



**A FALAZÓ HABARCSOK JELENTŐSÉGE  
TÖRTÉNETI ÉPÍTMÉNYEK  
TARTÓSZERKEZETI BIZTONSÁGÁBAN**

**DOKTORI ÉRTEKEZÉS**

**BALLA BRIGITTA**  
OKL.ÉPÍTŐMÉRNÖK

**TÉMAVEZETŐ: DR. ORBÁN ZOLTÁN**

2020

## Tartalomjegyzék

<b>1. Fejezet: Bevezetés.....</b>	<b>8</b>
1.1 A műemlékvédelemről .....	9
1.2 A műemlékvédelem fontosságáról .....	10
1.3 Az elvégzett kutatás célja .....	11
1.4 Summary.....	13
<b>2. Fejezet: Irodalmi áttekintés .....</b>	<b>14</b>
2.1 Meglévő falazatok anyagi összetétele, beépítési technológia hatása a szilárdságra.....	14
2.2 A habarcs .....	14
2.2.1 Habarcsalkotók: mész .....	14
2.2.1 Habarcsalkotók: homok és víz .....	15
2.2.2 Habarcsalkotók: egyéb adalékanyagok.....	16
2.2.3 A habarcs szilárdsága az összetétel függvényében.....	16
2.3 A téglá.....	17
2.3.1 Téglá gyártás és szilárdság.....	18
2.3.2 A téglák minősége és vizsgálata .....	19
2.4 A falazóhabarcs szerepe a falazatban .....	19
2.5 Régi tervezési eljárások, ökol szabályok és a tapasztalati méretezés módszere .....	20
2.6 Tervezési szabványok: Az MSZ 15023:1987 Építmények falazott teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése.....	23
2.7 Tervezési szabványok: Az MSZ EN 1996-1-2:2013 Eurocode 6: Falazott szerkezetek tervezése .....	25
<b>3. Fejezet: A kutatás módszereinek és a vizsgált építmények bemutatása .....</b>	<b>29</b>
3.1 Vizsgált építmények bemutatása .....	29
3.1.1 Tapolcai Járásbíróság épülete .....	29
3.1.1.1 Építészeti értékek bemutatása .....	29
3.1.1.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok.....	30
3.1.2 Székesfehérvár, Fekete Sas szálló.....	31
3.1.2.1 Építészeti értékek bemutatása .....	31
3.1.2.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok.....	32
3.1.3 Budapest, többszintes kereskedelmi épület.....	33
3.1.3.1 Építészeti értékek bemutatása .....	33
3.1.3.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok.....	33

3.1.4 Citadella .....	34
3.1.4.1 Építészeti értékek bemutatása .....	34
3.1.4.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok.....	35
3.1.5 Vasúti boltozott hidak.....	35
3.1.5.1 Építészeti értékek bemutatása .....	35
3.1.5.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok.....	36
3.2 Történeti, tömör agyag téglák szilárdság vizsgálata.....	37
3.3 Habarcsok szilárdság vizsgálata .....	40
<b>4. Fejezet: Falazatok teherbírás vizsgálata.....</b>	<b>41</b>
4.1 Boltozott hidak teherbírásának vizsgálata .....	41
4.1.1 Boltozott típushidak jellemzői .....	41
4.1.2 Merev-blokk módszer .....	42
4.1.2.1 Geometriai paraméterek .....	42
4.2.1.2 Geotechnikai paraméterek.....	44
4.2.1.3 Falazatszilárdság .....	45
4.2 Általános kialakítású történeti épületek falazatainak teherbírás vizsgálata sztochasztikus numerikus módszerrel.....	48
<b>5. Fejezet: Falazóhabarcsok szilárdság vizsgálata.....</b>	<b>51</b>
5.1 Ellenőrző mintasor készítése és törővizsgálata .....	51
5.2 Penetrométer vizsgálat.....	55
5.3 Pecsétnyomás vizsgálat .....	60
5.4 Nedvességmérés .....	63
5.5 Mikroszkopikus vizsgálatok .....	66
5.5.1 Mikroszkopikus vizsgálatok: hordozható, terepi mikroszkóp .....	67
5.5.2 Mikroszkopikus vizsgálatok: polarizációs (fény) mikroszkóp .....	68
5.5.3 Mikroszkopikus vizsgálatok: pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat (SE detektor) .....	73
5.6 Kiegészítő és kémiai vizsgálatok.....	76
5.6.1 Kémiai vizsgálat: pH mérés .....	76
5.6.2 Egyéb kiegészítő vizsgálat: XRF mérés .....	77
5.6.3 Egyéb kiegészítő vizsgálat: video endoszkópos vizsgálat.....	80
<b>6. Fejezet: Következtetések, tézisek.....</b>	<b>82</b>
6.1 I Téziscsoport: A falazóhabarcs szilárdsági tulajdonságainak szerepe történeti építmények falazatainak teherbíró képességében.....	82

6.2 II Téziscsoport: Történeti építmények falazóhabarcsainak helyszíni szilárdsági vizsgálata .....	83
6.3 Kitekintés, javaslat a kutatás gyakorlati alkalmazására.....	85
6.4 Vonatkozó saját publikációk jegyzéke .....	85
<b>7. Irodalomjegyzék.....</b>	<b>87</b>
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>92</b>



## Ábrajegyzék

1. ábra: Egykori Somoly falu romtemploma
2. ábra: A mész (habarcs) megszilárdulására jellemző körfolyamat
3. ábra: Tégla vetőláda
4. ábra: Falazatalkotók szilárdságának hatása a teljes falazat szilárdságára
5. ábra: A „Mery method” grafikus alkalmazása boltív tervezésénél
6. ábra: Jellemző feszültség-alakváltozás diagrammok a szilárdság függvényében
7. ábra: Falazatra működő igénybevételek jellegábrája és kísérleti elemek kialakult nyomásiránnyal párhuzamos repedések
8. ábra: Tapolcai járásbíróház épülete
9. ábra: F1-08 jelű (emeleti) és F0-09 jelű (földszinti) falfeltárás
10. ábra: Fekete Sas Szálló domináns homlokzata
11. ábra: A lépcsőházban kijelölt, fűrt mintavétellel is érintett belső (E10 jelű) és külső falfeltárási hely (K3 jelű)
12. ábra: Budapesti többszintes kereskedelmi épület gótikus homlokzata
13. ábra: Budapesti többszintes kereskedelmi épület feltárási és mintavételi helyek
14. ábra: Citadella látképe
15. ábra: Érdi vasúti boltozat a 6 sz. főút felett
16. ábra: Régi Waterloo híd terve, London, 1829.
17. ábra: Kiegyenlített felületű szilárdság vizsgálatra előkészített téglák minták
18. ábra: P-típusú OS-120 és az N-típusú Schmidt kalapács
19. ábra: Konvertáló görbék a Schmidt OS-120PT típusú eszközhöz
20. ábra: A falazatszilárdság a falazóelem és habarcs szilárdság függvényében
21. ábra: MÁV Zrt. kezelésében lévő falazott szerkezetű boltozatok korossága
22. ábra: Boltozatok anyag szerinti megoszlása európai viszonylatban
23. ábra: Dolgozó szélesség meghatározása
24. ábra: Kötésben rakott és gyűrűs falazású téglák boltozat kialakítása
25. ábra: „A” jelű, „B” jelű típusú számológépes modellje és meglévő szerkezetek metszete
26. ábra: „A” jelű típusú vizsgálati eredményeinek jelleggörbéje
27. ábra: „B” jelű típusú vizsgálati eredményeinek jelleggörbéje
28. ábra: Habarcskocka próbatetek törővizsgálata és jellemző törésképek megfelelő, szimmetrikus és szabálytalan törésképpel
29. ábra: Faltestek kialakítása
30. ábra: A visszapattanási értékre vonatkozó kiválasztott összefüggések
31. ábra: Falazott próbatetek törés közbeni alakváltozás diagrammjai
32. ábra: Penetrométer alkalmazása előterhelt próbatesten és függőleges falazaton
33. ábra: Kontroll habarcsminták vizsgálati eredményei és a vonatkozó lőtt beton szabvány grafikonja
34. ábra: A mért szilárdság várható értékének értelmezése
35. ábra: Penetrométer vizsgálat mintahelyeinek javasolt kijelölése
36. ábra: Pecsénnyomás vizsgálat mintakialakítása és számítási összefüggése
37. ábra: Pecsénnyomás vizsgálat: alul-felül gipszrétegek közé ágyazott eredeti mintakialakítás és a teljesen kitöltött mintatest
38. ábra: Pecsénnyomás vizsgálat eredményei (AS jelű habarcs)
39. ábra: Felületi nedvességmérés Protiméterrel
40. ábra: AS jelű mészhabarcs és CEM II jelű cementhabarcs vízfelszívása az idő függvényében
41. ábra: Terhelés hatására deformálódott vízzel telített próbakocka
42. ábra: Terepi mikroszkóp
43. ábra: Kontroll mintasor vizsgálata terepi mikroszkóppal (AS, S2, S3, H4, CEM, CEM2)

44. *ábra: Boltozott híd habarcsvizsgálata terepi mikroszkóppal (szárnyfal, boltváll belső, boltváll külső)*
45. *ábra: CEM jelű minta I Nikolos és keresztezett Nikolos képe*
46. *ábra: Polarizációs mikroszkópos vizsgálathoz előkészített tárgylemezek*
47. *ábra: Habarcsminta csiszolat az alkotó (jelölt) ásványokkal (Budapesti kereskedelmi épület első emeleti falazatból kiemelt habarcsminta)*
48. *ábra: Kontroll habarcsminta csiszolatok az alkotó (jelölt) ásványokkal (H4 jelű, AS jelű kontroll habarcsminta)*
49. *ábra: Gipszesedés boltozott híd szárnyfalából kiemelt habarcsmintán*
50. *ábra: AS jelű mintáról készült mikroszkópos felvételek – légpórusok és szerves anyag jelenléte*
51. *ábra: Budapesti kereskedelmi épületből kiemelt mintán beazonosítható portlandit és üledékes homok adalékanyagból származó mészváz*
52. *ábra: VEGA 3S elektronmikroszkóp*
53. *ábra: Habarcsminták elektron mikroszkópos vizsgálata (Fekete Sas Szálló pincefalazatából származó mintán látható gombafonalak, sóterhelt habarcsmintán klorid és szulfát só)*
54. *ábra: Dolomit adalékanyagú habarcs elektronmikroszkópos képe*
55. *ábra: Ettringitte kristályok elektronmikroszkópos felvételen*
56. *ábra: Adwa 132 terepi pH mérő*
57. *ábra: Vizsgált habarcsok pH értékei*
58. *ábra: Mészhabarcs kontroll minták pH érték – szilárdság vizsgálati eredményei*
59. *ábra: Egy tipikus röntgen fluoreszcencia spektrum*
60. *ábra: XRF vizsgálat eredményei boltozott hídszerkezet („BH”) habarcsminták*
61. *ábra: „BH”jelű habarcsminták kalcium tartalma*
62. *ábra: Boltozott hídból kiemelt minták pH érték – kalcium tartalom összefüggésre vonatkozó tendenciagörbe*
63. *ábra: Video endoszkóp vizsgálat rögzített felvétele homogén szerkezet és üreges szerkezeti kép*

## Táblázatjegyzék

1. táblázat: Minősítés az MSZ 18293 szerint: Homok, homokos kavics és kavics
2. táblázat: Szabvány habarcsok összetétele és várható szilárdsági értéke
3. táblázat: Habarcs összetétel
4. táblázat: Az  $a$  és  $b$  paraméter értékei  $i$ vsugár számításához
5. táblázat: Rugalmassági tényező értékei
6. táblázat: Megengedett feszültség alapértékei mészhabarcs esetén
7. táblázat: Módosító tényező értéke
8. táblázat: A nyomási határfeszültség  $\sigma_f$  kiindulási értéke
9. táblázat: A falazat minőségétől függő tényező
10. táblázat: A falazat nyomószilárdság számítására alkalmazott néhány (fontosabb) empirikus összefüggés
11. táblázat: Méretezéshez alkalmazandó biztonsági tényező értékei
12. táblázat: Vizsgált építmények téglaszilárdsági eredményeinek összefoglaló táblázata
13. táblázat: Európai statisztika: boltozat nyílásának ( $L$ ) és emelkedésének ( $r$ ) aránya
14. táblázat: Típushíd modelleken felvett főbb paraméterek
15. táblázat: A feltöltésre és háttöltésre vonatkozó geotechnikai paraméterek
16. táblázat: „A” jelű típushíd szimulációinak eredményei
17. táblázat: „B” jelű típushíd szimulációinak eredményei
18. táblázat: Falazatszilárdság ( $f_k$ ) értékének alakulása a falazóelem és falazóhabarcs szilárdság függvényében
19. táblázat: Valószínűségi változók ( $x_i$ ) és szórás értékeik
20. táblázat: A falazatszilárdság relatív szórásának ( $V_f$ ) változása a falazóelem és habarcs ( $f_{b,m}$  és  $f_{m,m}$ ) szilárdság relatív szórásának ( $V_{f_b}$ ,  $V_{f_m}$ ) függvényében
21. táblázat: Habarcsszilárdság minősítő osztályok és jellemzőik
22. táblázat: Alkalmazott habarcsminta sorok összetétele
23. táblázat: A próbakockák törővizsgálati eredményei
24. táblázat: A falazóelemek Schmidt kalapács vizsgálati eredményei
25. táblázat: Falazott próbatestek törővizsgálati eredményei
26. táblázat: AS, S2 és S3 jelű habarcsminták penetrációs vizsgálatának eredményei
27. táblázat: Nedvesség mértéke ÉMISZ 340:1999 szerinti besorolás szerint
28. táblázat: Szilárdságvizsgálati eredmények
29. táblázat: Eltérő típusú mikroszkópos vizsgálatok alkalmazhatósága habarcsok esetén
30. táblázat: Jelmagyarázat a csiszolatokon látható ásványok azonosításához
31. táblázat: Mikroszkópos vizsgálat látható tulajdonságaihoz tartozó minősítő pontrendszer az ajánlott vizsgálatokkal és a várható szilárdsági értékekkel kiegészítve
32. táblázat: Habarcs – kitöltöttségi mérőszámhoz (HKM) tartozó minőségi jellemző

## 1. Fejezet: Bevezetés

Épített örökségünk védelme, megóvása a jövő nemzedékek számára egy rendkívül fontos és nehéz feladat. Sok esetében a műemléki és történeti épületek, hidak szerkezeteiben romlási folyamatok olyan mértékben előre haladottak, hogy a szilárdsági, állékonysági problémák már jelentkeztek, ezen esetekben már nem restaurátori, hanem építőmérnöki feladat a helyreállítás – nem elhanyagolva az építészeti értékek megőrzését. Különösen a meglévő falazott szerkezetek vizsgálata, illetve a teherviselés mértékének meghatározása – kiemelten a mészhabarc falazatok esetén – nehezen kivitelezhető, költséges és időigényes. A vizsgálatokhoz minden esetben szükséges helyszíni mintavétel, mely – ugyan legtöbbször csak kis mértékben – fizikai beavatkozással, a falazat roncsolásával jár. Problémát jelent, hogy a falazat mért szilárdsági értékeinek szórása rendkívül nagy, mely értéket jellemzően a roncsolással járó vizsgálatokkal tudjuk csak csökkenteni.

Nagy kérdés a felújítás, átalakítás és a műemlékvédelem megvalósításának pontos kivitelezése. Gyakran a hosszú ideig magára hagyott épület, vagy építmény az idők során károsodott, megváltozott, de ez a korából adódó károsodás lehet az építmény, műemlék sajátja, oly módon, hogy báját, régies mivoltát e tényező javítja, nem pedig rontja. Ruskin véleménye szerint a rongálódás is hozzátartozik az emlék korához, így nincs jogunk ezt a folyamatot semmilyen módon megváltoztatni. Georg Dehio német művészettörténész véleménye is hasonló, úgy gondolja sokszor egy nem létezőt keltenek életre, az egyik oldalon van a valóság a Wirklichkeit, a másikon pedig már a fikció [1].

*„... csak azt lehet konzerválni, ami még megvan - ami elmúlt, az sohasem fog visszatérni.”*

*Georg Dehio: „Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler*

Gondoljunk csak a különböző romemlékekre<sup>1</sup>: romtemplomokra, romvárakra, ilyen fennmaradt számtalan műemlékünk között találjuk az 1. ábrán látható Regöly határában álló egykori Somoly falu templomának rommaradványát. A XV.századból származó templom konzerválását és statikai megerősítését 1960-as években végezték el, nem egészítették ki az elveszett részletekkel, mégis főbb építészeti értékei, mint a félköríves boltozat, masszív falak és zömök torony, keskeny, lőrésszerű ablakok megmaradtak [2].



64. ábra: Egykori Somoly falu romtemploma (saját felvétel)

<sup>1</sup> romemlék: Elpusztult történelmi jelentőségű építmény felszíni vagy felszín alatti maradványa, amelynek legalább részleges feltárása és bemutatása indokolt és műemléki védelemben áll..

Kutatásom során tehát nem csak a funkciót betöltő épületek, hanem például rommaradványok, szabadon álló falazatok és egyéb építmények vizsgálatát is elvégeztem, hiszen tartószerkezeti és állagmegóvási szempontból fontos a diagnosztika. A 3. fejezetben a vizsgált szerkezetek közül kiemeltem és ismertettem azokat, melyek jelentős, de sérülékeny építészeti értéket képviselnek, illetve a műemléki és világörökségi védetség miatt tartószerkezeti és szilárdsági jellemzőik nem vizsgálhatók roncsolással járó módszerekkel.

## 1.1 A műemlékvédelemről

*“Hazánk történelmének, kultúrájának és művészetének pótolhatatlan örökségét képezik azok az alkotások, amelyek a környezet kiemelkedő értékeiként az ország és az egyes települések arculatának jellegzetes meghatározói, kulturális hagyományainak hordozói, s egyben a történelmi és nemzettudat formálói.*

*Ezek az alkotások, mint műemlékek – a tulajdonjogra való tekintet nélkül – az egész nemzet közös kulturális kincsei, védelmük nemzeti összefogást kíván. Fenntartásuk, jelentőségükhöz méltó használatuk és az egész társadalom számára való hozzáférhetővé tételük közérdek.”*

*Részlet a műemléki törvény bevezetőjéből (1997. évi LIV. törvény a műemlékvédelemről)*

Már Kr. e. IV. századból származó írásokban szerepel az épületek későbbi kiegészítése, mint például az olimpiai Zeusz templom egyik párkánytöredékén végzett renoválás. Mégis logikusabbnak tűnik, hogy egy használatban lévő épületet nem műemlékvédelmi, hanem esztétikai megfontolásokból egészítették ki az ókori mesterek.

Úgy tartjuk tehát, hogy a műemlékvédelem a XIX. század szülötte. A régebbi korok művészeti alkotásainak tudatos és következetes védelme, megóvása és eredeti állapotukban való megtartása vagy helyreállítása a múlt század előtt tulajdonképpen ismeretlen fogalom volt. A korábbi idők általános magatartásából hiányzott a réginek az a tisztelete, amely a műemlékvédelmet közel a mai formájában életre hívta.

A XIX. században elsöprő erővel került középpontba az emberiség és az egyes nemzetek múltja, szellemi és tárgyi emlékei iránti érdeklődés. Az értékek megismerésének, összegyűjtésének, értékelésének folyamata, megóvásuk, megmentésük igénye társadalmi igénnyé vált. A purizmus<sup>2</sup> időszakában az eredetiséget kizárólag a műemlék legelső (építési) állapota jelentette. Az eltűnt szerkezeteket, formákat a stílusokról szerzett széleskörű ismeretek alapján pótolták. Az irányzat azonban nem becsülte az anyag és a felület eredetiségét, irtózott a töredékességtől, az eredeti vagy annak ítélt formát, szerkezetet meghatározónak tartotta, de a sérült eredeti részleteket épre kiegészített másolattal helyettesítette. Az anyagkompatibilitás és a nagymértékű szerkezetkiegészítés számos problémát idézett elő, nem csak a gyorsabb állapotromlás miatt, de a későbbi felújítások során is.

A XX. században a történelmi fejlődés állandóan változó, alakuló dinamikája került előtérbe. A helyreállítás alapvető elve a történetiség mellett a megőrzés, konzerválás. Cél a történetiség tiszteletben tartása mellett az anyagi értelemben vett eredetiség megtartása. A műemlékek helyreállításakor nagyon fontos szempont a hitelesség kérdése. Az emlékek anyagában és szerkezetében, megjelenésében hűen kell tükröznie azt a kort, amelyben létrehozták [3].

---

<sup>2</sup> purizmus: A 19. század műemlékvédelmének stíluszisztaságra törekvő módszere. Kevésbé, illetve egyáltalán nem vette figyelembe a műemlék múltjának történetiségét, és az egyedül eredetinek tartott legelső vagy leginkább uralkodó állapotot kívánta visszaállítani.

1964-ben a „The International Restoration Charter” azaz a Velencei Charta (Karta) kimondja, hogy „...nemzeti műemlékeink egyúttal az emberiség közös kulturális örökségének kincsei.” Ezen alapvető elgondolás a modern műemlékvédelem hitvallása [4].

Hivatalosan műemléknek az olyan építészeti értékeket nevezzük, amelyet a kulturális örökség védelméről szóló 2001. évi. LXIV. törvény alapján jogszabállyal védetté nyilvánítottak. A műemléki védettségnek különböző szintjeit különböztetünk meg. Országos műemléki védelem, vagy helyi védelem [5].

## 1.2 A műemlékvédelem fontosságáról

Az örökségvédelem nem a cél. Az örökségvédelem a társadalom számára a múlton alapuló, élhető jövő építésének egyik fontos eszköze. A társadalom egészséges identitásához szükség van a gyökerekre, múltra, a múlt ismeretére. Múltunknak, történelmünknek pedig kézzel fogható emlékei, bizonyítékai a korábbi generációk által megalkotott, szeretettel végzett emberi munkával létrehozott műemlékeink. Ezek megőrzése tudományos alapokon nyugvó, évszázados tapasztalatot felhalmozó és felhasználó, a bennünket követő generáció, a jövő társadalmá érdekében kifejtett társadalmi tevékenység.

Fontos kérdés, hogy mi is pontosan az építészeti érték, mi az, aminek a megőrzése kiemelt feladatunk.

*„Az épített környezet minden olyan tárgyi és szellemi (építészettörténeti, építőművészeti, műszaki-tudományos) építészeti minőséggel rendelkező alkotásokban megjelenő értéke, amelyben a mindenkori társadalom - ezen belül a helyi közösségek - identitása és alkotóképessége fejeződik ki.”*

*Az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény*

Néhány szempont az építészeti érték meghatározásához:

- épület szépsége, arányai, megjelenése, építészettörténeti stílusjegyei
- építés ideje
- különleges építéstechnológia
- építmény, épület egyedi, ritkán előforduló alkotás
- történelmi, társadalmi, kulturális értékeket hordoz
- harmonikus épületegyüttest alkot, különleges környezeti értéket képvisel

A műemlékvédelem feladata a műemléki értékek felkutatása, tudományos kutatása, értékelése és számba vétele, dokumentálása, nyilvántartása, védetté nyilvánítása és a védendő műemléki területek meghatározása, a műemlékek és környezetük fenntartása, helyreállítása, védelme, valamint eszei értékükkel összhangban álló hasznosításuk biztosítása, a műemléki szempontból védett területek fenntartását, fejlesztését és az értékvédelmét szolgáló kezelése összhangjának megteremtése, tudományos alaputatások és kutatások, oktatás, ismeretterjesztés [6].

Helyi védelem vagy műemléki védelem alatt álló építményeink a nemzeti értékeink közé tartoznak. Építészeti szépségük, az alkotó kor jellemzői számtalan apró részletben nyilvánulhat meg.

A műemlék-helyreállítás folyamata során - már a kutatás és a tervezést megelőző műszaki vizsgálatok elvégzésekor - előtérbe kerülhetnek a diagnosztikai vizsgálatok. A védelem típusától függetlenül a szerkezetek megóvása a briliáns építészeti megoldások épsége és az aprólékosan kidolgozott kiegészítő elemek sértetlensége különösen fontos. Ezen okokból kutatásom során a roncsolásmentes módszerek kerültek előtérbe, kiegészülve további anyagvizsgálatokkal. Az anyagvizsgálatok szerepe nem elhanyagolható. A ma használatos

cement tartalmú anyagok eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a régen használt (mész) kötőanyagok. Alkalmazásukkal megbomlik az épületfizikai egyensúly, ami komoly károsodásokhoz vezet [7]. Lényeges tehát a meglévő szerkezeti anyagok összetételvizsgálata, mely kutatásom egyik kiemelt módszere.

### 1.3 Az elvégzett kutatás célja

A kutatásom elsődleges célja a meglévő falazott szerkezetek azon diagnosztikai módszereinek fejlesztése, melyek alkalmasak a fizikai beavatkozás minimalizálása mellett a szilárdsági és állapotjellemzőik kellő pontosságú meghatározására – kiemelten a falazóhabarcs vonatkozásában. Dolgozatom 2. fejezetében a szakirodalmi áttekintést követően a különböző számítási összefüggések paramétereit, módszerét tekintettem át. Arra kerestem a választ, milyen számítási metódus szerint igazolható egy meglévő szerkezet. Összevettem az érvényben lévő és a megelőző szabványok szerinti vizsgálat feltételeit, külön épületek és boltzott hidak esetén. A 3. fejezet a módszertan rövid ismertetését tartalmazza. A 4. fejezetben az Eurocode által alkalmazott képletet alapul véve a számításban szereplő egyes paraméterek érzékenységét vizsgáltam, meghatároztam a teherbírásra gyakorolt hatásukat. A falazóelem és a habarcs karakterisztikus szilárdság értékeinek relatív szórása függvényében a teherbírás variabilitást modelleztem. Összevettem a rendelkezésre álló külföldi szakirodalom és a MÁV Zrt. hídállag nyilvántartása alapján a közép-kelet-európai és a nyugat-európai vasúti hidak főbb geometriai jellemzőit. Összehasonlítottam az eltérő kialakítású szerkezeteket, majd a tipikus jellemzők alapján megalkottam két numerikus hídmodellt. A két modellen falazott hídszerkezetekre vonatkozólag numerikus paraméter érzékenységi vizsgálatokkal megállapítottam a teherbírást leginkább meghatározó szerkezeti és anyagi jellemzőket. Az elvégzett szimulációk alapján meghatároztam azt a szilárdsági tartományt, ahol a falazóhabarcs szilárdsága a tartószerkezet biztonságában kiemelten fontos paraméter.

Az 5. fejezetben arra kerestem a választ, hogy a meghatározott szilárdsági tartományokban mely helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok alkalmazhatóak. Célom az alkalmazott módszerek közül kiválasztott diagnosztikai eljárások fejlesztése volt. Az alkalmazott anyag- és szerkezetvizsgálati módszerek közül elsődlegesen a roncsolásmentes, vagy kisoncsolással járó módszerek fejlesztésére és alkalmazására fókuszáltam. Célként tűzve ki a roncsolással járó vizsgálatok – különösen fűrt mintavételek – számának minimalizálását a szerkezetvizsgálat során. Kiemelten fontos, hogy az egyes módszerek a habarcsszilárdság változékonyságára és ne csak a szilárdság értékre adjanak megfelelő eredményt.

Alacsony habarcsszilárdsági tartományban készítettem változó összetételű kontroll mintasort, melyek alkalmasak a vizsgálati módszerek fejlesztéséhez, egzakt értékeléséhez és a variabilitás meghatározására. Az anyagi összetétel nagyban befolyásolja a habarcskeverék szilárdságát, így mikroszkopikus (terepi, polarizációs és elektronmikroszkóp) és kémiai módszerekkel (pH mérés, XRF vizsgálat) megvizsgáltam azt is, hogy a habarcsalkotók tulajdonságai hogyan hatnak a megszilárdult habarcs fizikai és mechanikai jellemzőire, továbbá a tulajdonságok változékonyságára. A vizsgálatokkal mikroszkopikus szinten feltérképezhetjük a habarcsban végbement degradációs folyamatokat, valamint az eltérő – szilárdságra ható – paraméterek változékonyságát. Látható és/vagy kimutatható a károsító sók jelenléte és típusa, a porozitás, a kötőanyag mennyisége, a repedések méretei, az adalékanyag fajtája, a benne lévő szerves anyagok, a szétosztályozódás vagy épp az egynemű szerkezeti felépítés. Az elvégzett vizsgálatok összességében a habarcs homogenitását, vagy inhomogenitását térképezik fel, lehetőséget adva a szilárdság értékének és variabilitásának pontosítására. A nedvességtartalom mérésével a szerkezeten belüli – nedvesség hatására végbement – állapotromlási folyamatok detektálására nyílik lehetőség. Kontroll habarcs mintasor törővizsgálata során a minták 20-90% közötti mértékű szilárdságcsökkenést mutattak teljesen telített állapotban. A szerkezeten belül

a változó nedvességtartalom a szilárdsági értékek szórását jelentősen megnöveli, így szilárdságbecslés megbízhatóságát is rontja. A kontroll mintasor eredményeket összevettem a már rendelkezésre álló, illetve célirányosan elvégzett nagyszámú helyszíni diagnosztikai mérési adattal, meglévő szerkezetből kiemelt minták elemzésével.

A 6. fejezetben az elvégzett mérések eredményei alapján vontam le következtetéseimet, majd gyakorlati ajánlást fogalmaztam meg az alacsony szilárdsági osztályba eső falazatok vizsgálatához, igazolhatóságához. Végül két kapcsolódó téziscsoportra bontva fogalmaztam meg kutatásaim legfontosabb eredményeit.



## 1.4 Summary

The protection of cultural heritage masonry buildings and structures is a very important and difficult task because they represent a large proportion of our built environment and infrastructure, and their maintenance requires careful consideration. The structural condition of many of these structures is rapidly declining due to the changing environmental effects or loading regimes. In order to maintain structural safety effective assessment tools are needed that are assisted by test methods. The main objective of my research is the improvement of Non-Destructive Tests (NDT) and Minor Destructive Tests (MDT) for existing masonry structures.

In the first chapter of my dissertation the relevant literature is reviewed, focusing on the parameters affecting masonry strength and stress distribution characteristics.

The second chapter contains a brief description of the methodology of analysis and introduces the selected buildings where field tests have been carried out for the case studies. These case studies form the practical demonstration of the developed analysis techniques.

In the third chapter the effect of different geometrical and material parameters are examined on the load capacity of typical masonry structures. The main geometrical characteristics of railway bridges from North-East Europe and West Europe are compared, based on the MÁV ZRt's bridge register and the relevant international literature. Comparison on the different structural and material characteristics are made and a numerical bridge-model is created based on the statistical analysis of the selected parameters. The structural and material parameters that primarily define the strength of the structures are specified. A masonry strength range is derived, in which the strength of the mortar has highlighted importance with regard the carrying capacity and safety of the structure.

In the fourth chapter results of field tests and laboratory examinations carried out on mortars are summarized. The aim of analysis was the improvement of the standard test procedure of the strength of historical mortars. Control samples in the low mortar strength range were created with different material compositions. These control samples were used to analyse the strength characteristics based on the variation of selected parameters of the composition and develop or refine the test-methods.

It was concluded based on the tests that the material composition and its variations highly influence the strength properties of historical mortars. Samples were analysed by using different types of microscopes (field-, polarising- and scanning electron microscope), and by chemical methods (e.g. pH measurement, XRF test). It was found that the presence of damaging salts and their type, the porosity of the material, the amount of binding material, the size and distribution of cracks, the presence of organic materials were detectable and/or visible with these tests. The effect of various moisture content of the mortars on its strength was analysed experimentally by using control samples with various moisture contents.

In the fifth chapter the conclusions are drawn from the results of the tests and numerical analyses. The most important results of the research are summarized in two thesis groups.

## 2. Fejezet: Irodalmi áttekintés

### 2.1 Meglévő falazatok anyagi összetétele, beépítési technológia hatása a szilárdságra

A történeti építmények egyik legjellemzőbb kialakítási módja a falazott szerkezetek alkalmazása. A habarcs – mint fő falazatalkotó egység – mechanikai jellemzőinek változása a legkevésbé ismert tényező. A szakirodalomban nagyságrendileg kevesebb publikáció foglalkozik a habarcsok vizsgálatával, mint a különböző falazóelemekével. Jelen fejezetben a habarcsok általános jellemzőit az összetevők tulajdonságait a készítés módját és a szilárdság alakulását vizsgáltam meg szakirodalom kutatás segítségével.

### 2.2 A habarcs

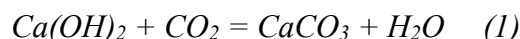
A habarcsok összetétele, mechanikai jellemzőik az összetétel függvényében a történeti korok változásával folyamatosan fejlődött. Az építők szakmai tapasztalata a bevett gyakorlat a földrajzi elhelyezkedés szerinti jellemző anyaghasználat a szilárdság mellett több egyéb jellemző is befolyásolhat. Az első falazatok - melynek története 5000 évvel nyúlik vissza – habarcsréteg nélkül készültek, azonban később az égetett mész szélesebb körű alkalmazásával homok, mész és víz keverékéből álló habarcsokat kezdtek alkalmazni.

Egyiptomban már i. e. 3000-ben, a piramishoz szalmával kevert sarat, gipsz-, ill. mészhabarcsot használtak a téglák összekötéséhez. Ugyanekkor Kínában már a Nagy Fal építésekor cementszerű anyagot használtak. A görögöknél i. e. 800-ban Krétán és Cipruson olyan mészből kevert habarcs volt elterjedve, ami keményebb volt, mint később a rómaiak téglá- és mészport tartalmazó habarcsa. Ez utóbbi legfejlettebb változata a puccolán (pozzuoli habarcs) volt, ami a Vezúv Pozzuoliban bányászott vulkáni hamujáról kapta a nevét. Ebben a hamuban jól hidratálható alumínium- és szilícium-vegyületek vannak – csakúgy, mint a mai cementporokban [8]. Jól látható, hogy a régi korokban a földrajzi elhelyezkedés, a rendelkezésre álló anyagok nagyban befolyásolták a habarcs jellemző tulajdonságait, valamint az összetételüket. A mai modern anyagok jellemzően előre kevert magas cement tartalmú anyagok, melyek finomszemcsés adalékanyagból és leggyakrabban portlandcement kötőanyaggal készülnek. A következőkben a legjellemzőbb habarcsalkotókat vettem sorra, azok jellemzőit a kötési folyamatot és a szilárdság változásra gyakorolt egyéb hatásokat.

#### 2.2.1 Habarcsalkotók: mész

A mész az építőiparban a legrégebben és leggyakrabban használt kötőanyag. A régi időkben leggyakrabban mészpép volt a falazóhabarcsok fő alapanyaga, később azonban szükség volt más anyaggal együtt alkalmazni, mert a karbonátosodás nagymértékű zsugorodással jár és így nagyon repedéshajlamos „habarcs” keletkezett. A felületi szilárdulást követően a mélyebben fekvő rétegek szilárdulása nem következett be, mert a széndioxid nem tud a belső rétegekig eljutni. A mészpépen kívül porrá oltott mész, őrlött égetett mész vagy ezek kombinációit alkalmazták kötőanyagként.

Az oltott mész a levegő széndioxidjának hatására alakul át szilárd kalcium-karbonáttá, mely folyamatot az *1. egyenlet* írja le.

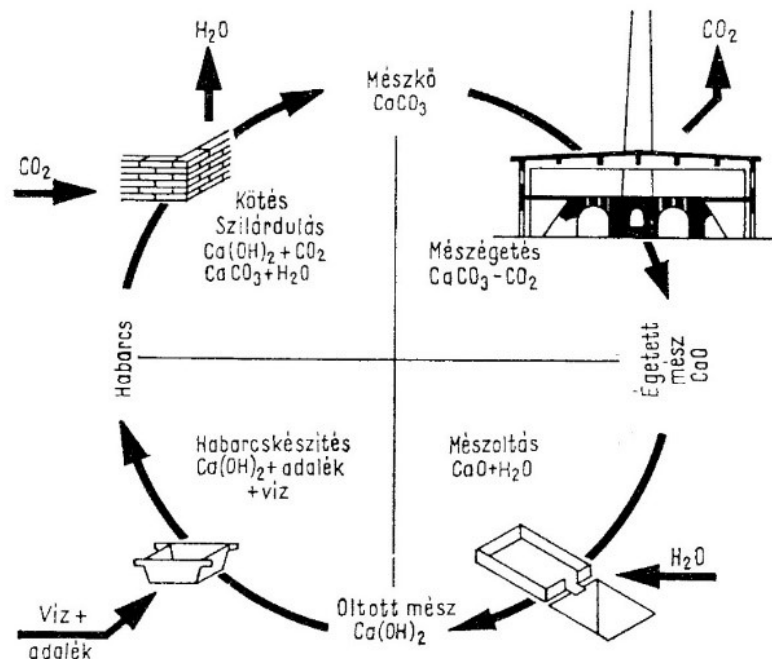


A mészhabarcs kötése bonyolult folyamat, annak ellenére, hogy főként a levegő széndioxid tartalmával lép reakcióba, és alakul szénsavas mésszé, a méshidrát kristályosodása – a mészszilikátok, méshidrátok képződése – is hozzájárul a megfelelő szilárdsághoz. A hirtelen szilárdulás a széndioxid hatására megy végbe, de a lassú, fokozatos merevedés a hidrát képződés hatására következik be [9].

„A régi építő gyakorlat szerint 20 éves mészhabarcsban 18-22%, 30 éves mészhabarcsban 12-16% veremmész található még.”

Déry Attila: Történeti anyagtan című könyve

A kövér mész hajlamos a lassú szilárdulásra, főként a vastag szerkezetek belső rétegeiben (nem szellőző helyeken) jellemző a lassú, de szilárdabb kötés. A régi építőmesterek úgy tartották, hogy nagy terhelésre méretezett falak habarcsát nem szabad kövér mészből elkészíteni, mert lassú szilárdulása miatt nem kellően teherbíró.



65. ábra: A mész (habarcs) megszilárdulására jellemző körfolyamat

A mész minőségét a kalcium-oxid, magnézium-oxid mennyisége és a portartalom (5 mm-nél kisebb szemcse nagyság) mellett a nehezen, vagy egyáltalán nem oltódó részek (kő, homok egyéb szilárd anyag) mennyisége jellemezi [9].

A dekarbonizációig égetett kötőanyagok a mész és a magnézia<sup>3</sup>, melyek közül az előbbi a klasszikus mészhabarcs fő alkotója. A mész előállításánál bizonyos szennyezőanyagok (például:  $\text{MgO}$ ) szilárdságcsökkentő és kötés gátló hatásával lehet számolni [10].

### 2.2.1 Habarcsalkotók: homok és víz

A habarcs száradásához elengedhetetlen porozitást homok hozzáadásával biztosítjuk, a megfelelő plasztikusságát, foltosságát pedig – ugyanúgy, mint napjainkban is – víz hozzáadásával érhetjük el.

Homoknak nevezzük a 2 mm és 0,063 mm közötti szemcseméretű talajt. Habarcs készítésére bányá- vagy folyami homokot alkalmaztak (napjainkban már a finomszemcsés anyagok kerültek előtérbe), az ún. futóhomok nem megfelelő. Megjelenésük szerint érdes és gömbölyű szeműt különböztetünk meg. A falazóhabarcsok agyag és iszaptartaloma negatívan befolyásolja a habarcs minőségét (károsító sók jelennek meg), ezért legfeljebb 8 térfogat% a megengedett. A minősítési osztályokra vonatkozó követelményeket az 1. táblázat tartalmazza [11].

<sup>3</sup> magnézium-oxid

<i>Minőségi osztály jele</i>	<i>Agyag- és iszaptartalom térfogat %</i>	<i>Alkalmazási terület</i>
P	$f \leq 3$	feszített vasbeton, C30/37 nyomószilárdsági osztály feletti vasbeton
Q	$3 < f \leq 6$	C30/37 nyomószilárdsági osztályú, vagy gyengébb vasbeton, cementhabarcs
R	$6 < f \leq 10$	beton, mészhabarcs
S	$10 < f \leq 20$	feltöltés, ágyazat

1. táblázat: Minősítés az MSZ 18293 szerint: Homok, homokos kavics és kavics [12]

A habarcskeverő vízzel szemben egészen napjainkig nem támasztottak különös követelményeket, lehetőség szerint tiszta, szennyező anyagoktól és oldott sóktól mentes vizet használtak. A korabeli előírások szerint, a készítési keverővíz nem származhatott agyagos vagy iszapos helyről, forrásvíz, szulfát tartalmú víz nem volt használható, így ezek hatását nem kell számításba venni. Megállapítható, hogy a meglévő szerkezetekben felellhető szulfátok, sók és egyéb szennyező anyagok nem a keverővízből származnak [11].

### 2.2.2 Habarcsalkotók: egyéb adalékanyagok

Előfordul, hogy a kötő és adalékanyag mellett egyéb különleges adalékanyagok hozzáadásával is számolnunk kell. Ilyen a puccolánnal kevert mész, vagy az elsőként az asszírok által alkalmazott mészhabarcsba kevert tufaőrlemény, kőpor vagy téglaliszt.

Előfordulnak szerves adalékanyagok, mint a szilárdság növelés céljából alkalmazott sovány tej, kazein, vagy túró. Amennyiben ezen adalékok aránya kisebb, mint 5% (kazein), illetve 1% (túró), valóban gyorsabb szilárdulás és jobb szilárdsági értékek várhatóak. A XIX. század elejétől kísérleteztek a kohósalak mészhabarcsban való felhasználásával, inkább kevesebb, mint több sikerrel. Az olcsó alapanyag néhány változata kecsgetető eredményeket mutatott, de a különféle forrású salakok nem biztosították az egyenletes szilárdságú és megfelelő minőségű habarcsot. Leggyakrabban alárendelt helyeken (vakolat elszíneződések miatt), azonban 3:1 arányú salak: mész keveréket a XX. század elejéig használtak. Hidraulikus jellegű kiegészítő anyag, az úgynevezett Tournay-i salakciment terjedt el kizárólagosan. Az 1870-es években mészhabarcsokat utólag próbálták meg szilárdítani, kénsavas cink-, réz- és vas- szulfátoldatokkal. Sajnos e próbálkozások nem jártak sikerrel, de gyakran inkább károsították a habarcsréteget [11].

A habarcs kémiai és mikroszkopikus vizsgálata során az alkalmazott különleges adalékanyagok jól detektálhatók, a szilárdságra gyakorolt hatásuk jellemzően – különösen a téгла- és kő őrlemény – szilárdságnövelő.

### 2.2.3 A habarcs szilárdsága az összetétel függvényében

A habarcsalkotók aránya alapvetően meghatározza a falazóhabarcs szilárdságát, vizsgálva a korabeli keverési arányokat, megállapítható, hogy a pontos összetétel igen változó. A kézi keverést keverőgödörben vagy keverőládában végezték, a keverés minőségétől függően a habarcs tartalmazhat mézzárványokat, inhomogén részeket. A kis habarcsszilárdság leggyakoribb oka a nagy készítési vízmennyiség, az adalékanyag kis szemnagysága és a tömörítetlenség. Ezen jellemzők szorosan összefüggenek a falazás technológiai adottságaival, és emiatt szinte az összes (kézi) falazó habarcsra jellemzők.

A XVIII-XIX. században 1:2 illetve 1:3 arányban keverték a meszet a homokkal, a sovány mészhez azonban csak 1-2 térfogatarányban keverték a homokot. A homoktartalom növelésével

ugyan növekszik a szilárdság, de a falazat annál kevésbé viseli rugalmasan az alakváltozásokat. A szabvány habarcsok összetételét – keverési arányát – és a várható szilárdsági értékeket a 2. táblázat tartalmazza. A magasabb mésztartalom lehetőséget ad a habarcsban fellépő feszültségek átrendeződésére a szerkezet túlterhelése esetén. A tönkremenetel ennek következtében nem rideg módon, hanem képlékeny módon megy végbe [11]. (Például a régi falazott boltozatok teher alatti viselkedése általában nemlineáris jellegű.)

Megnevezés	Homok (m <sup>3</sup> )	Mészhidrát (t)	Oltott mész (m <sup>3</sup> )	Cement (t)	Víz (m <sup>3</sup> )	Várható szilárdsági érték (N/mm <sup>2</sup> )
H3 falazó mészhabarcs	1,60	0,125	-	-	0,47	3
H3 falazó mészhabarcs	1,60	-	0,30	-	0,25	3
H4 könnyen javított falazó mészhabarcs	1,11	-	0,28	0,083	0,25	4
H6 javított falazó mészhabarcs	1,06	-	0,27	0,159	0,24	6
H10 különlegesen javított falazó mészhabarcs	1,04	-	0,26	0,208	0,24	10
H25 közönséges falazó cementhabarcs	1,12	-	1,11	0,336	0,25	25
H50 nagyszilárdságú falazó cementhabarcs	1,07	-	1,11	0,428	0,24	50
80 igen nagyszil. falazó cementhabarcs	1,10	-	0,06	0,495	0,24	80

2. táblázat: Szabvány habarcsok összetétele és várható szilárdsági értéke [11]

A nemzetközi szakirodalomba kitekintve láthatjuk, hogy a korabeli falazatokat leginkább a falazóelem nyomószilárdsága és a falazóhabarcs összetétele (keverési aránya) jellemzi. Kevés a habarcsra vonatkozó előírás. Boltozott hidakra vonatkozó néhány ajánlás: nedves homok esetén további keverővíz hozzáadása nem szükséges, keverővíz mennyisége éppen a bedolgozhatósághoz legyen elegendő, ne legyen több [13].

A 3. táblázatban mészhabarcsokra vonatkozó keverési arányok szerepelnek. Fontos megjegyezni, hogy bár az ajánláson a tengerparti homok még szerepel, magas sótartalma miatt nem volt megfelelő.

Homok	Mész	Víz	$f_{ck}$ (MPa)
3 rész	1 rész	bedolgozhatósághoz szükséges mennyiség	2-3
2 rész (finomhomok)	1 rész		3-4
2 rész (folyami homok)	1 rész		3-4
2 rész (nedves tengeri/folyami homok)	1 rész	-	3-4
3 rész (száraz tengeri/folyami homok)	1 rész	bedolgozhatósághoz szükséges mennyiség	2-3
3/5 rész (homok+mészkeő)	2/5 rész		2-3

3. táblázat: Habarcs összetétel [14][15][16]

## 2.3 A tégl

A habarcs és a falazóelem együtt alkot falazatot. A falazóelemek közül a legnagyobb számban használt, tipizált elemek az agyagtéglák. A tégl egyike a legrégebb építőanyagoknak, az agyagtéglát már Kr.e. 10.000–8000 között is ismerték [17].

### 2.3.1 Téglagyártás és szilárdság

A falazat szilárdság meghatározásának másik fontos összetevője a habarcs mechanikai tulajdonságai mellett a falazóelemek szilárdsága. A legtipikusabb falazóelem az égetett agyagtégla, így elsősorban az áttekintés ezen elemeket taglalja.

A téglák szilárdságát elsődlegesen az alapanyag minősége és a gyártástechnológia befolyásolja. A „téglaföld” ideális esetben 25 % alatti egyenletesen elosztott szénsavas mésztartalommal rendelkezik. Magasabb mésztartalom esetén mészdarabok maradnak a téglában, ami térfogatnövelő hatású, repedéseket és belső feszültséget okoz a falazóelemben [18].

A XIX. század elejéig a kézzel formált, szabad máglyába rakott, fával égetett téglák voltak elterjedt. A kézi vetésű és egyenetlenül égetett téglák minősége és szilárdsága rendkívül változékony. Az agyagtartalom a helyi adottságok függvénye, így a földrajzi elhelyezkedés is meghatározta a beépített téglák mechanikai jellemzőit. A korai téglák szilárdsága így rengeteg paraméter függvénye, de jellemzően az egyenlőtlen égetési hőmérséklet, a változó keverési arányok, tehát a gyártástechnológia miatt kiemelkedően nagy a szórás.

Magyarországon az 1838 években a nagy árvíz utáni helyreállítás növekvő téglagyártást igényelt kielégítő alakultak az első hazai téglagyárak. Az alkalmazott korszerű több kamrás körkemence (Hoffmann-kemence) jelentette a valódi folyamatos üzemű és a már egyenletes téglák minőségét, szilárdságát és kisebb szórásértékeket [17].

A téglák vörös színe a vas-oxid- és mésztartalom, valamint az égetési hőmérséklet függvényében változik [19].

A leggyakrabban használt elem a tömör falazótégla volt. A különféle téglák méreteit kor meghatározónak tekintjük, ami a falvastagság meghatározásának tekintetében is adhat útmutatást [20].

- 18. század: „1 lábas” téglák (31-33 x 15-16,5 x 6,5-8 cm)
- 19. század elejétől: „1x1/2x1/4 lábas” téglák (30 x 14,5 x 6,5 cm)
- 19. század közepétől: „1 lábas” téglák (31,5 x 15,7 x 7,8 cm) egységes méret
  - 1894. július 31. 42,262/VI.B-4. sz. Kereskedelmi Miniszteri rendelet
- 1895-től: „porosz” téglák (25 x 12,5 x 6,5 cm) alkalmazása
- 1919. március 1. Kereskedelmi miniszter rendelet
  - szabványosított kisméretű (25 x 12 x 6,5cm) téglák



66. ábra: Téglagyártóláda (Bélyeges téglák c. kiadvány, Albert Zs. gyűjteményéből származó felvétel)

A korai, kézi vetésű tömör téglák szilárdsága 3-10 N/mm<sup>2</sup> között alakult, szakirodalom szerint. A fellelt korabeli méretezési előírásokban 1839 évtől kezdődően legalább 9,8 N/mm<sup>2</sup> követelményértéket határoznak meg [11].

### 2.3.2 A téglák minősége és vizsgálata

Az építés közben végezett vizsgálatokkal megpróbálták a nagyon gyenge minőségű téglákat kiszűrni. Elődeink erre többféle módszert is alkalmaztak:

*„A kétoldali terhelő téglasor között 5-6 cm hézagot hagytak. Alapkövetelmény volt, hogy oldalanként 10-12 db, téglá alatt az alsó lapjában fekvő keresztteglának nem szabad kettétörnie, ez a legalább közepes erősség feltétele, 16-20 téglasor terhelésekor erős, 6-8 sornál eltörő próbadarab esetében, pedig gyöngye, vagy elfogadhatatlan minőségűnek tekintették a téglát.”*

*„Terhelték a téglát középen is. Ekkor a kipróbálandó téglát két végét támasztották alá és középre a teher alá egy állaskapcsot, vagy egyéb vékony fém rudat fektettek, hogy a terhelés vonalmenti legyen. Ha 10 téglánál tört, gyöngének, ha 16-18-nál, közepesnek, ha 22-24-nél, erősnek nevezték a téglát.”*

*Déry Attila: Történeti anyagtan című könyve*

A téglák ütögetése, kopogtatása is sokat elárulhat. A régi gyakorlat szerint, ha a téglát hangja éles csengésű, erős, a tompább csengésű, akkor közepes, a csengés nélküli téglát gyenge minőségű [11].

Helyszíni szilárdság becslést végezhetünk bármilyen hegyes tárgyjal. Ha az eszközt a téglát felületébe körülbelül 45°-os szögben képesek vagyunk, mintegy 4-5 mm-re benyomni, akkor a falazótégla 5 N/mm<sup>2</sup> szilárdságú. Ha az eszközt 2-3 mm-re tudjuk a téglába benyomni, akkor ~ 7 N/mm<sup>2</sup> szilárdságú. Ha az eszköz csak 1-2 mm-t hatol be, akkor valószínűsíthető a 10 N/mm<sup>2</sup> szilárdság. Amennyiben a hegyes eszközzel csak karcolni tudjuk a téglát, 14 N/mm<sup>2</sup> szilárdságot feltételezhetünk. A téglát pontosabb helyszíni szilárdsági vizsgálatára a betonvizsgáló Schmidt kalapácsot használhatjuk (régebben elterjedt volt a Christopholi féle ejtőorsó is) [21].

A jelenleg alkalmazott szabványos minősítő módszer, téglák nyomószilárdságának meghatározására az MSZ EN 772-1:2011+A1:2015. A vizsgálathoz szükséges mintadarab legkisebb mennyisége 6 db egész téglát (nyomószilárdság vizsgálat esetén). Természetesen egyedi, műemlék épületen történő felhasználás során ettől el lehet térni, és szakértő által javasolt vizsgálati módszerrel is meghatározható a téglát nyomószilárdsága [22].

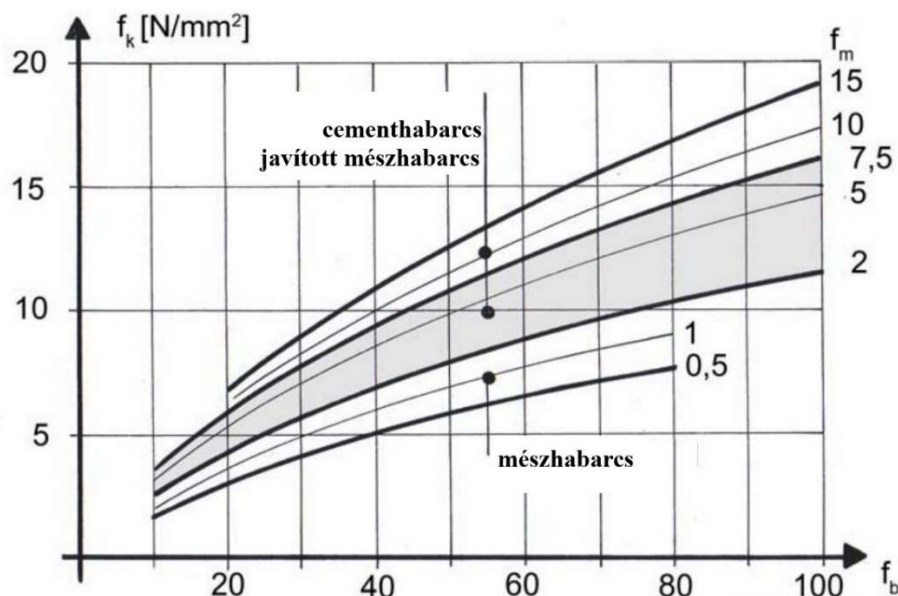
A falazóelemek szilárdságának meghatározása a falazatszilárdság meghatározásához elengedhetetlen. Lényeges, hogy a habarcsszilárdság ismeretének fontossága is a falazóelem szilárdság függvényében változó. Első lépésként célszerű az elemek legalább közelítő szilárdságának meghatározása a helyszíni vizsgálatok során.

### 2.4 A falazóhabarcs szerepe a falazatban

A habarcs feladata az elemek egymáshoz kötése, az elemek közötti átmenő hézagok kitöltése, valamint az egyenletes teherátadás biztosítása.

A falszerkezet valószínűsíthető szilárdságát úgy kell meghatározni, hogy figyelembe kell vennünk a szilárdság különbségeket, aminek a hatása nem jelentéktelen, különösen kis habarcsvastagság esetén. Kísérletek alapján megállítható, hogy 14,7 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdságú téglát alkalmazása esetén, ha a habarcs szilárdsága 3,92 N/mm<sup>2</sup>-ről 7,84 N/mm<sup>2</sup>-re nő, a falazat szilárdságának a változása 2,25-4 N/mm<sup>2</sup>, míg 4,9 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdságú téglából készült falazat szilárdsága az előbbi habarcsszilárdságok mellett 1,17-2,5 N/mm<sup>2</sup>.

Amennyiben 38 cm vastag, 280 cm magas téglát falazatot vizsgálunk 9,8 N/mm<sup>2</sup> szilárdságú téglát alkalmazásakor 0,49 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdságú habarccsal 2,16 N/mm<sup>2</sup>, míg 3,9 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdságú habarccsal 3,14 N/mm<sup>2</sup> falszilárdság érhető el [11].



4. ábra: Falazatalkotók szilárdságának hatása a teljes falazat szilárdságára<sup>4</sup> [23]

A mai számítási modellek által alkalmazott empirikus képletek hasonló összefüggés alapján határozzák meg a falazatszilárdságot.

A falazatalkotók szilárdságának ismeretében a falazatszilárdság számolható, azonban nem minden esetben szükséges a jelenleg érvényben lévő szabványok alapján. Abban az esetben, ha az építmény funkciója, terhelése nem változik, szerkezeti átalakítást nem végeznek rajta, illetve nem bővítik, az építése idejében érvényben lévő vonatkozó szabványoknak is megfeleltethető. A különböző méretezési előírások, a számítási modellek fejlődésének és a biztonság kérdésének áttekintése elengedhetetlen annak érdekében, hogy a szilárdsági jellemzők fontossága értelmezhető legyen.

## 2.5 Régi tervezési eljárások, ökölszabályok és a tapasztalati méretezés módszere

A mai modern szabványok megjelenése előtt a falazatokra egyszerű összefüggések, ökölszabályok alakultak ki, melyek a terhelés mértékéhez viszonyítva valamilyen arány alapján megadták a falvastagságot. A régi empirikus képletek, ökölszabályok, de még a korai méretezési előírások is csak a geometriai jellemzőkre fektettek hangsúlyt. Az irodalomkutatás során arra kerestem a választ, a modern méretezési előírások megjelenése előtt miért vonatkoztattak el a méretezés során a szilárdságtól. A dolgozatomban sorra vettem a számtalan korai méretezési módszer közül néhányat. A különféle elvek alapján kidolgozott, Európában legelterjedtebbeket részletesebben taglaltam. Szilárdságra vonatkozó összefüggést elsőként az Olasz Vasúttársaság 1907-ben megjelent szabályozásában találtam. Fontosnak tartom megismerni a korabeli előírásokat és áttekinteni, hogy a szilárdság mellett mely paraméterek játszanak fontos szerepet a méretezés során szerepet.

A legelső méretezési szabályok tapasztalati úton kerültek meghatározásra. Jellemzően nagy falvastagságot írtak elő, így megfelelő kivitelezéssel e zömök szerkezetek sokáig állékonyak

<sup>4</sup>Megjegyzés: A javított mészhabarcsok azok, amelyekben kötőanyagként az építési mészen kívül hidraulit vagy 200 kg/m<sup>3</sup>-nél kevesebb portlandcementtel egyenértékű cement is van.



maradtak, ritkán adódtak stabilitási problémák. Az egyszerű falazatok így jellemzően nagy biztonsággal épültek.

Falazott szerkezetek alapvető elemei a boltívek, melyeket már 6000 éve alkalmaznak. A boltívek majd a boltozatok erőjátéka már jóval összetettebb, így a hagyományos geometriai tervezés nélkülözhetetlenné vált. A különböző történeti korokban más a geometriai jellemzőkhöz társított arányszabályt alkalmaztak. A rómaiak általános szerkezeti kialakítását az ívmagasság = nyílásméret/2 aránypár határozta meg.

Később a falazat vastagság és ívmagasság arányát vették alapul, ami gótikus szerkezeteknél jellemzően 1/4, reneszánsz korban már 1/3, illetve 1/2 [24].

A késő gótikában alkalmazott módszerek további feltételeket szabtak, a legkisebb falvastagságot  $s/10$  ( $s$  = nyílásköz = span) a nyílásközhez viszonyítva adták meg [25].

Az első alkalmazott „méretezési elv” a Galilei-féle négyzetes, köbös törvénye volt (1638). Ez alapvetően egy matematika tétel, ami kimondja, hogy hasonló alakzatok területeinek, térfogatainak arányát a hasonlóság arányával (a megfelelő oldalak hosszának aránya) írhatjuk le. Ha elvonatkoztatunk a matematikai vonatkozástól és méretezési elvként alkalmazzuk, az alábbi összefüggést kapjuk: a szerkezetekben ébredő belső feszültségek lineárisan növekednek a szerkezet méreteivel, így a szerkezeti elemek vastagságát is arányosan kell növelni [26].

A boltív vastagság meghatározására a tapasztalati és erőtani feltételezéseket alapul véve számos összefüggés született a vastagság ( $e$ ) – ívsugár ( $r$ ) – nyílásköz ( $s$ ) összefüggésének meghatározására. A legkorábbi alapösszefüggést a 2. egyenlet írja le [16].

$$e = a + b (2r)^{1/2} \quad (2)$$

1885-ben Croizette-Desnoyers franciaországi híd állomány statisztikai vizsgálatát követően adtak meg elsőként olyan összefüggést, melyben a terhelés (közúti/ vasúti) is szerepel. 1907-ben az Olasz Vasúttársaság (*Ferrovie dello Stato*) kiadja az első Nemzetközi Műszaki Szabályzatot. A szabályzat már a 3. egyenlet szerint a falazóelem szilárdság függvényében adja meg a vonatkozó összefüggést. A 4. táblázat az  $a$  és  $b$  paramétereket mutatja be [16].

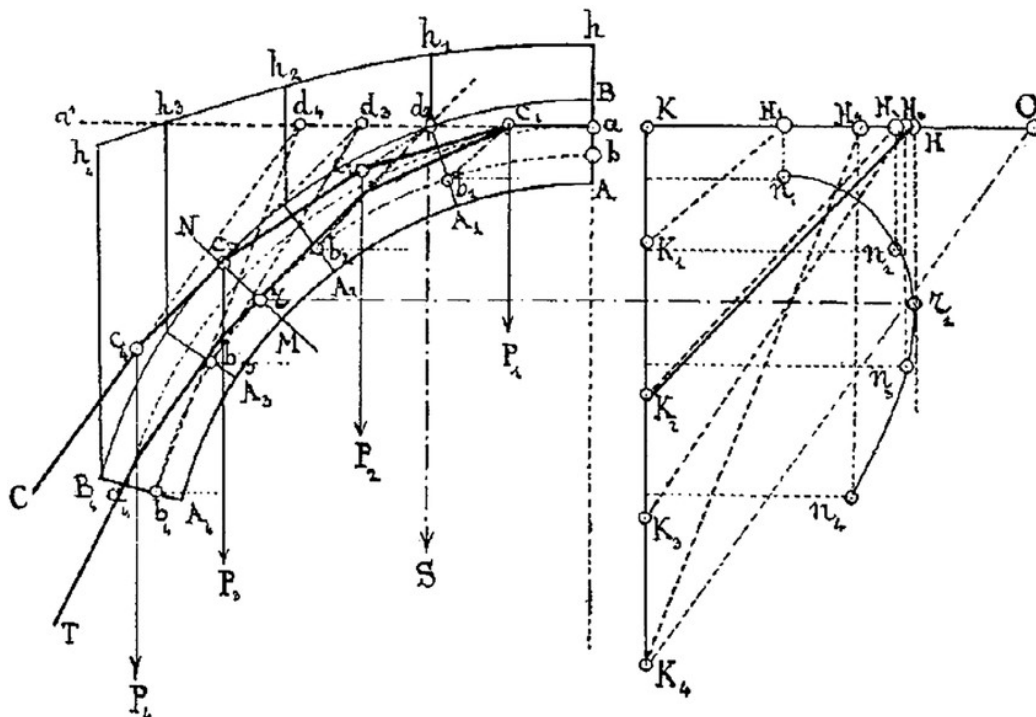
$$e = a + b \times s \quad (3)$$

Szilárdsági paraméterek		$r/s = 1/2$	$r/s = 1/4$	$r/s = 1/6$	$r/s = 1/8$	$r/s = 1/10$
$f_b = 10 \text{ MPa}$	$a$	0,36	0,38	0,39	0,40	0,40
	$b$	0,046	0,057	0,069	0,081	0,095
$f_b = 20 \text{ MPa}$	$a$	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33
	$b$	0,039	0,048	0,057	0,067	0,077
$f_b = 30 \text{ MPa}$	$a$	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26
	$b$	0,032	0,039	0,052	0,052	0,059

4. táblázat: Az  $a$  és  $b$  paraméter értékei ívsugár számításához [16]

Az első racionális megközelítési mód a „belső harmad szabály” (1840), mely szerint a boltozat vastagságát olyan mértékűre kellett választani, hogy a támaszvonallal minden terhelési körülmény között maradjon a keresztmetszet középső harmadában, tehát a keresztmetszetben csak nyomás ébredhet [27] [28]. Az alakváltozási energia módszerével így a határozatlan szerkezetek is megoldhatóvá válnak. Ha a szerkezetben csak nyomófeszültség ébred és a szerkezet megfelelő, akkor az elemeknek a boltíven belül kell maradniuk [29].

Az 5. ábra a "Mery módszer" alkalmazását mutatja be boltív tervezésénél. A tönkremeneteli módszert professzor Heyman ismertette először 1966-ban [30].



5. ábra: A „Mery method” grafikus alkalmazása boltív tervezésénél [30]

A falazatokra vonatkozó alábbi alapelvek, (principális elvek) általánosan elfogadottak:

- nyomószilárdságuk nagy (közel végtelen)
- húzószilárdsága nincs (elhanyagoljuk)
- elemek megcsúsúzása nem lehetséges, súrlódási együttható (0,5) [29]

Amennyiben a fenti feltételeket a szerkezet teljesíti, akkor a módszer alaptézise szerint a tönkremenetel, csak kellő számú csukló létrejötte után alakul ki. Ha az elemek között 4 helyen képlékeny csukló alakul ki, akkor bekövetkezik a 4 csuklós tönkremeneteli mechanizmus.

Az alsó korlát elve, a tönkremeneteli módszer továbbgondolása, feltétele, hogy az erők kialakuló támaszvonalaának a szerkezet keresztmetszetén belül kellett lennie. A határ ív elve meghatározza a minimális vastagságot, mely 1/18-ada a nyílásköznek, ez a geometriai biztonsági tényező. A biztonságos boltív kialakításához két féle megközelítés létezik: az „szilárdság” és a „stabilitás” oldal. A szilárdsági feltételhez a vastagságot növeljük a megengedhető feszültségek értékéig. A stabilitásvesztés miatti tönkremenetel elkerüléséhez felszorozzuk egy geometriai biztonsági tényezővel [31]. A szerkezetek e méretezési szabályokkal jellemzően túlméretezettek voltak.

A geometriai és egyszerűbb empirikus képletek alkalmazása a boltívek, boltozatok esetén igen fontos volt. A geometriai biztonsági tényező és az egyszerű képletek alkalmazása már a korszerű szabványok megjelenésének előszele. A későbbiekben a hazai szabványok és szabványok áttekintését taglalnám, mely a *MI-15011- Műszaki Irányelv* szerint meglévő adott időszakban épült építmények ellenőrzésekor alkalmazható [32]. Összevettem az Eurocode számítási módszerével első sorban a habarcsszilárdság pontos meghatározásának szükségessége okán.

## 2.6 Tervezési szabványok: Az MSZ 15023:1987 Építmények falazott teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése

Magyarországon az első hivatalos, statikai számítások során alkalmazható, a terhelési adatokat és a megengedett feszültségeket tartalmazó kiadvány 1892-ben jelent meg „*Építési Szabályzat Budapest fő- és székváros területén*” címmel. 1893-ban jelent meg a „*Részletes építésügyi szabályzat*”, mely a számításba veendő esetleges terhek értékeiben jelentősen különbözött. Az 1892-ben kiadott szabályzat 1914-ben további függelékkal bővült („A tervek bírálatánál alapul szolgáló adatok”). Végül 1936-ban jelentek meg a Magyar Országos Szabványok, melyek a méretezés során figyelembe veendő terheket írták elő. Már külön 3 kötetben adták ki 1949-ben az Országos Magasépítési Szabályzatot, mely III. kötete Fa-, kő-, téglá- és betonszerkezeti szabályzat. A teherfelvétel mellett meghatározza a rugalmassági tényező számítását, mely a falazat nyomófeszültségének és a fajlagos összenyomódásnak hányadosaként ( $\text{kg/cm}^2$ ) ad meg. Emellett leírja, hogy a fajlagos összenyomódás a nyomófeszültséggel arányosnak tekinthető. Az 5. táblázat a rugalmassági tényező értékeit mutatja be tömör és soklyukú téglára vonatkoztatva [33].

Tégla fajtája	Tégla vastagsága (cm)	Fekvőhézag vastagsága (cm)	Habarcsszilárdság fajtája szerint ( $\text{kg/cm}^2$ )		
			mészhabarc	javított mészhabarc	cementhabarc
tömör tégl	6,5	1,2	10.000	15.000	35.000
soklyukú tégl	14	1,2	12.000	25.000	70.000

5. táblázat: Rugalmassági tényező értékei [33]

A korai előírásokban a habarcsszerepe a fajlagos összenyomódás érték meghatározásán kívül jellemzően elhanyagolható. Az értékeket habarcsfajtánként adták meg, de nem tettek különbséget szilárdsági osztályonként.

A szabályzat meghatározza az alábbiakat:

- húzófeszültségeket nem kell számításba venni
- nyomófeszültségek sík szerint oszlanak el
- nyomófeszültségek gúlaszerűen terjednek
- nyírófeszültségeket elhanyagoljuk

A megengedett feszültség értéke a falazóelem szilárdsága és fajtája szerint változik, számítható a feszültség alapérték és a módosító tényező szorzataként. A mészhabarc megengedett feszültség alapértékeit a 6. táblázat tartalmazza.

Tégla szilárdság ( $\text{kg/cm}^2$ )	Soklyukú tégl ( $\text{kg/cm}^2$ )	Tömör tégl ( $\text{kg/cm}^2$ )
50	3	6
100	5	8
150	7	10
200	9	12
250	11	14
300	-	16
350	-	18

6. táblázat: Megengedett feszültség alapértékei mészhabarc esetén<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Megjegyzés: Javított mészhabarc esetén 50%-kal, cementhabarc esetén 100%-kal nagyobb a figyelembe veendő érték.

A módosító tényező a falazat karcsúsági számától függő tényező, mely értékeket a 7. táblázat tartalmazza. Számítható  $m/v$  értékkel, ahol  $m$  a fal kihajlási magassága,  $v$  a fal mértékadó vastagsága [33].

Falazat karcsúsági száma ( $m/v$ )	Módosító tényező értéke
4	1,00
6	0,80
8	0,70
10	0,60
12	0,50

7. táblázat: Módosító tényező értéke [33]

Az Eurocode szabványt megelőző MSZ 15023:1987 Építmények falazott teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése (előszabvány MSZ 15023/1-76) már részletes méretezési előírás. Irányelvei szerint a teherhordó szerkezetek építéséhez felhasznált falazóhabarcs átlagos szilárdsága legalább  $0,5 \text{ N/mm}^2$  kell, hogy legyen. A falazatot nyomásra ideálisan rugalmas képlékeny, húzásra pedig a húzási határfeszültség eléréséig ideálisan rugalmas anyagnak kell tekinteni [34].

Az alakváltozásra jellemző feszültség-nyúlás diagram kezdeti érintőjének megfelelő  $E_{fo}$  rugalmassági tényező ( $\text{N/mm}^2$ ) számítását a 4. egyenlet adja meg.

$$E_{fo} = \beta_0 \times \sigma_{fh} \quad (4)$$

Ahol,  $\sigma_{fh}$  – falazat nyomási határfeszültsége

$\beta_0$  – táblázat szerinti tényező (égetett agyag falazóelem esetén 2500)

$E_{fh} = 10 / \beta_0$  – falazat törési összenyomódásának határértéke (égetett agyag falazóelem: 4‰)

Falazóelem nyomószilárdságának átlagos értéke ( $\text{N/mm}^2$ )		2	3	4	5	7	10	14	
Falazóelem fajtája: tömör falazóelem	< 100	Habarcsszilárdság átlagos értéke ( $\text{N/mm}^2$ )	Falazat határfeszültségének $\sigma_f$ kiindulási értéke ( $\text{N/mm}^2$ )						
		0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	-
		1,0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,3
		3,0	-	-	-	0,7	0,9	1,2	1,5
	100-200	5,0	-	-	-	-	-	1,4	1,8
		0,5	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,1	-
		1,0	-	-	0,6	0,7	0,9	1,2	1,6
		3,0	-	-	-	0,8	1,0	1,4	1,9
	> 200	5,0	-	-	-	-	-	1,5	2,1
		0,5	0,4	0,5	0,7	0,9	1,2	1,7	-
		1,0	-	-	-	1,0	1,3	1,8	2,4
		3,0	-	-	-	-	1,4	1,9	2,6
		5,0	-	-	-	-	2,0	2,7	

8. táblázat: A nyomási határfeszültség  $\sigma_f$  kiindulási értéke [34]

A falazott szerkezet rétegeire merőleges  $\sigma_{FH}$  nyomási határfeszültség ( $\text{N/mm}^2$ ):

$$\text{falnál} \quad \sigma_{FH} = \sigma_f \times m_1 \quad (4)$$

$$\text{pilléernél} \quad \sigma_{FH} = 0,85 \sigma_f \times m_1 \quad (5)$$

Ahol,  $\sigma_f$  – határfeszültség kiindulási értéke;  
 $m_l$  – falazat minőségétől függő tényező (9. táblázat szerint)

<i>A falazat minősége</i>	<i><math>m_l</math></i>
<i>különleges</i>	1,30
<i>I. osztályú</i>	1,15
<i>II. osztályú</i>	1,00
<i>III. osztályú</i>	0,80

9. táblázat: *A falazat minőségétől függő tényező* [34]

Külpontos nyomásra igénybe vett szerkezet esetében a határerő (N):<sup>6</sup>

$$N_H = A_k \times \sigma_{fH} \quad (6)$$

Ahol,  $A_k$  – keresztmetszet  $e_M$  mértékadó külpontosságú erőhöz képest legnagyobb központos része  
 $\sigma_{fH}$  – nyomási határfeszültség (4. és 5. egyenlet szerint)

Központos nyomás, az elsőrendű elmélet szerint központosan nyomott szerkezet esetében a külpontosság növekmény hatását is tartalmazó határerő közelítő értéke (N):

$$N_H = \varphi \times A \times \sigma_{fH} \quad (7)$$

Ahol,  $\varphi$ ,  $l_o$  (helyettesítő kihajlási hossz) és  $h$  (magasság a vizsgálat síkjában) függvénye [34].

A 2000-es évektől az Eurocode bevezetésével a terhek osztott vagy parciális biztonsági tényezői elsősorban a számértékük növekedése miatt jelentettek változást. Továbbá a határfeszültség meghatározásához MSZ szerint 7 paraméter volt szükséges anyagminőség szerint a falazóelem fajtája, magassága, nyomószilárdsága és a habarcsszilárdság; a készítési mód szerint pedig a falazóelem minőségi osztálya, darabolási állapota (egész, fél, sérült, törött), a habarcsréteg jellemzői (vastagság, fugatelitetség). Az MSZ EN 1996-1-1:2009 szerinti falazat tervezési szilárdságát 12 adat határozza meg: 5 anyagminőség-jellegű és 7 kivitelezési jellegű paraméter. Ezek a falazóelem szabványos nyomószilárdsága és a falazóhabarcs nyomószilárdsága alapján a falazat nyomószilárdságának karakterisztikus értékét ( $f_k$ ) adják meg. A  $\gamma_M$  parciális tényező kiválasztásához szükséges a falazóelem-csoportba sorolás (gyártói adat), a falazóelem minőségi osztálya (I. vagy II. osztályú), a habarcs milyensége (tervezett összetételű habarcs, recepthabarcs, tetszőleges habarcs), valamint kivitelezési szempontok szerint további 6 paraméter [35].

Összességében tehát elmondható, hogy a falazat nyomószilárdságát az Eurocode szerinti méretezésnél vagy ellenőrzésnél több, főleg kivitelezési körülmény határozza meg. Ennek okán különösen fontos a meglévő szerkezetek építési módjának, kivitelezési minőségének ismerete, mely információkat leghatékonyabban falazatdiagnosztikai módszerek alkalmazásával nyerhetünk.

## 2.7 Tervezési szabványok: Az MSZ EN 1996-1-2:2013 Eurocode 6: Falazott szerkezetek tervezése

A legmegbízhatóbb anyagjellemző falazatok esetén a fekvőhézagra merőleges nyomószilárdság. A szilárdság a leginkább befolyásoló tényező az egyes falazat alkotók és a teljes falazat esetében. A legfontosabb jellemzők a különböző elemek esetén, az alábbiak.

<sup>6</sup> A külpontos nyomás vizsgálata során elegendő a legnagyobb hajlító nyomaték és a hozzá tartozó legnagyobb, illetve legkisebb normálerő, valamint a legnagyobb normálerő és a hozzá tartozó legnagyobb hajlító nyomaték számításba vétele.

Falazóelem:

- szilárdsági jellemzők
- alaki jellemzők

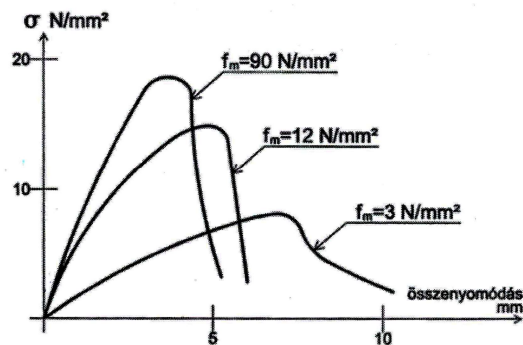
Falazóhabarcs:

- szilárdsági jellemzők
- alakváltozási jellemzők
- habarcsréteg vastagság (falazóelemhez viszonyítva)

Falazat:

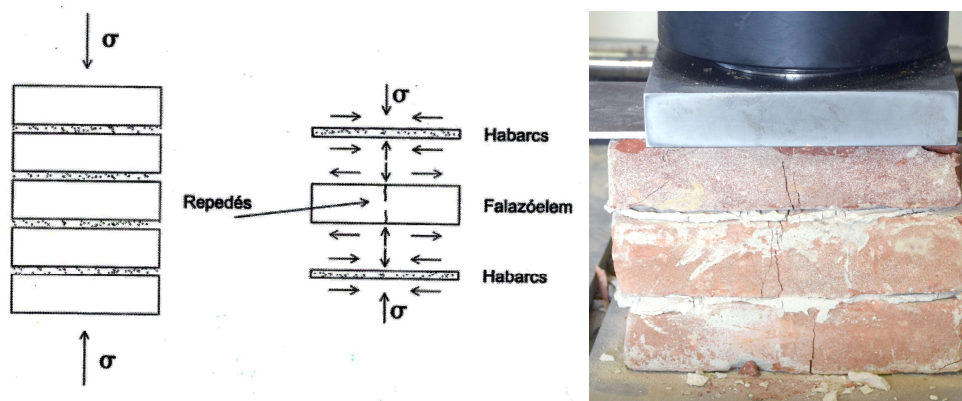
- típusa (tégla, mészkő, etc.)
- terhelő erő jellemzői (pl.: központos vagy külpontos)

A falazatok szilárdságát megadó összefüggések empirikus, kísérleti eredmények alapján felállított képletek. A tényleges teherbírás és az alakváltozási jellemzők a falazóelemtől és a falazóhabarcsától is függ. A feszültség-összenyomódás diagramm jelleggörbéjét a 6. ábra mutatja, mely a habarcsszilárdság függvényében eltérő [36].



6. ábra: Jellemző feszültség-alakváltozás diagrammok a szilárdság függvényében [36]

A falazat szilárdság a falazatalkotók szilárdságán kívül a geometriai jellemzők és a kivitelezési minőség függvénye is. A falazat tönkremenetele a falazóelemekben a nyomással párhuzamos irányban kialakuló repedések miatt megy végbe, a tönkrementel során kialakuló repedésképet a 7. ábra mutatja. A habarcs a falazóelemekhez képest nagyobb alakváltozásra képes, így a falazóelem és a habarcs között fellépő erő okozza a repedéseket [36].



7. ábra: Falazatra működő igénybevételek jellegábrája (bal oldalon [36]) és kísérleti elemen kialakult nyomásiránnyal párhuzamos repedések (jobb oldalon, saját felvétel)

Az Eurocode 6 szerint a falazat nyomószilárdságának karakterisztikus értékét ( $f_k$ ) kísérletek alapján vagy a szabványban megadott empirikus összefüggéssel határozhatjuk meg, mely összefüggést a 8. egyenlet írja le.

$$f_k = K \times f_b^\alpha \times f_m^\beta \quad (8)^7$$

Ahol,  $f_b$  – falazóelem szabványos nyomószilárdsága

$f_m$  – falazóhabarcs nyomószilárdsága

$\alpha, \beta$  – empirikus állandók

$K$  – állandó (függ a falazóelem anyagától, csoportba sorolásától és az alkalmazott habarcsától) [37]

Számos kutató tett – nagy mintaszámú kísérletsorozatok alapján – az  $\alpha, \beta$  és  $K$  állandókra különböző javaslatokat. A fontosabb egyenleteket az 10. táblázat foglalja össze. Az egyenletekben a falazóelem nagyobb szilárdsága miatt a falazatszilárdságra gyakorolt hatást is nagyobbak feltételezték. A legtöbb alkalmazott modell a nagyobb szilárdságú – cement tartalmú – habarcsok esetében helytálló, jellemzően e habarcs típusokra dolgozták ki.

<i>Empirikus összefüggés</i>	<i>Egyenlet sorszáma</i>	<i>Vonatkozó szakirodalom</i>
$f_k = 0,5 \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3}$	(9)	[37]
$f_k = 0,3 \times f_b^{0,7}$	(10)	[38]
$f_k = 0,275 \times f_b^{0,5} \times f_m^{0,5}$	(11)	[39]
$f_k = (400 + 0,25 \times f_b) / 145$	(12)	[40]
$f_k = 0,63 \times f_b^{0,49} \times f_m^{0,32}$	(13)	[41]
$f_k = 0,317 \times f_b^{0,866} \times f_m^{0,134}$	(14)	[42]
$f_k = 0,317 \times f_b^{0,531} \times f_m^{0,208}$	(15)	[43]

10. táblázat: A falazat nyomószilárdság számítására alkalmazott néhány (fontosabb) empirikus összefüggés [44]

Az egyenletek vizsgálata során fontos megállapítás volt, hogy nagy falazóelem szilárdság esetén a habarcsszilárdság értékét elhanyagolhatónak tekintették, jellemzően 25 N/mm<sup>2</sup> szilárdsági határ felett nem vették számításba, mint ahogy a 10. egyenlet leírja. Alapvetően elfogadott, hogy mészhabarcsok és mész tartalmú habarcsok esetén az Eurocode 6 által megadott (9. egyenlet) összefüggés adja a falazatok 28 napos korára elérhető nyomószilárdság érték legpontosabb számított értékét [37].

A kutatásom során alapvetően az Eurocode 6 szerinti empirikus összefüggés alapján értékeltem a falazatszilárdságot, szem előtt tartva, hogy a falazatszilárdság karakterisztikus értékének meghatározására kísérletek útján is van lehetőség.

A karakterisztikus értékből számított tervezési érték a parciális biztonsági tényező függvénye. A helyszíni diagnosztikai módszerek segítségével a falazóelem és a habarcsszilárdság értéke pontosítható, így a biztonsági tényező értéke csökkenthető. A méretezéshez használandó (parciális) biztonsági tényező megválasztása a kivitelezési körülményektől, fal készítés során alkalmazott anyagoktól és a minőségellenőrzési módtól függ, anyag függvényében alkalmazandó értékeket a 11. táblázat tartalmazza.

<sup>7</sup> Megjegyzés: Az Eurocode 6 a habarcsréteg vastagságot nem veszi figyelembe.

<i><math>\gamma_M</math> parciális biztonsági tényező</i>					
<i>Falazat, ami készül:</i>	<i>Falazat osztálya</i>				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>I falazóelem osztály, tervezett összetételű habarcs<sup>8</sup></i>	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5
<i>I falazóelem osztály, recept habarcs<sup>9</sup></i>	1,7	2,0	2,5	2,5	2,7
<i>II falazóelem osztály, tetszőleges habarcs</i>	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0

*11. táblázat: Méretezéshez alkalmazandó biztonsági tényező értékei [37]*

A következő fejezetben több műemléki védelem alatt álló, kiemelt építmény építészeti értékeit, vizsgált szerkezeteit és az elvégzett falazat diagnosztika módszereket mutattam be.

<sup>8</sup> *tervezett összetételű habarcs: Előírt tulajdonságoknak megfelelően tervezett, készített és bizonyos követelményeknek megfelelő habarcs.*

<sup>9</sup> *recepthabarcs: Előre meghatározott keverési arányok szerint készített habarcs, amelynek tulajdonságait az adalékanyagok keverési arányának alapján bizonyítottnak tekintik.*



### 3. Fejezet: A kutatás módszereinek és a vizsgált építmények bemutatása

#### 3.1 Vizsgált építmények bemutatása

A szakirodalmi áttekintés és a különböző kialakítású falazatok helyszíni vizsgálata során felmerült problémák megoldásához első lépéseként az eltérő falazattípusokat tanulmányoztam. Meghatároztam a teherbírást leginkább befolyásoló geometriai és mechanikai paramétereket vasúti boltozatok és épületek függőleges falazatai esetén. Numerikus vizsgálatokkal meghatároztam a falazataalkotó elemeinek szerepét a teherbírásban, valamint a történeti téglák és habarcsok legjellemzőbb tulajdonságait. Vizsgáltam a habarcs és a falazóelem szilárdságának és ezek variabilitásának szerepét a szerkezet teherbírásában. Az általam készített, különböző habarcs összetételű mintasorok és a bemutatott épületekből és vasúti hidakból származó minták helyszíni és laboratóriumi vizsgálati eredményeit vetettem össze. A kontroll mintasor ismert nyomószilárdsági értékei alapján igazoltam a meglévő szerkezetek mintái vonatkozásában a módszerek alkalmazhatóságát.

Fontos kiemelni, hogy a bemutatásra kerülő általam vizsgált építmények jelentős építészeti értékekkel bírnak és különböző fokú védelem alatt állnak. Az alábbi összefoglaló a tartószerkezeti leírás és az elvégzett diagnosztikai vizsgálatok ismertetése mellett elsődlegesen ezen értékek bemutatását szolgálja.

##### 3.1.1 Tapolcai Járásbíróság épülete

###### 3.1.1.1 Építészeti értékek bemutatása

A Tapolca, Köztársaság tér 4. alatti épületet Orbán Ferenc tervezte, funkcionálisan és építészeti szempontból is figyelemre méltó megjelenése eklektikus jegyeket hordoz. Az épület 1929-ben épült, az Ady Endre utcai szárnya helyi védelem alatt áll. Az épület szimmetrikus homlokzatú, kétszintes főbejárati tömbjéhez a nyugati oldalon csatlakozik egy ugyancsak kétszintes épületszárny, melyet a 8. ábra mutat. A főbejárat felülvilágító, kőkeretes, kétoldalt két szintet átfogó, széles, hornyolt lizénákkal közrefogott. A főbejárati rizalitot, fent lépcsőzött attika zárja. A főbejáratnál lévő ún. sarok tömeg felett sátortető, a hosszú épületszárnyak felett pedig nyeregterő került kialakításra. Az épület magas tetős kialakítású, teljes egészében hagyományos épületszerkezetekből épült [45].



8. ábra: Tapolcai járásbíróság épülete [45]

### 3.1.1.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok

A meglévő épület felmérése és diagnosztikai vizsgálata 2019 szeptemberében kezdődött meg. A vizsgálatok elvégzése során nehezítő körülmény volt az épület védettsége mellett a tény, hogy a Tapolcai Járásbíróság és Tapolcai Járási Ügyészség zavartalan működését továbbra is biztosítani kellett az épületben. A roncsolással járó módszerek elvégzésére ezen okokból korlátozottan volt lehetőség, de így is 10 db kis átmérőjű fúrt minta vétele valósult meg. Továbbá kis roncsolással járó módszerek közül a poroszsüveg földem és a földszinti, emeleti és pincefalak esetében endoszkópos vizsgálatokat végeztünk. A padlástérben könnyen kimozdítható – 10 db téglából – hasáb alakú téglamintákat készítettünk. A belső teherhordó falazatok feltárásának mértékét a 9. ábra mutatja. 15 feltárási helyen felületi nedvesség mérést is végeztünk.



9. ábra: F1-08 jelű (emeleti) és F0-09 jelű (földszinti) falfeltárás (saját felvétel)

A helyszínen megállapításra került, hogy az égetett téglafalazóelemek alacsony szilárdságúak, jellemzően rossz minőségűek. Az elvégzett diagnosztikai vizsgálatok eredményeinek tudományos értéke a falazóelem vonatkozásában jelentős, mivel ritka az ilyen alacsony téglaszilárdságú falazat meglévő épületben.

A falazóelemek helyszíni nyomószilárdságának meghatározásához Schmidt kalapácsos vizsgálatokat<sup>10</sup> végeztünk a feltárt téglafelületeken, az épület összes szintjén. A vizsgálatot N-típusú készülékkel végeztük el, 25 mérési helyen, az egyenlőtlen felületeket csiszolással készítettük elő. A földszinten és az emeleten mért (felületi) téglaszilárdságok átlagos értéke  $5,9 \text{ N/mm}^2$ . Relatív szórásuk (variációs együtthatójuk) viszonylag alacsonynak tekinthető. A pincében mért téglafelületi szilárdságok alacsonyabbak, mint a felsőbb szinteken mértek, feltehetően a nedves és emiatt felpuhult felületek miatt. Átlagos értékük  $5,0 \text{ N/mm}^2$ . A hasáb alakú téglamintákat laboratóriumban nyomószilárdság vizsgálatnak vettük alá, a szabványos méretű falazóelemre számít ott szilárdság  $6,11 \text{ N/mm}^2$ . A nyomószilárdsági értékek relatív szórása 38%-os, ami viszonylag magas értéknek tekinthető.

A habarcsok szilárdsági vizsgálatát penetrációs módszerrel végeztük el.<sup>11</sup> Az összes vizsgált falszakaszra kapott eredmények alapján a falazóhabarcs átlagos becsült, figyelembe vehető

<sup>10</sup> A Schmidt kalapács a téglafelületre rugóerővel rálőtt kalapácsstengely rugalmas visszapattanása ( $R_i$ ) segítségével méri a nyomószilárdságot ( $f_b$ ).

<sup>11</sup> A penetrációs eszköz túszerű végét 1cm mélységre benyomjuk a fekvő habarcshezagba és közben regisztráltuk a behatoláshoz szükséges erőt. A behatolási erő arányos a habarcs nyomószilárdságával ( $f_m$ ).

nyomószilárdsága,  $0,75 \text{ N/mm}^2$ , ami egy közepes minőségű mészhabarcsnak felel meg. Az eredmények relatív szórása 29 %, ami normálisnak tekinthető.

Kutatásomban az épület vizsgálati eredményeit egyrészt a helyszíni és laboratóriumi szilárdságvizsgálati eredmények összevetéséhez, kalibrálásához használtam fel, az alacsony téglaszilárdsági értékei miatt. Másrészt a penetrációs módszer alkalmazhatósága miatt volt különösen lényeges.

### 3.1.2 Székesfehérvár, Fekete Sas szálló

#### 3.1.2.1 Építészeti értékek bemutatása

A Fekete Sas szálló középület Székesfehérvár, Ady Endre utca 7. alatt található. Az épület 1994-től üresen áll. Az egyemeletes épület 1820-ban klasszicista stílusban épült. Az építés története különleges. A Fekete Sas épületét a belváros északi városfalaira alapozták. A 13. század második felében építették az első városfalat, a 13-14. század fordulóján pedig a városfalak visszabontásával felépültek a belváros északi falának tornyai is. Két falszakasz is a Fekete Sas területére eshetett. 1689-1701 között, ezen a telken létesült az első, Fekete Sasról elnevezett fogadó. A régi fogadó lebontását követően, három év leforgása alatt, 1807-1810 között már az új kor igényeinek megfelelően épült fel az új szálló [46].

Az épület keleti fala zárt sorú beépítésben, utcai frontja, nyugati- és északi oldala szabadon áll. Utcai traktusa részben alapincézett. Az egyemeletes szállodaépület részint kontyolt nyeregtetős részint nyeregtetős, padlástérrel épült. A mai épület alaprajzi elrendezése szabálytalan négyzetes alaprajzú, részben beépített kisméretű belső udvarral.

Az utcatorba illeszkedő, három oldalán, szabadon álló, eredetileg körülépített udvaros, egyemeletes épület számtalan építészeti értékkel bír. Főhomlokzata 4+3+5 tengelyes, középrizalitos kialakítású, tagozott övpárkány és emeleti, végig futó könyöklőpárkány osztja, csonka fő párkány zárja. A rizalit földszintjét dór pilaszterek osztják, a kapu mellett párosan, egymás mögé állítva. Az egyenes záródású, eredeti kapu, valamint az egyenes záródású ablakok mélyített falsíkban ülnek, keretezetlenek. Emeleti ablakai tagozott szalagkeretesek, állókonzolos szemöldökkel zártak. A rizalit feletti lapos timpanonban fekete sast ábrázoló dombormű van. Az Ady Endre utcai homlokzatot a 10. ábra mutatja. Az oldalsó részek földszinti ablakai keretezetlenek, egyenes záródásúak, némelyik ajtóvá alakítva [47].



10. ábra: Fekete Sas Szálló domináns homlokzata (saját felvétel)



### 3.1.2.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok

A szálló műemléki védelem alatt áll, így nagy átmérőjű fűrt mintavételre nem volt lehetőség. Ugyanakkor az épület – minimális bútorzattól eltekintve – üres és a korábbi falkutatás során számos falszakasz feltárára került, így kis roncsolással járó és a roncsolásmentes módszerek könnyebben elvégezhetőek voltak.

Falkutatás nélkül is meghatározható volt hat külön építési periódus. A legelső periódus épületrészeiben, különösen a pincefalazatban a visszabontott városfalak városfal terméskő anyaga is fellelhető. Több esetben az épület belső tereit az újabb funkcióknak megfelelően, átalakították, azonban e változtatások a teherhordó szerkezeteket nem érintették [47].

Az épület legrégebbi (első építési periódusban épült) szerkezeti, téglaterméskő felhasználásával épült vegyes falazatok, egyes helyeken kváderkövekkel kirakva. A pince és a földszint felett téglaboltozatú födémek, míg az emeleten vasbeton födémek és vas anyagú áthidalók találhatóak, beépítésük ideje 1956-ra tehető, amikor egy nagyobb léptékű felújítást végeztek az épületen [47].

Az épületen tehát első sorban roncsolásmentes vizsgálatokat hajtottunk végre, de 3-3 kis átmérőjű fűrt minta vétele is megvalósult. A helyszíni falazóelem vizsgálatot P típusú Schmidt kalapáccsal végeztük, kiegészítve felületi és mélységi nedvességméréssel. A fűrt mintavételi helyeken kívül még összesen szintenként 10 db belső és 5 db külső helyen történt helyszíni nedvesség és szilárdságvizsgálat. A 11. ábra egy belső és egy külső feltárási helyet mutat.



11. ábra: A lépcsőházban kijelölt, fűrt mintavétellel is érintett belső (E10 jelű, bal oldalon, saját felvétel) és külső falfeltárási hely (K3 jelű, jobb oldalon, saját felvétel)

A feltárási helyeken vett habarcsmintákat a laboratóriumban mikroszkópos vizsgálatokat is alá vettem. Elsősorban a különböző károsító folyamatok (biológiai károsítók, sók) előre haladottságát vizsgáltam a látott kép és a szilárdság kapcsolatán túlmenően.

### 3.1.3 Budapest, többszintes kereskedelmi épület

#### 3.1.2.1 Építészeti értékek bemutatása

Az L alakú, klinkertéglás homlokzatú saroképület 1901 és 1903 között épült, Révész Sámuel és Kollár József tervei alapján. 2017-ben a jellemzően gótikus elemekkel díszített historizáló stílust mutató, akkor üresen álló épület építészeti, belsőépítészeti, iparművészeti és történeti értékeinek megőrzése céljából műemléki védeltséget kapott.

A főbejárat szegecselt, háromszögmintás kapu mögött a nehéz faajtó található. Az épület négyemeletes a földszint és az első emelet klinkertéglás burkolatú. Homlokzatán az íves, oszloppal elválasztott ikerablakok vakolata fehér (12. ábra). A neogótikus ablakosztások, a körörszák és a díszítések aprólékos igényessége a belső udvarban is megjelenik. Az égetett téglát itt halványsárga színt kapott. A bejáraton felett a köríves ablak adja a belső udvar ékét [48].



12. ábra: Budapesti többszintes kereskedelmi épület gótikus homlokzata [48]

#### 3.1.3.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok

A falazatok jellemzően égetett téglafalazáselemmel és mészhabarcossal készültek. Egyes falazatok modern anyagúak. A falazott tartószerkezetet acél oszlopok és poroszsüvegfüdém egészíti ki.

Az épület felújításának megtervezéséhez a tervező legalább 300 helyen nagy átmérőjű fűrt minta szilárdságvizsgálata mellett az egyéb szerkezeti elemek feltárását is előírta. A 13. ábra két falfeltárási és mintavételi helyet valamint egy oszlopfeltárást mutat be. A mintavételt követően lehetőség nyílt roncsolásmentes kiegészítő vizsgálatok elvégzésére. Első sorban azon helyeken végeztünk kiegészítő vizsgálatot, ahonnan ép, törővizsgálatnak alávethető mintatest került ki. Közel 100 helyen két féle Schmidt kalapács vizsgálat, nedvességmérés és kisméretű habarcsminta vétel valósult meg. A többszintes épület szintenként mutat eltérő anyagjellemzőket, így a minták vizsgálata anyagösszetétel szempontjából is lényeges volt. A kiemelt mintákat mikroszkópos vizsgálatoknak és gipszbe ágyazva törővizsgálatnak is alávettem.

A rendelkezésre álló vizsgálati eredmények tudományos értéke az összehasonlíthatóság miatt jelentős. Ugyanazon feltárási helyen a fűrt minták laboratóriumban megvalósult törővizsgálatának nagyobb pontosságú szilárdsági eredményeit a helyszíni vizsgálatok közelítőleg becsült értékeivel tudtam összevetni.





13. ábra: Budapesti többszintes kereskedelmi épület feltárási és mintavételi helyek (saját felvételek)

### 3.1.4 Citadella

#### 3.1.4.1 Építészeti értékek bemutatása

A citadella olasz szó, fellelővárat jelent, azaz várszerű magaslati erődítményt, utolsó erődített menedéket a váron belül vagy egy város legmagasabb pontján emelt, fallal körülvett, védhető részt. Az erőd 1854-es létesítésekor, egy ókori eraviszkusz településre, az oppidum maradványaira építették rá.

A szabadságharc leverése után a korszerűtlen, hadászati elavult budai vár helyett egy jól védhető erődrendszert építettek Budán, amelynek az esetleges támadók visszaverése mellett, a legfontosabb célja az volt, hogy az építmény féken tartsa és megfélemlítse a város lakosságát. A tervezett erődrendszer első – és végül egyetlen – erődjét a Gellért-hegyen építették fel a Csillagda lebontása után a környező virág- és szőlőskertek helyén.

Az erődöt 1850-ben kezdték megépíteni Emmanuel Zitta altábornagy osztrák hadmérnök tervei alapján és Haynau tábornagy vezényletével, de hadászati már építésekor elavultnak számított, nem felelt meg a modern kor hadviselési követelményeinek. Az építkezési munkák – melynek vezetését Kassalik Ferenc építőmesterre és Zitterbarth Mátyás építészre bízta – 1854-ben fejeződött be.

A központi erőd félkörös udvar köré épült a hegytető nyugati oldalán – helyiségei kéttraktusosak, boltozatos termekkel, ezek az úgynevezett kazamaták – és kiemelkedik a nyugati és keleti védőfalak közül. Az erőd látképét a 14. ábra mutatja. A központi épület udvarán 80 méter mély ciszterna van, és nyugat felé az erőd védelmére védőárkot is ástak. Kelet felé az építmény falának tövébe szintén árkot húztak, ezen át felvonóhíd vezetett a keleti védőmű udvarába. 1947-ben avatták fel a Citadella előtt Kisfaludi Strobl Zsigmond alkotását, a Felszabadulási emlékművet, melyet „a felszabadító szovjet hősök emlékére a hálás magyar nép” állított. Az emlékmű központi alakja a szabadságot szimbolizáló, a kezében pálmafaágat tartó nőalak, mely hamarosan a város egyik legfontosabb jelképévé vált. A nőalak bal oldalán fáklyás, míg a jobb oldalon sárkányölő bronz mellékalak áll. Az UNESCO a Gellért-hegy tetején fekvő Citadella erődöt 1987-ben a Világörökség részévé nyilvánította [49].



14. ábra: Citadella látképe [50]

#### 3.1.4.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok

A 220 méter hosszú és 46-60 méter széles épület falai 12-16 méter magasak, négy méter vastagok [49]. Falazatai vegyesen kő és téglából épültek. Kiemelt kormányzati beruházás keretében kezdődött meg az Citadella erőd és közvetlen környezetének rehabilitációja. A falazóelemek a klimatikus hatások miatt erősen mállottak, a belső falak erősen nedvesek. Jelenleg pusztulófélben van, esztétikailag és szerkezetileg is felújításra szorul.

A mészhabarcs és a falazóelemek is igen alacsony szilárdságúak. Az erőd műemléki védettség miatt jelentős roncsolással járó vizsgálat nem volt végrehajtható. Korlátozott mértékben helyszíni roncsolásmentes és kis roncsolással járó módszerekkel végezhetünk vizsgálatot (Schmidt kalapács vizsgálat, nedvességmérés). A habarcs szilárdság helyszíni vizsgálatára különösen alkalmasnak bizonyult a penetrációs módszer.

### 3.1.5 Vasúti boltozott hidak

#### 3.1.5.1 Építészeti értékek bemutatása

A magyar vasúti építészetre a legnagyobb hatást a historizmus gyakorolta, tekintettel arra, hogy a vasúti hálózat kiépítésének megindulása idején az Osztrák–Magyar Monarchia területén már ez az irányzat vált uralkodóvá. Nagy biztonsággal állítható, hogy a legtöbb ország vasúthálózatának gerince a XX. század elejére kiépült. A vasúti létesítmények architektúrája ebből eredően a XIX. századi stílusirányzatok hatása alatt formálódott. A művészeti stílusirányzatok 1800-as évek elejétől tapasztalható dinamikus változása, a vasúti építmények funkcionális követelményei és a vasúttársaságok épülettípusozási törekvései adták a főbb vonásokat. Az építési stílusok a hídépítésekre is hatottak [51].

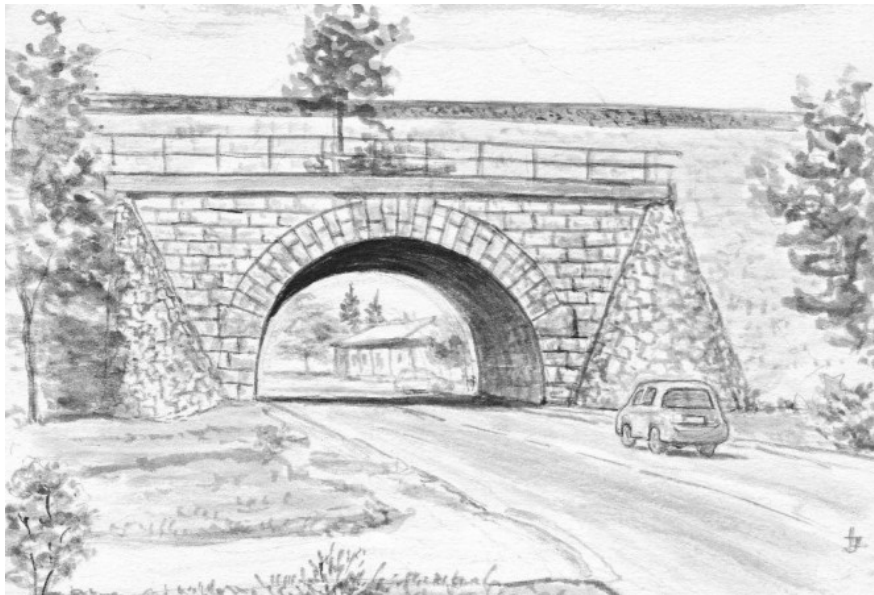
A vasúti hidak megjelenését tehát elsődlegesen a szerkezeti kialakításuk funkcionalitása határozza meg, mégis legtöbbjük építészeti értékkel is bír. A korai műtárgyak esetében a funkcionalitás mellett a rendelkezésre álló anyagok és az építéstechnológia is meghatározó volt. Tulajdonképpen az erőjáték anyagban rejlő lehetőségeinek kibontásáról volt szó, így ez az elemzési szempont nem vonatkoztatható el az erőjátéknak megfelelő forma kérdéséről. Az építőanyagok fejlődése lassú folyamat, az anyagszerű formák felismerése sokszor évszázadokig tartott. Jellemzően a hagyományos formákat igyekeztek utánozni az új anyagokkal [52].

„Általános ontológiai alaptörvény, hogy nem egyeztethető össze minden forma minden anyaggal, hanem csak meghatározott forma meghatározott anyaggal. Ez a törvény érvényes az egész természetben, minden emberi alkotásban, minden technikában.”

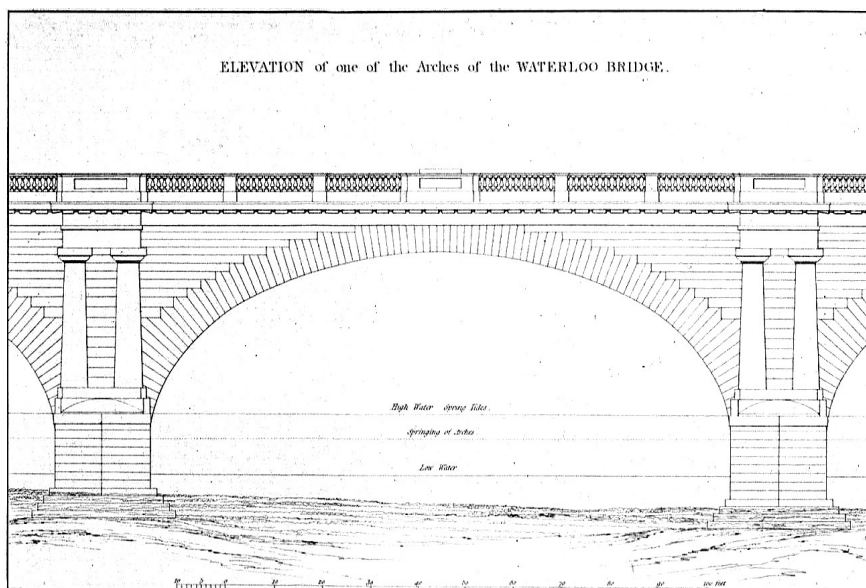
Nicolai Hartmann

### 3.1.5.2 Vizsgált szerkezetek és elvégzett vizsgálatok

A szerkezet alapvető eleme a megépítés módja, az építéstechnológia. Ennek formai hatásai nyilvánvalók, valóban közvetlen a technológia és forma összefüggése. Az egyes szerkezet típusok kialakulásában és elterjedésében nagy szerepe volt a különböző építéstechnológiáknak. A boltozatok fejlődése sem zajlott másképp, hiszen a falazás technológiája, a mintaállvány készítése, mind hatott a szerkezeti formákra [52]. A földrajzi elhelyezkedés és az építési hagyományok is befolyásolták a boltozatok geometriai paramétereit. Hazánkban jellemzőbb a zömök, robosztus szerkezetű (15. ábra), míg Nyugat-Európában, különösen Angliában a karcsúbb, szegmensíves vékony boltozatú hidak a terjedtek el (16. ábra).



15. ábra: Érdi vasúti boltozat a 6 sz. főút felett [53]



16. ábra: Régi Waterloo híd terve, London, 1829. [54]



Félköríves hídszerkezetek helyszíni diagnosztikai vizsgálatára volt lehetőségem, így az épületek mellett 3 boltozott vasúti híd eredményeit is felhasználtam az 5. fejezetben részletezett módszerek fejlesztésében. A műtárgyak vizsgálatát videoendoszkóppal is el tudtuk végezni. Három különböző mintavételi helyről (azonos szerkezetből) származó habarcs összehasonlítását is elvégeztem. A mérés a habarcs egy szerkezeten belüli variabilitását is jól bemutatta. A hidak tartószerkezetei az épületekhez képest eltérő hatásoknak is ki vannak téve (pl.: savas eső, közvetlen sóterhelés, etc.). Az anyagjellemzőkre gyakorolt hatást különböző nagytartású mikroszkopikus vizsgálatok elvégzésével is elemeztem.

Fontosnak éreztem a karcsúbb hídszerkezet vizsgálatát is, ezért modell szimulációk segítségével hasonlítottam össze a két híd típus teherbírását. Vizsgáltam a geometriai, geotechnikai és szilárdsági paraméterek teherbírásra gyakorolt hatását. A numerikus paraméter vizsgálatok leírását és eredményeit a 4. fejezetben foglaltam össze.

### 3.2 Történeti, tömör agyag téglák szilárdság vizsgálata

A falazatszilárdság a falazóelem szilárdság függvénye is, így nem elhanyagolható a vizsgálata. Annak ellenére, hogy számos publikáció foglalkozik falazóelem, azon belül is az égetett agyag téglák vizsgálatával a szilárdsági értékek vonatkozásában kevés a számadat. A rendelkezésre álló korabeli leírások sem tartalmazznak a téglák szilárdságára vonatkozó pontos értékeket, legfeljebb nagyságrendi adatokat. Első lépésben saját falazóelem vizsgálatok eredményeit hasonlítottam össze, melyeket a 12. táblázat tartalmaz.

Ssz.	Megnevezés	Visszapattanás átlag (psi)	Szilárdság (N/mm <sup>2</sup> )		Mérési helyek száma
			fürt minta	kiemelt téglá	
1.1	Fekete Sas Szálló psz.	77*	8,10	11,10	50
1.2	Fekete Sas Szálló fsz.	73*	8,80	9,10	50
1.3	Fekete Sas Szálló em.	70*	6,60	8,10	50
2	Tapolca bíróság	20**	7,79	5,60	35
3	1220 sz. épület	n.a	6,68	n.a	27
4.1	Budapest lakóépület belső	72*	n.a	n.a	10
4.2	Budapest lakóépület külső	66*	n.a	n.a	10
5.1	Budapest, ker.épület -2	32**	12,83	16,54	300
5.2	Budapest, ker.épület -1	32**	13,19	13,27	
5.3	Budapest, ker.épület fsz.	31**	13,11	19,56	
5.4	Budapest, ker.épület em.	31**	12,10	14,50	
5.5	Budapest, ker.épület 2 em.	31**	13,07	17,97	
5.6	Budapest, ker.épület 3 em.	32**	14,24	15,08	
5.7	Budapest, ker.épület 4 em.	29**	12,65	16,11	
5.8	Budapest, ker.épület 5 em.	29**	12,37	19,14	
5.9	Budapest, ker.épület 6 em.	27**	10,25	n.a.	
6	Magtár épület (Nádasdladány)	66*	n.a.	n.a.	55
7	Boltozott vasúti híd 1962	36**	n.a.	n.a.	35
8	Boltozott vasúti híd 1958	38**	n.a.	n.a.	20
9	Boltozott vasúti híd 2157	36**	n.a.	n.a.	60

12. táblázat: Vizsgált építmények téglaszilárdsági eredményeinek összefoglaló táblázata<sup>12</sup>

<sup>12</sup> \* P típusú Schmidt kalapács vizsgálati eredménye \*\*N típusú Schmidt kalapács vizsgálati eredménye

A táblázat nem kizárólag a 3.1 pontban bemutatott építmények vizsgálati eredményeit tartalmazza, hanem olyan épületekét is, melyeken nagy számban végeztünk a téglaszilárdság meghatározásához szükséges mérést. Az épületek eltérő funkciót töltöttek be, különböző fokú védettséggel bírnak, de jellemzően az 1800 években épültek.

Az összesített szilárdságvizsgálati eredményekből jól látható, hogy az 1800-as évben készült égetett tömör téglafalazóelemek szilárdság értékei jellemzően 8-12 N/mm<sup>2</sup> között mozognak, de a nagy szórásértékek miatt nagy a bizonytalanságuk.

A szilárdsági érték és a szórás meghatározásához 2 féle módszert alkalmazhatunk. Legalább 6 db kiegyenlített felületű próbatestet vizsgálógéppel az elérhető legnagyobb terhelésig terheljük, majd a kapott értéket átszámítjuk szabványos nyomószilárdság értékre. A szilárdságvizsgálatra előkészített szerkezetből kiemelt téglákat a 17. ábra mutatja [22].



17. ábra: Kiegyenlített felületű szilárdság vizsgálatra előkészített téglaminták (saját felvétel)

A másik módszer a Schmidt kalapácsos vizsgálat, ami egy roncsolásmentes vizsgálati módszer, elsősorban betonszerkezetek felületi szilárdságának meghatározására alkalmas. Szerkezeti kialakítás és a működési mechanizmus két féle eszközt különböztetünk meg. N-típusút és P-típusút. A legtöbb szabvány (MSZ EN 13791:2007 *Betonszerkezetek és előre gyártott betonelemek helyszíni nyomószilárdságának becslése*, ÚT 2-2.204:199) jellemzően az N típusú rugós acélkalapács használatához ad útmutatást, az eszköz a 10-70 N/mm<sup>2</sup> nyomószilárdságú betonok vizsgálatára ideális, ütési energiája 2,207 Nm. A vizsgált elem nyomószilárdságát a visszapattanási értékekből számolhatjuk az alábbi összefüggés szerint [55]:

$$f_b = R_i^2 / 90 \quad (17)$$

A P-típusú („pendulum hammer”) kalapács a helyzeti energia elvén működik, elsősorban az alacsony szilárdságú 1-5 N/mm<sup>2</sup> szilárdsági zónában alkalmazható (pl.: könnyű- vagy frissbetonok, gipsz elemek vizsgálatához), ütési energiája 0,833 Nm [55]. A különböző típusú kalapácsokat vizsgálat közben a 18. ábra mutatja.

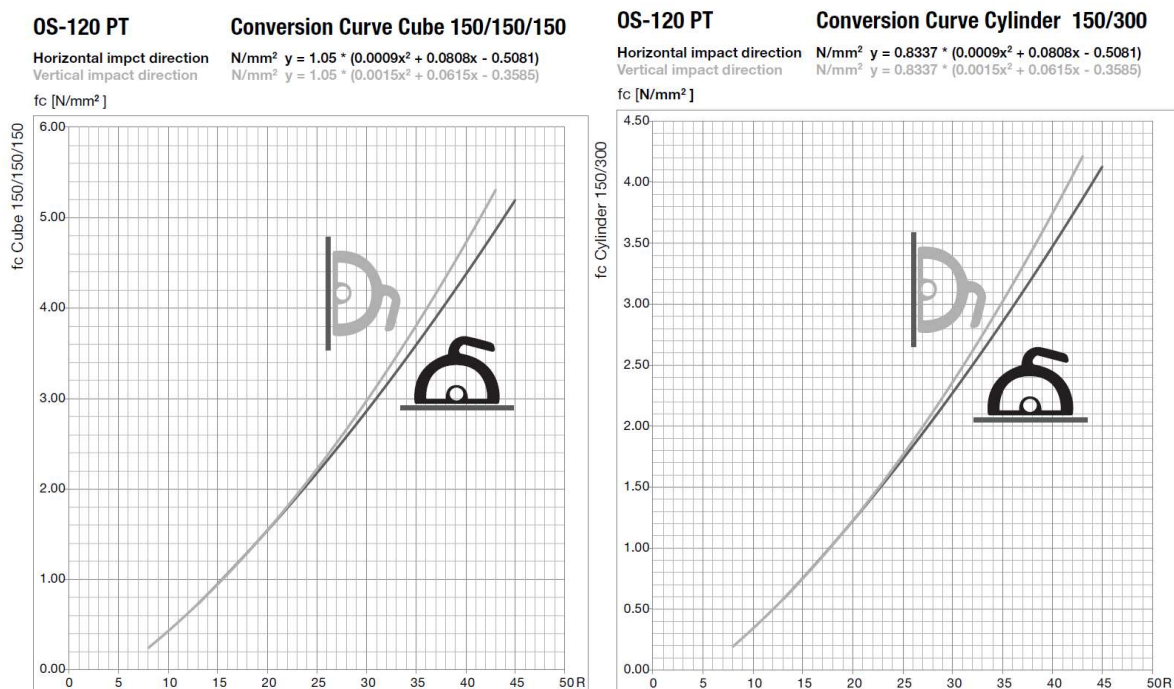


18. ábra: P-típusú OS-120 (bal oldalon, saját felvétel) és az N-típusú Schmidt kalapács (jobb oldalon, saját felvétel)

A falazat szilárdsági jellemzőitől függően alkalmazható a megfelelő típusú eszköz a falazóelemek nyomószilárdságának helyszíni becsléséhez. A puhább közetek (mészkö, homokkö), illetve a kisszilárdságú téglafalazóelemek vizsgálatára a P-típusú kalapács alkalmasabb. A vizsgálatok során a felületi visszapattanás értékeit (psi) mérik, az eszköz 0-200 skálán mér, falazatok esetében 10-90 közötti leolvasási értékek a jellemzők [55] [56].

A vizsgálat igen érzékeny a lokális tulajdonságok változására. A mérést egy meghatározott kisebb falrészben – akár egy kiválasztott falazóelemen – többször meg kell ismételni. A mérések átlagából lehet a felületi szilárdságot megfelelő összefüggések alapján számítani. A visszapattanási értékek száma a középérték meghatározásához minimum három. Egyes betonra vonatkozó szabványok, ezzel szemben minimum 9 (EN 12504-2), vagy 10 (ASTM C 805) visszapattanás értéket írnak elő. A mérések ideális darabszáma egy elemen 3-10 között határozható meg, a vizsgálati pontok közötti minimális távolságot 30 mm-re kell felvenni [57].

A visszapattanás értékből a felületi szilárdság kiszámítása meghatározott képlet, vagy grafikon segítségével végezhető el (19. ábra). A gyártó külön adja meg a 150/150 kocka és a 150/300 hasáb próbatestre vonatkozó értékeket [57].



19. ábra: Konvertáló görbék a Schmidt OS-120PT típusú eszközhöz [57]

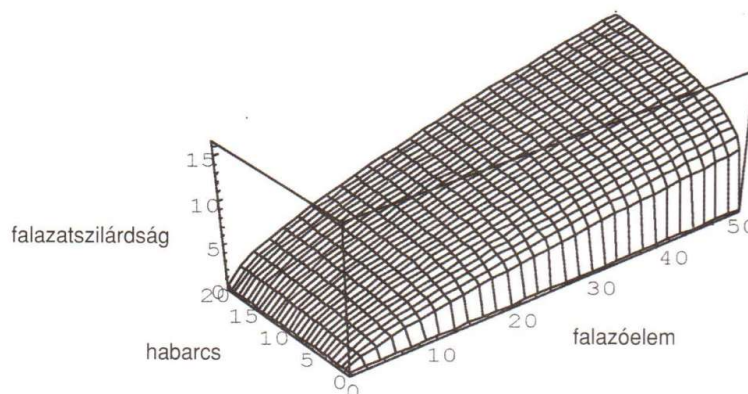
A falazóelemek nyomószilárdságát a fő teherhordási irányban és a beépítési helyzetnek megfelelően határozzuk meg. Az elem szilárdságát a törőerőnek, a falazóelem által meghatározott teljes elemfelületre vonatkoztatva számítjuk. A falazóelem szilárdsága nem az anyagra, hanem magára az elemre vonatkozik. A szabványos nyomószilárdság meghatározásához az alaktényező  $0,65 \leq \delta \leq 1,55$  között változik [58].

A  $b \times h \times t$  (mm) méretű falazóelem átlagos nyomószilárdsága ( $f_{b,m}$ ) és az alaki tényező szorzata adja a falazóelem szabványos nyomószilárdságát ( $f_b$ ), amely  $100 \times 100 \times 100$  mm méretű elemre vonatkozik [58].

A vizsgálat valóban alkalmas a falazóelemek szilárdságának közelítő becslésére, segít feltárni a kisebb szilárdságú falszakaszokat, illetve bizonyos esetekben belső üregek is detektálhatók az eszközzel (pl.: több rétegű falazatok, kéményttest). A vizsgálat segíti az esetleges fűrt mintavételek helyének meghatározását, továbbá alátámasztja a falazóelemek esetében a további vizsgálatok elvégzésének szükségességét. Tapasztalataim szerint az

agyagtégla falazóelemek vonatkozásában  $6 \text{ N/mm}^2$  szilárdsági határig a P-típusú az  $6-10 \text{ N/mm}^2$  szilárdság közötti, illetve a  $10 \text{ N/mm}^2$  feletti értékek meghatározásához inkább az N-típusú kalapács alkalmasabb.

A gyakorlati tapasztalatok és a számítási modellek alapján megállapítható, hogy a  $6 \text{ N/mm}^2$  falazóelem szilárdság alatt a falazóhabarcs szilárdság mértékadóvá válik. Ugyanakkor  $6-10 \text{ N/mm}^2$  szilárdsági sávban is jelentősen megnő a hatása a teherbírásra. A 20. ábra a falazatszilárdság változását mutatja a falazóelem és habarcs szilárdság függvényében.



20. ábra: A falazatszilárdság a falazóelem és habarcs szilárdság függvényében [58]

A helyszíni Schmidt kalapács vizsgálattal a falazóelem szilárdság kellő mértékben megbecsülhető ahhoz, hogy a habarcs szilárdság fontosságát meg tudjuk határozni. A mérések számának függvényében a relatív szórás érték meghatározható, egyéb vizsgálatok együttes elvégzésével csökkenthető, a falazóelemek relatív szórása a különböző vizsgálati módszerekkel 20 - 40 % között alakul.

### 3.3 Habarcsok szilárdság vizsgálata

A történeti habarcsok összetételére, várható szilárdságára vonatkozólag ugyan állnak rendelkezésre szakirodalmi adatok, de a meglévő szerkezetek habarcsainak vizsgálata a legtöbb esetben háttérbe szorul. Elmondható, hogy nagyon kevés módszer és eljárás alkalmas a falazó alkotók vizsgálatára. Az irodalmi adatok a tervezett szilárdságra adnak útmutatás, jellemzően  $1-3 \text{ N/mm}^2$  mészhabarcsok esetén, cement tartalmú habarcsok  $5 \text{ N/mm}^2$  körüli értéket jelölnek meg. A közölt szilárdságértékek azonban nem veszik figyelembe a degradációs folyamatok hatását, vagy a nem kellő gondossággal végzett kivitelezést. A kevés rendelkezésre álló adatot felhasználtam az általam készített ellenőrző mintasor tervezéséhez, mind az összetétel, mint az elő irányzott szilárdság vonatkozásában.

## 4. Fejezet: Falazatok teherbírás vizsgálata

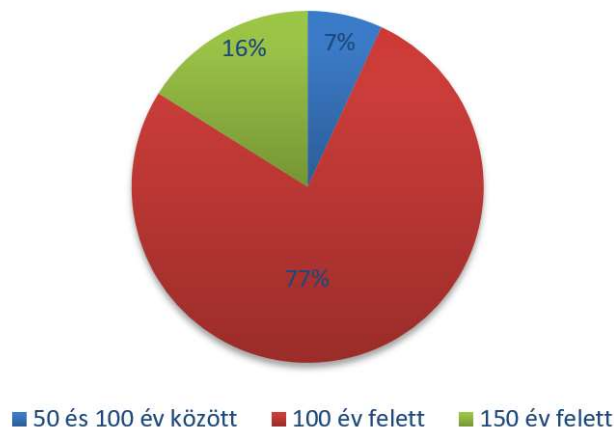
### 4.1 Boltozott hidak teherbírásának vizsgálata

#### 4.1.1 Boltozott típusú hidak jellemzői

Szakirodalmi adatok szerint 2004-ben Európában a vasúti hidak 40%-a volt boltozat, tehát nagyságrendileg 90.000 műtárgy. A boltozatok közül 52% égetett téglából, 33 % természetes kőfalazóelemből épült. A szerkezetek 64%-a 100 évnél korosabb. A jellemző nyílásméret < 10 m, ide tartozik a vizsgált hidak 75%-a [59].

Az európai adatok ismeretében a boltozott hidak jellemzőinek meghatározásához első lépésként megvizsgáltam a MÁV Zrt. hídállag nyilvántartás (Medina rendszer) adatait. A vasúti pályában lévő boltozatok száma jelenleg 656, ami a műtárgy állag > 6 %-át teszik ki. A boltozatok közül 349 hagyományos falazott szerkezetű (kő, téglából). A rendelkezésre álló adatok geometriai és anyagjellemzők alapján meghatároztam egy hazai típusú hidat. A hidak<sup>13</sup> darabszámának és jellemzőinek összevetésével, mint a boltozat vastagság, nyílás méret, ívmelkedés meghatároztam a legjellemzőbb paramétereket hazai viszonylatban. A hazai hidak jellemzőit összevettem későbbi, az európai boltozott vasúti hidakra vonatkozó, részletesebb statisztikai kimutatással is [60] [61] [62]. A kelet-közép-európai és a nyugat-európai országokban más klimatikus viszonyok uralkodnak, más volt az építéstechnológia és a felhasznált anyagok is a földrajzi elhelyezkedéshez igazodnak. A rendelkezésre álló adatok alapján meghatározható, hogy a boltozatos hidak jelentős része (mintegy 85%) egynyílású, nagyon kevés, mintegy 8,5%-ának nyílása haladja meg a 10 m-t. Magyarországon jellemző elsősorban a félköríves ív alak (92%-ban jellemző kialakítás) [63].

Vizsgáltam hazai viszonylatban a szerkezetek korosság szerinti eloszlást, melyet a 21. ábra mutat. A rendelkezésre álló statisztikai adatok rendszerezését követően megállapítottam, hogy a vizsgált műtárgyak 93%-a meghaladta a vonatkozó tervezési élettartamát *MSZ EN 1990:2011* szabvány alapján „Monumentális épületek tartószerkezetei, hidak, és más építőmérnöki szerkezetek előírt tervezési élettartam: 100 év”). A szerkezet megfelelőségének igazolása, ellenőrzésük a megnövekedett igénybevételekre már a korosság miatt is lényeges feladat. Továbbá a pályasebesség és a méretezési tengelyteher növekedése – napjainkban 25 tonna az 1900 évek elején még 10-12 tonna – is indokolja a teherbírás vizsgálatát. Európai viszonylatban is hasonló a hidak életkora, nagyságrendileg 80%-ban 100 évnél korosabbak.

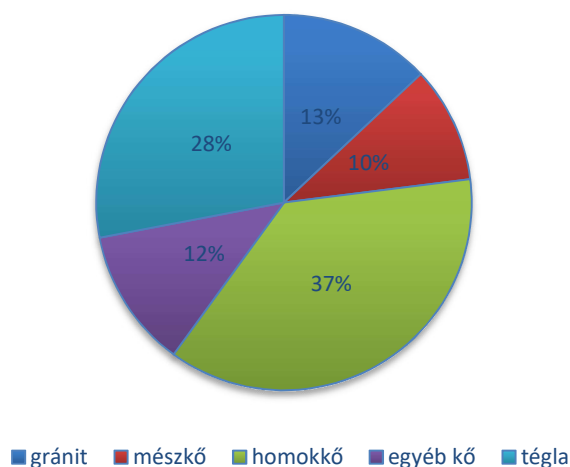


21. ábra: MÁV Zrt. kezelésében lévő falazott szerkezetű boltozatok korossága (saját gyűjtésű statisztikai adatok alapján)

<sup>13</sup> A MÁV Zrt állagnyilvántartás adatai szerint vasúti híd a 2,0 m-nél nagyobb nyílású műtárgy.



Anyaguk tekintetében 30%-ban égetett agyagtégla falazóelemmel épültek, nagyobb részben európai viszonylatban tehát a különböző építőkövek voltak elterjedtebbek (22. ábra). A boltozott hidak jellemzően a 19. században épültek, így a habarcs kötőanyaga jellemzően mész, a rendelkezésre álló európai hídadatokat szerint 65% [61].



22. ábra: Boltozatok anyag szerinti megoszlása európai viszonylatban [61]

#### 4.1.2 Merev-blokk módszer

Analitikus módszerek közül a merev-blokk módszert választottam a számítások elvégzéséhez. A RING szoftver e módszeren alapul, mely kifejezetten falazott boltozott szerkezetekhez lett kifejlesztve. A boltozat törőteher értékét a képlékenységtan határállapot vizsgálatával határozza meg [64][65]. Tökéletesen képlékeny anyagmodellrel feltételez a szerkezeti anyagra. A módszer lényege, hogy bármelyik kinematikailag elégséges teherintenzitás nagyobb, mint a törőintenzitás, tehát a legkisebb kinematikailag elégséges intenzitás egy felső korlátot ad a teherbírásra [66][67].

A közép-kelet-európai típushid modellje mellett megalkottam egy nyugat-európai híd numerikus modelljét is a LimitState RING 3.2 szoftver alkalmazásával, mely modelleken az a korábban részletezett vizsgált paraméterek érzékenységét vizsgáltam:

- geometriai jellemzők
- geotechnikai jellemzők
- falazatszilárdság

##### 4.1.2.1 Geometriai paraméterek

A hazai és külföldi boltozott vasúti hidak tanulmányozása és a szakirodalom áttekintésével meghatároztam a legjellemzőbb geometriai kialakításokat. Hazai viszonylatban több száz egynyílású boltozott vasúti híd lelhető fel. Az európai statisztikai adatokat a 13. táblázat tartalmazza a boltozatok nyílásának (L) és emelkedésének (r) arányára vonatkozóan. Az eltérő geometriai jellemzők (L/r arány) és az építési technológia - hazánkban a szerkezetek jellegüket tekintve zömökebb, robusztusabb a kialakításúak, szemben egy angolszász karcsúbb szerkezettel – miatt két numerikus modellt alkottam meg [67].

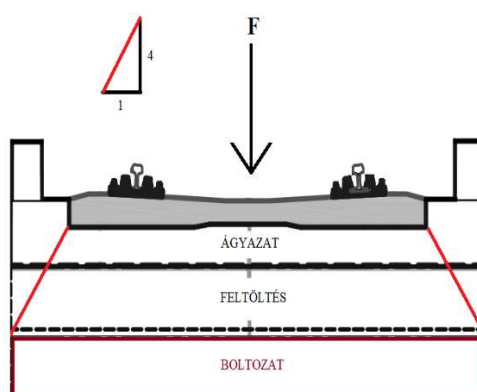
L/r	Cseh-ország	Francia-ország	Lengyel-ország	Portugália	Egyesült Királyság	Spanyol-ország	Magyar-ország
Átlag	2,55	3,30	3,70	2,65	3,18	3,35	2,12

13. táblázat. Európai statisztika: boltozat nyílásának (L) és emelkedésének (r) aránya [68]

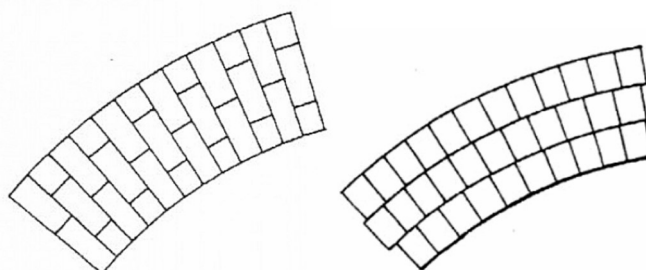
A boltozat vastagság/nyílásméret arány a kelet-európai régióban kisebb, Magyarországon 5,4, míg az átlag európai hidaké 10 feletti, így ezeknél a szerkezeteknél a jellemző boltozatvastagság 500 mm. [68] Mindkét modell esetében égetett agyag téglát, mint a legelterjedtebben használt tipizált falazóelemet alkalmaztam. Építési kövek is elterjedtek voltak ugyan, de a kőanyagok típus és lelőhely függvényében is nagyon eltérő szilárdsági jellemzőket mutatnak. A falazatszilárdság értékeit ennek függvényében történeti téglák jellemző értékei szerint határoztam meg. A 14. táblázat a két típusú híd jellemző adatait tartalmazza. A dolgozó szélességet egységesen 3,0 m-re vettem fel, a tehereloszlást és a figyelembe vehető szélességet a 23. ábra mutatja. A félköríves és a gyűrűs szegmensíves kialakítás közötti különbséget a 24. ábra mutatja.

Paraméterek	„A” jelű magyarországi típusú híd	„B” jelű angliai típusú híd
boltozat anyaga	égetett agyag téglafalazóelem	
jellemző geometria	félköríves	gyűrűs szegmensíves
vasúti pálya jellemzői	60 cm aljtávolság, LM jelű 280x150 mm vasbeton aljak	
terhek	UIC776-1 LM71 250 kN tengelyterhelés	
nyílásméret (l)	6,0 m	
dolgozó szélesség	3,0 m	
boltozat vastagsága (t)	450 mm	350 mm
ívemelkedés (h)	2000 mm	1000 mm

14. táblázat: Típusú híd modelleken felvett főbb paraméterek [69]

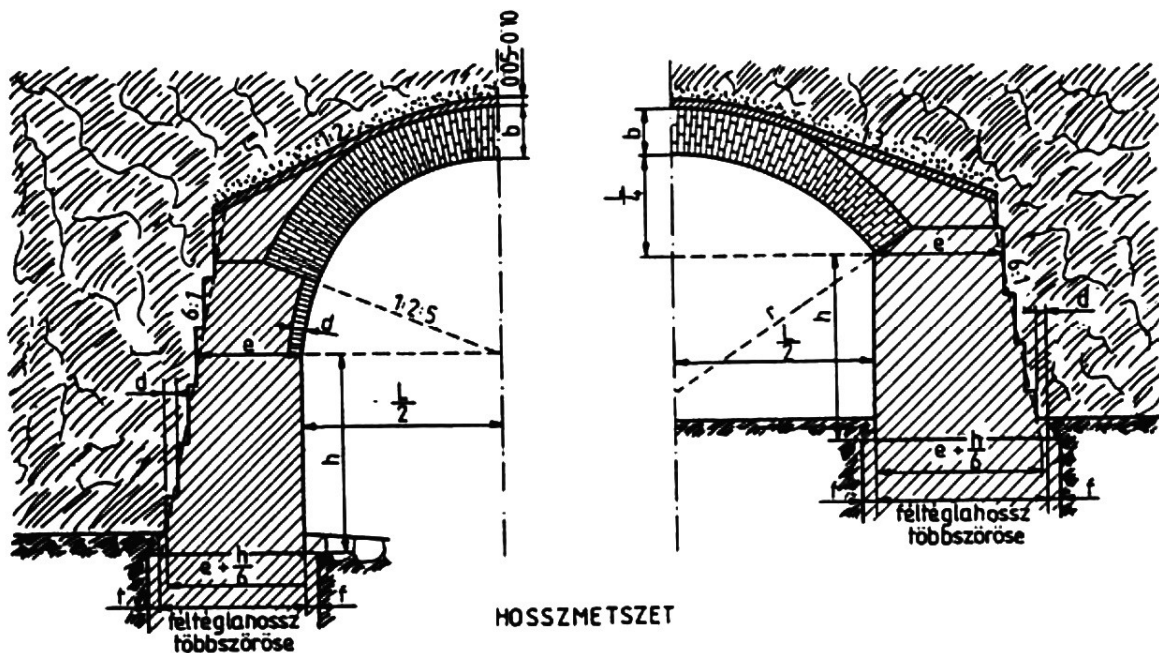
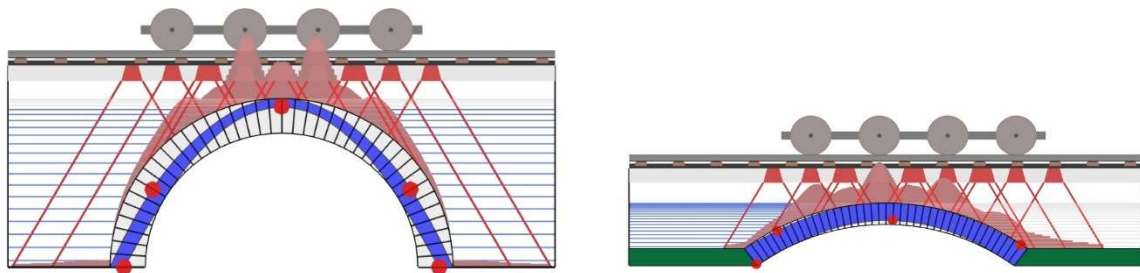


23. ábra: Dolgozó szélesség meghatározása (saját ábra)



24. ábra: Kötésben rakott és gyűrűs falazású téglaboltozat kialakítása [70]

A 25. ábra a két híd merev-blokk módszerhez felvett modelljét és egy-egy azonos kialakítású valós szerkezetet metszetét mutatja be, szemléltetve az eredeti szerkezet leképzését a modellen.



25. ábra: „A” jelű (felül bal oldalon) „B” jelű (felül jobb oldalon) típusú híd számítógépes modellje (RING 3.2 szoftver képernyőképei) és meglévő szerkezetek metszete (félköríves és körszegmens íves boltozat alakkal, alul) [71]

A két híd építési módja eltérő, a „B” jelű híd boltozata gyűrűs kialakítású, az „A” jelű félköríves, jellemzően kötésben épített. A két típusú híd geometriai sajátosságait ezek alapján az adott országok építési hagyományai és a lehető legjellemzőbb szerkezeti kialakítás alapján, de azonos nyílásmérettel vettem fel (európai átlaghoz közelítve, amely 6,60 m) [68]. A modellalkotás során a dolgozó szélesség minden esetben azonos, annak ellenére, hogy az érték a geo technikai és egyéb paraméterek függvénye, esetünkben a minimumérték. A vizsgálat csak a boltozatra szorítkozik, a hídfő mozgását elhanyagoltam, teljesen fix hídfőt feltételeztem.

#### 4.2.1.2 Geotechnikai paraméterek

A modellvizsgálatok során a háttöltés és a feltöltés anyaga, vastagsága szintén változó jellemző. Vizsgáltam feltöltés nélküli kialakítást és a jellemzőbb 1,0 m feltöltés vastagságú kialakítást. A talajra vonatkozó geotechnikai paraméterek ( $c$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$ ) a homokos iszap, agyag és kavicsos agyagos homok talajtípusok értékeinek megfelelően kerültek kiválasztásra [72], a részletes adatokat talajtípusonként meghatározva a 15. táblázat tartalmazza.



Talaj típusa	Homokos iszap	Agyag	Homok
Térfogatsúly ( $kN/m^3$ ) $\gamma$	18,0	20,0	18,0
Súrlódási szög ( $^\circ$ ) $\varphi$	23	19	30
Kohézió ( $kPa$ ) $c$	13	25	0

15. táblázat: A feltöltésre és háttöltésre vonatkozó geotechnikai paraméterek

#### 4.2.1.3 Falazatszilarás

A modell szimulációk során az  $f_k$  értékét 0,5-20  $N/mm^2$  között változtattam. A falazat nyomószilarásának karakterisztikus értékét ( $f_k$ ) a falazóhabarcs ( $f_m$ ) és a falazóelemek ( $f_b$ ) szilarásából számíthatjuk, a vonatkozó 9. egyenlet alapján.

A lefuttatott szimulációk eredményeit összevetve, arra a következtetésre jutottam, hogy mindkét híd típus esetében létezik egy kritikus alsó határ a boltozatot alkotó falazat szilarását tekintve. A kritikus érték alatti szilarással rendelkező boltozatok esetében a teherbírás már elsődlegesen a falazatszilarás függvénye, míg a többi paraméter jelentősége csökken. A szimulációk eredményeit a 16. és a 17. táblázat foglalja össze. A táblázatban a megfelelőségi tényezők, a számítás eredményeként kapott értékek szerepelnek. A mértékegység nélküli szorzótényező megmutatja, hogy az adott teher hányszorosát képes a szerkezet viselni, azaz hányszoros tehernél alakul ki a törési mechanizmus. A megfelelőségi tényezők alakulásából következik, hogy a falazatszilarás a vizsgált modellek esetében eltérő mértékben befolyásolja a szerkezetet teherbírását, azonban minden esetben egy fontos paraméter. Ebből egyértelműen következik, hogy a falazatszilarást és annak variabilitását ismerni szükséges a szerkezet igazolásához.

Falazat szilarás karakterisztikus értéke $f_k$ ( $N/mm^2$ )	"A" jelű típusú híd					
	Feltöltés anyaga: homok		Feltöltés anyaga: homokos iszap		Feltöltés anyaga: agyag	
	feltöltéssel	feltöltés nélkül	feltöltéssel	feltöltés nélkül	feltöltéssel	feltöltés nélkül
0.5	0,335	0,678	0,335	0,699	0,249	0,685
0.8	0,956	1,02	0,982	1,05	1,01	1,12
1.0	1,20	1,21	1,23	1,24	1,28	1,32
1.5	1,70	1,59	1,74	1,63	1,82	1,73
2	2,11	1,89	2,16	1,94	2,26	2,07
3	2,78	2,37	2,83	2,43	2,98	2,59
4	3,32	2,73	3,38	2,81	3,57	3,00
5	3,77	3,03	3,84	3,12	4,06	3,34
6	4,15	3,29	4,23	3,38	4,49	3,62
7	4,48	3,51	4,58	3,61	4,86	3,87
8	4,79	3,70	4,88	3,81	5,19	4,09
9	5,06	3,87	5,16	3,99	5,49	4,28
10	5,30	4,03	5,41	4,15	5,77	4,46

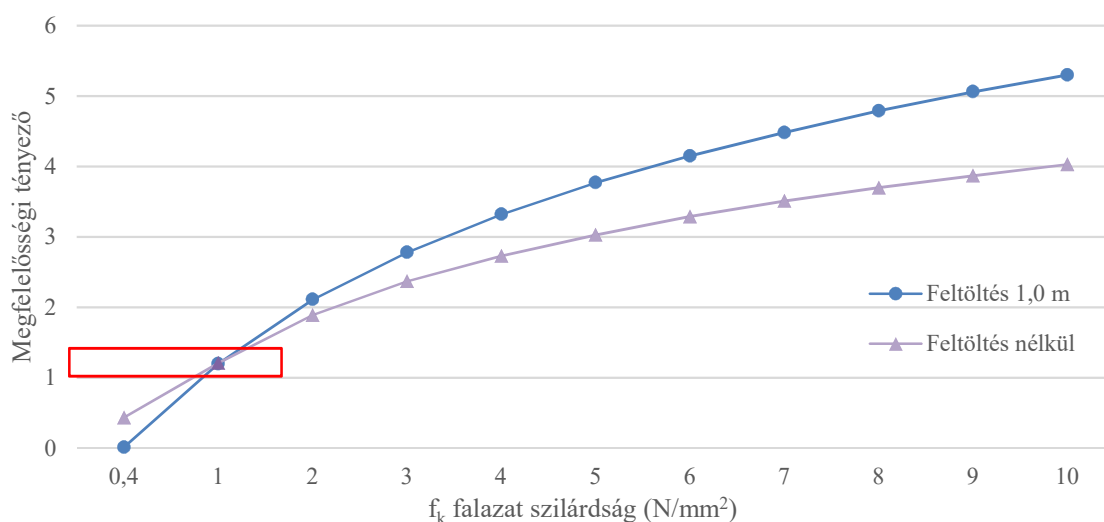
16. táblázat: „A” jelű típusú híd szimulációinak eredményei<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Megjegyzés: Eredményként a megfelelőségi tényező értékei kerültek feltüntetésre.

Falazat szilárdság karakterisztikus értéke $f_k$ (N/mm <sup>2</sup> )	"B" jelű típusú híd					
	Feltöltés anyaga: homok		Feltöltés anyaga: homokos iszap		Feltöltés anyaga: agyag	
	feltöltéssel	feltöltés nélkül	feltöltéssel	feltöltés nélkül	feltöltéssel	feltöltés nélkül
0.5	0	0,29	0	0,29	0	0,28
0.8	0,33	0,67	0,34	0,68	0,29	0,67
1.0	0,60	0,92	0,6	0,92	0,55	0,92
1.5	1,23	1,49	1,23	1,50	1,19	1,50
2	1,85	2,07	1,85	2,07	1,81	2,07
3	3,04	3,20	3,04	3,21	3,01	3,20
5	5,40	5,47	5,40	5,48	5,37	5,47
7	7,75	7,74	7,76	7,75	7,73	7,74
10	11,30	11,10	11,30	11,20	11,30	11,10
12	13,60	13,40	13,60	13,40	13,60	13,40
13	14,80	14,60	14,80	14,60	14,80	14,60
14	16,00	15,70	16,00	15,70	16,00	15,70
15	17,20	16,80	17,20	16,80	17,10	16,80

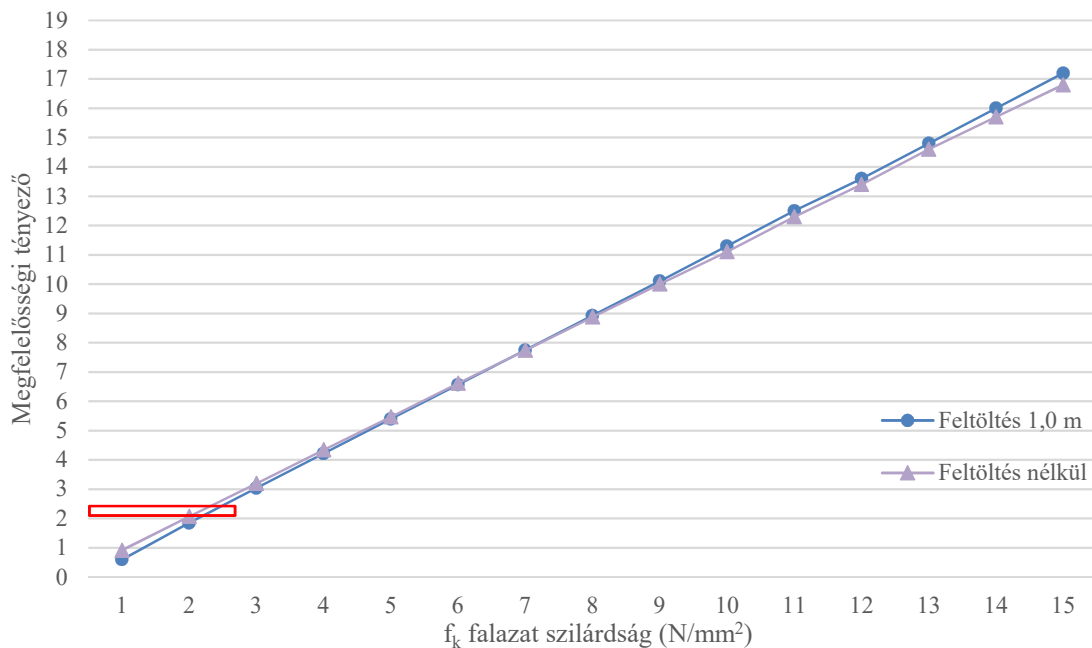
17. táblázat: „B” jelű típusú híd szimulációinak eredményei<sup>15</sup>

Az elvégzett numerikus vizsgálatok alapján meghatároztam az eltérő geometria miatt, mindkét típusú hídra vonatkozólag azt a szilárdsági határértéket, ahol a falazatszilárdság szerepe mértékadóvá válik a szerkezet teherbíróképességének igazolása szempontjából. A határszilárdság alatt az a falazatszilárdsági értéket értem, amely alatt a talajjellemzők hatása és a feltöltés teherelosztó szerepe csökkent jelentőségűvé válik és a teherbírás elsődlegesen a falazatszilárdságának függvénye. Ennek oka, hogy ekkora a boltozatban kialakuló támaszvonala szélessége jelentősen nő, így a törési mechanizmust elsősorban a szilárdsági paraméter befolyásolja. A diagramok alapján detektált szilárdsági határ a tipikus geometriájú hazai híd esetében 1 N/mm<sup>2</sup>, míg angolszász típusú híd esetén a határ 5-7 N/mm<sup>2</sup> között értelmezendő. Az eredmények grafikus ábrázolását a 26. és 27. ábra mutatja.



26. ábra: „A” jelű típusú híd vizsgálati eredményeinek jelleggörbéje (saját ábra)

<sup>15</sup> Megjegyzés: Eredményként a működési tényező értékei kerültek feltüntetésre.



27. ábra: „B” jelű típushíd vizsgálati eredményeinek jelleggörbéje (saját ábra)

További megfontolást igényel a töréssel szembeni megfelelő biztonság megadása [73]. Tapasztalatok szerint boltozott hidak esetében a törési mechanizmus kialakulásával szembeni biztonságot célszerűen 2,0-2,5 közötti értékben kell felvenni. Ha ennek megfelelően a megkövetelhető megfelelési tényezőt is e határok között definiáljuk, akkor az ehhez tartozó falazatszilárdsági határ a karakterisztikus értékek tekintetében mindkét hídtípus esetében a 2,0-2,5 N/mm<sup>2</sup>-es tartományba fog esni.

Az elvégzett numerikus vizsgálat elsődleges célja volt, hogy meghatározzuk mely esetekben szükséges a falazat szilárdság pontosabb meghatározása. Az eredmények azt mutatják, hogy a falazatszilárdság karakterisztikus értékének ( $f_k$ ) nagy pontosságú meghatározása, csak a definiált határszilárdság alatti értékek esetében szükséges.

A hazai hídtípusra definiált szilárdsági határ karakterisztikus értéke a 18. táblázatban szereplő falazóelem – falazóhabarcs szilárdság kombináció esetén áll fenn. Az  $f_k=1,00$  N/mm<sup>2</sup> alatti falazatszilárdság érték csak igen alacsony ( $f_b < 5$  N/mm<sup>2</sup>) falazóelem szilárdság esetén lehet releváns. További feltétel, hogy a habarcsszilárdság értéke se haladja meg 1,5 N/mm<sup>2</sup> –t.

A helyszíni vizsgálatok során az előbbi megfontolások alapján arra jutottam, hogy a falazóelem szilárdság helyszíni közelítő meghatározása (pl.: Schmidt kalapács vizsgálattal) feltétlenül szükséges. A habarcsszilárdságot pedig jellemzően az  $f_m < 1,5$  N/mm<sup>2</sup> zónában szükséges pontosabban meghatározni.

$f_m$ ( $N/mm^2$ )	$f_b$ ( $N/mm^2$ )												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15
0,5	0,41	0,66	0,88	1,07	1,25	1,42	1,59	1,74	1,89	2,04	2,18	2,31	2,70
0,6	0,43	0,70	0,93	1,13	1,32	1,50	1,67	1,84	2,00	2,15	2,30	2,44	2,86
0,7	0,45	0,73	0,97	1,19	1,39	1,57	1,75	1,93	2,09	2,25	2,41	2,56	2,99
0,8	0,47	0,76	1,01	1,23	1,44	1,64	1,83	2,00	2,18	2,34	2,51	2,66	3,11
0,9	0,48	0,79	1,05	1,28	1,49	1,70	1,89	2,08	2,26	2,43	2,60	2,76	3,22
1,0	0,50	0,81	1,08	1,32	1,54	1,75	1,95	2,14	2,33	2,51	2,68	2,85	3,33
1,25	0,53	0,87	1,15	1,41	1,65	1,87	2,09	2,29	2,49	2,68	2,86	3,04	3,56
1,50	0,56	0,92	1,22	1,49	1,74	1,98	2,20	2,42	2,63	2,83	3,03	3,22	3,76
1,75	0,59	0,96	1,28	1,56	1,82	2,07	2,31	2,54	2,75	2,96	3,17	3,37	3,94
2,00	0,62	1,00	1,33	1,62	1,90	2,16	2,40	2,64	2,87	3,09	3,30	3,51	4,10
2,25	0,64	1,04	1,38	1,68	1,97	2,24	2,49	2,73	2,97	3,20	3,42	3,63	4,25
2,50	0,66	1,07	1,42	1,74	2,03	2,31	2,57	2,82	3,06	3,30	3,53	3,75	4,38
2,75	0,68	1,10	1,46	1,79	2,09	2,37	2,64	2,90	3,15	3,39	3,63	3,86	4,51
3,00	0,70	1,13	1,50	1,83	2,14	2,44	2,71	2,98	3,24	3,48	3,72	3,96	4,63

18. táblázat: Falazatszilárdság ( $f_k$ ) értékének alakulása a falazóelem és falazóhabarcs szilárdság függvényében

#### 4.2 Általános kialakítású történeti épületek falazatainak teherbírás vizsgálata sztochasztikus numerikus módszerrel

A falazott híd modellek numerikus vizsgálata során megállapítást nyert, hogy egy boltozott híd olyan összetett statikai rendszer, amelyben a falazat szilárdságának a legtöbb esetben nincs kitüntetett jelentősége a szerkezet teherbírásában és állékonyságában. A szerkezet terhelés alatti viselkedését a geometriai paraméterek és egyéb anyagjellemzők nagyobb mértékben befolyásolják. Az épületek függőleges teherviselő falazatai esetében azonban jóval kevesebb tényezőnek van szerepe a teherbírásban, ezek közül a falazat szilárdságának jelentősége általában kiemelt. A szilárdság szerepe a fal karcsúságától és a terhelés külpontosságától is függ [36]. A falazatszilárdság sztochasztikus jellemzői így nagymértékben befolyásolják a fal teherbíró képességének bizonytalanságát, amit matematikai értelemben a relatív szórás<sup>16</sup> értékével fejezhetünk ki. A falazatok megengedhető terhelését a szabályzatok a teherbírás tervezési értékével definiálják, amely a falazatszilárdság tervezési értékétől lineárisan függ. A szilárdság tervezési értékét a karakterisztikus érték parciális tényezővel való osztása révén kapjuk, de ez a parciális tényező igen magas a többi építőanyagnál (pl. beton, fa, acél) használt értékekhez képest [74]. Meglévő falazatok esetében indokolt lehet a szabályzatban előírt parciális tényezőktől való eltérés ugyanis a szerkezetben található falazatot alkotó anyagok mechanikai jellemzőinek variabilitása egészen más lehet, mint egy új építésű szerkezet esetén. Mindez szükségessé teszi az egyes falazati alkotóelemek szilárdsági jellemzőinek sztochasztikus vizsgálatát és e sztochasztikus jellemzők hatását a falazatszilárdság variabilitásra. A vizsgálat egy fontos eredménye lehet, hogy adott szerkezet esetében a tervezési szabványokban adott értékekhez képest realisabb parciális tényezőket tudunk levezetni a falak teherbírás vizsgálatához. Mivel az anyagjellemzők eloszlás típusa általában nem ismert ezért

<sup>16</sup> relatív szórás (variációs együttható): A szóródás egyik mérőszáma, amely a minta szórását ( $s$ ) a minta átlagához ( $x$ ) viszonyítja. Képlete:  $V = s/x$ , ill.  $V = s/x \cdot 100(\%)$ . A relatív szórás mértékegység nélküli szám, megmutatja, hogy a minta értékei mennyire szóródnak átlagértékükhöz képest. Mivel pozitív adatokra alkalmazzuk és adott mintára,  $s < x$ , ezért  $V < 1$ . Létjogosultsága eltérő nagyságrendű adatokat tartalmazó, ill. különböző mértékegységű minták szórásának, ill. szóródásának összehasonlításában van [75].

az egyszerűség kedvéért célszerű normális eloszlást feltételeznünk a falazatok szilárdsági paraméterei tekintetében. Ezzel a feltételezéssel közelítő, de reális eredményre vezető vizsgálatokat tudunk végrehajtani.

Kutatásom során, numerikus modellen vizsgáltam a falak teherbíróképességét leginkább befolyásoló paraméterek hatását determinisztikus és sztochasztikus érzékenységvizsgálattal. A falazóelem és a falazóhabarcs szilárdság értékeit a történeti szerkezetekben általában fellelhető szilárdsági tartományokban határoztam meg, figyelembe véve a szilárdsághoz tartozó jellemző relatív szórásértékeket, normális eloszlású valószínűségi változókat feltételezve. [76]

A sztochasztikus érzékenységvizsgálatot Monte-Carlo szimulációs módszerrel végeztem el a definiált paramétertartományokban, az Eurocode szerinti számítási összefüggést alapul véve, paraméterekre vonatkozóan a történeti épületek gyakorlatában reálisan előforduló sztochasztikus jellemzőkkel [76] [77]. Az egyes falazatalkotók falazatszilárdságra és annak sztochasztikus jellemzőire gyakorolt hatását a 19. táblázat tartalmazza. A falazat szilárdságát leíró  $\alpha, \beta$  és  $K$  állandók esetében szakirodalmi adatokra hagyatkozva a relatív szórást 5%-ra vettem fel (2.7 pontban részletezett 11. táblázat: A falazat nyomószilárdság számítására alkalmazott néhány (fontosabb) empirikus összefüggés egyenletei alapján.).

A Monte-Carlo szimulációt egy saját készítésű Excel-fájlban alkalmazott véletlenszám generátorral hajtottam végre. [78] A valószínűségi változókat és azok szórásértékét szintén a 20. táblázat foglalja össze. A szimuláció során alkalmazott mintavételi számot úgy határoztam meg, hogy annak folyamatos növelése során megfelelő mintaszámnak tekintetem azt az értéket, amikor az egymást követő alacsonyabb és magasabb mintaszám esetén a generált statisztikai jellemzőkben már nem volt számottevő különbség.

	$x_i$	$x_{im}$	$V_{x_i}$
$x_1$	$K$	0,5	0,05
$x_2$	$\alpha$	0,7	0,05
$x_3$	$\beta$	0,3	0,05
$x_4$	$f_b$	3;5;15 N/mm <sup>2</sup>	0,10 - 0,40
$x_5$	$f_m$	0,5;1;5 N/mm <sup>2</sup>	0,10 - 0,40

19. táblázat: Valószínűségi változók ( $x_i$ ) és szórás értékeik

Monte-Carlo szimulációval végrehajtott valószínűségelméleti vizsgálattal [79] a falazóhabarcs szilárdság várható értékének ( $f_{m,m}$ ) és annak, variabilitásnak ( $V_{f_m}$ ) hatását a falazat szilárdság variabilitására ( $V_f$ ) összefoglalva a 20. táblázat tartalmazza.

A vizsgálatot a falazóelem különböző várható értékei ( $f_{b,m}$ ) és relatív szórás értékei ( $V_{f_b}$ ) feltételezésével hajtottam végre N=300-as szimulációs sorozattal. A relatív szórás jelen esetben a variabilitás mértékeként értelmezhető és a számításban annak százalékos értékét adjuk meg.

A relatív szórás (jelen esetben a variabilitás mértékeként értelmezhető) értékeket 10 - 40% között vettem fel. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy tapasztalataink szerint a meglévő falazatok esetében a szilárdsági jellemzők vonatkozásában a 10%-os relatív szórás érték szinte elérhetetlen a régi építési és gyártási technológiák miatt.

A falazóelemek helyszíni diagnosztikai vizsgálatainak eredményei alapján a reális szórásértékek jellemzően 20-30 % között alakulnak.

$f_{b,m}$	15	15	5	5	3
$f_{m,m}$	1	5	5	1	0,5
$(N/mm^2)$					
$V_{fb}=20\%$					
$V_{fm}=40\%$	24	24	21	21	22
$V_{fm}=30\%$	21	21	20	19	18
$V_{fm}=20\%$	19	19	18	18	17
$V_{fb}=30\%$					
$V_{fm}=40\%$	29	29	27	28	26
$V_{fm}=30\%$	27	27	26	25	25
$V_{fm}=20\%$	25	25	24	24	23
$V_{fb}=40\%$					
$V_{fm}=40\%$	33	33	33	33	33
$V_{fm}=30\%$	33	33	32	31	32
$V_{fm}=20\%$	32	32	32	31	30

20. táblázat: A falazatszilárdság relatív szórásának ( $V_f$ ) változása a falazóelem és habarcs ( $f_{b,m}$  és  $f_{m,m}$ ) szilárdság relatív szórásának ( $V_{fb}$ ,  $V_{fm}$ ) függvényében

Az eredményekből látszik, hogy a falazóelemek 40%-os szórásértéke mellett a falazóhabarcs szilárdságának és annak variabilitásának csökkentése a falazatszilárdság variabilitását minimálisan vagy egyáltalán nem csökkenti. Ebből következik egy gyakorlatban alkalmazható javaslat, miszerint a falazatvizsgálatok során célszerű első lépésként a falazóelem szilárdságát és annak variabilitását meghatározni. A habarcsszilárdság variabilitásának csak akkor lesz jelentősége a teherbírás értékelésében, ha a falazóelem szilárdság variabilitása nem haladja meg a 30%-ot. A falazóelem 20%-os relatív szórásértéke esetén a habarcsszilárdság variabilitásának 40%-ról 20%-ra történő csökkentésével, azaz szilárdság bizonytalanságának csökkenésével, a falazat szilárdság variabilitása 5%-kal csökkenthető. A falazatszilárdság variabilitása különösen csökkenthető ily módon alacsony falazóelem ( $f_b < 5 \text{ N/mm}^2$ ) és alacsony habarcsszilárdság ( $f_m < 1 \text{ N/mm}^2$ ) esetén.

A habarcsszilárdság helyszíni vizsgálati módszereit ezért láttam célszerűnek az alacsonyabb szilárdsági tartományban fejleszteni.

## 5. Fejezet: Falazóhabarcsok szilárdság vizsgálata

### 5.1 Ellenőrző mintasor készítése és törővizsgálata

A különböző vizsgálatok megfelelő összehasonlíthatósága érdekében kontroll habarcs mintasort készítettem. Meghatároztam a korábbi vizsgálatok alapján a megfelelően alacsony szilárdsági tartományt ( $f_m < 1,5 \text{ N/mm}^2$ ). Ebben az alacsony zónában definiáltam 3 minősítő osztályt, melyet a 21. táblázat részletez. Az elkészített próbakockák szilárdságát célzottan ezek szerint a minősítő osztályok szerint az alacsony szilárdsági tartományra terveztem (0,2-1,2 N/mm<sup>2</sup> közötti szilárdsági sáv).

<i>Minősítő osztály</i>	<i>Szilárdság érték (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Jellemző makroszkopikus tulajdonság</i>	<i>Habarcs típus</i>
közel nulla szilárdságú habarcs	< 0,3	porózus, kézzel morzsolható	mészhabarcs
igen alacsony szilárdságú habarcs	0,3 - 0,8	kézzel törhető, mészzárványos	mészhabarcs, vagy enyhén javított mészhabarcs
alacsony szilárdságú habarcs	0,8 - 1,2	kézzel nehezen törhető	mészhabarcs, enyhén javított mészhabarcs, gyenge cementhabarcs

21. táblázat: Habarcsszilárdság minősítő osztályok és jellemzőik

Első lépésben kiválasztottam egy alap habarcskeveréket, melyhez illesztve további 2 igen alacsony szilárdságú (S2 és S3 jelű) és 3 nagyobb szilárdságú (H4, CEM és CEM II jelű) habarcs készült. A pontos összetételt az 22. táblázat tartalmazza. A habarcs alakváltozási tényezője (500-2000 N/mm<sup>2</sup> közötti érték) döntően befolyásolja a falazat alakváltozási jellemzőit. A cementhabarcs jellemzően „ridegebb” viselkedést mutat, ezért cement kötőanyagú habarcs is szerepel a meghatározott mintasorban [80].

<i>Minta jele</i>	<i>Összetétel</i>				<i>Megjegyzés</i>
	<i>homok (m<sup>3</sup>)</i>	<i>mészhidrát (t)</i>	<i>víz (m<sup>3</sup>)</i>	<i>cement (t)</i>	
AS	1,60	0,125	0,470	-	alap habarcskeverék
S2	1,60	0,250	0,470	-	igen alacsony szilárdságú habarcs
S3	1,60	0,375	0,470	-	igen alacsony szilárdságú habarcs
H4	1,60	0,500	0,470	-	jellemző mészhabarcs
CEM	1,60	0,125	0,470	0,125	enyhén javított mészhabarcs
CEM II	1,60	0,125	0,470	0,250	cementhabarcs

22. táblázat: Alkalmazott habarcsminta sorok összetétele

A habarcsok kötőanyagai zsákos anyagok, a mészhidrát, porított oltott mész DL 85-30-S1, a portlandcement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 N Classic típusú. Adalékanyagként hagyományos bányahomok került felhasználásra. A kötő- és adalékanyagot a meghatározott mennyiségű vízzel a megfelelő homogén állag eléréséig 3-5 percig habarcskeverővel kevertem. Mindegyik

habarcszűpűsbűl kűszűtűtem 4x4x4 cm oldalhosszűsűgű habarcskockűkűt, melyeket 7 napig utű kezelűve, majd 28 napos korűkűg laborkűrűlműnyek kűzűtt (szűraz, hűzatmentes  $65 \pm 5\%$  relatűv pűratartalom mellett  $20 \pm 2$  °C-on zűrt tűrűben) tűrűoltam.

A 28 napos kor elűrűesűt kűvetűen a prűbakockűkűt tűrűvűzűgűlűtűnak vetűtem alű a szabvűnyos nyoműszűlűrdűsűg megűhatűrűozűsűűhűz. A műntűkűt Sercomp 7 (50-C7022) tűrűgűgűp segűtsűgűvel vűzűgűlűtam, a terhelűsi sebessűg 1N/s ertűkű volt, elkerűlendű a hűrtelen bekűvetűkűzű dűnamikus jellűgű tűnkremenetűl. A műntűsorokbűl 40 db (S2 2s S3 jellű műntűkűbűl 20-20 db) prűbakockű szűlűrdűsűg vűzűgűlűti ertűműnye állt űgű rendelűkűzűsűre. A 23. tűblűzűt tartalmazzű a szűlűrdűsűgi ertűműnyek műntű sorokra vetűtűtt űtlagűt. Ezen szűlűrdűsűg ertűkűkűt vetűtem alapul, ezen ertűműnyekkűl vetűtem űssűze az elvűzűzett kűlűnbűzűzű vűzűgűlűtűk ertűműnyekűt.

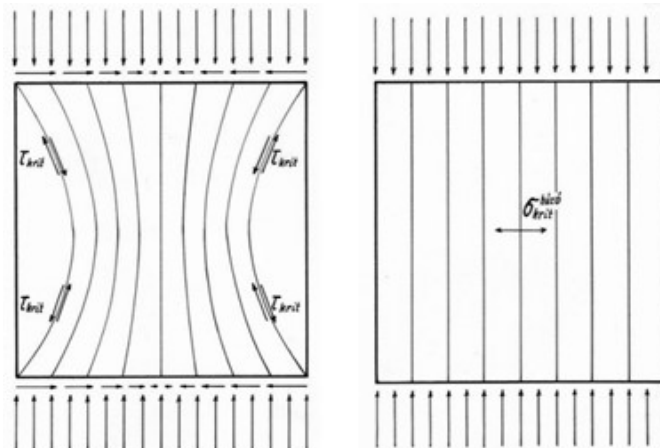
Műntű jellű	AS	S2	S3	H4	CEM	CEM II
Nyoműszűlűrdűsűg űtlag ( $f_m$ )	0,28 N/mm <sup>2</sup>	0,35 N/mm <sup>2</sup>	0,50 N/mm <sup>2</sup>	1,02 N/mm <sup>2</sup>	0,76 N/mm <sup>2</sup>	1,20 N/mm <sup>2</sup>

23. tűblűzűt: A prűbakockűkű tűrűvűzűgűlűti ertűműnyekű<sup>17</sup>



csűszűzűtűrűes

szakadűtűrűes



28. űbra: Habarcskockű prűbatestek tűrűvűzűgűlűta (felűl, saját felvűtel) 2s jelleműzű tűrűskűpek megűfelelű, szűmmetrikűs (bal oldal) 2s szabűlytalan tűrűskűppel (jobb oldal) [81]

<sup>17</sup> Megűjegűzűsű: A prűbakockűkű tűrűvűzűgűlűti ertűműnyekű kockűszűlűrdűsűgűra vonatkozűtatűva kerülűtek megűdűsűra.



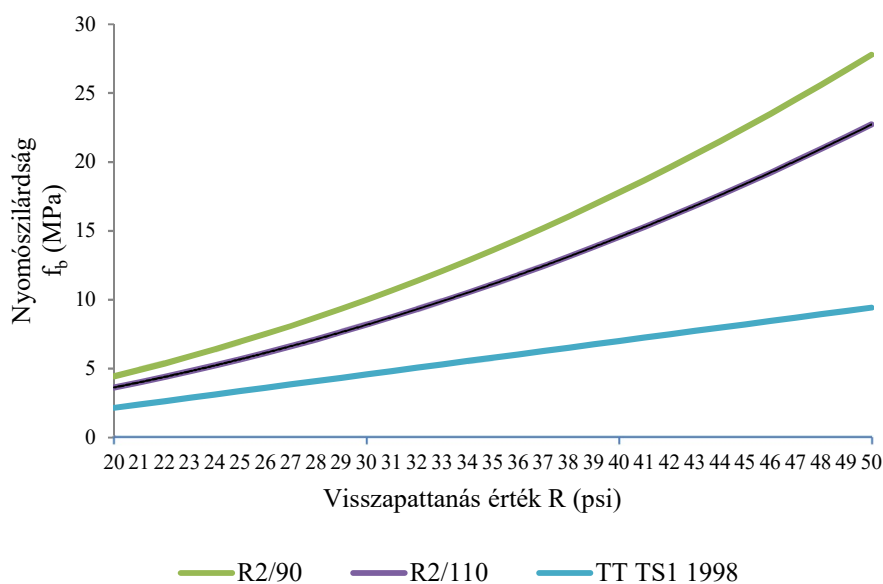
Az AS, H4, CEM és CEM II jelű habarcsok felhasználásával 3 téгла elem összeépítésével falazott próbatetek készítettem. A szakirodalmi források [82] [83] és a rendelkezésre álló lehetőségeket (kézi falazás, könnyen mozgatható faltest méret) figyelembe vételével készült faltestek kialakítását a 29. ábra mutatja.

Mindegyik habarcs típussal 3-3 falazott próbatestet készítettem. A falazóelemek új Bakonytherm kisméretű (gyártói teljesítménynyilatkozat szerint minimum  $18 \text{ N/mm}^2$  nyomószilárdságú falazóelemek) és történeti, vörös színű nagyméretű tömör agyagtéglák. (A használt falazóelemek egy épületből származnak, látható hibáktól és repedésektől mentesek, tisztítottak.)



29. ábra: Faltestek kialakítása (saját felvételek)

A faltestek törővizsgálatát INSTRON 5595 univerzális vizsgáló berendezéssel végeztük el, a terhelési sebesség  $4 \text{ mm/s}$  volt. A próbatesteket 10%-os előterhelés mellett Schmidt kalapács és penetrációs vizsgálatnak vetettük alá, majd a maximális törőerő eléréséig terheltük. A vizsgálat során a faltest mindkét oldalán végeztem méréseket N-típusú kalapáccsal – faltestek kialakítása és a várhatóan magasabb szilárdság értékek miatt P-típusú kalapáccsal nem történt mérés. Az eszköz 10 ponton történő mérésből számol egy átlag visszapattanási értéket. A visszapattanás értékekből számolt  $f_b$  falazóelemszilárdság meghatározásához a 30. ábra közelítő és egyszerűsített összefüggései közül a 17. egyenletet ( $f_b = R^2/90$ ) választottam, mely a magasabb szilárdsági tartományokban ad jobb közelítő eredményt.



30. ábra: A visszapattanási értékre vonatkozó kiválasztott összefüggések [84][55][21]

<i>Tégla típusa</i>	Bakonytherm kisméretű téglá	Használt nagyméretű téglá
<i>Visszapattanás érték (psi)</i>	32	28
<i>Számított nyomószilárdság értéke (N/mm<sup>2</sup>)</i>	11,38	8,71

24. táblázat: A falazóelemek Schmidt kalapács vizsgálatának eredményei

A törővizsgálat során a számítógép tizedmásodpercenként erő-elmozdulás diagrammon rögzíti a próbatest alakváltozását. 4 mm/perc terhelési sebesség mellett kezdtük meg a terhelést. A vizsgálat során a gép által tárolt adatokat feldolgoztam. A faltestek törővizsgálatának eredményeit a 25. táblázat tartalmazza.

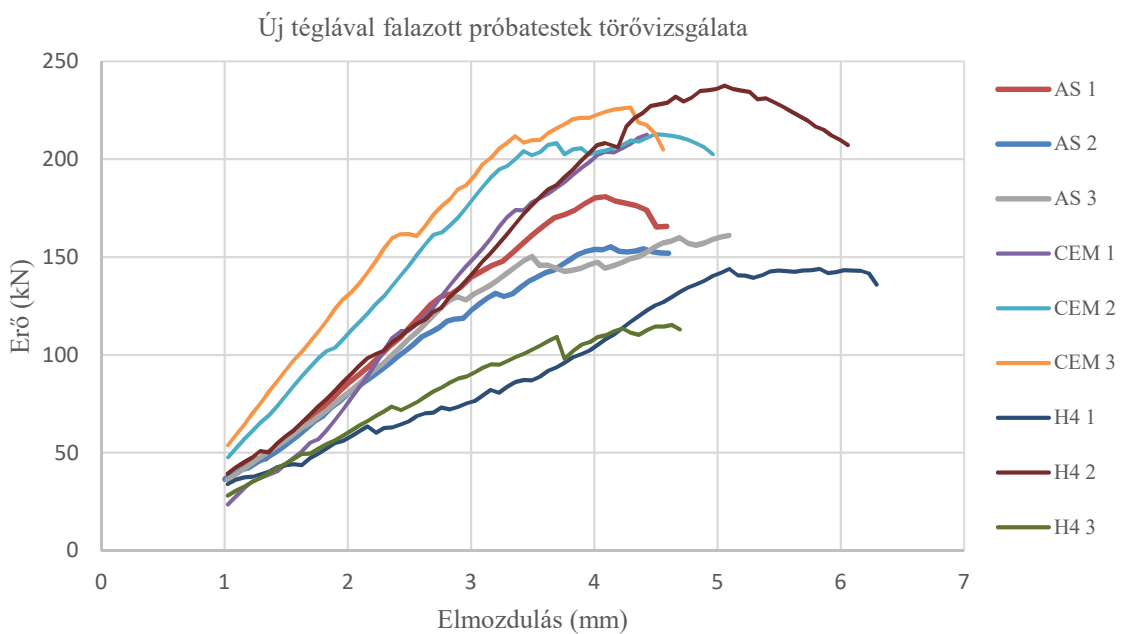
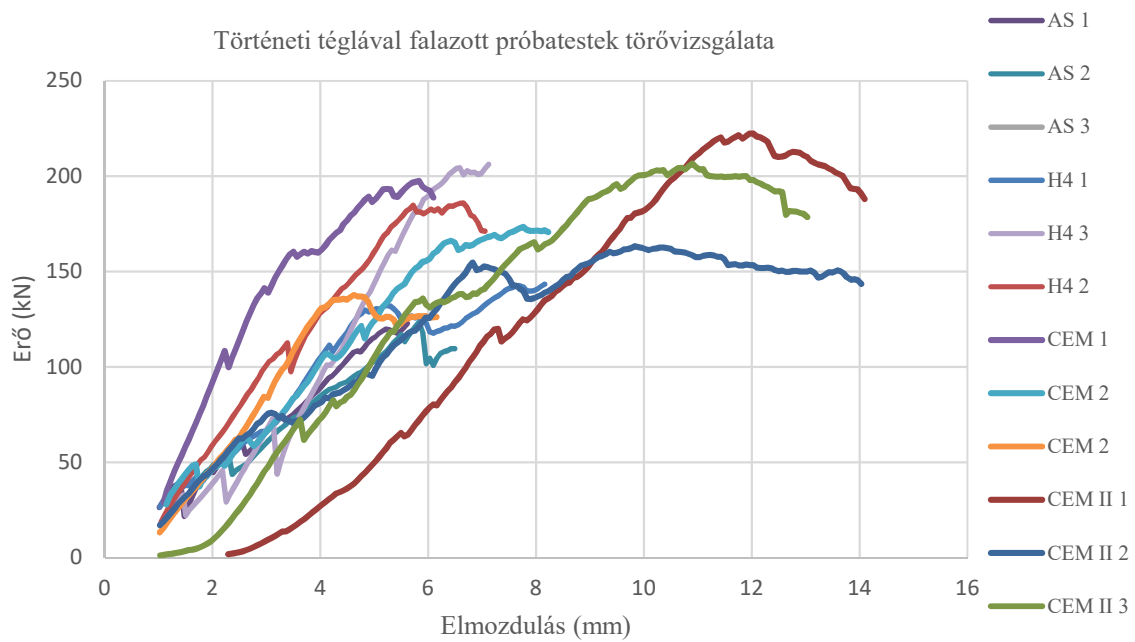
<i>Történeti téglá falazóelemmel készült falazat</i>			
<i>Falazott próbatest jele</i>	<i>Határerő (kN)</i>	<i>Legnagyobb elmozdulás (mm)</i>	<i>Falazat nyomószilárdsága (MPa)</i>
<i>AS jelű habarcs 1.</i>	123,49	5,64	4,11
<i>AS jelű habarcs 2.</i>	123,94	6,53	4,13
<i>AS jelű habarcs 3.</i>	143,48	8,16	4,78
<i>CEM jelű habarcs 1.</i>	197,64	6,14	6,59
<i>CEM jelű habarcs 2.</i>	173,52	8,27	5,78
<i>CEM jelű habarcs 3.</i>	137,71	6,19	4,59
<i>H4 jelű habarcs 1.</i>	168,23	6,01	5,61
<i>H4 jelű habarcs 2.</i>	185,95	7,06	6,20
<i>H4 jelű habarcs 3.</i>	207,18	7,15	6,91
<i>CEM II jelű habarcs 1.</i>	222,66	14,12	7,42
<i>CEM II jelű habarcs 2.</i>	163,70	16,49	5,46
<i>CEM II jelű habarcs 3.</i>	206,81	13,08	6,89
<i>Új téglá falazóelemmel készült falazat</i>			
<i>Falazott próbatest jele</i>	<i>Határtörőerő (kN)</i>	<i>Legnagyobb elmozdulás (mm)</i>	<i>Falazat nyomószilárdsága (MPa)</i>
<i>AS jelű habarcs 1.</i>	182,25	6,69	6,07
<i>AS jelű habarcs 2.</i>	155,42	6,17	5,18
<i>AS jelű habarcs 3.</i>	161,33	6,59	5,38
<i>CEM jelű habarcs 1.</i>	210,00	7,72	7,11
<i>CEM jelű habarcs 2.</i>	237,62	7,54	7,10
<i>CEM jelű habarcs 3.</i>	115,62	7,70	7,55
<i>H4 jelű habarcs 1.</i>	213,38	6,00	7,00
<i>H4 jelű habarcs 2.</i>	213,12	7,22	7,92
<i>H4 jelű habarcs 3.</i>	226,53	6,79	-

25. táblázat: Falazott próbatestek törővizsgálati eredményei

A falazott hasábok erő-elmozdulás diagrammját a 31. ábra mutatja. A gép által tized másodpercenként mért elmozdulás-erő adatpárok közül szekundumonként kiemelttem az értékeket, a grafikonok ezen adatpárokat ábrázolják, a kezdeti 1-2 mm-hez tartozó, úgynevezett beállási szakasz nélkül.

Az elmozdulás hirtelen esésponjtjai mutatják a falazóelem törés pillanatát (minden esetben a 3 esésponjt jól látható). A maximális törőerő elérése után, a maradék teherbírás meghatározásához a faltesteket tovább terheltük, így jól látható a falazat képlékeny tartaléka.

A CEM II jelű ( $f_m=1,2$  N/mm<sup>2</sup>) habarccsal falazott faltestek alakváltozási grafikonjai jelentősen eltérő, nyújtott alakúak, e próbatestek átlag falazatszilárdsága a legnagyobb.



31. ábra: Falazott próbatetek törés közbeni alakváltozás diagrammjai (saját ábra)

Az eredmények várható értékei: AS jelű minta:  $5,27 \text{ N/mm}^2$ ; CEM jelű minta:  $7,07 \text{ N/mm}^2$ ; H4 jelű minta:  $7,56 \text{ N/mm}^2$  a mért értékekhez nagyon jól illeszkedve 5%-os hibahatáron belül maradtak.

## 5.2 Penetrométer vizsgálat

Az általam használt penetrométert alapvetően a lőtt beton korai szilárdságvizsgálatára használják, vonatkozó szabvány: *MSZ EN 14488-2* [85]. Vizsgálataink során a habarcsszilárdság becslésére alkalmaztuk.

Hasonló elvek szerint, de eltérő kialakítással találunk más eszközöket, ilyen a fűrőerő-szilárdság összefüggés alapján működő kísérleti fázisban lévő X-drill [86], PNT-G [87] vagy behatolás – erő összefüggésen alapuló RSM-15 [88], illetve egyéb behatolásmérők [89]. Az általam alkalmazott behatolásmérő eszköz azonban egyszerű összefüggés alapján, kis

roncsolással, előfűrés nélkül ad az alacsony habarcsszilárdsági zónában kellő pontosságú becsült eredményt. Az eszközzel a kis szilárdságú habarcsrétegek detektálhatók, segítségével feltérképezhető, mely szakaszok vizsgálatát szükséges alaposabban elvégezni és a szilárdságot pontosabban meghatározni. Az alacsonyabb szilárdsági sávba eső habarcsok vizsgálata azért lényeges, mert a határszilárdsági értéket elérve a teherbírás vonatkozásában a habarcsszilárdság már kiemelt paraméterré válik. Alapvetően az 0,8-1,0 N/mm<sup>2</sup> habarcsszilárdsági határig képes az eszköz mérési adatot szolgáltatni ( $F_{\max}= 800 \text{ N}$ ). A penetrométer használatát falazatokon a 32. ábra mutatja.

A gyakorlati alkalmazhatóságot valamennyi a 3. fejezetben bemutatott építményen vizsgáltam. Lényeges, hogy épületek esetében kizárólag falfeltárási helyeken, illetve a vakolat eltávolítását követően alkalmazható a módszer. Pincefalazatok esetében általában nincs belső vakolatréteg, így ott nagyszámú vizsgálat elvégzésére is lehetőség nyílik. Fontos kiemelni, hogy a pincefalak általában magas nedvességtartalmat mutatnak (részletezi az 5.4 pont) és ez a degradáló folyamatokat is előrehaladottabbá teszi.

A vizsgált vasúti hidak (3.1.5 pont) esetében a habarcsszilárdság minden esetben meghaladta az eszköz mérési határát. Jellemző továbbá a szerkezeteknél az „újráfugázás”, így a vizsgálatot nagyon körültekintően kell eljárni és kizárólag az építési habarcsrétegen elvégezni a vizsgálatokat.

Egyes épületszerkezetek esetén nem volt mérhető érték 10-10 mérésből a behatolások száma nem volt kellően elégséges. A Tapolcai bíróság épülete (3.1.1 pont) és a Fekete Sas szálló (3.1.2 pont) esetében állt fenn, így matematikai összefüggések alapján határoztuk meg a habarcsszilárdság minimumértékeit.

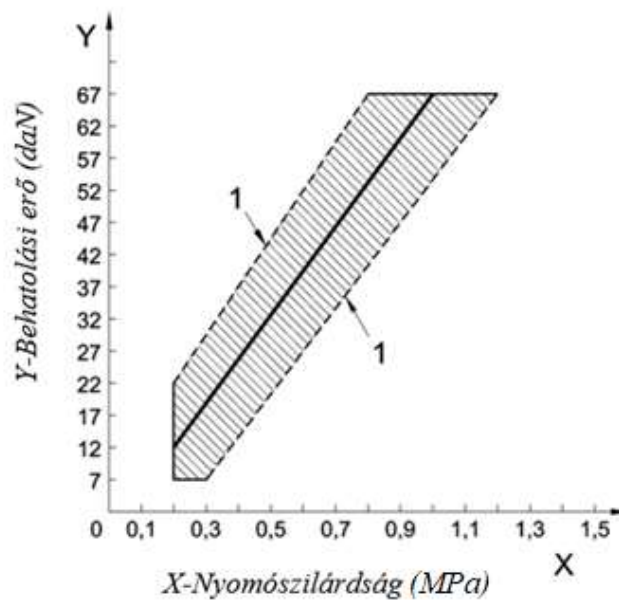
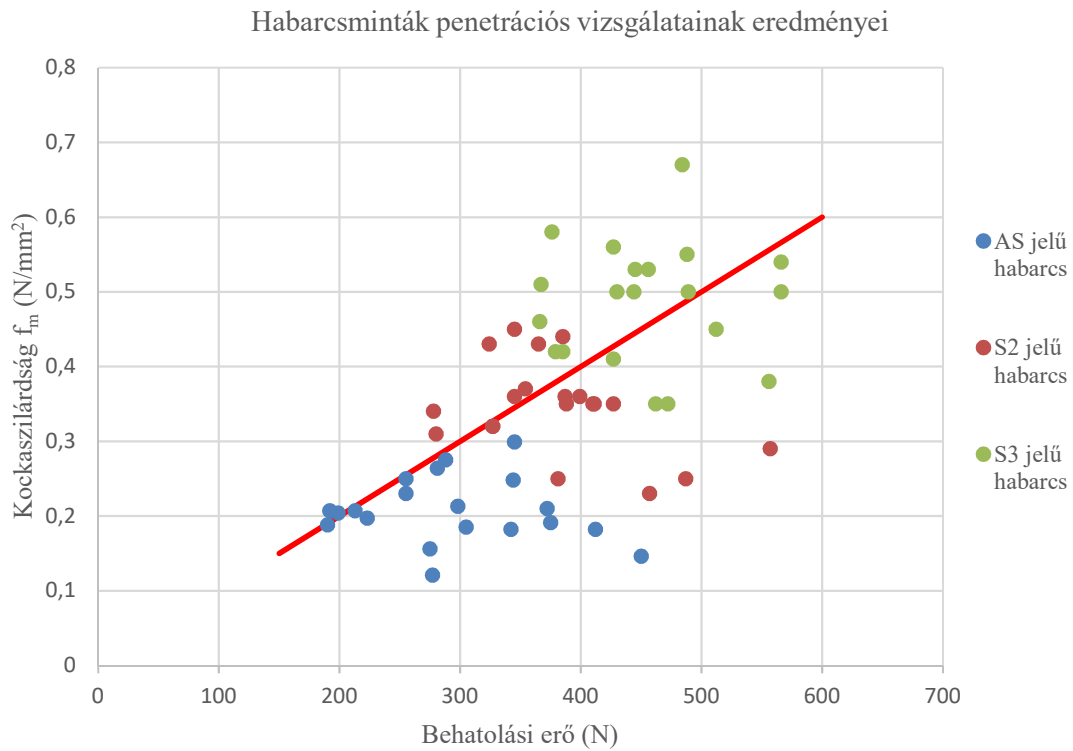
A legjelentősebb eredményt a Citadella (3.1.4 pont) falazatai esetében kaptuk. A nagyon puha mészhabarcs miatt valamennyi mérési ponton volt a mérési sávon belüli érték. Az erőd vizsgálata rámutatott, hogy valóban szükséges a gyakorlatban a módszer alkalmazása, fejlesztése.



32. ábra: Penetrométer alkalmazása előterhelte próbatesten és függőleges falazaton (saját felvételek)

Az eszköz kalibrálását falazóhabarcsokra az AS, S2 és S3 jelű habarcsokkal készített, falazott próbatestek vizsgálatával végeztem. A 10%-os előterhelést követően 20 ponton mértem a penetrációs tű teljes behatolásához szükséges erőt. A vizsgálat során valamennyi mérési helyen meg tudtam határozni a behatolási erőt. A próbakockákon mért szilárdság értékeket a penetrációs vizsgálat 20 eredményének átlaga jól közelíti. A habarcsvizsgálat eredményeit a kockaszilárdságra vetítve a 33. ábra mutatja. A mérési eredmények grafikonja az alsó lőtt beton

szabvány grafikonjához jól illeszkedik, hasonló hibasávval határozható meg a nyomószilárdság érték. A mintasorok vizsgálat eredményeit táblázatos formában a 26. táblázat foglalja össze. A táblázat az eredmények mellett a behatolási erő és a nyomószilárdság átlag értékeit is tartalmazza.



33. ábra: Kontroll habarcsminták vizsgálati eredményei (felül, saját ábra) és a vonatkozó lőtt beton szabvány grafikonja (alul, [85])<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Megjegyzés: A lőtt beton adalékanyagra vonatkozó  $d_{max}=8$  mm.

Ssz.	AS jelű habarcs minta		S2 jelű habarcs minta		S3 jelű habarcs minta	
	Behatolási erő (N)	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Behatolási erő (N)	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Behatolási erő (N)	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	255	0,23	278	0,34	462	0,35
2	372	0,21	427	0,35	430	0,50
3	275	0,16	324	0,43	379	0,42
4	412	0,18	387	0,36	445	0,53
5	199	0,20	327	0,32	366	0,46
6	223	0,20	557	0,29	427	0,41
7	190	0,19	487	0,25	556	0,38
8	192	0,21	354	0,37	427	0,56
9	277	0,12	280	0,31	376	0,58
10	298	0,21	345	0,36	484	0,67
11	255	0,25	327	0,32	566	0,54
12	342	0,18	457	0,23	489	0,50
13	450	0,15	388	0,35	566	0,50
14	305	0,19	410	0,35	512	0,45
15	375	0,19	381	0,25	488	0,55
16	344	0,25	345	0,45	472	0,35
17	281	0,26	411	0,35	444	0,50
18	213	0,21	365	0,43	385	0,42
19	345	0,30	399	0,36	456	0,53
20	288	0,28	385	0,44	367	0,51
<b>Átlag</b>	<b>295</b>	<b>0,21</b>	<b>382</b>	<b>0,35</b>	<b>455</b>	<b>0,49</b>

26. táblázat: AS, S2 és S3 jelű habarcsminták penetrációs vizsgálatának eredményei

A mérési eredmények relatív szórása  $V_{fm} = 25\%$ . Az érték elsősorban a mérés bizonytalanságából adódik, ugyanis a habarcsszilárdság az egyes típusoknál egyenletesnek tekinthető. A löttbetonra vonatkozó grafikus összefüggés szilárdságra vonatkozó értékei jellemzően magasabbak (33. ábra).

A kontroll mintasorok esetében valamennyi  $N=20$  mérési ponton a penetrométer tú behatolt, így a behatoláshoz szükséges erő értéke átlagszámítással meghatározható volt. Abban az esetben, ha nem minden mérési ponton hatol be az eszköz a habarcs szilárdságbecslést a rendezett minták elve<sup>19</sup> alapján tudjuk elvégezni a következő megfontolás alapján.

Kiindulva a becsült szórásértékből ( $V_{fm} \approx 0,3$ ) a biztonság javára történő közelítéssel  $V_{fm}$  értékét 0,3-ra vehetjük fel. A mérési határ  $f_{m,lim} = 0,8$  N/mm<sup>2</sup>, elvégzett mérések tapasztalatai alapján.

A mérések száma  $N$ , a behatolt mérések száma  $n$ ,  $f_{n,max}$  pedig a mért értékek közül a legnagyobb (ez alá legfeljebb  $n$  db érték esik). Annak valószínűsége, hogy a szilárdság  $f_{n,max}$  alatti:

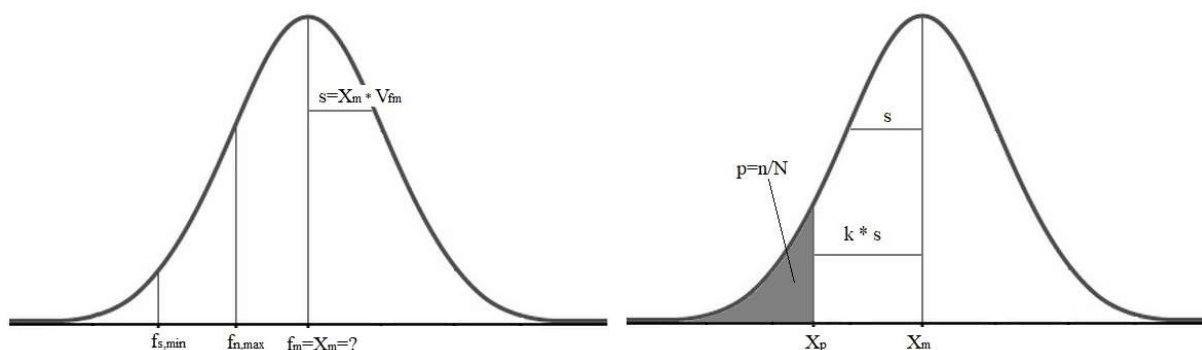
$$p=n/N \quad (19)$$

<sup>19</sup> A minta nagyság szerint rendezett elemeit rendezett mintának nevezzük, és a rendezett minta  $i$ -edik elemét  $X_i^*$ -gal jelöljük. A minta elemeit sorba rendezzük.  $X_1^*$  jelölje a legkisebbet. A rendezett minta:  $X_1^* \leq X_2^* \leq \dots \leq X_n^*$  [90]

A  $p$  valószínűségből kiindulva a standard normális eloszlás<sup>20</sup> eloszlásfüggvény inverze. Megadja, hogy az adott alulmaradási valószínűséghez tartozó érték hánszoros szórásnyira van a várható értéktől.

$$k = -F(p) \quad (20)$$

$$X_m = f_m = f_{n, \max} / (1 - k \times V_{fm}) \quad (21)$$



34. ábra: A mért szilárdság várható értékének értelmezése (saját ábra)

A számítást úgy is elvégezhető, ha vesszük az 5. legkisebb mért értéket,  $f_{5, \min}$ . Azt feltételezzük, hogy ez az érték megadja az 5%-os alulmaradáshoz tartozó kvantilis<sup>21</sup> értékét, mely így a 22. egyenlettel leírható.

$$X_m = f_m \approx f_{5, \min} / (1 - 1,645 \times V_{fm}) \quad (22)$$

A két egyenlet (21 és 22. egyenlet) eredménye közül a kisebbik érték alapján lehet megbecsülni a szilárdságot.  $N=100$ -nál alacsonyabb mintaszám esetén, min  $N=20$ ,  $f_{1, \min}$  értéket kell alapul venni.

A szilárdságbecsléshez legalább  $N=20$  mérési ponton kell végrehajtani a vizsgálatot. Feltétel továbbá, hogy 20 pont közül legalább 2 ponton lehetséges legyen a behatolás. Ezen 2 ponton mért értékek adják  $f_{n, \max}$  (legnagyobb érték) és  $f_{1, \min}$  (legkisebb) értéket.

Abban az esetben, ha a 20 pontból 2 ponton valósul meg a behatolás és mindkét mért érték 800 N ( $0,8 \text{ N/mm}^2$ ), akkor  $f_m$  számított értéke  $1,58 \text{ N/mm}^2$ , ez az érték a falazóhabarcs szilárdságára vonatkozó mérési határ.

A penetrométer alkalmazásának előnye, hogy kis roncsolással járó eljárás, a vizsgált minta kiemelése és külön előkészítése nélkül alkalmazható, költséghatékony. A kézi eszköz kis tömegű, könnyen használható, a mérési eredmény azonnal leolvasható. A vizsgálat korlátait a vizsgáló személy által kifejtendő erő adja, ami nagyságrendileg 800 N.

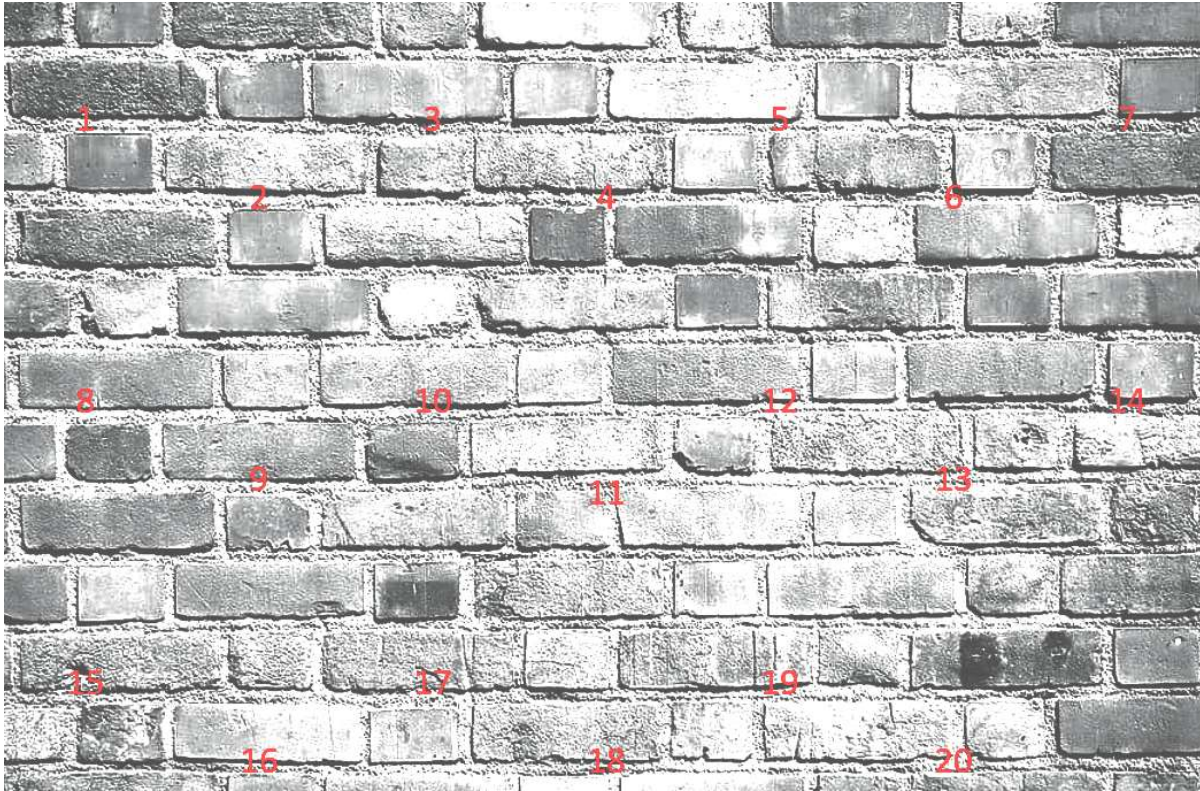
A mintahelyek darabszáma legalább  $N=20$ . A mérési pontok legalább 10%-ának (2 pont) mérési adata szükséges, hogy számítással igazolhassuk az  $f_m < 1,5 \text{ N/mm}^2$  habarcsszilárdsági értékeket. Abban az esetben, ha a kiválasztott 20 mérési ponton egyáltalán nincs behatolás, akkor a szilárdság tekintetében igazolható, hogy  $f_m > 1,5 \text{ N/mm}^2$ .

<sup>20</sup> Legyen  $m \in \mathbb{R}$ ,  $\sigma > 0$ . Az  $Y$  normális eloszlású, ha a sűrűségfüggvénye:  $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$ ,  $x \in \mathbb{R}$ . Jelölés:  $Y \sim N(m, \sigma^2)$ . Ha  $m = 0$  és  $\sigma = 1$ , akkor a valószínűségi változót standard normális eloszlásúnak nevezzük [90].

<sup>21</sup> Az 5%-os alulmaradáshoz tartozó kvantilis, amelynél kisebb érték előfordulásának valószínűsége 5% [80].



Többszintes épületek vizsgálata során szintenként, legalább 3 fal vizsgálata javasolt. A falazat reprezentatív feltérképezéséhez a minimálisan szükséges 20 mérési pont javasolt helyét a 35. ábra szerint célszerű felvenni. Függőleges viszonylatban nem csak az eszköz használat szempontjából ideális 1,2-1,5 m magasságban, hanem a falazat alsó és felső szakaszán is ki kell jelölni mérési pontokat. Függőleges fal esetén vízszintesen 3 magasságban egyenletesen elosztva (pl.: 2,5; 1,5; 0,75 m-en), illetve a közbenső magasságokban elszórtan, sakktábla szerűen kell a pontokat kijelölni.



35. ábra: Penetrométer vizsgálat mintahelyeinek javasolt kijelölése (saját ábra)

### 5.3 Pecsétnyomás vizsgálat

A kis szilárdságú habarcsréteg pontos szilárdságvizsgálatát laboratóriumban tudjuk elvégezni. A pecsétnyomás vizsgálat alkalmas szerkezetből kinyert kisméretű habarcs minta szilárdságának meghatározására. Számos mintakialakítást és törővizsgálati módszert alkalmaznak a nem standard méretű minták vizsgálatához. A legtöbb esetben darabolással, vagy gipszbe ágyazással érik el, hogy a törővizsgálatnak alá lehessen vetni a mintát [91] [92] [93] [94]. A legtöbb esetben, azonban nem áll rendelkezésre egyenletes felületű, vagy kellő méretű minta. A mintavételi tapasztalatok szerint az általam alkalmazott mintakialakítás [23] a legmegfelelőbb, csekély korlátokat szab a habarcsminta méretének, de különösen alakjának tekintetében.

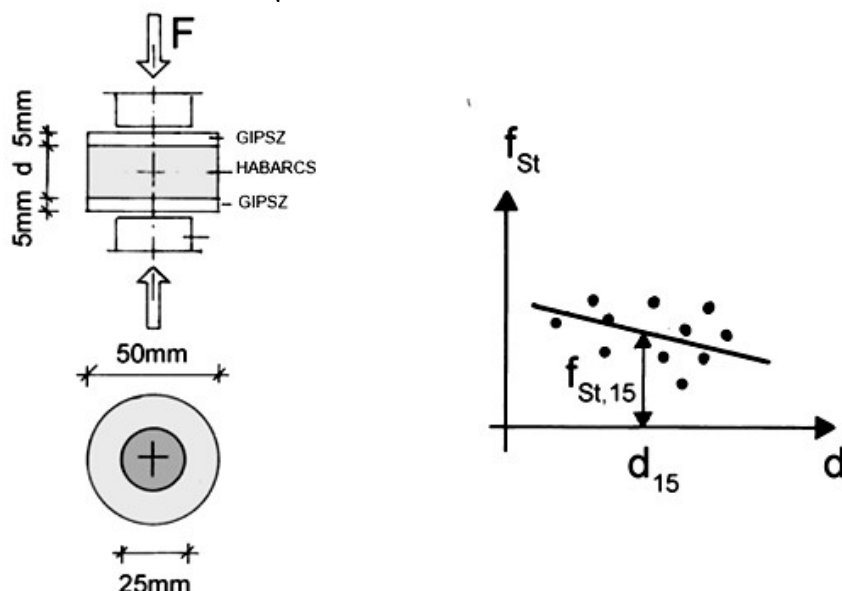
A vizsgálathoz alul-felül 5 mm vastagságú gipszrétegek közé kell ágyazni a 10–25 mm vastagságú habarcsmintát. Lehetőség szerint, az előkészített minta minél jobban közelítse az 50 mm átmérőjű kört. Fontos, hogy a gipszrétegek egymással párhuzamosak legyenek, a mintákat mindkét oldalról 50 mm átmérőjű és 5 mm vastag kör alakú gipszréteggel (vagy alternatív megoldásként négyzet alakú, 50 mm átmérőjű gipszréteggel) kell ágyazni. A gipsz és a habarcs közötti kellő tapadás elérése érdekében a mintát meg kell nedvesíteni. A gipszréteg szilárdulását követően a mintákat legalább három napig szobahőmérsékleten kell tárolni. A száradási idő letelte után törővizsgálatnak kell alávetni. A legideálisabb terhelő lap átmérő 25 mm, de 20 és



30 mm közötti átmérő is megfelelő. A kismértékben eltérő mintaméretetek nincsenek nagy hatással a habarcsszilárdságra [23].

A mért értékeket ( $f_{St,15}$ ) a 23. egyenlet összefüggésének segítségével  $f_m$  szilárdságértékké konvertáljuk [23].

$$f_m = \sqrt{f_{St,15} + 0,3 - 0,55} \quad (23)$$



36. ábra: Pecsenyomás vizsgálat mintakialakítása és számítási összefüggése [23]

Kevés esetben van lehetőség kellő méretű és számú minta vételére a gyakorlatban. A bemutatott épületek közül a többszintes budapesti épület (3.1.3 pont) esetében, részben a fűrt mintavételek helyén, részben a feltárások helyén tudtam kellő mennyiségű habarcsmintát vételezni a teszt elvégzéséhez. A vizsgálatok eredményei a különböző anyagjellemzőkkel bíró, szintenként eltérő habarcsok közötti különbségeket a szilárdság vonatkozásában is megmutatták. Az eredeti mintakialakítással végzett mérések eredményei az eltérő szilárdsági jellemzőkre is fényt derítettek.

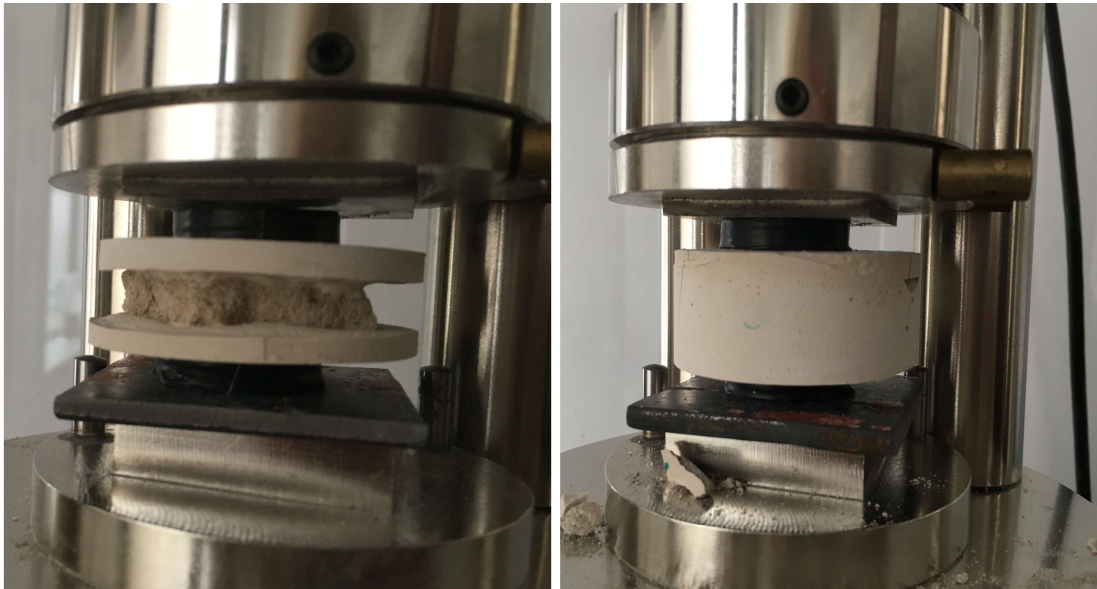
A Fekete Sas Szálló (3.1.2 pont) esetében nehezebb volt a mintavétel. A habarcsvizsgálat az eredeti mintakialakítással nem volt végrehajtható a minták kis szilárdsága és korai szétesése miatt.

Az eredeti pecsenyomás vizsgálat fejlesztéséhez az alábbi vizsgálat sorozatot terveztem meg, az ismert szilárdságú kontroll mintasorok AS, H4, CEM és CEM II jelű habarcsmintáinak felhasználásával. 50 mm-es átmérőjű kör alakú mintasablonnal próbatesteket készítettem, egyszerű modellgipsz felhasználásával. A gipsz alkalmazott keverési aránya 1:1 (gipsz őrlemény: víz) volt. 40 - 40 próbatestek készítettem, teljesen kitöltött és 12-12 próbatestet az eredeti kialakításnak megfelelően. A kétféle mintakialakítást a 37. ábra mutatja. A vizsgálatot 25 mm-es szűkített terhelőlappal végeztem, Sercomp 7 (50-C7022) törőgép segítségével vizsgáltam (terhelési sebesség 1N/s).

Az ismert összefüggés alapján a nyomószilárdság jól levezethető. Nagyságrendileg 1-1,5 N/mm<sup>2</sup> szilárdsági határ felett a módszer megbízható eredményt ad. A határszilárdság alatti minták esetében a módszer megbízhatósága romlik a minták terhelés alatti korai szétesése miatt.

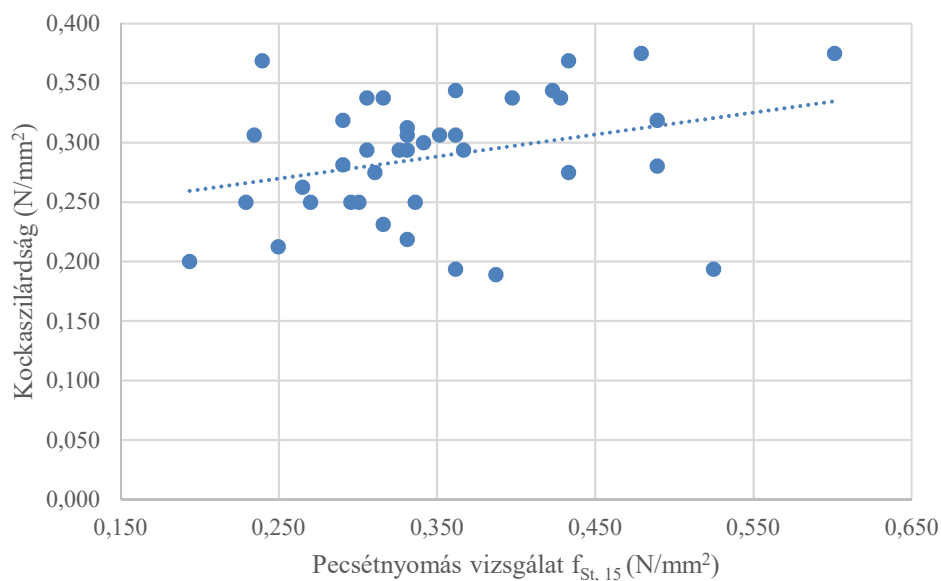
A kitöltött minta a habarcsréteg valós viselkedését jobban modellezi, ezáltal pontosabb szilárdságértéket ad, különösen a „közel nulla szilárdságú” habarcsok ( $f_m < 0,3$  N/mm<sup>2</sup>)

vizsgálata során. A falazóelemek között ugyanis a habarcsréteg oldal irányú „megtámasztása” valódi szerkezetek esetében biztosított.



37. ábra: Pecsénnyomás vizsgálat: alul-felül gipszrétegek közé ágyazott eredeti mintakialakítás és a teljesen kitöltött mintatest (saját felvételek)

A habarcsszilárdság számításához minimum 10 db minta előkészítése és gipszrétegbe ágyazása szükséges. Az AS jelű  $f_m=0,28 \text{ N/mm}^2$  nyomószilárdságú minták vizsgálati eredményeit a 38. ábra mutatja.



38. ábra: Pecsénnyomás vizsgálat eredményei (AS jelű habarcs, saját ábra)

Az AS jelű mintasor  $f_{St,15, \text{átlag}} = 0,35 \text{ N/mm}^2$ , ebből  $f_m=0,26 \text{ N/mm}^2$  az 23. egyenlet szerint számítva. A teljesen kitöltött minták vizsgálatával meghatározott  $f_m$  érték 7%-ban tér el a kocka próbatesteken meghatározott nyomószilárdságtól, az alacsonyabb tartományban. Ugyanakkor a csak gipszrétegek között vizsgált minták szilárdsága már több mint 20%-kal marad alul. ( $f_m=0,22 \text{ N/mm}^2$ )

Az alkalmazott, teljes kitöltöttség jobban megfelel a valódi szerkezetekben található többtengelyű feszültségállapotnak, továbbá a minták terhelés alatti korai szétesését is megakadályozza.

A CEM és H4 jelű  $f_m < 0,3 \text{ N/mm}^2$  mintasorok esetében a teljesen kitöltött minta törővizsgálati eredményeinél az eredeti 22. *egyenlet* nem adott kellő pontosságú eredményt, túl nagy mértékben közelített a biztonság javára. A H4 és a CEM jelű mintasorok esetében ezért egy egyszerűsített matematikai összefüggés – 24. *egyenlet* – alapján számoltam a habarcsszilárdságot. Az eredmények legfeljebb 10 %-os eltéréssel közelítik meg a próbakockákon mért értékeket.

$$f_m = \sqrt{f_{St,15} + 0,3} \quad (24)$$

Az igen alacsony szilárdságú és az alacsony szilárdságú ( $\sim f_m \leq 1 \text{ N/mm}^2$ ) minősítő osztályba tartozó habarcsok esetén teljesen kitöltött mintakialakítás esetén a módosított (24. *egyenlet*) alkalmazása javasolt.

#### 5.4 Nedvességmérés

A nedvességmérés az elektromos konduktivitás<sup>22</sup> elvén működik. Az elektromos ellenállás mérő eszköz kétféle nedvességtartalom meghatározására alkalmas. Felületi („*two pin*”) és mélységi („*deep wall probe*”) módszert különböztetünk meg. A felületi mérést az 39. *ábra* mutatja. A mélységi méréshez alkalmas a belső rétegek mérésére, melyhez azonban szükséges 2 ~ 10 cm-es fúróluk. A fúrt lyukakba kell helyezni a két mérőportot [95]. Az eszköz az anyag nedvességtartalmát tömegszázalékban ( $m\%$ ) jeleníti meg, a mért értékhez állapotkategóriát tudunk rendelni, melynek értékeit a 27. *táblázat* részletezi.



39. *ábra*: Felületi nedvességmérés Protiméterrel (saját felvétel)

Nedvességtelítettség minősítő osztálya	ÉMISZ 340:1999 szerint
száraz	< 20 m%
nedves	20–40 m%
közepesen nedves	40–60 m%
erősen nedves	60–80 m%
vizes	> 80 m% ezen belül
telítetten vizes	> 90 m%

27. *táblázat*: Nedvesség mértéke ÉMISZ 340:1999 szerinti besorolás szerint [96]

<sup>22</sup> elektromos vezetőképesség

A legtöbb esetben a folyamatos magas, illetve a változó nedvességtartalom az egyik jelentős építőanyag-károsító jelenség. Összefüggés van a nedvességtartalom és a degradációs folyamatok között, melyek negatívan befolyásolják a szerkezet állapotát [97]. Az egyik ilyen jelenség a „*rising damp*”, amely a történelmi épületek esetében a problémák többségét okozza.

A régi épületek általában nincsenek szigetelve a víz ellen; ezért a kapilláris kondenzáció a falakban anyagromláshoz vezet. Ez a probléma könnyen felismerhető a nedvesség profiljának elkészítésével. A profil elkészítéséhez a vizsgált fal nedvességtartalmát több ponton függőlegesen megmérjük, majd grafikonon ábrázoljuk. Ha a fal nedvességprofilja magas nedvességtartalmat mutat az alsó, és alacsony nedvességtartalmat a fal felső részein, a nedvességtartalom hirtelen „levágását” („*cut-off*”) mutatva, növekvő nedves jelenségek következtek be. Ez a hirtelen levágás általában körülbelül 1,5 m magasságban van, ha a vizet a fal alulról szívja fel. A magas nedvességtartalom számos más problémát is okozhat. Jelentős térfogatnövelő hatása van a fagyás-olvadás ciklusoknak, de egyes sók is térfogat növekedésre igen hajlamosak. A sók jelenléte szinte minden esetben térfogat növekedést okoz, ami növeli a porozitást és szilárdság csökkenést eredményez. A nedvességmérést függőleges falazatok esetében több magasságban (Jellemző mérési pontok: 0,2, 0,5, 1,0, 1,5 és 2,0 m) végezzük, amennyiben grafikonon ábrázoljuk a mérési eredményeket meghatározható a nedvességterjedés módja és a „*rising damp*” jelenség igazolható [98] [99]. A jelenséget első sorban a Fekete Sas Szálló (3.1.2 pont) pince falazatán elvégzett mérésekkel tudtam vizsgálni. A telített állapotú habarcs eltérő jellemzőiket mutat, ezért a telített állapotú mintákhoz egy külön mérési sorozatot készítettem.

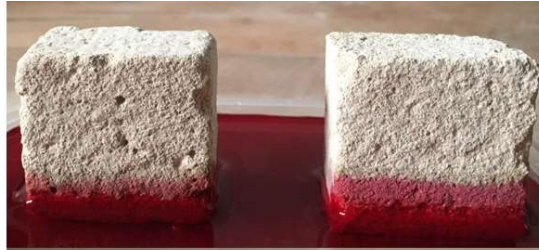
A mélységi és a felületi nedvességtartalom mérése segít meghatározni a szerkezet állapotjellemzőit, valamint a nedvességtartalom változása segít felderíteni a kiváltó okokat. (Pl.: Magasabb belső nedvességtartalom pincefalazatnál a függőleges szigetelés hibájára vezethető vissza.) A különböző típusú habarcsok – részben a porozitás miatt – eltérő vízfelszívási paraméterekkel rendelkeznek. A 40. ábrán jól látható, hogy az AS jelű kis szilárdságú mészhabarcs és a CEM II jelű cementhabarcs vízfelszívása. A vízfelszívási vizsgálatot színezett desztillált vízzel végeztem. A vízfelszívási képesség a mikro porozitás és az adalékanyag – kötőanyag mátrix mértékére is utal. Az alacsonyabb szilárdságú mészhabarcs kezdeti vízfelszívása gyorsabban ment végbe. A vízben oldott anyagok a pórusokban „megülnek”, a károsító sók a nedvességtartalom csökkenését követően kiterjedt kristályok mátrixot hoznak létre, a későbbiekben pedig vízmegkötő higroszkopikus góccok alakulnak ki. A jelölt minták estében a nedvességtartalom hatására kialakult szilárdságcsökkenést is vizsgáltam.

Légszáras egyensúlyi nedvességtartalommal és teljesen telített, 100%-os nedvesség tartalmú minták szilárdsági eredményeinek összehasonlítását a 28. táblázat tartalmazza. A teljesen telített állapotot a minták 48 óra időtartamú zárt tartályban történő vízben áztatásával értem el.

<i>Minta jele</i>	<i>Teljesen telített minta szilárdsága (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Egyensúlyi nedvességtartalom esetén a minta szilárdsága (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Szilárdságcsökkenés</i>
<i>AS</i>	0,07	0,28	75%
<i>CEM II</i>	0,87	1,20	28%

28. táblázat: Szilárdságvizsgálati eredmények

1 perc



5 perc

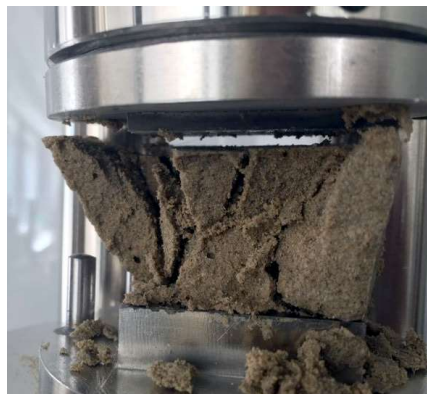


10 perc



40. ábra: AS jelű mészhabarcs (bal oldalon) és CEM II jelű cementhabarcs (jobb oldalon) vízfelszívása az idő függvényében (saját felvételek)

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a „közel nulla szilárdságú” mészhabarcsok nyomószilárdsága teljesen telített állapotban akár 75%-kal is csökkenhet, szemben a cementhabarcs kötőanyagú mintákkal, amelyek szilárdságcsökkenése jellemzően csak 28%. A vizsgálat során a mészhabarcsok eltérő alakváltozási jellemzői is megmutakoztak. A telített minták nagymértékű összenyomódása (5-10%-os magasságcsökkenés  $\Delta h_{\max} = 4$  mm) hasonló a terhelt vízzel telített talajok képlékeny viselkedéséhez. A terhelés alatt deformálódott mintakocka törésképét a 41. ábra mutatja.



41. ábra: Terhelés hatására deformálódott vízzel telített próbakocka (saját felvétel)

A nedvességváltozás hatása a falazatszilárdságra jellemzően degradáló jellegű. Ugyanakkor nem csak az idő függvényében kialakuló fagyás-olvadás [100], vagy sóterhelés hatása miatt, hanem önmagában a vízzel telített állapotban bekövetkező alakváltozási jellemzők változásának okán. Egyik fontos konklúziója a kísérletnek, hogy a nedvességtartalom falazaton belüli változékonysága a szilárdság variabilitását is növeli, így szilárdsághoz tartozó szórásértéket a nedvességváltozás függvényében is növelni szükséges.

## 5.5 Mikroszkopikus vizsgálatok

A habarcsok, de általában az építőanyagok, makroszkopikus fizikai tulajdonságai jelentős mértékben összefüggnek a mikro szerkezeti jellemzőkkel. Ezeket a mikro strukturális jellemzőket fizikai és kémiai szerkezeti tulajdonságokat általában roncsolásos módszerekkel – mint amilyenek a különböző típusú mikroszkópos módszerek – tudjuk vizsgálni, bár a töréstechnikától eltérően, ebben az esetben a szükséges minta mennyiség jellemzően sokkal kisebb (néhány milligrammtól néhány grammig).

A keverési arány és a kötőanyag mennyiség alapvetően meghatározza a habarcs szerkezeti jellemzőit, közvetve pedig a szilárdságot [101]. Az elvégzett terepi mikroszkópos, polarizációs mikroszkópos és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok az állapotértékelő minősítéséhez adnak egy-egy mérhető értéket. A mikroszkopikus szerkezeti struktúra és a szilárdsági jellemzők közötti összefüggés igazolásához a rendelkezésre álló kontrollmintákat és meglévő szerkezetekből kiemelt mintákat három – később részletesen is bemutatott – különböző típusú mikroszkóp segítségével vizsgáltam. A 29. táblázat a három eszköz főbb paramétereit és alkalmazhatóságát foglalja össze.

<i>Technikai paraméterek</i>	<i>Terepi mikroszkóp (Levenhuk DTX 500 Mobi)</i>	<i>Polarizációs mikroszkóp</i>	<i>Pásztázó elektronmikroszkóp (VEGA 3 SEM)</i>
<i>Alkalmazott részecskenyaláb</i>	fény	polarizált fény	elektron
<i>Alkalmazott nagyítás</i>	4-50x	25-200x	80-2000x
<i>Nagyítást végző egység</i>	nagyító lencsesor	1 Nikolos/ keresztezett Nikolos fényforrás	SE detektor
<i>Vizsgált minta mérete</i>	felület 1 cm alatt (akár kiemelés nélkül)	felület min. 4 cm (előkészítést igényel)	felület 0,5 cm alatt
<i>Látott kép színsprektuma</i>	valós	valós/ interferencia színek	szürke (kifehéredő)
<i>Habarcsminta vizsgálata során látható jellemzők</i>			
<i>Szövetszerkezet</i>	látható	jól látható	x
<i>Porozitás</i>	x	igen jól látható	igen jól látható
<i>Makroszkopikus repedések</i>	látható	x	x
<i>Mikroszkopikus repedések</i>	x	látható	igen jól látható
<i>Adalékanyag típusa</i>	látható	igen jól látható	csak különleges adalékanyagok
<i>Károsító sók jelenléte/ típusa</i>	x	x	igen jól látható
<i>Kötőanyag típusa</i>	x	látható	x
<i>Kötőanyag/ adalékanyag aránya</i>	látható	jól látható	x
<i>Adalékanyag szemcseszerkezete</i>	x	igen jól látható	x
<i>Biológiai károsítók (gombák)</i>	x	x	jól láthatóak

29. táblázat: Eltérő típusú mikroszkópos vizsgálatok alkalmazhatósága habarcsok esetén



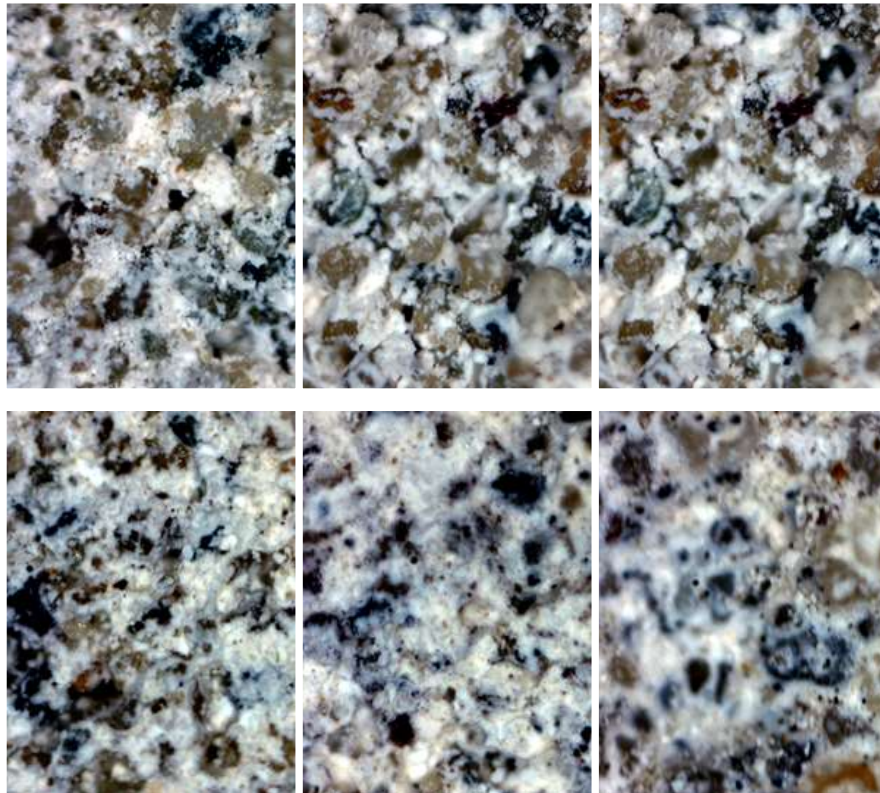
### 5.5.1 Mikroszkopikus vizsgálatok: hordozható, terepi mikroszkóp

Tapasztalataim szerint a terepi optikai mikroszkóp akkumulátorának és kis méretének köszönhetően különösen alkalmas volt a helyszíni vizsgálatok elvégzésére, (42. ábra). Az eszközzel maximálisan 500x-os nagyítás érhető el. A főbb anyagi jellemzők mellett alkalmas a szerkezeteken található repedések vizsgálatára és monitorozására. Szükség esetén a repedéstágasság tizedmilliméter pontossággal megállapítható, bár e funkció leginkább a vasbeton szerkezetek vizsgálatánál előnyös.



42. ábra: Terepi mikroszkóp (saját felvétel)

A terepi mikroszkóppal a helyszíni vizsgálatok kalibrálásához a kontroll mintákról egy felvételsort készítettem, melyet a 43. ábra mutat. A felvételek összehasonlíthatók voltak ismert összetételű habarcsmintákkal, így az összetétel (kötőanyag aránya) és az adalékanyag típus is becsülhető volt. A felvételeken továbbá jól láthatók olyan makroszkopikus jellemzők, mint a repedések vagy nagyobb méretű pórusok.

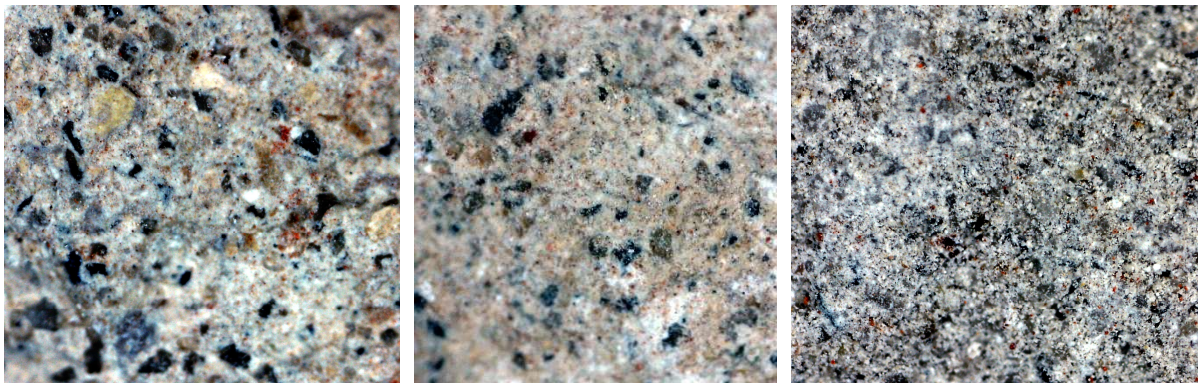


43. ábra: Kontroll mintasor vizsgálata terepi mikroszkóppal (felső sorban balról jobbra: AS, S2, S3, alsó sorban balról jobbra: H4, CEM, CEM2, saját felvételek)



Falazatok vizsgálatának esetében az eszköz elsősorban a habarcs és az adalékanyag típusának meghatározására, valamint a habarcsminta általános állapotának jellemzésére alkalmas. Detektálhatók a nagyobb méretű adalékanyag szemcsék és mészzárványok. A helyszínen meghatározható az ugyanazon szerkezetben, de más-más helyen lévő habarcsok azonos vagy eltérő volta. Az eszköz segíti a mintavételi pontok számának meghatározását, hiszen az eltérő habarcs összetételre a helyszínen fény derül, így szükség esetén a mintaszámot kellő mértékben meg lehet növelni, vagy adott esetben csökkenteni.

A meglévő szerkezetből kiemelt minták közül legeredményesebben a vasúti hídszerkezetekből (3.1.5 pont) kiemelt habarcsmintákat tudtam vizsgálni. Az egyik boltzott híd két különböző feltárási helyéről a boltváll esetében két különböző mélységből származó mintákat vizsgáltam a terepi mikroszkóppal. A minták szöveti képét a 44. ábra mutatja. Elsősorban az eltérő tulajdonságait tudtam összehasonlítani. Az összetétel és az egyéb jellemzők variabilitását ez alapján nagyságrendileg meg tudtam határozni. A fizikai jellemzők alapján a szilárdsági jellemzők változására is következtettem.



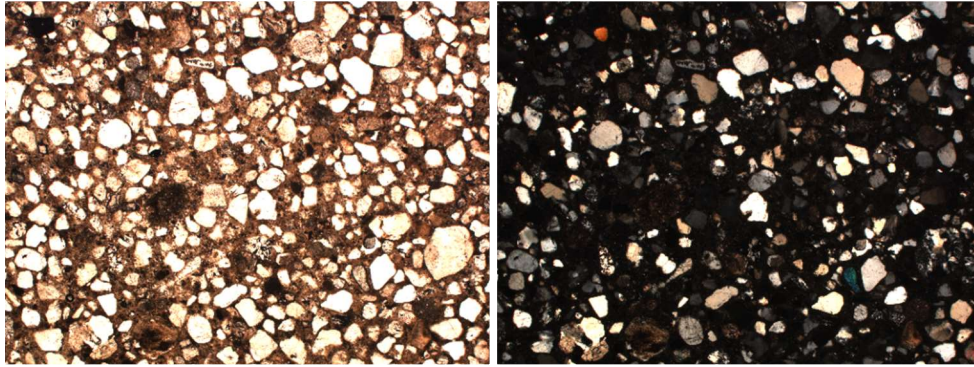
44. ábra: Boltzott híd habarcsvizsgálata terepi mikroszkóppal (bal oldalon: szárnyfal, középen: boltváll belső, jobb oldalon: boltváll külső habarcsminta képe, saját felvételek)

A szöveti képen jól látható, hogy a boltvállból kiemelt belső minta eltérő kötőanyagú, mészhabarcs, várhatóan alacsonyabb szilárdságú. Az összetétel – keverési arányok – tekintetében is találtam különbséget. A szárnyfalból származó minta adalékanyag mennyisége nagyobb. Egyértelműen megállapítható, hogy a boltvállból származó külső cementhabarcs minta, valószínűsíthetően újra fugázás során beépített modern anyag, mely várhatóan magasabb, legalább  $3 \text{ N/mm}^2$  szilárdságú.

### 5.5.2 Mikroszkopikus vizsgálatok: polarizációs (fény) mikroszkóp

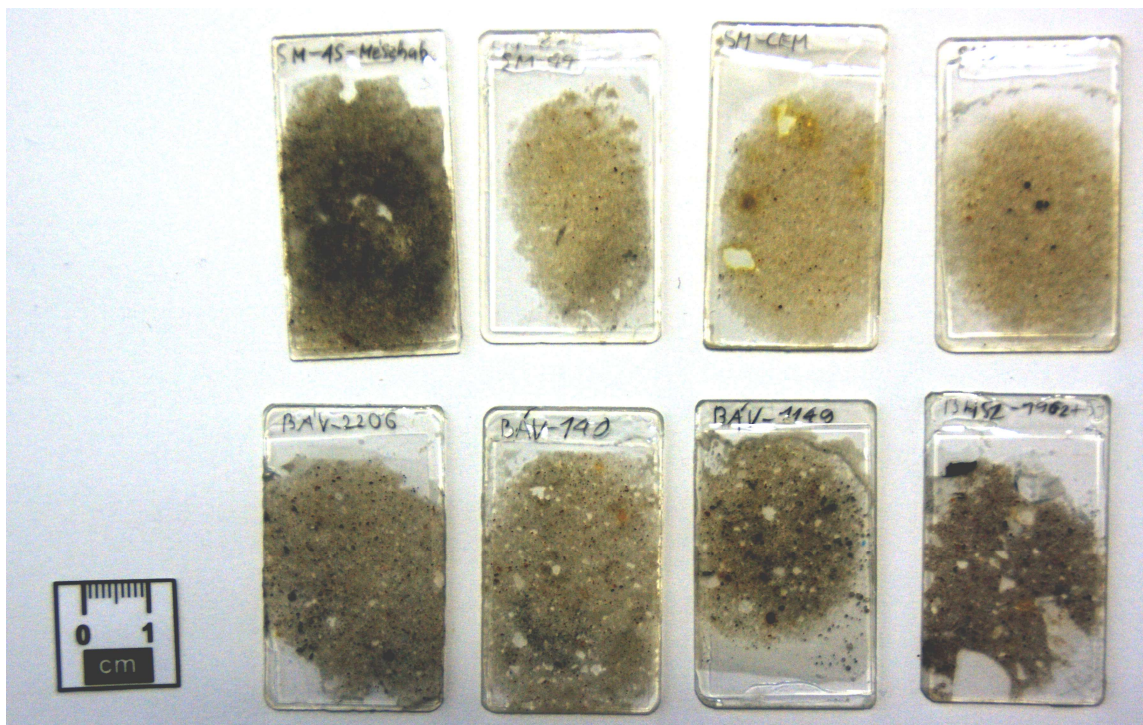
A polarizációs mikroszkóp két polarizációs szűrővel felszerelt fénymikroszkóp. Az ilyen típusú mikroszkóp két irányba képes polarizálni a fényt, így két külön egységgel lehet a mintákat vizsgálni. Amennyiben csak egy egységgel kerül megvilágításra a minta, akkor az úgynevezett 1 Nikolos kép jön létre (XPL= „cross polarized light”). Ha mindkét egységgel megvilágítjuk a mintát, akkor keresztezett fény „alatti” vizsgálatról (PPL= „plane polarized light”) beszélünk. A vékonycsiszolatok polarizációs mikroszkópos vizsgálatához (PLM) alsó megvilágítás szükséges. Az átmenő fényben észlelt színek eltérnek a szabad szemmel látottaktól (interferencia színek) [102].

Az 1 Nikolos vizsgálat esetén a látott képen az ásványok saját színsprektumát, keresztezett fényben vizsgálva pedig az interferencia színeket látjuk (habarcs minta esetén sötétebb árnyalatok). Egy 1 Nikolos és egy keresztezett Nikolos vizsgálat során kapott képet a 45. ábra mutat [103].



45. ábra: CEM jelű minta 1 Nikolos és keresztezett Nikolos képe (saját felvétel)

A vizsgálathoz a minták megfelelő technológiával történő előkészítése szükséges. Habarcok esetében, mivel puha, könnyen széteső anyagok, fűrészeléssel, reszeléssel, dörzsöléssel, töréssel kell kialakítani a felületet. A teljes mintadarab kiszárítása, előmelegítése szükséges legfeljebb 50 °C-on. Amennyiben a minta törékeny, porózus a felragasztandó felület szilárdítására, átitatásra van szükség. A durvaszemcsés anyagoknál tiszta műgyantával, finoman porózus mintánál pár csepp alkohollal hígított műgyantával történik az átitatás. A mintadarabból vékony (0,5-1 cm) szelet kialakítása szükséges, vízben mállékony anyag esetében száraz vágással. A levágott minta egyik felét nagyon simára kell csiszolni (jellemző a SiC csiszolópor használata). Csiszolás után a minta mosása, szárítása szükséges. A mintákat tárgylemezre ragasztjuk és szárítjuk. Miután a gyanta szilárdra kötött, a minta tartósan rögzült a tárgylemezhez levágjuk kb. 250 µm vastagságig (46. ábra) [104].



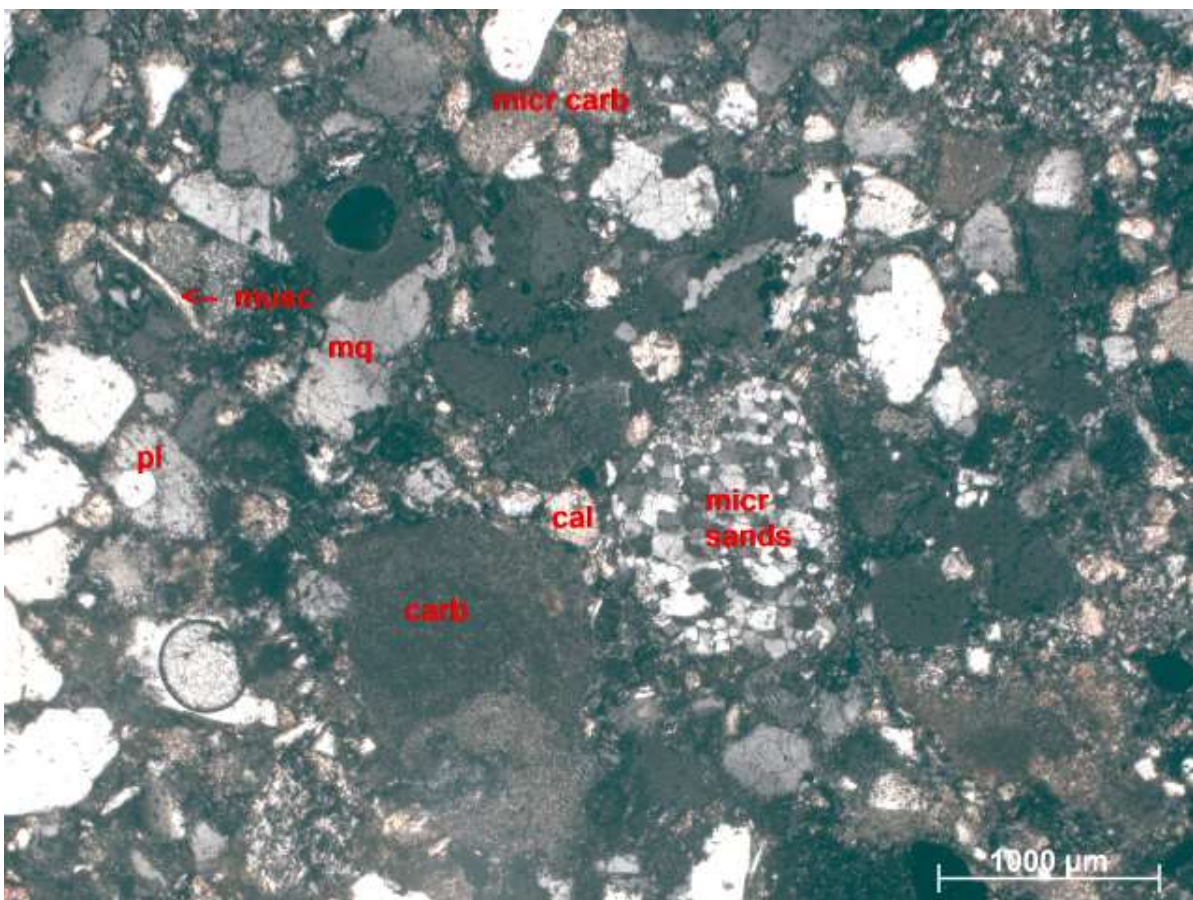
46. ábra: Polarizációs mikroszkópos vizsgálathoz előkészített tárgylemezek (saját felvétel)

A csiszolatokról készült felvételeken meghatározhatók az adalékanyag alkotó ásványai [105]. A 47. és 48. ábrán több vizsgált minta ásványait jelöltem. A jelölésrendszerhez tartozó jelmagyarázatot a 30. táblázat tartalmazza. A kontroll minták csiszolatain az adalékanyag (bányahomok) közepesen osztályozott, nagyon jól koptatott, áthalmazott homok az uralkodó szemcseméret 100 µm [104]. A mikrites szemcsék nem oltódott mészre utalnak (túl nagy mennyiségű kötőanyag) [105].



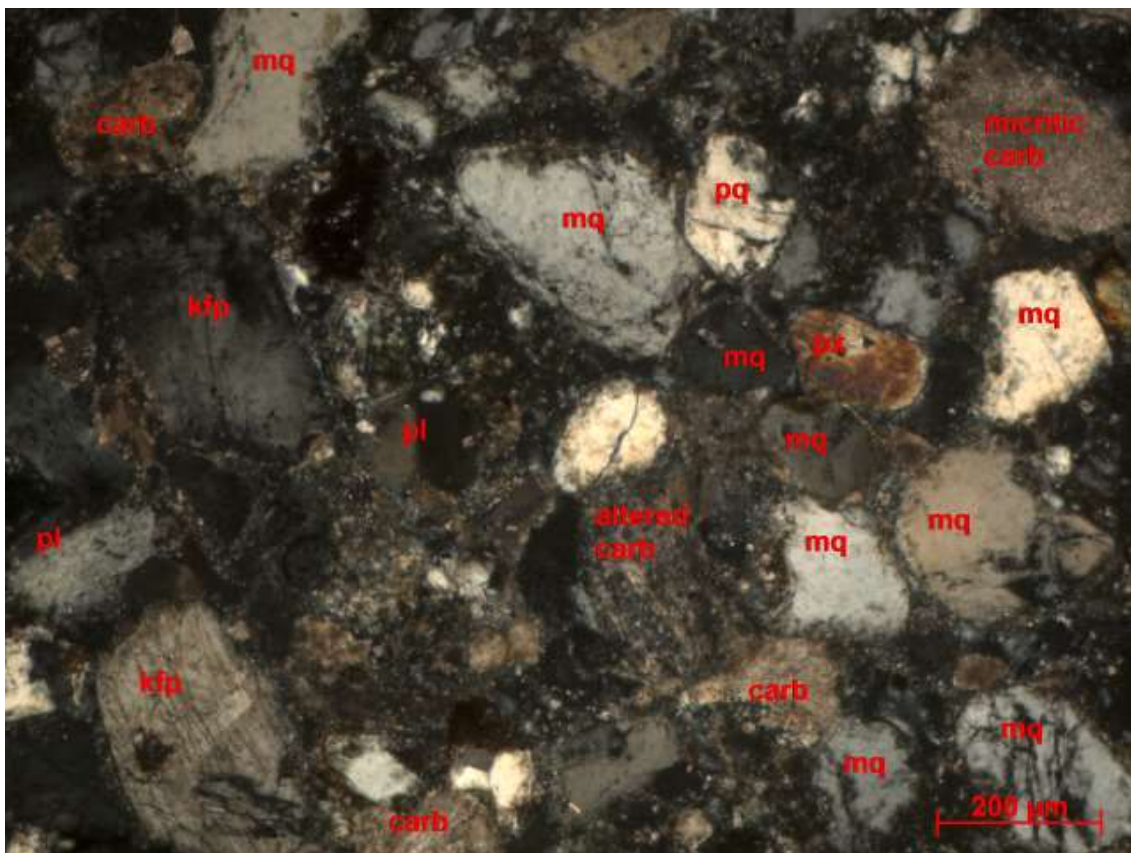
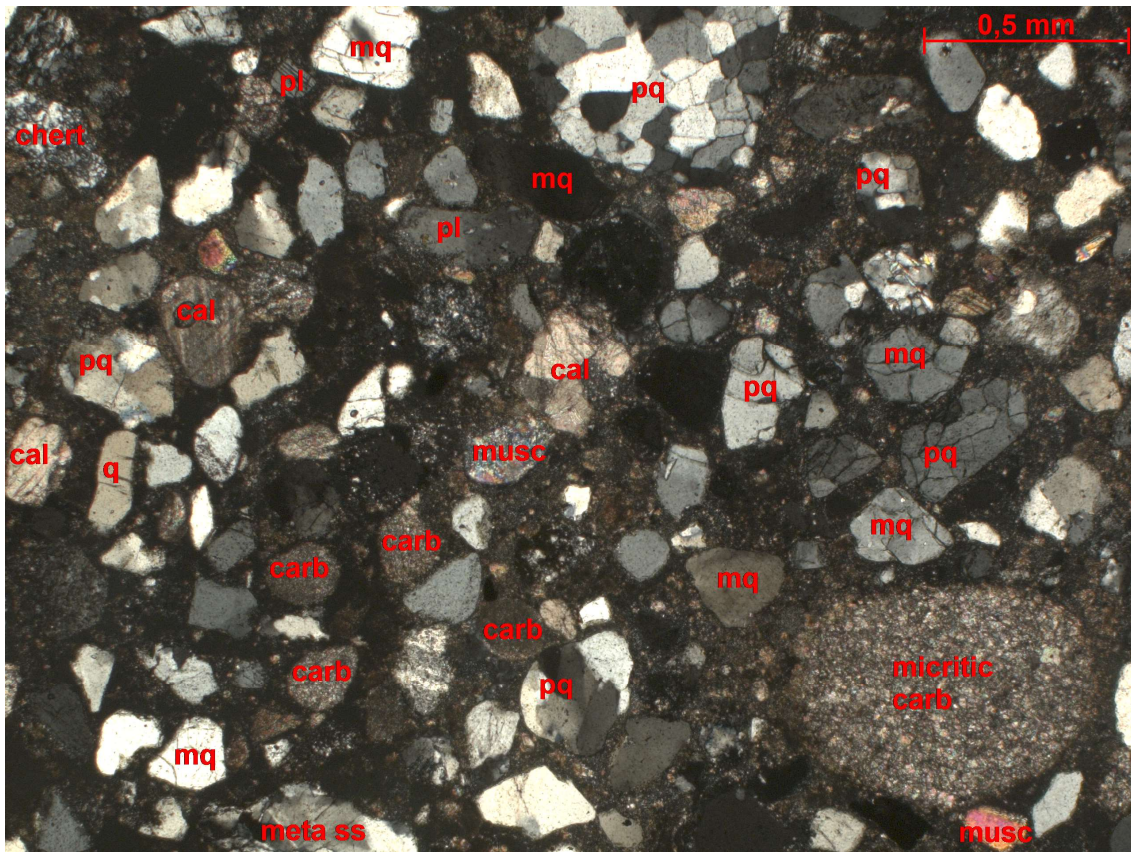
<i>Jelölés</i>	<i>Megnevezés</i>
<i>altered carb</i>	átalakult karbonát ásvány
<i>cal</i>	kalcit
<i>carb</i>	kalcium karbonát ásvány, meszes kiválás
<i>chert</i>	tűzkő
<i>kfp</i>	káliföldpát
<i>micritic carb</i>	mikrites szövetű karbonátásvány, meszes kiválás
<i>meta ss</i>	metahomokkő
<i>micr sands</i>	mikrokristályos homokkő/metahomokkő
<i>mq</i>	monokristályos kvarc
<i>musc</i>	muszkovit (csillám)
<i>pq</i>	polikristályos kvarc

30. táblázat: Jelmagyarázat a csiszolatokon látható ásványok azonosításához



47. ábra: Habarcsminta csiszolat az alkotó (jelölt) ásványokkal (Budapesti kereskedelmi épület első emeleti falazatból kiemelt habarcsminta, saját felvétel)





48. ábra: Kontroll habarcsminta csiszolatok az alkotó (jelölt) ásványokkal (felül H4 jelű, alul AS jelű kontroll habarcsminta, saját felvételek)



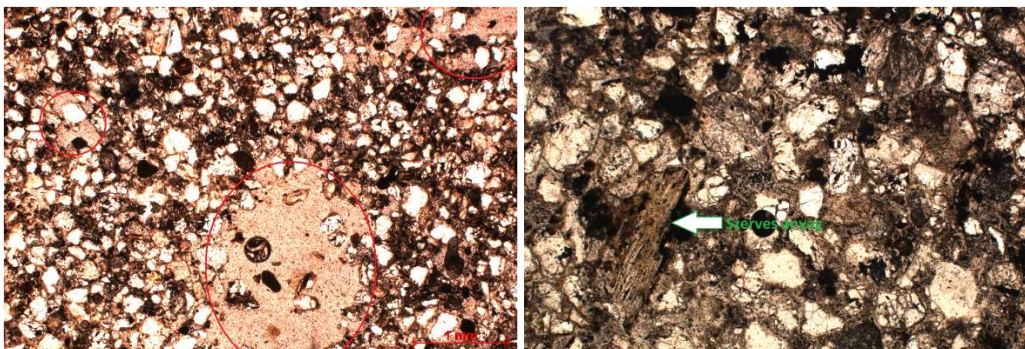
A csiszolatokon detektálható jelenségek közül jelentős a gipszesedés. A gipszesedést okozhatja a portlandcementhez kötőanyagként adagolt gipszkő jelenléte [106], vagy gyakrabban az, hogy a mészhabarcok kalcium-karbonát kötőanyaga a csapadékvíz és a levegő bármely savas összetevőjével reakcióba lép és így a megfelelő savak sói képződnek. A kalcium-karbonát átalakul kalcium-szulfáttá (gipsz), ami aztán jelentős térfogat-növekedés kíséretében kikristályosodik. A beoldódás és a kikristályosodás folyamata állandóan ismétlődik, ezt hívják gipszesedésnek. Az ilyenkor keletkező gipsz minden alkalommal 100%-os térfogat-növekedést mutat [107].

A 49. ábra a boltozott vasúti híd (3.1.5 pont) szárnyfalából kiemelt habarcsmintában kialakult gipszesedést mutatja. A falazat felszínén gyakran ugyan még nincs jele a gipszesedés folyamatának, mégis fennállhat mély, anyagszerkezeti károsodással együtt járó gipszkéreg képződés. A jelenség előrehaladott állapotban rétegleválást okoz. A habarcscok részletes állapotvizsgálását gipszesedés szempontjából csak mikroszkópos vizsgálatok értékelésével végezhetjük el, erre legalkalmasabb a polarizációs mikroszkópos felvétel elemzése.



49. ábra: Gipszesedés boltozott híd szárnyfalából kiemelt habarcsmintán (saját felvétel)

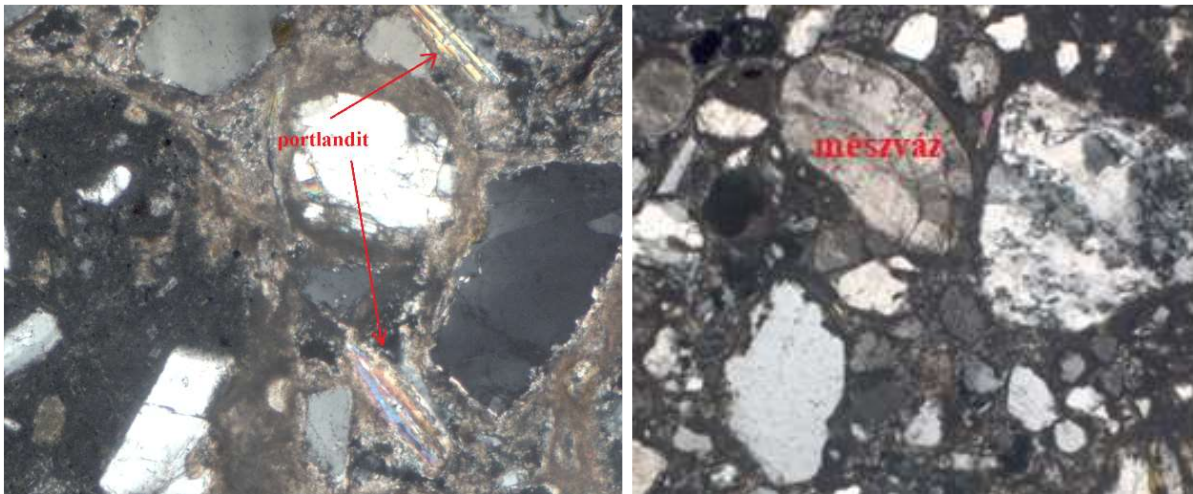
A csiszolatok vizsgálata során a pórusok [108] és szerves anyagok jelenléte is egyértelműen megállapítható. A 50. ábra a látható jellemzők közül mutatja be a szilárdságra leginkább hatással levőket.



50. ábra: AS jelű mintáról készült mikroszkópos felvételek – légpórusok és szerves anyag jelenléte (saját felvételek)

A cement tartalmú habarcscokban fellelhető a portlandit, ami a cement hidratációja során keletkező kalcium-hidroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) [106]. Abban az esetben, ha a csiszolatban detektálható, biztosan cementtartalmú habarccsal állunk szemben.

Az adalékanyag típusa is meghatározható, például a folyami homok adalékanyag esetén a mészváz maradványok jelenléte. Az 51. ábra a budapesti kereskedelmi épületből (3.1.3 pont) kiemelt mintáin beazonosítható portlanditot és mészvázat mutatja.



51. ábra: Budapesti kereskedelmi épületből kiemelt mintán beazonosítható portlandit (bal oldalon, saját felvétel) és üledékes homok adalékanyagból származó mészváz (jobb oldalon, saját felvétel)

### 5.5.3 Mikroszkopikus vizsgálatok: pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat (SE detektor)

Az ismertett mikroszkopikus vizsgálatokkal a habarcsok számos jellemző tulajdonságát meg tudjuk határozni, azonban vannak olyan jellemzők, melyek csak nagyobb nagyítással érzékelhetők. A rendelkezésre álló eszközök közül a legnagyobb nagyítást elektronmikroszkóppal tudtam elérni.

A vizsgálathoz használt eszköz egy VEGA 3S SEM típusú, SE (szekunder elektron) detektorral felszerelt elektronmikroszkóp (52. ábra). A vizsgált habarcs – illetve falazóelem – minták nem vezető anyagok, így az elektron ágyú intenzitást csak 11 kV feszültségig tudtuk emelni. A magasabb feszültségi szinteken elérhető 10-20.000x nagyítás. A minták felületét a jobb vezetőképességhez grafit vagy aranyréteggel lehet bevonni [109].

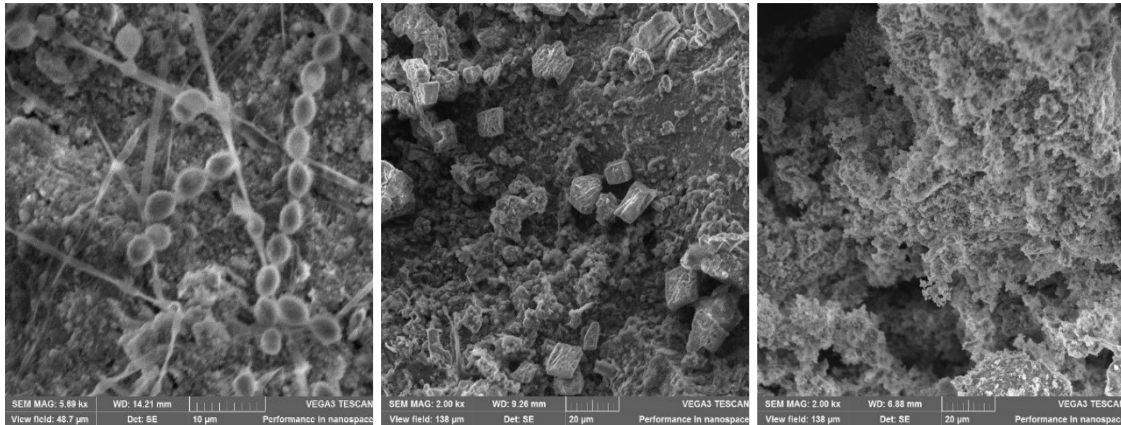


52. ábra: VEGA 3S elektronmikroszkóp (saját felvétel)

Az AS és a CEM II jelű kontroll minta vizsgálata mellett számos kiemelt mintán is végeztünk mérést. Az elvégzett vizsgálatok a bevonat hiánya ellenére is elegendő információval bírtak. A jellemző alkalmazott nagyítás 200x-2000x volt, a mérést alacsony feszültséggel – jellemzően 5kV – végeztük el.

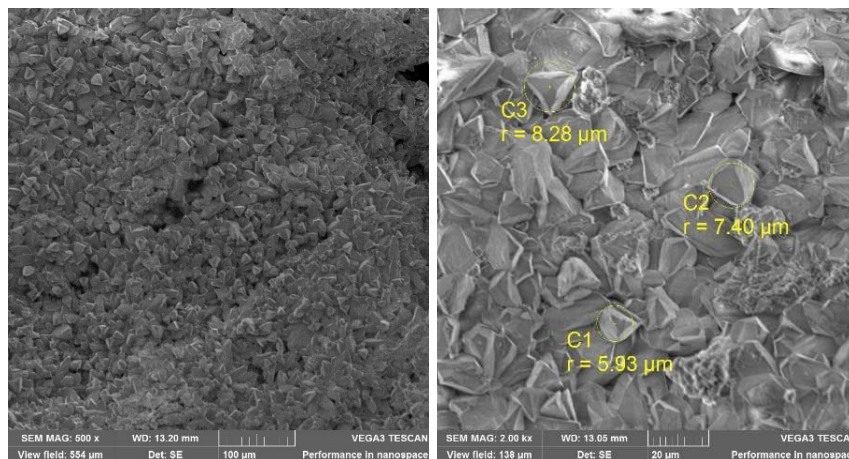


A 3. fejezetben bemutatásra külön nem került, de vizsgált vasút hídszerkezetekből és a Fekete Sas Szálló épület pincefalazataiból származó minták vizsgálata során biológiai károsítók és különböző típusú sók jelenlétét is tudtam igazolni (53. ábra). A sóterheltség mértéke a felületen látható kristályok mennyiségéből közelítően becsülhető [109]. A sók jelenlétének igazolása és a telítettség mértékének meghatározása a tartószerkezetek vonatkozásában nem csak esztétikai szempontból lényegesek [110]. Számos esetben áll fenn a sóterheltség miatti jelentős károsodás.



53. ábra: Habarcsminták elektron mikroszkópos vizsgálata (bal oldalon: Fekete Sas Szálló pincefalazatából származó mintán látható gombafonalak, közepén: sóterhelt habarcsmintán klorid só, jobb oldalon: szulfát só, saját felvételek)

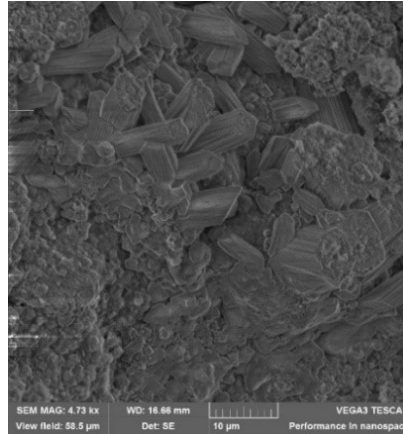
A porozitás, pórusméretek feltérképezése mellett különleges adalékanyagok, mint például a dolomit őrlemény mikroszerkezete is vizsgálható. Az 54. ábrán látható felvételek egy bakonyi boltozott vasúti hídból származó habarcsmintáról készültek. A vizsgált habarcs anyagösszetétel elemzése (XRF vizsgálat, ld. 5.6.2 pont) alapján igazoltan dolomitot tartalmaz.



54. ábra: Dolomit adalékanyagú habarcs elektronmikroszkópos képe (saját felvételek)

A gipszesedés jelenségét a polarizációs mikroszkópos vizsgálatok során már részleteztem. A gisztartalom, illetve a cement hidratációs folyamatának eredménye az ettringitte kristályképződés jelensége is, amely elektronmikroszkóppal látható jellemző. A cement tartalmú habarcsban a monoszulfát (jellemzően külső szulfátforrás hatására) ettringitté alakul, mely jelentős mértékű térfogatnövekedéssel jár, ezt a jelenséget nevezzük szulfátkorrózióknak [106] [111]. Az 55. ábra ettringitte kristályokat mutat elektronmikroszkópos felvételen, közel 5000x nagyítással.





55. ábra: Ettringite kristályok elektronmikroszkópos felvételen (saját felvétel)

A mikroszkopikus jellemzők – anyagösszetétel, károsító tényezők, előrehaladott állapotromlási folyamatok – alapján meghatároztam egy állapotjellemező mérőszámot. A pontrendszerhez tartozó paramétereket a 31. táblázat részletezi. A pontszámok alapján a célirányos diagnosztikai vizsgálatok kiválasztásához a szilárdság várható maximális értékének meghatározásához kapunk segítséget, illetve a pontszám megad egy a habarcs állapotára vonatkozó mutatószámot.

<i>Habarcs és kötőanyagának típusa</i>	<i>Mészhabarcs (mész)</i>	<i>Javított mészhabarcs (mész és cement)</i>	<i>Cementhabarcs (cement)</i>
	2	1	0
Porozitás	1mm-nél nagyobb pórusok	1 mm alatti pórusok	nincsenek pórusok
	2	1	0
Károsító sók	összefüggő felületen	elszórt kristályok	nincs jelen
	2	1	0
Biológiai károsítók	jelen van		nincs jelen
	2		0
Adalékanyag	folyami homok	bányahomok	tégla/kő őrlemény
	0	1	-2
Kötőanyag-adalékanyag arány	kevés kötőanyag mennyiség az adalékanyaghoz képest	tömött szöveti kép	kötőanyag mennyisége több a kötőanyaghoz képest (mikrites szemcsék)
	2	0	-1
Szerves anyag	jelen van		nincs jelen
	2		0
Várható szilárdság	0,3-3 N/mm <sup>2</sup> között	0,8-3 N/mm <sup>2</sup> között	1,5 N/mm <sup>2</sup> felett
Pontszám	5 felett	5-3 között	3 alatt
Ajánlott pontosító vizsgálat	penetrométer vizsgálat, pecsétnyomás vizsgálat, pH mérés	penetrométer vizsgálat/fürt mintavétel a pontos szilárdságérték meghatározáshoz	nem szükséges/ fürt mintavétel a pontos szilárdságérték meghatározáshoz

31. táblázat: Mikroszkópos vizsgálat látható tulajdonságaihoz tartozó minősítő pontrendszer az ajánlott vizsgálatokkal és a várható szilárdsági értékekkel kiegészítve

## 5.6 Kiegészítő és kémiai vizsgálatok

Lényeges, hogy a szerkezeteknek ne csak a legkülső, látható réteget vizsgáljuk. Az eltérő környezeti hatások a belső rétegeket ugyan nem érik, de a külső rétegekben megváltozott mikrostruktúra a belső rétegekben is változásokat eredményezhet. Esetenként az is jellemző lehet, hogy a jobb minőségű anyagokat csak a látszó, külső rétegnél alkalmazták, a belső rétegekben rosszabb minőségű anyagokat alkalmaztak. Az építéstechnológia sem minden esetben precíz, alapos (pl.: eltérő a fugavastagság). A későbbi javítások, felújítások miatt, mint az újra fugázás, falazóelem pótlás okán eltérő mechanikai jellemzőkkel rendelkező anyagokat is találhatunk. A kiegészítő vizsgálatok segítenek ezen anomáliák felderítésében.

### 5.6.1 Kémiai vizsgálat: pH mérés

A pH érték meghatározását építőanyag vizsgálatokhoz első sorban betonok esetében a betonacél korrózió mértékének becslésére alkalmazzák, tájékoztató jellemzőként. A pH egy kémiai mennyiség, amely egy oldat kémhatását jellemezi. Híg vizes oldatokban a pH egyenlő az oxóniumion-koncentráció tízes alapú logaritmusának ellentettjével. Az oldatok kémhatása a következőképpen alakulhatnak: savas: pH: 0-7, semleges: pH=7, lúgos: pH: 7-14. A pH értéket indikátorokkal, vagy digitális pH-merőkkel lehet meghatározni [112].

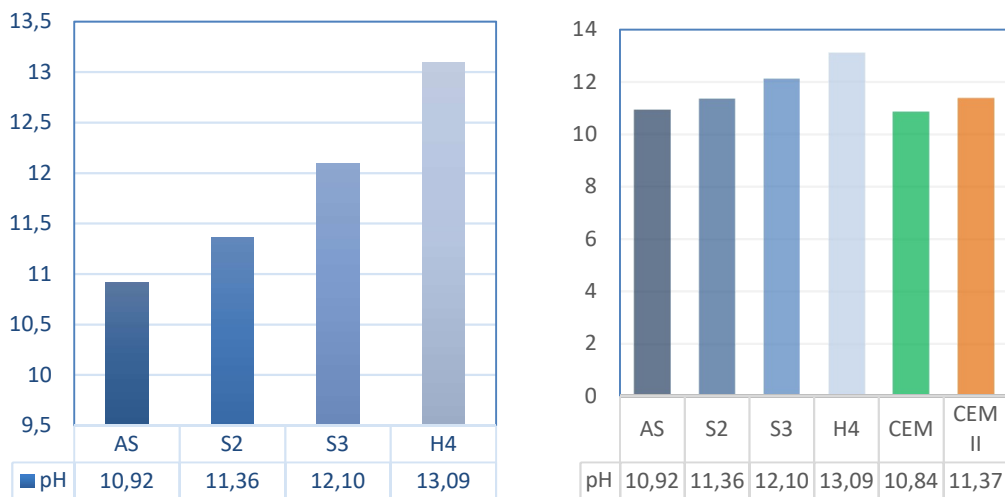
A vizsgálatok során Adwa 132 terepi pH mérőt használtam, melynek kialakítását az 56. ábra mutatja. Az eszközben a pH érték megállapításához szükséges két elektróda egy kimenetben van integrálva, míg egy másik adapter hőmérsékletmérésre szolgál. Az integrált két elektróda közül az egyik pH-érzékeny a másik pedig állandó értéket mutat bármilyen pH-értékű oldatban (referencia elektróda). A pH-érzékeny membránnak köszönhetően, a két elektróda között a pH-értékkel változó potenciálkülönbség alakul ki, amelyet a mérőműszer elektronikája mér és pH-egységben a kijelzőn megmutat, ezáltal nagy pontossággal meghatározható az oldat kémhatása [112] [113].

A vizsgálatokat falazóhabarcs és desztillált víz szuszpenziójának mérésével végeztem. A pH érték a habarcs mésztartalmát – meghatározott összefüggés alapján – jellemezi. A mésztartalom és a szilárdság kapcsolata szintén ismert [114], így a vizsgálat alkalmas közvetve az alacsony szilárdságú (mész-) falazóhabarcsok mechanikai jellemzőinek meghatározásához.



56. ábra: Adwa 132 terepi pH mérő (saját felvételek)

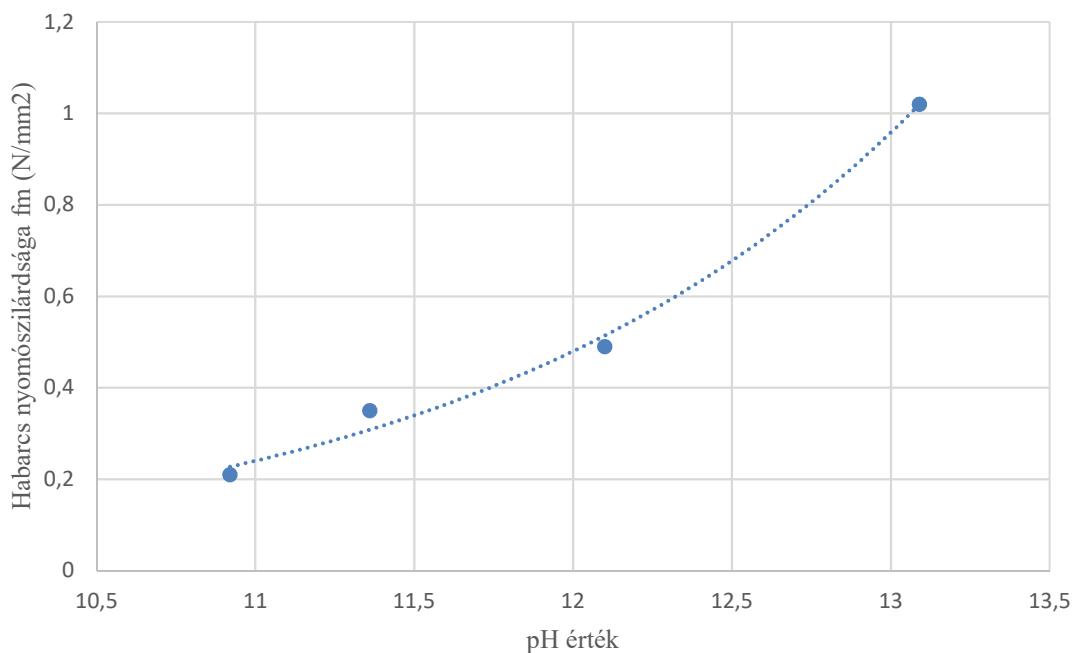
A vizsgálati eredményeket az ismert összetételű habarcsokon 3-3 mérés átlagértékeként tüntettem fel az 57. ábrán.



57. ábra: Vizsgált habarcsok pH értékei

A mész kötőanyagú habarcsok pH értékei a mésztartalommal egyenes arányban változnak. A pH érték tehát a mésztartalom tömeg%-ára (m%) ad közelítő becslést. A 6 m% mésztartalmú habarcsok pH értéke ~11, a 12 m% mésztartalmú minták 13 feletti pH értéket mutatnak. A mésztartalom összefüggés javított mészhabarcsok esetében is helytálló, de az érték a cementtartalmat nem jellemezi.

A habarcs nyomószilárdság – pH érték kapcsolatát az elvégzett mérésorozatra vonatkozóan az 58. ábra pontjaira illesztett görbe mutatja.

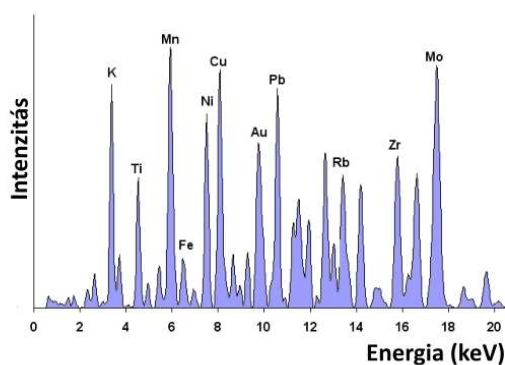


58. ábra: Mészhabarcs kontroll minták pH érték – szilárdság vizsgálati eredményei

### 5.6.2 Egyéb kiegészítő vizsgálat: XRF mérés

A röntgen-fluoreszcencia spektroszkópia (XRF – X-ray fluorescence spectroscopy) egy roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer, amely elemi összetétel meghatározására alkalmas. A módszer roncsolásmentes, semmilyen nyomot nem hagy a mintán. Az alkalmazott röntgensugárzás ionizálja az atomot, a nagy energia miatt általában egy alacsonyabb energiájú héjon lévő elektron hagyja el az atomot. Az így keletkező űrt egy magasabb energiájú külső héjról

származó elektron foglalja el. Miközben ez kisebb energiájú szintre lép, sugárzás formájában leadja a felszabadult energiát. Mivel a vakancia lényegében nem szűnik meg, hanem csak egy felsőbb elektronpályára vándorol, ezért azt kaszkádszerűen további elektronátmenetek fogják követni, és mindegyikről sugárzás fog származni, míg az utolsó is visszarendeződik. A különböző atomok különböző elektronátmeneteinek különböző hullámhosszúságú sugárzások felelnek meg, melyet karakterisztikus röntgensugárzásnak hívunk. A folyamatot pedig a röntgen-fluoreszcenciának [115]. Egy tipikus röntgen fluoreszcencia spektrumot mutat az 59. ábra.



59. ábra: Egy tipikus röntgen fluoreszcencia spektrum [116]

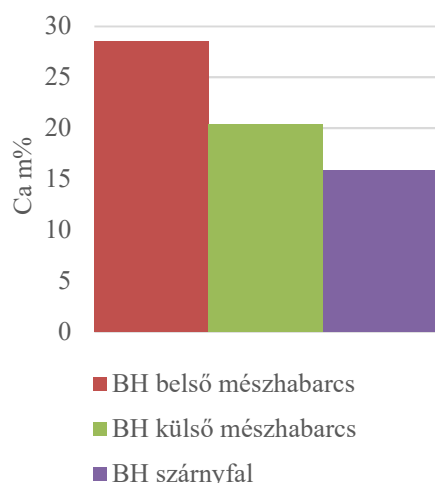
Az XRF módszer során keletkező karakterisztikus sugárzás energiája (a spektrumcsúcsok energiája vagy másképpen hullámhossza) jó közelítéssel csak az elem rendszámától függ. Az eljárás nagy biztonsággal a magnéziumnál nagyobb rendszámú atomok tömegszázalékos mennyiségét tudja érzékelni.

Az anyag elemi összetételben mutatkozó különbségek kimutatására alkalmas módszert meglévő boltozott vasúti hídszerkezetekből (3.1.5 pont) kiemelt minták vizsgálatára alkalmaztam.

A „BH” külső jelű mészhabarc a boltváll külső rétegéből, a „BH” belső jelű mészhabarc a boltváll belső rétegéből a „BH” szárnyfal jelű a boltozat vakolt (külső hatásoktól elzárt belső) szárnyfalából származik. A három eltérő helyről kiemelt habarc mintát XRF vizsgálatnak vettem alá, eredményeit a 60. ábra szemlélteti. A vizsgálattal a külső és belső rétegek közötti különbségeket mutattam ki. Az azonos szerkezetből kiemelt habarcok összetételén belüli eltéréseket a kalcium mennyisége és az egyéb jelenlévő anyagok megoszlása is jól mutatta (61. ábra).



60. ábra: XRF vizsgálat eredményei boltozott hídszerkezet („BH”) habarcsminták



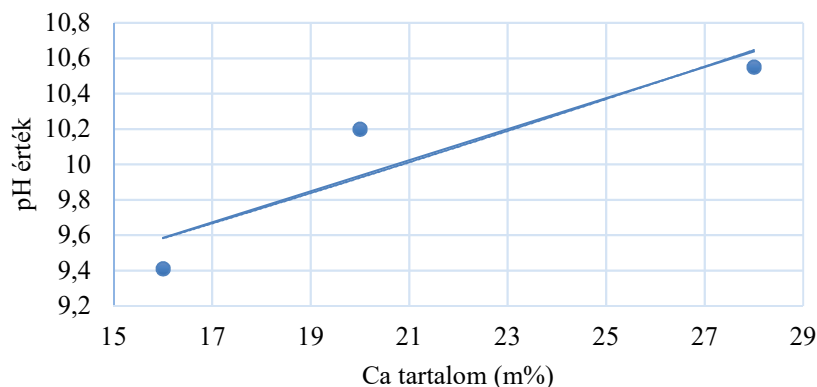
61. ábra: „BH”jelű habarcsminták kalcium tartalma

Kén jelenléte szulfát só, nátrium és klór együttes jelenléte nátrium-kloridra utal. A vizsgált habarcsminták közül a „BH” külső jelű mészhabarcs tartalmaz kizárólagosan ként, ami valószínűsíthetően savas esőből származó szulfát [117].

A módszer eredményei önmagukban nem elégségesek ahhoz, hogy pontos következtetést tudjunk levonni, de a szakirodalmi adatok alapján összefüggés mutatkozik a szilárdsággal [118]. Ugyanakkor sók jelenlétére, a szilárdság változékonyságára és az anyagminőség változására jó tájékoztatást adnak a mért értékek.

A kalcium tartalom a mésztartalom tekintetében tájékoztató adatot biztosít. A 3 vizsgált minta kalcium m% értékéből a kötőanyag mennyiség aránya megbecsülhető. A belső mészhabarcs 1:4 a külső mészhabarcs 1:2 arányban tartalmaz mész kötőanyagot. A szárnyfalból vett minta cement kötőanyagot is tartalmaz. A valószínűsíthető kötőanyag- adalékanyag arány 1:2.

A boltozatból kiemelt mintákon pH mérést végeztem. A szárnyfal pH értéke 9.41 (16m% Ca), a külső habarcs 10.2 (20m% Ca), míg a belső minta pH értéke 10.55 (28m% Ca). A pH érték kalcium tartalom valószínűsíthető összefüggést az 62. ábra mutatja. Az elvégzett mérések száma nem teszi lehetővé az összefüggés igazolását, csupán tájékoztató adat, ugyanakkor mutatja a vonatkozó tendenciát.



62. ábra: Boltozott hídból kiemelt minták pH érték – kalcium tartalom összefüggésre vonatkozó tendenciagörbe

### 5.6.3 Egyéb kiegészítő vizsgálat: video endoszkópos vizsgálat

A lyukkamera vagy videoendoszkóp minimális roncsolással járó vizsgálati módszer, a vizsgálóluk átmérője 1,8-2 cm. A belső inhomogenitások és geometriai anomáliák (repedések, üregek) megállapítására az egyik leghatékonyabb módszer. A szerkezet homogén illetve üregeket, folytonossági hiányokat tartalmazó tartományai jól körül határolhatók. A vizsgálat jellemzően 0,95-1,15 m közötti vizsgálati mélységig alkalmazható, de megfelelő fúrószárral a 2,0 m mélység is elérhető [119]. A mérések alapján megállapítottam, hogy boltozatok esetén legalább 10 vizsgálati helyet érdemes kijelölni. Függőleges falazatok esetén szintenként minimum 3 hely már elégséges információt adhat. A pincszinten javasolt 3-nál több vizsgálati hely kijelölése.

A vizsgálat során a védőcsőben vezetett lyukkamera videófelvételen rögzíti a szerkezet teljes vizsgált keresztmetszetének látható jellemzőit [119]. Különösen jól mérhetők a réteghatárok és az üregek méretei centiméter pontosággal. A 63. ábra a videoendoszkóppal látható homogén és egy inhomogén szerkezeti kép közötti különbséget mutatja.



63. ábra: Video endoszkóp vizsgálat rögzített felvétele homogén szerkezet (bal oldalon, saját felvétel) és üreges szerkezeti kép (jobb oldalon, saját felvétel)

A video endoszkóp felvételein kijelöltem a külső 15 cm-t követő 1,0 méteres szakaszt. Vizsgáltam, hogy horizontálisan 100 cm hosszban hány cm-en található üreg. A mért adatokból meghatároztam az ürekszázalékot (üregek hossza cm/100 cm).

Üregtérfogat jele:            c%            (cavitas = üreg)

A helyszínen végrehajtott endoszkópos vizsgálatok elemzését követően történeti téglafalakra levezettem egy „habarcs-kitöltöttségi mérőszám”-ot (HKM), az üregtérfogat alapján. A minősítő jellemzőket és a szilárdság átlag értékének javasolt csökkentésének százalékos értékeit, valamint a variabilitás módosító értékeit a 32. táblázat tartalmazza.

A mérőszám vonatkozó értéke alapján a habarcsszilárdság variabilitásának módosító tényezőjét is levezettem. 20 szilárdságmérési adatnál 5c% esetén kevesebb, mint 1 eredményt feltételeztem nulla szilárdságúnak, ekkora ürekszázalék még nem volt jelentős hatással a szilárdság átlagértékére. A 10c% értéknél legalább 2, 20c%-nál már legalább 4 szilárdságértéket feltételeztem 0-nak. A variabilitás a 10c%-nál már ~ 20%-kal megnövekedett. Tehát 10c% esetén a szilárdság relatív szórásban kifejezett variabilitását már 40%-ra javasolt növelni. A 10c%-nál nagyobb üregtérfogat esetén a variabilitás növekmény már nem értelmezhető. A szilárdság átlagát a c% függvényében 10-20-30%-kal javasolt csökkenteni.



<i>Habarcscitöltöttség minősítő osztálya</i>	<i>c% üregtérfogát</i>	<i>Szilárdság (<math>f_k</math>) átlag értékének javasolt csökkentése</i>	<i>Variabilitás módosító értéke</i>	<i>Megjegyzés</i>
kitűnő	< 3 %	0 - 5%	0 - 5%	teljesen homogén, fűrt minta szinte teljesen ép
jó	3% < c% < 10%	10%	20%	kevés, kis méretű üreg, fűrt minta egyben, rétegleválás előfordul
közepes	10% < c% < 20%	20%	-	több, nagyobb méretű üreg, fűrt minta több ép darabban kiemelhető
gyenge	20% < c%	30%	-	sok, nagyobb üreg, teljes fugaszélesség hiány, fűrt minta 30 cm-nél kisebb darabokban

32. táblázat: Habarcscitöltöttségi mérőszámhoz (HKM) tartozó minőségi jellemző

A mérőszám alkalmas a falazat szilárdságának jellemzésére. A módszert érdemes a furatpor pH mérésével kombinálva alkalmazni, így a falazatban lévő habarcscitöltöttségre vonatkozóan egy komplex képet kaphatunk. A rendelkezésre álló információkat a szakirodalmi adatok [120] alapján ismert történeti szerkezetek építési hagyományjaival minden esetben össze kell vetni és kielemezni az esetleges eltéréseket.

## 6. Fejezet: Következtetések, tézisek

Doktori értekezésemben első lépésként történeti építmények tipikus falazott szerkezeteit elemeztem a rendelkezésre álló szakirodalmi adatok és saját vizsgálati tapasztalatok alapján. Az elemzések alapján meghatároztam a falazat szilárdságra vonatkozó azon kritikus határértékeket, amelyek a kiválasztott tipikus szerkezetek esetében szerkezeti viselkedés és teherbíró képesség szempontjából, a szilárdság jelentőségében egy átmeneti értéket definiálnak. Numerikus modelleken végzett vizsgálataim eredményeiből kiindulva, a további vizsgálatoknál elsősorban az alacsony szilárdságú habarcsokra fókuszáltam. Szem előtt tartva a történeti és műemléki építmények megóvásának igényét, kutatásomban roncsolásmentes illetve kis roncsolással járó vizsgálati módszerek alkalmazhatóságát és fejlesztését tűztem ki célul. Kutatásaim részben meglévő szerkezeteken végzett helyszíni és az azokból nyert minták laboratóriumi, részben kontroll mintasoron végzett laboratóriumi vizsgálatokon alapulnak. A bemutatott új tudományos eredmények alkalmasak a habarcsszilárdság kellő pontosságú meghatározásához a szerkezet károsítás minimalizálása mellett.

### 6.1 I Téziscsoport: A falazóhabarcs szilárdsági tulajdonságainak szerepe történeti építmények falazatainak teherbíró képességében

**I.I. Tipikus kialakítású, boltozatos falazott hídszerkezetekre vonatkozólag numerikus paraméter érzékenységi vizsgálatokkal megállapítottam a hidak teherbírását leginkább meghatározó szerkezeti és anyagi jellemzőket valamint kimutattam a falazatok szilárdságának jelentőségét a többi paraméterhez képest.**

- A. A MÁV Zrt. hídállag nyilvántartás rendszerben és nemzetközi adatbázisokban található adatok alapján statisztikai elemzést végeztem a hazai és nyugat-európai vasúti hídállományban található falazott hídszerkezetek geometriai kialakítására vonatkozóan. Megállapítottam több európai ország hídállományában található legjellemzőbb geometriai kialakítást és az ezek közötti eltéréseket. A statisztikai elemzés alapján kiadódó leggyakoribb építési és geometriai paraméterek alapján megalkottam 2 merev-blokk módszeren alapuló számítógépes modellt egy tipikus hazai és egy tipikus angliai hídra.
- B. Merev blokk módszerrel végrehajtott paramétervizsgálatok alapján megállapítottam, hogy tipikus geometriai és geotechnikai paraméter tartományok feltételezése esetén a falazatszilárdság változásai milyen hatással vannak a szerkezet teherbírásának kimerülését eredményező terhelés intenzitásra.
- C. A végrehajtott numerikus paramétervizsgálatok alapján megállapítottam, hogy mindkét vizsgált híd típus esetén létezik egy olyan falazat nyomószilárdsági határérték, amely felett a falazat nyomószilárdságának változására a híd teherbírása kevésbé érzékeny. Ez a határérték a hazai, zömökebb kialakítású boltozattípus esetén kb. 1-1,5 N/mm<sup>2</sup>, míg a karcsúbb kialakítású angolszász boltozat esetében 5-7 N/mm<sup>2</sup>.
- D. Megállapítottam, hogy amennyiben a nemzetközi előírásoknak megfelelően, a híd törési mechanizmus kialakulásával szembeni biztonságát 2,0-2,5 közötti tartományban vesszük fel, akkor az ehhez a biztonsági szinthez tartozó falazatszilárdsági határ a karakterisztikus értékek tekintetében mindkét híd típus esetében a 2,0-2,5 N/mm<sup>2</sup>-es tartományba fog esni. Ezen határérték alatt a falazat nyomószilárdsága és annak variabilitása döntő jelentőségűvé válik a szerkezet teherbírásának igazolása szempontjából.

**I.II. Általános kialakítású történeti épületek vizsgálatai alapján elemeztem a falazóhabarcsok nyomószilárdságának és annak, variabilitásának szerepét a dominánsan nyomott falazott szerkezeti elemek teherbírásában. Sztochasztikus numerikus vizsgálat alapján meghatároztam, azt az értéktartományt, ahol a falazóhabarcs szilárdsága a falazott szerkezeti elemek teherbírása szempontjából kiemelt jelentőséggel bír.**

- A. Szakirodalmi adatok és saját helyszíni méréseim alapján, tipikus kialakítású történeti építményeken meghatároztam a téglafalazatokat alkotó anyagok (falazóelemek, habarcsok) nyomószilárdságának jellemző tartományait és variabilitását.
- B. Falazott épületek tipikus teherviselő falszerkezeti elemein végrehajtott numerikus vizsgálatok alapján megállapítottam a falazatok szilárdságát leginkább befolyásoló paramétereket és a jellemző paramétertartományokban érzékenység vizsgálattal állapítottam meg az értékek változásának hatását.
- C. Monte-Carlo szimulációval végrehajtott valószínűségelméleti vizsgálatok alapján megállapítottam a falazóhabarcsok szilárdságának és annak variabilitásnak jelentőségét a falazatszilárdság értékének statisztikai jellemzőiben illetve történeti építmények tipikus, dominánsan nyomott falszerkezeti elemeinek teherbíró képességében.

## **6.2 II Téziscsoport: Történeti építmények falazóhabarcsainak helyszíni szilárdsági vizsgálata**

**II.I. Tézis: Kidolgoztam egy új közelítő módszert falazóhabarcsok nyomószilárdságának roncsolásmentes, helyszíni meghatározására.**

- A. Kísérletileg igazoltam, hogy az MSZ EN 14488-2:2007 szabványban közölt, a löttbetonok korai szilárdságának meghatározására kidolgozott penetrációs módszer alkalmas 0,8-1,5 N/mm<sup>2</sup>-t nem meghaladó szilárdsággal rendelkező habarcsok nyomószilárdságának helyszíni becslésére. Falazott hasábokon végrehajtott laboratóriumi mérések alapján kidolgoztam a penetrációs tú benyomódásához szükséges erő és a habarcs nyomószilárdsága közötti összefüggést.
- B. A rendezett minták elvének alkalmazásával kidolgoztam egy módszert a falazóhabarcs szilárdság adott alulmaradási valószínűséghez tartozó karakterisztikus értékének és várható értékének meghatározására.
- C. Kidolgoztam a penetrációs eszköz alkalmazásához egy gyakorlati útmutatót. Az útmutató tartalmaz ajánlást a mintahelyek darabszámára, a mintahelyek kijelölésére és a további pontosító vizsgálatok elvégzésére vonatkozólag. Történeti építmények falazott szerkezetein végzett helyszíni vizsgálatok alapján igazoltam a módszer alkalmazhatóságát.

**II.II. Tézis: A habarcs szilárdságvizsgálati eljárások közül ritkán alkalmazott „pecsénnyomás teszt” módszert továbbfejlesztettem. Kísérletsorozattal igazoltam, hogy az igen alacsony szilárdságú (<0,5 N/mm<sup>2</sup>) habarcsok vizsgálata során az általam kidolgozott teljes kitöltöttségű mintakialakítás pontosabb szilárdsági értéket ad az eredeti (nemzetközi szabályzatokban ismertetett) kialakításhoz képest.**

- A. Az általam készített, különböző habarcsösszetételű mintasorok esetében, ismert nyomószilárdsági értékekkel való összevetés után igazoltam, hogy az eredeti „pecsénnyomás teszt” 1-1,5 N/mm<sup>2</sup> szilárdsági határ felett megbízható eredményre vezet. Megállapítottam, hogy ez alatti szilárdságok esetében a módszer megbízhatósága romlik a minták terhelés alatti korai szétesése miatt.

- B. A „pecsétnyomás teszt” módszer alacsony szilárdsági tartományban való megbízhatóságának növelése érdekében kidolgoztam a teljes kitöltöttségű mintakialakítást, amelyben a szerkezetből kinyert habarcsmintát minden oldalról gipszréteg veszi körül.
- C. Laboratóriumi vizsgálatok alapján, teljes kitöltöttségű mintakialakítás alkalmazásával levezettem a pecsétnyomás és habarcs nyomószilárdsága közötti összefüggést az igen alacsony szilárdságú habarcsok esetére ( $f_m \leq 0,3 \text{ N/mm}^2$ ).
- D. Igazoltam, hogy az új, teljes kitöltöttségű habarcsminta kialakítással megbízhatóbban lehet az igen alacsony szilárdságú habarcsok szilárdságát méréssel megállapítani, ugyanis ez a kialakítás jobban megfelel a valódi szerkezetekben található többtengelyű feszültségállapotnak és a minták terhelés alatti korai szétesését is megakadályozza.

**II.III. Tézis: Igazoltam, hogy a történeti építmények falazóhabarcsainak roncsolásmentes vizsgálatokkal meghatározható fizikai és kémiai jellemzői összefüggésben vannak a habarcsok nyomószilárdságával így ezek mérésével a szilárdságbecslés pontosítható.**

**1. Altézis: A habarcsok makroszkopikus és mikroszkopikus jellemzői alapján – mint az anyagösszetétel, károsító tényezők, előrehaladott állapotromlási folyamatok látható és mérhető jellemzői – meghatároztam egy állapotjellemző mérőszámot.**

A pontrendszer a célirányos diagnosztikai vizsgálatok kiválasztásához a szilárdság várható maximális értékét és variabilitását adja meg.

**2. Altézis: Igazoltam, hogy a történeti építmények falazóhabarcsainak pH értéke összefüggésben van a habarcs mésztartalmával és közvetve a szilárdsággal.**

- A. Szakirodalmi adatok feldolgozása alapján igazoltam, hogy a történeti mészhabarcsok szilárdsága szoros összefüggésben áll a mésztartalommal.
- B. Ismert, történeti építményekre jellemző összetételű habarcsminták vizsgálatával igazoltam a mésztartalom és a szilárdság közötti összefüggést.
- C. Saját laboratóriumi vizsgálatok alapján igazoltam, hogy habarcs pormintából készített desztillált vizes szuszpenzió pH értékének mérésével a habarcs viszonyított (m%) mésztartalma meghatározható, ez alapján a habarcsszilárdság becslése pontosítható.

**3. Altézis: Meghatározott összetételű és szilárdságú falazóhabarcs próbakockákon végrehajtott laboratóriumi mérésekkel meghatároztam a szilárdság és a nedvességtartalom közötti összefüggést. Megállapítottam, hogy a történeti habarcsok szilárdsága nagymértékben függ a víztartalomtól.**

- A. Légszáraz egyensúlyi nedvességtartalommal és teljesen telített, 100%-os nedvességtartalommal rendelkező minták szilárdsági eredményeinek összehasonlításával megállapítottam, hogy a  $1,2 \text{ N/mm}^2$  szilárdságú, vagy ez alatti habarcsok nyomószilárdsága legalább 20%-kal csökken erős nedvesség hatására. A „közel nulla szilárdságú” ( $f_m < 0,3 \text{ N/mm}^2$ ) mészhabarcsok esetében a vízzel telített állapot akár 75%-os szilárdságcsökkenést is eredményezhet.
- B. A nedvességtartalom eloszlása egy épületben növeli a szilárdság variabilitását. A szerkezet nedvességtartalmának 30%-os variabilitása a falazóhabarcs szilárdság relatív szórás értékét 5-10% között növeli.

**4. Altézis: Helyszínen végrehajtott endoszkópos vizsgálatok alapján történeti téglafalakra leveztettem egy „habarcs – kitöltöttségi mérőszám”-ot. A mérőszám aktuális értéke alapján javaslatot tettem a habarcsszilárdság variabilitásának módosító tényezőjére.**

- A. 5 db falazott szerkezet endoszkópos vizsgálatai során készített videófelvételek kiértékelése alapján kidolgoztam a fugahabarcsok minőségi értékelésére egy ún. „habarcs – kitöltöttségi mérőszám”-ot (HKM). A mérőszám a fal vizsgált keresztmetszeti hosszának és habarcsrétegekben jelentkező üregek, vagy elhanyagolható szilárdságú részek hosszának az arányából számolható, százalékos formában. A HKM értéke habarcsrétegek kitöltöttségének és minőségi variabilitásának szerkezetspecifikus megállapítására ad egy kiegészítő jellemzőt.
- B. Javaslatot tettem arra vonatkozóan, hogy a HKM paraméter ismeretében a habarcsszilárdság átlagos értékét és szórását milyen mértékben kell módosítani a falazatszilárdság karakterisztikus és tervezési értékének megállapításához.

### **6.3 Kitekintés, javaslat a kutatás gyakorlati alkalmazására**

A különböző módszerek eredményeinek ismeretében vizsgálati eljárásrend dolgozható ki, vasúti hidak és történeti épületek falazott szerkezeteinek állapotvizsgálatára. A kidolgozandó vizsgálati módszertan jelentősen csökkentheti vagy akár nélkülözheti a jelenleg gyakran alkalmazott roncsolással járó vizsgálatokat. A javasolt roncsolásmentes és minimális roncsolással járó vizsgálati módszerek alkalmazásával a habarcsszilárdság becslése megbízhatóbbá válik, ezáltal a falazatszilárdság tervezési értékének megállapítása során alkalmazandó parciális tényező értéke csökkenthető.

### **6.4 Vonatkozó saját publikációk jegyzéke**

Török Brigitta, Dr. Orbán Zoltán: Történeti építmények teherviselő falazatainak állapotvizsgálata roncsolás nélkül, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Épületeink és műemlékeink védelme, 2016.

Török Brigitta, Dr. Len, Adél, Dr. Orbán, Zoltán: Salt content analysis of historic masonries with SEM, Pollack Periodica 12 : 3 pp. 99-108. , 10 p., 2017.

Orbán, Zoltán, Dormány, András, Török, Brigitta: Hidak állapotvizsgálata kombinált szerkezet-diagnosztikai módszerekkel, In: anon (szerk.) Építményeink 2018, Budapest, Magyarország, Konferencia Iroda Bt., pp. 33-34. 2 p., 2018.

Dr. Orbán Zoltán, Török Brigitta, Dormány András: Műemlék épületek tartószerkezetének állapot-vizsgálata, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Épületeink és műemlékeink védelme, 2018.

Balla Brigitta: Historic masonry diagnosis reliability of single and combined minor- and non-destructive techniques, Pollack Periodica conference abstract book, 2018.

Dr. Orbán, Zoltán, Török, Brigitta, Dormány, András: Assessment and rehabilitation of heritage structures helped by combined non-destructive tests (In: Tamás, Molnár; Aleksandra, Krstić-Furundžić; Eva, Vaništa Lazarević; Aleksandra, Djukić; Gabriella, Medvegy; Bálint, Bachmann; Milena, Vukmirović Conference Proceedings), 6th International Academic Conference on Places and Technologies, Pécs, Magyarország: Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar Breuer Marcell Doktori Iskola, pp. 64-71. 8 p., 2019.

Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán, Dr. Len Adél: Assessing the reliability of single and combined diagnostic tools for testing the mechanical properties of historic masonry structures, Pollack Periodica 14 : 3 pp. 31-42. , 12 p., 2019.

Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán, Dormány András: Falazott szerkezetek szilárdság- vizsgálati eredményeinek hasznosítása infrastruktúra létesítmények tartószerkezeti értékelésében, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Építményeink, 2019.

Dormány András, Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán: Falazott hidak geometriai felmérése georadaros és 3D szkenneléses vizsgálattal, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Építményeink, 2019.

Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán: Falazott műemléki épületek roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatainak lehetőségei (Fekete Sas Szálló állapotértékelése) Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Épületeink és műemlékeink védelme, 2019.

Balla Brigitta: Boltozott szerkezetű típushidak teherbírás vizsgálata, Sínek világa, megjelenés alatt, 2021.



## 7. Irodalomjegyzék

1. Lövei P.: „Konzerválni és nem restaurálni” – A műemlékvédelem elvei, régebbi és újabb törekvése, Műemlékvédelem, 2014.
2. <http://muemlekem.hu/muemlek/show/8714> 2020.09.15.
3. Entz G.: Műemléki helyreállítások tudományos előkészítése és dokumentálása, Magyar Műemlékvédelem 1973-1974 (Országos Műemléki Felügyelőség Kiadványai 8.), Budapest, 1977.
4. „The International Restoration Charter” Velencei Charta (Karta): Nemzetközi karta a műemlékek és műemlékhelyszínek konzerválására és restaurálására, Történeti Épületek Építészeinek és Szakértőinek Második Kongresszusa (The Second Congress of Architects and Specialists of Historic Buildings), Velence, 1964.
5. Az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény
6. A kulturális örökség védelméről szóló 2001. évi LXIV. törvény
7. Ágostházi L.: Műemlékvédelem, Műszaki Kiadó, Budapest, 1999.
8. Vitruvius: Tíz könyv az építészetéről. Képzőművészeti Kiadó, Budapest, 1988.
9. Kollányi B.: Kőműves szakismeretek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
10. Kausay T.: Kötőanyagok 1. Levegőn szilárduló szervesetlen kötőanyagok: mész, gipsz, magnézium, nátron-vízüveg, Beton, 2005.
11. Déry A.: Történeti anyagtan. Budapest, Terc Kft., 2000.
12. Magyar Szabvány: MSZ 18293:1979 Homok, homokos kavics és kavics termék, Magyar Szabványügyi Testület, 1979.
13. H.1. Vasúti hídszabályzat. H.1.2. utasítás. Vasúti hidak és egyéb műtárgyak méretezésének általános előírásai, 42/2018. (XII. 21. MÁV Ért. 13.) EVIG sz. utasítás, 2018.
14. Rondelet G.: Theoretical and practical treatise of the building art (in Italian), 1832.
15. Curioni G.: L'arte del costruire (in Italian), A.F. Negro, Turin, 1865-1884.
16. Brencich A., Morbiducci R.: Masonry Arches: Historical rules and modern mechanics, International Journal of Architectural Heritage, 2007.
17. Szabóné Nágl É.: Egy világhódító anyag: A téglák, Ipartörténetünk „jeles” emlékei a bélyeges téglák, Kiállítási katalógus, 2009.
18. Hinsenkamp A.: Téglák és cserépgyártás, Műszaki Könyvkiadó, 1969.
19. Szakmány Gy.: Kerámia nyersanyagok, kerámiák a mai Magyarországon területén, A Miskolci Egyetem Közleménye A sorozat, Bányászat, 74. kötet, 2008.
20. Bajza J.: Szemrevételezéses épületdiagnosztika, TERC Kiadó, 2006.
21. Dulácska E.: Tartószerkezeti tagozat tervezési segédlet sorozat TT-TS 1 1998 - Téglából falazott szerkezetek statikai vizsgálata és megerősítése, Magyar Mérnöki Kamara Tartószerkezeti Tagozata, 1998.
22. 3/2019. (V I I.1.) ÉPMI Bontott téglák minősítése újra felhasználás előtt- Bontott tömör téglák minősítése, 2019.
23. UIC Project I/03/U/285: International Union of Railways Project: Improving Assessment, Optimization of Maintenance and Development of Database for Masonry Arch Bridges, Contribution to and recommendation for destructive testing methods for the determination of material parameters of railway masonry arches, 2005.
24. Beseval R.: Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien. 2 vols. Paris: Editions Recherche sur les Civilisations, 1984.
25. Coenen U.: Die spätgotischen Werkmeisterbücher in Deutschland. Untersuchung und Edition der Lehrschriften für Entwurf und Ausführung von Sakralbauten. (Beiträge zur Kunstwissenschaft, Bd. 25), München, 1990.
26. Galilei G.: Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove scienze Attenenti alla Meccanica & I movimenti Locali, 1638.

27. Castilian, C.A.: New theory about the balance of elastic systems. Memory of the Royal Academy of Sciences in Turin, 1875.
28. Hooke R.: A description of helioscopes, and some other instruments, London, 1675.
29. Heyman J.: The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
30. Jorini, A. F. : Teoria e pratica della costruzione dei ponti [Theory and practice of building bridges]. Milano: Ulrico Hoepli Editore (in Italian), 1918.
31. Heyman J.: The safety of masonry arches, International Journal of Mechanical Sciences, 1969.
32. Dulácska E., Korda J., Körmöczy E.: TSZ 01 Műszaki Szabályzat Épületek megépült teherhordó szerkezeteinek erőtani vizsgálata és tervezési elvei (MI 15011 Műszaki Irányelv), 2010.
33. Tervezési segédlet: Régi méretezési előírások 1839-1950, Tervezésfejlesztési és Technikai Építészeti Intézet, Budapest, 1987.
34. Magyar Szabvány: MSZ 15023:1987 Építmények falazott teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése, Magyar Szabványügyi Testület, 1988.
35. Gonda F., Lukács D., Varga K., Horváth Cs., Tajta I.: Kétszintes, falazott tartófalas, monolit vasbeton födémű épület tervezése az MSZ EN szabványok szerint, Vasbetonépítés 2010.
36. Sajtos at all: Példatár Falazottszerkezetek méretezése, Falazott szerkezetű épületek méretezése földrengésre, EC6-EC8 Statikus szakkonferencia, 2010.
37. Eurocode 6: Falazott szerkezetek tervezése. 1-1. rész: Vasalt és vasalatlan falazott szerkezetekre vonatkozó általános szabályok, Magyar Szabványügyi Testület, 2013.
38. Bennett, S. J. ; Maxted, N.: An ecogeographic analysis of the *Vicia narbonensis* complex, Genetic Resources and Crop Evolution, 1997.
39. Dayaratnam P.: Brick and Reinforced Brick Structures, Oxford & IBH, 1987.
40. MSJC: Masonry Standards Joint Committee, Building code requirements for masonry structures,"ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02, American Concrete Institute, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, The Masonry Society, Detroit, 2002.
41. Kaushik H., Durgesh C. R. : Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007.
42. K.S. Gumaste, K.S.N. Rao, B.V.V. Reddy, K.S. Jagadish: Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression, Material Structures, 2007.
43. Hendry, A. W., Davies, S. R., Royles, R., Ponniah, D. A., Forde, M. C., & Komeyli–Birjandi : Test on masonry arch bridge at Bargower (Contract Report 26). Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1986.
44. Costigan A., Pavía S., Kinnane o.: An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression, Journal of Building Engineering, 2015.
45. <http://www.birosag.hu> 2020.09.20.
46. <https://www.muemlekem.hu/muemlek/show/3803> 2019.04.10.
47. Székesfehérvár, Ady Endre utca 7. Fekete Sas Szálló – Tudományos dokumentáció és értékleltár (Faveo Consulting Kft., 2016. május 31.)
48. <http://lasdbudapestet.blogspot.com/2013/11/lakatra-zart-szepsegek-i.html> 2020.10.20.
49. [https://studhist.blog.hu/2017/08/12/citadella\\_a\\_gellert-hegyen](https://studhist.blog.hu/2017/08/12/citadella_a_gellert-hegyen) 2020.12.02.
50. <https://epiteszforum.hu/felujitjak-a-citadellat> 2020.09.02.
51. Vörös T.: Vasúti építészet (15. rész), Építészeti stílusok és irányzatok a vasúti építészetben, Sínek Világa, 2014
52. Gilyén N.: Szerkezet és forma az építészetben, Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1982.

53. Imre L.: Hídrajzok - Fehéren-feketén, Lánchíd füzetek 21., Első Lánchíd Bt. Budapest, 2020.
54. <https://thames.me.uk/Rennie.htm> 2020.08.10.
55. Szilágyi K., Borosnyói A.: A Schmidt kalapács 50 éve: múlt, jelen, jövő: 1. rész: Módszerek és szakirodalmi összefoglaló, Vasbetonépítés, 2008.
56. Szilágyi K., Borosnyói A.: A hazai Schmidt- kalapácsos betonvizsgálati szabályozásról Beton, 2010.
57. Schmidt OS-120 operating instructions, 2017.
58. Magyar Szabvány: MSZ EN 772-1:2000: Falazóelemek vizsgálati módszerei. 1. rész: A nyomószilárdság meghatározása, Magyar Szabványügyi Testület, 2000.
59. Erdődi L.: Vasúti hidak teherbírás-vizsgálata, Sínek Világa, 2006.
60. Orbán, Z. : Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges in Europe, ARCH 04: 4th International Conference on Arch Bridges, eds: P. Roca, C. Molins, Barcelona, 2004.
61. UIC Project I/03/U/85: International Union of Railways Project: Catalogue of damages on masonry arch bridges Final Draft, 2003.
62. UIC Project I/03/U/85: International Union of Railways Project: Assessment, reliability and Maintenance of masonry arch bridges, State of the Art Study, 2003.
63. Ütügyi műszaki előírás 813/2005.: Téglá- és kőboltozatos hidak állagmegóvása és korszerűsítése, Magyar Ütügyi Társaság, 2006.
64. Heyman, J.: The Masonry Arch, Chichester, New York, Holsted Press, 1982.
65. Gilbert, M., Melbourne, C.: Rigid-block analysis of masonry structures, The Structural Engineer, 1994.
66. Orbán, Z.: Boltozott vasúti hidak szerkezeti viselkedésének modellezése és teherbírásának értékelése, Közúti és Mélyépítési Szemle, 2008.
67. M. Rossia, C. Calderinia, B. Di Napolia, L. Cascinib, F. Portiolib: Structural analysis of masonry vaulted staircases through rigid, Structures, 2020.
68. Orbán, Z., Lenkei, P. : Számítási modellek és diagnosztikai eljárások fejlesztése műemlék jellegű, falazott hídszerkezetek teherbírásának megállapítására és használhatósági követelményeiknek ellenőrzésére (OTKA Kutatási Zárójelentés No. T46691 sz. OTKA kutatás), 2009.
69. Gilbert M.: Limit analysis applied to masonry arch bridges: state-of-the-art and recent developments, Conference: 5th International Arch Bridges Conference, 2007.
70. Déry A.: Öt könyv a régi építészetről, Gyakorlati műemlékvédelem 2. c. könyve, 2010.
71. Lósy-Schmidt E.: A hortobágyi kőhíd építése Debrecen város Mátai pusztáján, Debrecen, 1922.
72. Dietmar A.: Erdbau: Teil 2. Geotechnische Verfahren, Grundbau-Taschenbuch, Ernst & Sohn, 2018.
73. Szécsi L., Szlukovényi I., Tóth Z.: Boltozatok teherbírásának megítélése segédlet, Győr 1990.
74. Visnovitz Gy., Erdélyi T., Kollár L.: Terhek és hatások. A tartószerkezeti tervezés alapjai - Tervezés az Eurocode előírásai alapján, Artifex Kiadó, 2007
75. [http://www.kislexikon.hu/relativ\\_szoras.html](http://www.kislexikon.hu/relativ_szoras.html) 2020.12.01.
76. Tianfeng H., Nuyensb D., Staf R., Hans J.: Quasi-Monte-Carlo based probabilistic assessment of wall heat loss, 11th Nordic Symposium on Building Physics, 2017.
77. Takács Sz.: Érzékenységi vizsgálatok a statisztikai eljárásokban, Alkalmazott Matematikai Lapok, 2012.
78. Nordlund K.: Basics of Monte Carlo simulations, egyetemi jegyzet, Helsinki, 2006.

79. Micic T., Asenov M.: Probabilistic Model for Ageing Masonry Walls, 11th International Conference on applications of statistics and probability in Civil Engineering, Vancouver, Canada, 2015.
80. Kovács K.: A habarcs, mint tartószerkezeti anyag, Beton, 1999.
81. Palotás L., Balázs Gy.: Mérnöki szerkezetek anyagtana 3., Beton-habarcs-kerámia-műanyag, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
82. Cultrone G., Sebastián E., Ortega Huertas M.: Durability of masonry systems: A laboratory study, Construction and Building Materials, 2007.
83. Łątka D., Seręga Sz., Matyse P.: Estimation of mortar compressive strength based on specimens extracted from masonry bed joints, Conference: Structural Analysis of Historical Constructions, Cusco, Peru, 2018.
84. Gábory P.: Bauxitbeton épületek állagbiztosítása c. könyv, Építéstudományi Intézet, 1972.
85. Magyar Szabvány: MSZ EN 14488-2:2007: Lőtt beton vizsgálata. 2. rész: A fiatal lőtt beton nyomószilárdsága, Magyar Szabványügyi Testület, 2007.
86. Christiansen P.D.V.: In Situ Determination of the Compressive Strength of Mortar Joints Using an X-Drill. Masonry International, 2011.
87. Gucci N., Barsotti R.: Determination in situ of mortar load capacity by a drilling technique, 10th IB2MAC Conference, Calgary, Canada, 1995.
88. Łątka D., Matyse P.: Determination of Mortar Strength in Historical Brick Masonry Using the Penetrometer Test and Double Punch Test, Materials, 2020.
89. Liberatore D., S. Pera G., Cotugno M.: A new penetration test on mortar joints, RILEM TC177-MDT Workshop on On-Site Control and NON-Destructive Evaluation of Masonry Structures, Montova, Italy, 2001.
90. Raisz P., Fegyverneki S.: Sztochasztikus modellezés, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
91. Benedetti A., Pelá L.: Experimental characterization of mortar by testing on small specimens, 15th International Brick and Block Masonry Conference, 2012.
92. Drdáczy M., Masin D., Mekonone M.D., Slízková Z.: Compressive tests on non-standard historic mortar specimens, Historical Mortar Conference, 2008.
93. Válek J., Veiga R.: Characterisation of mechanical properties of historical mortars – testing of irregular samples, Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, 2005.
94. Henzel, J., Karl S.: Determination of Strength of Mortar in the Joints of Masonry by Compression Tests on Small Specimens. Darmstadt Concrete, 1987.
95. Pala A.: Investigations of moisture content in saline lime mortar by nondestructive dielectric method, 43rd International Conference, Olomouc, Czech Republic, 2013.
96. ÉMISZ 340:1999: Építésügyi Műszaki Irányelv: Falazott szerkezetek nedvesség és sóvizsgálata, 2019.
97. Forster A. M., Ewan M. Szadurski, P., Banfill F. G.: Deterioration of natural hydraulic lime mortars, I: Effects of chemically accelerated leaching on physical and mechanical properties of uncarbonated materials, Construction and Building Materials, 2013.
98. Rirsch E., MacMullen J., Zhang Z.: Evaluation of mortar samples obtained from UK houses treated for rising damp, Construction and Building Materials, 2011.
99. Hołaa A., Matkowskia Z., Hołaa J.: Analysis of the moisture content of masonry walls in historical buildings using the basement of a medieval town hall as an example, Modern Building Materials, 2016.
100. Uranjek M., Bokan-Bosiljkov V.: Influence of freeze–thaw cycles on mechanical properties of historical brick masonry, Construction and Building Materials, 2015.
101. Elsen J.: Microscopy of historic mortars, Cement and Concrete research, 2006.
102. Havancsák K., Baris A., Kalácska Sz.: Az ELTE TTK kétsugaras pásztázó elektronmikroszkópja, Archeometriai Műhely, 2013.

103. Harangi Sz., Szakmány Gy., Józsa S., Lukács R., Sági T.: Magmás kőzetek és folyamatok - gyakorlati ismeretek magmás kőzetek vizsgálatához, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2011.
104. Füzi J., Len A., Bajnok K.: Research Instruments at the Budapest Neutron Centre: Handbook of the Central European Training School on Neutron Techniques, Budapest, Magyarország KFKI, 2017.
105. Pintér F., Wacha R., Bajnóczi B., Borsodiné Kovács M., Tórh M.: Anyagtudományi és műemléki kutatás: Középkori habarcsok vizsgálata a felső-ausztriai Prandegg várromból, Archeometriai Műhely, 2012.
106. Kausay T.: Kötőanyagok IV. Hidraulikus kötőanyagok: Cement 3. Hidratáció, Beton, 2008.
107. Sabbionia C., Zappiaab G., Riontinoa C., Blanco-Varelac M. T., Aguilera J., Puertasc F., VanBalend K., Toumbakarid E. E.: Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars, Atmospheric Environment, 2001.
108. Elsen J.: Misroscopy of historic mortars- a review, Cement and Concrete Research, 2006.
109. Török, B., Len, A., Orbán, Z.: Salt content analysis of historic masonries with SEM, Pollack Periodica, 2017.
110. Gentilini C., Franzoni E., Bandini S., Nobile L.: Effect of salt crystallisation on the shearbehavior of masonry walls: An experimental study, Construction and Building Materials, 2012.
111. Riesz L.: Cement- és mészgyártási kézikönyv, Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest, 1989.
112. EC-Lab Application Note: Corrosion of reinforced concrete, Bio-Logic Science Instruments, 2010.
113. Shafigh P. et al: The effect of cement mortar composition on the pH value, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
114. Costigan A., Pavía S.: Influence of the mechanical properties of lime mortar on the strength of brick masonry, Historic Mortars, 2012.
115. Nagy M.: A röntgenfluoreszcencia-analízis elvi alapjai, Nukleon, 2014.
116. <https://szte.org.hu> 2020.10.20.
117. Ceukelaire L. D.: The effects of hydrochloric acid on mortar, Cement and Concrete Research, 1992.
118. Velosa A., L. Rocha F., Veiga R.: Influence of mechanical and miceralogical composition of metakaolin on mortar characteristics, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2006.
119. Orbán, Z., Gutermann, M.: Assessment of masonry arch railway bridges using nondestructive in-situ testing methods. Engineering Structures, 2009.
120. Déry A.: Történeti szerkezetan c. könyv, Terc Kiadó, 2002.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönetet mondok Dr. Orbán Zoltán egyetemi docensnek, aki témavezetőként szakmai iránymutatásával segítette munkámat. Köszönöm, hogy lehetőséget biztosított munkám sikeres elvégzéséhez, valamint, hogy elvégezte doktori értekezésem alapos és kritikus átnézését.

Hálás vagyok Dr. Len Adélnak a tudományos publikációk elkészítésében, valamint az egyes mérések elvégzésében nyújtott rendkívül értékes segítségéért, szakmai és baráti jellegű tanácsaiért.

Köszönöm Dr. Fülöp Attila egyetemi docensnek a faltest törővizsgálatok elvégzésében, valamint Bajnok Katalinnak a polarizációs mikroszkóppal végzett vizsgálatokban nyújtott segítségét.

Köszönetem fejezem ki barátaimnak, családomnak, hogy számos esetben segítették munkámat. Külön köszönöm segítségét édesanyámnak és húgomnak, továbbá köszönöm kollégáimnak, közülük legfőképp munkahelyi vezetőmnek Janocskó Viktornak, hogy lehetőséget biztosított a képzés elvégzésére és végig támogatott.

Végül, de nem utolsó sorban leginkább férjemnek, Balla Jánosnak szeretném megköszönni. A hosszú évek során mellettem állt, végig bízott bennem és kiegyensúlyozott családi háttérrel biztosított az igazán nehéz időszakokban is.

Kospupa, 2020. november

Balla Brigitta