két azonos geometriájú kicsinyített boltozatok egyike CFRP lamellás megerősítést kapott, így a vizsgálatokkal ennek a megerősítésnek a számíthatósága is ellenőrizhető volt. Az ívek elemzéshez szükséges anyagvizsgálatok elvégzése, majd a törőteherbírást laboratóriumi meghatározása után, a mért eredményeket összevettem a numerikus modellek eredményeivel, és értékelttem a tapasztalatokat. A laboratóriumi

modellkísérletek nagy része Varró Richárddal közös munkánk eredménye, akinek témavezetője voltam TDK (Varró, 2012) és diplomamunkájában (Varró, 2015) is. Az eredményekről Varró et al. (2013), Varró et al. (2014) is beszámol. A numerikus modelleket a kutatásaim keretén belül továbbfejlesztettem.

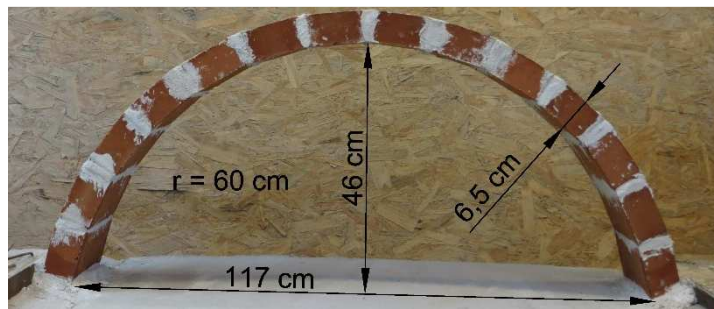
A két azonos geometriájú erősített, illetve erősítés nélküli kicsinyített boltozat alakja szabályos félkörív volt. Mindkét ív kupás falazással, 3x3x4 centiméteres finomszemű homokkő blokkokból épült. A nagyobb méretű boltív szegmens körív alakúra épült, kisméretű tömör téglából. A fugák mindegyik esetben tradicionális mészhabarc használatával készültek. Az erősítés három darab 50 mm szélességű SIKA CarboDur M-514 típusú szalag az ív teljes hosszában való felragasztásával történt. A szalagok rögzítéséhez a Sikadur-30 kétkomponensű, epoxigyanta alapú, nedvességálló ragasztót használtuk.



**2. ábra** Falazott ívek laboratóriumi és numerikus modellezésével kapcsolatos kutatás folyamatábrája

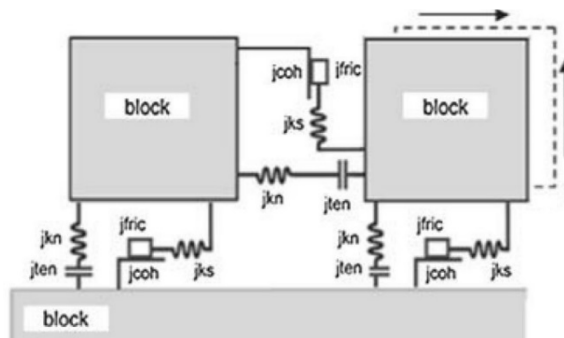


3. ábra Kicsinyített boltozat a geometriai méretekkel (balra), CFRP szalagokkal erősített boltozat (jobbra)



4. ábra A laboratóriumi boltív geometriai méretei

A numerikus modellezéshez a Rocscience RS2 (Rocscience, 2014) kétdimenziós hibrid végeleemes programot alkalmaztam. A szoftver hat csomópontú háromszög alakú lineárisan rugalmas, izotróp viselkedésű elemeket használ. A módszer hibrid jellegét az adja, hogy az elemek között olyan határfelületeket lehet megadni, amely mentén elmozdulás, elválás jöhet létre. Az elemek közti kapcsolatok figyelembevétel a húzószilárdság, a kohézió, a súrlódási szög, illetve a normál- és nyírómerevség beállításával történt, a Mohr-Coulomb törési határfeltételt alkalmazva. A kapcsolatok mechanikai modelljét az 5. ábra szemlélteti. A szilárdsági paraméterek reziduális értékei is megadhatók, így egy elnyíródott kapcsolat viselkedése is modellezhető. A kapcsolatok normál-, és nyírómerevségének meghatározása Senthivel & Lourenço (2009) alapján történt.



jkn~normálmerevség, jks~nyírómerevség, jten~húzószilárdság, jfric~súrlódási szög, jcoh~kohézió

5. ábra A kapcsolatok működésének szemléltetése (Sarhosis et al., 2015) alapján



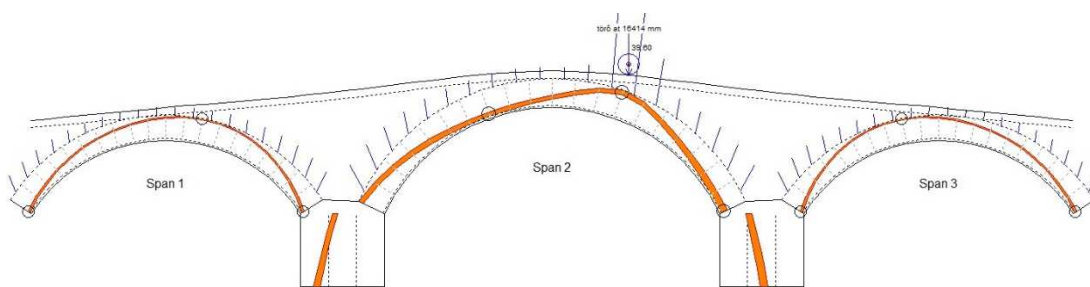
## 5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### 5.1. Boltozott hidak teherbírásának vizsgálata téziscsoport

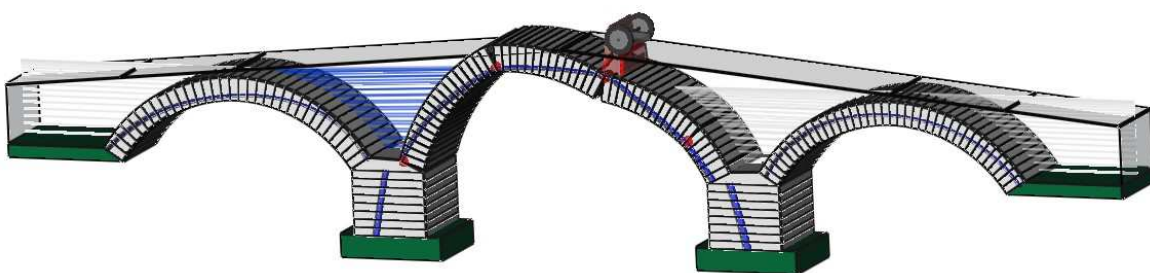
#### 1. Tézis [5, 6]

Öt többnyílású boltozott kőhid numerikus módszerekkel (merev-blokk módszer, támaszvonal eljárás) számított teherbírásának és közelítő számításának összevetéséből megállapítottam, hogy az általam vizsgált zömök pillérű, többnyílású boltozott hidak esetén (merev hídfők, pillérek magasság/szélesség aránya 0,11-0,87; a boltozatok támaszköze 3,6-9,2 m, támaszköz/ív magasság aránya 2,11-3,83) a MEXE módszer használható a megengedett tengelyterhek számítására. A vizsgált öt többnyílású híd esetén a MEXE közelítő számítási eljárással kapott teherbírás az 55-70%-át teszi ki a merev blokkos módszerrel meghatározott eredményeknek.

Vizsgálataimhoz Melbourne et al. (1997) és Magyar Útügyi Társaság (2006) munkáját vettem alapul, miszerint egy többnyílású híd boltozatai külön-külön működnek, amennyiben a pillérei zömöknek minősülnek. Mivel a MEXE módszer vizsgálati kritériuma, hogy csak egynyílású hidak esetén alkalmazható a számítás, fenti megállapításommal a módszer alkalmazhatóságának feltételeit bővítettem ki. Az ellenőrzéshez a támaszvonal eljárást és merev-blokk módszert használtam, melyekre a 6. és 7. ábra ad példát. A vizsgált hidak különböző módszerekkel számított teherbírásait a legpontosabb számítás, azaz a merev-blokk módszer arányában a 1. táblázatban foglaltam össze. A táblázatban szürkével jelöltek a többnyílású hidak. Az „e” jelű híd esetén a túlbecslés oka a kis támaszköz és a kis vastagságú feltöltés, ami a MEXE módszer ismert hibája. A többi esetben a becslés pontossága a módszer pontosságának és a nemzetközi tapasztalatoknak (Gibbons & Fanning, 2010) megfelelő.



6. ábra A Bér-patak hídon kialakuló támaszvonal a törés pillanatában (39,06 t)



7. ábra A merev-blokk módszerrel kapott törési mechanizmus a Bér-patak híd esetén (49,0 t)

**1. táblázat** Megengedett tengelyterhelések a merev-blokk módszer eredményeinek arányában

	a	b	c	d	e	f	g
MEXE módszer	0,55	0,74	0,89	0,70	2,08	0,57	0,67
Támaszvonala elj.	0,64	0,41	0,75	1,15	0,96	0,81	0,82
Merev-blokk m.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Jelmagyarázat: a~Sóskút, Benta-p. híd, b~Malom-híd, c~Szentendre, Bükkös-p. híd, d~Patak, Derék-p. híd, e~Romhány, Lókos-híd, f~Héhalom, Bér-p. híd, g~Gyöngyöspata, Rédey-Nagy-p. híd

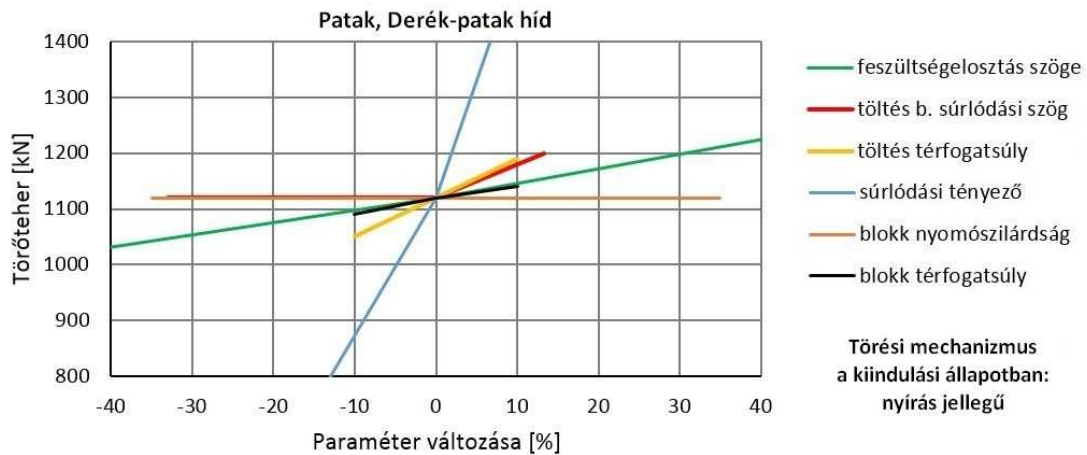
## 2. Tézis [11]

Hét boltozott kőhíd (2 db egynyílású, 2 db kétnyílású, 3 db háromnyílású) teherbírásának merev-blokk módszerrel alapuló érzékenységvizsgálatából megállapítottam, hogy a vizsgált hidak teherbírásának alakulásában a blokkok közti súrlódási tényezőnek van a legnagyobb szerepe. A további öt elemzett tényező (feszültségelosztás szöge, töltés belső súrlódási szöge, töltés anyagának térfogatsúlya, blokkok nyomószilárdsága, blokkok testsűrűsége) a vizsgált boltozott kőhidak (merev hídfők, pillérek magasság/szélesség aránya 0,11-0,87; a boltozatok támaszköze 3,6-9,2 m; támaszköz/ív magasság aránya 2,11-3,83) teherbírását kevésbé befolyásolta.

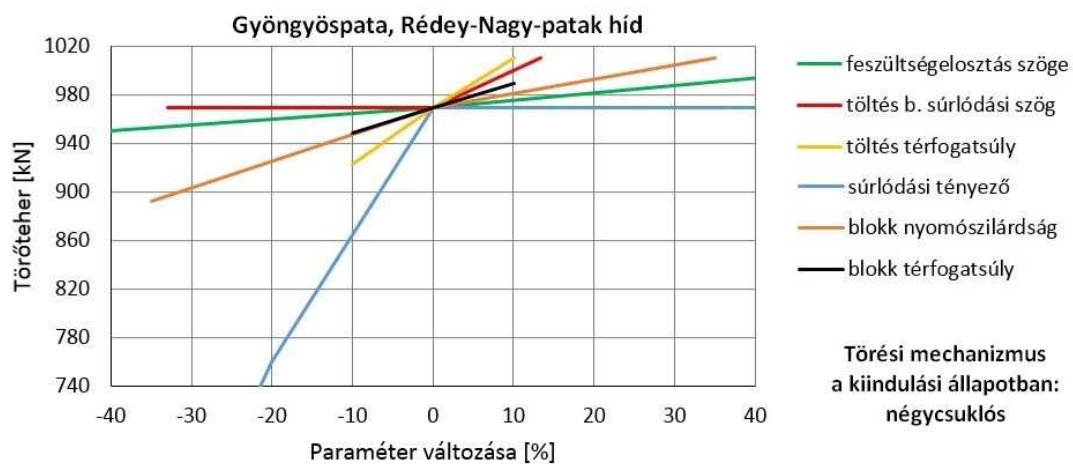
## 3. Tézis [11]

Hét boltozott kőhíd (merev hídfők, pillérek magasság/szélesség aránya 0,11-0,87; a boltozatok támaszköze 3,6-9,2 m; támaszköz/ív magasság aránya 2,11-3,83) teherbírásának merev-blokk módszerrel alapuló érzékenységvizsgálatából megállapítottam, hogy a vizsgált hidak teherbírása a feltöltés anyagának térfogatsúlyára érzékenyebb, mint a boltozat kőanyagának nyomószilárdságára. A vizsgált hidak teherbírásának átlagos eltérése a blokkok nyomószilárdságának  $\pm 10\%$ -os változtatása esetén  $\pm 1,88\%$ , míg a feltöltés térfogatsúlyának szintén  $\pm 10\%$  változtatása esetén  $\pm 4,80\%$  volt.

Az érzékenységvizsgálatok eredményeire ad példát a 8. és 9. ábra. Ezek eredményei szerint boltozott hidak esetén a súrlódási tényező és a talajfizikai paraméterek változására a legérzékenyebb a teherbírás. Ez is mutatja, hogy a feltöltésnek többszörös szerepe van a boltozatok erőjátékában. Az eredmények továbbá azt mutatják, hogy a kialakuló törési mechanizmus jelentősen befolyásolja a paraméterek teherbírásra gyakorolt hatását. Ezért mindenképp javasolt a különböző tényezők pontosságára a tönkremeneteli mechanizmustól függően figyelmet szentelni. Nyírás jellegű törési mechanizmus esetén (8. ábra) a súrlódási tényező értékének pontossága különösen meghatározó. Az elemzett hidak esetén a tényező kismértékű változása is jelentős különbségeket eredményez a törőerőben (10 %-os változására átlagosan 28 %-kal módosulhat a törőerő).



8. ábra Érzékenységvizsgálat eredménye a Derék-patak hídra



9. ábra Érzékenységvizsgálat eredménye a Réday-Nagy-patak hídra

## 5.2. Falazott ívek laboratóriumi és numerikus modellezése téziscsoport

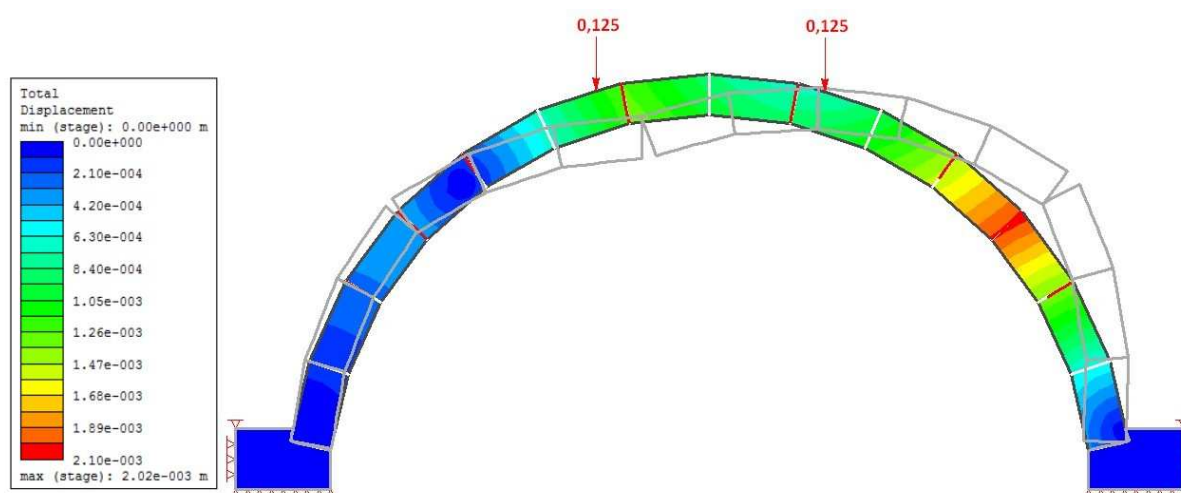
### 4. Tézis [7, 9, 11, 14]

Laboratóriumi kísérletekkel alátámasztott numerikus modellezéssel igazoltam, hogy hibrid végeelemes módszerrel (Rocscience RS2) a szegmens alakú kupásan falazott ívek és dongaboltozatok szerkezeti viselkedése elemezhető, a vizsgált szerkezetek teherbírása megfelelő pontossággal számítható (83-97 %-a a kísérleti eredményeknek). A megfelelő pontosság eléréséhez a modell felépítésénél szükséges az idealizált geometria felvétele helyett, a pontos geometria, azaz figyelembe kell venni a blokkok valós formáját és a fugák valós tágasságát. Az idealizált geometriával készült modell a vizsgált ív teherbírását négyszeresen túlbecsülte, a tönkremeneteli mechanizmus a valóságtól eltért. Míg pontos geometria vizsgálata esetén a számított eredmény a valóság konzervatív becslését adta (a laborban mért teherbírás 83%-át) és a tönkremeneteli forma megegyezett a kísérletben megfigyelttel.

A 2. táblázat összegzi a téglaboltív és a kicsinyített homokkő boltozat laboratóriumban mért és numerikus modellel számított törőterhét. Az eredmények láthatóan jó egyezést mutatnak mind a két esetben, a teherbírás megfelelő pontosságú számítása a módszer alkalmas volt. A téglaboltív numerikus modelljét a 10. ábra, a homokkő boltozat modelljét a 15. ábra mutatja. Az említett ábrákon színskálával jelölve láthatók a kialakult elmozdulások a törés pillanata előtt, illetve piros kiemelés jelöli az egyes keresztmetszetek berepedt szakaszait. A törőerőn kívül a numerikus modellekkel kapott tönkremeneteli mechanizmus is jól közelíti a valóságot. A laborban kialakult törési képet a boltív esetén a 11. ábra, a boltozat esetén a 12. ábra mutatja. Az ívek mind a két esetben négy csukló kialakulásával veszítették el stabilitásukat.

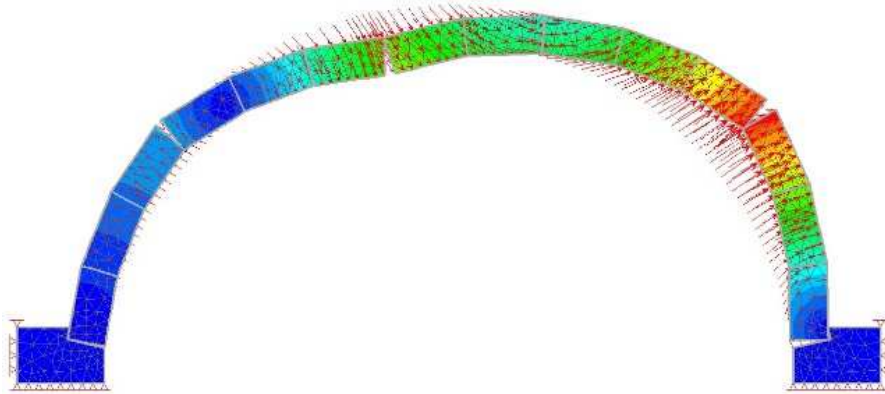
**2. táblázat** A laboratóriumi kísérletek és a numerikus modellek törőteher eredményeinek összehasonlítása

	Numerikus modell		Laboratóriumi kísérlet
	Számított törőteher	Számított/Kísérleti törőteher	Kísérleti törőteher
boltív	0,25 kN (2 x 0,125 kN)	97 %	0,258 kN (2 x 0,129 kN)
boltozat	0,16 kN (2 x 0,08 kN)	83 %	0,193 kN (2 x 0,097 kN)

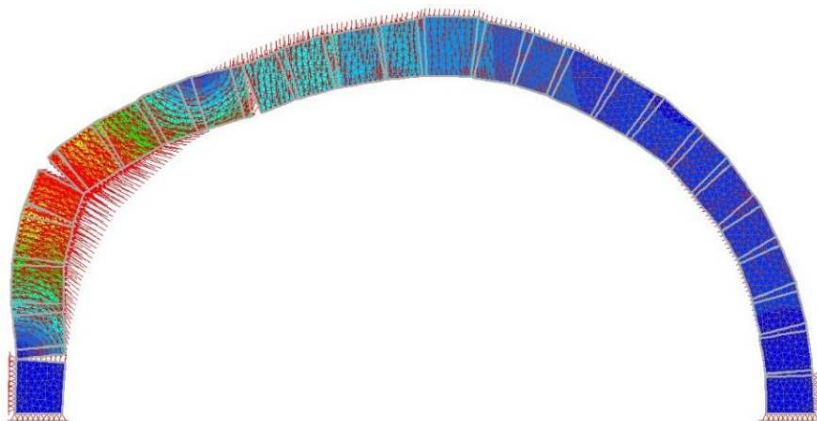


**10. ábra** A téglaboltív törőterhe és elmozdulásai a törés pillanatában

Kőanyagokból készült boltozatoknál gyakran előfordul, hogy a boltozat szabálytalan, egymástól eltérő méretű és formájú blokkokból áll. Ezzel szemben a numerikus modellezésnél gyakran idealizált, szabályos geometriájú elemekkel dolgozunk. Ennek hatását ellenőriztem a kicsinyített homokkő boltozaton, ami szabálytalan elemekből épült. Ilyen esetben a numerikus modell megalkotásánál több megközelítés is lehetséges a blokkok geometriáját illetően. Az ív modellezhető idealizált, azonos formájú és méretű elemekkel (13. ábra); valós formákat és méreteket követő elemekkel (14. ábra); illetve valós formákkal és méretekkkel, a fuga vastagságokat is figyelembe véve (15. ábra). A kicsinyített méret miatt ebben a vizsgálatban a fugák vastagságának blokkokhoz mért aránya nagyobb volt az átlagosnál, így ennek hatása is jelentős.



**11. ábra** A boltív kialakult törésképe: laboratóriumi modell (fent), numerikus modell (lent)



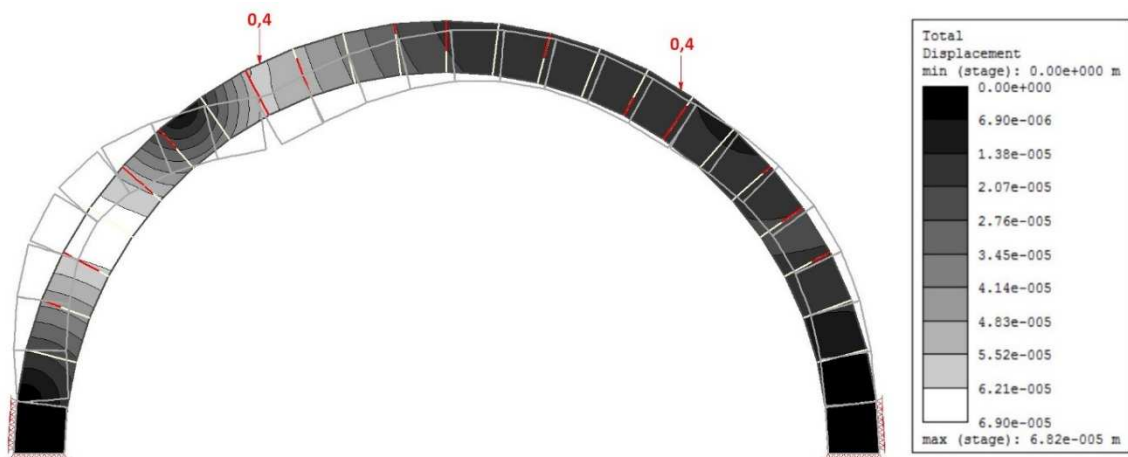
**12. ábra** A boltozat kialakult törésképe: laboratóriumi modell (fent), numerikus modell (lent)



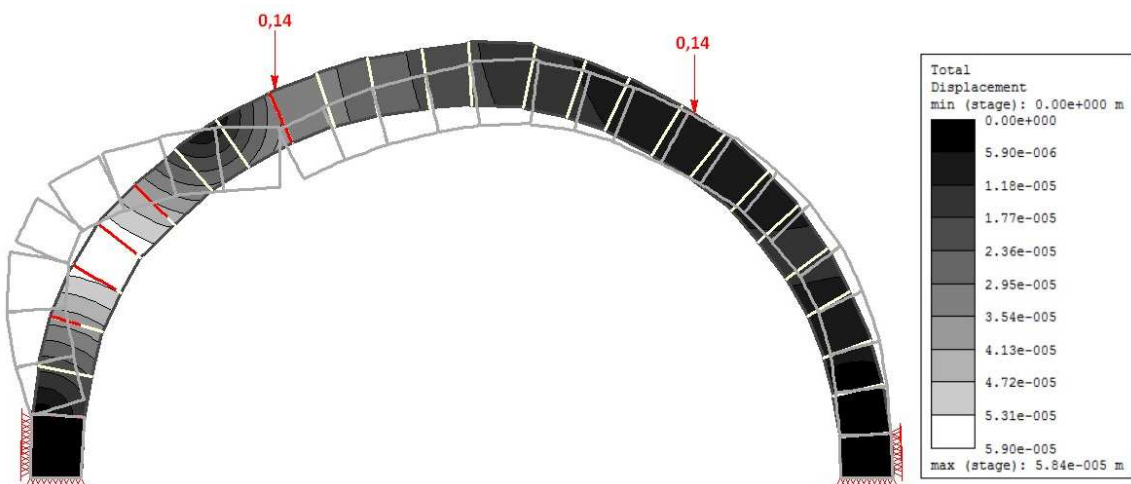
A három különböző felépítésű numerikus modellel számított törőteher és a valóságban mért érték összehasonlítása látható a 3. táblázatban. Az eredmények alapján látható, hogy az idealizált geometriát alkalmazó modell jelentősen túlbecsülte a boltozat teherbírását. A valóságot legjobban a pontos geometriát és a fugák vastagságát is figyelembe vevő modell közelítette. A 13.-15. ábrákon megfigyelhető továbbá, hogy a figyelembe vett geometria a kialakult törési képet is jelentősen befolyásolta. Feketétől fehérig növekedve láthatók a kialakult elmozdulások, illetve pirossal kiemelve az egyes keresztmetszetek berepedt szakaszai.

**3. táblázat** A laboratóriumi kísérlet és a különböző felépítésű numerikus modellek törőteher eredményeinek összehasonlítása

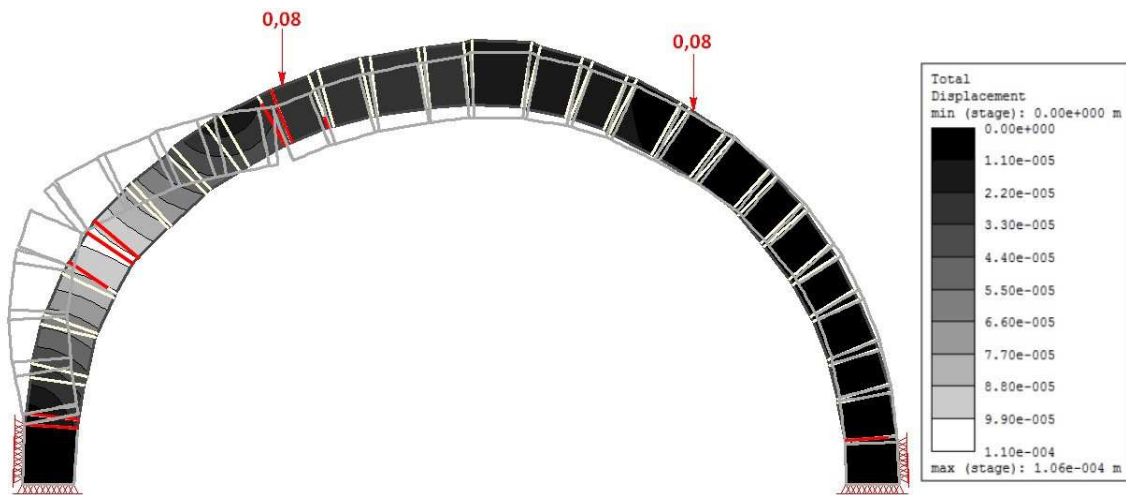
Numerikus modellek			Laboratóriumi kísérlet
Modell neve	Számított törőteher	Számított/Kísérleti törőteher	Kísérleti törőteher
<i>Idealizált blokkos m.</i>	0,8 kN (2 x 0,4 kN)	414 %	0,193 kN (2 x 0,097 kN)
<i>Valós blokkos m.</i>	0,28 kN (2 x 0,14 kN)	145 %	
<i>Valós blokkos és fugás m.</i>	0,16 kN (2 x 0,08 kN)	83 %	



**13. ábra** Az idealizált geometriájú kicsinyített boltozat törőterhe és elmozdulásai a törés pillanatában



**14. ábra** A valós geometriájú kicsinyített boltozat törőterhe és elmozdulásai a törés pillanatában



15. ábra A valós geometriájú, fuga vastagságokat is figyelembe vevő kicsinyített boltozat törőterhe és elmozdulásai a törés pillanatában

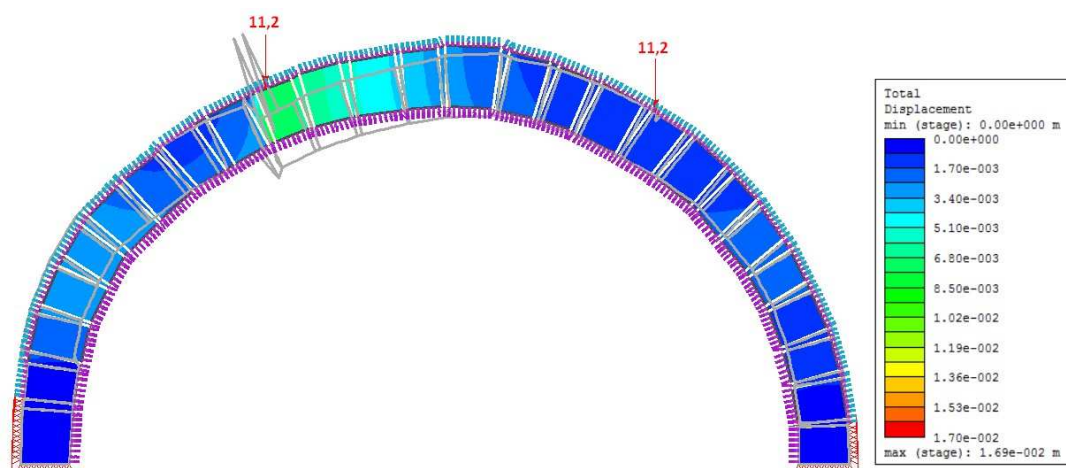
### 5. Tézis [13, 14]

**Az extradosz és intradosz teljes ívhosszán felragasztott szénszál-erősítésű szalagos (CFRP) megerősítésű kupás falazású dongaboltozat esetén laboratóriumi kísérlettel igazoltam, hogy a kalibrált numerikus modellel, (Rocscience RS2 szoftver használatával) a megerősítés hatása számítható, a megváltozott tönkrementel előrejelezhető.**

A megelőző vizsgálatokban validált numerikus modellt felhasználva ellenőriztem, hogy a számítás valóban helyesen működik-e és alkalmas-e további problémák megoldására, így például a CFRP szalagos megerősítés hatásának számítására. A laboratóriumban mért eredmények alapján a megerősített boltozat (2 x 11,25 kN) 24,5 kN-os terhelésre ment tönkre. A boltozat numerikus modellje az előzőekben megállapítottak alapján a blokkok valós formájának és a fugák vastagságának figyelembe vételével készült. A modell jelen esetben is kielégítő pontossággal közelítette a valós törőerő nagyságát (4. táblázat). Az eltérés teherben kifejezve ugyan nagy, de a százalékos arány az eddigiekkel összhangban van. A számított teherbírás a mért érték 91 %-a.

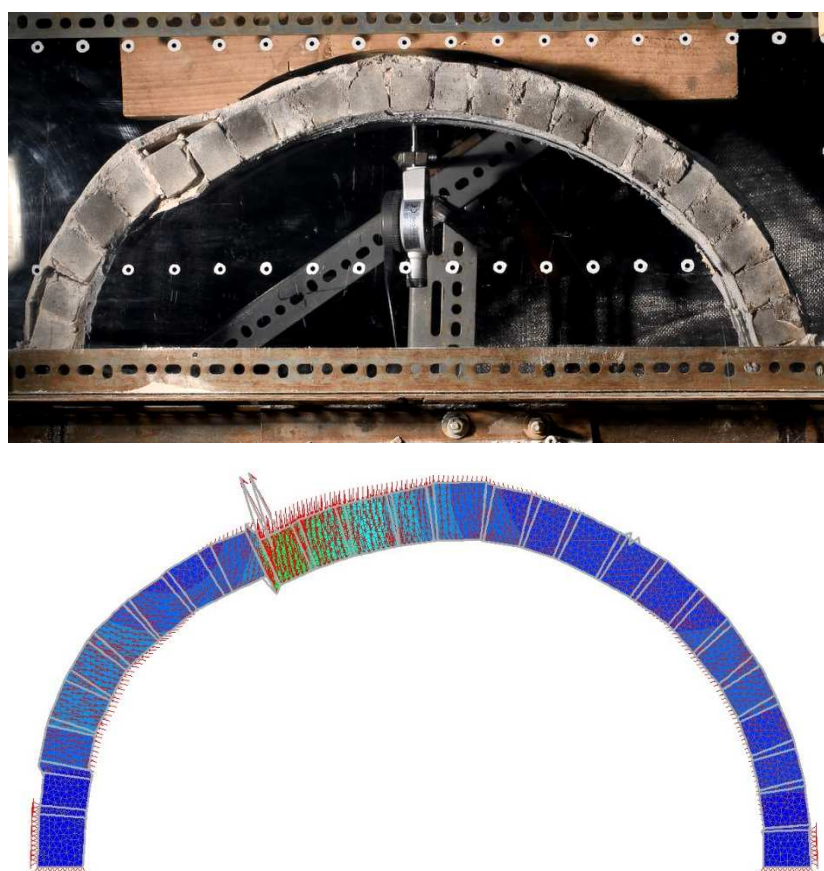
4. táblázat A laboratóriumi kísérlet és a numerikus modell törőteher eredményeinek összehasonlítása a CFRP erősítésű ív esetén

Numerikus modell		Laboratóriumi kísérlet
Számított törőteher	Számított/Kísérleti törőteher	Kísérleti törőteher
22,4 kN (2 x 11,2 kN)	91 %	24,5 kN (2 x 11,25 kN)



**16. ábra** A CFRP lamellákkal megerősített boltozat törőterhe és elmozdulásai a törés pillanatában

A 16. ábra mutatja a boltozat elmozdulásait a törés pillanatában. A törés bekövetkeztéig az ív összes kapcsolata teljes egészében átrepedt. A törés viszont mégsem alakult ki, mivel a szerkezet elfordulásait és ezzel egyidejűleg a négy csuklós tönkremeneteli mechanizmus kialakulását az extradoszra és intradoszra felhelyezett szalagok meggátolták. A módosult törés a kísérletben a CFRP szalag leválásával és a blokkok elcsúszásával jött létre közel az erőbevezetés helyéhez (17. ábra). A modell most is jól mutatja a szerkezet valós viselkedését, az eltérések az idealizált anyagi paramétereiből adódhattak.



**17. ábra** A megerősített boltozat kialakult törésképe: laboratóriumi modell (fent), numerikus modell (lent)



A boltozatok jellemzően négycsuklós vagy háromcsuklós mechanizmus létrejöttével mennek tönkre. Mivel a CFRP szalagok gátolják az elfordulások kialakulását, a csuklós tönkremenetelek blokkolva vannak. Az erősített boltozatok tönkremenetele ezért egészen máshogy következnek be. Ilyen esetben a kőzetblokkok nyomószilárdságának kimerülése, a blokkok szétcsúszása, a CFRP szalag leválása, vagy a szalag húzási szakadása következhet be (Foraboschi, 2004). A kísérlet során jól megfigyelhető volt ez a megváltozott tönkremeneteli mechanizmus, a vizsgált boltozat a szalag leválására veszítette stabilitását.

## **6. AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI, TOVÁBBI KUTATÁSI KITEKINTÉS**

A bemutatott új tudományos eredmények kőboltozott hidak teherbírásának vizsgálatát, illetve boltívek és kupás falazású boltozatok szerkezetei viselkedésének elemzését segítik. Vizsgálati eredményeimmel egy egyszerű és elterjedt közelítő számítás (a MEXE módszer) felhasználási lehetőségeit bővítettem ki zömök pillérű többnyílású hidak esetére. Ezzel lehetővé tettem a gyakorlat számára további számos híd könnyebb ellenőrizhetőségét.

Érzékenységvizsgálatok eredményeként megállapítottam, hogy a különböző bemenő adatok pontosságára a tönkremeneteli mechanizmustól függően kell figyelmet szentelni. Kutatásom eredményei felhívják a figyelmet azokra a paraméterekre (pl. blokkok közti súrlódás), amik pontatlanságára érzékenyen reagál a teherbírás, így ez gyakorlati vizsgálatok esetén támpontot adhat a mérnököknek. Érdekes eredmény, hogy teherbírás érzékenyebben reagál a feltöltés súlyának bizonytalanságára, mint a boltozat építőköveinek nyomószilárdságára. Ez a megállapítás kiemeli a töltés vizsgálatának fontosságát ezeknél a számításoknál. Mivel a blokkok közti súrlódási tényező nem mérhető, ám igen fontos paraméter a számítás szempontjából, így ezek értékének felvétele további kutatásokra ad lehetőséget különböző kőanyagok és különböző habarcsok laboratóriumi vizsgálatával.

Falazott boltozatok laboratóriumi és numerikus modellezéséből kapott eredményeimmel igazoltam, hogy egy hibrid végeeselemes módszer (Rocscience RS2) megfelelő pontossággal számítja ívek törőterhét, illetve alkalmas a törési mechanizmusok előrejelzésére mind az erősítetlen, mind a CFRP lamellával erősített ívek esetén. A numerikus modellek legnagyobb tanulsága az volt, hogy jelentős eltérések adódhatnak az idealizált és a valós geometriával való modellezés között. Az idealizált geometriával való számítás jelentősen túlbecsülte a boltozat teherbírását, illetve a törési képet sem adta vissza. Szabálytalan alakú és különböző méretű blokkokból épült boltozatok esetén ezért, a modellezéskor lehetőség szerint a geometriai imperfekciókat figyelembe kell venni. Az eredményeket a jövőben mindenképp érdemes lenne, valós méretű boltozatok esetén is validálni. A bemutatott kísérletekkel igazolt numerikus modellek

alkalmasak a kutatás jövőbeni továbbviteléhez, hiszen ezek a validált modellek már felhasználhatóak újabb hatások (feltöltés, vízszintes erők, stb.) elemzéséhez is.

Összességében elmondható, hogy a kőboltozatok vizsgálata egy összetett, több tudományterületen átívelő kutatási téma, mely a mai napig újabb és újabb megválaszolandó kérdésekkel, problémákkal látja el a mérnököket. Az anyagtudományok, mérési technológiák és numerikus módszerek fejlődésével a téma kutatottsága továbbra is fokozódni fog. Jelenleg a rendelkezésre álló mechanika modellek pontossága messze felülmúlja az egyes anyagtulajdonságok mérési pontosságát, így elméletben nagy precizitással, de gyakorlatban csak jelentős becslésekkel tudjuk a meglévő szerkezetek teherbírását számolni. Ezért a jövőben mindenképp érdemes hangsúlyt fektetni a diagnosztikai eljárások fejlesztésére, és ezeknek a társtudományoknak a szorosabb együttműködésére.

## 7. HIVATKOZÁSOK A TÉZISFÜZETBEN

- Bagi, K., 2014. When Heyman's Safe Theorem of rigid block systems fails: Non-Heymanian collapse modes of masonry structures. *International Journal of Solids and Structures* 51, 2696–2705. doi:10.1016/j.ijsolstr.2014.03.041
- Berkó, D., 2003. Boltozatos kőhidak. *Mélyépítés* 16–20.
- Cavicchi, A., Gambarotta, L., 2006. Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges. *Computers & Structures* 84, 2316–2328. doi:10.1016/j.compstruc.2006.08.048
- Czeglédi, O., 2005. *Épületszerkezettan 2. - Boltozatok.*
- Déry, A., 2010. *Öt könyv a régi építészetéről 2. - Falak, boltozatok, tagozatok, lépcsők, Gyakorlati műemlékvédelem.* Terc Kft., Budapest.
- Dulácska, E., 1994a. Falazatok és boltozatok: Segédlet építészmérnök hallgatók részére. BME. Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék, Budapest.
- Dulácska, E., 1994b. Falazott szerkezetek tervezése és kivitelezése. : Segédlet építészmérnök hallgatók részére. Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Kar, Budapest.
- Fanning, P.J., Boothby, T.E., 2001. Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers & Structures* 79, 2645–2662. doi:10.1016/S0045-7949(01)00109-2
- Fódi, A., 2011. The behaviour of a simplified micromodel for masonry, in: XI. Magyar Mechanikai Konferencia: Az Előadások Összefoglalói (In: Baksa A., Bertóti E., Szirbik S. (Szerk.)). Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, pp. 1–11.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips. *Journal of Composites for Construction* 8, 191–202. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(191)
- Gáll, I., 1970. *Régi magyar hidak.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Gálos, M., Vásárhelyi, B., 2005. Közúti boltozott kőhidaink. *Díszítő Építő Mű Terméskő* 7, 21–25.
- Gibbons, N., Fanning, P.J., 2010. Ten stone masonry arch bridges and five different assessment approaches, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Arch Bridges ARCH'10* (In: B. Chen, J. Wei (Eds.)). Presented at the 6th International Conference on Arch Bridges, Fuzhou, China, pp. 482–489.
- Gilbert, M., Melbourne, C., 1994. Rigid-block analysis of masonry structures. *Structural Engineer* 72.

- Gubányi-Kléber, J., Vásárhelyi, B., 2004. A héhalmi boltozott kőhíd vizsgálata. Mélyépítés 16–20.
- Harvey, W.J., 1988. Application of the mechanism analysis to masonry arches. *The Structural Engineer* 66, 77–84.
- Hegyi, D., 2012. Különleges tartószerkezetek-Jegyzet kézirat. Budapest.
- Heyman, J., 1995. *The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture*. Cambridge University Press.
- Heyman, J., 1966. The stone skeleton. *International Journal of Solids and Structures* 2, 249–279. doi:10.1016/0020-7683(66)90018-7
- Imre, L., Gyukics, P., Gáll, I., Orbán, Z., 2009. Boltozott hidak a Kárpát-medencében: Grafikákon és fotókon. Mérnöki Kamara Nonprofit Kft, Budapest.
- ISRM, 2014. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*. Springer, New York.
- Kalinszky, S., 1961. Kő-, téгла- és betonboltozatok vizsgálata a törési elmélet szerint. *Mélyépítéstudományi Szemle* 9, 469–474.
- Kiss, R., Kollár, L., Jai, J., Krawinkler, H., 2002a. Masonry strengthened with FRP subjected to combined bending and compression, Part II: Test results and model predictions. *Journal of Composite Materials* 36, 1049–1063.
- Kiss, R., Kollár, L., Jai, J., Krawinkler, H., 2002b. FRP Strengthened Masonry Beams Part I. - Model. *Journal of Composite Materials* 36, 521–536.
- Lengyel, G., Bagi, K., 2015. Numerical analysis of the mechanical role of the ribs in groin vaults. *Computers & Structures* 158, 42–60. doi:10.1016/j.compstruc.2015.05.032
- LimitState Ltd, 2011. *LimitState: RING Manual*.
- Magyar Útügyi Társaság, 2006. *Útügyi Műszaki Előírás 813/2005, Téгла- és kőboltozatos hidak állagmegóvása, korszerűsítése, (kidolgozta: Vásárhelyi B., Gubányi-Kléber J., Orbán Z., Seidl Á.)*. Budapest.
- McKibbins, L.D., Sawar, N., Gaillard, C.S., Melbourne, C., 2006. *Masonry arch bridges: condition appraisal and remedial treatment*, CIRIA. CIRIA, London.
- Melbourne, C., Gilbert, M., Wagstaff, M., 1997. The collapse behaviour of multispan brickwork arch bridges. *Structural Engineer* 75, 297–305.
- MEXE, 1963. *Military load classification of civil bridges by reconnaissance and correlation methods*. Military Engineering Experimental Establishment, Christchurch, [SOLOG study B38].
- Milani, E., Milani, G., Tralli, A., 2008. Limit analysis of masonry vaults by means of curved shell finite elements and homogenization. *International Journal of Solids and Structures* 45, 5258–5288. doi:10.1016/j.ijsolstr.2008.05.019
- Obvis, 2016. *The theory behind Archie-M [WWW Document]*. URL <http://www.obvis.com/archie-theory/> (accessed 1.28.16).
- Orbán, Z., 2008. Boltozott vasúti hidak szerkezeti viselkedésének modellezése és teherbírásának értékelése. *Közúti és Mélyépítési Szemle* 58, 30–35.
- Orbán, Z., 2006a. Condition assessment and rehabilitation of masonry arch railway bridges. *Concrete Structures* 7, 22–30.
- Orbán, Z., 2006b. Increasing the reliability of the assessment of masonry arch bridges by non-destructive testing. *Pollack Periodica* 1, 45–56. doi:10.1556/Pollack.1.2006.3.4
- Orbán, Z., Gutermann, M., 2009. Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures* 31, 2287–2298. doi:10.1016/j.engstruct.2009.04.008
- Orbán, Z., Lenkei, P., 2009. Számítási modellek és diagnosztikai eljárások fejlesztése műemlék jellegű, falazott hídszerkezetek teherbírásának megállapítására és használhatósági követelményeiknek ellenőrzésére (OTKA Kutatási Zárójelentés No. T46691 sz. OTKA kutatás).

- Page, J., 1988. Load tests to collapse on two arch bridges at Torksey and Shinafoot, Research Report - Transport and Road Research Laboratory.
- Pattantyús-Ábrahám, Á., 2011. Boltozatok és kupolák. Terc Kft., Budapest.
- Peck, T., 2003. Falazott boltívek hagyományos elmélete. *Építés-Építészettudomány* 31, 69–104.
- Peck, T., Sajtos, I., 2005. Falazott boltozatok, boltívek, in: Fernezelyi, S., Matuscsák, T. (Eds.), *Épületek Teherhordó Szerkezetei.: Aktuális Szerkezeti Megoldások Tervezőknek, Kivitelezőknek.* Verlag Dashöfer Szakkiadó Kft., Budapest, pp. 1–61.
- Rocscience, 2014. Phase2 Theory Overview [WWW Document]. URL [https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/theory/Theory\\_Overview.htm](https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/theory/Theory_Overview.htm) (accessed 11.23.15).
- Sajtos, I., 2004. Falazott szerkezetek anyagai, in: Fernezelyi, S., Matuscsák, T. (Eds.), *Épületek Teherhordó Szerkezetei.: Aktuális Szerkezeti Megoldások Tervezőknek, Kivitelezőknek.* Verlag Dashöfer Szakkiadó Kft., Budapest, pp. 1–22.
- Sajtos, I., 2001. Az Eurocode 6: tervezési elvek, méretezési példák, in: *EUROCODE 6 - Téglafalazatok. Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs Közhasznú Társaság, Budapest,* pp. 47–84.
- Sarhosis, V., Garrity, S.W., Sheng, Y., 2015. Influence of brick-mortar interface on the mechanical behaviour of low bond strength masonry brickwork lintels. *Engineering Structures* 88, 1–11. doi:10.1016/j.engstruct.2014.12.014
- Senthivel, R., Lourenço, P.B., 2009. Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls. *Engineering Structures* 31, 1930–1943. doi:10.1016/j.engstruct.2009.02.046
- Ther, T., Kollár, L., 2014. Response of masonry columns and arches subjected to base excitation, in: *Proceedings of Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology: EAEE Sessions. Presented at the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 2014. aug 25-29., Isztambul, Törökország,* pp. 1–9.
- Tóth, A.R., Orbán, Z., Bagi, K., 2009. Discrete element analysis of a stone masonry arch. *Mechanics Research Communications* 36, 469–480. doi:10.1016/j.mechrescom.2009.01.001
- Turi, N., Bagi, K., Kiss, R., Török, Á., 2013. A Prágai Károly-híd modellezése. *Magyar Építőipar* 55–62.
- Varró, R., 2015. Falazott boltozatok teherbírásának és megerősítésének vizsgálata - BSc Diplomamunka. BME Építőmérnöki Kar, Budapest.
- Varró, R., 2012. Kőszerkezetű boltozatok teherbírásának vizsgálata - TDK dolgozat. BME Építőmérnöki Kar.
- Varró, R., Bögöly, G., Görög, P., 2014. Kőszerkezetű boltozatok teherbírásának vizsgálata, in: In: Köllő G. (Eds.). Presented at the XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2014. Konferencia helye, ideje: Csíksomlyó, Románia, 2014.06.12-2014.06.15., Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 333–337.
- Varró, R., Bögöly, G., Görög, P., 2013. Kőboltozat laboratóriumi vizsgálatának tapasztalatai. *Magyar Építőipar* 2013, 63–68.
- Vermeltfoort, A., 2001. Analysis and experiments of masonry arches, in: *Proceedings of the 3rd International Seminar on Historical Constructions (In. P.B. Lourenco, P. Roca (Eds.)). Presented at the 3rd International Seminar on Historical Constructions, Guimaraes Portugal,* pp. 489–498.

## 8. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM

- [1] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., 2010. A Bükkös patak boltozott kőhídjának vizsgálata, in: Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2010. (In: Török Á., Vásárhelyi B. (Eds.)), Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár. Presented at the Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Konferencia, Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2010.03.25, Műegyetem Kiadó, Budapest, pp. 35–44.
- [2] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., Seidl, Á., Török, Á., 2011. Gyöngyöspatai boltozott híd kőzetdiagnosztikai vizsgálata, in: Építményeink védelme-Műemlékeink védelme 2011 (In: Szalay L. (Ed.)). Presented at the Építményeink védelme - Műemlékeink védelme 2011., Konferencia helye, ideje: Ráckeve, Magyarország, 2011.03.29-2011.03.31., Konferencia Iroda Bt., Budapest, pp. 1–9.
- [3] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., Török, Á., 2011. Diagnostics and stability analysis of stone masonry arch bridges, a case study from Hungary, in: Building Materials and Building Technology to Preserve the Built Heritage (In: Drochytká R., Bohus S. (Eds.)). Presented at the 2nd WTA International Ph.D. Symposium, Brno, Csehország, Oct. 6-7. 2011., Academic Publishing CERM Ltd., Brno, pp. 98–107.
- [4] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., Török, Á., 2011. Boltozott hidak diagnosztikai módszerei. Díszítő- Építő- Mű-Terméskő XIII, 32–36.
- [5] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., 2012. Kőszerkezetű hidak számítógépes modellezése, in: Építményeink Védelme-Műemlékeink Védelme 2012 (In: Szalay L. (Ed.)). Presented at the Építményeink védelme - Műemlékeink védelme 2012., Konferencia helye, ideje: Ráckeve, Magyarország, 2012.03.27-2012.03.29., Konferencia Iroda Bt., Budapest, pp. 49–56.
- [6] **Bögöly, Gy.**, 2012. Diagnostic and stability analysis of stone masonry arch bridges, in: Proceedings of the 9th Fib International PhD Symposium in Civil Engineering. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, pp. 167–173.
- [7] Varró, R., **Bögöly, Gy.**, Görög, P., 2013. Kőboltozat laboratóriumi vizsgálatának tapasztalatai. Magyar Építőipar, 2013:(2), 63–68.
- [8] **Bögöly, Gy.**, Borbély, D., Görög, P., 2014. Előkészítő vizsgálatok kőboltozat laboratóriumi modellezéséhez. Magyar Építőipar 64, 141–145.
- [9] Varró, R., **Bögöly, Gy.**, Görög, P., 2014. Kőszerkezetű boltozatok teherbírásának vizsgálata, In: Köllő G. (Eds.). Presented at the XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2014. Konferencia helye, ideje: Csíksomlyó, Románia, 2014.06.12-2014.06.15., Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 333–337.
- [10] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., Török, Á., 2015. Stone masonry arch bridges: In situ testing and stability analyses by using numerical methods; examples from Hungary, in: Engineering Geology for Society and Territory - Volume 8: Preservation of Cultural Heritage. pp. 503–506.
- [11] **Bögöly, Gy.**, Görög, P., 2015. Numerical Testing of a Small-Scale Stone Masonry Arch. Periodica Polytechnica Civil Engineering 59 (4), 567-573. doi:10.3311/PPci.7786
- [12] **Bögöly, Gy.**, Török, Á., Görög, P., 2015. Dimension stones of the North Hungarian masonry arch bridges. Central European Geology 58 (3), 230–245. doi:10.1556/24.58.2015.3.3
- [13] Szakály, F., **Bögöly, Gy.**, Varró, R., Berecz, A., Görög, P., 2015. Experimental and numerical analysis of small scale masonry arches, in: Proceedings of the 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics (In: Ivica Kožar, Nenad Bičanić, Gordan Jelenić, Marko Čanadija (Eds.)). Presented at the 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Croatian Society of Mechanics, Opatija, Croatia, 2015.09.29-2015.10.02., pp. 1–10.
- [14] **Bögöly, Gy.**, 2016. Kicsinyített boltozatok laboratóriumi és hibrid vége-selelemes modellezése, in: Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2016. (In: Török Á., Görög P., Vásárhelyi B. (Eds.)), Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár. Presented at the Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Konferencia, Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.05.18., Hantken Kiadó, Budapest, pp. 307–316.

## 9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsősorban témavezetőmnek Dr. Görög Péternek köszönöm a rengeteg segítséget, és támogatást, amivel az elmúlt években kiemelkedően hozzájárult a cikkek, vizsgálatok és ezen dolgozat elkészítéséhez. Köszönöm tanszékvezetőmnek Dr. Török Ákosnak a sok segítséget, a cikkeknel, dolgozatomnál, és az egyetemi munkámnál nyújtott kitartó támogatását.

Köszönöm Dr. Bagi Katalinnak és Dr. Kiss Ritának értekezésem tanszéki védésre készült változatának bírálatát, értékes észrevételeiket és javaslataikat.

Köszönöm a diplomázók, Tasnádi Orsolya és Himmel Olivér segítségét és munkáját a laboratóriumi és helyszíni méréseknel. Különösképp köszönöm Varró Richárd segítségét és munkáját a laboratóriumi kismodell kísérletekben és hozzá tartozó anyagvizsgálatokban. Köszönöm Borbély Dánielnek a numerikus modellezésben nyújtott segítségét és a közös munkát. Köszönöm Dr. Rozgonyi-Boissinot Nikolettának és Dr. Vásárhelyi Balásznak, hogy elolvasták dolgozatom és sok hasznos tanáccsal, javaslattal láttak el.

Köszönöm a Sika Hungária Kft.-nek, hogy biztosította a kísérletekhez szükséges CFRP szalagokat és egyéb kiegészítőket.

Köszönöm továbbá Nagyné Barsi Ildikó, Buocz Ildikó, Kocsisné Bodnár Nikolett, Juhász Péter, Kárpátiné Pápay Zita, Pálinkás Bálint, Emszt Gyula és a tanszék minden munkatársának odaadó támogatását.

Végezetül, de cseppet sem utolsó sorban köszönöm feleségem, családom és barátaim türelmét, évekig tartó biztatását és támogatását.

A doktori disszertáció szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatta.