

HABARCSOK A KESZTHELY-FENÉKPUSZTAI KÉSŐ RÓMAI ERŐDBŐL: A PETROGRÁFIAI-GEOKÉMIAI ÉS MÉRNÖKGEOLOGIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

MORTAR SAMPLES FROM THE LATE ROMAN FORTRESS OF KESZTHELY-FENÉKPUSZTA: RESULTS OF PETROGRAPHIC-GEOCHEMICAL AND ENGINEERING GEOLOGICAL ANALYSES*

JÓZSA, Sándor¹ ; PINTÉR, Farkas² ; TÖRÖK, Ákos³  & HEINRICH-TAMÁSKA, Orsolya⁴ 

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Közettan-Geokémiai Tanszék, Budapest, H-1117 Pázmány Péter sétány 1/C, jozsa.sandor@ttk.elte.hu

²Institut für Konservierung und Restaurierung, Universität für angewandte Kunst Wien, Salzgries 14, A-1010 Wien, Österreich, farkas.pinter@uni-ak.ac.at

³Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., torok.akos@emk.bme.hu

⁴Leibniz-Institut für Geschichte und Kultur des östlichen Europa (GWZO), Abt. "Mensch und Umwelt", Specks Hof (Eingang A), Reichstraße 4-6, D-04109 Leipzig, Deutschland, orsolya.heinrich-tamaska@leibniz-gwzo.de

Abstract

The Roman fortress of Keszthely-Fenékpuszta, built in the 4th century AD, was located at the western edge of Lake Balaton on a peninsula bordered by open water and marshy peat bogs. The well-protected fortification played a significant infrastructural role, due to the fact that the lake could be crossed here along a main north-south road of Pannonia. Archaeological excavations started in 2009 had the primary goal to clarify the location, floor plan and dating of individual buildings (nos. 24, 25 and 27). Based on petrographic, geochemical, and engineering geological investigations of mortars used in the constructions, we were able to gain insight into the possibilities of answering certain archaeological questions with geoarchaeometric methods. Mortar samples were systematically collected from the different locations representing the functions and construction phases. Based on the archaeological research three chronological groups (I-III: end of 3rd c. to early 7th c. AD) were distinguished; two of them belong to the late Roman Period (I-II.) and one (III.) to the Migration Period. The aggregates of the mortars were analyzed by polarized light microscopy and thermoanalytical method. The chemical examination of the binder was carried out by scanning electron microscopy. Additionally, water absorption, density and compressive strength of the mortars were also determined. Based on the results, we can conclude that the mortars of all three periods are of air lime nature containing Mg and Si impurities and both the binders and additives were produced using local raw materials rich in dolomite components. The higher compressive strength values of the mortars of the 3rd period (late 5th to early 7th c. AD) are probably due to the slightly different composition of the binder, or they can also be explained by the static role of the selected pillars.

Kivonat

A 4. században Keszthely-Fenékpusztán épült római erőd a Balaton nyugati végén, nyíltvíz és mocsaras tőzeglápok által határolt félszigeten feküdt. A különlegesen jól védett építménynek jelentős infrastrukturális szerepe volt, ugyanis itt lehetett átkelni a Balatonon a Pannoniát észak-déli irányban átszelő főút mentén. A 2009-ben kezdődött régészeti feltárások elsődleges célja az egyes épületek (24-es, 25-ös, 27-es) fekvésének, alaprajzának és keltezésének pontosítása volt. A vizsgált épületeknél használt habarcsok petrográfiai, geokémiai

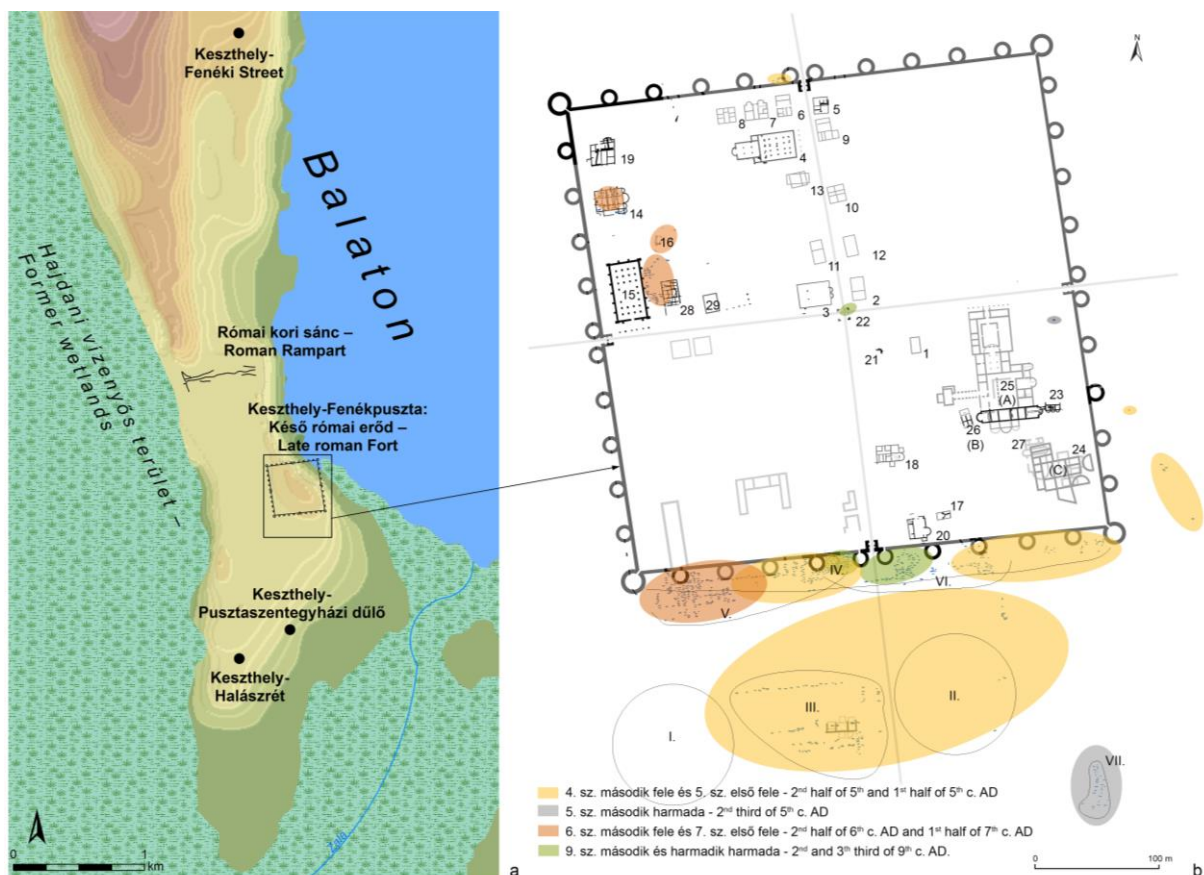
* How to cite this paper: JÓZSA, S.; PINTÉR, F.; TÖRÖK, Á. & HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2024): Habarcsok a Keszthely-fenékpusztai késő római erődből: a petrográfiai-geokémiai és mérnökgeológiai vizsgálatok eredményei / Mortar samples from the Late Roman fortress of Keszthely-Fenékpuszta: results of petrographic-geochemical and engineering geological analyses [in Hungarian with English abstract], *Archeometriai Műhely* XXI/2 161–182.

doi: [10.55023/issn.1786-271X.2024-014](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2024-014)

és műszaki földtani vizsgálata segítségével pedig betekintést nyertünk bizonyos régészeti kérdések geoarcheometriai módszerekkel történő megválaszolásának lehetőségeibe. A habarcsmintákat az épületek funkcióit és építési fázisait képviselő legkülönbözőbb helyekről gyűjtöttük. Ennek alapján három kronológiai csoportot különböztettünk meg (I-III. = 3. század vége – 7. század eleje). A habarcsok adalékanyagait polarizációs mikroszkópi és derivatográfus vizsgálatokkal, a kötőanyag szöveti és kémiai tulajdonságait pásztázó elektronmikroszkóppal elemeztük. Továbbá meghatároztuk a habarcsok vízfelvételi, porozitási, testsűrűségi és nyomószilárdság értékeit is. Az eredmények alapján megállapítható, hogy mindhárom vizsgált korszakban Mg és Si szennyezőket tartalmazó meszes habarcsok voltak használatban, amelyek készítésénél a helyi, dolomitkavicsokban gazdag nyersanyagokat használták fel úgy a kötő-, mint az adalékanyagok esetében. A III. periódus habarcsainak nagyobb nyomószilárdság-értékei valószínűleg a kötőanyag némileg eltérő összetételével, illetve a kiválasztott pillérek statikai szerepével is magyarázhatók.

KEYWORDS: MORTAR, AGGREGATE, BINDER, PETROGRAPHY, GEOCHEMISTRY, ENGINEERING GEOLOGY, ARCHAEOLOGY

KULCSSZAVAK: HABARCS, ADALÉKANYAG, KÖTŐANYAG, PETROGRÁFIA, GEOKÉMIA, MÉRNÖKGEOLÓGIA, RÉGÉSZET



1. ábra: Keszthely-Fenekpuszta: (a) A késő római erőd fekvése a római korban egy félsziget déli végén, a környékbeli 4–7. századi temetőkkel és a sánccal. (b) A római erőd alaprajza és belső épületei, valamint a temetők (4–9. sz.). Grafika: Heinrich-Tamáska O.

Fig. 1.: Keszthely-Fenekpuszta: (a) Location of the late Roman fortress in the Roman era at the southern edge of a peninsula, with cemeteries and rampart in the vicinity from the 4th–7th century. (b) Floor plan and inner buildings of the Roman fortress, and the cemeteries. Graphics: O. Heinrich-Tamáska.

Bevezetés

Keszthely-Fenekpuszta a magyarországi, római kontinuitás kutatás egyik legjelentősebb lelőhelye. Keszthelytől 7 km-re délre, a Balaton délnyugati csücskében fekszik. A régészeti kutatások középpontjában a 15 hektár nagyságú késő római kori erőd áll (Heinrich-Tamáská 2011a). Ehhez az erőd déli fala előtti területen egy temető is csatlakozik (**1.a-b ábra**), ahol a 4. századtól egészen a Karoling korig temetkeztek (Müller 2010).

A szabályos négyzet alaprajzú erődöt egy keskeny löszhát déli végén emelték. A Balaton déli és nyugati vidékét hasonló észak-déli irányú, patak- és folyóvölgyekkel tagolt löszdombok alkotják. A 19. század óta végrehajtott lecsapolási és egyéb szabályozási intézkedések azonban alapvetően megváltoztatták a tájképet. A római korban a fenekpusztai erőd a Balaton egy félszigetén feküdt, amit délről és keletről nyíltvíz, nyugatról pedig mocsaras tőzeglápok határoltak. Ez azt jelenti, hogy a települést csak észak felől lehetett megközelíteni a szárazföldön, ahol az utat dél felé egy sánc zárta el, amely a félsziget teljes kelet-nyugati hosszában húzódott (**1.a ábra**). A fenekpusztai erőd így nem csak különlegesen jól védett helyen épült, hanem infrastrukturális szerepe is jelentős volt. A dunai Limestől délkelet felé vezető diagonális főút mentén itt lehetett átkelni a Balatonon *Sopiane* (Pécs) és *Sirmium* (Sremska Mitrovica) felé haladva (Heinrich-Tamáská 2014, 404–413).

Keszthely-Fenekpuszta Alsóheténnyel, Ságvárral, Táccal és Környével egyetemben az ún. belső erődök körébe tartozik. Ezek a masszív tornyokkal védett erődök megnevezésüket a *Ripa Pannonica* hátszágában való fekvésüknek köszönhetik. Szabályos katonai táborokra emlékeztető felépítésük mellett, mindenhol találunk nagy gabonátárolókat és egyéb gazdasági épületeket is. Ezek alapján leginkább a katonaság gazdasági és logisztikai központjaiként értelmezik őket (Tóth 2009; Heinrich-Tamáská 2015; Visy 2018). A belterületeiken található villa épületek azonban civil lakosság jelenlétének kérdését is felvetik (Heinrich-Tamáská 2017).

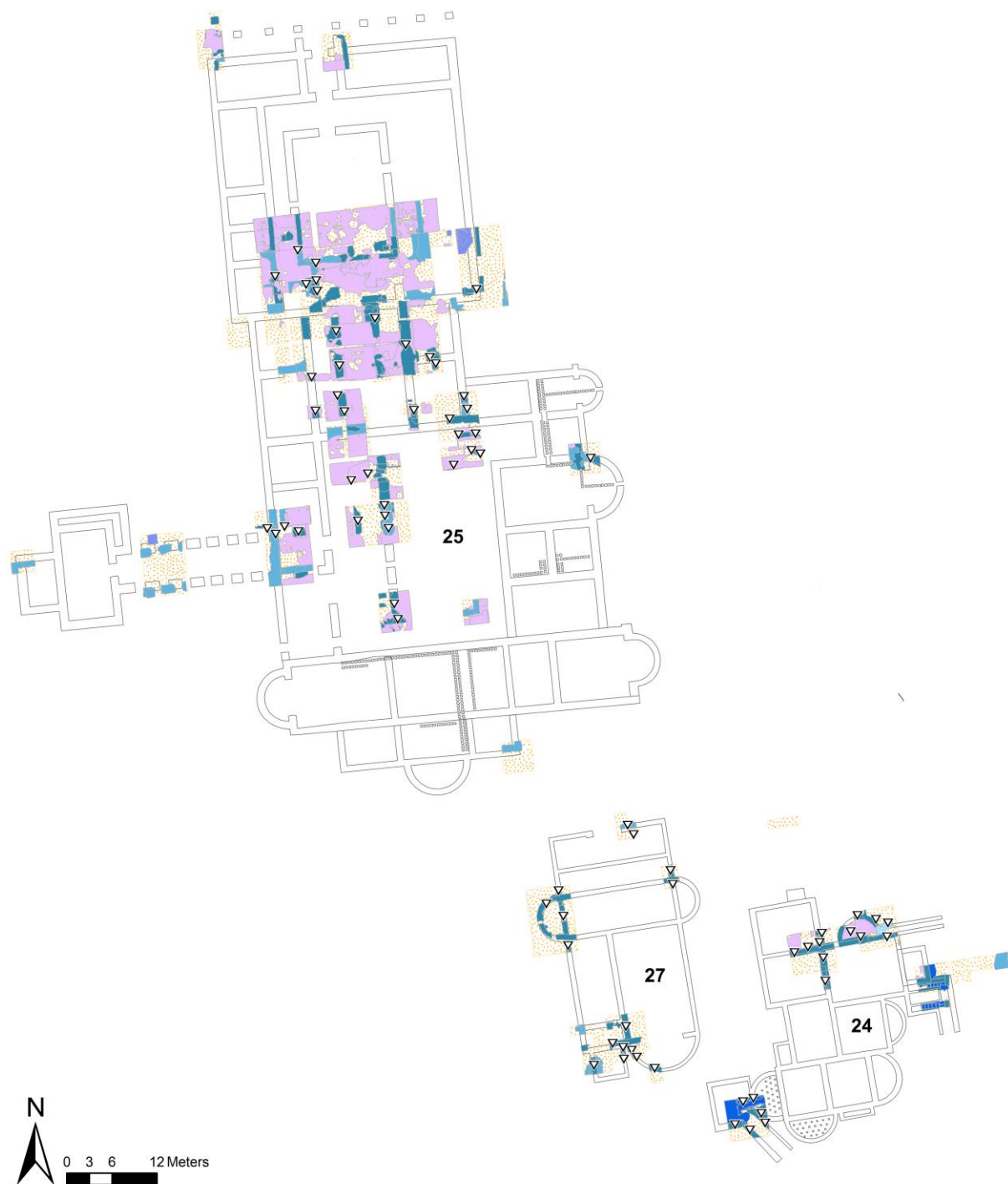
Keszthely-Fenekpuszta a kutatás jelenlegi állása szerint a 4. század középső harmadában épült. Különlegessége a fentebb említett erődökkel szemben, hogy a települést a Pannonia római adminisztrációból történt kivonása után is használták. Egészen a 7. század elejéig igazolható egy keresztény, romanizált közösség továbbélése, akikhez feltehetően bevándorlók is társultak (Fóthi et al. 2009; Heinrich-Tamáská 2007/08; Müller 2020). A 9. században egy több mint egy évszázados szünet

után újra találunk régészeti nyomokat az erőd használatára (Müller 2010, 246–248).

Keszthely-Fenekpuszta mai képét a hajdani keszthelyi Festetics grófok majorsági épület egysége határozza meg. A 18. században, amikor a majorságot kialakították, a római erődfalak és tornyok még jól láthatóak lehettek, hiszen romjait a 17–18. századi történelmi térképeken is jelölték és a majorságot az erőd nyugati falához igazodva, azon kívül helyezték el (Havasi et al. 2020). Az első régészeti felmérést Rómer Flóris publikálta 1862-ben (Rómer 1862). 1899 és 1909 között a Balatoni Múzeum akkori igazgatója Csák Árpád végzett számos feltárást az erőd területén (Csák 1903). Eredményei évtizedekre meghatározták a *castrum* belső felépítéséről kialakult képet (Heinrich-Tamáská 2013, 11–15, Abb. 6). E kapcsán Sági Károly nevéhez köthetőek még fontos feltárások 20. század közepétől (Sági 1989), ezen kívül az ún. kora keresztény bazilika (14-es épület, Sági 1961), illetve a gabonatar (*Horreum*, 15-ös épület) kutatása hozott új eredményeket (Heinrich-Tamáská 2013, 15–17). A további kutatások a 20. század folyamán leginkább a déli erődfal előtti temetőre irányultak (Müller 2010, 20–152) (**1.b ábra**).

Egy 2006-ban megkezdett német-magyar projekt keretében sikerült először az addig Keszthely-Fenekpusztán folyt régészeti feltárásokat egységes keretbe rendszerezni és ezáltal a jövőbeli kutatásokat új alapokra helyezni (Heinrich-Tamáská 2011a). Ennek keretében számos, még Csák Árpád által a 20. század elején feltárt épület területén végeztünk geofizikai felmérést. Mivel a régi ásatásokról csak nagyon hiányos adatokkal rendelkezünk, elsődleges célunk az egyes épületek fekvésének és alaprajzának pontosítása volt. Ezek segítségével fény derült arra is, hogy Csák Árpád alaprajzai egyes épületek esetében több építési fázist egyesítenek. Ennek tisztázására 2009-től 2017-ig hitelesítő ásatásokat végeztünk az erőd keleti felében az ún. 24-es, 25-ös és 27-es épületek területén (Heinrich-Tamáská & Prien 2017/18).

A 24-es és 27-es épületeket Csák Árpád „C” épület megjelöléssel egy egységként kezelte és egy nehezen értelmezhető alaprajzot közölt. Már a georadar felmérések alapján nyilvánvalóvá vált, hogy valójában két épülettel kell számolni, amelyek közül a 24-es egy több mint 400 m² nagyságú fürdőépület (**2. ábra**). Az eredmények alapján az alaprajza jól felvázolható és az ásatások során a délnyugaton fekvő *caldarium*-ot (izzasztóhelység) és annak fűtő kamráját (*prae-furnium*), a *frigidarium* (hideg fürdő részleg) egyik medencéjét és az ehhez keletre kapcsolódó *latrina*-t (illemhely) sikerült azonosítanunk.



2. ábra: Keszthely-Fenekpuszta: A 24-es, 25-ös és 27-es épületek rekonstruált alaprajza: szelvények (narancssárga), objektumok (lila, kék) és a habarcs mintavételek helyével (háromszög). A 25-ös alaprajz a három fázist összesít, a 24-es és 27-es épületek a II. fázisban voltak használatban és csak kisebb átépítéseken estek át. Grafika: Heinrich-Tamáska O.

Fig. 2.: Keszthely-Fenekpuszta: Reconstructed floor plan of the buildings nos. 24, 25 and 27 with the locations of excavation sections (orange), features (violet, blue) and sampling positions (triangles). The floor plan of building 25 merges three phases, building 24 and 27 were only in use during the IInd phase and only few changes were made. Graphic: O. Heinrich-Tamáska.

A leletanyagból és az épület fekvéséből kiindulva a fürdőt a 4. században az erőddel egy időben emelték és az 5. század első negyedéig lehetett használatban (Heinrich-Tamáská & Prien 2017/18, 123–129, Abb. 4; Heinrich-Tamáská & Prien 2019, 41–43).

A tőle nyugatra fekvő 27-es épület alaprajzát egy nagy, apszisos záródású *aula* dominálja, ami alapján az épület reprezentációs szerepe feltételezhető (2. ábra). Keltezésére csak kevés adatunk van, de nagyjából a fentebb említett fürdővel lehetett egyidejűleg használatban (Heinrich-Tamáská & Prien 2017/18, 129).

A 25-ös „villa“ az itt említett két épülettől északra található (2. ábra). Ez az erőd legnagyobb építménye, amit a kutatás „főépületként“ tart számon, amivel leginkább a központi, reprezentációs szerepét kívánja hangsúlyozni. Keszthely-Fenekpuszta mellett Tácon, Ságváron és Alsóhetényen is feltártak hasonló alaprajzú épületeket (Heinrich-Tamáská 2011b; Tóth 2020). Mindegyik egy központi udvarral (*peristylum*) és egy ehhez kapcsolódó apszissal záródó aulával rendelkezik. Ez az építészeti megoldás igen gyakori a korabeli villagazdaságok lakóépületeinél is (Palágyi 2009). A belső erődökben feltárt maradványok esetében azonban hiányoznak a belső díszítőelemek (pl. mozaikok, falfestmények).

A Keszthely-fenekpusztai 25-ös épület esetében három főépítési fázist sikerült elkülöníteni. Az első az erőd építése elé, a 3. század vége/4. század elejére keltezhető, és az itt említett klasszikus *peristylumos* felépítést mutatja egy apszissal záródó aulával és feltehetően egy villagazdaság részét képezte a területen. A második fázis során az apszist elbontva új belső udvart alakítottak ki egy portikusszal határolt fronttal északon. Ezt a fázist az erőd építésével köthetjük össze, tehát a 4. század közepe tájára keltezzük. Az utolsó átépítés a 6. században történt, amikor is a déli traktusban masszív pilléralapozások tagolják a teret. Az épületet a 7. század elején egy tűzvész pusztította el (Heinrich-Tamáská & Prien 2017/18, 130–140).

Jelen tanulmányban az itt röviden bemutatott három épületből (2–3. ábra) származó habarcsmintákon az általunk alkalmazott geoarcheometriai vizsgálatok módszertani háttérét és az ezekhez kapcsolódó legfontosabb eredményeket mutatjuk be. A régészeti adatokkal részletesen összevetett feldolgozásra egy későbbi, átfogó cikkben fogunk sort keríteni (ehhez ld. Józsa et al. in prep). Célunk a jelenlegi tanulmányban sokkal inkább az, hogy a Keszthely-fenekpusztai minták példáján keresztül felvázoljuk, hogy milyen lehetőségek rejlenek régészeti kontextusból származó (adott esetben római kori) habarcsminták adalék- és kötőanyagainak petro-

gráfiai és geokémiai, valamint mérnök-geológiai vizsgálati eredményeinek együttes kiértékelésében.

Mintavétel és vizsgálati módszerek

Az általunk feldolgozott habarcsminták a korábban leírt három épületből (24-es, 25-ös, 27-es) származnak. Az ásások során a régészetileg dokumentált objektumokból szisztematikusan vettünk mintákat, a főépületi elemekre (falak, pillérek) és a későbbi hozzáépítésekre éppúgy ügyelve, mint ezek különböző használati környezetére (2. ábra). Így reméltünk teljes képet kapni az egyes építési fázisokhoz, illetve kronológiai csoportokhoz tartozó, valamint a funkcionális tényezőkhöz alapuló habarcs használatról. A három épületből származó mintákat a fentebb ismertetett régészeti megfigyelések alapján három kronológiai csoportra osztottuk (ld. Melléklet – 1. táblázat).



3. ábra: A 2017-es ásítás során előkerült 25-ös épület kőalapozásának maradványa, (a) távoli; (b) közeli felvétel. Fotók: Török Á.

Fig. 3.: Stone features of foundations of building no. 25 found during the excavations in 2017: (a) overview; (b) close-up view. Photos: Á. Török.

Az első (I) a 3. század végétől a 4. század közepéig, a második (II) a 4. század közepétől a 5. század közepéig, a harmadik (III) pedig ezt követően a 7. század elejéig tart. Egyedül a második fázis volt megtalálható mindhárom vizsgált épületnél (24-es, 25-ös, 27-es), ami Pannoniában a késő római korszak utolsó évszázadát öleli fel. Az első, valamint a harmadik fázist ezzel ellentétben csak a 25-ös épület kapcsán figyelhettük meg. Az első fázis szintén késő római, de az erőd alapítása elé keltezhető, a harmadik azonban már a népvándorláskort jelöli, ami Keszthely-Fenekpusztán a római továbbélés kérdésével is összefügg. A 25-ös épület kapcsán viszont azt is hangsúlyoznunk kell, hogy az épületnek legtöbb elemét nem bontották el, hanem a későbbi korszakokban is (tovább) használták. Ez azt jelenti, hogy a három kronológiai csoportba való besorolás elsősorban az építés idejét keltezi, nem a teljes használati időszakot, ami egyes esetekben (I-III. fázis) 300 évet is jelenthet. Ezen fázisok szerinti csoportosítás alapján a habarcs használatának és összetételének római koron belüli fejlődését éppúgy reméltük felmérni, mint az azt követő korszakra jellemző változásokat.

A minták túlnyomó részét az épületek alapozásaiból gyűjtöttük (**3. ábra**). Ezek többnyire *opus incertum* (szabálytalan alakú törmelékkövekből készült héjú öntött falazat) technikával készültek, de a különböző nagyságú homok-és nagyobb adalék szemcsék habarcskötésének szilárdsága már a mintavétel során is igen eltérőnek bizonyult. Felmenő falakat csak ritka esetben tudtunk megfigyelni. Itt falvakolatból is vehettünk mintát. A 24-es fürdő-épületnél csatornák és vízmedencék, illetve fűtőcsatornák anyagából is tudtunk mintát venni.

A habarcsok adalékanyagainak polarizációs mikroszkóppal történő petrográfiai vizsgálatához a 24-es, 25-ös és 27-es épületekből rendre 18, 46 és 17 db, azaz összesen 81 mintát választottunk ki, és ebből 89 vékonycsiszolat készült (8 minta esetében kettő ld. **Melléklet – 1. táblázat** a/b kóddal). Mindezek a 2011 és 2017-ig között folyt ásatásokból származnak (ld. Heinrich-Tamáská/Prien 2017/18; Józsa et al. in prep). A száraz, nagyméretű, esetenként könnyen széteső habarcsdarabokat többször szilárdítottuk alkohollal hígított Araldite-D műgyantával, majd az ezután kialakított vágott felületen át újrainpregnáltuk. A vágott felületet SiC csiszolóporral 800-as finomságig síkra és simára csiszoltuk, majd az így kialakított mintadarabokat tárgylemezre ragasztottuk. A minták gépi levágásával, koptatásával és kézi finomcsiszolásával 30 µm vastag, részben normál (50x25 mm), részben nagyméretű (50x50 mm), fedett vékonycsiszolatok készültek. A mintákat az ELTE Közéttan-Geokémiai Tanszéken OLYMPUS CH2 és Nikon OPTIPHOT2-POL OPTIPHOT polarizációs mikroszkóppal vizsgáltuk. A mikrofotókat Nikon DS Fil fényképezőgéppel készítettük és NIS Elements

BR 3.2 programmal rögzítettük. Az adalékanyag kevésbé megszámlálható szemcséinek mennyiségét becsléssel (**Melléklet – 1. táblázatban** x-szel jelölve), az arra alkalmas szemcsék mennyiségét szemcseszámlálással (**Melléklet – 1. táblázatban** számokkal jelölve) határoztuk meg. A különböző vékonycsiszolatokban a habarcsminták vizsgálható, hasznos területe a legtöbb esetben eltért egymástól, ezért a mennyiségi összehasonlíthatóság érdekében a szemcseszámlálással nyert eredményekből a szemcsék mennyiségét a habarcsmetszet területével arányos, azaz az egységnyi habarcsfelületre eső szemcseszámot kiszámolva is megadtuk.

A habarcsok kötőanyagainak kémiai-ásványtani jellemzőinek és a másodlagos folyamatok hatásának vizsgálatára 12 mintát (ld. **Melléklet – 1. táblázat**) választottunk ki a SEM-EDX elemzéshez: három-három a 24-es és 27-es épületekből és hatot a 25-ös épületből. A vékonycsiszolatok készítéséből maradt minták ellenoldali darabját epoxigyantába ágyaztuk (Araldite 2020A), majd polírozott felületi csiszolatokat készítettünk, amiket szénnel gőzöltük le. Az elemzések Zeiss EVO15 pásztázó elektronmikroszkópban (gyorsító feszültség 20 kV, mintaáram 400 pA), a kémiai elemzések Oxford DryCool EDS energiadiszipatív spektrométerrel történtek. A kötőanyagok és azokkal rokon fázisok, illetve mállás hatására kialakult másodlagos fázisok jellemzésére pontanalízist és elemtérképezést használtunk. A vizsgálatok a bécsi Bundesdenkmalamt Természettudományi Laboratóriumában készültek.

A mérnökgeológiai mérésekhez előkészített 12 db habarcsmintát a 2011-es és 2013-as ásatások során vett anyagból válogattuk ki (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). Három minta kivételével (M27-02, M27-09, M27-10) amelyek a 27-es épülethez köthetők, az összes többi a 25-ös épületből származik. Minden egyes habarcsmintának meghatároztuk az egyedi méretét és az egyes darabok tömegét. A tömeget Sartorius Balance típusú mérleggel, századgramm pontossággal mértük meg. A minták testsűrűségét az MSZ EN 12390-7:2009 szabvány alapján mértük meg. A minták vízfelvételét 48 órás víz alatti tárolással határoztuk meg.

A szilárdsági vizsgálatokat az előkészített mintákból elkülönített és a szilárdság mérésére alkalmas méretű, de szabálytalan alakú habarcs próbatesteken végeztük el. A méréseket az amerikai szabvány ASTM D5731 (Standard test method for determination of the point load strength index of rock) alapján készítettük el, ún. pontterheléses módszerrel. A mérés során a próbatesteket úgy helyeztük el a terhelő berendezésbe, hogy a 60°-os kúpos acél nyomófejek egymással szemben helyezkedjenek el. A nyomófejek kiképzése r = 5 mm-es lekerekítéssel készült. A vizsgálat előnye, hogy

ehhez nem szükséges szabályos henger alakú próbatest és kisebb erőhatást igényel, így szabálytalan alakú habarcsminták közelítő szilárdságának mérésére is alkalmas.

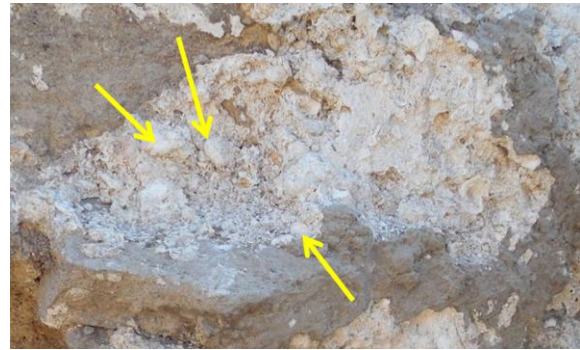
A habarcsminták összetételét, azon belül a karbonát tartalmat jól jellemző izzítási veszteséget izzító-kemencés méréssel határoztuk meg. Az eredményeket a minta bemért tömegéhez viszonyítva [m%] adjuk meg. Ehhez kiegészítésként a híg sósavas oldási technikával meghatároztuk az oldási veszteséget is, amely szintén a karbonát tartalom meghatározását segíti.

Néhány kiválasztott mintán az ásványtani összetételt is meghatároztuk termoanalitikai módszerrel. Ehhez 250-500 mg porított mintákat készítettünk, amelyeket MOM Derivatograph Q-1500 műszerrel elemeztük. A mérés során 10°C/perces fűtési sebességet alkalmaztunk, a mintákat 1000°C-os hőmérsékletre felfűtve. A mérés során detektáltuk a minta tömegének változását és a minta hőmérsékletét. Ezzel a módszerrel elsősorban a habarcsminták kötőanyagának összetételét kívántuk meghatározni. A minták vizsgálata a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének akkreditált Talaj és Kőzetvizsgáló Laboratóriumában (akkreditációs szám: NAH-1-1743/2023) készült.

Vizsgálati eredmények

A habarcsok makroszkópos leírása

A Keszthely-Fenekpusztán lévő római kori épületmaradványok habarcsai általában gyenge megtartásúak. Terepi viszonyok között is jól meg lehetett figyelni és el lehetett különíteni egymástól a finomszemcsés kötőanyagot és a nagyobb méretű adalékanyagok darabjait (**4. ábra**). A habarcsminták fő típusaiban a makroszkóposan meghatározott adalékanyagok aránya kb. 20–30%. Legfeltűnőbb, legnagyobb arányú összetevői a nagyon kemény, igen jól koptatott, cm-es méreteket is elérő dolomtkavicsok, amelyek kisebb erőhatásra is könnyen kieshetnek a kötőanyagból. Ezek mellett – ritkábban, akár nagyobb mennyiségben is – megfigyelhetők szögletes megjelenésű egyéb kőzet- és kerámiatöredékek is (**5. ábra**). A cm-es méretet ez utóbbi összetevők is elérhetik. A kötőanyag tört felszíne egyenetlen, erősen mikroporózus, de nagyobb, akár több cm-t is elérő szabálytalan pórusokat-üregeket is sűrűn tartalmaz (**4. ábra**). Anyagában finomszemcsés inhomogenitást mutat, színe szürke vagy fehér, egyenetlesen, sűrűn hintetten tartalmaz apró, 1 mm átmérőjű fehér mészcsozókat. Állaga általában puha, széteső, könnyen morzsolható, poros tapintású. Egyes változatai jobban kötöttek, állékonyak, keményebbek.

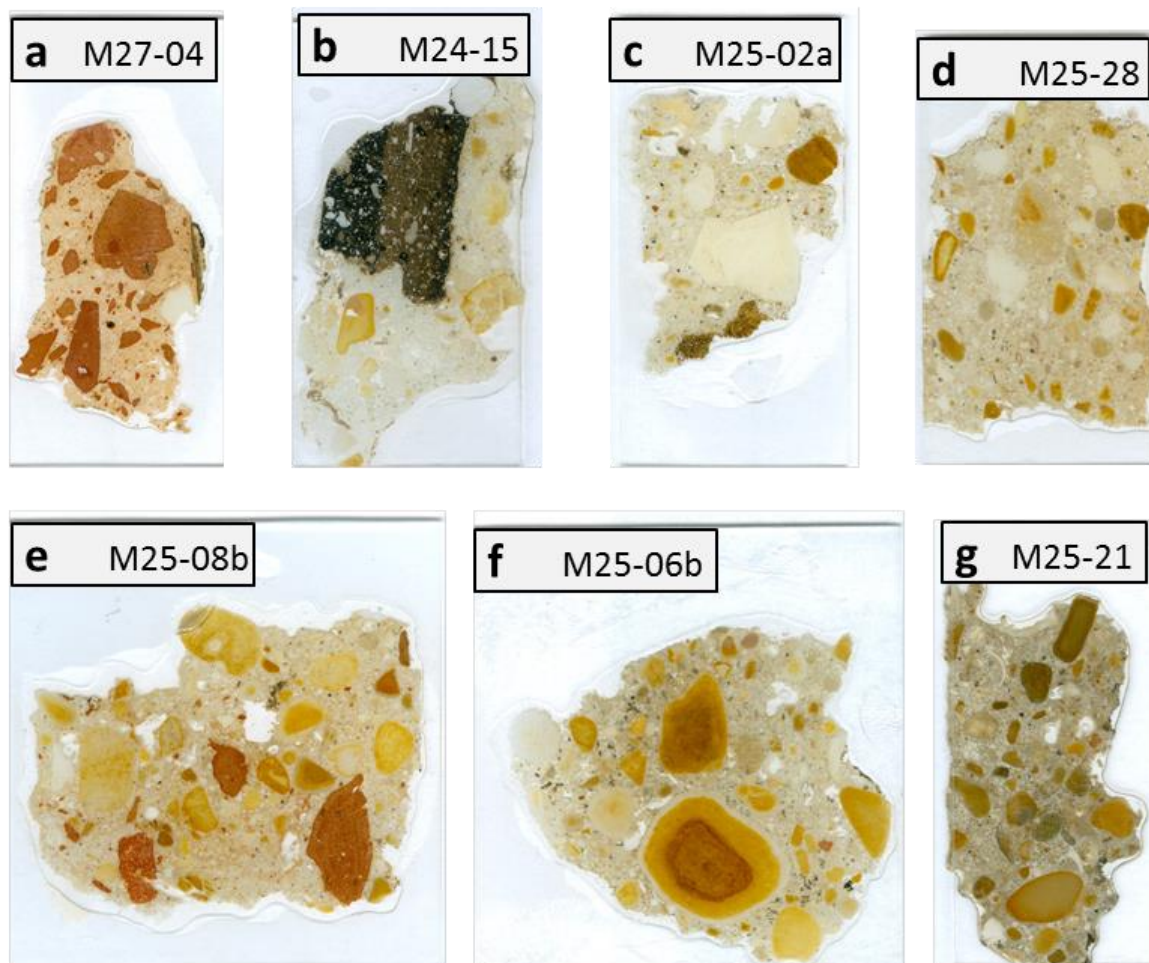


4. ábra: Keszthely-Fenekpuszta: Habarcs közeli *in situ* képe az ásátáson (25-ös épület). Jól láthatók a koptatott cm-es dolomtkavicsok (sárga nyilak) és a laza, porózus kötőanyag. Kép szélesség 20 cm. Fotó: Török Á.

Fig. 4.: Keszthely-Fenekpuszta: Close *in situ* view of mortar during the excavations (building no. 25). The well rounded, cm-sized dolomite pebbles (yellow arrows) and the porous friable binder is well visible. Picture width is 20 cm. Photo: Á. Török.

Az adalékanyagok polarizációs mikroszkópos vizsgálata

Ebben a fejezetben a Keszthely-Fenekpusztán 2011 és 2017 között folytatott ásátásokból származó 84 db habarcsminta vékonycsiszolatos fénymikroszkópi elemzésének eredményeit mutatjuk be (ld. Józsa et al. *in prep*). Kitzűzött célunk volt az adalékanyagok leírása, meghatározása és lehetséges forrásaik azonosítása. Már a vékonycsiszolatok kissé vastagabb állapotban történt szabad szemű megfigyelésekor feltűnt (**5. ábra**), amit a teljes anyag fénymikroszkópi áttekintése után egyértelműen megállapítottuk, hogy a minták adalékanyag-tartalma nagyjából azonos, és csak a mennyiségi arányaikban van kisebb-nagyobb, 4 minta esetén azonban igen jelentős különbség [M24-07, M25-03b, M25-18, M25-45]) (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). Ez lehetővé tette, hogy a vizsgált mintákban megfigyelt adalékanyagokat egységes ásvány-kőzettani szempontú csoportokba soroljuk. Az egyes csoportok leírása után geológiai értékelést adtunk és megkíséreltük meghatározni forrásképződményeiket és származási területeiket. Elvégeztük a minták adalékanyagainak mennyiségi meghatározását is az előző fejezetben ismertettek szerint. A mérési eredményeket tartalmazó táblázatot azonban erősen redukáltuk és csak a jelen tanulmány számára legfontosabb és felhasznált adatokkal közöljük (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). Ebben a cikkben egyelőre csak előzetes mennyiségi értékelést adunk, mert a teljes körű értékeléshez további elemzésekre van szükség, amit egy későbbi tanulmányban tervezünk bemutatni (Józsa et al. *in prep*).



5. ábra: Néhány jellegzetes Keszthely-fenekpusztai habarcsminta vékonycsiszolatának makroszkópos képe. (a) Csak szögletes kerámia adalékanyagot tartalmazó habarcsminta. (b) Nagyméretű durvakerámiát (sötétbarna) tartalmazó habarcsminta. (c) Uralkodóan kisebb-nagyobb fehér, szögletes mészkőtörmeléket tartalmazó habarcsminta. (d) Mészke (fehér) és dolomit adalékanyagot vegyesen tartalmazó habarcsminta. (e) Kerámia (sötétokker) és dolomit szemcséket vegyesen tartalmazó habarcsminta. (f) Vasásvány kicsapódási front nagyméretű dolomit adalékszemcsében (g) Dolomitzemcsében gazdag, recens kagylóváz elemet is tartalmazó habarcsminta (A tárgylemezek magassága egységesen 5 cm). Fotók: Józsa S.

Fig. 5.: Macroscopic images of the thin sections of characteristic mortars from Keszthely-Fenekpuszta. (a) Mortar sample with only ceramic additive. (b) Mortar sample with a large grain of coarse ceramic (dark brown). (c) Mortar dominantly consists of white angular limestone of different sizes. (d) Mortar sample with mixed dolomite and limestone additives. (e) Mortar sample with both ceramics and dolomite additives. (f) Iron oxide precipitation front in a large dolomite pebble. (g) Mortar sample rich in dolomite grains containing recent bivalve shell fragment (Height of glass slides is 5 cm). Photos: S. Józsa.

Az adalékanyagok részletes ismertetése

A vékonycsiszolatokról készített polarizációs mikroszkópi felvételek a **Melléklet 1–4. ábráin** láthatók.

1. Mészanyagú törmelékek

Általánosságban elmondható, hogy ezek az elegyrészek könnyen felismerhetők, mert nagyobbak és jobban koptatottak, mint a kovaanyagú szemcsék.

1.1. Dolomit kőzet

Leírás: A dolomit mennyisége általában a szemcsék 30–60 tf%-a, csak négy mintából (M24-07, M25-03b, M25-44, M25-45) hiányoznak (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). Nagyon jól koptatott szemcséi kétféle mérettartományban jelennek meg (0,3–1 cm és 0,1–0,5 mm) (**Melléklet – 1.a-b ábra**). Kristályos megjelenésük, szövettük homogén, ekvigranuláris, irányítatlan, ritkán inekvigranuláris. Szemcseméretük mikrit (10–20 μm) vagy pátit (0,3 mm). Egyes mikritekben durvaszemcsés erek láthatók, más szemcsékre akciószegélyt mutatnak. A

kötőanyagban helyenként az itt bemutatott dolomitzemcsék szövetéhez hasonló reliktszövetű szemcsemaradványok láthatók. Méretük és alakjuk is megegyezik a dolomítkavicsok ezen tulajdonságaival (**Melléklet – 1.c-e ábra**). Az egyik dolomítkavicson rátapadt kőzetlisztes agyag van (**Melléklet – 2.a ábra**).

Értékelés: A fenékpusztai habarcsok dolomitzemcséinek mikroszkópi megjelenése a közeli keszthelyi-hegységi dolomitokéhoz nagyon hasonló (Bohn 1975). A nagyon jól koptatott jelleg és a nagy méret alapján a szemcsék nagy energiájú vizes környezetben formálódhattak a forrásterület (Keszthelyi-hegység) közelében. Ilyen kavicsanyag jelenik meg a Keszthelyi-hg. peremén, a “pannóniában” kialakult abráziós konglomerátumban (Békési Formáció, Diási Tagozat, Budai et al. 1999; Sásdi 2020; http2), amely recens áthalmazódással eljuthatott a Balaton partjáig is. Ezt a következtetést a jól koptatott recens molluszka héjak habarcsbeli jelenléte és a dolomit és molluszka szemcséken megfigyelt rátapadt iszap is alátámasztja.

1.2. Márga, kőzetlisztes mészkő, mikrites és mikropátitos mészkő

Leírás: Ezek a komponensek csak néhány mintában és kismennyiségben fordulnak elő (**Melléklet – 1.f ábra**). Méretük és alakjuk megegyezik az 1.1. fejezetben tárgyalt dolomítkavicsokéval. Különböző arányban tartalmaznak finomszemcsés sziliciklasztot (agyagot és aleurolitot) és mikritet. Esetenként vékonyhéjú mikrofossziliákat is tartalmaznak.

Értékelés: Forrásközetük a dolomítkavicsok forrásterületével nagyjából megegyezően az Edericsi és Veszprémi Márga Formációk keszthelyi-hegységi elterjedési területein kereshető (Haas 1995). Ezek a kőzetek szintúgy jelen vannak a Keszthelyi-hegység peremén a “pannóniában” kialakult abráziós konglomerátumban (Diási Tagozat, Budai et al. 1999; Sásdi 2020; http2) de a dolomitoknál jóval kisebb mennyiségben. Recens áthalmazódással ezek a kavicsok eljuthattak akár a Balaton partjáig is.

1.3. Molluszka váztöredékek

Leírás: Szinte minden mintában előfordulnak kis-közepes mennyiségben. Nagyméretű, vastag (0,2 mm–0,8 cm), enyhén ívelt, jól koptatott vázelemek (**Melléklet – 1.b, 2.c ábra**). Többségük kagyló váztöredék, de vannak *gastropoda* és más puhatestű (**Melléklet – 2.b. ábra**) vázelemek is. A héjmaradványok eredeti belső szerkezete jól megőrződött, néhány szemcsén hőhatás (**Melléklet – 2.b-c ábra**), másokon bioerózió nyomai figyelhetők meg. Az egyik vázelemen rátapadt finom-

szemcsés aleuritós agyag is látható (**Melléklet – 2.a ábra**).

Értékelés: Mikroszkópi megjelenésük alapján ezek a törmelékek leginkább recens, kis valószínűséggel miocén laza üledékből származó vízi puhatestűek (kagylók, csigák) vázdarabjai lehetnek. Töredékes, de jól koptatott, bioeróziót mutató jellegei alapján hullámverte sekély vízi környezetből származhatnak. Hasonló molluszka töredékek jelennek meg a Balaton part menti hullámverte sávjában. Az egyik szemcsére rátapadt finomszemcsés üledék is erre utal. Ugyanakkor a Keszthelyi-hegység peremén fellelhető “pannóniai” korú törmeléken üledékes képződmények (pl. Száki Formáció, Somlói Formáció) is tartalmaznak molluszka maradványokat (Jámbor 1980; Cziczter et al. 2009).

1.4. Meszes fitolit

Leírás: Sok mintában megtalálható, de mindig kis mennyiségben (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). Jellegzetes növényi sejtes, rostos szerkezetet mutat. Nagy méretű hosszúkás elemei (0,1–0,4x2–3 mm) egyenes, görbült, szakadozott megjelenésűek (**Melléklet – 2.d ábra**).

Értékelés: Megjelenésük alapján lapos vízparti vagy sekélyvízi környezetben élő elhalt meszesedett növényi maradványokból származhatnak. Megjelenésük alapján még képlékenyen, lágy állapotban kerülhettek a habarcsba. Valószínűleg a Balaton partvidékéről származnak.

1.5. Mészvázú globigerinoidae foraminifera

Leírás: Nagyon kevés mintában nagyon kis mennyiségben jelenik meg. 2–3 gömbölyű cellából álló kisméretű (<0,1 mm), vékonyhéjú foraminifera vázak.

Értékelés: Megjelenési formájuk és a földtani háttér ismerete alapján ezek fosszilis foraminiferák, amelyek miocén, valószínűleg “pannóniai” korú finomszemcsés üledékes kőzetrétegekből származhatnak a Keszthelyi-hegység környékéről.

2. Sziliciklasztos törmelékek

A sziliciklasztok nagy része kisebb és kevésbé koptatott, mint a meszes törmelékek. Uralkodóan kvarc anyagúak, de kis mennyiségben sokféle egyéb ásvány és kőzetfajta is előfordul közöttük. A minták többségében a meszes törmelékek után a legnagyobb mennyiséget (20–90%) képviselik. Kis mennyiség csak kevés mintában van (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). Értékelésük az alcsoportok leírása után következik.

2.1. Kvarc és kvarcit

Leírás: A sziliciklasztoknak több mint 90%-át adják **Melléklet – 1.a ábra**). Jól osztályozott bimodális szemcseeloszlást mutatnak (0,4–0,5 mm és 0,1–0,2 mm). A szemcsék általában xenomorfoz, izometrikusak, szögletesek (**Melléklet – 4.f ábra**), de a nagyobb szemcsék között jól koptatottakat is találunk (**Melléklet – 1.d, 3.a ábra**). Néhány kiugróan nagy kvarcit szemcse (2,5–3 mm) is megjelenik (**Melléklet – 1.a ábra**). A kvarcsezemcsék többsége hullámos kioltású monokristályos, a vulkáni megjelenésű monokristályos kvarc ritkán fordul elő. A polikristályos kvarc és kvarcit kevésbé gyakori (**Melléklet – 3.b ábra**). Gyakorik a repedezett szemcsék.

2.2. Földpátok

Leírás: Sok mintában jelen vannak, de csak kis mennyiségben (ld. **Melléklet – 1. táblázat**), a sziliciklasztoknak is csak néhány százalékát teszik ki. Ortoklász, mikroklin és plagioklász egyaránt megjelenik. Többnyire négyszögletesek, gyengén koptatottak, izometrikusak, méretük a kvarc méreteihez hasonló. A mikroklin általában üde, az ortoklász gyenge hasadást mutat, gyakran szericites és pertites (**Melléklet – 2.e ábra**). A plagioklász nem zónás, savanyú összetételű, gyakran szericites, vagy saussurites (**Melléklet – 1.b, 2.e ábra**).

2.3. Csillámok

Leírás: Szinte minden mintában megjelennek, de általában kis mennyiségben (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). A biotit nagyon ritka, általában kis méretű. Uralkodik a muszkovit, szemcséi vékonyak, nyúltak, metszeteik kissé hullámosak.

2.4. Akcesszóriák

Leírás: Szórtan, legtöbbször nagyon kis mennyiségben és méretben (50–100 µm) jelennek meg (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). A nagyobb szemcsék (kb. 0,3 mm) ritkábbak, de jellegzetesek. Leggyakoribb közülük a gránát (**Melléklet – 3.c ábra**), az epidot (**Melléklet – 2.e ábra**), a zoisit (**Melléklet – 3.a ábra**) és a sztaurolit. Sok mintában megtalálják, általában szögletesek, izometrikusak. Leginkább jellemző közülük a gránát. Egyes mintákban a nagy gránátok nagy mennyiségben láthatók a más mintákban található gránátok és más akcesszóriás ásványokhoz képest (ld. **Melléklet – 1. táblázat**). A többi akcesszóriás ásvány, mint az aktinolit, hornblende, oxihornblende, turmalin, klorit, kloritoid, kianit, klinopiroxén, titanit, cirkon (**Melléklet – 3.a ábra**) és szillimanit földpátban csak néhány mintában jelenik meg és általában kis mennyiségben.

2.5. Kőzettörmelékek

Leírás: Általában a nagyobb méretű szemcsék között található. Zömében 0,2–0,3 mm-esek, de akár az 1 mm átmérőt is meghaladhatják. A metamorf kőzeteket a különböző ásványtartalmú kvarcitok (csillámgazdag, kloritos (**Melléklet – 3.e ábra**), aktinolit, zoisit és turmalinos (**Melléklet – 3.b ábra**), ritkábban csillámpala (**Melléklet – 2.f ábra**), gneisz, márvány (**Melléklet – 4.a ábra**), kloritos (**Melléklet – 3.d ábra**) és grafitos fillit, valamint metahomokkő képviseli. A magmás eredetű kőzetszemcséket néhány granitoid és riolittufa képviseli, de ide tartoznak a ritka bazalt (**Melléklet – 4.b ábra**) és bazalttufa szemcsék is, amelyek aleuritós agyagbevonattal rendelkeznek. A leggyakoribb sziliciklasztos üledékes kőzettörmelék a homokkő. Két típusa van. A gyakoribb változat nagyméretű, jól koptatott, szövete jól osztályozott, kissé irányított, karbonátos cementtel. A szögletes kvarcsezemcsék mellett sok muszkovitot és változó mennyiségű akcesszóriát tartalmaz. Különösen nagy méretben (néhány mm) is előfordul (**Melléklet – 4.d ábra**). A ritkább homokkő változat kisebb méretű, kompaktabb és nagyon kevés karbonátot tartalmaz (**Melléklet – 3.f ábra**). Az üledékes kőzetek között nagyon jellegzetesek még a kovakőzetek. A radiolarit (**Melléklet – 4.c ábra**), a szpikulit és a tűzkő általában szögletesek és nagy méretűek.

A sziliciklasztos törmelékek értékelése

A sziliciklasztos szemcsék alakja és mérete alapján a forrásuk egy gyengén vagy nem cementált homok lehetett, amelyet részben kissé össze is törhettek felhasználás előtt. A szemcsék anyagi összetétele, különösen a kvarcgazdagsága és az akcesszóriás ásványok fajtája alapján forrásuk egy miocén homokösszlet lehetett. Ilyen kőzeteket szolgáltatnak a "pannóniai" korú, korábban Somlói és Kállai Formációkba besorolt, jelenleg a Békési Formáció Diási és Kállai Tagozataiként, illetve az Újfalui Formáció Somlói Tagozataként ismert rétegtani egységek, amelyek a Keszthelyi-hegység peremi részénél és Keszthelytől kissé délre és nyugatra is megtalálhatók (Jámbor 1980, Thamóné Bozsó 1983, http1, http2).

3. Egyéb törmelékek

3.1. Korhadt fitolit

Leírás: Csak néhány mintában jelennek meg kis mennyiségben. Fekete, sejtes szerkezetű, hosszúság, viszonylag nagyméretű (0,2–1 mm), nyúlt, kissé foszlányos töredékek. Színük fekete.

Értékelés: Ez az összetevő sekélyvízi, vagy lapos parti agyagos, iszapos környezetben képződhetett. A foszlányos kifejlődés alapján recensnek értékelhető és nagy valószínűséggel a Balaton parti iszapjából származik.

3.2. Kőzetlisztes agyag aggregátumok

Leírás: Ez az összetevő sok mintában jelenik meg. Szabálytalan alakú, apró kvarc szemcsékben (0,05–0,25 mm) gazdag, eredetileg nagyrészt képlékeny, homokos, iszapos anyag (**Melléklet – 2.a, 4.f ábra**) nagyméretű (1–2 cm) darabjai. Törmelékanyaga lényegében megegyezik az egyedi nagyobb sziliciklaszt szemcsék anyagával, de csillámban gazdagabbak. Gyakran tartalmazzák a kétféle (meszes és fekete) fitolitot, a kissé égetett karbonátos kőzet-törmelégeket, a molluszka váztöredékeket és gömbölyded konkréciókat. Finomszemcsés alapanyaga általában közel izotróp, gyakran látható másodlagos finomszemcsés kalcitosodás.

Értékelés: Ez az anyag lágy iszapként kerülhetett be a habarcsba, ilyen anyagot a Balaton parti sávjában, pl. Keszthely-Fenekpuszta környékén is nagy mennyiségben lehet találni.

3.3. Kerámiatöredékek

Leírás: Majd minden mintában jelen vannak, de változó mennyiségben. Egy mintában (M24-07 fürdőmedence vakolat) csak égetett agyagtermék (pl. cserépedény, tetőcserép, stb.) töredék volt. A kerámiatöredékek a többi esetben nagyon különböző méretben (<1 mm – néhány cm), többnyire szögletes formában mutatkoznak (**Melléklet – 4.e ábra**). Összetételük és szövetségük a különböző mintákban hasonló. Nemplasztikus elegyrészeit főleg a kvarc és a szintén gyakori csillám képviseli, ritkán zoisit és cirkon is található bennük (**Melléklet – 3.a ábra**), az egyikben kissé kiégett molluszka héjtöredék is megjelent. Általában irányított, szeriális, jól osztályozott szövetet mutatnak.

Értékelés: Összetételük alapján a Keszthely-fenekpusztai habarcsokban található kerámiatöredékek helyi készítésű cserépedények, illetve tetőcserepek darabjai lehetnek.

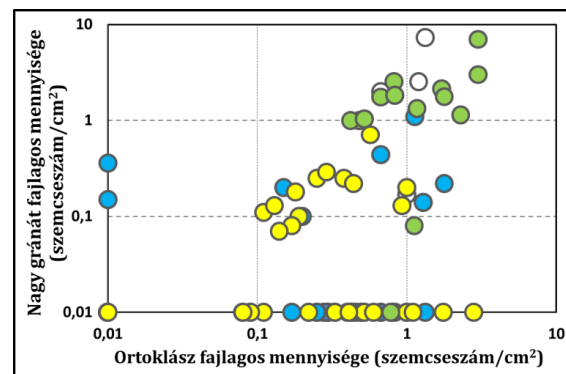
Az adalékanyagok mennyiségi elemzése

Az előzetes mennyiségi vizsgálat fő kérdése az volt, lehet-e polarizációs mikroszkópos petrográfiai módszerrel mennyiségi alapon különbséget tenni a Keszthely-fenekpusztai római erőd három belső épületének (24-es, 25-ös és 27-es) régészeti dokumentált maradványaiból gyűjtött és különböző kronológiai fázisokhoz (I., II. és III.) tartozó habarcsminták között. Negyvenhárom féle összetevő mennyiségi, illetve félmennyiségi elemzését

végeztük el, de itt csak a legfontosabb adatait foglaltuk táblázatba (ld. **Melléklet – 1. táblázat**).

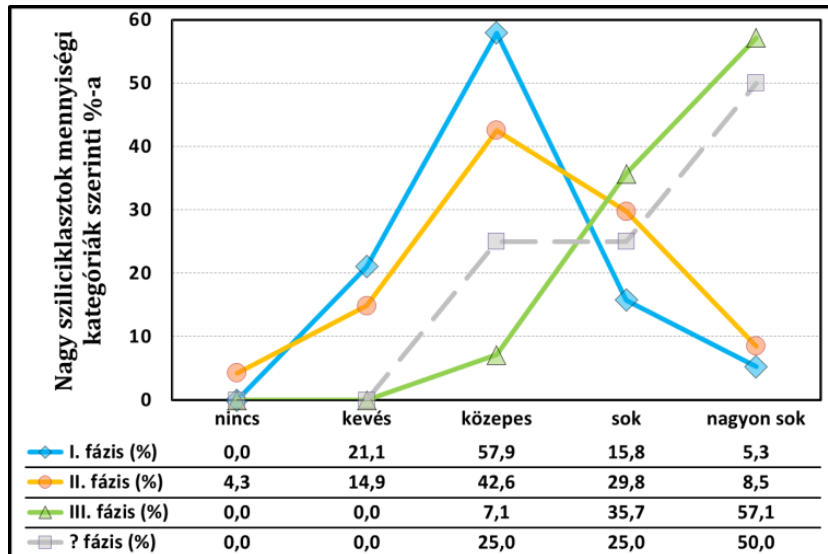
Előzetes elemzésünk alapján megállapítottuk, hogy a III. fázis habarcsmintái több összetevő esetében is különböznek az I. és II. fázis habarcsmintáitól. Az utóbbiak között azonban szignifikáns különbséget nem észleltünk, ami azzal is magyarázható, hogy mindkettő a késő római korra keltezhető. A III. kronológiai fázis különbözőségét legegyszerűbben a nagy méretű gránát fajlagos mennyisége alapján lehetett kimutatni. Ez az összetevő a III. fázis habarcsainak döntő többségében nagyobb mennyiségben fordul elő (≥ 1), mint az I. és II. fázis habarcsaiban (<1) (**6. ábra**). A nagyméretű gránát mennyisége alapján a több fázist lefedő, ún. kérdéses csoport (ld. **Melléklet – 1. táblázat**) 4 habarcs mintájából három a III. fázis habarcsmintáival rokonítható.

Az esetleges különbségek kimutatása érdekében vizsgáltuk az egyes kronológiai fázisok habarcsainak teljes mintahalmazában előforduló egyes adalékanyagok mennyiségi eloszlását is. Az így megalkotott diagramok közül a nagy méretű gránát, a nagyméretű sziliciklasztok (**7. ábra**), a nagy méretű mészközetek és az ortoklász diagramján is jól elkülönül a III. fázis görbéje (a több fázishoz is köthető minták görbéjével egybeesve). Mindezek az eredmények arra utalnak, hogy a III. fázisban használt egyes adalékanyagok kissé különböztek az I. és II. fázisban használt adalékanyagoktól.



6. ábra: A Keszthely-fenekpusztai habarcsok adalékanyagaként megjelenő nagy méretű gránát és ortoklász szemcsék fajlagos mennyiségének két-komponensű diagramon való ábrázolása. **Jelmagyarázat:** Kék = I. fázis, sárga = II. fázis, zöld = III. fázis, fehér = több fázishoz tartozik. **Grafika:** Józsa S.

Fig. 6.: Two-component diagram showing specific number of large garnet vs. orthoclase additives in Keszthely-Fenekpuszta mortars. **Legend:** Blue = phase I., yellow = phase II., green = phase III., white = belonging to more phases. **Graphic:** S. Józsa.



7. ábra:

A Keszthely-fenekpusztai habarcsok nagy méretű sziliciklasztjai mennyiségének eloszlása az egyes kronológiai fázisok mintáinak teljes mintahalmazában.
Grafika: Józsa S.

Fig. 7.:

Quantitative distribution of large siliciclasts in the mortar samples of Keszthely-Fenekpuszta related to different chronological phases.
Graphic: S. Józsa.

A kötőanyagok jellemzése

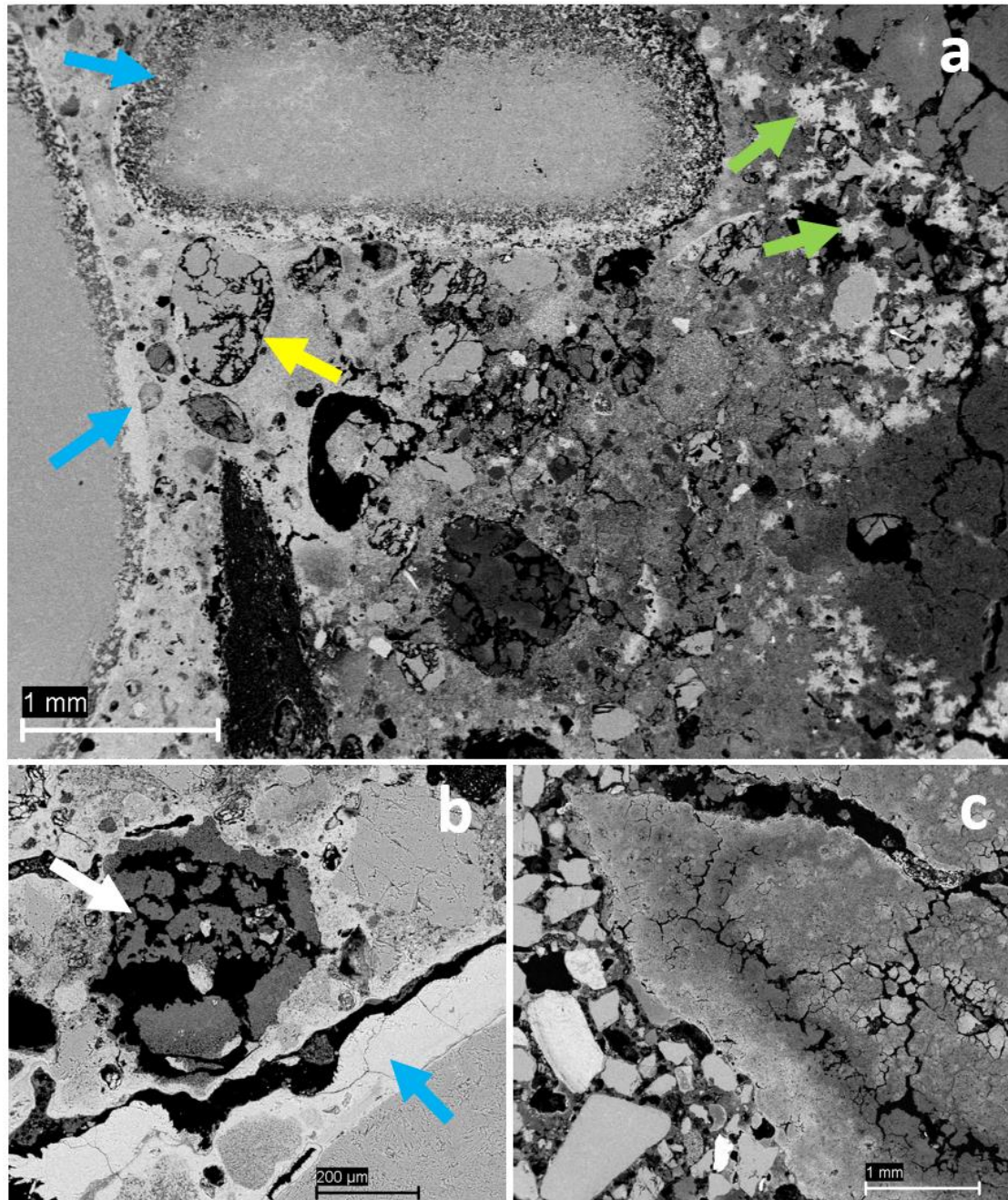
A SEM-EDX vizsgálatra kiválasztott minták kötőanyagait (ld. **Melléklet – 1. táblázat**), nagyfokú hasonlóságuk miatt, összefoglalva ismertetjük. A habarcsok kötőanyagait a minták épületeken belüli helyétől és az építési periódusoktól függetlenül kémiaiilag és ásványtanilag minden esetben heterogén mikroszerkezetet és összetételt mutatnak (**8.a ábra**). Ez alól csak egy vizsgált minta (M24-11) képez kivételt, amelyben a többi minta összetételéhez hasonló, azonban azokhoz képest jóval homogénebb meszes kötőanyagot figyeltünk meg. A kötőanyagokban megjelenő heterogenitás a Ca és Mg mennyiségében és eloszlásában, valamint kisebb mértékben a Si (és Al) jelenlétében nyilvánul meg. Általánosságban elmondható, hogy minden mintában kalcium-karbonát (CaCO_3) a domináns kötőanyag, a kémiai összetételben megjelenő magnézium, valamint szilícium természetes – és többnyire csak kisebb mértékű – szennyeződésként van jelen. A repedések mentén és légpórusokban másodlagos kiválásként gyakran mikropátitos/pátitos CaCO_3 figyelhető meg (**8.b ábra**).

A másodlagos kalcium-karbonát jelenléte leginkább a karbonátban gazdag talajoldatok (talajvíz) beszivárgására utal, és gyakran idézi elő a fent említett pórus- és üregkitöltéseket. Továbbá, ha a mátrix adott esetben hidrát fázisokat tartalmazott, akkor ezekből a kötőanyag-komponensekből is kioldóhattak Ca^{2+} -ionok a HCO_3^- -ionokban gazdag (talaj) oldatok hatására, ami heterogén – kalcium-karbonátból és részben amorf fázisokat (szilikagél) tartalmazó zónákból álló – mátrixot hagy maga után (Weber et al. 2015).

Az ilyen típusú reakciók során keletkező, sugarasan növekvő másodlagos CaCO_3 gyakran gömbölyded, ún. „pattogatott kukorica-szerű” (popcorn calcite, Poole & Sims 2015) szemcsékként jelenik meg (**8.a ábra**). A heterogén szöveti jelleg jelen mintákban másodlagos CaCO_3 -ban gazdag kötőanyagterületekként jelentkeznek, amelyeket gyakran Mg-ban és Si-ban dús zónák vesznek körül (**8.a ábra**) jelezve az eredeti kötőanyag átalakulását a beszivárgó pórusoldatok hatására (Weber et al. 2015).

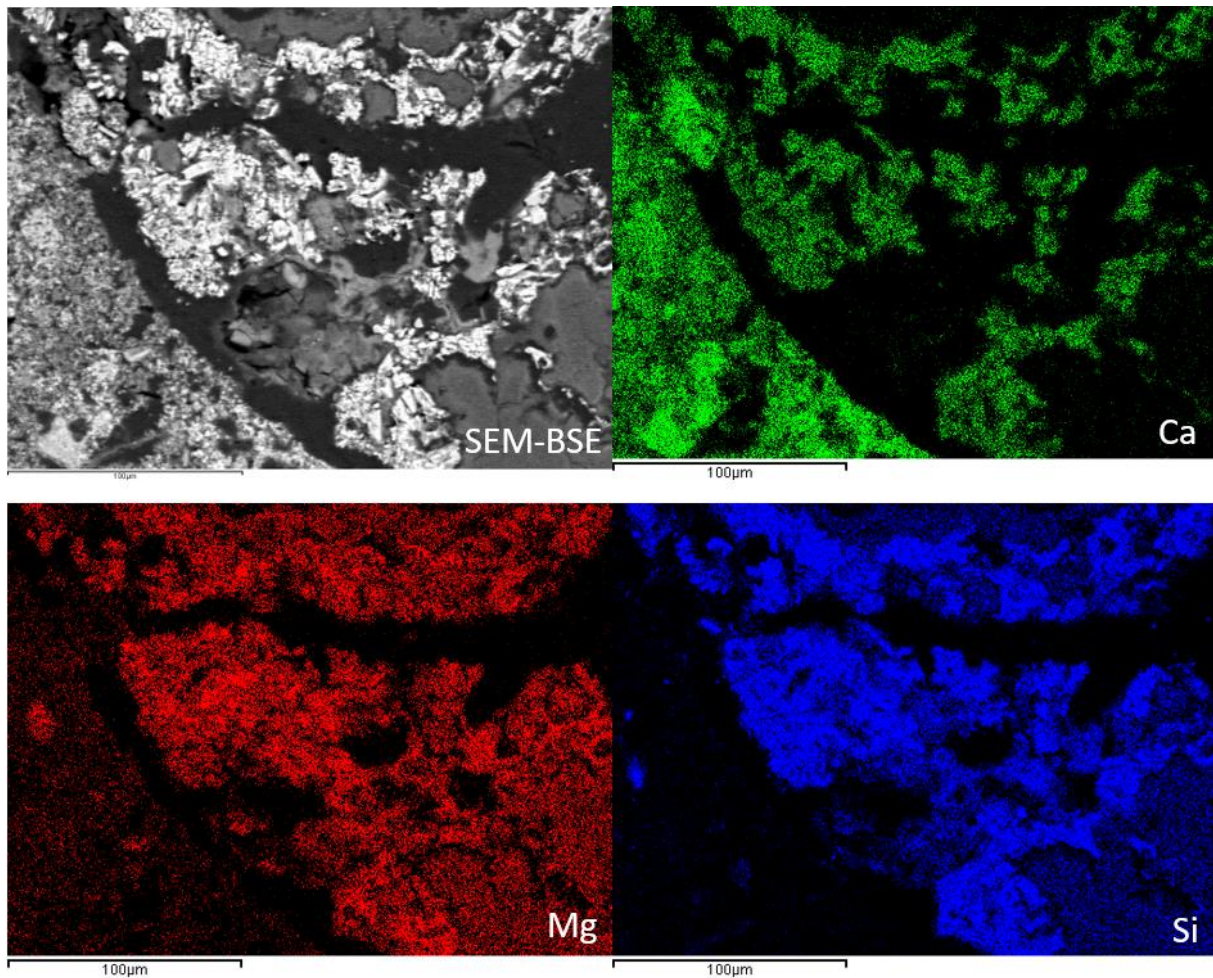
A mátrix mellett a meszes habarcsok másik jellemző komponenseit, az úgynevezett kötőanyag-rokon szemcséket és fázisokat is vizsgáltuk. A leggyakrabban előforduló kötőanyag-rokon szemcsék a mészetégetés során az optimális égetési hőmérsékletnél alacsonyabb, ill. magasabb hőmérsékletet elszenvedett, ún. alul-, illetve túlégetett karbonátos szemcsék (**8.c ábra**) és a habarcs bekeverése közben keletkező kerekded mészesomók. Különösen az alulégetett maradvány szemcsék mutathatnak részleteket az eredeti közettextúrájáról és összetételéről (Hughes et al. 2001). A vizsgálatok során minden mintában találtunk kerekded mészesomókat és/vagy szögletes, feltételezhetően a nyersanyag alulégetett maradványaiból álló szemcséket, ill. egyes kagylótöredékek esetében is megfigyelhettünk hóhatásra utaló jeleket (ld. **Melléklet – 12.c ábra**).

A **8.c ábra** egy nagy méretű inhomogén kötőanyag-rokon szemcsét mutat be, amely Mg-ban (sötét részek) és Ca-ban (világos részek) gazdag területeket tartalmaz. A kémiai összetételt a környező kötőanyag átlagos kémiai összetételével összehasonlítva csak kisebb eltérések voltak kimutathatók.



8. ábra: Keszthely-Fenekpuszta: (a) Heterogén, kalciumban gazdag (világos) és szegény (sötétebb) részekből álló habarcs kötőanyag ún. “popcorn” kalcittal (zöld nyilak). A nagy méretű dolomitkavicsok széleiken dedolomitizáltak (kék nyilak), egyes szilikátszemcsék (sárga nyíl) részleges oldódási felületet mutatnak (M25-27-es minta, SEM-BSE); (b) Másodlagos kalcium karbonát kiválások (kék nyíl) a heterogén mátrixban Ca-ban szegény, porózus meszes szemcsével (fehér nyíl) (M25-02-es minta, SEM-BSE); (c) Nagy, szögletes, kötőanyag-rokon szemcsé, erőteljes zsugorodási repedésekkel, valamint Mg-ban (sötét) és Ca-ban (világos) gazdag területekkel (M25-12-es minta, SEM-BSD)

Fig. 8.: Keszthely-Fenekpuszta: (a) Heterogeneous mortar binder consisting of calcium rich (light) and calcium poor (darker) parts with so-called “popcorn” calcite (green arrows). Rims of large dolomite pebbles (blue arrows) suffered dedolomitization; certain silicate grains (yellow arrow) show partial resorption surface (sample M25-27, SEM-BSE), (b) Secondary calcium carbonate precipitations (blue arrow) in heterogeneous matrix with a porous, dark calcareous grain (white arrow) depleted in calcium (sample M25-02, SEM-BSE); (c) Large, angular binder-related grain, with strong shrinkage cracks consist of areas rich in Mg (dark) and Ca (bright) (sample M25-12, SEM-BSD)



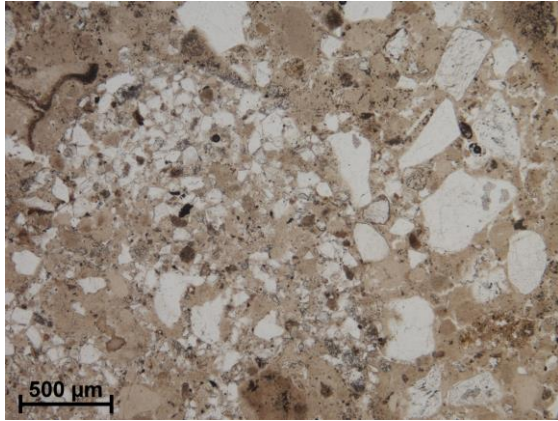
9. ábra: Keszthely-Fenekpuszta, M25-21-es minta: Kvarc és dolomitzemcsék határán a mészégetés során kialakult diopszid kristályok (világos szemcsék a BSE képen) (SEM-BSE és elemtérkép). Fotó: Pintér F.

Fig. 9.: Keszthely-Fenekpuszta, sample M25-21: Diopside crystals, formed during lime-burning, appear on the boundary of quartz and dolomite grains (light grains in BSE image) (SEM-BSE and element maps). Photo: F. Pintér.

Hasonló jellemzőket találtunk minden mintában, kivéve az 25-ös épületekből származó egyes mintáknál (pl. M25-21, I. fázis és M25-12, III. fázis), ahol a kötőanyagok és a kötőanyag-rokon szemcsék kalciumban erősen kimerültek és a Si mennyisége is több volt a többi mintához képest. A kötőanyagok kémiai összetételének eloszlása – mint ahogy azt már a bevezetőben is említettük – itt sem volt egyértelműen adott építési fázishoz köthető.

A SEM-EDX vizsgálat során a mészégetésre használt konkrét forráskőzet szövetére utaló részleteket nem, vagy csak korlátozottan lehetett megfigyelni. Ez utóbbihoz példaként említhetők az egykori dolomitzemcsék körvonalait alig felismerhetően tartalmazó csomók. A SEM-BSE megfigyelésekkel jól korrelálnak, illetve kiegészítik azokat a petrográfiai vizsgálatok során észlelt, termikusan részlegesen bontott, korábban említett recens molnuszka héj töredékek és dolomitkavicsok, amelyek egyértelműen beazonosíthatóvá teszik a kötőanyag előállításához használt nyersanyagok egyes típusait.

A durvább szemcsés kötőanyag-rokon szemcsék sok mintában tartalmaznak SiO_2 maradványokat, amelyekben a főelemek (Ca, Mg és Si) eloszlása az égetés során korlátozottan kialakult, feltételezhetően nem sztöchiometrikus fázisok meglétére utalnak. Az eredeti nyersanyag karbonátos (dolomitos) és szilícium-dioxid (feltehetően kvarc, esetleg kova) komponensei közötti reakcióra csak néhány mintában találtunk egyértelmű bizonyítékot. Egy kötőanyag-rokon maradványban (M25-21-es minta) az égetés során képződött másodlagos fázisok voltak kimutathatóak. A Ca:Mg:Si ~ 1:0,9:1,9 atomaránya diopszid, $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ jelenlétére utal (9. ábra). Ez a piroxén a természetben előforduló kontakt metamorf folyamatokhoz hasonlóan (pl. kontakt metamorf karbonát kőzetekben, dolomitos márványokban), ill. mesterséges termékekben (pl. kerámiák, salakok és történelmi cementek) is képződhet az égetés során, ahol a Mg-ban gazdag karbonát komponensek reakcióba lépnek szilikát-ásványokkal végeredményben Ca-Mg-szilikátokat képezve (Cultrone et al. 2001).



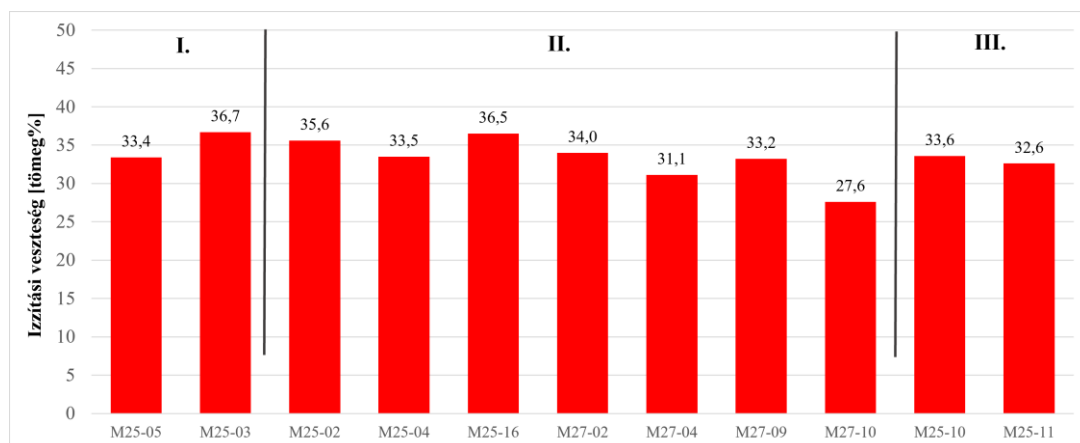
10. ábra: Keszthely-Fenekpuszta, M25-08a minta: égetés hatására átalakult, a kötőanyaggal azonos megjelenésű meszes homokkő-maradvány (szaggatott vonallal jelölve) (polarizációs mikroszkópia, 1N). Fotó: Józsa S.

Fig. 10.: Keszthely-Fenekpuszta, sample M25-08a: residue of a calcareous sandstone grain (marked with the dashed line) transformed due to firing and showing identical appearance to the binder (polarized light microscopy, PPL). Photo: Józsa S.

Karbonát-szilikát reakcióra további példát találunk a III. fázishoz tartozó minták egyikében (M25-08a), amelyben nagy méretű, eredetileg CaCO_3 kötőanyagból és sziliciklasztos törmelékből álló szemcsék (valószínűleg a miocén meszes homokkő töredékei) figyelhetők meg. Az eredeti karbonát cement szinte teljes mértékben átalakult és a habarcs kötőanyagával megegyező szöveti, illetve optikai jellegeket mutat (10. ábra). A sziliciklasztos komponensek vékonycsiszolatban megfigyelhető határvonala elmosódott, amely az égetés

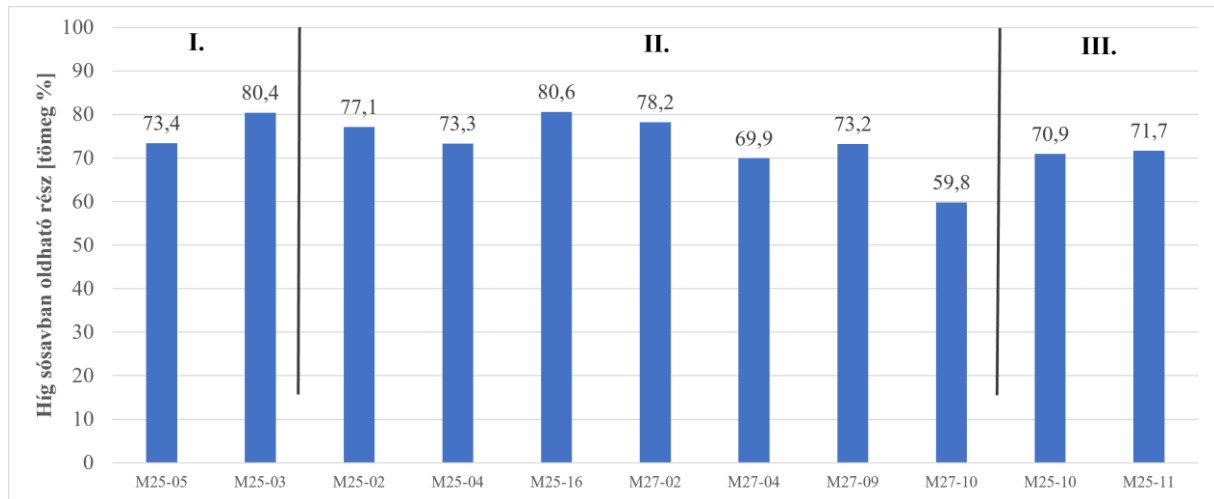
során a szilikát és karbonát komponensek között lejátszódó reakciót és végeredményben enyhén hidraulikus tulajdonságokkal rendelkező új fázisok létrejöttét jelezheti. Bár a fent említett komponensek arra utalnak, hogy a habarcs kötőanyagok előállításához használt forrásközet és/vagy nyersanyagkeverék szilícium-dioxid vagy kovakomponenseket tartalmazott, mennyiségük és eloszlásuk egyértelműen azt mutatja, hogy a minták többségében csekély mértékű szennyeződésekről van szó.

Végezetül számos habarcsmintában, a kötőanyaghoz hasonlóan, egyes adalékanyagok megjelenése is utólagos mállási folyamatok hatására utal. A dolomitzemcsék körüli oldódási peremek dedolomitizációt jeleznek, ahol a $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ porusolatok hatására lebomlott, és reakciótermékként $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ill. CaCO_3 keletkezett (8.a ábra). A reakció jól ismert a portlandcement-alapú betonokban (Katayama 2010), de bizonyos körülmények között kialakulhat történelmi mészalapú habarcs kötőanyagokban is. Több mintában is megfigyeltük, hogy számos kvarc és földpát adalék szemcse felületén is oldódási jelenségek mutatkoznak (8.a ábra). A jelenség gyakran megfigyelhető – mint a mi esetünkben is – régészeti ásatások során talált, főleg ókori történelmi habarcsoknál (Weber et al. 2015). Bár a reakciók még nem teljesen tisztázottak, feltételezhető, hogy a hosszú ideig tartó eltemetődés és a nagy nedvességtartalom, ill. elemgazdag (magas pH-jú?) porusolatok hatására az adalék földpát- vagy akár kvarc szemcséinek felülete lassan és kis mértékben feloldódhat. A felszabaduló szilikagél kitölti a mikroporusokat, ami lokálisan a kötőanyag másodlagos vagy „látens hidraulikus” tulajdonságait okozza (Weber et al. 2015).



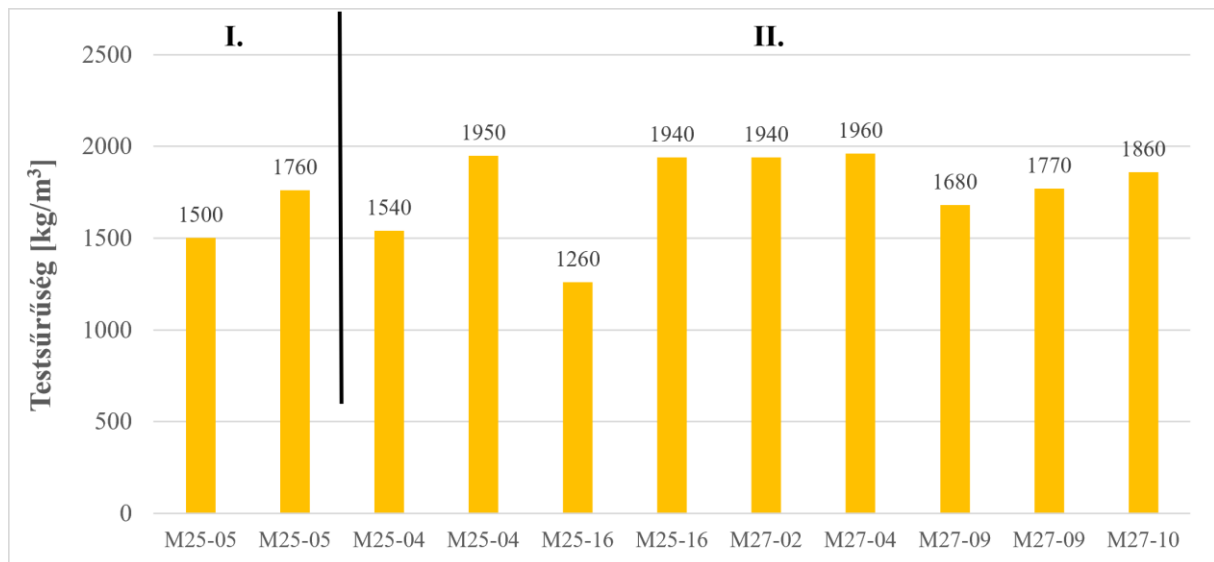
11. ábra: Keszthely-Fenekpuszta: Habarcsok izzítási vesztesége a kronológiai fázisok (I-III.) szerint ábrázolva (mintaszámok a vízszintes sorban). Grafika: Török Á., Pintér F.

Fig. 11.: Keszthely-Fenekpuszta: LOI (loss of ignition) of mortars illustrated by chronological phases (I-III) (sample numbers in horizontal rows). Graphic: Á. Török, F. Pintér.



12. ábra: A Keszthely-fenépusztai habarcsok híg sósavban oldható része a kronológiai fázisok (I-III.) szerint ábrázolva (mintaszámok a vízszintes sorban). Grafika: Török Á., Pintér F.

Fig. 12.: Mortars of Keszthely-Fenépuszta, parts soluble in dilute hydrochloric acid, divided by chronological phases (I-III) (sample numbers in horizontal rows). Graphic: Á. Török, F. Pintér.



13. ábra: A Keszthely-fenépusztai habarcsok testsűrűsége a kronológiai fázisok (I-II.) szerint ábrázolva (mintaszámok a vízszintes sorban). Grafika: Török Á., Pintér F.

Fig. 13.: Mortars of Keszthely-Fenépuszta, the body density of mortars divided by chronological phases (I-II) (sample numbers in horizontal rows). Graphic: Á. Török, F. Pintér.

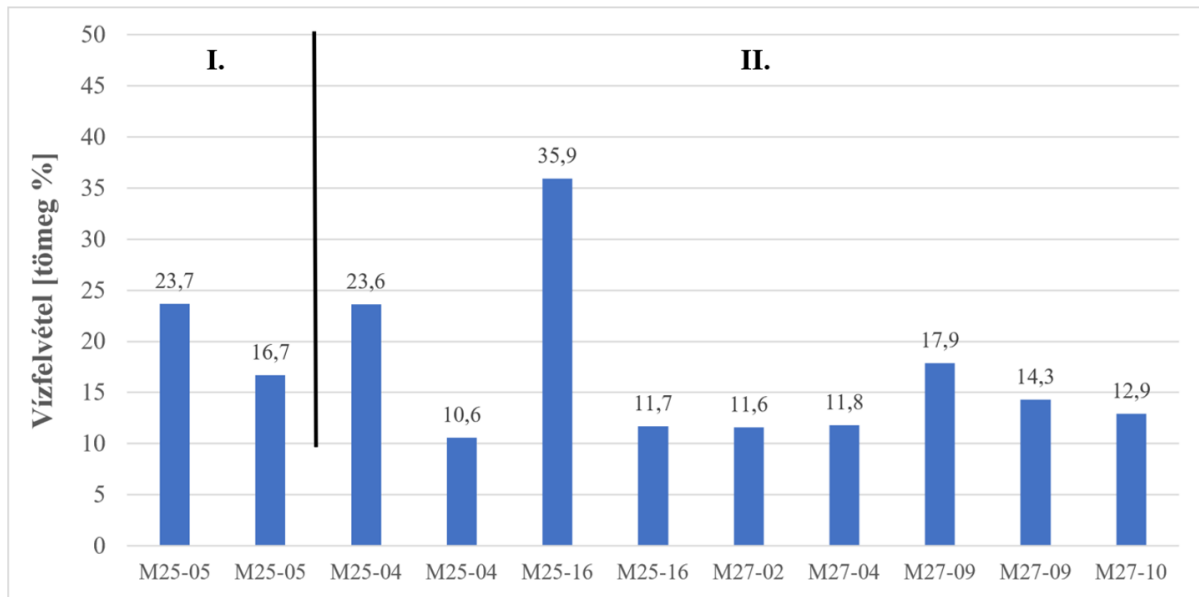
Méregológiai vizsgálati eredmények

A habarcsok izzítási vesztesége és híg sósavban való oldható frakció százalékos aránya jól tükrözi a habarcsok összetételét. Az izzítási veszteség 30% feletti a legtöbb minta esetében, a **11. ábrán** az is látható, hogy olyan római kori fugázó habarcsot (M27-10) is használtak a II. kronológiai fázisban, amelynél ez az arány 28% körüli volt.

A híg sósavban való oldást követően látható, hogy a habarcsok uralkodó része karbonátos összetevőket tartalmaz. A méréseink szerint a karbonát tartalom 70% feletti (kivéve az M27-10-es mintát, amelyben

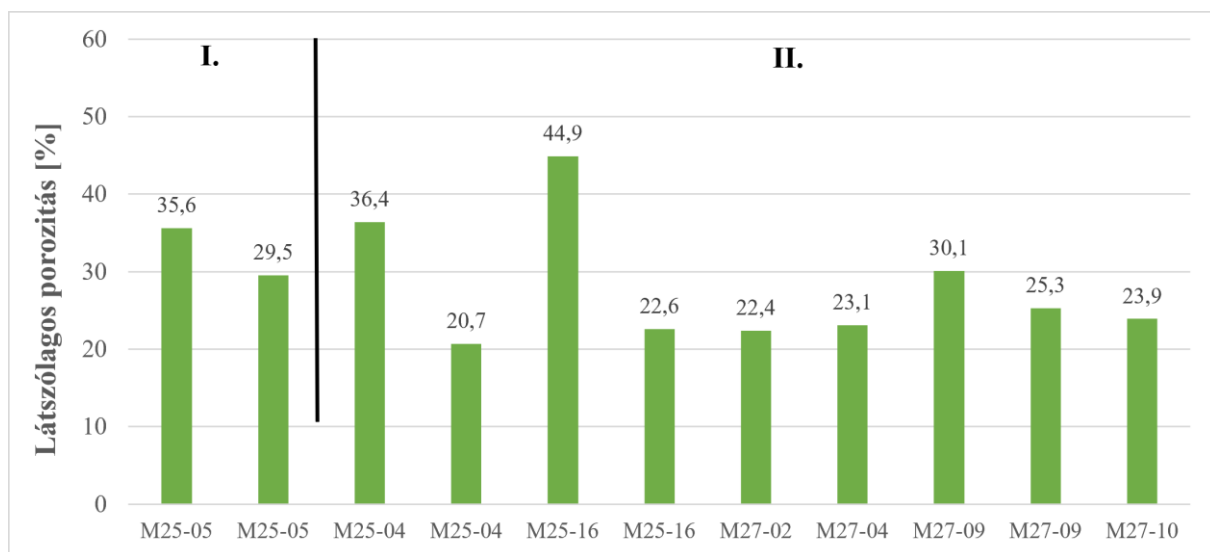
60% (**12. ábra**) és a három vizsgált periódusokból származó habarcsok karbonát tartalma nem különül el élesen egymástól. A karbonáttartalom-vizsgálat esetében azonban meg kell jegyeznünk, hogy a mérési eredmények nemcsak a kötőanyag, hanem részben az adalékanyagok karbonát tartalmát is tükrözik, mivel ezen komponensek egy része szinten a savas kezelés hatására szintén oldatba kerülhetett.

A termoanalitikus (derivatográfias) mérések igazolták a mikroszkópos elemzéseket. A karbonát frakció uralkodó ásványa a dolomit, ami a habar-



14. ábra: A Keszthely-fenekpusztai habarcsok vízfelvétele a kronológiai fázisok (I-II.) szerint ábrázolva (mintaszámok a vízszintes sorban). Grafika: Török Á., Pintér F.

Fig. 14.: Mortars of Keszthely-Fenekpuszta, the water absorption of mortars divided by chronological phases (I-II) (sample numbers in horizontal rows). Graphic: Á. Török, F. Pintér.



15. ábra: A Keszthely-fenekpusztai habarcsok látszólagos porozitása a kronológiai fázisok (I-II.) szerint ábrázolva (mintaszámok a vízszintes sorban). Grafika: Török Á., Pintér F.

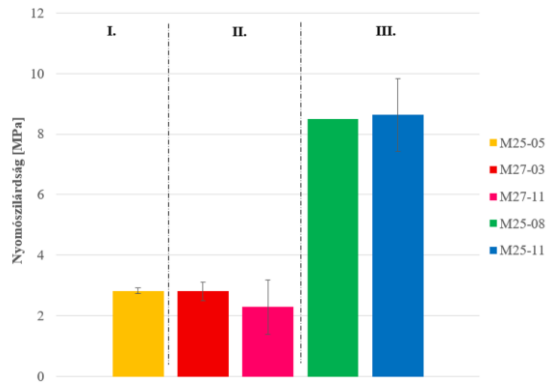
Fig. 15.: Mortar of Keszthely-Fenekpuszta, the virtual porosity of mortars divided by chronological phases (I-II) (sample numbers in horizontal rows). Graphic: Á. Török, F. Pintér.

csak adalékanyagának nagy dolomittartalmára utal és a mikroszkópos eredményekkel jól korrelál.

A habarcsok testsűrűsége szélsőségesen, 1260 kg/m^3 (egy minta) és 1960 kg/m^3 között szór az I., a II. és a III. kronológiai periódusból származó habar-csoknál, de jellemzően $1500\text{--}1960 \text{ kg/m}^3$ közötti (**13. ábra**).

A habarcsok (**14. ábra**) vízfelvétele – amely során 10 és 36% közötti értékeket mértünk – szorosan összefügg látszólagos porozitásukkal (**15. ábra**).

A habarcsminták szilárdsági paramétereit a pontterheléses vizsgálatok alapján lehetett meghatározni. A méréseket a különböző kronológiai fázisokhoz köthető mintákon végeztük. Az eredmények azt mutatják, hogy az első két fázis között nincs nagy különbség. A harmadik fázisban azonban a vizsgált habarcsminták (M25-08, M25-11) jóval nagyobb szilárdságúak (**16. ábra**).



16. ábra: A Keszthely-fenekpusztai habarcsok átlagos nyomószilárdsága a kronológiai fázisok (I-III.) szerint ábrázolva (a mérési eredmények szórását oszlopok jelzik, a mintaszámok az ábra jobb oldalán találhatóak). Grafika: Török Á., Pintér F.

Fig. 16.: Mortars of Keszthely-Fenekpuszta, the average compressive strength of mortars divided by chronological phases (I-III) (standard deviation of measurement results is indicated by columns, sample numbers are indicated on the right side of the chart). Graphic: Á. Török, F. Pintér.

Diszkusszió

Vizsgálataink során három különböző módszer együttesen elemeztük a Keszthely-fenekpusztai római erőd három épületmaradványának habarcsmintáit. A 25-ös épületet a 3. század végétől a 7. század elejéig használták, ez alatt három nagyobb mértékű átépítésen esett át. Az első fázis (I.) a 3. század végétől indul és az erőd építése előtti korszakra vonatkozik. A második fázis (II.) az erőd építésével egyidejű volt, tehát a 4. század közepétől az 5. század második negyedéig tartott. A harmadik fázis az 5. század közepétől a 7. század elejéig keltezhető (III). A két másik épület, a 24-es és a 27-es az erőddel egy időben volt használatban, tehát ennél a két épületnél csak a II. kronológiai fázis volt megfigyelhető.

A polarizációs mikroszkópos vizsgálat alapján megállapítható, hogy a vizsgált fenekpusztai habarcsok készítéséhez az adalékanyagokként a lehető legközelebbi területen található alkalmas nyersanyagokat használták. A habarcsok döntő többségénél az adalékanyag legnagyobb mennyiségét a főleg nagyméretű, jól koptatott dolomit-szemcsék teszik ki. Ez az anyag nagy valószínűséggel a Keszthelyi-hegység déli pereméről, a Pannon tenger partján képződött abráziós konglomerátum (Békési Formáció, Diási Tagozat) kisebb foltokban megtalálható feltárásaiból származik. Az építkezéshez vagy ezekből a feltárásokból közvetlenül, vagy innen, az időszakos vagy állandó helyi vízfolyások által, illetve gravitációsan később áthalmozott anyag lelőhelyeiről szerezték be. Alkalmas körülmények között – pl. partközeli eredeti feltárás,

vagy nagytömegű anyagszállítás – az anyag akár a Balaton partjáig, sőt kicsit beljebb is eljuthatott és ott összekeveredhetett a parton felhalmozódott törmelékanyaggal, így a hullámverés által koptatott molluszka vázelemekkel is. Ezeken a helyeken lehetett megtalálni a recens tóparti iszapot is a meszes vagy korhadt növénymaradványokkal. Fontos lehetett a kötés erősítése szempontjából, hogy a nagyméretű koptatott mészszenyagú szemcsék közé kisebb méretű szögletes sziliciklasztos törmelék szemcsék is kerüljenek szintén jelentős mennyiségben. Ez az anyag is rendelkezésre állt a „pannóniai” homoktartalmú üledékek formájában Keszthely környékén (Békési Formáció Kállai Tagozat és Újfalu Formáció Somlói Tagozat). A durvább szemcsés kalcittal cementált homokkő szemcsék ugyanezen homokösszetek cementált padjaiból származhatnak. Ez jól kiegészíti azt a képet, hogy az épületeknél és védműveknél felhasznált homokkő és mészkő alapanyag szintén a közelből, feltehetően a Balaton északi partjáról (Keszthelyi-hegység) származik.

A vizsgált anyagok közül a 24-es épület fürdőmedencéjéből származó egyikmintában (M24-07) csak égetett agyagtermékek töredékei (pl. cserépedény, tetőcserép stb.) voltak megfigyelhetők. Ez az összetétel olyan ókori puccolános mészkötő anyagokra jellemző, amelyeket nedves környezetben (pl. vizes helyiségek, csatornák, víz alatti műtárgyak, stb.) alkalmaztak. Az alacsony hőfokon égetett kerámiából készített örlemény puccolános (hidraulikus) reakcióba lép az oltott mésszel, ami által vízálló kalcium-szilikát hidrát és kalcium-aluminát hidrát fázisok keletkeznek vízállóvá és nagyobb szilárdságúvá téve az eredetileg nem vízálló mészhabarcsot. Kerámia töredékeket majd minden mintában megfigyelünk, azonban ezek – többi adalékanyaghoz viszonyított – kisebb mennyisége arra utal, hogy nem állt belőlük rendelkezésre nagyobb mennyiség. Ez is és mikroszkópi megjelenésük is azt támasztja alá, hogy helyben, vagy közelben készült edények véletlen törés által keletkezett töredékeiről lehet szó és a – fenti példa kivételével – a habarcsok többségében csak újra felhasználásként és nem a habarcs minőségének javítása érdekében kerültek bele.

Az adalékanyag egyes szemcsefajtainak részletes mennyiségi értékelése, ahogy a bevezetőben írtuk, nem képezi jelen tanulmány tárgyát. Az itt bemutatott előzetes vizsgálati eredmények alapján azonban megállapítható, hogy van néhány olyan törmelékfajta, amelynek mennyiségi adatai alkalmasak az egyes kronológiai fázisok közötti különbségtételre. Négy különböző adalékanyag mennyiségi adatai vonatkozásában is különbség mutatkozott a III. kronológiai fázis és a korábbi korszakokhoz köthető habarcsminták között. Az I.-II. periódus egységes képe a közös római gyökerekkel magyarázható, ezért is érdekes, hogy a

III. (már népvándorláskori) építkezési egységek mintáinak adalékanyagai némileg eltérő képet mutatnak.

A polarizációs mikroszkópos vizsgálat lehetővé tette a kötőanyag egyes komponenseinek megfigyelését is. Mikroszkópi bélyegek alapján (méret, termet, alak, koptatottság, szövet) egyértelműen kimutatható volt, hogy a habarcs kötőanyagának készítéséhez (égetéséhez) nagy mennyiségben használták az adalékanyagoknál ismertetett mészes anyagú, abráziós eredetű kavicsokat az ott leírt beszerzési lehetőségeket kihasználva.

A laboratóriumi geokémiai és mérnökgeológiai vizsgálatok alapján a kötőanyagokról a petrográfiai megfigyelésekkel jól korreláló, viszonylag egységes kép rajzolódik ki, amelynek a fő sajátossága, hogy mindhárom kronológiai fázisban változó, de nagy karbonát tartalmú habarcsokat használtak. A minták szinte mindegyikére jellemző a kötőanyagok kémiai heterogén jellege, amely a Ca/Mg és a Ca+Mg/Si(+Al) arányok változásában és számos Ca-ban, Mg-ban, Si-ban és Al-ban gazdag kötőanyag-rokon fázis inhomogén eloszlásában tükröződik. Az értékek alapján a minták, változó magnézium, szilícium és alumínium tartalmú mészhabarcsként, ill. dolomitos mészhabarcsként jellemezhetőek. A habarcsok fizikai tulajdonságainak elemzése igazolta, hogy az alkalmazott római kori dolomitos habarcsok még évezredek idősége után is megfelelő szilárdsággal rendelkeznek. Látszólagos porozitásuk 20% feletti, de egyes minták esetén meghaladhatja a 40%-ot is. Testsűrűségük 1260 kg/m³ és 1960 kg/m³ közötti tartományt ölel fel. Ezen paraméterek alapján azonban a három kronológiai fázis habarcsai között nincsenek döntő különbségek. A pontterheléses mérések ezzel szemben azt mutatták, hogy a harmadik kronológiai fázisba tartozó vizsgált habarcsok közül kettőnek (M25-08, M25-11) a szilárdsága határozottan nagyobb (átlagosan 8 MPa feletti), mint az első két fázisban (I-II.) mért habarcsok szilárdsági értékei, amelyek 4 MPa alattinak adódtak. Továbbá az is megállapítható, hogy ezek a minták valamivel kisebb karbonát tartalmúak, kevésbé porózusak és nagyobb testsűrűségűek, amelyek a korábbi habarcsokkal nem teljesen kompatibilis fizikai tulajdonságokat jeleznek. A kötőanyagok mikroszkópban megfigyelt homogén, szinte repedésmentes megjelenése, kis mikroporozitása, a mátrix relatív nagy Si-tartalma, valamint a mintában észlelt égetett karbonát és szilikát komponensek megléte a kötőanyag egykor gyengén hidraulikus tulajdonságaira utalhatnak. Végezetül a mátrix jellegzetes megjelenése másodlagos betemetődési folyamatok nyomait is magán hordozza, amelyek nemcsak a kémiai összetételt, de a mikroszerkezetet is megváltoztatták és így részben hatással lehetnek a

mért nagyobb szilárdsági, valamint kisebb porozitási értékekre is.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a mészégetéshez mindhárom periódusban azonos típusú vagy nagyon hasonló jellegű, kevert összetételű nyersanyagokat használtak. A dolomit, mint jellegzetes nyersanyag-komponens, számos mintában direkt kimutatható volt, azonban a minták kémiai összetételéből adódóan biztosan nem tekinthető az égetés során felhasznált egyedüli anyagnak. A geokémiai és a petrográfiai vizsgálatok megerősítették, hogy a mészégetéshez használt nyersanyag nem szálkőzet előfordulásból kitermelt karbonátos kőzet, hanem az erőd közelében előforduló, helyi vegyes (kalcitos, dolomitos, szilikátos) összetételű laza, könnyen kitermelhető (recens) üledék lehetett, amely nemcsak üledék szemcséket, ásvány- és közettöredékeket, de kagylómaradványokat is tartalmazott. Ez a technológiai alkalmazás nem ismeretlen római kori, provinciális építményeknél. Az ausztriai Enns (*Lauriacum*) településen feltárt késő római kori villa építésénél használt habarcsok összetételében is kimutatható volt, ill. a közelben feltárt római kori mészégető kemencékből is előkerültek az Enns-folyó által szállított mészkő kavicsok és görgetegek maradványai, amelyeket – helyi mészkő előfordulás híján – a habarcs kötőanyagok égetésére és előállítására használtak (Wacha 2010; Linke et al. 2017).

Habarcs technológiai szempontból a legizgalmasabb kérdés az egységesebb I. és II. periódusok utáni III. periódusban megjelenő eltérő tulajdonságú és megnövekedett nyomószilárdságú habarcsok értelmezése. Hangsúlyozni kell azonban, hogy ezt a megfigyelést nem feltétlenül kell technológiai fejlődésként interpretálni, hanem pl. a habarcsok építészeti használatára is vissza lehet vezetni. Ezen habarcsok ugyanis 1,5–1,8 méter mély és minimum 1x1,6 méteres pillérek kötéséből származnak. Ezeknek már a dimenziói is azt mutatják, hogy komoly statikai jelentőségük volt a felmenő falak, a tetőzet tartásában, amihez a habarcsok szilárdsága párosulhatott. A nagyobb nyomószilárdsággal bíró habarcs használatának elmélete jelen esetben azért is különösen érdekes, mert a fizikai tulajdonságaik szervesen összefüggenek a mintákban megfigyelt karbonát-szilikát reakciókkal és azoknak a kötőanyagra gyakorolt hatásával. Mindazonáltal fontos megjegyezni, hogy a késő antik és koraközépkorból a puccolános kötőanyagokon kívül nem ismertek olyan hidraulikus termékek, amelyek kimondottan csak a nyersanyag égetésével kerültek volna előállításra. Így a jelen eredmények alapján nem lehet egyértelműen bizonyítani az esetlegesen hidraulikus tulajdonságokkal rendelkező kötőanyagok szándékos alkalmazását az épület teherhordó szerkezetei esetében.

Az 5–6. században, a római kort követően Pannoniából alig ismerünk új vagy olyan átépített köépüle-

teket, mint a Keszthely-fenekpusztai 25-ös épület. Párhuzamokat leginkább a Drávától délre (pl. Sremska Mitrovica/*Sirmium*) és a balkán provinciákban találunk, de hasonló vizsgálati eredmények a habarcsok kapcsán itt még hiányoznak. A kérdésre, hogy a Keszthely-fenekpusztai–pannoniai viszonylatban már a római koron túli habarcs-használatra vonatkozó megfigyelések–mennyire egyeznek vagy térnek el ettől az iránytól, csak kiterjedtebb és összehasonlító vizsgálatokkal lehetne megnyugtatóan választ adni.

Végezetül megemlítendő, hogy bár a 15 hektár nagyságú erőd felépítéséhez nagy mennyiségben kellett meszet égetni, ennek régészeti nyomait egyelőre nem sikerült megtalálni Keszthely-Fenekpusztán. Feltehetően az erődön kívüli, nyugatra, illetve északra eső területeken kereshetnénk ezeket, de erre irányuló régészeti kutatások a területen még nem voltak.

A Keszthely-Fenekpusztáról származó habarcsok kutatása önmagukban is fontos eredményeket hozott. A habarcsok fizikai tulajdonságainak elemzése igazolta azt, hogy az alkalmazott római kori meszes-dolomitos fugázó habarcsok, még másfél évezred után is megfelelő szilárdsággal rendelkeznek. Fontos kiemelni, hogy az alkalmazott habarcsok porózusak, jó vízáteresztő-képességűek, ami biztosította a falak átszellőzését.

Konklúzió

Vizsgálataink során három különböző módszer együttessel elemeztük a Keszthely-Fenekpuszta római erőd három épületmaradványának habarcs mintáit. A habarcsok eltérő szempontú, más-más tulajdonságaira irányuló vizsgálatával kapott eredmények egymással jó összhangban vannak, egymást megerősítik és kiegészítik a habarcsok anyagára, összetevőik származási helyére, készítési módjára és fizikai tulajdonságaira vonatkozó tudásunkat egyaránt. A Keszthely-fenekpusztai habarcsminták vizsgálatával átölelt közel 300 év (3. század vége – 7. század eleje) különleges lehetőséget nyújt Pannoniában a római hatalom jelenlétén túlmutató változás diáchrón, korszakokon átívelő áttekintésére. Így a jelen tanulmány végül arra is rávilágít, hogy a Keszthely-fenekpusztaihoz hasonló régészeti jelenségek komplex, összehangolt geoarcheometriai vizsgálata új, az archeológia keretén túlmutató következtetésekre ad lehetőséget.

Szerzők tudományos közreműködése

Józsa Sándor Módszertan, Validálás, Formai elemzés, Kísérletvezetés, Kísérleti munkák, Adatkezelés, Eredeti kézirat, Vizualizáció. **Pintér Farkas** Validálás, Kísérletvezetés, Kísérleti munkák, Adatkezelés, Eredeti kézirat, Javított kézirat, Vizualizáció. **Török Ákos** Validálás, Kísérletvezetés, Kísérleti munkák, Adatkezelés, Eredeti kézirat. **Heinrich-Tamáská Orsolya** Kutatásvezetés, Mód-

szertan, Kísérletvezetés, Adatkezelés, Eredeti kézirat, Javított kézirat, Vizualizáció, Ellenőrzés, Adminisztráció, Pályázás.

Köszönetnyilvánítás

A habarcsminták petrográfiai vizsgálatát anyagilag a Leibniz-Institut für Geschichte und Kultur des östlichen Europa (GWZO) támogatta. Köszönettel tartozunk továbbá a Balatoni Múzeumnak (Keszthely), a Nemzeti Kulturális Alapnak (NKA) és a Heidelbergi Egyetem Régészeti Tanszékének, amely intézmények támogatásával az ásatások Keszthely-Fenekpusztán 2009 és 2017 között megvalósulhattak. A habarcsok műszaki földtani összetételi elemzésében Rónaky Viktória és Dr. Csányi Erika (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék) nyújtottak segítséget.

Irodalom

BOHN, P. (1975): A Keszthelyi-hegység komplex földtani vizsgálatának újabb eredményei. *Földtani Közlöny* **105/1** 31–57.

BUDAI, T., CSÁSZÁR, G., CSILLAG, G., DUDKO, A., KOLOSZÁR, L. & MAJOROS, Gy. (1999): *A Balaton-felvidék földtana*. Magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez, 1: 50.000. Magyar Állami Földtani Intézet **197**, Budapest, 257 p.

CULTRONE, G., RODRIGUEZ-NAVARRO, C., SEBASTIAN, E., CAZALLA, O. & DE LA TORRE, M. J. (2001): Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. *European Journal of Mineralogy* **13/3** 621–634.

<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2001/0013-0621>

CZICZER, I., MAGYAR, I., PIPÍK, R., BÖHME, M., ČORIĆ, S., BAKRAČ, K., SÜTŐ-SZENTAI, M., LANTOS, M., BABINSZKI, E. & MÜLLER, P. (2009): Life in the sublittoral zone of long-lived Lake Pannon: paleontological analysis of the Upper Miocene Szák Formation, Hungary. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* **98** 1741–1766.

<https://doi.org/10.1007/s00531-008-0322-3>

CSÁK, Á. (1903): Fenék (Mogentiana) és területén az 1899. év folyamán teljesített első archaeológiai ásatásunk eredményeinek ismertetése. *A Balatoni Múzeum-Egyesület Első Évkönyve (Keszthely)*. **I.** 73–92.

FÓTHI, E., HEINRICH-TAMÁSKA, O., MÜLLER, R. & PERÉMI, Á. (2009): Möglichkeiten und Grenzen der Radiokarbonanalyse zur Datierung der Keszthely-Kultur. In: HEINRICH-TAMÁSKA O., KROHN, N. & RISTOW, S., szerk., *Dunkle Jahrhunderte in Mitteleuropa? Tagungsbeiträge der Arbeitsgemeinschaft Spätantike und Frühmittelalter 1.*

Rituale und Moden (Xanten, 8. Juni 2006) und 2. Möglichkeiten und Probleme archäologisch-naturwissenschaftlicher Zusammenarbeit (Schleswig, 9.–10. Oktober 2007). Studien zu Spätantike und Frühmittelalter 1. Hamburg. Verlag Dr. Kovač. 307–334.

HAAS J., szerk., (1995): *Magyarország Litosztratigráfiai Egységei. Triász*. Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa Budapest, 278 p.

HAVASI, B., HEINRICH-TAMÁSKA, O., NAGY, G. & VASÁROS, Zs. (2020): Római castrum és a Festetics majorság Fenékpusztán. Elképzések egy 21. századi kulturális turisztikai tájról. In: WIRTH, G. & KÖBLI, Á., szerk., *Huncastle II*. Budapest 131–151.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2007): Bemerkungen zur Transformation spätantiker Strukturen in Pannonien am Beispiel von Keszthely-Fenékpusztá. *Acta Archaeologica Carpathica XLII-XLIII* 199–229.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2011a): Die spätrömische Innenbefestigung von Keszthely-Fenékpusztá: Innere Chronologie und funktioneller Wandel. In: HEINRICH-TAMÁSKA, O., szerk., *Keszthely-Fenékpusztá im Kontext spätantiker Kontinuitätsforschung zwischen Noricum und Moesia. Castellum Pannonicum Pelsonense 2* Budapest-Leipzig-Keszthely-Rahden/Westfalia, VML Verlag. 653–702.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2011b): Überlegungen zu den „Hauptgebäuden“ der pannonischen Innenbefestigungen im Kontext spätrömischer Villenarchitektur. In: BÜLOW VON, G. & ZABEHLICKY, H., eds., *Bruckneudorf und Gamzigrad. Spätantike Paläste und Großwillen im Donau-Balkan-Raum*. Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte 15. Frankfurt/M. 233–245.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2013): Archäologische Forschungen in Keszthely-Fenékpusztá: eine Einführung. In: HEINRICH-TAMÁSKA, O. ed., *Keszthely-Fenékpusztá: Katalog der Befunde und ausgewählter Funde sowie neue Forschungsergebnisse. Castellum Pannonicum Pelsonense 3*. Budapest-Leipzig-Keszthely-Rahden/Westfalia, VML Verlag. 9–24.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2014): Research perspectives on landscape archaeology at the western end of Lake Balaton in the first millennium: In: HEINRICH-TAMÁSKA, O. & STRAUB, P. eds., *Mensch, Siedlung und Landschaft im Wechsel der Jahrtausende. People, Settlement and Landscape on Lake Balaton over the Millennia. Castellum Pannonicum Pelsonense 4* Budapest-Leipzig-Keszthely-Rahden/Westfalia, VML Verlag. 403–428.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2015): Inner fortifications and the Late Roman Defensive System in Pannonia (4th/5th c. AD) – some remarks. In: VAGALANSKI, L. & CHARANKOV, N. eds., *LIMES XXII. Proceedings of the 22nd Congress of Roman Frontier Studies Ruse, Bulgaria, September 2012*. Sofia 119–125.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2017): Castra and towns in the hinterland of the Limes during Late Antiquity: Pannonia and the provinces along the lower Danube in comparison. *Acta Archaeologica Carpathica 52* 83–108.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. & PRIEN, R. (2017): Keszthely-Fenékpusztá in der Spätantike: ein Vorbericht über die deutsch-ungarischen Ausgrabungen zwischen 2009 und 2017. *Anteus 35–36* 119–145.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. & PRIEN, R. (2019): *Castrum Virtuale. Időutazás a fenékpusztai római erődben*. Keszthely. Balatoni Múzeum, 60 p.

http1: <https://map.mbfisz.gov.hu/fdt100/>

http2:

https://sztfh.hu/downloads/foldtan/kainozoos_online.pdf

HUGHES, J. J., LESLIE, A.B. & CALLEBAUT, K. (2001): The petrography of lime inclusions in historic lime-based mortars. *Annales Geologiques des pays Helleniques, Edition Speciale XXXIX* 359–364.

JÁMBOR Á. (1980): A Dunántúli-középhegység pannoniai képződményei. *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve 62* 259 p.

JÓZSA, S., PINTÉR, F. P., TÖRÖK Á. & HEINRICH-TAMÁSKA, O. (in prep): Evaluation of the mortar in the buildings 24, 25 and 27 of Keszthely-Fenékpusztá from the 2011–2017 excavations. In: Heinrich-Tamáška, O., Hrsg., *Neue Forschungen in Keszthely-Fenékpusztá: Landschaftsarchäologie und Naturwissenschaften*. Mit Beiträgen von Gyulai F. et al. *Castellum Pannonicum Pelsonense 9*. Leipzig-Budapest-Keszthely-Rahden/Westfalia, VML Verlag.

KATAYAMA, T. (2010): The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. *Cement and Concrete Research 40/4* 643–675. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.020>

LINKE, R., PINTÉR, F., SANTNER, M., SAGMEISTER, A., PITTHARD, V., GRIESSER, M. & BARFUSS, S. (2017): Werktechnik der Wand- und Deckenmalerei aus dem “Haus der Medusa” – Materialwissenschaftliche Untersuchungen – In: SANTNER, M., Hrsg., *FOKUS Denkmal 8, Das Haus der Medusa – Römische Wandmalereien in Enns*, Horn-Wien, 187–207.

MÜLLER, R. (2010): *Die Gräberfelder vor der Südmauer der Befestigung von Keszthely-Fenekpuszta*. Mit Beiträgen von E. Fóthi et al. *Castellum Pannonicum Pelsonense* **1**. Budapest-Leipzig-Keszthely-Rahden/Westfalia, VML Verlag, 430 p.

MÜLLER, R. (2020): A Keszthely-kultúra ma (The Keszthely-Culture today). *Archaeologiai Értesítő* **145** 69–99.

<https://doi.org/10.1556/0208.2020.00003>

PALÁGYI, Sz. (2009): A gorsiumi Villa Amasia, a későcsászárkori palota és a balácai villagazdaság főépületének összevetése. *Alba Regia* **38** 39–46.

POLE, A. B. & SIMS, I. (2015): *Concrete petrography – a handbook of investigative techniques*. 2nd edition, Boca Raton-London-New York: CRC Press 794 p.

RÓMER, F. (1862): Pannonia területén Magyarországon fennmaradt néhány római Várnáról. *Archeológiai Közlemények* **3** 26–53.

SÁGI, K. (1961): Die zweite altchristliche Basilika von Fenékpuszta. *Acta Antiqua* **9** 397–440.

SÁGI, K. (1989): Adatok a fenékpusztai erőd történetéhez (Über die Geschichte der Festung in Fenékpuszta). *Tapolcai Városi Múzeumok Közleményei* **1** 261–317.

SÁSDI, L. (2020): A Keszthelyi-hegység karsztja és fejlődéstörténete. *Karszt és Barlang* **2015-16** 33–52.

THAMÓNÉ BOZSÓ, E. (1985): A fehérvárcsurgói kvarchomok telep ásvány-közzettani vizsgálatának eredményei. *Magyar Állami Földtani Intézet évi Jelentése 1983-ról* 75–80.

TÓTH, E. (2009): *Studia Valeriana. Az alsóhetényi és ságvári erődök kutatásának eredményei. Helytörténeti sorozat* **9**. Dombóvár, 353 p.

TÓTH, E. (2020): Zu den Hauptgebäuden der spätantiken Befestigungen von Ságvár, Alsóheténypuszta und Tác. In: HEINRICH-TAMÁSKA, O., Hrsg., *Castra et villae in der Spätantike: Fallbeispiele von Pannonien bis zum Schwarzen Meer. Castellum Pannonicum Pelsonense* **8** Leipzig-Budapest-Keszthely-Rahden/Westfalia, VML Verlag, 37–53.

VISY, Zs. (2018): Some Considerations on the Late Roman Fortifications of Inner Pannonia. In: SOMMER, S. & MATEŠIĆ, S., eds., *Limes XXIII. Proceedings of the 23rd International Congress of Roman Frontier Studies Ingolstadt 2015 Akten des 23. Internationalen Limeskongresses in Ingolstadt 2015. Beiträge zum Welterbe Limes*. Sonderband 4/I, Mainz, 437–443.

WACHA, R. (2010): Gravel Lime? Research into Danube gravel as the main ingredient of the historic mortars at Castle Prandegg in Upper Austria. *Proceedings of the 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop*, 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic, 389–396.

WEBER, J., BARAGONA, A., PINTÉR, F. & GOSSELIN, C. (2015): Hydraulicity in ancient mortars: its origin and alteration phenomena under the microscope. *Proceedings 15th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, 17-19 June 2015, Delft, The Netherlands, 147–156.