

Varró Richárd Imre<sup>1</sup>, Görög Péter<sup>2</sup>

# KŐHIDAK TÖNKREMENETEI ÉS KÁROSODÁSAI

## COLLAPSES AND DAMAGE OF STONE BRIDGES

### KIVONAT / HUN

Napjainkban a kőhidaknak jelentős többletterheléssel kell szembenézniük, emellett szerkezeti állapotuk többnyire a karbantartás hiánya miatt romlik, ami jelentős teherbírás-csökkenést is eredményezhet. A cikk ismerteti a különböző károsodások típusait, illetve azok megelőzésének és javításának lehetőségeit, továbbá bemutatja azokat a számítási és ellenőrzési módszereket, amikkel az adott szerkezet teherbírása meghatározható és ellenőrizhető. A kőhidak szerkezeti károsodásai mögött gyakran összetett folyamatok állnak, és ezek megértése kulcsfontosságú a hatékony beavatkozás és a hosszú távú megoldás szempontjából. Az érintett szerkezetek állapota megfelelő beavatkozásokkal, mint például megerősítés vagy a sérült részek cseréje, jelentősen javítható. A károsodások kialakulásának megelőzéséhez és a szükséges beavatkozások meghatározásához különösen fontos alapot jelent a kőhidaink rendszeres felmérése és állapotuk naplózása. Ezek a tevékenységek lehetővé teszik a mérnökök számára, hogy nyomon kövessék az esetleges változásokat a híd állapotában és időben felismerjék, mikor van szükség a szerkezet megerősítésére. Ezzel a proaktív megközelítéssel jelentősen meghosszabbítható a kőhidak élettartama, és biztosítható a hídon áthaladó forgalom biztonsága.

**Kulcsszavak:** kőhíd, károsodás, teherbírás, modellezés, boltzott szerkezet

### ABSTRACT / ENG

Nowadays, stone arch bridges are facing significant additional loads, and their structural condition is generally deteriorating due to the lack of maintenance, which can also result in a significant decrease in load bearing capacity. The article outlines various types of damages, as well as the possibilities for their prevention and repair. It describes various computational and verification methods that can be used to determine and check the load bearing capacity of a given structure. For determining effective interventions and long-term solutions it is crucial to understand the complex processes which often stand behind structural damages. With appropriate interventions, such as reinforcement or replacing damaged parts, significant improvements can be achieved in the condition of the affected structures. Finally, the article highlights the importance of the regular surveys and logging of the condition of our stone arch bridges are important basement to prevent the damage and determine the necessary measures. These activities enable engineers to monitor potential changes in the condition of the bridge and recognize in time when intervention is needed. With this proactive approach, the lifespan of stone bridges can be significantly extended, ensuring the safety of traffic passing over them.

**Keywords:** stone arch bridge, damage, load bearing capacity, modelling, vaulted structure

<sup>1</sup> okl. építőmérnök, doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, e-mail: varro.richard@edu.bme.hu

<sup>2</sup> okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, e-mail: gorog.peter@demk.bme.hu

## 1. | BEVEZETÉS

A közlekedés szempontjából a hidak kiemelkedő jelentőségűek és kezdetektől összekapcsolódtak az úthálózatok kialakulásával. A római korban már jelentős úthálózat szelte át Európát, így köztük a mai Magyarországot is, a változatosan tagolt európai táj pedig megkövetelte a különböző műtárgyak létrehozását. A rómaiak nagy úttörők voltak a kőhidak építésében, aminek az egyik legszebb ma is álló példája a franciaországi Pont du Gard [1]. A rómaiak tudása sajnos a birodalom bukásával feledésbe merült, a középkor folyamán vegyesen építettek fa és kőhidakat. Utóbbiak sokkal időtállóbbak, viszont építési költségük is jóval magasabb, ezért csak a tehetős régiók engedhették meg maguknak az efféle szerkezeteket.

Magyarországon az Árpád-korból számos írásos említés lelhető fel a fontosabb építményekről, mint például főbb utak vagy hidak. Azonban Európa többi részéhez viszonyítva Magyarországon kevés teljes egészében középkori híd található, a folyamatos háborúskodás és a természeti hatások jelentősen károsították a hidakat, így azok újjáépítése sokszor szükséges volt. A magyar kőhidállomány jellemzően 18-19. századi építésű, de sok esetben előfordulhat, hogy a már korábban meglévő középkori vagy akár római hidat bővítették vagy alakították át. A pontos kormeghatározást sajnos nehézsé teszi, hogy ezekről az építményekről nem minden esetben készült dokumentáció, így a levéltárakban csak elvétve akadhatunk néhány híd tervére. Ennek ellenére Magyarország jelentős kőhidállománnyal rendelkezik, hazánkban több mint 1500 kőszerkezetű híd található [2], és ezeknek a folyamatos felülvizsgálata, állagmegóvása, megerősítése vagy javítása napjainkban fontos feladattá vált [3] [4].

## 2. | HIDAK FELÜLVIZSGÁLATA

A forgalom változásával, napjainkra a kőhidaknak jelentős többletterherrel kell szembenéznük. Építésük idején, Magyarországon jellemzően a 18-19. században a legnagyobb forgalmi teher a ló vagy ökrök által vontatott ágyú volt, ezek össz- tömege még a legnagyobb lövegek esetében is 5 tonna körül mozgott, addig napjainkban nem ritkák az 50 tonna össz- tömegű járművek, így ezek jelentős többletterhet jelentenek az ilyen szerkezeteknek [2] [5]. Továbbá, ha még korlátozzuk is a tengelyterhelést az adott hidakon, akkor is meg kell felelniük a kisebb tömegű, de gyakran ismétlődő terheknek, mint amilyenek a személyautók. A sebességek növekedésével, a gyorsulásból vagy lassulásból (fékezés) adódó vízszintes teherkomponens is jelentős igénybevételt jelent az adott szerkezetnek. A jelentős tehernövekedés ellenére még ma is vannak napi használatban lévő kőhidak, amik tökéletesen kielégítik a mai kor elvárásait is. Ezeknek a hidaknak a felülvizsgálata fontos feladat, mivel döntő többségük már műemléki besorolás alá tartozik, így ezek megsemmisülése kulturális veszteséget is jelentene. A nemzetközi példákból látszik, hogy napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a kőhidak fenntartására szerte a világban [6] [7] [8] [9]. A megfelelő karbantartással és felügyelettel még hosszú ideig kiszolgálhatják építésük célját.

A legnagyobb veszélyt a rendszeres felülvizsgálat és karbantartás elmaradása okozza, mivel a kis károsodások halmozódásával, jelentős probléma alakulhat ki, ami már a szerkezet épségét is veszélyeztetheti. Itt akár elsőre jelentéktelennek tűnő hibából is súlyos következmények alakulhatnak ki.

Boltozott kőhidak teherbírásának vizsgálatára többféle eljárás létezik. A korai építészetben a gyakorlati tapasztaltoknak nagy jelentősége volt, emiatt is készültek, egymáshoz hasonló típushidak. A bevált formákat és technikákat tovább alkalmazták más szerkezeteknél is, abban az esetben, ha valami nem működött az már az építés után rögtön kiderült, így változtattak a szerkezeten. Az ókorban és a középkor elején tapasztalati ökölszabályokat, később geometriai tervezést használtak, melynek lényege az volt, hogy a kialakuló támaszvonala biztonságga a keresztmetszeten belül maradjon. A támaszvonala kézzel is gyorsan és könnyen kiszakaszthatjuk, vagy akár Excel táblázattal is kiszámíthatjuk [10], de napjainkban ezeket a vizsgálatokat, egy ezt az eljárást alkalmazó programmal, az Archie-M szoftver segítségével végezhetjük el a leggyorsabban. A program adott terhelés, adott helyzete esetén meghatározza a támaszvonala, és ennek segítségével egyszerűen igazolható a híd teherbírásának megfelelősége. Ha a támaszvonala sehol nem hagyja el a keresztmetszetet a mértékadó teher áthaladásakor, a híd teherbírása megfelelő. A programmal meghatározható a boltozat törőterhe, így számíthatunk egy megengedhető tengelyterhelést [11] [12] [13] [14] [15].

A 20. században az egyik legegyszerűbb és talán a leggyakrabban alkalmazott eljárás boltozott hidak teherbírásának vizsgálatára a MEXE módszer [16]. A számítás tapasztalati összefüggésekre épül, egy ideális szerkezetet vesz alapul, majd az ettől való eltéréseket csökkentő tényezőkkel veszi figyelembe, mint például a repedések, kőhiányok vagy ívforma. Az eljárás erősen közelítő jellegű, de megalkotásának a célja az egyszerűség és a gyorsaság volt. Néhány alkalmazási korláton kívül a módszer gyengesége még, hogy a nagynyílású hidaknál alulértékeli, míg a kisnyílásúaknál túlértékeli a teherbírást. Ez a módszer nagyon gyorsan ad eredményt egy adott szerkezetről, alkalmazása pedig nem igényel komolyabb szaktudást.

A szerkezeti analízis következő szintjein számítógépes modellezések terjedtek el, a számítási műveletek nagy száma miatt. Ilyenek a támaszvonala eljárás [17] [18], a merev-blokk módszert alkalmazó programok, vagy a véges és diszkrét elemes szoftverek. Az ilyen bonyolultabb modelleket a szerkezeti analízis legmagasabb szintjén javasolt használni. A nem-folytonos mikroszintű modellezés egy lehetséges változata a diszkrét elemes modell, amely különálló elemekből és az elemek érintkezésével létrejövő kapcsolatokból áll. Az elemek között új kapcsolatok jöhetnek létre, és meglévő kapcsolatok szűnhetnek meg. Ez a módszer az egyik legalkalmasabb például a falazott szerkezetek vizsgálatára, de bemenő adatai rengeteg mérést és kísérletet igényelnek [19]. Boltívek teherbírását és megerősítésének számítását készítették el hibrid végelelemes szoftver segítségével Varró és munkatársai [10], ahol a laboratóriumi kísérlettel alátámasztott mikromodell felépítését és a felépített modell pontosságának eredményekre gyakorolt hatását vizsgálták. Az ily módon aprólékosan felépített modellek már részletesebb eredményt adnak a teherbírásról és a tönkremeneteli folyamatról.

A teherbíráson túlmutatva fontos még az építőanyagok és a szerkezet lokális vizsgálata, ahol a hídszerkezet egyszerű szemrevételezésével a meglévő repedéseket, károsodásokat és egyéb hibákat lehet feltérképezni. A korábban bemutatott eljárások a MEXE módszer kivételével, többnyire a szerkezet egészét vizsgálják, így az ilyen egyszerűbb modellek esetében a lokális károsodások nem mindig vehetők figyelembe. Ezek teherbírássra, a tönkremeneteli folyamatra gyakorolt hatásának értékeléséhez többnyire összetett és komplex numerikus modellek kellenek, amelyek elkészítése időigényes és költséges, így alkalmazásuk kisebb szerkezeteknél nem gazdaságos. A lokális hibák elhanyagolásával készített vizsgálat félrevezető, vagyis nem a híd valós állapotára vonatkozó eredményeket ad a híd teherbíráásával kapcsolatban. A hazai tapasztalatok azt mutatják, hogy a tönkremenetek mindig valamilyen kisebb lokális hibával indulnak, majd ezek halmozódása okozza a szerkezet részleges vagy teljes összeomlását [20]. Összességében előfordulhat, hogy egy globális egyszerűbb statikai vizsgálat azt mondja ki egy hírről, hogy biztonságos, pedig a valóságban, néhány éven belül bekövetkezhet a katasztrófa.

### 3. | A KŐHIDAK KÁROSODÁSÁNAK OKAI

A szabadtéri szerkezetek folyamatosan ki vannak téve az időjárás viszontagságainak. A hosszú élettartamuk alatt jelentős hatást jelent a nedvesség és a fagy miatti aprózódás és mállás. A szél is folyamatosan igénybe veszi a szerkezeteket, ezek együttese eredményezi, hogy az építményben habarcs vagy kő/tégla kipergés és mállás jelentkezik (**1. ábra**). A szerkezet így veszít a teherbírási képességéből, megfelelő beavatkozás és javítás nélkül ez egészen a híd összeomlásához is vezethet [21] [22].

Az egyik legveszélyesebb károsodás a talajmozgásokból alakulhat ki. A falazott szerkezetek csak minimálisan vagy egyáltalán nem képesek a húzóerő felvételére, így ezekből a mozgásokból repedések alakulhatnak ki. A repedések miatt



1. ÁBRA: Habarcschiány a pulai híd intradoszán

átalakul a statikai váz, hiszen ott feltételezhetően egy csukló alakul ki, így az igénybevételek átrendeződnek, ezek halmozott hatásai a szerkezet összeomlásához vezethetnek.

A talajvízszint változása, illetve a folyóvíz eróziós hatása is jelentős probléma lehet. Élővizek partján, szemcsés talajra emelt építmények esetén gyors apadásnál a magasabb talajvízszint miatt erős áramlás jön létre a folyó irányába, így az magával ragadja a szemcséket. Ennek hatására üregek keletkeznek az építmény alatt, ami az egyes támaszelemek süllyedéséhez vezethet.

E mellett a folyóvíz áradásai is problémát okoznak a hídszerkezeteknek. Az ilyen szerkezetek általában az áthidaláshoz képest vastag pillérekkel rendelkeznek, ezek jelentősen csökkentik a meder keresztmetszetét, ami visszaduzzasztáshoz vezet, így hidrosztatikai nyomás is jelentkezik az egyik oldalon. Továbbá a folyóban lévő hordalékok és a jégzajlás is okozhat károkat. Az áradások ezeken túlmenően a hídpilléreket is alámoshatják.

Az évszázadok alatt lezajlott háborúk is a hidakon hagyták a lenyomatukat. A közúti hidak szenvedték el a legtöbb bombázást, hiszen ezek hadászati jelentősége nagy, mivel valamilyen természeti akadály felett biztosítottak áthaladást a harcoló csapatoknak. A területeket veszítő és visszavonuló alakulatok ezeket a hidakat gyakran lerombolták, használatatlanná tették, hogy az ellenséges csapatok ne tudjanak számolni velük.

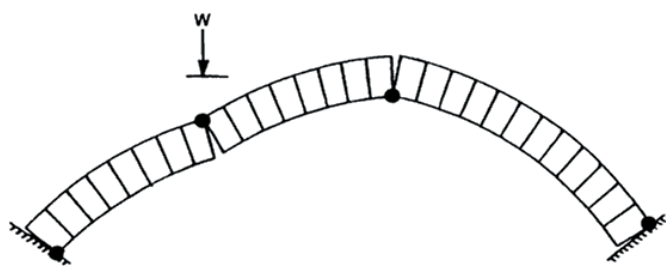
Napjainkban pedig a korábban már kifejtett forgalmi terhelés jelenti az egyik legnagyobb problémát. A megnövekedett terhelés különböző repedésekhez, elfordulásokhoz és elcsúszásokhoz vezethet. Ezek húzószilárdság nélküli szerkezetek, bármilyen kis mozgás hatására a falazatban repedések jelennek meg, mivel az esetleges mozgásokból fakadó húzóerőket nem tudja felvenni a szerkezet. Ez a probléma számos hidat érint, ahol az utóbbi időben megjelentek a különböző repedések, amik vélhetően a járműforgalom növekedéséből adódtak. Erre a jelenségre már a nemzetközi példák is egyre élesebben rávilágítanak, mint Silva és munkatársai 2022-es cikke [23], ami a vasúti terhelés káros hatásaira mutat rá több portugál boltozott híd esetében, vagy Domed és munkatársai 2013-as cikke [24], ahol francia példákat láthatunk, szintén vasúti hidak esetében.

### 4. | A TÖNKREMENETELI FOLYAMAT

Az ívek feltételezett statikai váza, egy a két végén befogott görbe tengelyű rúd, ebből következik, hogy a szerkezet statikailag határozatlan lesz. Ha szerkezetben átmenő repedések, vagyis csuklók keletkeznek, akkor a szerkezet határozatlansága csökken. Az ilyen szerkezetek egészen három repedésig kiválóan működnek, amikor azonban megjelenik a negyedik repedés, akkor a szerkezet túlhatározottá válik, vagyis elveszti stabilitását és bekövetkezik a tönkremenetel [25] [26]. Ezt az elméleti tönkremeneteli folyamatot mutatja a **2. ábra**.

A valós hidak tönkremenetele, a fentebb leírtaknál komplexebb, nem mindig szabályosan következik be, hanem több probléma halmozódása miatt történik. Továbbá a hidak térbeli szerkezetéből következően a tönkremenetek többnyire





2. ÁBRA: A repedések helyén kialakult csuklók [25]

szabálytalanok, ritka, ha a repedés, amiből a csukló kialakul a híd teljes szélességét érinti.

Jól látható a komplex tönkremeneteli folyamat a héhalmi (3. ábra) vagy a felsőpetényi hidak esetében (4. ábra), ahol csak a szerkezet egy része omlott össze. A károsodás bekövetkeztével a hidakon forgalom már nem haladt át, ennek ellenére bekövetkezett a tönkremenetel. Ezeknél a hidaknál nem a terhelés jelentette a legfőbb gondot, hanem más jellegű problémák halmozódása. A héhalmi híd megmaradó részein látszik, hogy a mállás és a kipergés jelentős a szerkezeten, a téli fagyok és az áradások hatására a felvízi rész lassan olyan mértékben károsodott, hogy a rész összeomlásához vezetett. A felsőpetényi híd megmaradó része jó állapotban van, így itt valószínűleg valamilyen hirtelen hatás érthette a szerkezetet, feltételezhetően támaszmozgás okozhatta az összeomlást a felvízi oldalon, ami áradás hatására következhetett be. Az alapozási problémák felderítése nem egyszerű feladat, mivel nem tudjuk pontosan mi van a szerkezet alatt. Egy másik példa a tönkremenetelre a piliscsabai híd (5. ábra), ami végig közötti használatban volt. Itt is féloldalas tönkremenetel következett be, ennek oka azonban szinte biztosan visszavezethető a pillérek mállása miatti építőelem hiányra (6. ábra).

A három példán látszik, hogy a tönkremenetel többnyire nem a túlterhelés miatt következik be, hanem sok más hatás együttes eredményeként. Így a meglévő szerkezetek felülvizsgálatainál komoly figyelmet kell fordítani a fellelhető hibákra. Ezek kijavításával könnyedén megelőzhető lenne a katasztrófa. Ezeknek a javításoknak a költségei elenyészőek, a tönkrement szerkezet elbontásához és pótlásához viszonyítva. Nem beszélve arról, hogy egy régi építészeti emlék semmisül meg.

## 5. | A SZERKEZETEK FELÜGYELETE, JAVÍTÁSA

A boltozott hidak folyamatos ellenőrzése, felülvizsgálata és javítása fontos feladat, hogy ne történjenek komolyabb balesetek. A hidak állapotáról, már egyszerű szemrevételezéssel is meggyőződhetünk, ha nem látunk rajta semmilyen hibát (repedést, fugahiányt, elemhiányt, torzulást), akkor biztonsággal állítható, hogy a szerkezet a továbbiakban is megfelelően fog működni.

Ha fugahiánnyal találkozunk, akkor az csökkentheti a teherbírást, mivel a habarcs biztosítja a kapcsolatot az elemek között, amennyiben ez nincs meg, a szerkezet nem tud az eredeti elvárásoknak megfelelni. A pulai híd esetében (7. ábra), jól látható ez a károsodás, ahol az intradosz mentén, mind a



3. ÁBRA: A héhalmi híd tönkremenetele



4. ÁBRA: A felsőpetényi híd [27] tönkremenetele



5. ÁBRA: A piliscsabai híd tönkremenetele, az erős mállás helyén [28]

három ívben jelentős a fugahiány. Ezek 8-10 cm mélyek, az ívvastagság 40 cm, azaz a keresztmetszet negyedéből hiányzik a habarcs, hozzávetőlegesen az ív felületének 80%-án (8. ábra). Ezek kialakulása valószínűleg a kis nyíláskeresztmetszetre vezethető vissza, mivel torlasztóhatása lehet a műtárgynak, nagy áradások esetén a víz könnyedén elérheti az intradoszt is, ami káros hatással bír a szerkezetre.





6. ÁBRA: Erősen mállott pillérek a piliscsabai hídon, jól látható a károsodás helye, ahol a tönkremenetel be fog következni (évekkel az összeomlás előtti felvétel)



7. ÁBRA: A háromnyílású pulai híd

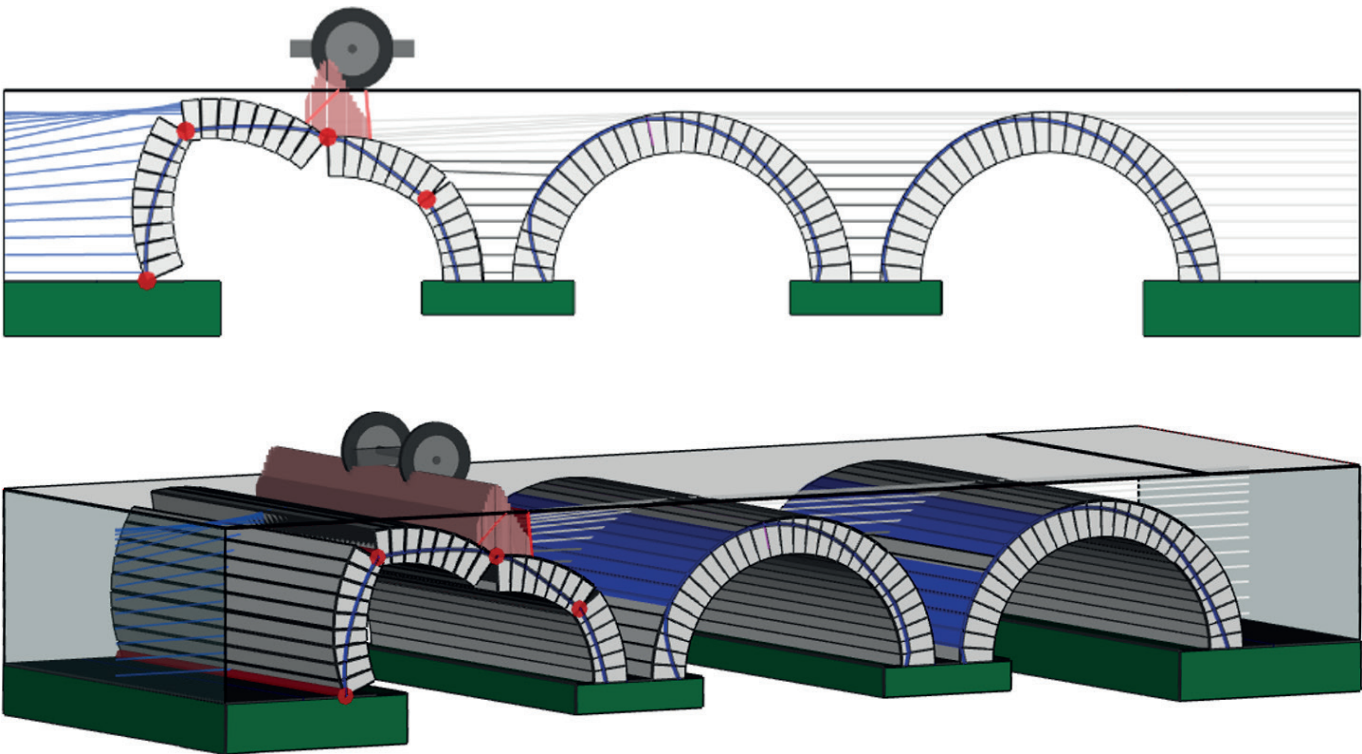
A LimitState Ring szoftverrel [29] elemezve a szerkezetet (9. ábra) látható, hogy a fugahiány méretének növelésével, hogyan változik a teherbírása az adott szerkezetnek (1. táblázat). Az eredményekből látszik, hogy a jelenlegi állapot még nem befolyásolja nagy mértékben a teherbírást, azonban, ha ezek tovább növekednek akkor jelentősen csökkenni fog a szerkezet teherviselőképessége.

Hasonló elemzést lehet készíteni a RS2 szoftverrel is, ahol szintén lehetőség van fugahiányok, repedések felvételére a szerkezetben. A program egy hibrid kétdimenziós véges elemes szoftver főleg talaj- és kőzetmechanikai problémákhoz, de emellett építőmérnöki feladatok széles skáláját lehet vele megoldani. A szoftver ezenkívül még számos szerkezeti megerősítési lehetőség modellezésére is alkalmas, így ezekkel a különböző utólagos erősítések is számíthatóak [10].



8. ÁBRA: 8-10 cm mély fugahiány a pulai híd intradoszán (írvastagság 40 cm)





9. ÁBRA: A tönkremeneteli mechanizmus egytengelyű teher esetén, Eger-víz hídja, Pula

A fugahiány miatt fellépő problémák megszüntetésére az egyik legegyszerűbb és legrégebben használt beavatkozás a szétmállott vagy kipergett fugák újbóli kitöltése. A beavatkozás lényege, hogy az eredeti kapcsolatot állítsuk helyre a boltozatoknál. Ez a folyamat nem igényel különösebb speciális beavatkozást, viszonylag gyorsan és könnyen elvégezhető. A módszer lényege, hogy a megkopott olykor már porrá vált fugákat, melynek már szilárdsága alig van, eltávolítjuk a szerkezetből, majd új habarccsal pótoljuk a hiányt. Ez a megoldás a szerkezet teherbírását növelni nem képes, a javítások után az eredeti teherbírás tételezhető fel, amennyiben nincsenek más jellegű károsodások. Az előrehaladott szerkezeti romláskor, gyakran előfordul, hogy nem csak az elemek közötti habarcs károsodik, hanem maguk az építőkövek is. A kövek kifordulnak, kiesnek a szerkezetből, mint a piliscsabai híd esetében, ezeket a hiányosságokat javítani kell az elemek pótlásával, cseréjével. Az eljárás során a pótolni kívánt elem helyét kellően meg kell tisztítani, ugyanis előfordul, hogy növények és egyéb dolgok telepednek meg a résekben. A tisztítás után megfelelő habarccsal kell pótolni a fentiekben leírt módon a környező fugákat, majd behelyezni az új építőkövet,

1. TÁBLÁZAT: A fugahiányok és a teherbírás kapcsolata a pulai Eger-víz hídjának esetében a LimitState Ring szoftverrel számolva

| Eger-víz hídja, Pula                      | számított teherbírás |
|-------------------------------------------|----------------------|
| fugahiány nélkül                          | ~700 kN              |
| a jelenlegi fugahiánnyal (~10 cm)         | ~600 kN              |
| a jelenlegi fugahiány duplájával (~20 cm) | ~300 kN              |

ha szükséges, akkor ezeket szilárdulásig alá kell támasztani, hogy biztosan a kívánt helyen maradjanak. Ezzel a javítással megelőzhető lett volna a piliscsabai híd összeomlása.

A meglévő hídállomány felmérése és monitorozása, jelentős feladat, de nélkülözhetetlen az állagmegóvás szempontjából. Erre jó megoldást jelent a meglévő szerkezetek, építményinformációs modellezése (BIM), ez a modell tartalmazhatja, minden információt az adott szerkezetről, illetve a későbbi megerősítések átalakítások is felvihetők a rendszerbe, így a felülvizsgálatuk, nyilvántartásuk sokkal hatékonyabb lehetne. Számos történelmi épületet dolgoztak már fel ilyen módszerrel, így napjainkban egyre inkább teret hódít ez a folyamat [30] [31].

6. | ÖSSZEFOGLALÓ KÖVETKEZTETÉSEK

Magyarországon számos kőhíd áll kritikus állapotban, ezek jelentős részét már lezárták a gépjárműforgalom elől. E hidak állapotának további romlása nem csak történelmi veszteséget jelent, hanem jelentős biztonsági kockázatot is. A hosszú élettartamú szabadtéri szerkezetek számos környezeti kihívással néznek szembe, például olyan időjárási hatásokkal, mint a nedvesség, fagy és szél, valamint a talajvízszint változásával. Ezek a tényezők előidézhetik a hídszerkezetek károsodását, így a habarcs és kő/tégla mállását.

A talajmozgások különösen veszélyesek, mivel a falazott hídszerkezetek nagyon korlátozottan képesek húzóerők elviselésére, így a mozgások repedésekhez vezethetnek. Ezek a repedések veszélyeztethetik a híd stabilitását, ami végső soron a hídszerkezet jelentős károsodását okozhatja. A fo-

lyóvizek eróziója és a talajvízszintváltozás alámoshatja a híd alapját, ami szintén a támaszok süllyedését okozhatja. Napjainkban az emelkedő forgalmi terhelés is kritikus kihívásokat jelent a falazott hídszerkezetek stabilitására.

Mindezek a tényezők hozzájárulnak a hídszerkezetek fokozódó állapotromlásához. Az időben történő felismerés és azonnali beavatkozás kritikus a műemléki hidak megővéséhez és a közlekedés biztonságának fenntartásához. Egyszerű szemrevételezéssel is már sokat mondhatunk egy híd állapotról, az ilyen vizsgálatok elvégzése gyors és egyszerű. Nem feltétlen kell bonyolult numerikus számításokat készíteni, hiszen amelyik szerkezet már több száz éve áll, az a későbbiekben is állni fog, ha a szerkezete nem károsodik jelentősen.

A fenti igénybevételek, illetve a miattuk kialakuló károsodások teherbírára gyakorolt hatását lehet a bemutatott szoftveres számításokkal vizsgálni és kimutatni. A számítások szerint például az Eger-víz pulai hídja esetében a keresztmetszet feléig tartó fugahiány az eredeti állapothoz képest közel 60%-kal csökkenti a híd teherbírását. A hidak teherbírása általában megfelel a megnövekedett igényeknek, feltéve, ha a hídszerkezet nem károsodott, ugyanis a legtöbb esetben a geometriai megfelelőség miatt robusztus szerkezetek. Azonban a jelentősebb dinamikus terhek okozhatnak károsodásokat, amelyek rendszeres ellenőrzéssel és karbantartással kezelhetők.

Összefoglalva, a falazott hídszerkezetek tartósságának egyik kulcsa a monitoring és a szükség szerinti karbantartás. A monitoring megvalósítható hagyományos szemrevételezéssel, egyszerű mérésekkel és azok dokumentálásával, de napjainkban már az építményinformációs modell (BIM) módszer alkalmazása teljessé teheti és egyszerűsíthatja a szerkezet állapotában történő változások regisztrálását, és segítheti a szükséges karbantartás, megerősítés tervezését.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] George F. W. Hauck: The Roman Aqueduct of Nîmes. *Scientific American* 260(3), 1989, 98-105. <http://www.jstor.org/stable/24987182>
- [2] Gáll Imre: Régi magyar hidak. Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1970, 3-46.
- [3] Gécsek Máté, Kiss Rita M., Török Ákos: A tatai Cifra Malom mellett lévő boltozott híd szerkezeti analízise. *Magyar Építőipar*, 63(2), 2013, 48-54.
- [4] Orbán Zoltán: Boltozott vasúti hidak élettartamának meghosszabbítása teherelosztó szerkezettel. *Magyar Építőipar*, 63(2), 2013, 69-73.
- [5] MAÚT: Útügyi Műszaki Előírás 813/2005., Magyar Útügyi Társaság, Budapest, 22-29, 61-108.
- [6] Paul J. Fanning, Thomas E. Boothby: Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers & Structures* 79(29-30), 2001, 2645-2662, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00109-2)
- [7] Andrea Cavicchi, Luigi Gambarotta: Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction. *Engineering Structures* 27(4), 2005, 605-615, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.12.002>
- [8] Gabriele Milani, Paulo B. Lourenço: 3D non-linear behavior of masonry arch bridges. *Computers & Structures* 110-111, 2012, 133-150, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.008>
- [9] Borja Conde, Luís F. Ramos, Daniel V. Oliveira, Belén Riveiro, Mercedes Solla: Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge. *Engineering Structures* 148, 2017, 621-638, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.011>
- [10] Varró Richárd, Bögöly Gyula, Görög Péter: Laboratory and numerical analysis of failure of stone masonry arches with and without reinforcement. *Engineering Failure Analysis* 123, 2021, 105272, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105272>
- [11] Bögöly Gyula, Görög Péter, Török Ákos: Boltozott kőhidak diagnosztikai módszerei. *Díszítő- Építő- Mű- Terméskő* 13(1), 2011, 32-36.
- [12] Huerta, Santiago: Galileo was wrong: The geometrical design of masonry arches. *Nexus Network Journal* 8, 25-52, <https://doi.org/10.1007/s00004-006-0016-8>
- [13] Pattantyús-Ábrahám Ádám: Boltozatok és kupolák. TERC, Bp., 2011.
- [14] Varró Richárd, Bögöly Gyula, Görög Péter: Kőboltozat laboratóriumi vizsgálatának tapasztalatai. *Magyar Építőipar* 63(2), 2013, 63-67.
- [15] Bögöly Gyula, Borbély Dániel, Görög Péter: Előkészítő vizsgálatok kőboltozat laboratóriumi modellezéshez. *Magyar Építőipar* 64(4), 2014, 141-145.
- [16] Pippard, Alfred John Sutton: The Approximate Estimation of Safe Loads on Masonry Bridges. The civil engineer in war. January 1948, 365-372. <https://doi.org/10.1680/ciwv1.45170.0021>
- [17] Jacques Heyman: The stone skeleton. *International Journal of Solids and Structures* 2(2), 1966, 249-279, [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(66\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(66)90018-7)
- [18] Gilbert M.: The behaviour of masonry arch bridges containing defects. PhD értekezés, University of Manchester, 1993.
- [19] Khalil Naciri, Issam Aalil, Ali Chaaba, Muzahim Al-Mukhtar: Numerical modeling of a masonry arch structure. *Procedia Structural Integrity* 37, 2022, 469-476, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.111>
- [20] Varró Richárd, Görög Péter: Investigation of the collapse of a four-span masonry arch bridge, a case study from Hungary. 7th Global Stone Congress, Batalha, Portugal, 2023.06.18-23. <https://www.researchgate.net/publication/371947456>
- [21] Gálos Miklós, Vásárhelyi Balázs: Közúti boltozott kőhidaink. *Kő* 7(2), 2005, 21-25.
- [22] Gálos Miklós, Vásárhelyi Balázs: Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2006, <https://www.researchgate.net/publication/236170659>
- [23] R. Silva, C. Costa, A. Arêde: Numerical methodologies for the analysis of stone arch bridges with damage under railway loading. *Structures* 39, 2022, 573-592, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.063>
- [24] Nathalie Domede, Alain Sellier, Thomas Stablon: Structural analysis of a multi-span railway masonry bridge combining in situ observations, laboratory tests and damage modelling. *Engineering Structures* 56, 2013, 837-849, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.052>
- [25] Matthew Gilbert: Limit analysis applied to masonry arch bridges: State-of-the-art and recent developments. *Proceedings of ARCH'07*, 5th International Conference on Arch Bridges, 14-27.
- [26] Matthew Gilbert, C. Melbourne: Rigid-block analysis of masonry structures. *The Structural Engineer* 72(21), 1994, 356-361
- [27] Zöldi Péter: Rejtett kincseink 1. – Patakhid a felsőpetényi határban. *Indóház Online*, 2013.11.30. <https://iho.hu/hirek/rejtett-kincseink-1-patak-hid-a-felsopetenyi-hatarban-131129>
- [28] [1]: Leszakadt egy híd Piliscsabán – fotók. Origo, 2020.02.01. <https://www.origo.hu/itthon/2020/02/leszakadt-egy-hid-piliscsabon>
- [29] LimitState: Ring 3.2 Theory and modelling guide. Sheffield UK, 2007.
- [30] Luigi Barazzetti, Fabrizio Banfi, Raffaella Brumana, Gaia Gusmeroli, Mattia Previtali, Giuseppe Schiantarelli: Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory* 57, 2015, 71-87, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>
- [31] Raffaella Brumana, Daniela Oreni, Branka Cuca, Luigia Binda, Paola Condoleo, Maurizio Triggiani: Strategy for integrated surveying techniques finalized to interpretive models in a byzantine church, Mesopotam, Albania. *International Journal of Architectural Heritage* 8(6), 2014, 886-924, <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.756077>