

Archeometriai Műhely

2026.
XXIII. évfolyam 1. szám

Archeometriai Műhely

elektronikus folyóirat



Kiadja a Magyar Nemzeti Múzeum

Felelős kiadó: Zsigmond Gábor, főigazgató

Szerkesztő: Szilágyi Veronika

A szerkesztőbizottság tagjai:

Bajnóczi Bernadett, Bartosiewicz László, Bárány Annamária, Kasztovszky Zsolt, Kiss Viktória, Kolláth Ágnes, Kreiter Attila, Kürtösi Brigitta Mária, Major István, Mateovics-László Orsolya, Molnár Mihály, Péterdi Bálint, Simonyi Erika, Székely Balázs, Tóth Zsuzsanna, Török Béla, Zöldföldi Judit

Alapító szerkesztő: T. Biró Katalin

Tiszteleti (alapító) tagok: Ilon Gábor, Járó Márta, Sümegi Pál, Svingor Éva, Szakmány György, T. Biró Katalin

Örökös alapító tag: Svingor Éva (1948-2020)

ISSN: HU ISSN 1786-271X

URN: urn:nbn:hu-4106

Tartalom / Contents

Archeometriai Műhely / Archaeometry Workshop No. 2026/1.

Cikkek / Articles

FARKAS, Csaba; GUGORA, Ariana; ERDÉLYI, Dániel; SOMOGYVÁRI- LAJTÁR, Enikő; BONDÁR, Mária; FÓTHI, Erzsébet; RÓZSA, Zoltán; SOMOGYI, Krisztina; HORVÁTH, Anikó & DEMÉNY, Attila	:	Oxigén- és stronciumizotóp-vizsgálatok együttes alkalmazásának bemutatása magyarországi példákon keresztül / Combined application of oxygen and strontium isotope analyses through Hungarian case studies	1-24
FARKAS et al.	:	Melléklet / Appendix	(1-12)
GULYÁS, Sándor; BALOGH, Csilla & FINTOR, Krisztián	:	Chemical and mineralogical analysis of tenax used as a metalworking auxiliary material in artefacts from the early Avar-period cemetery of Makó–Mikócsa-halom / Ötvöstechnikai segédanyagok (tenax) kémiai és ásványtani összetétel vizsgálata a Makó-Mikócsa halomi kora avar kori temetőből	25-36
THIELE, Ádám & KARAVIDOVIĆ, Tena	:	Density-based classification and iron content estimation of the bloomery iron semi-products: an experimental approach to post-reduction technological characterization / Vasbucák kategorizálása és vastartalmuk becslése a sűrűségük alapján - próbakohósítások eredményeképpen kapott vasbucák vastömbbé kovácsolása	37-60

*

Közlemények / Other communications

T. BIRÓ, Katalin	:	Elhunyt Antoni Judit (1951-2026) / A short obituary for Judit Antoni (1951-2026), archaeologist and ethnographer	61-63
TÖRÖK, Béla	:	Konferencia beszámoló: Nemzetközi archeometriai konferencia a krétai Chaniában	64-66
ILON, Gábor	:	Könyvismertetés: MAKAROWICZ, Przemysław & KOCHKIN, Ihor T. (eds.): Bukivna. An elite Bronze Age barrow necropolis on the Upper Dniester	67-70

OXIGÉN- ÉS STRONCIUMIZOTÓP-VIZSGÁLATOK EGYÜTTES ALKALMAZÁSÁNAK BEMUTATÁSA MAGYARORSZÁGI PÉLDÁKON KERESZTÜL

COMBINED APPLICATION OF OXYGEN AND STRONTIUM ISOTOPE ANALYSES THROUGH HUNGARIAN CASE STUDIES*

FARKAS Csaba^{1,2} ; GUGORA Ariana^{1,2} ; ERDÉLYI Dániel^{1,2} ; SOMOGYVÁRI-LAJTÁR Enikő^{1,2,3} ;
BONDÁR Mária⁴ ; FÓTHI Erzsébet⁵ ; RÓZSA Zoltán⁶ ; SOMOGYI Krisztina⁷ ; HORVÁTH Anikó⁸ 
& DEMÉNY Attila^{1,2} 

¹HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet,
1112 Budapest, Budaörsi út 45.

²HUN-REN CSFK, MTA Kiváló Kutatóhely, 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 15-17.

³Eötvös Loránd Tudományegyetem, Történelemtudományi Doktori Iskola, 1088 Budapest, Múzeum krt. 6-8.

⁴ELTE Humán Tudományok Kutatóközpontja Régészeti Kutatóintézet, MTA Kiváló Kutatóhely,
1097 Budapest, Tóth Kálmán utca 4.

⁵ELTE Humán Tudományok Kutatóközpontja Archeogenomikai Intézet,
1097 Budapest, Tóth Kálmán utca 4.

⁶MNM KK Magyar Nemzeti Múzeum, 1088 Budapest, Múzeum Körút 14-16.

⁷Rippl-Rónai Vármegyei Hatókörű Városi Múzeum, 7400 Kaposvár, Rippl-Rónai tér 1.

⁸ HUN-REN ATOMKI Izotóp Klimatológiai és Környezetkutató Központ,
4026 Debrecen, Bem tér 18/C.

E-mail: farkas.csaba@csfk.hun-ren.hu

Extended abstract

In this study, we present the application of combined oxygen and strontium isotope analyses on 77 individuals from three burial sites in Hungary: Balatonlelle–Rádpusztá (site 67/5, next to the Ruin Church) (abbreviated Balatonlelle from here onward), Balatonszentgyörgy–Faluvégi dűlő (site 2) (abbreviated Balatonszentgyörgy from here onward), and Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10) (abbreviated Orosháza from here onward) (Fig. 1). Archaeological descriptions of these sites can be found in the following works: Balatonlelle – Mihácz-Pálfi (2019), Bondár (2020), Bondár & Szécsényi-Nagy (2020), Köhler (2020), Bondár et al. (2021), Bondár & Somogyi (2023); Balatonszentgyörgy – Sümegi (2022), Bondár & Somogyi (2022, 2023); Orosháza – Rózsa & Tugya (2012), Rózsa et al. (2014), Balázs et al. (2015), Balogh et al. (2015), Balázs (2017).

This study utilizes three chronologically and spatially diverse case studies to demonstrate the versatility of combined geochemical analyses to identify mobility. Whether examining high-status individuals in isolated burials (Balatonlelle), intra-cemetery variations in burial rites (Balatonszentgyörgy), or the migration patterns of entire religious-ethnic communities (Orosháza), the methodology proves effective across different archaeological scales. The selection of these sites is justified not by historical links, but by their collective ability to show that isotope-based mobility patterns provide relevant insights regardless of the time period and/or the complexity of the social structure.

The oxygen isotope composition of carbonate-containing hydroxyapatite (LeGeros 1981; Dorozhkin 2009) also called bioapatite (Keenan 2016) from bones and teeth has long been used as a proxy for human mobility (e.g.,

* How to cite this paper: FARKAS, Cs.; GUGORA, A.; ERDÉLYI, D.; SOMOGYVÁRI-LAJTÁR, E.; BONDÁR, M.; FÓTHI, E.; RÓZSA, Z.; SOMOGYI, K.; HORVÁTH, A. & DEMÉNY, A., (2026): Oxigén- és stronciumizotóp-vizsgálatok együttes alkalmazásának bemutatása magyarországi példákon keresztül / Combined Application of Oxygen and Strontium Isotope Analyses through Hungarian Case Studies, *Archeometriai Műhely* XXIII/1 1–24.

doi: [10.55023/issn.1786-271X.2026-001](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2026-001)

Iacumin et al. 1996a; Müller et al. 2003; Keenleyside et al. 2011). A direct relationship exists between the oxygen isotope composition of bioapatite phosphate ($\delta^{18}\text{Op}$) and carbonate ($\delta^{18}\text{Oc}$) and the $\delta^{18}\text{O}$ values of environmental water. Consequently, the $\delta^{18}\text{Op}$ values of bones and teeth unaffected by diagenesis can be used to reconstruct the isotopic composition of drinking water ($\delta^{18}\text{Ow}$) consumed during an individual's lifetime (Longinelli 1984). Since drinking water was delivered from surface sources during historical and prehistorical times (Daux et al. 2008), its $\delta^{18}\text{O}$ values approximate those of local precipitation (Mook 2001), which in turn varies regionally (e.g., Terzer et al. 2013). By analysing tooth enamel and bone, it is possible to identify periods of mobility during different life stages (White et al. 1998).

Strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) are also widely applied in mobility research (e.g., Price et al. 2011; Vida et al. 2017; Kusaka et al. 2022; Pásztor et al. 2024). Because soils developed on different lithology, and consequently plants, animals, and humans, reflect distinct strontium isotope signatures (Sillen & Kavanagh 1982; Ericson 1989; Elliott 1994; Marie et al. 2001; Bentley 2006), combining O and Sr isotope analyses allows for more precise determination of geographic origin.

Analyses of the oxygen isotope compositions of phosphate and carbonate components of bioapatite were carried out at the HUN-REN Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Institute for Geological and Geochemical Research (HUN-REN CSFK FGI), while strontium isotope ratios were determined at the HUN-REN Institute for Nuclear Research (HUN-REN ATOMKI). The $\delta^{18}\text{Op}$ and $\delta^{18}\text{Oc}$ values are reported in per mil (‰) relative to the V-SMOW reference standard. Detailed protocols are described in Stephan (2000) and Hegyi (2015) for phosphate preparation, Gugora et al. (2018, 2022) and Demény et al. (2019) for carbonate oxygen isotope analysis, and Gugora et al. (2022) for strontium isotope analysis.

In the case of Late Copper Age Baden Culture (3600/3500 – 2800 BC, Oross et al. 2023) burial site Balatonlelle we analysed both the tooth enamel and bone samples of an adultus-maturus aged woman buried in grave 367 and an infans II age child buried in grave 415. These two graves are exceptional: a single skull was placed beside the woman, whereas multiple skulls were deposited beside the child. In addition, the child was buried with a copper bracelet and a black bead at the neck (Bondár 2020). The bead represents the earliest occurrence of “jet” in Central Europe and most likely derives from a Carboniferous, low-rank coal-forming environment; a Spanish or French provenance is plausible (Bondár et al. 2021). The stable isotope results of the child and the woman are reported in **Supplementary Table 1**. Both individuals' phosphate oxygen-isotope values overlap with published data from western Hungarian burials (Depaermentier et al. 2020a) (**Fig. 2**). The elevated phosphate oxygen-isotope composition measured in the child's deciduous tooth most likely reflects the effect of breastfeeding (Britton et al. 2015; Knipper et al. 2018), as the phosphate- and carbonate- $\delta^{18}\text{O}$ values conform to the equilibrium correlation defined by Chenery et al. (2012) (Demény et al. 2023) (**Fig. 3**). Because deciduous teeth partly reflect maternal values during pregnancy (Nava 2024), this suggests that his mother may have lived elsewhere and arrived at Balatonlelle shortly before conception. Genetic analyses failed to identify the mother (Bondár & Szécsényi-Nagy 2020), leaving this hypothesis unconfirmed. **Figures 4 and 5** demonstrate that the Balatonlelle male child has an $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio consistent both with the local values reported in earlier studies (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) and with the established baseline range (Depaermentier et al. 2021). The adult female exhibits enamel and bone phosphate $\delta^{18}\text{O}$ values comparable to those of the child (**Fig. 2**), suggesting both individuals were likely born locally, consistent with values from western Hungary (Depaermentier et al. 2020a).

From the Late Copper Age Baden culture (3600/3500–2800 BC, Oross et al. 2023) cemetery at Balatonszentgyörgy, we analysed tooth enamel $\delta^{18}\text{Op}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values for 26 individuals and $\delta^{18}\text{Oc}$ values for 23 individuals (**Supplementary Fig. 1**). The cemetery is biritual, exhibiting both cremation and inhumation rites. In addition, this is the first documented cemetery in Somogy County with stone covered graves (Somogyi 2022). The stable isotope results of the analysed individuals are reported in **Supplementary Table 2**. The enamel $\delta^{18}\text{Op}$ values broadly overlap with published datasets from other western Hungarian burials (Depaermentier et al. 2020a) (**Fig. 2**), while the strontium isotope values (with a single exception) correspond closely to published data (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) and baseline ranges (Depaermentier et al. 2021) for the region (**Figs. 4–5**).

Statistical assessment of $\delta^{18}\text{Op}$ values permits differentiation between local and non-local individuals. Following the methodology of Lightfoot & O'Connell (2016), individuals falling outside the local range defined by 1.5 times the interquartile range (1.5IQR) and 3 times the normalized median absolute deviation (3MADnorm) were considered non-local. A mature woman from grave 1223 shows a higher $\delta^{18}\text{Op}$ value than the cemetery average (**Supplementary Fig. 2**), indicating possible non-local origin. However, because the calculated drinking water oxygen isotope composition ($\delta^{18}\text{Ow}$) from $\delta^{18}\text{Op}$ remains within the Carpathian Basin range (Terzer et al. 2013; Erdélyi 2025, 101–108), and her $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio matches the cemetery baseline, large-scale migration from outside the basin can be excluded. A possible explanation is that her primary drinking water source was Lake Balaton rather than precipitation (Csérnyi 2024).

An additional case is the 20–25-year-old woman (?) from grave 802, whose $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value differs from the cemetery population (Fig. 4). Combined oxygen and strontium isotope results suggest migration from a region with old crustal rocks within the Carpathian Basin, with possible origins in the Velence Hills (Kohút et al. 1999; Ondrejka et al. 2021), the Mórágý Hills (Shatagin et al. 2004), the north shore of Lake Balaton (Budai & Csillag 1998; Depaermentier et al. 2021) or the Hernád Valley (Depaermentier et al. 2020a).

Stable isotope data show no clear patterning by sex, age, orientation of the grave, burial position, or stone coverage, nor do they correlate with the presence or absence of grave goods (Supplementary Figs. 3–5). These results suggest that the community buried at Balatonszentgyörgy was largely local except two individuals. Based on the $\delta^{18}\text{O}$ values, the mature woman from grave 1223 shows evidence of short-range, micro-regional mobility. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the juvenile female (?) from grave 802 indicate broader, long-distance (macro-regional) movement within the Carpathian Basin (Fig. 6).

From Orosháza, (12th–13th century, Árpád Era, Rózsa et al. 2014) we analysed tooth enamel carbonate $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values for 49 individuals (Supplementary Fig. 6). For 44 of these, $\delta^{18}\text{O}_p$ values were also obtained from both enamel and rib samples. From the settlement associated with the cemetery, only a small fraction of the abundant animal bones was identified as pig remains (Rózsa et al. 2014). It is hypothesized that the “Kaliz” people (a collective term for Muslims in medieval Hungary (Szabó 2003)) lived in Orosháza, engaging in travel and money exchange (Rózsa & Tugya 2012). Furthermore, the graves, arranged in rows, are side-niche burials, with the heads of the deceased consistently turned toward the south-southeast. This practice can be interpreted as following Islamic burial rites (with the deceased facing the Kaaba). These features deviate from patterns typical of 12th–13th-century Hungary (Rózsa et al. 2014).

Phosphate and carbonate oxygen-isotope data and calculated water values with strontium isotope data are provided in Supplementary Table 3. The strontium isotope values align with local baselines (Depaermentier et al. 2021) and previously published data from the region (Depaermentier et al. 2020a) (Figs. 4–5), suggesting a local population. However, $\delta^{18}\text{O}_p$ -derived water values are more negative than those typical of the Carpathian Basin, pointing instead to regions closer to the poles (Scandinavia, the Baltic), high-mountain zones (Alps, Carpathians, Caucasus), or continental interiors such as the East European Plain (Terzer et al. 2013; Erdélyi 2025, 101–108) (Fig. 7). Scandinavia and the Baltic region can be excluded due to higher Sr isotope values (Åberg 1995; Price & Naumann 2015; Lahtinen et al. 2021; Armaroli et al. 2024; Danielisová et al. 2025; Eckelmann et al. 2025). For similar reasons, Carpathian (Nikezić et al. 2024) and Eastern Alpine (Grupe et al. 2018; Müller et al. 2003) origins are unlikely. While the Western Alps show isotopic overlap (Rosselet-Christ et al. 2024), archaeological evidence argues against this origin (Rózsa & Tugya 2012; Rózsa et al. 2014). Caucasian regions provide matching Sr isotope signatures (Reinhold et al. 2024), but areas with sufficiently negative precipitation $\delta^{18}\text{O}$ values are characterized by higher Sr values (Coupal et al. 2023). The East European Plain remains the most plausible origin, supported by both O and Sr isotope evidence (Terzer et al. 2013; Bataille et al. 2020), even when accounting for the error associated with the phosphate-to-water conversion equation (Daux et al. 2008). Variability in $\delta^{18}\text{O}_p$ values from enamel, compared to the more consistent rib values, suggests that the studied individuals spent their childhood across different regions of the East European Plain, including the Volga region (Gerling 2015, 209–210), the Volga–Kama area (Kazantseva et al. 2022; Kiseleva et al. 2022), and further north in Komi (Terzer et al. 2013; Bataille et al. 2020) (Fig. 8A). Subsequently, individuals from the Volga-region likely converged in the Volga–Kama region, as reflected in rib $\delta^{18}\text{O}$ modification, before arriving at Orosháza only a few years prior to death (Fig. 8B). These isotopic results correspond well with archaeological observations (Rózsa et al. 2014). A high frequency of Foramen supratrochleare and Wormian bones was observed, yet individuals with these traits did not differ isotopically from others (Supplementary Fig. 7A–B).

Kivonat

A hagyományos régészeti vizsgálatokat kiegészítendő egyre nagyobb teret nyernek a különböző izotópeokémiai módszerek, melyek segítségével széles spektrumú betekintést nyerhetünk a múltbeli közösségek életébe. A csontok és fogak szervesen anyagát alkotó karbonáttartalmú hidroxipatit oxigén-, és stronciumizotóp-összetételének vizsgálata lehetőséget kínál az egyének és közösségek mobilitási mintázatainak feltárására. Bár ez a kombinált izotópeokémiai módszer sok évtizedes múltra tekint vissza és számos régészeti kontextusban hasznosnak bizonyult, Magyarországon eddig még nem vált széles körben alkalmazottá.

Jelen tanulmányunkban a módszer együttes ismertetésén túl az alkalmazását is bemutatjuk három magyarországi, régészeti korú temetkezési hely (Balatonlelle-Rádpusztá, Romtemplom mellett 67/5. lelőhely, Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő 2. lelőhely, Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10.) lelőhely) összesen 77 egyénén keresztül. A balatonlellei késő rézkori sírok esetében a rendhagyó temetkezési szokások és gazdag mellékletek ellenére mindkét elemzett egyén helyi származású volt, életük során nem végeztek izotópeokémiai módszerrel kimutatható mobilitást. A balatonszentgyörgyi késő rézkori közösség tagjai izotópadataik alapján helyi származásúak voltak, mindössze két esetben mutatható ki különböző léptékű mobilitás. Az orosházi középkori lelőhely esetében az

izotópösszetételek alapján a temetőt alkotó egyének feltételezhető származási területe a Volga-Káma-régió volt, és csupán a haláluk előtt pár évvel érkeztek a mai Orosháza környékére.

Habár mind az oxigén-, mind a stronciumizotóp-vizsgálatok önállóan is értékes információkkal szolgálhatnak, együttes alkalmazásuk jelentősen növeli az értelmezés pontosságát és megbízhatóságát. Az oxigén- és stronciumizotóp-adatok kombinált elemzése ugyanis nemcsak a vizsgált egyének földrajzi eredetére, hanem a mobilitási mintázatok részleteire is rávilágít, teljesebb képet adva a múltbeli közösségek élettörténetéről, mint az egyes módszerek önmagukban.

KEYWORDS: STABLE ISOTOPE GEOCHEMISTRY, OXYGEN AND STRONTIUM ISOTOPE ANALYSIS, BIOAPATITE, MOBILITY STUDIES, BURIALS IN HUNGARY

KULCSSZAVAK: STABILIZOTÓP-GEOKÉMIA, OXIGÉN- ÉS STRONCIUMIZOTÓP-VIZSGÁLATOK, BIOAPATIT, MOBILITÁSKUTATÁS, MAGYARORSZÁGI TEMETKEZÉSEK

Bevezetés

Az emberi maradványok oxigénizotóp-vizsgálata régóta alkalmazott módszer az egyének mobilitásának vizsgálatára (pl. Iacumin et al. 1996a; Müller et al. 2003; Keenleyside et al. 2011; Hamre & Daux 2016; Pellegrini et al. 2016), hazai alkalmazása, habár vannak példák (Gerling et al. 2012; Noche-Dowdy 2015; Hakenbeck et al. 2017; Depaermentier et al. 2020a), de ez idáig nem terjedt el széles körben. A vizsgálatok során a fogak és csontok szervesen anyagát felépítő karbonáttartalmú hidroxipatitból (LeGeros 1981; Dorozhkin 2001), vagy más néven bioapatitból (Keenan 2016) nyerünk ki információt arra vonatkozóan, hogy az adott egyén hol élt élete során. A karbonáttartalmú hidroxipatit kémiai összetétele a következő képlettel írható le: $\text{Ca}_{10-x}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x(\text{OH})_{2-x-2y}(\text{CO}_3)_y$, ahol az A-típusú karbonáthelyettesítés (az OH gyök helyén) értéke y , a B-típusú karbonáthelyettesítés (a PO_4 gyök helyén) értéke x . A képletből következően a bioapatitban a szén stabilizotóp-összetétel ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ aránya) csak a karbonátkomponensben (CO_3^{2-}) határozható meg (Sullivan & Krueger 1981; Lee-Torp & van der Merwe 1991), míg az oxigén stabilizotóp-összetétele ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ aránya) vizsgálható a karbonát és foszfát (PO_4^{3-}) komponensekben is (Iacumin et al. 1996a; Iacumin et al. 1996b). Emellett az apatitban a Ca helyére számos elem, így jelen tanulmányunkban vizsgált Sr is beépülhet, amelynek az izotópösszetétele ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya) szintén elemezhető. Tekintettel arra, hogy radioaktív izotópokkal (pl. ^{14}C) jelen munkában nem foglalkozunk, ezért a „stabilis” jelzöt elhagyjuk az izotóp-összetételek elől.

Az oxigén leggyakoribb elem a földkéregben (Urey 1948). Három stabilis izotópjá van: 16-os (^{16}O), 17-es (^{17}O) és 18-as (^{18}O) tömegszámú. A különböző izotópok gyakorisága nem egyenlő. Leggyakoribb a ^{16}O (99,76%), ezt követi a ^{18}O (0,2%) míg a legritkébb a ^{17}O (0,04%) (Nier 1950). Különböző fizikai és kémiai folyamatok során fellépő frakcionáció megváltoztatja az izotópok egymáshoz viszonyított arányát. A frakcionáció az eltérő tömegszámú (és így tömegű) izotópok különböző reakciósebességén és/vagy fizikai tulajdonságain

alapul, ami eltolódást okoz a nehéz és könnyű izotópok relatív gyakoriságában (Faure & Mensing 2005; Hoefs 2009, 5–7). Stabilizotóp-összetétel alatt egy adott minta ritka és gyakori stabilis izotópjainak (oxigénizotópok esetében a $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) arányát értjük egy referencia anyaghoz (sztenderd) viszonyítva. Ezt delta (δ) értékkel fejezzük ki és ezrelékben (‰) adjuk meg (McKinney et al. 1950). A számítás az alábbi képlettel történik:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{minta}}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{sztenderd}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ [‰]}$$

A sztenderd egy nemzetközileg meghatározott referenciaanyag. Oxigén esetében ez leggyakrabban a Pee Dee Belemnite (PDB) vagy a Standard Mean Ocean Water (SMOW). Mivel az eredeti anyagok elfogytak, jelenleg a velük megegyező összetételű vagy pontosan hozzájuk kalibrált anyagok vannak használatban, amelyekről a bécsi Nemzetközi Atomenergia-ügynökség (IAEA) gondoskodik. A megkülönböztetés érdekében ezeket a sztenderdeket „V” előtaggal kell ellátni (V-PDB, V-SMOW). Mivel a képletben szereplő δ -érték a kismértékű eltérések miatt nagyon alacsony szám lenne, a könnyebb kezelhetőség érdekében 1000-rel szorozzuk meg. Ennek jelölésére az ezrelék (‰) szimbólum szolgál, ami tehát nem koncentrációt, hanem relatív eltérést jelent. A stabilizotóp-geokémia további részletes leírása többek között Hoefs (2009) könyvében, illetve magyar nyelven Demény (2003) publikációjában olvasható.

A testfolyadék $\delta^{18}\text{O}$ értékét a szervezetbe bejutó és onnan távozó víz kapcsolata adja meg (Luz & Kolodny 1985). A talajvíz és a felszíni vizek $\delta^{18}\text{O}$ értéke a csapadék izotópösszetételét tükrözi (Gat 1971; Mook 2001). A csapadékvíz oxigénizotóp-összetétele függ a forrásterülettől (Rozanski et al. 1993), az egyenlítő felől való távolságtól (Dansgaard 1964), a tengerszint feletti magasságtól (Ambach et al. 1968), illetve az óceántól való távolságtól (Rozanski et al. 1993). Ezen módosító faktorok következtében a csapadékvíz oxigénizotóp-összetétele területileg eltérő képet mutat (pl. Terzer et al. 2013). Mivel az ivóvíz a helyi talajvízből származik

(ezáltal közvetve a helyi csapadékvízből), oxigénizotóp-összetétele megközelíti a területre jellemző csapadékvízét (Daux et al. 2008). Ez az egyezés ugyanakkor mutat némi bizonytalanságot, mivel a talajvíz és felszíni vizek $\delta^{18}\text{O}$ értékét a csapadékvízen kívül helyi faktorok is befolyásolják, mint például a párolgás (Gat & Dansgaard 1972).

A bioapatit foszfát- és karbonáttartalmának $\delta^{18}\text{O}$ értékei, és a környezeti víz oxigénizotóp-összetétele között közvetlen kapcsolat áll fenn. Ebből következik, hogy a diagenetikus átalakulásoktól mentes csontok és fogak foszfátkomponensének oxigénizotóp-összetétele ismeretében rekonstruálható az egyén élete során elfogyasztott víz $\delta^{18}\text{O}$ átlagos értéke ($\delta^{18}\text{Ow}$) (Longinelli 1984). Az ivóvízen túl a testfolyadék oxigénizotóp-összetételét a bevitt táplálék is befolyásolja. A két komponens (ivóvízként és táplálékként bevitt folyadék) aránya fajonként eltérő. Mivel az ember kevesebb vizet vesz fel táplálékból, így bár a táplálék és az ételek víztartalma befolyásoló hatással bír, a fogak és csontok $\delta^{18}\text{O}$ értékét döntően az ivóvíz oxigénizotóp-összetétele határozza meg (Daux et al. 2008).

A bioapatitban lehetséges mind a foszfát- ($\delta^{18}\text{Op}$), mind pedig a karbonátkomponens ($\delta^{18}\text{Oc}$) vizsgálata (Iacumin et al. 1996a, 2022). A csontok karbonát komponense minimális mintaelőkészítés után könnyen elemezhető (Garvie-Lok et al. 2004), azonban közismert, hogy a csontok diagenézis hatására könnyen át tudnak alakulni, így a csontok karbonát komponenséből mért oxigénizotóp-összetételek nem alkalmasak antropológiai következtetések levonására (Demény et al. 2019). A fogzománc karbonát komponense ezzel ellentétben jól megőrzi az eredeti izotópos jelet (Gugora et al. 2022). Habár a foszfátkomponens vizsgálata bonyolult mintaelőkészítést igényel (Stephan 2000), mind a csontok, mind pedig a fogzománc esetében alkalmazható az átalakulással szembeni nagyfokú ellenállása következtében (Kolodny et al. 1983; Fricke et al. 1998). Speciális körülmények között ez a komponens is át tud alakulni, módosítva ezzel az eredeti oxigénizotóp-összetételt (Zazzo et al. 2004). Amennyiben a minták nem estek át diagenetikus átalakuláson, a $\delta^{18}\text{Op}$ vs. $\delta^{18}\text{Oc}$ ábrán az összetételi adatok egy egyensúlyi egyenes mentén helyezkednek el (Chenery et al. 2012). Abban az esetben, ha ettől az egyensúlyi egyenestől a minták eltérnek, diagenetikus átalakulás feltételezhető a foszfát-, vagy a karbonátkomponensben (Iacumin et al. 1996a). Ezen esetekben jellemzően a karbonátkomponens módosul, míg a foszfátkomponens megőrzi az eredeti izotópos jelet, így alkalmazható származási hely meghatározására (Iacumin et al. 1996b; Farkas et al. in preparation).

További szempont az egyén élete során lejátszódó összetételi változás, és ennek rögzülése az egyes csontvázelemekben. A gyermekkorban kialakuló

fogzománc oxigénizotóp-összetétele az egyén korai éveiről ad információt (Wright & Schwartz 1998). A csontok esetében az oxigénizotóp-összetétel idővel kicserélődik, így az egyén életének egy pár éves időintervallumáról ad információt (Longinelli 1984). Ezen kettő különböző szövettípus elemzésével lehetőségünk van annak megállapítására, hogy az egyén életének mely szakaszában volt mobilis (White et al. 1998). A csontok $\delta^{18}\text{Op}$ értékeinek interpretációja során kritikus szempont a diagenetikus átalakulás. Habár a csontok foszfátkomponense ellenálló a környezeti hatásokkal szemben (Kolodny et al. 1983), speciális körülmények között módosulhat (Zazzo et al. 2004). Emiatt a csontok foszfát-oxigénizotóp-összetételének értékelésekor a diagenetikus folyamatok figyelembevétele elengedhetetlen.

Az oxigénizotóp-geokémiai módszer korlátja, hogy a csapadékvíz $\delta^{18}\text{O}$ értékei egymástól távoli régiókban átfedést mutathatnak (Terzer et al. 2013; Erdélyi 2025, 101–108). Továbbá kulturális vízfogyasztási és táplálkozási szokások (Daux et al. 2008) is befolyásolják a mért oxigénizotóp-összetételek interpretációját, így csupán ezen módszerrel az adott egyén pontos származási helye nem határozható meg. Ennek kiküszöbölése érdekében szükséges ezen vizsgálatokat más vizsgálati módszerekkel (például stronciumizotóp-vizsgálatokkal) kiegészíteni.

A stronciumizotóp-arányok alkalmazásáról a mobilitás kutatásban hazai (pl. Vida et al. 2017; Demény et al. 2023; Pásztor et al. 2024) és nemzetközi (pl. Price et al. 2011; Kusaka et al. 2022) szakirodalmi példák is rendelkezésre állnak így jelen cikkünkben e módszert csak röviden ismertetjük. A stronciumnak a természetben négy stabilizotópj van jelen (^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr , ^{84}Sr). A ^{87}Sr a ^{87}Rb béta bomlásával keletkezik (Mattauch 1937). Stabilizotóp-geokémiai vizsgálatok során ^{87}Sr és ^{86}Sr izotópok arányát vizsgáljuk.

Mivel a különböző kőzetek eltérő stronciumizotóp-összetétellel rendelkeznek (Bentley, 2006), így az egyes geológiájú területek specifikus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékekkel jellemezhetők. A talaj izotópos egyensúlyban áll a helyi alapkőzettel, ezért a stronciumizotóp-összetétele is hasonló (Ericson 1989). A növények felveszik a stronciumot a talajból, így bekerül a táplálékláncba (Sillen & Kavanagh 1982). Az emberi és állati szervezetbe ezt követően az elfogyasztott növényi és állati táplálék és az ivóvíz útján kerül (Marie et al. 2001; Bataille et al. 2020) ahol a Ca^{2+} ionokat helyettesíti a bioapatitban (Elliott 1994).

A módszer hátránya, hogy a hasonló alapkőzetten képződött talajok stronciumizotóp-összetétele (és ennek megfelelően a szervezetbe beépülő stronciumizotóp-arány) hasonló. Példaként említhető a bazaltos kőzetek hasonló stronciumizotóp-összetétele,

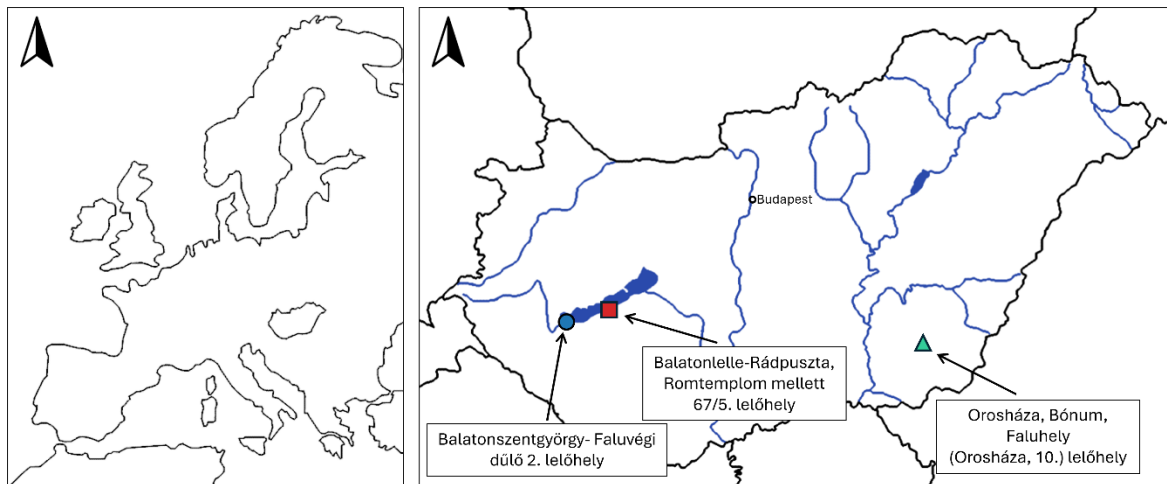
hiszen a hasonló eredetű, a Föld köpenyéből feltörő magma megszilárdulásából képződő kőzeteknek hasonló lesz a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya is. A Balatonfelvidéki és nógrádi bazaltok $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya 0,7037 és 0,7042 között (Embey-Isztin et al. 1993), a németországi Eifel vidék bazaltjai 0,7036 és 0,7055 között (Jansen et al. 2024), míg a franciaországi Massif Central bazaltjai 0,703 és 0,7055 között (Négre et al. 2015) szórnak, így pusztán csak a stronciumizotóp-arányok alapján nem lehet megállapítani, hogy egy adott egyén melyik helyszínen élhetett. Ezért ez a módszer nem alkalmas egy adott származási hely beazonosítására csupán az adott helyszínhez képest eltérést, migrációt jelezhet, ami természetesen rendkívül fontos információ az adott lelőhely vizsgálatában. Érdeemes kihangsúlyozni, hogy a módszer inverz bizonyításra is alkalmas mivel segítségével bizonyos régiók kizárhatók a potenciális származási területek közül amennyiben a minta eredményeitől nagymértékben eltérő $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránnyal jellemezhetők. A módszer hátrányainak kiküszöbölése érdekében a stronciumizotóp-vizsgálatokat célszerű más vizsgálatokkal (például a már tárgyalt oxigénizotóp-vizsgálatokkal) kiegészíteni.

A fentebb ismertetett kombinált, többizotópos (multiproxy) geokémiai elemzések alkalmazása mára a nemzetközi régészeti kutatások alapvető és széles körben elterjedt módszertanává vált. Többek között lehetséges volt annak kimutatása, hogy a svájci Basel-Gasfabrik proto-urbánus központ (La Tène-időszak) szoros kapcsolatban állt mind közvetlen vonzáskörzetével, mind távolabbi

régiókkal (Knipper et al. 2018). A régészeti lelőhelyek kiterjedt, interregionális kapcsolatrendszerének bemutatására kiváló példa Madgwick et al. (2019) munkája, amely kimutatta, hogy a brit késő neolitikus henge-komplexumok (pl. Stonehenge) lakóira az állatokat Britannia távoli pontjairól szállították a helyszínre. A mobilitási mintázatok különböző léptékét szemlélteti Price et al. (2020) munkája is, amely kimutatta, hogy a salmei (Észtország) hajós temetkezésekben nyugvó harcosok többsége Svédországból származott. A mobilitási típusokra kiváló példa a dél-németországi zsinédíszes kultúra (Corded Ware culture) temetkezéseinek vizsgálata. Ezen vizsgálat megállapította, hogy főként a nők voltak mobilisak (Sjögren et al. 2016). Emellett az izotópos adatok arra is alkalmasak, hogy igazolják a közösségek helyben élését még abban az esetben is, ha ez ellentmond a történeti narratíváknak (Miller et al. 2019). Végezetül hangsúlyozandó, hogy a stabilizotóp-eredmények értelmezése során elengedhetetlen a teljes adatkészlet objektív vizsgálata a hamis vagy szelektív narratívák megalkotásának elkerülése érdekében (Madgwick et al. 2021).

A vizsgált lelőhelyek régészeti bemutatása

A 67-es út Balatonlelle és Rádpusztá közötti szakaszán 2005-ben négy sírt tártak fel Molnár István vezetésével (Balatonlelle-Rádpusztá, Romtemplom mellett 67/5. lelőhely) (továbbiakban Balatonlelle) (**1. ábra**).



1. ábra: A vizsgált temetkezések helyszínei. Piros négyzet: Balatonlelle-Rádpusztá, Romtemplom mellett 67/5. lelőhely; kék kör: Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő 2. lelőhely; zöld háromszög: Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza, 10.) lelőhely.

Fig. 1.: Locations of the investigated burials. Red square: Balatonlelle-Rádpusztá (site 67/5, next to the Ruin Church); blue circle: Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő (site 2); green triangle: Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10).

Ezen késő rézkori (i. e. 3600/3500–2800, Oross et al. 2023), badeni kultúrához tartozó temetkezés (Bondár & Somogyi 2023) négy sírja közül kettő mellékletes, kettő melléklet nélküli. A kettő mellékletet tartalmazó sír egymástól négy méterre helyezkedett el. Mindkét esetben az eltemetett egyén jobb oldali fektetésű, közel É-D-i tájolású, zsugorított helyzetű volt. Mindkét sírba további emberi koponyarészek kerültek (Bondár 2020). Az egyik sír esetében (367. sír) a szabályosan eltemetett felnőtt nő mellé egy koponyát, a másik sír esetében (415. sír) a gyermek mellé több koponyát helyeztek el. Nem lehet megállapítani, hogy az egyéneket egy időben helyezték-e a sírgödörbe vagy az elhalalozásuk sorrendjében (Köhler 2020). A 415. sír esetében DNS vizsgálatok alapján kimutatható, hogy anyai ági rokonság alapján két különböző anyától származó gyermek maradványait helyezték a sírba. A 367. sír esetében a nő mellé helyezett koponya rossz megtartása miatt nem lehetséges a kapcsolat kimutatása. Továbbá nem lehetséges szoros családi kapcsolat meglétének kimutatása a 367. sírba eltemetett nő és a 415. sírba eltemetett gyermek között (Bondár & Szécsényi-Nagy 2020). Külön kiemelendők a 415. sír ékszerai. A klasszikus badeni időszak elejére keltezhető edényeken kívül réz karpereccel és nyakán egy fekete gyönggyel temették el a fiút. A gyöngy feltételezhetően „gagát” anyagú (Bondár 2020). A karperec rézlemezéből készült, belső oldalán valószínűleg az elhunyt bőrének lenyomata látható (Mihácsi-Pálfi 2019). A gyöngy Közép-Európában a legkorábbi előfordulása „gagát” gyöngy. Komplex anyagvizsgálati módszerek alapján megállapítható, hogy valószínűleg karbon korú, alacsony érettségi fokú kőszénképződési környezetből származik, spanyolországi vagy franciaországi eredete feltételezhető (Bondár et al. 2021). Mindezek alapján a két feltárt badeni sír az i. e. 4. évezred második felében a különleges temetkezések közé tartozik (Bondár 2020). A jelen tanulmányban szereplő balatonlellei emberi maradványok vizsgálatát, a stabilizotóp-adatokat és azok értelmezését korábban Demény et al. (2023) részletesen ismertette.

A késő rézkori (i. e. 3600/3500 – 2800, Oross et al. 2023) tipokrológiailag Badeni IIa? – Badeni IV? (Bondár 2022) Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő 2. lelőhelyének (1. ábra) (későbbiekben Balatonszentgyörgy) feltárása 2017-ben zajlott, összesen 73 sír került elő. A temetőben szerkezetileg elkülöníthető egy belső, számottevően nagyobb sírsűrűséggel jellemezhető ovális alakú központi rész, amely körül elszórtan további sírok helyezkednek el. Mind a csontvázas, mind a hamvasztásos temetési rítus jelen volt a temetőben (Somogyi 2022). A csontvázas temetkezés a temető használatának legkorábbi szakaszában nincsen jelen, míg a szórt hamvasztásos rítus a temető egész 150-200 éves használati idejére jellemző (Bondár & Somogyi 2023). Megfigyelhetők többes temetkezések is, feltételezhetően az

ilyen módon eltemetett egyének között erős családi kötődés lehetett. A temetőre jellemző a D-É (fej-láb) tájolás és a bal oldali fektetés, az ettől eltérő tájolás társadalmi, etnikai vagy szociális okát nem ismerjük (Somogyi 2022).

A temetőre jellemző az esetenként jelentős mellékletadás. Leggyakoribb mellékletek a különböző típusú edények, illetve a gyöngyök. A gyöngyök alapanyaga többnyire mészkő, csigahéj (Bondár & Somogyi 2023). A mészkőgyöngyök származási helye nem meghatározható. Csigahéjból készült gyöngyök esetében jelen vannak *Columbella rustica* sekélytengeri csigafaj héjából készült gyöngyök, melyek feltételezhetően az Adriatikum északi részéről származnak, de nem zárható ki a fosszilis héjak begyűjtése sem. Továbbá jelen vannak *Lithoglyphus naticoides* édesvízi csigafaj héjából készült gyöngyök is. Mivel ezen csigafaj a Balaton déli partján elterjedt, feltételezhetően helyi begyűjtésű volt (Sümegei 2022). A mellékleteket jellemzően a fej környékén helyezték el (Somogyi 2022).

Somogy vármegyében ez az első dokumentált temető, amelyben több kőpakolásos sír volt (Somogyi 2022). Ezen rítus során az elhunytat különböző méretű kövekkel fedték be. A kövek feltehetően a sírok védelmét, megjelölését szolgálták vagy az eltemetett személy társadalmi státuszára utalhattak, de rituális szerepük is elképzelhető, pontos rendeltetésük azonban nem ismert (Sachße 2008; Bondár 2009). A temető teljes feldolgozása Bondár & Somogyi (2022, 2023) olvasható.

Az Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10.) lelőhely (későbbiekben Orosháza) (1. ábra) feltárása több szakaszban zajlott 1996 és 2015 között. Ezen időszakban az Árpád-kori falu mindegy 400 objektuma és temetőjének 180 sírja került elő (Balázs et al. 2015). A település és a leletszegény temető kapcsolatára egy Árpád-korra keltezhető gyűrű enged következtetni (Rózsa et al. 2014). A temető sírjainak korát három radiokarbon elemzéssel vizsgálta Balázs János 2017-es doktori értekezésében (Balázs 2017, 56–58). A három elemzés jelentősen eltérő korokat adott (i. sz. 686–722, 777–923 és 1295–1462), aminek az értelmezéséhez vagy revíziójához további vizsgálatok szükségesek.

Az előkerült mérlegserpenyők, pénzváltó súlyok alapján az itt élők kereskedelemmel foglalkoztak. Habár a település megfelel a korszakra jellemző falusi környezet képének, több szempontból is eltéréseket mutat más Árpád-kori településekhez képest. Egyik ilyen eltérés a palackok és korsók nagy száma, illetve az egyik házból előkerült sütőharangok és töredékes sütőlapok megjelenése, amely a környező településektől eltérő étkezési kultúrára enged következtetni. Ugyancsak az eltérő étkezési szokásokat jelöli, hogy a nagyszámú (15 657 db) állatsont csupán elenyésző hányada

(24 db) azonosítható sertécsontként. A csontok vizsgálatával továbbá megállapítható, hogy a szarvasmarhák és kiskérődzők jelentős hányadát fiatal életkorban vágták le, amely szintén eltér a szokásos gyakorlattól. Ezen eltérő sajátosságok a települést alkotó népesség eltérő vallására, és feltételezhetően eltérő etnikumára engednek következtetni (Rózsa et al. 2014). A sertécsontok csekély száma arra utal, hogy az itteni népesség vallási okokból nem fogyasztott sertéshúst. Valószínűsíthető, hogy Orosházán kereskedelemmel és pénzügyekkel foglalkozó kálizok éltek (Rózsa & Tugya 2012). A *káliz* szó nem népcsoportot jelöl, hanem a magyarországi muzulmánok összefoglaló neve az izmaelita, szaracén, böszörmény mellett (Szabó 2003).

A temetőben délről észak felé haladva temetkeztek (Balogh et al. 2015). A sorokba rendezett temetkezések padmalyosak (az akna déli fala alá egy lépcsővel mélyülő oldalüreget vájtak, az aknával egy keskeny nyak biztosított kapcsolatot) amely nem jellemző a 12–13. századi magyarországi temetkezésekre. A testeket általában oldalra fektették, kar és kéztartásuk változatos. Az elhunytak fejét következetesen dél-délkelet felé fordították. Az iszlám előírásoknak megfelelő szokásként értelmezhető a vázak és a sírgödrök tájolása (Kába szentély felé tekintő elhunyt). Az orosházi temetőben feltárt csontvázak azonban ennek a tájolási előírásnak csak részben felelnek meg. Ennek magyarázata a temető használó népesség földrajzi ismereteinek hiánya lehetett: a közösség azt az irányt követhette, amelyet régi hazájában ismert (Rózsa et al. 2014).

Az egykori közösség embertani képe heterogén. A férfiak és a nők közötti magasságbeli eltérés nagyobb az átlagosnál, illetve nagyszámú anatómiai variáció is megfigyelhető az egyéneknek. A karcsonatok 30%-ánál megfigyelhető volt *foramen supratrochleare* (singcsont izesülése feletti lyuk) illetve a koponyák 60%-ánál Worm-féle csontok (önálló csontocskák a falsontok és a nyakszirtecsont közötti varratban). Ezen sajátosságok is elkülönítik az orosházi temetőben feltárt egyéneket az Árpád-kori népesség átlagától (Rózsa et al. 2014).

A vizsgált lelőhelyek kiválasztásának szempontjai és a kutatás koncepciója

A vizsgált lelőhelyek kiválasztása során olyan esettanulmányokra fókuszáltunk, amelyek önmagukban is fajsúlyos régészeti kérdéseket vetnek fel a mobilitás és a temetkezési rítus, közösségi identitás tekintetében. Balatonlelle esetében a koponyakultusz (Bondár & Somogyi 2023) és a „gagát” anyagú gyöngy (Bondár 2020) feltételezi a gyermek és a nő megkülönböztetett társadalmi helyzetét, és ehhez kapcsolódóan esetleges nem helyi származását. A balatonszentgyörgyi temető esetében a kőpakolásos sírok és a temetőre jellemző tájolásról eltérő egyének jelenléte felveti a kérdést,

hogy ezen varianciák esetlegesen az eltérő társadalmi háttérrel és ebből kifolyólag nem helyi eredetet jelezhetnek a temetőn belül. Végezetül az orosházi középkori temető érendi és antropológiai adatok alapján vélhetően egy betelepült, nem helyi vallási-etnikai háttérű közösséget reprezentál. Ezen temető esetében a mobilitási vizsgálatok elengedhetetlenek a régészeti hipotézis (a sírgödrök tájolása a közösség régi hazájában ismerteket követte; Rózsa et al. 2014) igazolására vagy cáfolására.

Tanulmányunk célja a kombinált geokémiai elemzésekben rejlő lehetőségek bemutatása, a fentebb ismertetett három, jellegében eltérő esettanulmányon keresztül. Jóllehet a késő rézkori (Balatonlelle, Balatonszentgyörgy) és a középkori (Orosháza) leletanyag mind időben, mind térben távol esik egymástól, együttes szerepeltetésüket a régészeti problémák sokszínűsége indokolja. A választott példák segítségével szemléltethető, hogy a mobilitási mintázatok kimutatására alkalmas módszertan nem csupán korszaktól független, hanem különböző léptékű régészeti jelenségek esetén is releváns eredményekkel szolgál: hatékonyan alkalmazható izolált, kisszámú temetkezés (Balatonlelle), valamint nagy egyedszámú, komplex közösségi temetők (Balatonszentgyörgy, Orosháza) elemzésekor is. Az esettanulmányok közötti kapcsolatot tehát nem a közvetlen történeti összefüggés, hanem a módszertani adaptálhatóság és a különböző társadalmi struktúrákból fakadó interpretációs lehetőségek adják.

A jelen munka adatai tovább bővítik a temetkezések stabilizotóp-vizsgálatával nyert ismereteinket, kiegészítve a szakirodalomban már publikált nagyszámú mérési eredményt (pl. Leggett et al. 2021).

Módszertan

A bioapatit foszfát- és karbonátkomponensének oxigénizotóp-összetétel meghatározása a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Földtani és Geokémiai Intézet (HUN-REN CSFK FGI) stabilizotóp-laboratóriumában történt. A foszfát-oxigénizotóp-vizsgálatokhoz a mintaelőkészítés Stephan (2000) módszere alapján történt. A mechanikusan megtisztított, finom porrá őrölt (180 µm) fog- és csontmintákat előbb 24 órán keresztül NaOCl, majd 48 órán át NaOH-oldattal kezeltük a szerves komponensek eltávolítása érdekében. Ezután mintákat desztillált vízzel átöblítettük majd 48 órán keresztül HF-dal reagáltattuk. Az oldatot KOH-oldattal semlegesítettük majd ezüst-amin oldattal reagáltattuk. Ezt követően a mintákat három órán keresztül 70 °C-os szárítószekrénybe helyeztük. Ezen idő során ezüst-foszfát (Ag₃PO₄) csapadék képződött. A csapadékot leszűrtük, desztillált vízzel átöblítettük majd egy éjszakán keresztül szárítottuk. A mérésekhez mintánként 500 µg ezüst-foszfátot mértünk ki ezüst kapszulába (Hegy 2015, 32–34).

A mérést megelőzően a mintákat 110 °C-on kifűtöttük, majd *glassy carbon* csóvel reagáltattuk egy Thermo Finnigan TC/EA (Thermal Conversion Elemental Analyzer) automata feltáróberendezésben 1460 °C-on. A keletkezett szén-monoxidot folyamatosan áramló héliumgáz szállította a feltáróberendezéshez csatlakoztatott Thermo Delta V Adventure tömegspektrométerbe.

A mért értékek ezrelékben (‰) vannak megadva a Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) referencia sztenderdhez viszonyítva. A mintaelőkészítés és a vizsgálatok pontosságának ellenőrzése az NBS-120c sztenderddel történt. Minden mintánál három párhuzamos mérést végeztünk. A mérések pontossága 0,3‰ (1σ).

A mérések során kapott foszfátotizotóp-összetételek ($\delta^{18}\text{Op}$) csapadékvíz $\delta^{18}\text{O}$ értékekké ($\delta^{18}\text{Ow}$) való átszámítása az alábbi egyenlettel történt (Daux et al. 2008).

$$\delta^{18}\text{Ow} = 1,54 \cdot \delta^{18}\text{Op} \pm 0,09 - 33,72 \pm 1,51$$

A karbonátkomponens oxigénizotóp-összetételi vizsgálatához a feltárások Gugora et al. (2018, 2022) alapján történtek. A finom porrá (180 μm) őrölt fogzománcmintákból a szerves anyag eltávolítása NaOCl oldattal történt 24 órán keresztül. Ezt követően a mintákat átöblítettük desztillált vízzel. Ezután a mintákat 4 órán keresztül ecetsavval reagáltattuk szobahőmérsékleten a másodlagos karbonát eltávolítása érdekében. Újabb átöblítés után a mintákat két napra -40 °C-on lefagyasztottuk majd -60 °C-on és 20 mTorr-on két napon keresztül liofilizáltuk.

A mérések során a mintákat 70 °C-on 3,5 mg ortofoszforsavval reagáltattuk egy GASBENCH II automata mintaelőkészítő egységben (Demény et al. 2019). A keletkező CO₂ gáz elemzése egy Thermo Finnigan Delta Plus XP tömegspektrométerrel történt.

A mért értékek ezrelékben (‰) vannak megadva a V-SMOW referenciaértékhez viszonyítva. A mintaelőkészítést és a mérések pontosságát NBS-19, NBS-18 és IAEA-612 nemzetközileg elfogadott sztenderdekkel ellenőriztük. Mindegyik mintából kettő párhuzamos mérés történt. A mérések pontossága 0,1‰ (1σ).

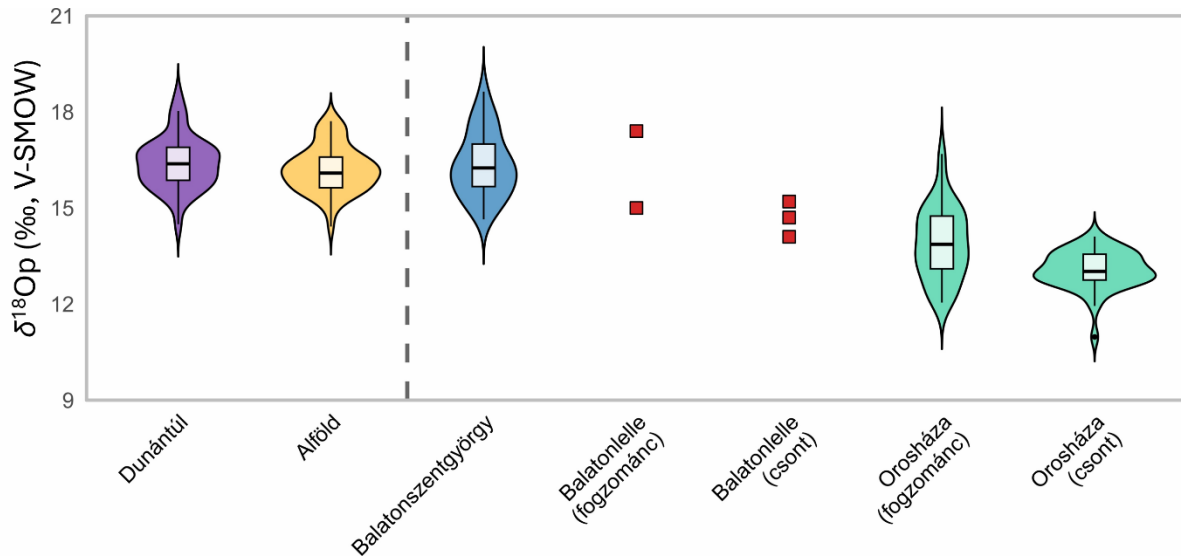
A stronciumizotóp-vizsgálatokhoz a mintaelőkészítés Gugora et al. (2022) alapján történt. A fogzománc minták mechanikai tisztítás után 1 M-os ecetavas kezeléssel (diagenetikus karbonát eltávolítása) estek át. Ezt követően háromszori milliQ vízzel való öblítés után 60 °C-os szárítószekrényben száradtak egy éjszakán át. Ezt követően 20 mg fogzománc minta PA főzőpohárba helyezése történt. Kétszeri, 1 ml 14 M-os salétromsav (HNO₃) kezelés után minták 120 °C-on száradtak. Ezután 3%-os salétromsavban oldódtak fel, majd stroncium-specifikus oszlopba kerültek, ahol a stroncium elválasztása történt a mátrix komponensektől. A stroncium-specifikus gyanta (100–150 μm szemcseméret, Triskem International, Franciaország) a használatot megelőzően 8 M-os salétromsavval és ultratiszta vízzel lett megtisztítva. A stroncium és egyéb mátrixkomponensek szétválasztása után a minták ismételtlen szárításon estek át. Ezt követően 1 ml 14 M-os salétromsavval történő reakció és ismételt mintaszárítás után a visszamaradt oldási maradék 4 ml 3%-os salétromsavban való feloldása történt. A standard oldatok NBS987 SrCO₃-ból készültek.

A mintaelőkészítés és a minták mérése a HUN-REN Atommagkutató Intézetében (HUN-REN ATOMKI) történt egy Neptune Plus MC-ICPMS (Thermo Scientific) tömegspektrométerrel, amely Aridus-3 (CETAC) gázmentesítő rendszerrel volt felszerelve. A kapott stronciumizotóp értékek a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8,375209$ továbbá $^{87}\text{Rb}^+$, $^{86}\text{Kr}^+$ és $^{83}\text{Kr}^+$ interferenciákkal való korrigáláson estek át. A mért értékeket az NBS987 elfogadott értékéhez (0,710240) kerültek normalizálásra (Wall et al. 2013).

Eredmények és diszkusszió

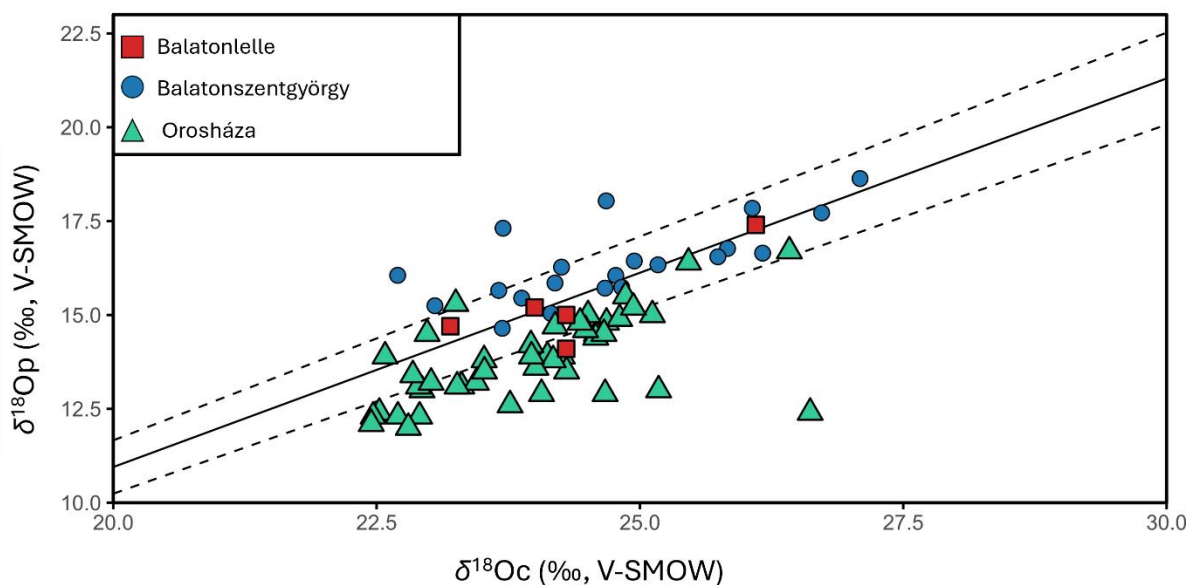
Balatonlelle

A balatonlellel temetkezések esetében a 367-es sírban nyugvó adultus-maturus korú nőnek és a 415-ös számú sírban eltemetett infans II. korú gyermeknek vizsgáltuk mind fogzománc, mind a csontmintáját. Foszfát- és karbonátotizotóp-összetételi meghatározás a gyermek falcsontjából, sípcsontjából és tejfogából (DM2) és a nő bordájából és őrlőfogából (M3) történt. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ érték meghatározást csak a gyermek tejfogából (DM2) végeztünk (**Melléklet 1. táblázat**). Az adultus-maturus korú nő $\delta^{18}\text{Op}$ értékei 14,1‰ (borda) és 15‰ (M3 őrlőfog) voltak, a karbonátkomponens oxigénizotóp-összetétele mindkét esetben 24,3‰ volt. A 415-ös számú sírba eltemetett gyermek $\delta^{18}\text{Op}$ értékei 17,4‰ (tejfog), 15,2‰ (falcsont) és 14,7‰ (sípcsont) voltak.



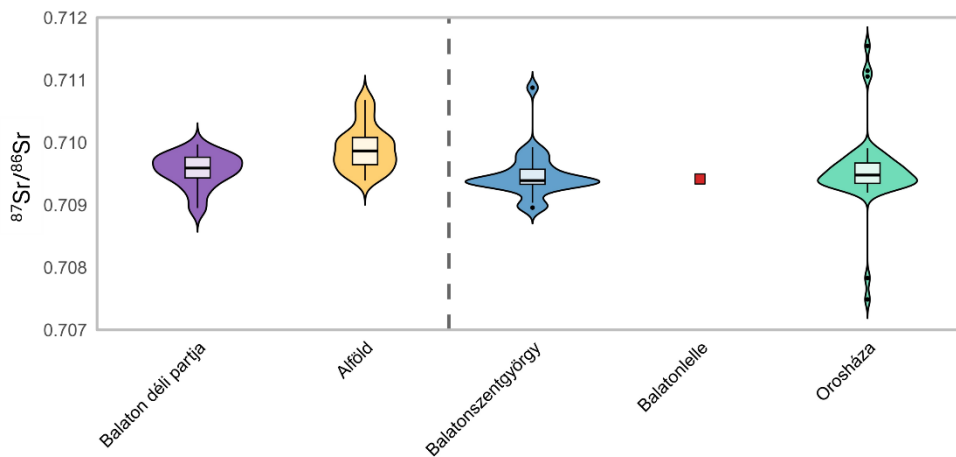
2. ábra: A vizsgált egyének fogzománcából és csontmintájából mért foszfát-oxigénizotóp-összetételek ($\delta^{18}\text{Op}$, ‰, V-SMOW) összehasonlítása Depaermentier et al. (2020a) által publikált dunántúli és alföldi értékekkel. A hegedűdiagramok külső kontúrja az adott csoport $\delta^{18}\text{Op}$ értékeinek becstelt valószínűségi sűrűségét mutatja. A dobozdiagramok az interkvartilis-tartományt (IQR) ábrázolják, a dobozban lévő vízszintes vonal a mediánt jelöli. A dobozokból kiinduló terjedelemvonalak az 1,5IQR-en belüli értéktartományt jelölik. Az ezen tartományon kívül eső értékek pontként jelennek meg. A szaggatott függőleges vonal a korábbi vizsgálatok és a jelen tanulmány eredményeinek elkülönítésére szolgál.

Fig. 2.: Phosphate oxygen isotope compositions ($\delta^{18}\text{Op}$, ‰, V-SMOW) measured from tooth enamel and bone samples of the investigated individuals, compared with Transdanubian and Great Hungarian Plain values published by Depaermentier et al. (2020a). The outer contours of the violin plots represent the estimated probability density of the $\delta^{18}\text{Op}$ values for each group. The box plots depict the interquartile range (IQR), with the horizontal line within the box indicating the median. The 'whiskers' represent the range of values within 1.5IQR, while values outside this range are plotted as individual points. The dashed vertical line serves to distinguish between the results of previous studies and those of the present study.



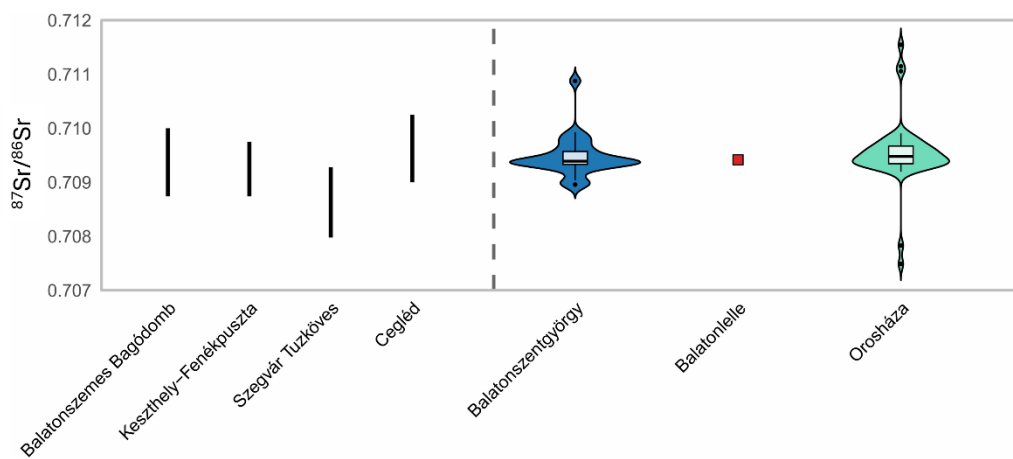
3. ábra: Fogzománc foszfát ($\delta^{18}\text{Op}$) és karbonát ($\delta^{18}\text{Oc}$) oxigénizotóp-összetételek a három különböző lelőhelyről a két érték között fennálló egyensúlyi vonal mentén (Chenery et al. 2012).

Fig. 3.: Tooth enamel phosphate ($\delta^{18}\text{Op}$) and carbonate ($\delta^{18}\text{Oc}$) oxygen isotope compositions from the three sites, plotted against the equilibrium line between the two values (Chenery et al. 2012).



4. ábra: A vizsgált egyének fogzománcából mért stronciumizotóp-összetételek összehasonlítása a Balaton déli partjára (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) és az Alföldre (Depaermentier et al. 2020a) jellemző $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékekkel. A hegedüdiagramok külső kontúrja az adott csoport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékeinek becslött valószínűségi sűrűségét mutatja. A dobozdiagramok az interkvartilis-tartományt (IQR) ábrázolják, a dobozban lévő vízszintes vonal a mediánt jelöli. A dobozokból kiinduló terjedelemvonalak az 1,5IQR-en belüli értéktartományt jelölik. Az ezen tartományon kívül eső értékek pontként jelennek meg. A szaggatott függőleges vonal a korábbi vizsgálatok és a jelen tanulmány eredményeinek elkülönítésére szolgál.

Fig. 4.: Strontium isotope compositions measured from the tooth enamel of the investigated individuals, compared with the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values characteristic of the southern shore of Lake Balaton (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) and the Great Hungarian Plain (Depaermentier et al. 2020a). The outer contours of the violin plots represent the estimated probability density of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values for each group. The box plots depict the interquartile range (IQR), with the horizontal line within the box indicating the median. The 'whiskers' represent the range of values within 1.5IQR, while values outside this range are plotted as individual points. The dashed vertical line serves to distinguish between the results of previous studies and those of the present study.



5. ábra: A vizsgált egyének fogzománcából mért stronciumizotóp-összetételek összehasonlítása a temetkezésekhez közeli stronciumizotóp-alapvonal tartományokkal (Depaermentier et al. 2021). A hegedüdiagramok külső kontúrja az adott csoport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékeinek becslött valószínűségi sűrűségét mutatja. A dobozdiagramok az interkvartilis-tartományt (IQR) ábrázolják, a dobozban lévő vízszintes vonal a mediánt jelöli. A dobozokból kiinduló terjedelemvonalak az 1,5IQR-en belüli értéktartományt jelölik. Az ezen tartományon kívül eső értékek pontként jelennek meg. A szaggatott függőleges vonal az alapvonal tartományok és a jelen tanulmány eredményeinek elkülönítésére szolgál.

Fig. 5.: Strontium isotope compositions measured from the tooth enamel of the investigated individuals, compared with the local strontium isotope baseline ranges near the burial sites (Depaermentier et al. 2021). The outer contours of the violin plots represent the estimated probability density of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values for each group. The box plots depict the interquartile range (IQR), with the horizontal line within the box indicating the median. The 'whiskers' represent the range of values within 1.5IQR, while values outside this range are plotted as individual points. The dashed vertical line serves to distinguish between baseline ranges and the results of the present study.

A karbonátfrakcióból 23,2‰ (sípcsont), 24‰ (falcsont) és 26,1‰ (tejfog) értékeket kaptunk. A gyermek tejfogában mért stronciumizotóp-összetétel 0,709416 volt (Demény et al. 2023).

A balatonlellel temetkezés esetében a 415-ös sírban lévő 8-9 éves gyermek, mind pedig a 367-es sírba eltemetett nő csont és fogmintáiból kapott foszfát $\delta^{18}\text{O}$ értékek átfedést mutatnak a nyugat-magyarországi temetkezésekből származó irodalmi adatokkal (Depaermentier et al. 2020a) (**2. ábra**).

A gyermek tejfogából mért stronciumizotóp-összetétel teljes mértékben megegyezik a területről származó stronciumizotóp-vizsgálatok értékeivel (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) (**4. ábra**) és a területre jellemző stronciumizotóp-alapvonal tartománnyal (Depaermentier et al. 2021) (**5. ábra**).

A vizsgált gyermek és nő stabilizotóp-összetétele átfedést mutat egymással, amiből valószínűsíthető, hogy a két egyén egymással megegyező környezetben élt (Demény et al. 2023). Mivel a gyermek és a nő fogzománcában, illetve bordájában mért oxigénizotóp-összetételek nem mutatnak jelentős eltérést egymástól, az eredmények nem indikálnak az egyének életén belüli számottevő helyváltoztatást (például magashegységi területekről történő származást). Továbbá a mért értékek átfedést mutatnak a Dunántúlra jellemző oxigénizotóp-értékekkel (Depaermentier et al. 2020a), valamint a gyermek fogából mért stronciumizotóp-összetétel átfedést mutat a területre jellemző értékekkel (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) és a Balaton déli partjára jellemző $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ alapvonal értékével (Depaermentier et al. 2021). Ezek alapján feltételezhető, hogy mind a gyermek, mind a nő helyben született és nevelkedett (Demény et al. 2023). Bár a nő esetében a stronciumizotóp-adatok hiánya korlátozza a pontos származási hely meghatározását, az oxigénizotóp-értékek és a gyermek helyi eredetét valószínűsítő adatok közötti egyezés összhangban áll a nő helyi életmódjával is. Fontos megemlíteni, hogy a nő és a gyermek oxigénizotóp-összetétele, illetve a gyermek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya átfedést mutat az Alföldre jellemző értékekkel is. Így bár az adatok összhangban vannak a helyi származással, nem zárható ki, hogy az egyének a Kárpát-medence egy másik, Balatonlelléhez hasonló izotópos adottságú területéről származtak.

Ugyanakkor a gyermek tejfogából mért magasabb oxigénizotóp-összetétel magyarázatra szorul. Ezen emelkedett $\delta^{18}\text{O}$ érték legvalószínűbb oka a szoptatás (Britton et al. 2015; Knipper et al. 2018), amit alátámaszt, hogy a foszfát- és karbonát $\delta^{18}\text{O}$ értékek ezen két komponens között fennálló egyensúlyi vonal (Chenery et al. 2012) mentén helyezkednek el (**3. ábra**) (Demény et al. 2023). Azonban a tejfogak részben az anya várandósság

alatti $\delta^{18}\text{O}$ értékeit is tükrözik (Nava 2024). Ebből kifolyólag az emelkedett érték arra is utalhat, hogy a gyermek anyja máshol élhetett és a fogantatás előtt nem sokkal érkezett Balatonlellére. Mivel azonban a genetikai vizsgálatok során nem sikerült az anyát beazonosítani (Bondár & Szécsényi-Nagy 2020), ez a hipotézis nem igazolható.

Balatonszentgyörgy

A balatonszentgyörgyi késő rézkori temetőből 26 egyén fogzománcából vizsgáltuk mind $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értéket, mind pedig a foszfát-oxigénizotóp-összetételt. Továbbá 23 esetben karbonát-oxigénizotóp-összetételt is meghatároztunk ugyancsak fogzománc mintákból. A vizsgált egyének lefedik a temető egész területét (**Melléklet 1. ábra**). A kapott eredményeket a **Melléklet 2. táblázat** tartalmazza. A $\delta^{18}\text{O}$ értékek 14,7‰ és 18,6‰ között változnak, az átlagérték 16,4‰. A karbonátkomponensből mért oxigénizotóp-összetételek 22,7‰ és 27,1‰ között mozognak, az átlaguk 24,8‰. A $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékek 0,70896 és 0,71088 között változnak, átlagértékük 0,70947.

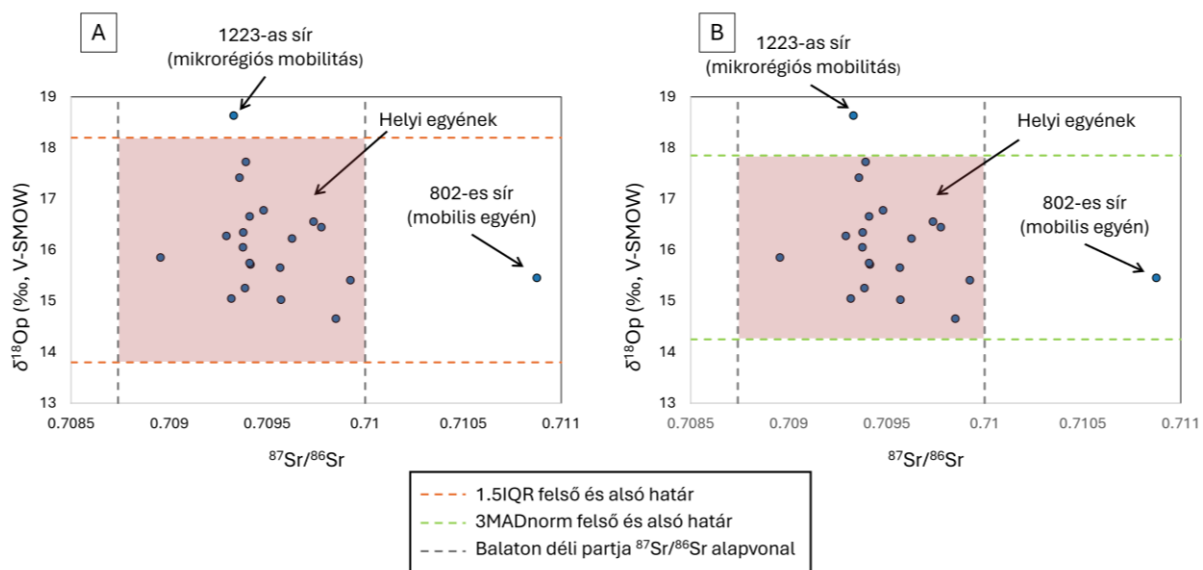
A balatonszentgyörgyi késő rézkori temetőből vizsgált egyének közül négy esetben (768, 794, 1214, 1196) lehetett kimutatni a foszfátból és karbonátból mért $\delta^{18}\text{O}$ értékek között fennálló egyensúlytól való eltérést (**3. ábra**). E négy esetben az egyensúlyi vonaltól való eltérés oka a másodlagos karbonát megjelenése, illetve a CO_3 beépülése a hidroxapatit szerkezetébe. Mivel ezek a folyamatok kizárólag a karbonátkomponens oxigénizotóp-összetételét módosították, az egyensúlyi vonaltól való eltérés ellenére is felhasználhatók az érintett egyének $\delta^{18}\text{O}$ értékei mobilitás vizsgálati következtetések levonására (Farkas et al. in preparation). Négy egyén (1196, 1221, 793, 1214) esetében tejfogból, egy egyén (768) esetében pedig első őrlőfogból (M1) történtek az oxigénizotóp-elemzések. Ezen, korai életszakaszban képződött fogak (a korábban tárgyaltaknak megfelelően) a szoptatás hatására nehéz izotópban dúsultak, így nem alkalmasak mobilitási következtetések levonására. Ezért ezt az öt egyént (1196, 1221, 793, 1214, 768), illetve az adataikat további értékelésből kizártuk, és nem szerepeltetjük őket a kapott eredmények interpretációjában. Ugyanakkor az a tény, hogy ezen esetekben a mért értékek a fiziológiai dúsulás ellenére sem térnek el a temetőre jellemző $\delta^{18}\text{O}$ értékek átlagától, fontos kontrolladatként szolgál, mivel igazolja a populáció oxigénizotópos homogenitását.

A vizsgált egyének fogzománcának oxigénizotóp-összetétele jól átfed a Balaton déli partjáról származó egyéb temetkezések publikált adataival (Depaermentier et al. 2020a) (**2. ábra**). Stronciumizotóp-összetételük (egyetlen egyén kivételével) nagymértékű egyezést mutat a térségre vonatkozó irodalmi adatokkal (Depaermentier et al. 2020a; Gerber et al. 2023) (**4. ábra**), valamint a területre

jellemző $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ alapvonal-tartományokkal (Depaermentier et al. 2021) (**5. ábra**). Mind a foszfát-oxigénizotóp-összetétel alapján, mind $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékeik alapján a temetőt alkotó népesség helyinek tekinthető.

Habár oxigénizotóp-összetétel alapján a temetőt alkotó népesség helyi, azonban a mért értékek bizonyos fokú variációjára észrevehető (**6. ábra**). Statisztikai módszerekkel lehetséges helyi és nem helyi egyének elkülönítése, azáltal, hogy a mintasoron belül azonosíthatóvá válnak a közösség átlagától jelentősen eltérő, statisztikai értelemben kiugró értékek (Lightfoot & O'Connell 2016). Ezen két statisztikai eljárás az interkvartilis tartomány (1,5IQR) vagy a mediántól való eltérés (3MADnorm) alapján határozza meg a helyi izotópos variációt. Ezáltal (habár más temetkezések $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ értékeivel egyezés figyelhető meg) lehetséges a vizsgált populáció statisztikai változékonyságán kívül eső, így nem helyi egyének elkülönítése. Mind az 1,5IQR, mind pedig a 3MADnorm módszer kimutatta, hogy az 1223-as számú sírba eltemetett matusus korú nő, a temető átlagánál magasabb $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ értéke következtében potenciálisan

nem helyi származású (**Melléklet 2. ábra**). Mivel az egyén őrlőfogzománcából mért foszfát $\delta^{18}\text{O}$ értékéből számolt csapadékvíz oxigénizotóp-összetétel nem tér el a Kárpát-medencére jellemző értékektől (Terzer et al. 2013; Erdélyi 2025, 101–108), továbbá stronciumizotóp-összetétele is megegyezik a temetőre jellemző tartománnyal, így nagy léptékű, Kárpát-medencén kívülről jövő migráció nem feltételezhető. Ezen emelkedett oxigénizotóp-összetétel egyik lehetséges magyarázata, hogy az egyén elsődleges ivóvízforrása nem a helyi csapadékvíz hanem a nehéz izotópban dúsabb (Csernyi 2024) Balaton vize lehetett. Ezek alapján feltételezhető, hogy az 1223-as sírba eltemetett nő egy Balatonhoz közelebbi településről származhatott és csak élete későbbi szakaszában csatlakozott a temetőt alkotó közösséghez. Mindezek alapján a mobilitás ténye kimutatható, mikrorégiós szinten értelmezendő. Ezen eredmények összhangban állnak a korábbi magyarországi rézkori vizsgálatokkal, melyek kimutatták, hogy a vizsgált népesség döntően helyi egyénekből állt, a mobilitás pedig jellemzően nem volt nagy léptékű (Giblin 2011, 278; Giblin et al. 2013).



6. ábra: A balatonszentgyörgyi késő rézkori temetőből vizsgált egyének foszfát $\delta^{18}\text{O}$ értékei és stronciumizotóp-összetétele a helyi és mobilis egyének, illetve a kimutatható mobilitás típusának megjelölésével. A helyi és mobilis egyének meghatározása az 1,5IQR (A) és 3MADnorm (B) statisztikai módszerekkel (Lightfoot & O'Connell 2016) és a Balaton déli partjára jellemző $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ alapvonal tartományokkal (A és B) (Depaermentier et al. 2021) történt.

Fig. 6.: Phosphate oxygen and strontium isotope compositions of the investigated individuals from the Late Copper Age cemetery of Balatonszentgyörgy, indicating local and non-local individuals as well as the identified types of mobility. Local and mobile individuals were identified using the 1.5IQR (A) and 3MADnorm (B) statistical methods (Lightfoot & O'Connell 2016) and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ baseline ranges characteristic of the southern shore of Lake Balaton (A and B) (Depaermentier et al. 2021).

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értéke alapján a 802-es számú sírba elhelyezett 20-25 év közötti nő (?) elkülönül a temetőt alkotó népeiségtől. Az ilyen, magas (0,71 feletti) stronciumizotóp-összetételek idős kontinentális kőzetű területekre jellemzők (Bentley 2006). Ilyen kőzetű területek a Kárpát-medencén belül a Mórággyi-dombság területén, a Balaton-felvidéken vagy a Velencei-hegységben található a Kárpát-medencén kívül pedig a Dinaridákon vagy a Kárpátokban. Mivel az egyén oxigénizotóp-összetételében nem tér el sem a temetőre jellemző értékektől, sem pedig a foszfát $\delta^{18}\text{O}$ értékből számolt csapadékvíz oxigénizotóp-összetétel nem utal dinári (Paar et al. 2019) vagy kárpáti (Holko et al. 2012; Nagavciuc et al. 2022) eredetű ivóvízre, így az egyén feltételezhetően a Kárpát-medencén belülről származott.

Az egyén stronciumizotóp-értéke megegyezik a Velencei-hegységgel rokon kifejlődésű (Ondrejka et al. 2021) Nyugati-Kárpátok, a Mórággy területénél jelen lévő gránit $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékeivel (Kohút et al. 1999; Shatagin et al. 2004), illetve a Balaton-felvidék keleti részére jellemző stronciumizotóp-alapvonal tartománnyal (Depaermentier et al. 2021). Ennek ellenére nem mutatható ki egyezés a Mórággyi Gránit (Mórággy Tűzkődomb) és a variszkuszi orogén lepusztulásával képződött Balatonfelvidéki Homokkő (Budai & Csillag 1998) (Felsőörs Bárókert) területéről származó más temetkezések $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékeivel (Depaermentier et al. 2020a, 2020b, 2021). Ennek magyarázata a „biológiailag hozzáférhető” (bioavailable) és a kőzetben mért stronciumizotóp közötti különbség. Vagyis annak ellenére, hogy a gránit és a variszkuszi orogén törmelékeiből képződött homokkő magas stronciumizotóp-összetétellel jellemezhető, azonban felszínhez közeli előfordulása kevés és kis méretű (Gyalog & Síkhegyi 2005), így az azt fedő fiatal (és ennek megfelelően alacsonyabb stronciumizotóp-arányú) üledékek felülírják az izotópos jelet. Ennek következtében a Mórággyi Gránit és Balaton-felvidéki Homokkő területén található lelőhelyek stronciumizotóp-összetételei ezen fiatal, gránitétől eltérő üledékeket mutatják.

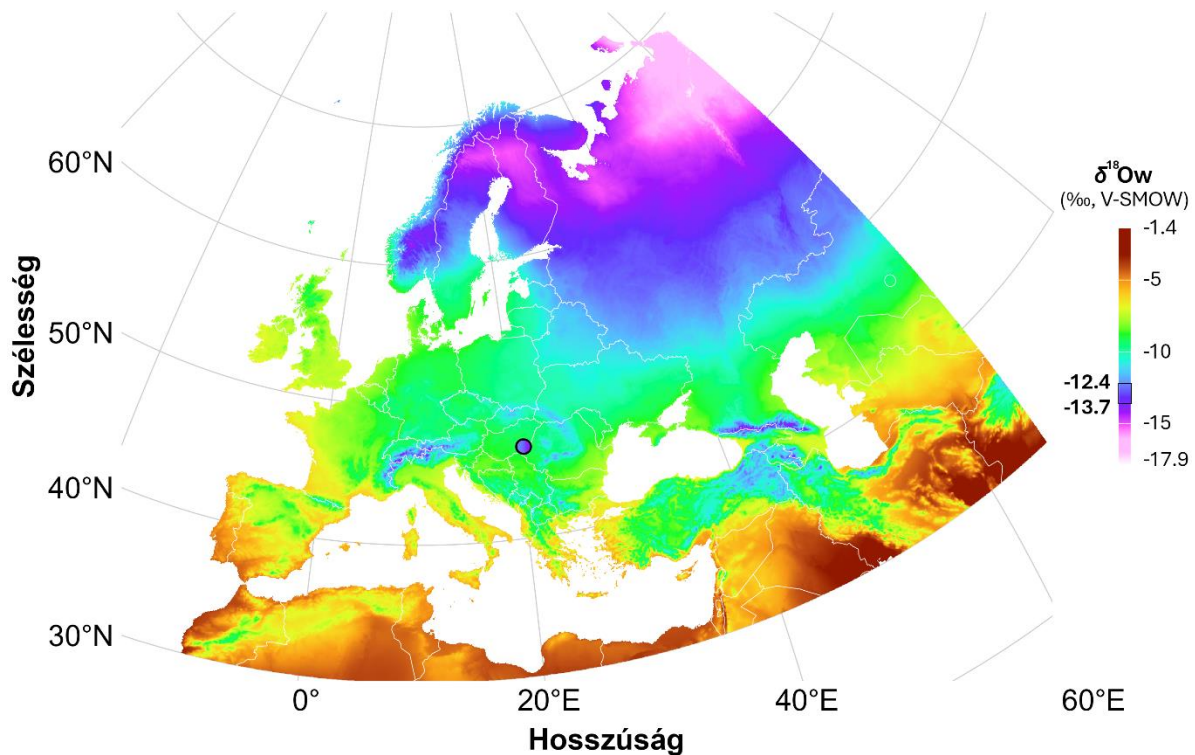
Nagyfokú egyezés figyelhető meg a Hernád-völgyi stronciumizotóp-adatok (Depaermentier et al. 2020a) és a 802-es egyén $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értéke között. Ennek magyarázata, hogy a Hernád kárpáti eredetű, nagy kiterjedésű hordalékkúpot épít (Gábris & Nádor 2007), így az azon képződött talajokba átöröklődik a Kárpátokra jellemző magas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értéket. Összegezve elmondható, hogy a 802-es sírba eltemetett juvenis nő (?) oxigén- és stronciumizotóp-értékeinek együttes vizsgálatával kimutatható az egyén migrációja egy Kárpát-medencén belüli idős kontinentális kőzetű területről.

Tekintettel arra, hogy a korábbi vizsgálatokból csupán pontszerű adatok állnak rendelkezésre összehasonlításként, az alacsonyabb stronciumizotóp-arányú üledékekkel borított területek (Velencei-hegység, Mórággyi-dombság, Balaton-felvidék) szintén az egyén lehetséges származási helyének tekintendők. Mindent egybevetve az egyén potenciális származási területe a Velencei-hegység, a Mórággyi-dombság, a Balaton-felvidék vagy a Hernád-völgye.

A stabilizotóp adatok nem alkotnak elkülönülő csoportokat a vizsgált egyének neme és kora szerint. A temetőre jellemző D-É-i tájolástól eltérő tájolású egyéneket jellemzően negatívabb foszfát-oxigénizotóp-összetétel jellemzi, azonban mivel stronciumizotóp-összetételük megegyezik a temetőre jellemző tájolású egyénekével, így az átlagosan alacsonyabb $\delta^{18}\text{O}_p$ érték a kis mintaszámból eredő statisztikai torzulás eredménye. Az egyének fektetése és a sírok kőpakolással való ellátása és az egyének stabilizotóp-összetételei között sem mutatható ki összefüggés. Ugyancsak nem állapítható meg összefüggés az egyének izotópterékei és a sírmellékletek között. Sem a gyöngymellékletek, sem az edénymellékletek nem mutatnak összefüggést sem az oxigénizotóp-, sem a stronciumizotóp-összetételekkel. A vizsgált sírok közül csak az 1171-es sír tartalmazott különleges mellékletet (fémhuzal, *Columbella rustica* héjából készült gyöngy). Ezen egyén mind stronciumizotóp-, mind oxigénizotóp-összetételei tekintetében megegyezik a temetőre jellemző értékekkel (**Melléklet 3-5. ábra**).

Orosháza

A 12–13. századi (Rózsa et al. 2014) Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10.) lelőhelyről 49 egyén karbonát $\delta^{18}\text{O}$ értékét és stronciumizotóp-összetételét vizsgáltuk meg fogzománc mintákból. Továbbá ezen 49 egyéneken belül 44 egyénnek vizsgáltuk mind a fogzománcból, mind pedig bordából kapott foszfát-oxigénizotóp-összetételét (**Melléklet 3. táblázat**). Három egyén (OH2013.11.32, OH2013.11.61, OH2013.11.113) esetében volt megfigyelhető a fogzománcmintákból mért $\delta^{18}\text{O}_p$ és $\delta^{18}\text{O}_c$ értékek jelentős eltérése a foszfát- és karbonátkomponens között fennálló egyensúlyi vonaltól (Chenery et al. 2012). E három esetben az eltérés a fogzománc karbonátkomponense és a talajvíz közötti izotópcserre miatt következett be. Mivel a foszfátkomponens ezeknél a mintáknál nem módosult, a $\delta^{18}\text{O}_p$ értékek alkalmazhatóak mobilitási következtetések levonására (Farkas et al. in preparation). A vizsgált egyének lefedik a feltárt temető egészét (**Melléklet 6. ábra**). A fogzománcból mért karbonát-oxigénizotóp-összetételek 22,4% és 26,6% között helyezkednek el, átlaguk 23,9%. Ugyanezen minták stronciumizotóp-arányai 0,70748 és 0,711546 között szóródtak, az átlagos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,70953.



7. ábra: Az RCWIP2 modellel (Terzer-Wassmuth et al. 2021) számított átlagos csapadék stabil oxigénizotópos ($\delta^{18}\text{O}_w$) eloszlása Európában a 1960–2016 közötti időszakra. A fekete körrel jelölt pont Orosházát jelzi, ahol az egyének fogzománcából és bordáiból meghatározott átlag $\delta^{18}\text{O}_w$ értékei kerültek feltüntetésre színátmenettel; fogzománc ($-12,4\text{‰}$) és borda ($-13,7\text{‰}$) értékeket a jobb oldali színskála mutatja. A térkép vetülete: ETRS89 / LAEA Europe (EPSG:3035).

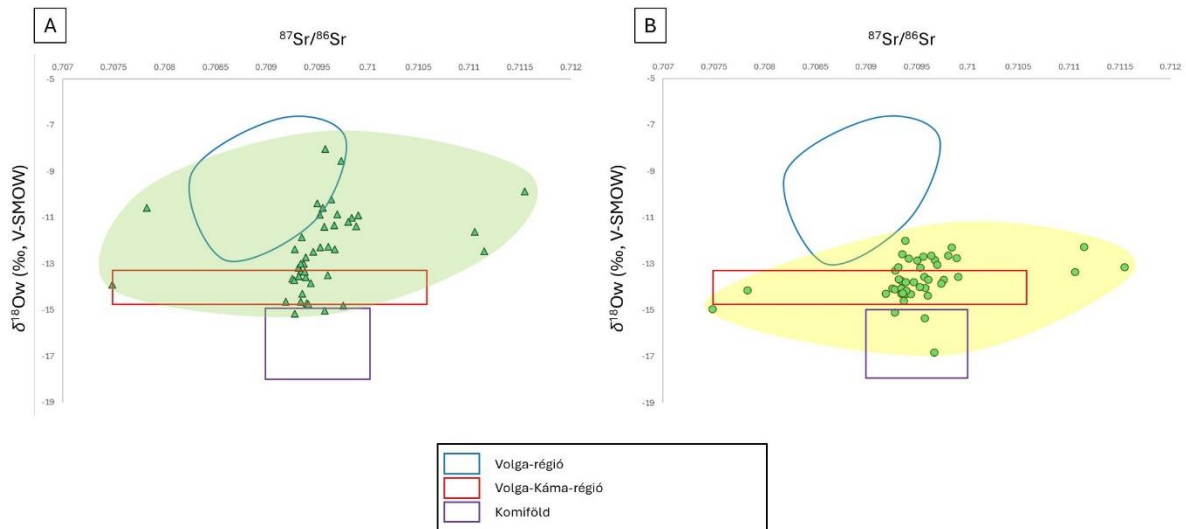
Fig. 7.: The average precipitation $\delta^{18}\text{O}$ distribution in Europe for the period 1960–2016, calculated with the RCWIP2 model (Terzer-Wassmuth et al. 2021). The black circle marks Orosháza, where the mean $\delta^{18}\text{O}_w$ values determined from the tooth enamel and ribs of individuals are indicated with a color gradient; the dental enamel (-12.4‰) and rib (-13.7‰) values are shown on the color scale to the right. The map projection is ETRS89 / LAEA Europe (EPSG:3035).

A vizsgált egyének fogzománcából mért foszfát-oxigénizotóp-összetétele 12‰ és $16,7\text{‰}$ között helyezkedik el, (átlag $13,8\text{‰}$), bordából mért foszfát-oxigénizotóp-összetételük 11‰ és $14,1\text{‰}$ között változnak 13‰ -es átlagértékkel. A $\delta^{18}\text{O}_p$ értékekből számolt csapadékvíz oxigénizotóp-összetételek a fogzománcminták esetében -8‰ és $-15,2\text{‰}$ között helyezkednek el (átlag $-12,4\text{‰}$). A bordák esetében a $\delta^{18}\text{O}_w$ értékek -12‰ és $-16,8\text{‰}$ között szórnak, átlaguk $-13,7\text{‰}$. A foszfát-oxigénizotóp-összetételének a csapadékvíz $\delta^{18}\text{O}_w$ értékévé való átszámítás bizonytalanságának mértéke az egyenlet tengelymetszetének standard hibája alapján $\pm 1,51\text{‰}$ (Daux et al. 2008).

A vizsgált egyének stronciumizotóp-összetétele jelentős mértékű egyezést mutat a területre jellemző stronciumizotóp-alapvonal értékkel (**5. ábra**), illetve korábbi vizsgálatokkal (**4. ábra**) (Depaermentier et al. 2020a, 2021). A vizsgált egyének stronciumizotóp-összetétele alapján a temetőt alkotó népesség helyinek lenne tekinthető. Azonban mind az egyének fogzománcából, mind pedig bordájából

mért foszfát $\delta^{18}\text{O}_p$ értékekből számolt csapadékvíz $\delta^{18}\text{O}_w$ értékek negatívabbak a Kárpát-medencére jellemző értékeknél. Az ilyen negatív csapadékvíz oxigénizotóp-összetételek egyenlítői távoli területekre (Skandinávia, Balti-térség), magashegységekre (Alpok, Kárpátok, Kaukázus) vagy kontinensek belső területeire jellemzőek (pl. Kelet-európai-síkság) (Terzer et al. 2013; Erdélyi 2025, 101–108) (**7. ábra**).

Ezen lehetséges származási területek közül Skandinávia (Åberg 1995; Armaroli et al. 2024; Price & Naumann 2015) és a Balti-térség (Lahtinen et al. 2021; Danielisová et al. 2025; Eckelmann et al. 2025) az orosházinál magasabb stronciumizotóp-összetétellel jellemezhető. Ebből kifolyólag ezen területek nem tekinthetőek az orosházi egyének származási területének. A lehetséges magashegységi származási területek közül ugyancsak magas stronciumizotóp-összetételi eltérés miatt nem feltételezhető a kárpáti (Nikezić et al. 2024) vagy kelet-alpi (Müller et al. 2003; Grupe et al. 2018) származás.



8. ábra: Az Orosháza lelőhelyről származó egyének fogzománcából (A) és bordájából (B) meghatározott foszfát-oxigénizotóp-összetételekből számított csapadékvíz- $\delta^{18}\text{Ow}$ értékek, a lehetséges származási területek eloszlásmezőivel. A különböző színű vonalak a Volga-régiót (Gerling 2015, 209–210), a Volga-Káma-régiót (Kazantseva et al. 2022; Kiseleva et al. 2022) és a Komiföldet (Terzer et al. 2013; Bataille et al. 2020) jelölik.

Fig. 8.: Precipitation $\delta^{18}\text{Ow}$ values calculated from the phosphate oxygen isotope compositions of tooth enamel (A) and rib samples (B) of the individuals from Orosháza, with distribution fields of potential areas of origin. Color-coded lines indicate the Volga region (Gerling 2015, 209–210), the Volga-Káma region (Kazantseva et al. 2022; Kiseleva et al. 2022), and the Komi Republic (Terzer et al. 2013; Bataille et al. 2020).

A vizsgált egyének mind oxigén- mind stronciumizotóp-összetétel tekintetében nagymértékű egyezést mutatnak a Nyugat-Alpokra jellemző értékekkel (Rosselet-Christ et al. 2024). A sírok tájolása azonban ellentmond a feltételezésnek, miszerint a származási helyet Orosházától nyugatra kell keresni. A közösség ugyanis (vallási rítusainak megfelelően) Kába irányába mutató tekintettel (Rózsa et al. 2014) temette el halottait, ami egy, Kárpát-medencénél keletebbi lokalizációt indikál. Továbbá a feltárás során nem került elő olyan tárgyi lelet (Rózsa & Tugya 2012) amely a vizsgált egyének nyugat-alpi származását, ezzel a területtel való szociális-kulturális kapcsolatát feltételezné. Így a Nyugat-Alpok mint származási hely régészeti megfigyelések alapján nem valószínűsíthető. A Kaukázus egyes régióira jellemző stronciumizotóp-összetétel megegyezik az orosházi egyének esetében mért értékekkel (Reinhold et al. 2024), azonban a Kaukázus azon magasan fekvő régióit, amelyek kellően negatív csapadékvíz oxigénizotóp-összetétellel rendelkeznek ahhoz, hogy az általunk vizsgált egyének származási területének tekinthetők legyenek, magas stronciumizotóp-összetétel jellemzi (Coupal et al. 2023). A Kelet-európai-síkság mind oxigénizotóp-, mind stronciumizotóp-összetétel szempontjából megfelelő tartományba esik ahhoz, hogy a vizsgált egyének potenciális származási helyének lehessen tekinteni (Terzer et al. 2013; Bataille et al. 2020). Megfigyelhető, hogy a fogzománcból mért foszfát-oxigénizotóp-összetételek nagyobb szórást mutatnak, mint ugyanazon

egyének bordáiból meghatározott $\delta^{18}\text{O}$ értékek. Ez arra utal, hogy az érintettek gyermekkorukat feltehetően a Kelet-európai-síkság különböző területein töltötték. Ilyen területek lehetnek a Volga-régió (Gerling 2015, 209–210), a Volga-Káma-vidék (Kazantseva et al. 2022; Kiseleva et al. 2022), valamint az ezeknél északabbra fekvő Komiföld (Terzer et al. 2013; Bataille et al. 2020) (8. ábra, A). A bordák fogzománchoz képesti negatívabb $\delta^{18}\text{Ow}$ értékei arra utalnak, hogy a Volga-vidéken élő népesség a Volga-Káma-vidékre települt át. Ezt követően az egyének Volga-Káma-vidéke és Komiföld területekről a halálukat megelőző néhány évben érkeztek a mai Orosháza térségébe (8. ábra, B).

Habár a bordákból nyert adatok interpretációja során nem zárható ki a szövetek diagenetikus átalakulása, a $\delta^{18}\text{O}$ értékek negatív eltolódása az egész populációban jelentkezik. Mivel a környezeti hatás véletlenszerűen lenne megfigyelhető, ez az egységes trend valószínűsíthetően nem a diagenézis következménye, hanem az eredeti biológiai szignált tükrözi. Ezt az észrevételt erősíti, hogy a fogzománcok átalakulása sem volt jellemző a teljes populációra, csak néhány egyént érintett.

Bár a temetőben a relatív betemetési sorrend délről észak felé történt (Balogh et al. 2015) annak megállapítása, hogy a vizsgált egyének bevándorlása egyszerre, egy esemény során vagy több fázisban történt-e, a temető leleteinek szegénysége (Rózsa et al. 2014) illetve a publikált radiokarbon

koradatok (Balázs 2017, 56–58) pontatlansága következtében nem lehetséges.

A vizsgált egyének jelentős részénél megfigyelhető a *Foramen supratrochleare* és a Worm-féle csontok megléte. Ezen genetikai sajátosságokkal rendelkező egyének nem különülnek el sem oxigénizotóp-, sem stronciumizotóp-összetételükben a többi egyéntől, nem alkotnak külön csoportot a temetőt használó népességben belül (**Melléklet 7. ábra A, B**).

Konklúzió

Habár az emberi fogak és csontok oxigén- és stronciumizotóp-vizsgálata régóta alkalmazott módszer az egyének és közösségek mobilitásának feltárására, hazai kombinált alkalmazásuk még nem terjedt el széles körben.

Jelen tanulmányban három lelőhely temetkezéseit elemeztük e módszeregyüttes segítségével. A legfontosabb megfigyeléseink a következők:

- Balatonlelle-Rádpusztá, Romtemplom mellett 67/5. lelőhelyről származó gyermek és nő is helyben született és élt. A gyermek tejfogában mért emelkedett $\delta^{18}\text{O}$ érték háttérben elsősorban a szoptatás élettani hatása állhat, ugyanakkor az adatok alapján nem zárható ki az ismeretlen (nem vizsgált) anya nem helyi származásának lehetősége sem, bár ez utóbbi genetikai adatok hiányában nem igazolható.

- Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő 2. lelőhelyen a temetőt alkotó népesség két kivételtől eltekintve helyi származású. Ezen két egyén különböző léptéki mobilitásban vett részt élete során. Oxigénizotóp-összetétele alapján 1223-as sírba eltemetett nő feltételezhető származási helye egy Balatonhoz közelebbi település. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értéke alapján a 802-es sírba eltemetett nő (?) Kárpát-medencén belüli magas stronciumizotóp-összetétellel jellemezhető területről származott. Ilyen terület lehet a Mecsek, a Velencei-hegység, a Balaton-felvidék vagy a Hernád-völgye. A temetkezési különbségek és a tárgyi mellékletek nincsenek összefüggésben az egyén mobilitásával.

- Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10.) lelőhelyről vizsgált egyének stronciumizotóp-értékei nem térnek el az Alföldre jellemző értékektől, azonban mind a fogakban, mind a bordákban mért oxigénizotóp-összetétel negatívabb a Kárpát-medencére jellemző értékeknél. A két módszer együttes alkalmazásával feltételezhető, hogy az egyének gyermekkorukat a Kelet-európai-síkság különböző területein töltötték majd a régió belüli mobilitást követően csupán haláluk előtt néhány évvel érkeztek a mai Orosháza környékére. A temető leleteinek szegénysége, illetve a publikált radiokarbon koradatok pontatlansága következtében nem lehetséges annak megállapítása, hogy az egyének bevándorlása egyszerre, vagy több fázisban történt.

Eredményeink egyértelműen igazolják, hogy bár az oxigén- és stronciumizotóp-vizsgálatok önállóan is értékes információkat nyújtanak, integrált alkalmazásuk jelentősen növeli a mobilitási mintázatok és a potenciális származási területek beazonosításának lehetőségét. E módszeregyüttes révén nemcsak az egyének földrajzi eredete, hanem életútjuk egyes szakaszai is részleteikben rekonstruálhatók.

Szerzők tudományos közreműködése

Farkas Csaba Eredeti kézirat, kísérleti munkák. **Gugora Ariana** Javított kézirat, kísérleti munkák. **Erdélyi Dániel** Javított kézirat, vizualizáció. **Somogyvári-Lajtár Enikő** Javított kézirat, kísérleti munkák. **Bondár Mária** Javított kézirat. **Fóthi Erzsébet** Javított kézirat. **Rózsa Zoltán** Javított kézirat. **Somogyi Krisztina** Javított kézirat. **Horváth Anikó** Kísérleti munkák. **Demény Attila** Kutatásvezetés, javított kézirat.

Köszönetnyilvánítás

Hálásan köszönjük Dr. Laszlovszky József, Faragó Norbert és két ismeretlen bíráló értékes véleményét.

Irodalomjegyzék

- ÅBERG, G. (1995): The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies. *Water, Air and Soil Pollution* **79** 309–322. <https://doi.org/10.1007/BF01100444>
- AMBACH, W., DANSGAARD, W., EISNER, H. & MØLLER, J. (1968): The altitude effect on the isotopic composition of precipitation and glacier ice in the Alps. *Tellus* **20/4** 595–600. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v20i4.10040>
- ARMAROLI, E., LUGLI, F., CIPRIANI, A. & TÜTKEM, T. (2024): Spatial ecology of moose in Sweden: Combined Sr-O-C isotope analyses of bone antler. *PLoS ONE* **19/4** e0300867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300867>
- BALÁZS J., MARCSIK, A. & RÓZSA, Z. (2015): Adatok az Árpád-kori Orosháza paleopatológiájához: a lepra. *Mozaikok Orosháza és Vidéke Múltjából* **13** 49–57.
- BALÁZS, J. (2017): Komplementer morfológiai és kémiai antropológiai vizsgálatok régi emberi maradványokon. *Közöletlen PhD értekezés*, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar, Embertani Tanszék. Szeged, 109 p.
- BALOGH, Cs. BALÁZS, J., KÁLOMISTA, I. & GALBÁCS, G. (2015): Előzetes nyomelemmérés eredmények Orosháza, Bónum, Faluhely régészeti lelőhelyről. *Mozaikok Orosháza és Vidéke Múltjából* **13** 58–63.
- BATAILLE, P.C., CROWLEY, B.E., WOOLLER, M.J. & BOWEN, G.J. (2020): Advances in global bioavailable strontium isoscapes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **555** 109849.

- <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109849>
- BENTLEY, R.A. (2006): Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: A review. *Journal of Archaeological Method and Theory* **13/3** 135–187. <https://doi.org/10.1007/s10816-006-9009-x>
- BONDÁR, M. (2009): Funerary rites in the Budakalász cemetery. In: BONDÁR, M. & RACZKY, P. eds., *The Copper Age cemetery of Budakalász*. Budapest: Pytheas Printing House, 198–243. <https://real.mtak.hu/72325/>
- BONDÁR, M. & SZÉCSÉNYI-NAGY, A. (2020): Skull cult in the Late Copper Age. *Ziridava Studia Archaeologica* **34** Cluj-Napoca: Editura MEGA, 91–104. <https://real.mtak.hu/121106/>
- BONDÁR, M. (2020): Késő rézkori temetkezések Balatonlelléről (Somogy megye). *A Kaposvári Rippl-Rónai Múzeum Közleményei* **7** 89–108. <https://doi.org/10.26080/krrmkozl.2020.7.89>
- BONDÁR, M., DEMÉNY, A., NÉMETH, P., KARLIK, M., FINTOR, K. & TÓTH, M. (2021): Különleges „gagát” gyöngy egy különleges késő rézkori sírból. Special „jet-like” bead from a special late copper age grave. *Archeometriai Műhely XVIII./2*. 143–155. <https://doi.org/10.55023/ISSN.1786-271X.2021-012>
- BONDÁR, M. & SOMOGYI, K. (2022): Késő rézkori birituális temető Balatonszentgyörgy határában. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 316 p.
- BONDÁR, M. (2022): A temető „benépesülése”, a sírok tipokronológiai helyzete. In: BONDÁR M. & SOMOGYI, K. eds., *Késő rézkori temető Balatonszentgyörgy határában*. Archeolingua Alapítvány, Budapest 91–97.
- BONDÁR, M. & SOMOGYI, K. (2023): A temetkezések katalógusa. Somogy vármegye. In: BONDÁR, M. ed., *Késő rézkori temetkezések régészeti és bioarcheológiai elemzése*. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 181–268. https://doi.org/10.62150/BM.KRT.2023_03
- BRITTON, K., FULLER, B.T., TÜTKEN, T., MAYS, S. & RICHARDS, M.P. (2015): Oxygen isotope analysis of human bone phosphate evidences weaning age in archaeological populations. *American Journal of Physical Anthropology* **157/2** 226–241. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22704>
- BUDAI, T. & CSILLAG, G. (1998): *A Balaton-felvidék középső részének földtana*. Bakonyi Természettudományi Múzeum, Zirc, 1998, p. 80.
- CHENERY, C.A., PASHLEY, V., LAMB, A.L., SLOANE, H.J., & EVANS, J.A. (2012): The oxygen isotope relationship between the phosphate and structural carbonate fractions of human bioapatite. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **26/3** 309–319. <https://doi.org/10.1002/rcm.5331>
- COUPAL, I., POIRIER, A., HOROI, V. & RIBOT, I. (2023): Strontium isoscape of Georgia, south Caucasus region: implications for paleodiet and population migration studies. *Goldschmidt 2023 Abstract*. <https://doi.org/10.7185/gold2023.15421>
- CSERNY, T. (2024): Water stable isotope data of Lake Balaton from 1991–2008. <https://hdl.handle.net/21.15109/ARP/PCKHRH>, ARP, VI. utolsó megtekintés: 2025.05.07.
- DANIELISOVÁ, A., NORDFORS, U., KERTES, S., WESSMAN, A., ACKERMAN, L., OINONEN, M., ETU-SIHVOLA, H. & ARPE, L. (2025): Multi-isotopic evidence reveals the emergence of a cosmopolitan community at the Luistari cemetery in Eura, Finland, during the early Medieval period (600–1130 CE). *Archaeological and Anthropological Sciences* **17** 58. <https://doi.org/10.1007/s12520-024-02147-6>
- DANSGAARD, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus* **16** 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- DAUX, V., LÉCUYER, C., HÉRAN, M.A., AMIOT, R., SIMON, L., FOUREL, F., MARTINEAU, F., LYNNERUP, N., REYCHLER, H. & ESCARGUEL, G. (2008): Oxygen isotope fractionation between human phosphate and water revisited. *Journal of Human Evolution* **55/6** 1138–1147. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.06.006>
- DEMÉNY, A. (2003): Stabilizotóp-geokémia és termometria: hogyan és mire? *Földtani Közöny* **133/2** 263–270.
- DEMÉNY, A., GUGORA, A. D., KESJÁR, D., LÉCUYER, C. & FOUREL, F. (2019): Stable isotope analyses of the carbonate component of bones and teeth: The need for method standardization. *Journal of Archaeological Science* **109** 104979. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.104979>
- DEMÉNY, A., GUGORA, A., SOMOGYVÁRI-LAJTÁR, E., FARKAS, Cs., HEGYI, I, PALCSU, L. & HORVÁTH, A. (2023): Rézkori temetők csontvázleteinek stabilizotóp-geokémiai elemzése. In: BONDÁR, M., *Késő rézkori temetkezések régészeti és bioarcheológiai elemzése*. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 592–611. https://doi.org/10.62150/BM.KRT.2023_12
- DEPAERMENTIER, M.L.C., KEMPF, M., BÁNFFY, E. & ALT, K.W. (2020a): Tracing

mobility patterns through the 6th-5th millennia BC in the Carpathian Basin with strontium and oxygen stable isotope analyses. *PLoS ONE* **15/12** e0242745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242745>

DEPAERMENTIER, M.L.C., OSZTÁS, A., BÁNFFY, E., ALT, K.W. & KEMPF, M. (2020b): Neolithic land-use, subsistence, and mobility patterns in Transdanubia: A multiproxy isotope and environmental analysis from Alsónyék – Bátaszék and Mórág – Tűzkődomb. *Journal of Archaeological Science: Reports* **33** 102529. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102529>

DEPAERMENTIER, M.L.C., KEMPF, M., BÁNFFY, E. & ALT, K.W. (2021): Modelling a scale-based strontium isotope baseline for Hungary. *Journal of Archaeological Science* **135** 105489. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105489>

DOROZHKIN, S.V. (2009): Calcium Orthophosphates in Nature, Biology and Medicine. *Materials* **2/2** 399–498. <https://doi.org/10.3390/ma2020399>

ECKELMANN, R., ARPPE, L., TARASOV, A., POSPIESZNY, Ł., ACKERMAN, L., HEYD, V., GERASIMOV, D., MOISEYEV, V., FAIRBANKS, V., HYLAND, C. & MANNERMAA, K. (2025): Mobility and community at Mesolithic Lake Onega, Karelia, north-west Russia: insights from strontium isotope analysis. *Archaeological and Anthropological Sciences* **17** 17. <https://doi.org/10.1007/s12520-024-02129-8>

ELLIOTT, J.C. (1994): Structure and Chemistry of the Apatites and the Other Calcium Orthophosphates. *Studies in Inorganic Chemistry* **18** Elsevier Science B.V. 1994, Amsterdam, 82–84.

EMBEY-ISZTIN, A., DOWNES, H., JAMES, D.E., UPTON, B.G.J., DOBOSI, G., INGRAM, G.A., HARMON, R.S. & SCHARBERT, H.G. (1993): The petrogenesis of Pliocene alkaline volcanic rocks from the Pannonian basin, Eastern Central Europe. *Journal of Petrology* **34/2** 317–343. <https://doi.org/10.1093/petrology/34.2.317>

ERDÉLYI, D. (2025): A csapadék stabilizotóp összetételét jellemző térbeli eloszlás geomatematikai modellezése szubkontinentális léptékben. *Közöletlen PhD dolgozat*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Környezettudományi Doktori Iskola, 156 p. <https://doi.org/https://doi.org/10.15476/ELTE.2025.083>

ERICSON, J.E. (1989): Some Problems and Potentials of Strontium Isotope Analysis for Human and Animal Ecology. In: RUNDEL, P.W., EHLERINGER, J.R. & NAGY, K.A., eds., *Stable Isotopes in Ecological Research*. Springer-Verlag New York Inc. 1989, 252–259. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3498-2_14

FARKAS, Cs., KARLIK, M., HEGYI, I., KOVÁCS, I., BONDÁR, M., FÓTHI, E., SOMOGYI, K., RÓZSA, Z., GUGORA, A. & DEMÉNY, A. (in preparation): Examination of the postmortem alteration of dental enamel – combined analytical approaches and pre-treatment method standardisation. (Kézirat beküldve bírálatra): *Journal of Archaeological Science*.

FAURE, G. & MENSING, T.M. (2005): *Isotopes. Principles and Applications*. John & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 691.

FRICKE, H.C., CLYDE, W.C., O'NEIL, J.R. & GINGERICH, P.D. (1998): Evidence for rapid climate change in North America during the latest Paleocene thermal maximum: oxygen isotope compositions of biogenic phosphate from the Bighorn Basin (Wyoming). *Earth and Planetary Science Letters* **160/1-2** 193–208. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00088-0)

GÁBRIS, G. & NÁDOR, A. (2007): Long-term fluvial archives in Hungary: response of the Danube and Tisza rivers to tectonic movements and climatic changes during the Quaternary: a review and new synthesis. *Quaternary Science Reviews*, **26/22–24** 2758–2782. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.06.030>

GARVIE-LOK, S.J., VARNEY, T.L. & KATZENBERG, M.A. (2004): Preparation of bone carbonate for stable isotope analysis: The effects of treatment time and acid concentration. *Journal of Archaeological Science* **31/6** 763–776. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.10.014>

GAT, J.R. (1971): Comments on the Stable Isotope Method in Regional Groundwater Investigations. *Water Resources Research* **7/4** 980–993. <https://doi.org/10.1029/WR007i004p00980>

GAT, J.R. & DANSGAARD, W. (1972): Stable Isotope Survey of the Fresh Water Occurrences in Israel and the Northern Jordan Rift Valley. *Journal of Hydrology* **16/3** 177–211. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(72\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90052-2)

GERBER, D., SZEIFERT, B., SZÉKELY, O., EGYED, B., GYURIS, B., GIBLIN, J.I., HORVÁTH, A., KÖHLER, K., KULCSÁR, G., KUSTÁR, Á., MAJOR, I., MOLNÁR, M., PALCSU, L., SZEVEÉNYI, V., FÁBIÁN, S., MENDE, B.G., BONDÁR, M., ARI, E., KISS, V. & SZÉCSÉNYI-NAGY, A. (2023): Inter-disciplinary analyses of Bronze Age communities from Western Hungary reveal complex population histories. *Molecular Biology and Evolution* **40/9** 478968. <https://doi.org/10.1101/2022.02.03.478968>

GERLING, C., BÁNFFY, E., DANI, J., KÖHLER, K., KULCSÁR, G., PIKE, A.W.G., SZEVEÉNYI, V. & HEYD, V. (2012): Immigration and transhumance in the Early Bronze Age Carpathian

Basin: the occupants of a kurgan. *Antiquity* **86/334** 1097–1111.

<https://doi.org/10.1017/S0003598X00048274>

GERLING, C. (2015): *Prehistoric Mobility and Diet in the West Eurasian Steppes 3500 to 300 BC. An Isotopic Approach*. Berlin, München, Boston: De Gruyter, Germany, 402 p.

<https://doi.org/10.1515/9783110311211>

GIBLIN, J.I. (2011): Isotope Analysis on the Great Hungarian Plain: An Exploration of Mobility and Subsistence Strategies from the Neolithic to the Copper Age. *PhD dolgozat*, The Ohio State University, 278 p.

GIBLIN, J.I., KNUDSON, K.J., BERECZKI, Zs., PÁLFI, Gy. & PAP, I. (2013): Strontium isotope analysis and human mobility during the Neolithic and Copper Age: a case study from the Great Hungarian Plain. *Journal of Archaeological Science* **40/1** 227–239.

<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.024>

GRUPE, G., KLAUT, D., MAUDER, M., KRÖGER, P., LANG, A., MAYR, C. & SÖLLNER, F. (2018): Multi-isotope provenancing of archaeological skeletons including cremations in a reference area of the European Alps. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **32/19** 1711–1727. <https://doi.org/10.1002/rcm.8218>

GUGORA, A., DUPRAS, T.L. & FÓTHI, E. (2018): Pre-dating paprika: Reconstructing childhood and adulthood diet at medieval (13th century CE) Solt-Tételhegy, Hungary from stable carbon and nitrogen isotope analyses. *Journal of Archaeological Science: Reports* **18** 151–160.

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.036>

GUGORA, A., DEMÉNY, A., FÓTHI, E., HORVÁTH, A., PALCSU, L. & KARLIK, M. (2022): Detection of diagenetic alteration in bones and teeth for migration and dietary studies — a combined FTIR and C–N–O–Sr isotope study on tenth century CE cemeteries in northern and northeastern Hungary. *Archaeological and Anthropological Sciences* **14** 58.

<https://doi.org/10.1007/s12520-022-01532-3>

GYALOG, L. & SÍKHEGYI, F. (sorozatszerk.) (2005): *Magyarország földtani térképe, M= 1:100 000*. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest. <https://map.hugeo.hu/fdt100/>, utolsó megtekintés: 2025.04.13.

HAKENBECK, S.E., EVANS, J., CHAPMAN, H. & FÓTHI, E. (2017): Practising pastoralism in an agricultural environment: An isotopic analysis of the impact of the Hunnic incursions on Pannonian populations. *PLoS ONE* **12/3** e0173079. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173079>

HAMRE, S. S. & DAUX, V. (2016): Stable oxygen isotope evidence for mobility in medieval and post-

medieval Trondheim, Norway. *Journal of Archaeological Science: Reports* **8/10** 416–425.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.06.046>

HEGYI, I.N. (2015): Ezüst-foszfát ¹⁸O/¹⁶O izotóp arányának meghatározása EA-IRMS módszerrel. *Közöletlen szakdolgozat*, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar, Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék. Szeged, 49 p.

HOEFS, J. (2009): *Stable Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 285 p.

HOLKO, L., DÓŠA, M., MICHALKO, J., KOSTKA, Z. & ŠANDA, M. (2012): Isotopes of Oxygen-18 and euterium in precipitation in Slovakia. *Journal of Hydrology* **60/4** 265–276. <https://doi.org/10.2478/v10098-012-0023-2>

IACUMIN, P., BOCHERENS, H., MARIOTTI, A. & LONGINELLI, A. (1996a): An isotopic palaeoenvironmental study of human skeletal remains from the Nile Valley. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **126** 15–30. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(96)00067-3)

IACUMIN, P., BOCHERENS, H., MARIOTTI, A. & LONGINELLI, A. (1996b): Oxygen isotope analyses of co-existing carbonate and phosphate in biogenic apatite: a way to monitor diagenetic alteration of bone phosphate? *Earth and Planetary Science Letters* **142/1-2** 1–6.

[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00093-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00093-3)

IACUMIN, P., ROSSI, M., SELMO, E. & VENTURELLI, G. (2022): Oxygen isotopes in carbonate and phosphate of modern mammal bioapatite: New data and critical revision after about 25 years from the first recognition. *Minerals* **12/10** 1204.

<https://doi.org/10.3390/min12101204>

JANSEN, M.W., MÜNKER, C., PAKULLA, J.J., HASENSTAB-DÜBELER, E., MARIEN, C.S., SCHULZ, T., KIRCHENBAUR, M., SCHNEIDER, K. P., TORDY, R., SCHMITT, V. & WOMACHER, F. (2024): Petrogenesis of volcanic rocks from the Quaternary Eifel volcanic fields, Germany: detailed insights from combined trace-element and Sr–Nd–Hf–Pb–Os isotope data. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **179** 57. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02137-w>

KAZANTSEVA, A.S., KADEBSKAYA, O.I. & DUBLJANSKY, Y.V. (2022): Isotopic Composition of Atmospheric Precipitation in the Cis-Ural Region. *Journal of Earth Science* **33/3** 831–838. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1429-8>

KEENAN, S.W. (2016): From bone to fossil: A review of the diagenesis of bioapatite. *American Mineralogist* **101/9** 1943–1951.

<https://doi.org/10.2138/am-2016-5737>

- KEENLEYSIDE, A., SCHWARCZ, H.P. & PANAYOTOVA, K. (2011): Oxygen isotopic evidence of residence and migration in a Greek colonail population on the Black Sea. *Journal of Archaeological Science* **38/10** 2658–2666.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.06.001>
- KISELEVA, D.V., SHAGALOV, E.S., OKUNEVA, T.G., SOLOSHENKO, N.G., RYANSKAYA, A.D., PANKRUSHINA, E.A., KARPOVA, S.V., URAZOVA, K.K. & SIDORUK, A.R. (2022): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Isotope Ratios in the River Waters of the Southern Urals. *Geodynamics & Tectonophysics* **13/2s** 0602.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0602>
- KNIPPER, C., PICHLER, S.L., BRÖNNIMANN, D., RISSANEN, H., ROSNER, M., SPICHTIG, N., STOPP, B., RENTZEL, P., RÖDER, B., SCHIBLER, J., LASSAU, G. & ALT, K.W. (2018): A knot in a network: Residential mobility at the Late Iron Age proto-urban centre of Basel-Gasfabrik (Switzerland) revealed by isotope analyses. *Journal of Archaeological Science: Reports* **17** 735–753.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.001>
- KOHÚT, M., KOVACH, V.P., KOTOV, A.B., SALNIKOVA, E.B. & SAVETENKOW, V.M. (1999): Sr and Nd isotope geochemistry of Hercynian granitic rocks from the Western Carpathians-Implications for granite genesis and crustal evolution. *Geologica Carpathica* **50/6** 477–487.
- KOLODNY, Y., LUZ, B. & NAVON, O. (1983): Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, I. Fish bone apatite rechecking the rules of the game. *Earth and Planetary Science Letters* **64/3** 398–404.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90100-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90100-0)
- KÖHLER, K. (2020): Balatonlelle-Rádpusztá 67/5. lelőhely embertani leleteinek vizsgálati eredményei In: BONDÁR, M., ed., Késő rézkori temetkezések Balatonlelléről (Somogy megye): *A Kaposvári Rippl-Rónai Múzeum Közleményei* **7** 89–108.
<https://doi.org/10.26080/KRRMKOZL.2020.7.89>
- KUSAKA, S., SAITO, T., ISHIMARU, E. & YAMADA Y. (2022): Strontium isotope analysis on human skeletal remains from the Hobi and Ikawazu shell-mounds in Aichi Prefecture, Japan. *Anthropological Science* **130/1** 23–32.
<https://doi.org/10.1537/ase.2202191>
- LAHTINEN, M., ARPPE, L. & NOWELL, G. (2021): Source of strontium in archaeological mobility studies-marine diet contribution to the isotopic composition. *Archaeological and Anthropological Sciences* **13** 1.
<https://doi.org/10.1007/s12520-020-01240-w>
- LEE-THORP, J.A. & VAN DER MERWE, N.J. (1991): Aspects of the chemistry of modern and fossil biological apatites. *Journal of Archaeological Science* **18/3** 343–354.
[https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90070-6f](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90070-6f)
- LEGEROS, R.Z. (1981): Apatites in biological systems. *Progress in Crystal Growth and Characterization* **4/1-2** 1–45.
[https://doi.org/10.1016/0146-3535\(81\)90046-0](https://doi.org/10.1016/0146-3535(81)90046-0)
- LEGGETT, S., ROSE, A., PRAET, E. & LE ROUX, P. (2021): Multi-tissue and multi-isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) data for early medieval human and animal palaeoecology. *Ecology* **102/6** e03349.
<https://doi.org/10.1002/ecy.3349>
- LIGHTFOOT, E. & O'CONNELL, T.C. (2016): On the use of biomineral oxygen isotope data to identify human migrants in the archaeological record: Intra-sample variation, statistical methods and geographical considerations. *PLoS ONE* **11/4** e0153850.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153850>
- LONGINELLI, A. (1984): Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: A new tool for palaeohydrological and palaeoclimatological research? *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48/2** 385–390.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90259-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90259-X)
- LUZ, B. & KOLODNY, Y. (1985): Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, IV. Mammal teeth and bones. *Earth and Planetary Science Letters* **75/1** 29–36.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90047-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90047-0)
- MADGWICK, R., LAMB, A.L., SLOANE, H., NEDERBRAGT, A.J., ALBARELLA, U., PEARSON, M.P. & EVANS, J.A. (2019): Multi-isotope analysis reveals that feasts in the Stonehenge environs and across Wessex drew people and animals from throughout Britain. *Science Advances* **5/3** eaau6078.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aau6078>
- MADGWICK, R., LAMB, A., SLOANE, H., NEDERBRAGT, A., ALBERALLA, U., PEARSON, M.P. & EVANS, J. (2021): A veritable confusion: use and abuse of isotope analysis in archaeology. *Archaeological Journal* **178/2** 361–385.
<https://doi.org/10.1080/00665983.2021.1911099>
- MARIE, P., J. AMMANN, P., BOIVIN, G. & REY, C. (2001): Mechanisms of Action and Therapeutic Potential of Strontium in Bone. *Calcified Tissue International* **69/3** 121–129.
<https://doi.org/10.1007/s002230010055>
- MATTAUCH, J. (1937): Das Paar Rb^{87} - Sr^{87} und die Isobaren-regel. *Naturwissenschaften* **25** 189–191.
- MCKINNEY, C.R., MCCREA, J.M., EPSTEIN, S., ALLEN, H.A. & UREY, H.C. (1950): Improvements in Mass Spectrometers for the Measurement

of Small Differences in Isotope Abundance Ratios. *The Review of Scientific Instruments* **21/8** 724–730.
<https://doi.org/10.1063/1.1745698>

MIHÁCZI-PÁLFI, A. (2019): A balatonlellei késő rézkori karperec mikroszkópos vizsgálata. In: BONDÁR, M., ed., *A késő rézkori fémművesség magyarországi emlékei*. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 183–188.
<http://real.mtak.hu/id/eprint/102749>

MILLER, A.R.V., JOHNSON, J.A., MAKHOR-TYKH, S., LITVINOVA, L., TAYLOR, T., ROLLE, R. & MAKAREWICZ, C.A. (2019): Mobility and diet in the Iron Age Pontic forest-steppe: A multi-isotopic study of urban populations at Bel'sk. *Archaeometry* **61/6** 1399–1416.
<https://doi.org/10.1111/arcm.12493>

MOOK, W.G. (2001): Environmental isotopes in the hydrological cycle. *Principles and Applications III* Surface water. UNESCO, Paris, p. 71.

MÜLLER, W., FRICKE, H., HALLIDAY, A.N., MCCULLOCH, M.T. & WARTH, J.A. (2003): Origin and Migration of the Alpine Iceman. *Science* **302/5646** 862–866.
<https://doi.org/10.1126/science.1089837>

NAGAVCIUC, V., PERȘOIU, A., BĂDĂLUȚĂ, C. A., BOGDEVICH, O., BĂNICĂ, S., BÎRSAN, M.V., BOENGIU, S., ONACA, A. & IONITA, M. (2022): Defining a Precipitation Stable Isotope Framework in the Wider Carpathian Region. *Water* **14/16** 2547.
<https://doi.org/10.3390/w14162547>

NAVA, A. (2024): Understanding the maternal-infant nexus from dental histology and high-resolution compositional biogeochemistry: implications for bioarchaeological research. *Bulletins et mémoires de la société d'anthropologie de Paris* **36/1** 10–21.
<https://doi.org/10.4000/bmsap.13828>

NÉGREL, P., GUERROT, C., PETELET-GIRAUD, E. & MILLOT, R. (2015): Reinforcing the origin of volcanic rocks from the Massif Central through the isotopic composition of lead and strontium. *Journal of Geochemical Exploration* **153** 79–87.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.03.005>

NIER, A.O. (1950): A Redetermination of the Relative Abundances of the Isotopes of Carbon, Nitrogen, Oxygen, Argon and Potassium. *Physical Review* **77/6** 789–793.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.77.789>

NIKEZIĆ, M., PERȘOIU, A., FEHER, R., POPA, I. & ZULIANI, T. (2024): Geochemical fingerprinting of Norway spruce from the Eastern Carpathians: Sr isotopic and multi-elemental signatures. *Science of the Total Environment* **954** 176244.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176244>

NOCHE-DOWDY, L. (2015): Multi-isotope analysis to reconstruct dietary and migration patterns of an avar population from Sajópetri, Hungary, AD 568–895. *Közletlen szakdolgozat*, Department of Anthropology, College of Arts and Sciences, University of South Florida. Tampa (Florida), 137 p.

ONDREJKA, M., UHER, P., PUTIŠ, M., KOHÚT, M., BROSKA, I., LARIONOV, A., BOJAR, A. V. & SOBOCKÝ, T. (2021): Permian A-type granites of the Western Carpathians and Transdanubian regions: products of the Pangea supercontinent breakup. *International Journal of Earth Sciences* **110/6** 2133–2155.
<https://doi.org/10.1007/s00531-021-02064-2>

OROSS, K., JAKUCS, J., SOMOGYI, K., RÁCZ, P., KÖHLER, K. & BONDÁR, M. (2023): A Baden-komplexum síregyütteseinek abszolút kormeghatározása a Kárpát-medence nyugati területein. In: BONDÁR, M., szerk., *Késő rézkori temetkezések régészeti és bioarcheológiai elemzése*. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 492–553.
https://doi.org/10.62150/BM.KRT.2023_12

PAAR, D., MANCE, D., STROJ, A. & PAVIĆ, M. (2019): Northern Velebit (Croatia) karst hydrological system: results of preliminary ²H and ¹⁸O stable isotope study. *Geologia Croatica* **72/3** 205–213.
<https://doi.org/10.4154/gc.2019.15>

PÁSZTOR, E., SZILÁGYI, V., GERBER, D., GÉMES, A., HAJDU, T., HAJDUNÉ DARABOS, G., HELTAI, B., HORVÁTH, A. ILLÉS, L., KÁROLY, I., KOVÁCS, Z., KULCSÁR, G., MAJOR, I., MERKL, M., R., SÁNDORNÉ KOVÁCS, J., SIPOS, E., SÜMEGI, P., SZAKMÁNY GY., SZÉCSÉNYI-NAGY, A., SZOLDÁN, ZS., T. BIRÓ, K & KISS, V. (2024): Archeometriai vizsgálatok a Sükösd-Árpád-Dűlői bronzkori temetőből – Előzetes eredmények. Archaeometric Investigations of the Bronze Age Cemetery at Sükösd-Árpád-Dűlő – Preliminary Results. *Archeometriai Műhely*, **XXI/4**, 445–482.
<https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2024-033>

PELLEGRINI, M., JAY, M., PEARSON, M.P. & RICHARDS, M.P. (2016): Tooth enamel oxygen „isoscapes” show a high degree of human mobility in prehistoric Britain. *Scientific Report* **6** 34986.
<https://doi.org/10.1038/srep34986>

PRICE, T.D., FREI, K.M., DOBAT, A.S., LYNNERUP, N. & BENNIKE, P. (2011): Who was in Harold Bluetooth's army? Strontium isotope investigation of the cemetery at the Viking Age fortress at Trelleborg, Denmark. *Antiquity* **85/328** 476–589.
<https://doi.org/10.1017/S0003598X00067880>

PRICE, T.D. & NAUMANN, E. (2015): The Peopling of the North Atlantic: Isotopic Results from

- Norway. *Journal of the North Atlantic* **7** 88–102. <https://doi.org/10.3721/037.002.sp706>
- PRICE, T.D., PEETS, J., ALLMÄE, R., MALDRE, L. & PRICE, N. (2020): Human remains, context, and place of origin for the Salme, Estonia, boat burials. *Journal of Anthropological Archaeology* **58** 101149. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2020.101149>
- REINHOLD, S., EGER, J., BENECKE, N., KNIPPER, C., MARIASCHK, D., HANSEN, S., PICHLER, S.L., GERLING, C., BUZHILOVA, A.P., MISHINA, T.A., KOROBOV, D.S. & BELINSKIY, A.B. (2024): At the onset of settled pastoralism – Implications of archaeozoological and isotope analyses from Bronze age sites in the North Caucasus. *Quaternary International* **700–701** 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2023.05.008>
- ROSSELET-CHRIST, D., GOUDE, G., BESSE, M., HONEGGER, M., KOTTAS, G., GIOS, M. & DESIDERI, J. (2024): First Swiss alpine agropastoral societies: Contribution of isotope analysis to the study of their diet and mobility. *Journal of Archaeological Science: Reports* **57** 104585. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2024.104585>
- ROZANSKI, K., ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. & GONFIANTINI, R. (1993): Isotopic patterns in modern global precipitation. In: SWART, P.K., LOHMANN, K.C., MCKENZIE, J. & SAVIN, S. eds., *Climate Change in Continental Isotopic Records*. American Geophysical Union, USA, 1–36. <https://doi.org/10.1029/GM078p0001>
- RÓZSA, Z. & TUGYA, B. (2012): Kik voltak az első Orosháza lakói? Problémafelvetés egy kutatás kezdetén. *Mozaikok Orosháza és Vidéke Múltjából*, **6** 17–31.
- RÓZSA, Z., BALÁZS, J., CSÁNYI, V. & TUGYA, B. (2014): Árpád-kori muszlim telep és temetője Orosházán. *Magyar Régészet* **3** 1–7.
- SACHSE, C. (2008): Baden Cultural Identities? Late Copper Age Funeral Reviews. In: FURHOLT, M., SZMYT, M. & ZASTAWNY, A., eds., *Baden Complex and the Outside World* [Proceedings of the 12th Annual Meeting of the EAA 2006, Cracow], 49–68.
- SHATAGIN, K., CHERNYSHEV, I., BALLA, Z. & BREZSNYÁNSZKY, K. (2004): Geochronology of Mórággy Granite: Results of U-Pb, Rb-Sr, K-Ar, and 40Ar-39Ar isotope study. *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése* **2004** 41–53.
- SILLEN, A. & KAVANAG, M. (1982): Strontium and Paleodietary Research: A Review. *Yearbook of Physical Anthropology* **25/53** 67–90. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330250505>
- SJÖRGEN, K.-G., PRICE, T.D. & KRISTIENSEN, K. (2016): Diet and Mobility in the Corded Ware of Central Europe. *PLoS ONE* **11/5** e0155083. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155083>
- SOMOGYI, K. (2022): A Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő 2. lelőhelyen feltárt temető bemutatása és értelmezése. In: BONDÁR M. & SOMOGYI, K., eds., *Késő rézkori temető Balatonszentgyörgy határában*. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 11–58.
- STEPHAN, E. (2000): Oxygen isotope analysis of animal bone phosphate: Method refinement, influence of consolidants, and reconstruction of palaeotemperatures for Holocene sites. *Journal of Archaeological Science* **27/6** 523–535. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0480>
- SULLIVAN, H.C. & KRUEGER, H.W. (1981): Carbon isotope analysis of separate chemical phases in modern and fossil bone. *Nature* **292** 333–335. <https://doi.org/10.1038/292333a0>
- SÜMEGI, P. (2022): Késő rézkori temetkezési gyöngyök petrográfiai és archeomalakológiai elemzése Balatonszentgyörgyről In: BONDÁR M. & SOMOGYI, K., eds., *Késő rézkori temető Balatonszentgyörgy határában*. Budapest: Archeolingua Alapítvány, 269–280.
- SZABÓ, L. (2003): Megjegyzések a Böszörmények Kérdéséhez a Hajdúböszörmény Határában talált Árpád-kori falu régészeti leletei alapján. *A Debreceni Déri Múzeum Évkönyve* **2002–2003**. Debrecen: Hajdú-Bihar Megyei Múzeumok Igazgatósága, 73–108.
- TERZER, S., WASSENAAR, L.I., ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.J. & AGGARWAL, P.K. (2013): Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: Improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences* **17/11** 4713–4728. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4713-2013>
- TERZER-WASSMUTH, S., WASSENAAR, L.I., WELKER, J.M. & ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.A. (2021): Improved High-Resolution Global and Regionalized Isoscapes of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and d-excess in Precipitation. *Hydrological Processes* **35/6** e14254. <https://doi.org/10.1002/hyp.14254>
- UREY, H.C. (1948): Oxygen Isotopes in Nature and in the Laboratory. *Science, New Series*, **108/2810** 489–496. <https://doi.org/10.1126/science.108.2810.489>
- VIDA, T., ALT, K.W., KNIPPER, C., SKRIBA, P., WINGER, D. & FREEDEN, Von U. (2017): Tudományágak együttműködése a szőládi langobard kori temető kutatásában. *Magyar Régészet* **2017 Tél** 1–17.

WALL, J.A., CAPO, R.C., STEWART, B.W., PHAN, T.T., JAIN, J.C., HAKALA, J.A. & GUTHRIE, G.D. (2013): High throughput method for Sr extraction from variable matrix waters and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope analysis by MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **28** 1338–1344. <https://doi.org/10.1039/C3JA30350K>

WHITE, C.D., SPENCE, M.W., STUART-WILLIAMS, H.L.Q. & SCHWARCZ, P. (1998): Oxygen Isotopes and the Identification of Geographical Origins: The Valley of Oaxaca versus the Valley of Mexico. *Journal of Archaeological Science* **25/7** 643–655. <https://doi.org/10.1006/jasc.1997.0259>

WRIGHT, L.E. & SCHWARCZ, H.P. (1998): Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel: Identifying breastfeeding and weaning in prehistory. *American Journal of Physical Anthropology* **106/1** 1–18.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199805\)106:1<::AID-AJPA1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199805)106:1<::AID-AJPA1>3.0.CO;2-W)

ZAZZO, A., LÉCUYER, C. & MARIOTTI, A. (2004): Experimentally-controlled carbon and oxygen isotope exchange between bioapatites and water under inorganic and microbially-mediated conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68/1** 1–12.

[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00278-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00278-3)

CHEMICAL AND MINERALOGICAL ANALYSIS OF TENAX USED AS A METALWORKING AUXILIARY MATERIAL IN ARTEFACTS FROM THE EARLY AVAR-PERIOD CEMETERY OF MAKÓ–MIKÓCSA-HALOM

ÖTVÖSTECHNIKAI SEGÉDANYAGOK (TENAX) KÉMIAI ÉS ÁSVÁNYTANI ÖSSZETÉTEL VIZSGÁLATA A MAKÓ–MIKÓCSA HALOMI KORA AVAR KORI TEMETŐBŐL*

GULYÁS, Sándor¹; BALOGH, Csilla² & FINTOR, Krisztián^{1,3}

¹University of Szeged, Department of Geology, Szeged, Hungary

²Istanbul Medeniyet University, Department of Art History, Istanbul. Turkey

³University of Pécs, Department of Biophysics, Pécs, Hungary

E-mail: gulyas.sandor@szte.hu, csigonc@gmail.com

csillabal@gmail.com; efkrisz@gmail.com

Abstract

In this study, we present the composition of tenax used as an adhesive and as a reinforcing or filling material, identified on two unique artefacts recovered from the Early Avar-period cemetery of Makó–Mikócsa-halom: a circular pendant forming part of a necklace and a belt mount. Based on our findings the main organic component was wax, similarly that recorded in the literature. The inorganic phase was somewhat different coming from sand (quartz, muscovite) and Mg-bearing calcite.

Kivonat

Ebben a tanulmányban a Makó–Mikócsa-halom kora avar kori temetőből előkerült leletek közül származó két egyedi tárgy, egy nyakék részét képező kerek csüngőből és egy övveretből származó, ragasztó és szilárdító vagy töltőanyagként használt tenax összetételéről számolunk be. Eredményeink alapján a fő szerves komponens a szakirodalomban rögzítetthez hasonlóan a viasz volt. A szervetlen fázis némileg eltérő volt, amely homokból (kvarc, muszkovit) és Mg-tartalmú kalcitból származott.

KEYWORDS: TENAX, CHEMICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION, EARLY AVAR AGE

KULCSSZAVAK: TENAX, KÉMIAI ÉS ÁSVÁNYOS ÖSSZETÉTEL, KORA AVAR KOR

Introduction

The design of the form and ornamentation of each individual piece of jewellery and dress accessories are primarily guided by artistic intent (Horváth, 2008, 2013; Riegl, 1989), regardless of the raw materials and the production technology. However, to gain a more detailed understanding of the methods, techniques, tools and circumstances of the objects' production, it is necessary to know the composition, geological deposits and value of the raw materials used, in addition to the typological analysis of the objects.

The pressing technique of Byzantine origin, employed in metalworking, became widespread in the Avar-period material of the Carpathian Basin (second half of the 6th century–early 9th century CE) from around the turn of the 6th and 7th centuries onward, and remained a dominant manufacturing technology until the end of the 7th century. The overwhelming majority of belt and horse-harness fittings, as well as jewellery, were produced using this technique.

* How to cite this paper: GULYÁS, S.; BALOGH, Cs. & FINTOR, K., (2026): Chemical and mineralogical analysis of tenax used as a metalworking auxiliary material in artefacts from the Early Avar-period cemetery of Makó–Mikócsa-halom, *Archeometriai Műhely* XXIII/1 25–36.

doi: [10.55023/issn.1786-271X.2026-002](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2026-002)

Our understanding of their manufacture is primarily based on the known goldsmiths' graves and assemblages containing metalworking tools (Fettich 1926; Csallány 1933; Balogh 2004, 266–267; Rác 2014; Ny. Kovacsóczy et al. 2022, etc.). Alongside the tools and pressing dies employed in production, however, the raw materials and the so-called auxiliary materials used in the manufacture of these objects may also provide important information regarding the technologies applied within the workshops, as well as the connections maintained between different workshops. One of the most used auxiliary materials in the Migration Period was putty or tenax, which was used to consolidate or fill in the settings. According to the literature, it was in use from antiquity (Hawthorne & Smith 1963; Brepohl 1987; Presbyter, 1986; Borbíró, 1996; Ogden 1982). It appears from the Hunnic period (5th century AD) and by the Merovingian period, dating from the first half of the 6th century, its use had become common practice (Horváth 2008, 2013; Horváth et al. 2024). It was also a popular filler material in the Avar period, used for stone and glass enclosures and as a filler and stiffener between metal sheets (Heinrich-Tamáška 2016). In the 12th century, Theophilus Presbyter, in his work on various works of art, mentioned a material called tenax. He suggested the use of tenax as a filling and stiffening agent for decorating thin-walled metal objects such as gold or silver cups and bowls. He described exactly the composition of the material and the technique for making it: „Grind a piece of brick or tile very small and melt some pitch in an earthenware dish and add a little wax. When these are both melted, mix in the powdered tile and stir it vigorously and pour it out into water. When it begins to grow cold, dip both your hands into the water and knead it for a long time until you can stretch the composition and draw it out like a skin.” (Hawthorne & Smith 1963, 129–130; Brepohl 1987). However, the composition of the tenax, consisting of crushed minerals and added organic binders, may have differed from age to age and workshop to workshop from what Presbyter describes. A reliable qualitative and semi-quantitative assessment of the compositional differences requires additional chemical analytical analysis of the putty mass beyond macroscopic and microscopic examination.

However, the composition of the Avar Age tenax was markedly different from that described by Presbyter, based on the results of a complex chemical analysis of the putty material of Avar potsherds available in the literature. X-ray diffraction analysis was generally used to measure the inorganic components, while infrared spectroscopic analysis was used to determine the organic components in the analysis of samples from Hungary from the 5th to the 8th centuries AD

(Arrhenius 1984, 1985; Daim 2002; Heinrich-Tamáška, 2006, 2016; Horváth et al. 2009, 2024).

The results of one of the most detailed chemical composition studies of the Avar filling masses can be found in Heinrich-Tamáška (2006). Based on individual sample analyses, the main organic component of the tenax was wax in most cases. The FTIR measurements were able to confirm the use of beeswax. Apart from wax the use of gypsum, quartz and lime was also common (Heinrich-Tamáška 2006, 2016; Arrhenius, 1985; Horváth et al. 2009). Beeswax was also used as a filler in a Keszthely-Dobogó disc fibula, according to Daim (2002). Birgit Arrhenius (1985) also recorded the use of wax in samples from Hungarian finds from the 5th and 6th centuries. Although at the present stage of research it is not possible to draw far-reaching conclusions about the use of tenaxes of different compositions, the continuity of the use of wax in the Carpathian Basin is already apparent (Heinrich-Tamáška 2006, 2016; Arrhenius, 1984, 1985; Horváth et al. 2009, 2024). For cloisonné goldsmith works the use of filling and firming substance called tenax composed of pulverized minerals and an organic binder was also common in the 5–6th centuries AD (Horváth et al. 2009). The tenax from the gold coated bronze pressed rosette of a horse-harness fitting from the cemetery of Komárom-Hajógyár dated to the last third of the 7th century AD was composed of wax mixed with millet seeds (Trugly 2008). In many cases, the finds include lead-containing paste e.g., from the Late Avar period at Zamárdi (Bárdos & Garam 2009), porous materials such as asphalt and clay (Kassa-Zsebes, Budinský-Krička & Točík 1984) and some kind of silicate-based tenax mixture (Pitvaros-Víztaózó, Bende 1998).

In this work we aim to show the results of chemical compositional analyses of Early Avar Age tenax recovered from two finds of the cemetery of Makó–Mikócsa-halom.

A brief overview of the archaeological material

In 2009–2010, 251 graves belonging to an Avar-period cemetery were excavated near Makó in south-eastern Hungary (Fig. 1). The cemetery may be regarded as fully excavated, and according to the preliminary analyses, its period of use can most likely be dated from the end of the 6th century to the middle of the 7th century AD (Balogh 2017; Balogh 2020).

Grave 33 was situated in the central part of the cemetery and contained the burial of a woman who died between approximately 23 and 35 years of age.

The grave assemblage included a partial skeleton of a 3.5-year-old cow, a partial skeleton of a newborn calf, a partial skeleton of an approximately 12-year-

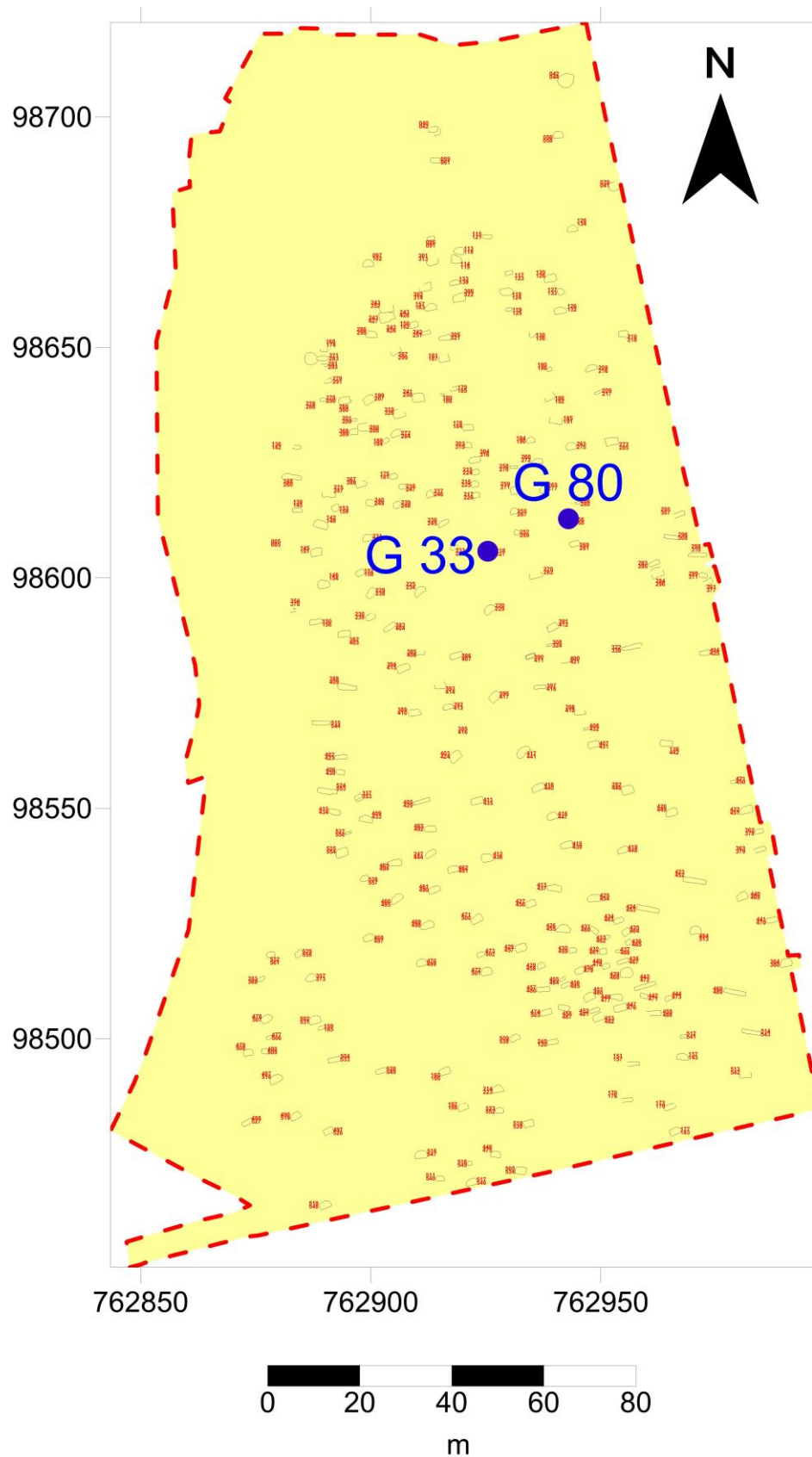


Fig. 1.: General plan of the Early Avar-period cemetery of Makó–Mikócsa-halom with the mentioned graves marked

1. ábra: A Makó–Mikócsa-halomi kora avar kori temető összesítő térképe az említett sírokkal



Fig. 2.: Deszk-type necklace with sheet-metal pendants from Grave 33

2. ábra: A 33. sír Deszk-típusú lemezcsüngős nyakéke

old sheep, as well as five additional cattle limbs. Among the grave goods were a pair of bronze earrings with large globular sheet-metal pendants, a necklace composed of colored beads, a Byzantine gold cross (Balogh 2018; Gulyás et al. 2018), a cast bronze bracelet with funnel-shaped terminals, an iron buckle, a spindle whorl, and an iron awl. From the chest area of the deceased, a remarkable necklace was recovered (Balogh 2018, 25).

The necklace was composed of three circular pendants – one larger and two smaller examples – combined with thin bronze tubes (Figs. 2–3). All three discs were manufactured using the same technique. Their back plates were cut from thick bronze sheet, while the front plates consisted of gilded silver sheet decorated with pressed concentric motifs. An oval aperture was created at the center of each front plate, into which a convex pale-green glass inlay was inserted from behind.



Fig. 3.: Reconstruction of the manner of wearing the necklace (Balogh 2019)

3. ábra: A nyakék viseleti rekonstrukciója (Balogh 2019)

The suspension loops and the pendant ornaments attached to the lower edges of the discs were soldered onto the back plates. Tenax adhesive was employed both for fixing the glass inlays to the back plates and for joining the two plates together along their edges. Inv. No.: Móra Ferenc Museum, 2012.9.249.

Similar necklaces with sheet-metal pendants occur in the archaeological material of the Avar Khaganate exclusively in the Transisza region, within cemeteries situated along the Maros River, more precisely in the vicinity of Makó and Deszk. Parallels are known from Grave 31 of the Deszk-G cemetery and Grave 5 of the Deszk-L cemetery (Garam 2001, Taf. 16.4; Taf. 17.1–2), while an additional unpublished example derives from Grave 214 of the Makó–Mikócsa-halom cemetery. A similar pressed disc with two crescent-shaped pendant ornaments was strung onto a necklace composed of coloured beads in Grave 16 of the Deszk H cemetery (Garam 2001, Taf. 16.4). It cannot be determined with certainty whether the fragmentary circular pendant recovered from Grave 60 at Mokrin–Vodoplav důl likewise belonged to a necklace composed of tubes and discs similar to

the examples discussed above, or whether it originally functioned as an isolated circular pendant (Ranisavlev 2007, T. XXI. 60:7)

These necklaces imitate Late Antique necklaces with circular medallion pendants and were produced after their prototypes. Their geographically concentrated distribution, together with their high degree of similarity, suggests that they may have been manufactured by a local goldsmith active in this region, in the vicinity of the Maros River (Balogh 2019).

On the basis of the findspots of the first known examples, these ornaments — designated in the scholarship as “Deszk-type” necklaces — can most likely be dated to the end of the 6th century and the opening decades of the 7th century (Balogh 2018).

Grave 80 was excavated at the eastern edge of the same cemetery. A set of silver mounts (**Fig. 4.**) exceptional within the archaeological material of the Avar Khaganate was recovered from the grave. The grave contained the burial of a man who died between 35 and 39 years of age; beside him were placed a 12–14-year-old horse with harness equipment and three partial sheep skeletons. The deceased was interred with a bow, sword, and quiver, while the silver mounts decorated his belt.

The belt set comprised an iron buckle, three shield-shaped and three double shield-shaped mounts, one shield-shaped mount of differing form, five small strap-ends, and one large strap-end. Loop attachments were soldered to the reverse sides of the shield-shaped and double shield-shaped mounts, perpendicular to the longitudinal axis of the fittings. The reverse sides were then filled with tenax adhesive, which reinforced the thin and fragile mounts. The tenax from one of the shield-shaped mounts was subjected to analysis. Inv. No.: Móra Ferenc Museum, 2012.9.638.

The only known parallel within the Carpathian Basin for the shield-shaped and double shield-shaped mounts of this belt set is the fragmentary fitting from Grave 211 at Csákberény–Orondpuszta (László 2015, Taf. 18. 211:1). Outside the Carpathian Basin, close analogies are known from Graves 90 and 119 of the Castel Trosino Longobard cemeteries in northern Italy (Paroli & Ricci 2007, T. 67. 12a–g, T. 100. 30b–l). As in the case of the Makó mounts, loop attachments were soldered onto their reverse sides; however, no tenax is visible within the Italian examples (cf. Paroli & Ricci 2007, T. 152.h–d).

In the case of pressed belt mounts from the Avar Khaganate, fastening was most commonly achieved



Fig. 4: Belt fitting from Grave 80

4. ábra: A 80. sír övveretei

either by rivets or by loop attachments fixed into the tenax filling. The soldered loop attachment employed on the Makó mounts, by contrast, represents a characteristic technical solution of Byzantine–Mediterranean metal fittings. On the basis of this feature, as well as the North Italian analogies of the mounts, we assume that these objects were not produced within the Carpathian Basin but rather constitute Italo-Byzantine products.

According to the radiocarbon date obtained from the anthropological material, Grave 80 at Makó was most likely constructed during the first half of the 7th century.

Taking into consideration both the age of the deceased and the nearly unused condition of the mounts, the fittings themselves were probably manufactured during the opening decades of the 7th century CE.

Material and methods

Sampling was made from the bottom of the sheets of the clasp and the belt fitting. Raman confocal spectrometry was used for the determination of the mineralogical structure of the inorganic components. A Thermo Fisher Scientific DXR confocal Raman spectrometer with an Olympus BX41 microscope using 50X objective lens (NA: 0.75) and Peltier cooling CCD detector was used to obtain the Raman spectra. The measurements were performed using a 532 nm wavelength Nd-YAG solid state laser and a 900 lines/mm optical grating, with a spectral resolution of 3–4 cm^{-1} . The confocal aperture was set to a 50 μm slit, and the laser power was varied between 1 and 5 mW to avoid photodegradation.

X-ray powder diffraction analysis (XRD) was used for determining the mineralogical composition of the samples besides crystalline or amorphous structure. The sample under study was ground in an agate mortar and pestle. The instrument used was a Shimadzu XRD-6000 X-ray diffractometer using a Cu X-ray tube (I: 1.5405 Å) with 40 kV, 30 mA Cu $K\alpha$ radiation. Scanning was carried out for 2θ in the range 0–75°.

Results

Figs. 5 and 6 display the Raman spectra of two tenax samples from the cemetery of Makó–Mikócsa-halom. The first four distinct bands in the wavenumber region of 100 and 1100 cm^{-1} are associated with the carbonate ion (Gunasekaran et al. 2006). These are the ν_1 symmetric stretching vibration (1087 cm^{-1}); the ν_4 symmetric deformation vibration (712 cm^{-1}) and two translational vibrations (277 and 150 cm^{-1}), which are specific to the carbonate lattice of CaCO_3 (Gunasekaran et al. 2006). In each of the curves of the spectral series these spectral bands appear with higher intensities, demonstrating that a part of the samples is most certainly composed of the trigonal crystalline mineral calcium carbonate, i.e. calcite (inorganic component).

However, a much larger number of peaks appeared in the spectra in a visually obvious way. These can be divided into two distinct groups. On the one hand, there is a series of peaks belonging to an

amorphous, carbonized component (Corg). These are very broad, poorly defined peaks (~1587 and 1372 cm^{-1}) and must probably represent the charcoal pieces seen on the microscopic views of **Fig. 5b** (Ferrari 2007). At the same time, another series of peaks belonging to the organic phase also appeared in the spectra. In both samples tested, shown in the **Figs. 5 and 6**, this organic component was “enriched”, providing us with the possibility of identification. Based on literature analogies, we may assume the component to be wax, most likely beeswax (Edwards et al. 1996). FTIR measurements would be needed to confirm the presence of beeswax. The different vibrations we identified are summarized in **Table 1**. The vibration at 1127 cm^{-1} was a superposition of two vibrations.

Figs. 7–9 represent the x-ray diffractograms of the studied samples. **Fig. 7** has quartz and beta-cristobalite and Mg-bearing calcite as the main components. **Fig. 8** hints at the presence of quartz and muscovite. **Fig. 9** shows the diffractogram of Mg-bearing calcite. Based on our results the main organic component was beeswax in addition to charcoal in both samples. The major mineral components are sand (quartz, muscovite) and carbonate (Mg-bearing calcite). The presence of beta-cristobalite is also notable.

Summary of the results

Based on our findings, the organic composition of the filling material tenax is similar to that described in the literature (Horváth et al. 2024; Heinrich-Tamácska 2016). The major organic components are wax, most likely beeswax and flue ash. The confirmation of beeswax requires FTIR measurements. Charcoal-bearing backing paste is known from the literature as well (Horváth et al. 2024). The main inorganic components are sand (quartz, muscovite), Mg-bearing calcite. The latter appears in the soda lakes of the Danube-Tisza Interfluve (Molnár & Molnár-Murvai 1975; Molnár et al. 2014). The presence of beta-cristobalite in the samples point to the presence of potential volcanic glass production residues which might have been transported to the site after weathering and long-distance fluvial transportation of the sediment (Kristály & Török 2020).

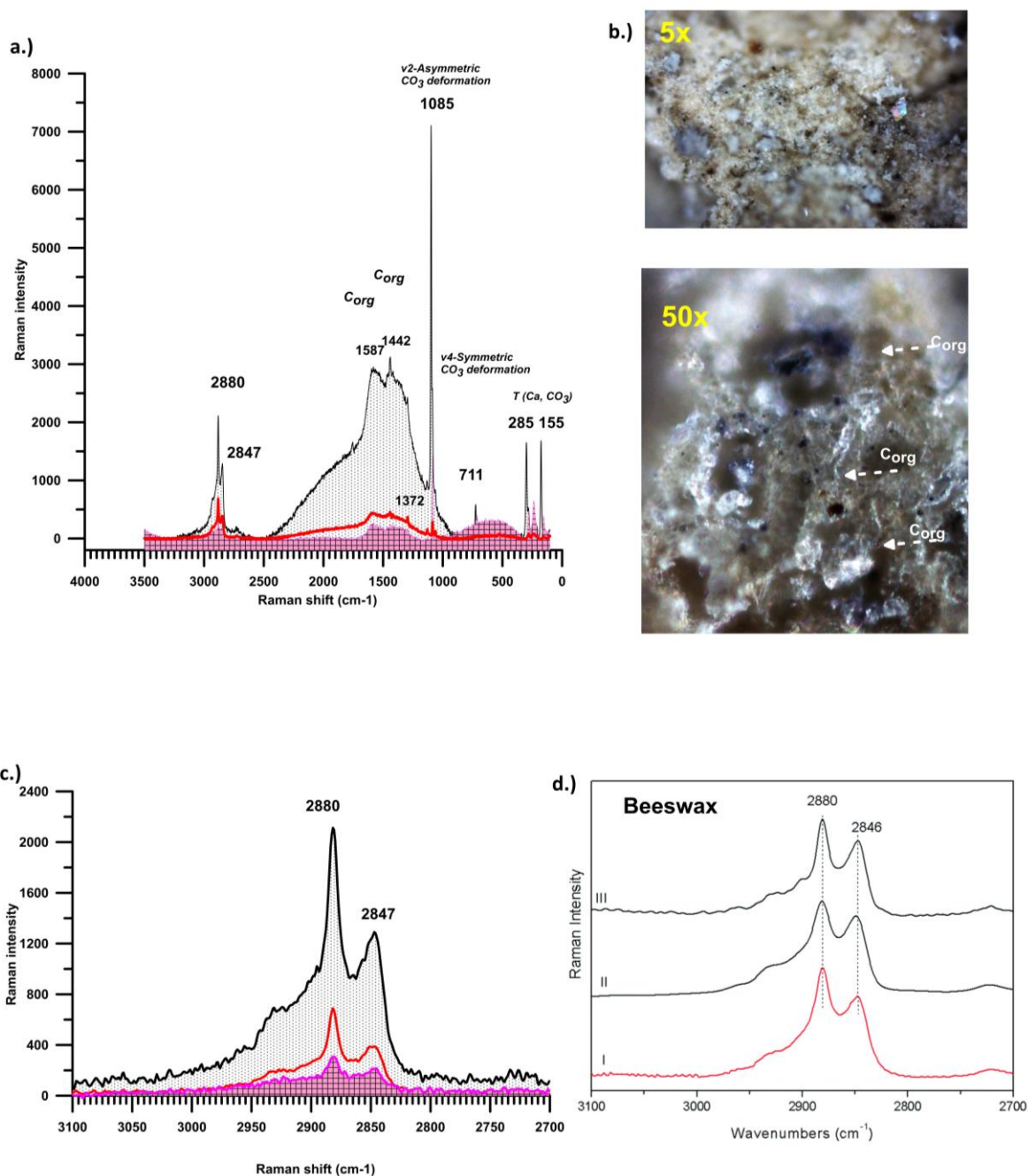


Fig. 5.: Raman spectra of the tenax recovered from the shield-shaped mount of Grave 80: **a.)** full spectrum, **b.)** microscopic view of the tenax, **c.)** area between 2700 and 3100 cm^{-1} wavenumbers enlarged giving signal of organic component wax **d.)** the spectrum of beeswax for reference.

5. ábra: A 80. sír pajsz alakú veretéből származó tenax Raman spektrumai: **a.)** teljes spektrum, **b.)** a tenax mikroszkópi képe, **c.)** a 2700 és 3100 cm^{-1} közötti rész kinagyítva a viaszra jellemző csúcsokkal **d.)** a méhviasz referencia spektruma.

Table 1.: Characteristic wavenumbers of the wax

1. táblázat: A viasz karakterisztikus csúcsai

Wavenumbers (cm^{-1})	$\nu(\text{CH}_2)$ asymmetric	$\nu(\text{CH}_2)$ symmetric	$\nu(\text{CH}_3\text{CH}_2)$	$\delta(\text{CH}_2)$	$\delta(\text{CH}_2)_2$	$\nu(\text{COC})$	$\nu(\text{CC})$ asymmetric	$\nu(\text{CC})$ symmetric
	2881	2847	2727	1435	1291	1127	1127	1060

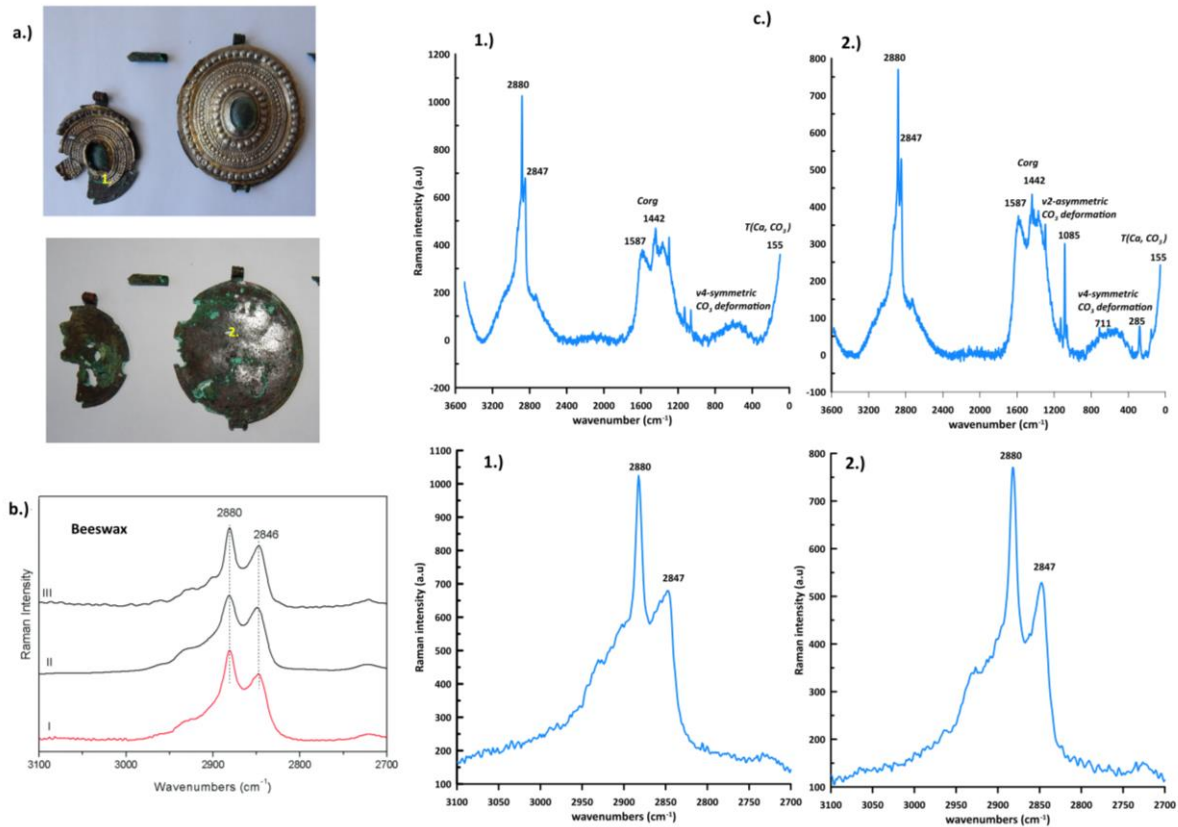


Fig. 6.: Raman spectra of the tenax recovered from the disc ornaments of the Deszk-type necklace from Grave 33: a. sampling points, b. full spectrum, b. the spectrum of beeswax for reference, c. full spectra and area between 2700 and 3100 cm^{-1} wavenumbers enlarged giving signal of organic component wax, most likely beeswax.

6. ábra: A 33. sír Deszk-típusú nyakéke korongdíszének tenaxának Raman spektruma: a mintázott boglárók a mintavételi helyekkel, b. a referéncia méhviasz spektruma, c. a teljes és a 2700 és 3100 cm^{-1} közötti spektrum nagyítva kiadja a viasz, valószínűleg a méhviasz csúcsait.

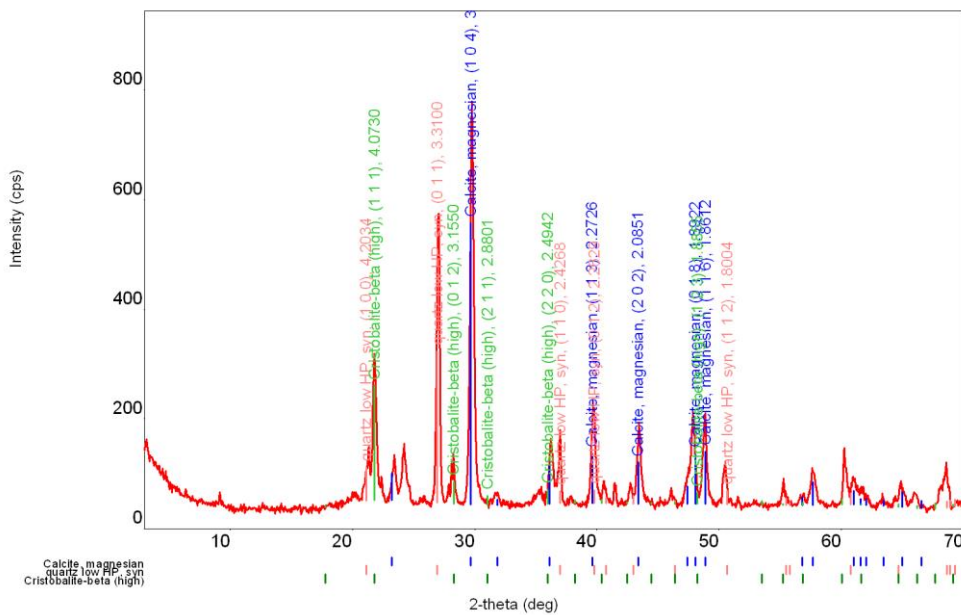


Fig. 7.: XRD diffractogram of tenax of sample G33

7. ábra: A G33 minta tenaxának XRD diffraktogramja

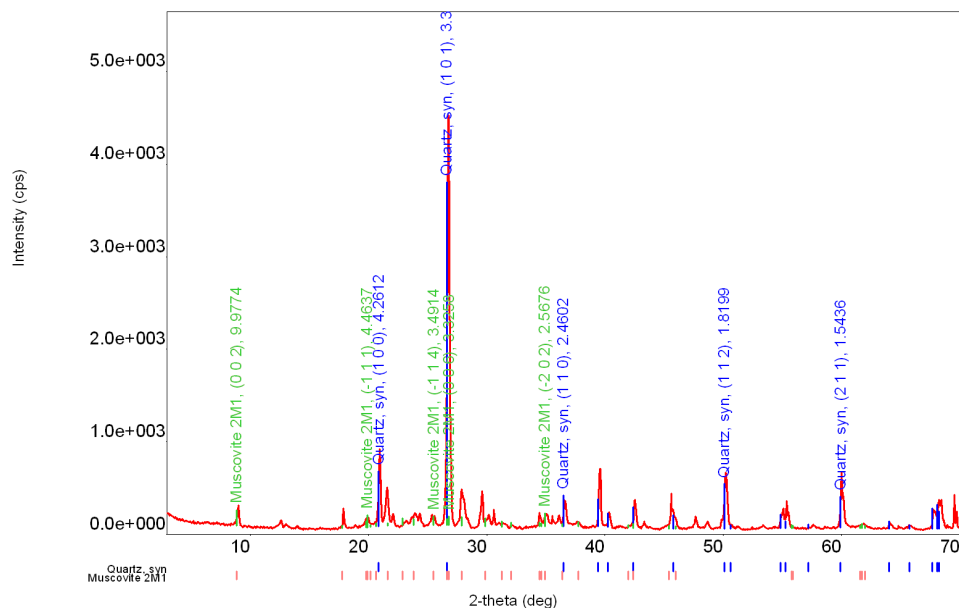


Fig. 8.: XRD diffractogram of tenax of sample G80

8. ábra: A G80-as minta tenaxának XRD diffraktogramja

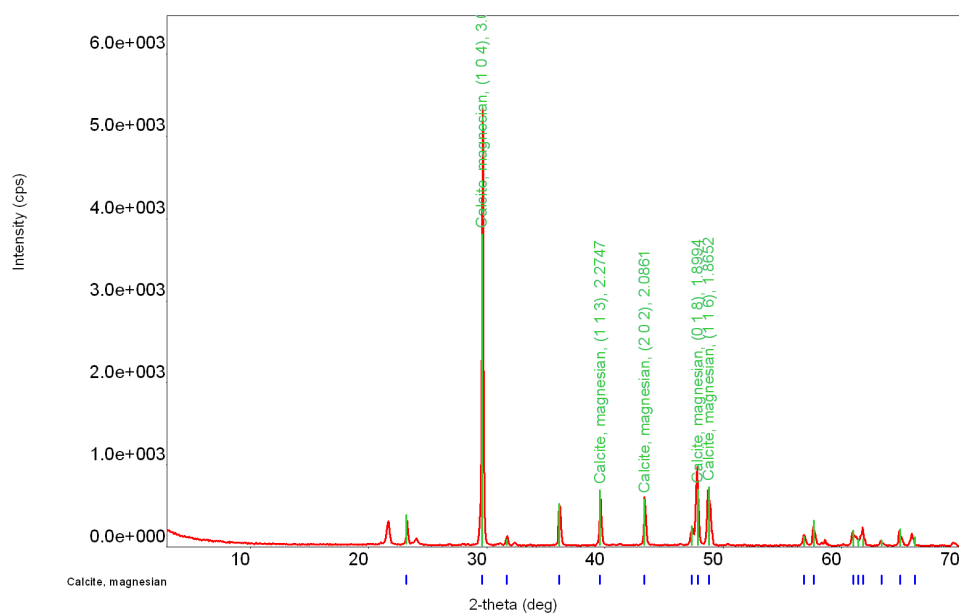


Fig. 9.: XRD diffractogram of tenax of sample G80

9. ábra: A G80-as minta tenaxának XRD diffraktogramja

Contribution of authors

Gulyás Sándor Conceptualization, Interpretation, XRD analysis, Writing – Original draft, Review & Editing. **Balogh Csilla** Material provision, Archaeological description, Circumstances of discovery, Archaeological and historical data, Dating, Editing. **Fintor Krisztián** Raman spectroscopy.

Acknowledgements

This work has been carried out as part of the Terra Tempus Research Group, University of Szeged. Support from OTKA Grant K109510 is acknowledged.

References

ARRHENIUS, B. (1984): Cloisonné-Technik. *Reallexikon der Germanischen Altertumskunde* V:32–33 604–618.

- ARRHENIUS, B. (1985): *Merovingian Garnet Jewellery. Emergence and Social implications*. Stockholm, Kungl. Vitterhets Historie Och Antikvitets Akademien, 229 p.
- BALOGH, Cs. (2004): Martinovka-típusú övgarnitúra Kecelről. A Kárpát-medencei maszkos veretek tipokronológiája (Gürtelgarnitur des Typs Martinovka von Kecel. Die Typochronologie der Maskenbeschläge des Karpatenbeckens). *Studia Archaeologia* **10** 241–303.
- BALOGH, Cs. (2017): Orta Tisa Bölgesi'nde Doğu Avrupa Bozkır Kökenli Göçebe Bir Topluluğa Ait Mezarlık (Makó, Mikócsa-halom, Macaristan) (A Cemetery Belonging to an Nomad Community of Eastern Europe Steppe Origin in the Middle Tisza Region [Makó, Mikócsa-halom, Hungary]). *Art – Sanat* **7** 53–70.
- BALOGH, Cs. (2018): A Byzantine Gold Cross in an Avar Period Grave from Southeastern Hungary. In: DRAUSCHKE, J., KISLINGER, E., KÜHTREIBER, K., KÜHTREIBER, T., SCHARRER-LIŠKA, G. & VIDA, T., Hrsg., *Lebenswelten zwischen Archäologie und Geschichte. Festschrift für Falko Daim zu seinem 65. Geburtstag. Monographien des Römisch-Germanischen Zentralmuseums* **150**. Mainz 2018, 25–37.
- BALOGH, Cs. (2019): "Asszonyok smukkjai" – 6–7. századi divatékszerek a Dél-Alföldről. In: ILON, G., szerk., *Régészeti nyomozások Magyarországon* **2.0**, Martin Opitz Kiadó, Budapest, 247–260.
- BALOGH, Cs. (2020): Egy Maros-völgyi kora avar kori közösség életmódjáról a régészeti adatok alapján – Makó-Mikócsa-halom. In: TÖRŐCSIK, T., GULYÁS, S., MOLNÁR, D. & NÁFRÁDI, K., szerk., *Környezettörténet. Tanulmányok Sümei Pál professzor 60 éves születésnapjára*. Geolitera Kiadó, Szeged, 129–142.
- BÁRDOS, E. & GARAM, É. (2009): Das awarenzeitliche Gräberfeld in Zamárdi-Rétiföldek. *Monumenta Avarorum Archaeologica* **9**. Magyar Nemzeti Múzeum, Budapest, 491 p.
- BENDE L. (1998): A pitvarosi késő avar kori temető 51. sírja (Das Grab 51 im spätawarenzeitlichen Gräberfeld von Pitvaros). *A Móra Ferenc Múzeum Évkönyve Studia Archaeologica* **4** 195–230.
- BORBÍRÓ, M. (1996): Újabb adatok az avarkori ötvösművességhez. *Múzeumi Kutatások Csongrád-megyében* **1996** 80–84.
- BREPOHL, E. (1987): *Theophilus Presbyter und die Mittelalterliche Goldschmiedekunst*. Leipzig, Böhlau, 311 p.
- BUDINSKÝ-KRIČKA, V. & TOČÍK, A. (1984): Jazdecký hrob 94/1967 z doby avarskej ríše v Košiciach, časť Šebastovce. In: STUDENÍKOVÁ, E. & ZACHAR, L., Zost., *Zborník prác Ludmily Kraskovskej (Das Reitergrab No. 94/1967 aus der Zeit des Awarenreiches in Košice Šebastovce)*. Bratislava, Slovenské Narodne Museum, 172–195.
- CONTI, C., BOTTEON, A., BERTASA, M., COLOMBO, C., REALINI, M. & SALI, D. (2016): Portable Sequentially Shifted Excitation Raman spectroscopy as an innovative tool for in situ chemical interrogation of painted surfaces. *Analyst* **141** 4599–4607.
- CSALLÁNY, D. (1933): *A kunszentmártoni avarkori ötvössír*. Szentés, 133 p.
- DAIM, F. (2002): Pilgeramulette und Frauenschmuck? Zu den Scheibenfibeln der frühen Keszthely-Kultur. *Közlemények Zala-megye múzeumaiból*. **11** 113–132.
- EDWARDS, H.G.M., FARWEL, D.W. & DAFFNER, L. (1996): Fourier-transform Raman spectroscopic study of natural waxes and resins. *Spectrochimica Acta A* **52** 1639–1648.
- FERRARI, A.C. (2007): Raman Spectroscopy of Graphene and Graphite: Disorder, Electron-Phonon Coupling, Doping and Nonadiabatic Effects. *Solid State Communications*, **143** 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>
- FETTICH, N. (1926): *Az avarkori műipar Magyarországon*. Archaeologia Hungarica **1**. Budapest, Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, 1–65.
- GARAM, É. (2001): Funde byzantinischer Herkunft in der Awarenzeit vom Ende des 6. bis zum Ende des 7. Jahrhundert. *Monumenta Avarorum Archaeologica* **5** Budapest, Magyar Nemzeti Múzeum, 391 p.
- GULYÁS, S., BALOGH, Cs. & BOZSÓ, G. (2018): Metallurgical Characteristics of a Gold Byzantine Cross from the Early Avar Period Cemetery Makó, Mikócsa-halom. In: DRAUSCHKE, J., KISLINGER, E., KÜHTREIBER, K., KÜHTREIBER, T., SCHARRER-LIŠKA, G. & VIDA, T., Hrsg., *Lebenswelten zwischen Archäologie und Geschichte. Festschrift für Falko Daim zu seinem 65. Geburtstag. Monographien des Römisch-Germanischen Zentralmuseums* **150**. Römisch-Germanischen Zentralmuseum, Mainz, 37–42.
- GUNASEKARAN, S., ANBAGALAN, G. & PANDI, S. (2006): Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure *Journal of Raman Spectroscopy* **37** 892–899.
- HAWTHORNE, J.G. & SMITH, C.S. (1963): *On Divers Arts: The Treatise of Theophilus*. Cyril Stanley, Chicago, 279 p.

<https://archive.org/details/ondiversartstrea00theo/page/n9/mode/2up>

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2006): Az avar kori kő- és üvegberakásos technikák. In: ÚJLAKI PONGRÁCZ, Zs., szerk., „Hadak útján” – Népeségek és iparok a népvándorlás korában **XVII** 137–151.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2016): Finds decorated with garnets from Early Avar context in the light of their cell techniques. In: ARMBRUSTER, B., EILBRACHT, H., HAHN, O. & HEINRICH-TAMÁSKA, O., eds., *Verborgenes Wissen. Innovation und Transformation feinschmiedetechnischer Entwick-lungen im diachronen Vergleich*. Berlin, Studies of the Ancient World **35**, Berlin, 183–220.

HORVÁTH, E. (2008): Ékkőberakásos ötvös-művészet a pannoniai Langobard korszakban. *Hadak útján. A népvándorlás kor kutatóinak XIX. Konferenciája*. Győr-Moson-Sopron Megyei Múzeumok Igazgatósága, Tanulmányok **3**. Győr, 125–139.

HORVÁTH, E. (2013): Gemstone and glass inlaid fine metalwork from the Carpathian Basin: the Hunnic and Early Merovingian Periods. *Dissertationes Archaeologicae*, **3/1** 275–302. <https://doi.org/10.17204/dissarch.2013.275>

HORVÁTH, E., MAY, Z., KOVÁCS, J.S. & TÓTH, M. (2009): An early medieval buckle with cloisonné decoration: localization of workshop area by archeometrical investigation. *Archeometriai Műhely* **VI/4** 15–30.

HORVÁTH, E., MOZGAI, V., ARADI, L.E., TOPA, B. & BAJNÓCZI, B. (2024): Production perspectives of a high-status polychrome jewellery set from the Hunnic period (mid-5th century AD) Carpathian Basin. *Journal of Archaeological Science* **171** 106085. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2024.106085>

KRISTÁLY, F. & TÖRÖK, B. (2020): The role of SiO₂ and silica-rich amorphous materials in understanding the origin of uncommon archaeological finds, *Materials and Manufacturing Processes* **35/13** 1410–1419. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1762210>

LAFUENTE, B., DOWNS, R. T., YANG, H. & STONE, N. (2015): The power of databases: the RRUFF project. In: ARMBRUSTER, T. & DANISI, R.M., eds., *Highlights in Mineralogical Crystallography*, W. De Gruyter, Berlin, 1–30.

LÁSZLÓ, Gy. (2015): Das awarenzeitliche Gräberfeld in Csákberény-Orondpuszta. *Monumenta Avarorum Archaeologica* **11** Magyar Nemzeti Múzeum, Budapest, 413 p. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1762210>

MOLNÁR, B. & MOLNÁR-MURVAI, I. (1975): Geohistorical evolution and dolomite sedimentation of the natron lakes of Fülöpháza, Kiskunság National Park, Hungary. *Acta mineralogica-petrographica* **22/1** 73–86.

MOLNÁR B., JENEI, M., ECHART, B. & SCHMITT, M. (2014): Tavak és tavi karbonátok sajátosságai a Duna-Tisza közén. *Hidrológiai Közöny* **94/2**, 1–13.

NY. KOVACSÓCZY, B., MOZGAI, V., BAJNÓCZI, B. & ROSTA Sz. (2022): Avar kori ötvöskészlet a Duna medréről - A régészeti és archeometriai vizsgálatok első eredményei. In: HÁGA, T.K., KOLOZSI, B. & NAGY, E.Gy., szerk., *Sötét idők hétköznapjai. A 2020-ban Debrecenben megrendezett konferencia kiadványa. Tempora Obscura* **5**. Debrecen, 171–200.

OGDEN, J. (1982): *Interpreting the past. Ancient jewellery*. University of California Press, London, 64 p.

PAROLI, L. & RICCI, M. (2007): *La necropoli altomedievale di Castel Trosino*. Ricerche di Archeologia Altomedievale e Medievale **32–33**. Firenze.

PRESBYTER, Th. (1986): *A különféle művészégekről*. Műszaki Kiadó, Budapest, 172 p.

RANISAVLEV, A. (2007): *Early Medieval Necropolis near Mokrin*. РАНИСАВЉЕВ, А. (2007): *Раносредњовековна некропола код Мокрина* Serbian Archaeological Society **4**, Belgrade, 96 p.

RÁCZ, Zs. (2014): *Die Goldschmiedergräber der Awarenzeit*. Monographien des Römisch-Germanisches Zentralmuseums **116**. RGZM Verlag, Mainz, 217 p.

RIEGL, A. (1927): *Alt Roman industrial art*. Bretschneider Verlag, Wien, 127 p.

RIEGL, A. (1989): *A késő-római iparművészet. Művészet és elmélet*. Műszaki Kiadó, Budapest, 127 p.

TRUGLY S. (2008): *A Komárom-hajógyári avar kori temető*. Opitz Archaeologica **2**. Budapest, 276 p.

DENSITY-BASED CLASSIFICATION AND IRON CONTENT ESTIMATION OF THE BLOOMERY IRON SEMI-PRODUCTS: AN EXPERIMENTAL APPROACH TO POST-REDUCTION TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION

VASBUCÁK KATEGORIZÁLÁSA ÉS VASTARTALMUK BECSLÉSE A SŰRŰSÉGÜK ALAPJÁN - PRÓBAKOHÓSÍTÁSOK EREDMÉNYEKÉPPEN KAPOTT VASBUCÁK VASTÖMBBÉ KOVÁCSOLÁSA*

THIELE, Ádám¹ & KARAVIDOVIĆ, Tena^{2*} 

¹ Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Műegyetem rkp. 3., H-1111 Budapest, Hungary

² Institute of Archaeology, Jurjevska ulica 15, 10 000 Zagreb Croatia (* Corresponding author)

E-mail: thiele.adam@gmail.com, tkaravidovic@iarh.hr

Abstract

The study presents a framework for estimating metallic iron content and the degree of refinement in archaeological iron semi-products using non-destructive bulk density measurement. Visual inspection, simple metrics and conventional structural analysis reveal aspects of bloomery technology but seldom yield comparable quantitative indicators of technological practice. Moreover, structural analysis frequently includes invasive sectioning. To address this limitation, changes in semi-product density during post-reduction refining – from iron sponge to purified bars – were evaluated through a programme of experimental refining, density measurement, structural analysis and predictive modelling.

On this basis, a four-stage typology with indicative density ranges for 1–5 kg heavy blooms is proposed: (1) uncompacted sponge, 3–4 g/cm³; (2) compacted bloom, 3.5–5 g/cm³; (3) reheated/consolidated bloom, 5–6 g/cm³; and (4) purified bars – with slag inclusions – 7.3–7.7 g/cm³. A linear relation between bulk density (ρ) and metallic iron content (Fe%) was derived ($\text{Fe}\% \approx 9.24\rho + 27.2$), permitting estimation of metallic iron content and mass of a semi-product at any given density. The framework standardises technological characterisation of iron production stages and supports comparative analysis across diverse archaeological contexts through a replicable, scalable protocol linking experimental archaeology with morphology-based artefact analysis.

Kivonat

Ebben a cikkben vasbucákon egyszerűen és roncsolásmentesen elvégezhető sűrűségmérések alapján bemutatunk egy olyan módszert, amely lehetővé teszi a tömörítettségi fokuk és a fémes vastartalmuk meghatározását. Ez a módszer kiterjeszhető a félkész bucavastermékekre, vastömbökre, vasrudakra és egyéb előgyártmányokra is.

A vasbucákon általánosan elvégzett egyszerű szemrevételezéses vizsgálatok és mérések (tömeg, befoglaló méretek stb.), valamint a szokásosan alkalmazott, de gyakran roncsolásos anyagvizsgálatok (metallográfia, vegyelemzések stb.) ugyan feltárják az előállítás bizonyos körülményeit, azonban a készítőtechnológiára vonatkozóan további, jól összehasonlítható és számszerűsíthető adatok nyerhetők a mért sűrűségértékekből a cikkben bemutatott matematikai összefüggések felhasználásával.

* How to cite this paper: THIELE, Ádám; KARAVIDOVIĆ, Tena, (2026): Density-Based Classification and Iron Content Estimation of the Bloomery Iron Semi-Products: An Experimental Approach to Post-Reduction Technological Characterization / Vasbucák kategorizálása és vastartalmuk becslése a sűrűségük alapján - próbakohósítások eredményeképpen kapott vasbucák vastömbbé kovácsolása. *Archeometriai Műhely* XXIII/1 37–60.

doi: [10.55023/issn.1786-271X.2026-003](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2026-003)

Ezeknek az összefüggéseknek a meghatározásához próbakohósítások során kapott 1–5 kg tömegű vasbucákat kovácsoltunk vastömbbé, és megmértük, hogyan változik eközben a sűrűségük. Ezt a kísérleti módszert keresztmetszeti mintákon elvégzett képelemzésekkel is kiegészítettük, validáltuk, továbbá megalkottunk egy olyan háromfázisú anyagmodellt, amely lehetővé teszi a porózus és egyben nagy salaktartalmú vasbuca (vasszivacs) tömörítésének és kovácsolásának során lezajló sűrűség-, vastartalom- és porozitásváltozás matematikai leírását.

Mindezek alapján a cikkben bemutatott két legfontosabb eredmény közül az első, hogy a vasbucákat sűrűségük alapján csoportosítottuk: (1) 3–4 g/cm³ – tömörítetlen vasszivacs (ahogyan a bucakemencében keletkezett), (2) 3,5–5 g/cm³ – tömörített vasbuca, (3) 5–6 g/cm³ – többször újraízzított vasbuca, (4) 7,3–7,7 g/cm³ – vastömbök, rúdszerű előgyártmányok. A második eredmény pedig egy képlet, amellyel a vasbuca vastartalma becsülhető meg a sűrűség ismeretében: $Fe\% \approx 9.24\rho + 27.2$. Ezen kívül bemutatjuk, hogy a sűrűség ismeretében hogyan határozható meg a vasbuca porozitása és salaktartalma, továbbá azt is, hogy egy ismert kiinduló tömegű és sűrűségű vasbucának a tömörítés és kovácsolás lépései során, egyre növekvő sűrűség mellett, hogyan csökken a tömege, mire vastömbbé alakul.

Összességében tehát a cikkben bemutatott, kísérleti régészeti módszereken alapuló vizsgálatok újabb adatokkal szolgálhatnak a kohósítás során nyert vasbuca előállítását követő további technológiai lépésekről.

KEYWORDS: IRON SPONGE, IRON BLOOM, IRON BAR, IRON CONTENT, SMITHING, ARCHAEOMETALLURGY

KULCSSZAVAK: VASSZIVACS, VASBUCA, VASTÖMB, VASTARTALOM, KOVÁCSOLÁS, ARCHAEOMETALLURGIA

Introduction

In the context of pre-industrial metallurgy, the production of iron involved a complex *chaîne opératoire* centred on the direct reduction of iron ore and subsequent post-reduction processing (Pleiner 2000; Buchwald 2005). This multi-stage technological system can be broadly divided into two principal phases: smelting and smithing. Direct reduction smelting is a solid-state chemical process in which iron ore is reduced to metallic iron by exposure to a carbon-rich, reducing atmosphere, typically at temperatures between 1100 and 1300 °C. This is conducted in a bloomery furnace – usually a shaft or bowl-type structure made traditionally of clay or stone materials. While furnace design and geometry vary across archaeological periods and cultural regions, the process operates within broadly consistent parameters. During smelting, iron oxides are reduced by carbon monoxide (generated through charcoal combustion), producing a spongy mass of metallic iron interspersed with slag and other impurities – referred to as an iron bloom. Following extraction from the furnace, the raw iron bloom must undergo mechanical and thermal refinement to reduce impurity level (slag content) and porosity and make it usable for further processing into objects. This stage, broadly referred to as post-reduction, can theoretically consist of two or three successive phases: 1) Compaction – directly after the smelting process, while the spongy iron and slag mass is hot, traditionally considered to be achieved with a wooden hammer; 2) Primary smithing/reheating (consolidation, purification, shaping and standardisation): a) the bloom is reheated in a hearth and subjected to repeated hammering (wooden hammer) to expel entrapped slag and consolidate the iron particles. The output is a more compact, semi-refined iron mass – often

referred to as a consolidated bloom; b) the semi-refined iron is further worked into intermediate forms or semi-products such as bars, billets, or slabs. The latter phase allows for structural homogenisation and standardisation of iron for trade, storage, or subsequent manufacturing of objects. It requires the use of a metal hammer. Techniques at this stage vary depending on the intended use of the metal and the cultural or regional metallurgical traditions.

Although the production process is technically complex and varies across time and space, the resulting semi-products are often described merely as *blooms* or *bars*, accompanied by basic measurements such as weight and maximum dimensions. This descriptive approach permits only limited comparative analysis. Several morphological traits of a bloom or bar may be considered principal attributes for understanding the technological steps involved in their production – such as surface morphology and internal structure (including visible deformations and slag, iron and porosity content). The characteristics of surface structure (if cleaned of corrosion) can inform about methods of handling and procedures carried out (use of wooden or iron hammer, hammering base type, wedging etc.) (Merta 2019). Macroscopic or microscopic examination of cross-sections can reveal slag, porosity, iron content, and plastic deformation from shaping, and may indicate the refining stages applied to iron semi-products (Bauvais & Fluzin 2009; Berranger & Fluzin 2011; Galili et al. 2015; Saage et al. 2018; Strobl et al. 2010; Török et al. 2017; 2018; 2022; 2024). However, these are destructive methods and serve only as relative comparative tools due to the lower accuracy in measuring partial surfaces and the potential structural variability within a semi-product observed, requiring complementary analyt-

ical methods. Bulk density constitutes the most complementary and integrative non-destructive parameter for characterising iron semi-products, as it captures the combined volumetric contribution of metallic iron, slag inclusions, and porosity within the object as a whole. Since the density of a metallic object reflects its internal structure, it could be used as a proxy for evaluating key factors - degree of refinement (technological procedures) and iron content (metallic yield). Standardised density measurements could facilitate comparative studies across sites and periods, revealing regional or chronological similarities and differences in metallurgical processes and technological choices made.

Density measurements incorporated into the morphological analysis of archaeological iron semi-products (Dungworth 2015; Espelund 2013; Merta 2019; Pleiner 2000) or experimental testing (Crew 1991) are present in the published works, though very rare, making the comparative study possible only on a limited level. Metallic yield (in form of a bloom or bar) in archaeometallurgical studies is usually calculated through results of experimental smelting and smithing sessions, as a ratio ore : slag : bloom/bar/billet or through combination of experimental testing and chemical analyses of resources and waste (Crew 1991; Crew & Crew 1994; Dillmann et al. 1997; Eschenlohr & Serneels 1991; Joosten et al. 1998; Karavidović 2020; Senn 2001; Thiele & Török 2011; Tylecote et al. 1971). However, the total iron content (Fe%) of a given iron-semiproduct remains a key, unaddressed question. Simple bulk density measurement could enable quantitative estimation of iron content and metallic yield, and improve the understanding of production efficiency and past iron economies. A quantifiable metric (like iron percentage) improves classification schemes for semi-products – beyond just size and shape – by incorporating an element of material quality.

The iron production *chaîne opératoire* reflects not only the technical expertise embedded in early ironworking but also the socio-economic and cultural frameworks in which it was practiced. A standardised analytical protocol for describing and categorising each technological stage is essential for meaningful comparative studies of metallurgical practices across chronological, geographical, and cultural boundaries.

The objective of this research is to propose a framework for a basic morphological descriptive standard to support the identification of refinement levels and the estimation of iron content in archaeological iron semi-products. Such a standard facilitates the reconstruction of the technological processes involved in their production and enables the assessment of usable iron yield from individual semi-products. The proposed approach is informed

by a series of experiments replicating key stages associated with the production of iron semi-products, including direct reduction and post-reduction refinement. Based on the results of experimental testing, a classification system grounded in object density is proposed for differentiating between stages of refinement. Furthermore, a physically grounded three-phase theoretical model (iron–slag–porosity) is established to explain how measured density relates to iron, porosity and slag content during post-reduction processing, while a predictive correlation between density and iron content is derived through linear regression based on the experimental forging of compacted and reheated blooms into purified bars.. Finally, an equation for calculating the estimated mass of an iron semi-product in different stages of refinement is introduced.

Materials and methods

To achieve the objectives of this research, a programme of experimental testing, theoretical and predictive modelling was devised. The experimental setup and predictive modelling has three principal aims:

To define density ranges corresponding to different levels of refinement in iron semi-products;

To estimate the iron content (Fe%) within a given semi-product and enable estimation of the mass of an iron semi-product at any given density;

To apply and compare these findings to available archaeological finds.

Experimental testing

To address the initial objective, 35 iron semi-product samples were produced by direct reduction and subsequently refined through post-reduction procedures.

The direct reduction was carried out in a reconstruction of early medieval shaft furnaces, with a shallow hearth and freestanding or/and semi-dug in clay shaft, known as Nemeskér and Avar type furnaces after J. Gömöri (2000). These furnaces measure from 28–40 cm in inner diameter of the hearth, reach 60–70 cm in height and have a plate (“door”) with incorporated tuyere at the front, that was removed for the extraction of the bloom (Gömöri 2000; Sekelj Ivančan & Karavidović 2021). These types of furnaces were widespread within Carpathian basin and its fringes, namely Transdanubia in Hungary, Burgenland in Austria and Podravina region in Croatia from 7th to 9th centuries and appear in Moravia in the Middle Hillfort period (800–950 AD) (Gömöri 2000; Bielenin 1977; Mehofer 2010; Kerbler & Krainz 2013; Sekelj Ivančan & Karavidović 2021; Souchopová 1986: 23–37, Fig. 28).

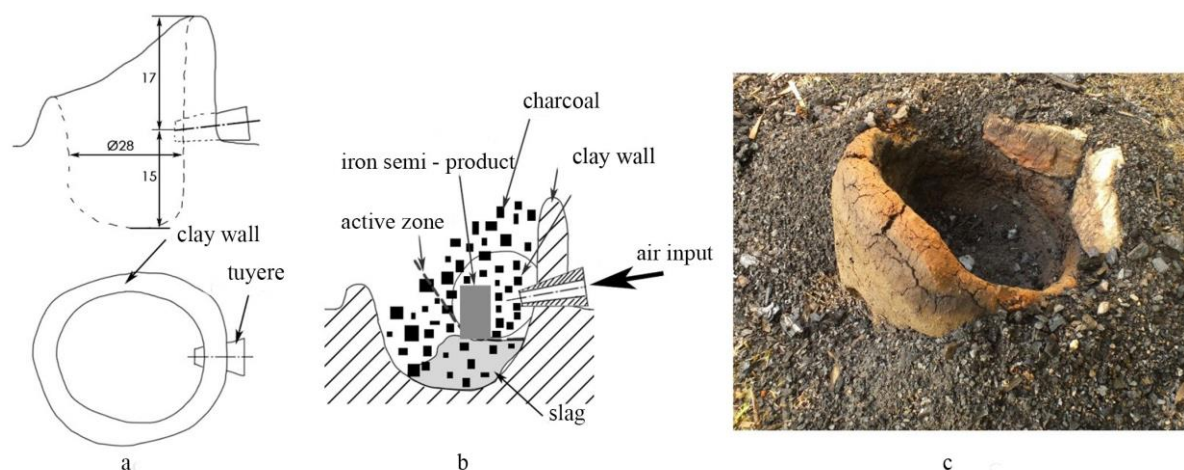


Fig. 1.: Side-blown forge used in the experiments: **a)** graphical representation of geometry of the forge, **b)** graphical representation of the reheating process, **c)** forge after the reheating, cleaned of slag residue and unburned charcoal

1. ábra: A kísérleteknél használt oldalszeles kovácstűzhely: **a)** a kovácstűzhely oldal- és felülnézeti képe a főbb méretekkel, **b)** a kovácstűzhely főbb részei, **c)** fotó a kovácstűzhelyről

Different types of ores were used in the experiments, including regional bog iron ore found in the lowland areas of the Pannonian basin, today's Hungary and Croatia (Brenko et al. 2020; 2021; Kerčsmár & Thiele 2017). Smelting was conducted by intermittently charging 300 g portions of ore and charcoal in a 1:1 ratio. The average air input ranged from 150 to 300 L/min. Charcoal had a grain size of 6–50 mm, while the ore was roasted and crushed to 4–18 mm, with finer particles sieved out. The experimental smelts lasted between 3 and 9 hours, depending on the total amount of ore charged.

The aim was to produce blooms ranging in size and weight from 1 to 11 kg (reflecting different stages of refinement), comparable to semi-products known from the Iron Age, Roman and the Medieval period in South-Central Europe and Scandinavia (Gömöri 2000; Espelund 2000; Pleiner 2000; 2003; Merta 2019; Souchopová & Stránský 1999). The experimentally produced blooms, representing various stages of refinement, weigh between 1.3 kg and 5 kg, with two samples weighing 8.7 kg and 9.2 kg.

The post-reduction techniques applied were intended to reconstruct potential stages in the production of iron semi-products, as evidenced by historical records and supported by morphological and archaeometric analyses of archaeological semi-products (Pleiner 2000; 2003; 2006; Buchwald 2005). The experimental primary smithing was conducted by a single individual. The experimentally produced semi-products can be defined as follows: 1) Iron sponge: uncompacted bloom, as extracted directly from the smelting furnace; 2) Compacted iron bloom: hot-hammered with a

wooden hammer on a wooden log as anvil immediately after extraction; 3) Consolidated iron bloom: bloom purified and consolidated by reheating and hammering using a wooden hammer on a wooden log as anvil to a maximum achievable level; 4) Iron bar: consolidated bloom reheated and further purified using an iron hammer, on an iron anvil without flux use or welding. Compaction of an iron sponge was executed within several minutes, until cooled. Reheating was carried out in a simple side-blown reheating installation (**Fig. 1**). Reheating time and number of reheats applicable was variable, depending primarily on base-state of the processed sample (structural integrity / compaction level), size of the sample and delivered air input (hot zone size), ranging between 30–45 min and 2–5 heating cycles. The wooden hammer used was 3.5 kg heavy, with an impact surface of 12 cm diameter and velocity was between 5 and 10 m/s.

To address the second objective – determining the iron content of semi-products based on their density – five experimental bloom samples at various stages of refinement (compacted and reheated), together with one archaeological sample from the Iron Age site of Jakab-hegy (Hungary), were forged into bars. The blooms were heated in a simple, conventional side-blown forge (**Fig. 1**).

Charcoal with particle sizes of 12–25 mm and 25–50 mm was used, and the air blast ranged from approximately 200 to 500 l/min. The iron bars were forged through 4–5 heating cycles over a period of 30–45 minutes using a mechanical Ajax2 power hammer, weighing 60 kg, with an impact surface of 18x5 cm at velocity between 0.5 and 1 m/s. Burn-off losses during the experiments were minimal due

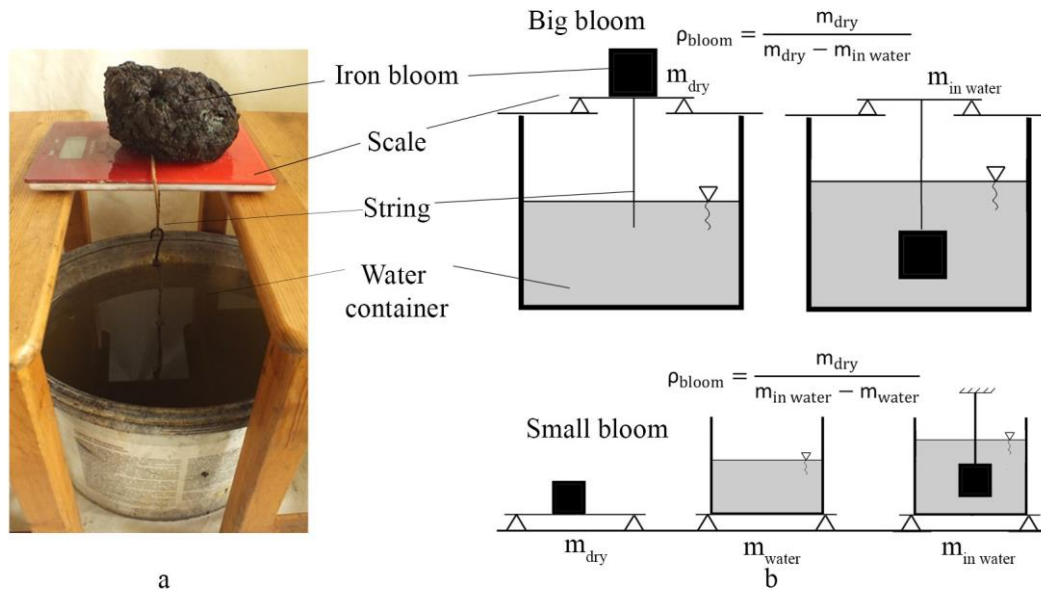


Fig. 2.: Density measurement using the water displacement principle: a) measurement setup, b) graphical representation for measurement of bigger (top) and smaller (bottom) blooms.

2. ábra: Sűrűségmérés vízkiszorításos elven. a) fotó a mérési elrendezésről, b) a sűrűségmérések vázlatos bemutatása nagy- (felül) és kisméretű (alul) vasbucára.

to the rapid and limited heating, so only a negligible amount of the iron phase was lost as hammer scale. In order to avoid more significant iron losses and to more closely replicate archaeological iron bars known to retain slag inclusions, the bars were not forged to full purification (i.e., to a nearly slag- and crack-free state). Instead, forging was limited to achieving a density exceeding ca. 7.0 g/cm³ without further reheating. Density of each semi-product was calculated using Archimedes water displacement measurement (Fig. 2).

Theoretical and experimental predictive modelling

To propose a theoretical material model, four semi-products, representing different stages of refinement were cross-cut, and the structure is analysed visually to determine the constituent phases and relative relation between content. Visual observations are complemented by quantitative cross-section image analysis to quantify phase proportions in these iron semi-products. False-colour overlays of objects cross-section images were generated in Adobe Photoshop using a Magic Wand Tool (Tolerance=20). This ensured consistency between quantitative results and spatial distribution patterns visible on the samples. Surface colour proportions were quantified using a pixel-based image analysis approach. Transparent pixels and near-white background pixels were removed using RGB thresholding, ensuring that only the object surface was included in subsequent calculations. Based on luminance, pixels were

classified into three tonal categories: Black: luminance < 50; Dark grey: luminance 50–139; Light grey: luminance ≥ 140. For each category, pixel counts were calculated and expressed as percentages of the total object surface area.

Based on this, a model for calculation of slag, porosity and iron content is proposed. The six blooms experimentally forged to bars are further taken as case study example for determining a predictive model calculation of iron content (Fe%) as a function of density (ρ) via linear regression. The iron, porosity, and slag contents predicted by the model are compared with independent cross-section image surface analyses of experimental blooms. Finally, the equation for prediction of mass of any given semi-product in different stages of refining is derived based on estimated iron content and density of the semi-product.

Archaeological samples

To evaluate the complementarity of the density values and ranges obtained from experimental samples with the archaeological samples, iron semi-products from archaeological contexts dated to the Iron Age and Early Medieval period were analysed, along with data from a literature review. As data on bulk density is rarely measured and reported, the literature review gave only limited results. The selection of the samples is based primarily on methodological grounds following experimental replication presented here. This relates to size and weight of the experimental blooms, as well as

potentially comparative smelting furnace capacity and type. All samples come from sites within the Carpathian basin, and areas in immediate vicinity. Samples dated to Early Middle Ages, are from in Transdanubia (Hungary) and Moravia (Czech Republic).

They represent typically sized blooms of the early Middle Ages, both smaller weight category (1–5 kg) and larger one (8.5–10 kg), which is related to smelting furnace type and/or capacity used in experimental reconstruction.

Iron Age samples from the Jakab-hegy site are contextually connected to the bloom experimentally forged into a bar, obeying the methodological premise of size and weight, and comprise blooms recovered from a single context: a deposit consisting exclusively of iron blooms found within a shallow pit at the Jakab-hegy site near Pécs. The site has occupation phases dating to the Early Iron Age (Ha C/D) and the Late Iron Age (LT C/D). As no associated finds allowing a more precise chronology were present, the deposit can only be broadly dated to Iron Age, i.e. the phases defined on site. Another sample, found as a surface find

within spatial extent of a site dated into the Early Iron Age, from Verebce-bérc is analysed as it falls well within size/mass range experimentally tested, and the results of analysis can be compared to published metallographic analyses of the archaeological semi-products from the same site.

Results

Density ranges and stage-based classification of semi-products

Density measurements of experimental iron semi-products (**Table 1, Fig. 3**) allow classification into four main categories, each corresponding to a specific post-reduction refinement stage as defined previously:

- (1) $\rho = 3.0\text{--}4.0\text{ g/cm}^3$ – uncompacted iron sponge;
- (2) $\rho = 3.5\text{--}5.0\text{ g/cm}^3$ – compacted iron bloom;
- (3) $\rho = 5.0\text{--}6.0\text{ g/cm}^3$ – reheated / consolidated iron bloom;
- (4) $\rho \approx 7.3\text{--}7.7\text{ g/cm}^3$ – iron bar

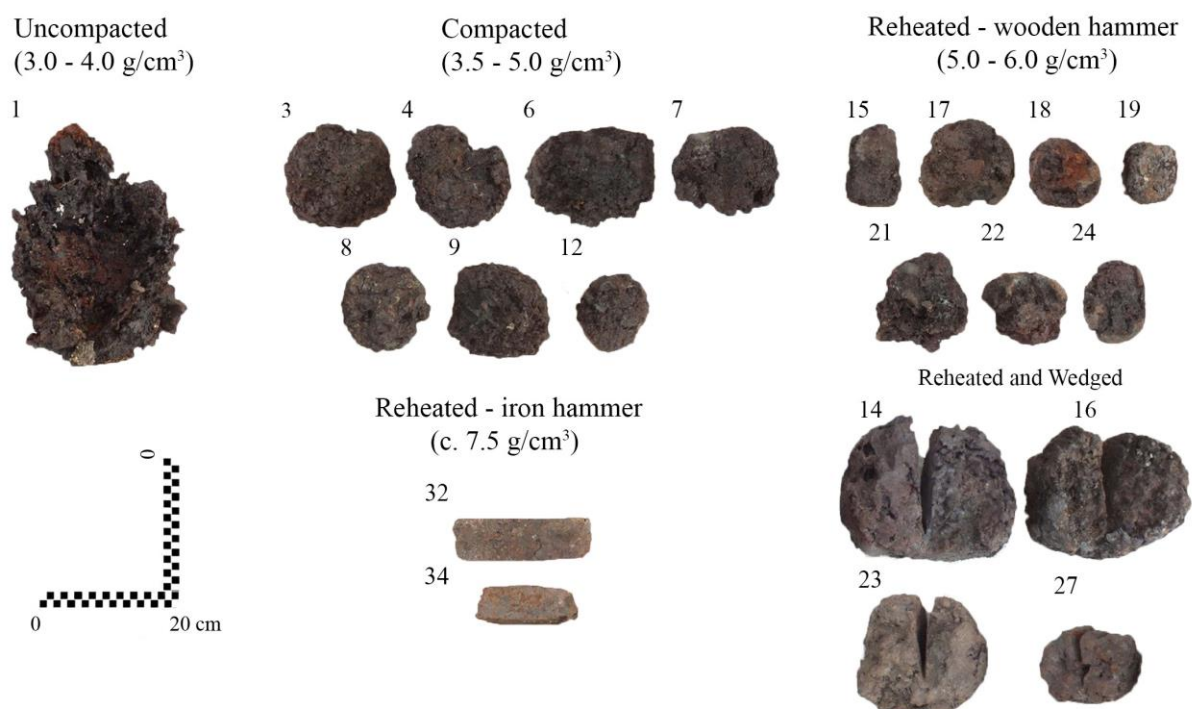


Fig. 3.: Samples of experimentally produced iron semi-products of different mass, density and level of purification (numbers denote samples in **Table 1**)

3. ábra: Kísérleti próbakohósítások során előállított vasbucák fotói (a minták számozása az **1. táblázat** adataival összhangban)

Table 1.: Experimental samples of iron semi products with variable degree of post-reduction processing (see Fig. 3.)**1. táblázat:** Kísérleti próbakohósítások során előállított vasbucák sűrűsége különböző tömörítettségi állapotban

Sample	Semi-product	Tool	Process	Weight (kg)	Density (g/cm ³)	Density range (g/cm ³)			
1	iron sponge	/	uncompacted	5.20	3.20	3.2 – 4.05			
2				0.75	4.05				
3	iron bloom	wooden hammer / wooden log anvil	compacted	2.60	3.60	3.5-5.0			
4				2.40	3.60				
5				2.37	3.63				
6				4.40	4.00				
7				3.60	4.00				
8				2.00	4.50				
9			4.10	4.50					
10			3.54	4.52					
11			1.70	4.66					
12			1.30	4.70					
13			1.26	4.84					
14*			iron bloom	wooden hammer / wooden log anvil	reheated		8.70	4.90	5.0-6.0
15							1.27	5.00	
16*	9.20	5.10							
17	2.48	5.13							
18	1.28	5.14							
19	0.84	5.14							
20	2.48	5.15							
21	3.21	5.16							
22	1.84	5.28							
23*	4.90	5.30							
24	1.27	5.37							
25	1.60	5.78							
26	1.60	5.89							
27*	2.40	5.90							
28	iron bar	iron hammer / iron anvil	reheated	2.89	7.19	7.2-7.7			
29				1.13	7.22				
30				1.46	7.25				
31				0.93	7.34				
32				1.70	7.40				
33				2.08	7.41				
34				1.50	7.50				
35				1.70	7.68				

*objects wedged

The density of an object increases in correlation with the degree of purification achieved during the refining process, ultimately approaching—but remaining slightly below—the density of pure iron (7.87 g/cm³) in the case of iron bars.

If observed among archaeological material, densities of 6 – ≈ 7.3 g/cm³ could be regarded as heavily refined iron blooms or loosely consolidated

bars (iron hammer and anvil), depending on other morphological factors. These densities were not recorded among experimental samples since the last stage of refining aimed at replicating heavily purified iron bars, and refining with wooden hammer showed limited to gaining a density of 6 g/cm³. The calculated impact (m·v/A) for the wooden hammer used in refining the blooms up to the consolidated state (5–6 g/cm³) was approxi-

mately $1.5\text{--}3.1 \times 10^3 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. The threshold of 6 g/cm^3 is defined as the maximum achievable density with given parameters. The iron hammer used has a calculated impact of $3.3\text{--}6.7 \times 10^3 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

The clear separation between these ranges reflects fundamentally different mechanical regimes: wooden hammering is sufficient primarily for collapse of large, interconnected pore networks and limited slag redistribution, whereas iron hammering delivers stresses high enough to expel finer slag inclusions and close residual micro-porosity. The calculated impact contrast therefore provides a physically grounded explanation for the experimentally observed density threshold of $\sim 6 \text{ g/cm}^3$ attainable with wooden tools and the substantially higher densities achieved during bar formation using iron hammer and anvil.

The results indicate that an object's technological treatment can be inferred from its density, measured simply and non-destructively using the Archimedes' method.

Iron content and mass of iron semi-products through the purification process

Cross-section phase proportions across refinement stages

As a starting point for the modelling, full cross-sections of the experimental samples with varying densities were examined through visual inspection (Fig. 4a, c) and quantitative surface analysis (Fig. 5) in order to assess their internal structure. The analysis shows highly heterogeneous structure across the surface of uncompact sponge and compacted and reheated blooms (Figs. 4c, 5). The cross-sections show that, in addition to the iron and slag phases comprising the bloom, both phases contain porosities. As the degree of purification and material density increase, the proportion of iron rises, while the relative amounts of slag and porosity decrease. This process ultimately results in iron bars characterised by only minor slag inclusions and very limited micro-porosity.

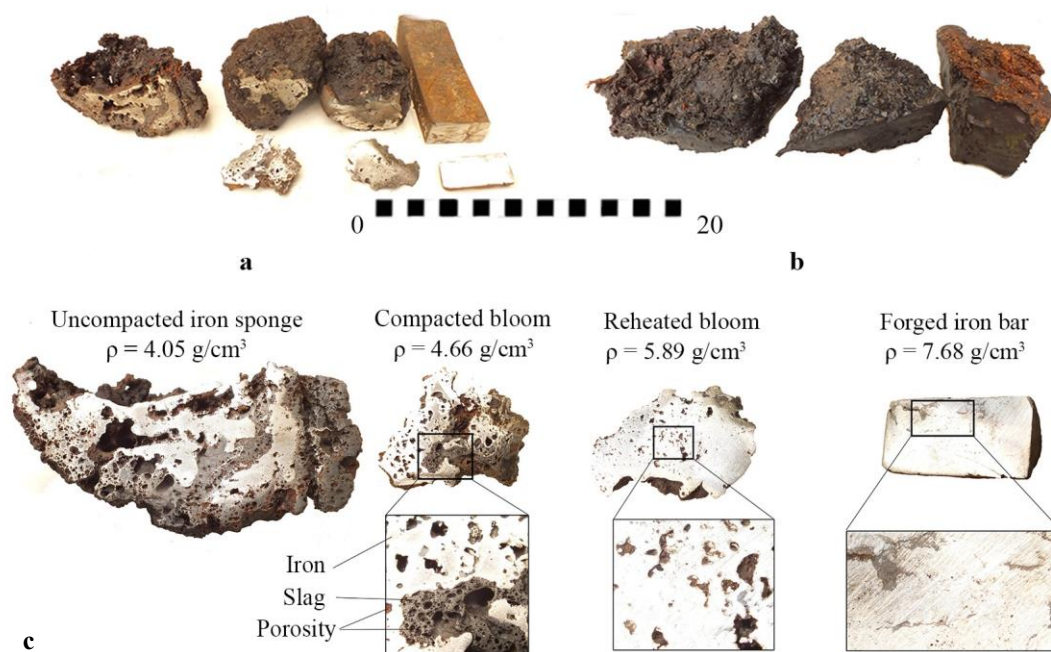
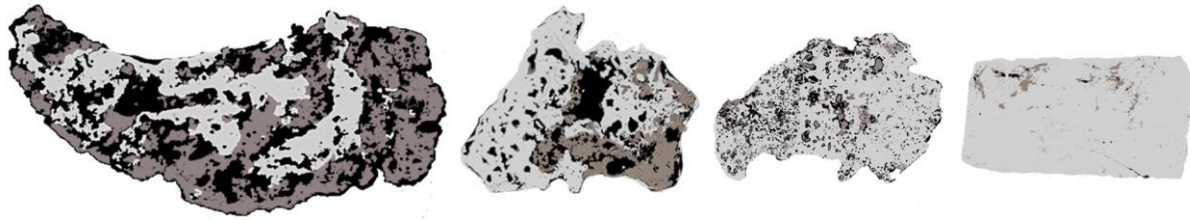


Fig. 4.: a) Samples cut from iron semi-products of different purification level and density, b) tap slag samples measured for density, c) cross-cut surface of iron semi-products with different purification level and density - uncompact iron sponge (Table 1: 2), compacted iron bloom (Table 1: 11), reheated iron bloom (Table 1: 26), iron bar (Table 1: 35)(see also Fig. 5).

4. ábra: a) Különböző sűrűségű és tömörítettségű vasbucákból és bucavas tömbből kivágott minták, b) Sűrűségmérésbe bevont folyósalak minták, c) A különböző tömörítettségű vasbucákból kivágott minták csiszolata, tömörítetlen vasbuca (1. táblázat, 2. minta), tömörített vasbuca (1. táblázat, 11. minta), újraizított vasbuca (1. táblázat, 26. minta), vastömb (1. táblázat, 35. minta), (ld. még a keresztmetszetek sematikus rajzát az 5. ábrán).



Material category	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
	$\rho = 4.05 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 4.66 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 5.89 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 7.68 \text{ g/cm}^3$
Metal (light grey)(%)	59.12	73.48	84.06	98.76
Slag (dark grey)(%)	21.48	15.98	9.82	1.09
Porosity (black)(%)	19.4	10.54	6.11	0.14
Total analysed surface area (%)	100	100	100	100

Fig. 5.: Three-phase surface classifications (original photographs: Fig. 4c) and quantitative surface analysis of iron semi-products with increasing density, from an uncompacted iron sponge (Sample A), through a compacted iron bloom (Sample B) and a reheated and consolidated bloom (Sample C), to a fully refined iron bar (Sample D).

5. ábra: A különböző tömörítettségű vasbucákból kivágott minták csiszolatának sematikus rajza képelemzéshez, tömörítetlen vasbuca (A minta), tömörített vasbuca (B minta), újraizzított vasbuca (C minta), vastömb (D minta).

Quantitative analysis of sampled material surfaces in three-phase cross-section images (Fig. 5) indicates that metal content increases systematically with density, from an uncompacted iron sponge (59.12% at $\rho = 4.05 \text{ g/cm}^3$) to a compacted bloom (73.48% at $\rho = 4.66 \text{ g/cm}^3$), a reheated and consolidated bloom (84.06% at $\rho = 5.89 \text{ g/cm}^3$), and finally the iron bar (98.76% at $\rho = 7.68 \text{ g/cm}^3$). Over the same density range, porosity declines rapidly at lower density increments, from 19.40% to 10.54% and 6.11%, before falling to 0.14%, whereas slag content decreases more gradually, from 21.48% to 15.98%, 9.82%, and finally 1.09%. The transition between intermediate density stages (between 5 and 6 g/cm^3) and heavy refining (c. 7.68 g/cm^3) marks a shift from predominantly compaction-driven change (porosity closure) to more effective metallurgical refinement, in which slag removal becomes the dominant factor controlling material composition. Porosity exhibits a steep early decline because void closure responds directly to initial compaction, whereas slag decreases more gradually, reflecting progressive removal during repeated thermal and mechanical refinement.

Theoretical material model

Based on the visual observations (Figs. 4, 5), a three-phase material model is proposed in which the iron matrix contains slag inclusions and porosities. As boundary conditions, the density of iron phase is taken as 7.87 g/cm^3 , while the density of air (porosity) is considered negligible

(approximately 0 g/cm^3). The density of the slag phase is taken as approximately 3.5 g/cm^3 , based on density measurements conducted on compact, low viscosity and porosity tap slag samples (Fig. 4b). The iron burn-off loss is set to zero, as another boundary condition. Using standard relationships between mass ($m = m_{\text{iron}} + m_{\text{slag}}$), volume ($V = V_{\text{iron}} + V_{\text{slag}} + V_{\text{voids}}$), and density ($\rho = m/V$), porosity is defined as a volume fraction ($P = V_{\text{voids}}/V$), and iron content as a mass fraction ($\text{Fe} = m_{\text{iron}}/m$). From these definitions the iron content of the three-phase material can be expressed as a function of density and porosity:

$$\text{Fe} = \frac{\rho_{\text{iron}} - \rho_{\text{slag}} \frac{1-P}{\rho}}{\rho_{\text{iron}} - \rho_{\text{slag}}} = 1.8 - 6.3 \frac{1-P}{\rho} \quad (1)$$

From equation (1) porosity can be expressed as:

$$P = 1 - \rho \left(\frac{\text{Fe}}{\rho_{\text{iron}}} + \frac{1-\text{Fe}}{\rho_{\text{slag}}} \right) = \frac{\text{Fe}-1.8}{6.3} \rho + 1 \quad (2)$$

Fig. 6a illustrates the theoretical iron content (Fe%) as a function of density (ρ) for a set of fixed porosity values (P%), calculated using equation (1).

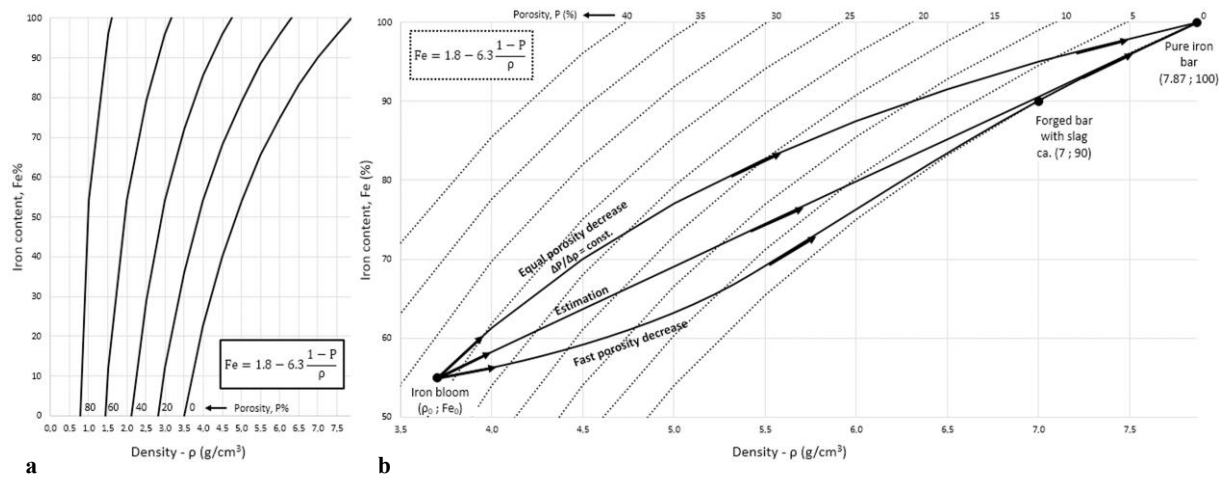


Fig. 6.: **a)** The theoretical iron content (Fe) as a function of density (ρ) and different porosity content (P), **b)** Theoretical iron content graphs through the post-reduction refining from uncompacted iron sponge to an iron bar.

6. ábra: **a)** Az elméleti vastartalom (Fe) a sűrűség (ρ) és a porozitás (P) függvényében a háromfázisú anyagmodell alapján. **b)** Az elméleti vastartalom lehetséges változásai egy vasbucá vastömbbé kovácsolása során.

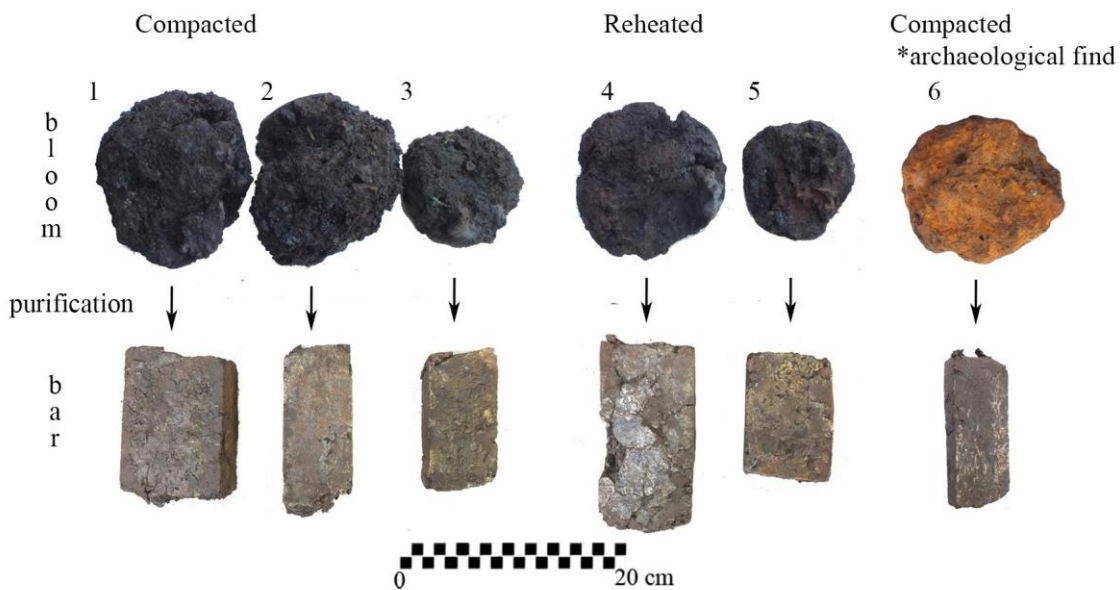


Fig. 7.: Experimental samples – compacted (1-3, 6*) and reheated (4-5) iron blooms forged into iron bars (1-5', 6*) (see also **Table 2**)

7. ábra: A kovácsolási kísérletekbe bevont vasbucák (1-3, 6* – tömörített és 4-5 – újraizzított vasbucák) és a belőlük kikovácsolt vastömbök (1-5', 6*) (ld. még **2. táblázat**).

Each curve represents a static material state with constant porosity, illustrating the combined influence of density and porosity content on the iron fraction. **Fig. 6b** extends this framework to refining processes by illustrating possible evolutionary trajectories during the forging from an uncompacted iron sponge into a bar. In this diagram, the dotted curves correspond to porosity states as shown in **Fig. 6a**, while the solid arrows

represent dynamic forging paths in which both porosity and density change.

If a simplified forging behaviour is assumed, in which porosity decreases proportionally with increasing density ($\Delta P/\Delta \rho = \text{constant}$) through the process of reheating and forging, porosity can be expressed as a linear function of density and substituted into equation (1). This substitution results in a non-linear (hyperbolic) relationship

between iron content and density, expressed by equation:

$$\begin{aligned}
 \text{Fe} &= 1.8 - 6.3 \frac{(1 - P)}{\rho} \\
 &= 1.8 - 6.3 \frac{\left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta \rho} (\rho_{\text{iron}} - \rho)\right)}{\rho} \\
 &= 1.8 - \frac{6.3}{\rho} + \frac{\Delta P}{\Delta \rho} \left(\frac{50}{\rho} - 6.3\right)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

The corresponding trajectory is shown by the upper solid curve in **Fig. 5b**. While this model is mathematically consistent, it implies that porosity reduction and slag removal proceed at comparable rates throughout the forging process, i.e. porosity decreases equally through the process. However, based on experimental observations and comparative quantitative analysis of cross-section surfaces (**Fig. 5**), a more realistic behaviour should assume a fast porosity decrease in the beginning of the forging, declining through the process. At densities of approximately 7 g/cm³, porosity can be assumed to approach zero, and further increases in density primarily reflect slag expulsion. This path is represented by the lower curve in **Fig. 6b**. The slag content, however, is removed significantly slower than porosity and gradual decrease of slag content should be expected through the process. Under these conditions, the relationship between iron content and density can be reasonably approximated as linear over the main forging interval (middle trajectory on **Fig. 6b**). This approximation does not imply linearity over the entire forging sequence but provides a practical estimate of iron enrichment during the dominant phase of bar formation.

Table 2.: Measured, calculated and estimated values of mass (m), density (ρ), iron content (Fe%) and porosity (P%) of experimental iron semi-products (including archaeological sample 6*), in their initial state and after purification/forging into bars.

2. táblázat: A mért, számított és becsült tömeg (m), sűrűség (ρ), vastartalom (Fe%) és porozitás (P%) értékek a kovácsolási kísérletekbe bevont vasbucák és a belőlük kovácsolt vastömbök esetén.

		Bloom				Bar					Bloom			
Sample	Initial stage	Measured		Calculated (theoretical model)		Sample	Measured		Calculated (theoretical model)			Estimated (regression model)		
		m ₀ (g)	ρ ₀ (g/cm ³)	Fe ₀ (%)	P ₀ (%)		m' (g)	ρ' (g/cm ³)	Fe' (%)	m _{metallic iron} (g)	P' (%)	Fe (%)	m _{metallic iron} (g)	P (%)
1	compacted	3538	4.52	75.5	25.0	1'	2890	7.19	92.4	2671	0	68.6	2427	20.0
2	compacted	2365	3.63	57.4	29.4	2'	1458	7.25	93.2	1358		60.4	1428	31.1
3	compacted	1262	4.84	69.6	15.1	3'	932	7.34	94.2	878		71.5	903	16.6
4	reheated	2478	5.15	79.6	17.9	4'	2076	7.41	95.0	1973		74.4	1843	13.6
5	reheated	1273	5.37	82.1	16.6	5'	1127	7.22	92.8	1046		76.4	973	11.7
6*	compacted	1988	4.37	60.5	17.1	6*'	1231	7.65	97.7	1203		67.2	1336	21.7

*archaeological find

Experimental calibration: The estimated iron content (Fe%) (regression model)

The second experimental set resulted in successful forging of five experimentally produced blooms and one archaeological sample into bars (**Fig. 7**). On the basis of these experiments and the theoretical iron content model, the percentage of iron within a given semi-product as a function of density can be estimated.

The iron content of the bars (Fe'%) can be derived using equation (1), with measured mass (m') and density (ρ') of the bars. The porosity of a forged bar is assumed to be negligible as a boundary condition (cf. **Fig. 4**) and set to zero. The mass of the metallic iron (m_{metallic iron}) can therefore be calculated as m_{metallic iron} = m' · Fe'%. Assuming negligible burn-off losses during forging as further boundary condition, the metallic iron content of the initial semi-product (i.e. the compacted or reheated bloom) is considered equal to that in the final iron bar. The iron content of the initial semi-product can thus be calculated as Fe₀% = m_{metallic iron}/m₀. On this basis, the porosity (P₀%) of the initial semi-product can be calculated from equation (2). The measured and calculated data for iron blooms nr. 1–6* and bars 1'–6*' are summarized in **Table 2**.

The results indicate that the iron content of compacted blooms is lower than that of reheated and refined blooms, and, naturally, lower than that of the final iron bar. The highest porosity, approx. 30%, is presumed in sample 2, a very lightly compacted bloom which has the lowest density. The variability between calculated iron content of the samples, especially illustrated by differences in calculated iron contents of samples 1 and 6* (**Table 3**), that have a similar density (4.52 g/cm³ vs. 4.37 g/cm³) is inherent due to the nature of the calculation, and differences in the initial mass of the samples (3538 g vs. 1988 g).

Table 3.: Calculated mass change (Δm) and density increase ($\Delta \rho$) and their ratio, normalised to a final density of $\rho = 7.5 \text{ g/cm}^3$

3. táblázat: A kovácsolási kísérletekbe bevont vasbucák számított tömegcsökkenése (Δm) és sűrűsége növekedése ($\Delta \rho$) a kapott vastömbök sűrűségét egységesen $\rho = 7,5 \text{ g/cm}^3$ -re átszámítva

Sample	Initial stage	Bloom					Bar					
		m_0 (g)	ρ_0 (g/cm^3)	Fe ₀ (%)	P ₀ (%)	$m_{\text{metallic iron}}$ (g)	ρ_2 (g/cm^3)	Fe ₂ (%)	m_2 (g)	Mass loss Δm (%)	Density increase $\Delta \rho$ (g/cm^3)	Mass loss / Density increase $\Delta m/\Delta \rho$ ($\%/ \text{g/cm}^3$)
1	compacted	3538	4.52	75.5	25.0	2671	7.5	96	2782	21.4	2.98	7.2
2	compacted	2365	3.63	57.4	29.4	1358			1414	40.2	3.87	10.4
3	compacted	1262	4.84	69.6	15.1	878			915	27.5	2.66	10.3
4	reheated	2478	5.15	79.6	17.9	1972			2055	17.1	2.35	7.3
5	reheated	1273	5.37	82.1	16.6	1045			1089	14.5	2.13	6.8
6*	compacted	1988	4.37	60.5	17.1	1203			1253	37.0	3.13	11.8

*archaeological find

Building on the theoretical material model, in order to establish a general relationship between density and iron content in iron semi-products weighing several kilograms, a linear regression model was applied on experimental data (**Fig. 8**).

The resulting equation for the estimated iron content is as follows:

$$\text{Fe}\% \approx 9.24\rho + 27.2 \quad (4)$$

The correlation coefficient between the samples indicates a strong positive relationship ($r = 0.98$), and the coefficient of determination for the regression model is high ($R^2 = 0.95$), suggesting that the model provides a reliable approximation and accounts for a substantial proportion of the variance. In comparison, the coefficient of determination for a cubic polynomial regression is somewhat higher ($R^2 \approx 0.96$) and could be used as well. However, the linear regression model is preferred due to its simplicity that refers on the estimation as well as the rounded constants in Equation (4), which would be $\text{Fe}\% \approx 9.2346\rho + 27.193$ in a more accurate form. Using Equation (4), the iron content (Fe%), porosity (P%), and mass of metallic iron ($m_{\text{metallic iron}}$) are estimated for all experimental samples and summarised in **Table 2**.

When equation (4) is applied to experimentally established density categories, the estimated iron and porosity contents are:

(1) $\rho = 3\text{--}4 \text{ g/cm}^3$ – uncompacted iron sponge, Fe $\approx 55\text{--}64\%$, P $\approx 40\text{--}26\%$;

(2) $\rho = 3.5\text{--}5 \text{ g/cm}^3$ – compacted iron bloom, Fe $\approx 60\text{--}73\%$, P $\approx 33\text{--}15\%$;

(3) $\rho = 5\text{--}6 \text{ g/cm}^3$ – reheated/consolidated iron bloom, Fe $\approx 73\text{--}82\%$, P $\approx 15\text{--}7\%$;

(4) $\rho \approx 7.3\text{--}7.7 \text{ g/cm}^3$ – iron bar, Fe $\approx 94\text{--}96\%$, P $\approx 0.5\text{--}0\%$.

Ultimately, the density of pure iron is 7.87 g/cm^3 – which is not realistic for archaeological bar finds – would correspond to 100% iron content. With the presented form of formula (4) the iron content equates to 99.998% of iron. The formula is applicable to densities of iron semi-products of $\rho > 3 \text{ g/cm}^3$.

The quantitative cross-section surface data shown in **Fig. 5** correspond closely with estimated density-based compositional ranges for successive stages of iron consolidation and refinement. At low densities (Sample A, $\rho \approx 4.05 \text{ g/cm}^3$), the uncompacted iron sponge falls within the reference range for metal and porosity, albeit towards its more consolidated end.

The compacted bloom (Sample B, $\rho = 4.66 \text{ g/cm}^3$) matches the upper limits of the reference range for compacted material, while the reheated and consolidated bloom (Sample C, $\rho = 5.89 \text{ g/cm}^3$) slightly exceeds the upper iron content and approaches the lower porosity bound of the corresponding range. The final iron bar (Sample D, $\rho = 7.68 \text{ g/cm}^3$) shows excellent agreement with reference values for refined bars. Overall, the measured data closely align with established density–composition. The slight differences can be understood as inherent to heterogeneity of the internal structure of the bloom, since only a single surface per purification stage and individual sample is analysed.

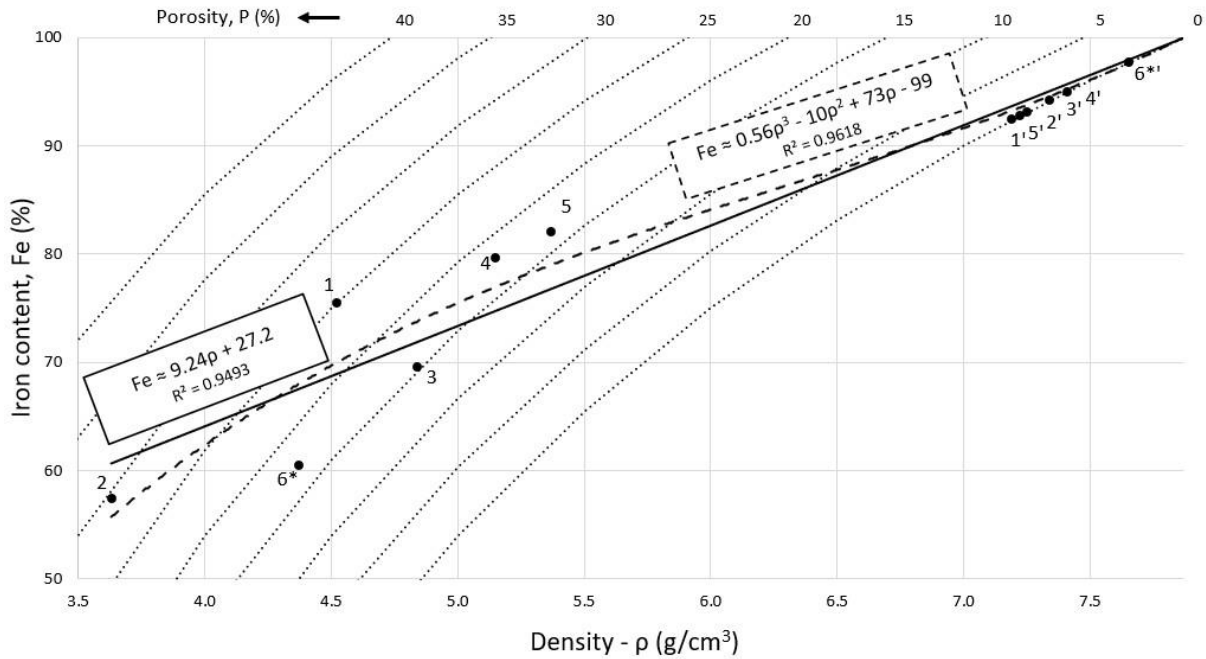


Fig. 8.: The estimated iron content – calculated iron content (Fe%) of the experimental samples (Table 2) – as a function of measured density (ρ), with the and porosity contours and the fitted regression model for estimating the iron content.

8. ábra: A becsült vastartalom – a kovácsolási kísérletekbe bevont vasbucákra és a kikovácsolt vastömbökre számított vastartalom értékeknek (2. táblázat) megfelelő pontok – a sűrűségek függvényében és az ezekre illesztett, a sűrűség függvényében a becsült vastartalmat mutató regressziós egyenes.

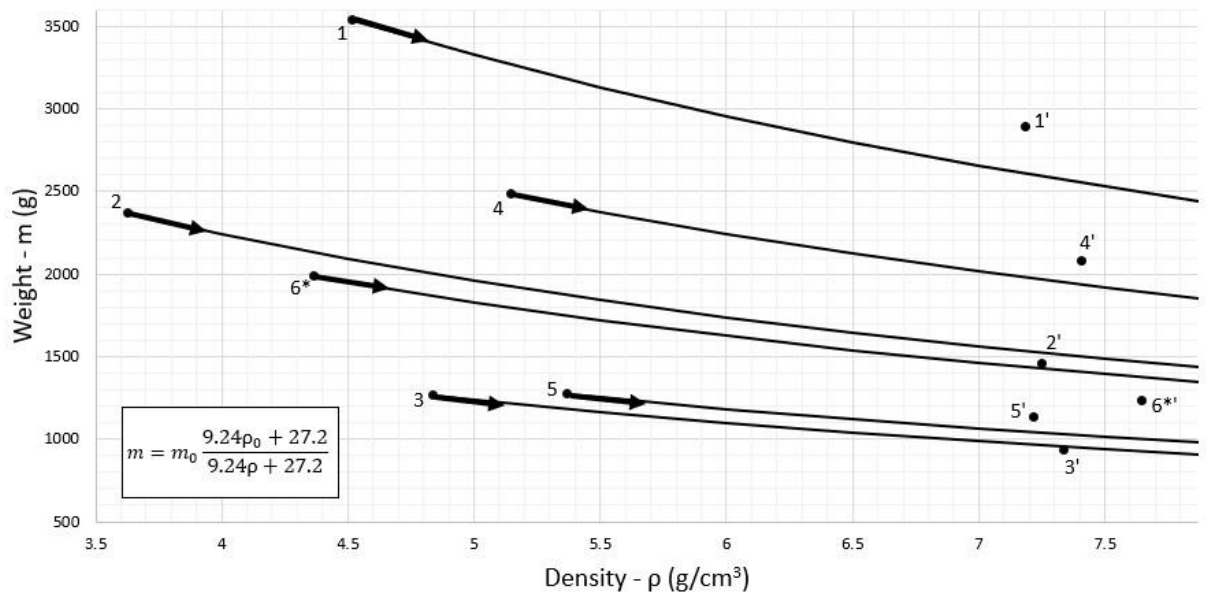


Fig. 9.: The estimated mass of the iron semi-product – for a full density range experimentally observed: from uncompacted iron sponge ($\rho \approx 3.5 \text{ g/cm}^3$) to pure iron bar ($\rho = 7.87 \text{ g/cm}^3$). Dots (1-6) represent the measured values of experimental samples.

9. ábra: A becsült tömeg – a vasbuca becsült tömege a vastömbbé kovácsolás során a teljes sűrűségtartományra kiterjesztve: a tömörítetlen vasszivacstól ($\rho \approx 3,5 \text{ g/cm}^3$) a tiszta vastömbig ($\rho = 7,87 \text{ g/cm}^3$). A diagramban feltüntetett pontok a kísérletbe bevont vasbucák és a belőlük kovácsolt vastömbök sűrűség – tömeg adatpárjait jelölik.

Mass of the iron semi-product through purification process

If the mass (m_0) and density (ρ_0) of an iron semi-product are known (measured), its mass at any stage of post-reduction processing (m_{sp}) – corresponding to a different density – can be estimated from the iron content equation (4) by:

$$m_{sp} = m_0 \frac{9.24\rho_0 + 27.2}{9.24\rho + 27.2} \quad (5)$$

The calculated mass of an iron bar (ca. $\rho \approx 7.3\text{--}7.7$), when applied to archaeological bloom objects, may be interpreted as the forgeable iron mass of the bloom, corresponding to a purified iron bar that retains some slag inclusions and microporosity and is suitable for further secondary smithing into finished objects.

When plotted with the experimental data (Fig. 9), where m_0 corresponds to initial bloom mass (Table 2: 1-6), the non-linear relationship between density increases and mass loss during post-reduction processing is evident. The curves, derived from Equation (5), show that the majority of material loss occurs at lower densities corresponding to processing of uncompact iron sponge, gradually declining through the process, while mass stabilises as density approaches that of forged iron bar. The latter is in line with general experimental observations and the theoretical model. Experimental data dots that represent measured values of final iron bars (Fig. 9: 1'-6*'), closely follow the estimated trajectory, albeit both minor under- and over-estimation of final semi-product mass is present.

Variability in mass loss relative to density increase is evident among the experimental cases. To enable direct comparison between samples, measured values are normalised to a common final bar density ($\rho_2 = 7.5 \text{ g/cm}^3$), corresponding to a metallic iron content of approximately 96% (Fe_2), calculated by equation (1) (Table 3). This normalisation is achieved by recalculating the final bar mass (m_2) for each bloom from its calculated metallic iron content (Eq. 1). Given that all experiments were conducted under a maximal degree of similarity in processing parameters—including reheating conditions, tools, and smithing technique—the observed mass loss is directly comparable across samples and cannot be attributed to differences in handling. Instead, it reflects a combination of slag expulsion and metallic iron burn-off during post-reduction processing, with any variation primarily related to intrinsic properties of the individual

blooms. Relative mass loss was calculated as $\Delta m = m_0 - m_2 / m_0$ and expressed as a percentage. Finally, the mass loss per unit of density increase is expressed for each case (Table 3).

The lowest mass loss values are observed in reheated blooms (approximately 14–17%), whereas the higher values occur in compacted-only blooms with low initial density (21–40%) reaching the highest value with bloom with lowest density (Table 3). This pattern illustrates the trajectory in which mass loss is strongly dependent on initial density. Structurally more refined blooms require less intensive processing (less reheating), and consequently their mass loss is lower. However, burn-off loss of metallic iron is also influenced by the mass and size of the bloom. Larger blooms with greater initial weight may exhibit proportionally lower metallic iron losses owing to a smaller specific surface area exposed during forging. This effect is evident when comparing Samples 1 and 6*, which have similar initial densities ($\rho_0 \approx 4.4\text{--}4.6 \text{ g/cm}^3$) but markedly different initial masses. Sample 1 shows a mass loss of approximately 21%, whereas the archaeological sample (Sample 6*) exhibits a higher value of nearly 37% (Table 3) i.e. the ratio of mass loss and density increase varies between 7.2 and 11.8.

Archaeological semi-products: density range comparison and case study application

The density values recorded for the analysed archaeological blooms and literature reviews, ranging from 3.3 to 5.95 g/cm^3 (Table 4, Fig. 10.) correspond closely to those observed in experimental samples (Table 1 and 2). The relatively limited variability observed suggests predominantly no or low to moderate levels of post-reduction refinement, extending from uncompact iron sponges to compacted blooms. Only two samples exhibit evidence for more advanced purification through reheating, attaining densities approaching 6 g/cm^3 , which experimental results indicate as the upper limit achievable through reheating and hammering with a wooden hammer (Table 4: Samples 2 and 18). The density ranges — 3.3–5.7 g/cm^3 for Early Medieval samples and 3.4–5.9 g/cm^3 for Iron Age specimens — do not suggest temporally conditioned variation in density range obtained through the post-reduction processes. They are consistent with the observations of R. Pleiner (2008), who noted that the majority of blooms fall within a density interval of approximately 3.5–6 g/cm^3 . Taken together, it could be reasonably inferred that the observed archaeological densities also implicate the boundary condition of density that was reached by compacting with a wooden hammer, especially for blooms weighing between 1–6 kg, as experimental samples.

Since data on the iron blooms presented here is only of limited contextual and chronological comparability, only multiple finds from single context can be analysed in more detail.

Similarities or differences in the level of refinement and iron content are evident among samples from the same archaeological site and period. The Iron Age samples from the Jakab-hegy site (**Table 4: 13–17**) were found together in a shallow pit depot, recognised on the surface on the multi-phase Iron Age site Jakab-hegy. The samples show some variability in weight and density, however, all within range from uncompacted sponge to compacted blooms density values, implicating a unique, albeit slightly variable, post-reduction processing within the group. The shape of the blooms is not fully standardised (**Fig. 10**), which complements the limited variability in processing premise. Minor differences in overall mass and estimated metallic iron content are also present, suggesting another variable, the difference in smelting outcomes. Nevertheless, the samples can be regarded as quite standardised semi-products, as only very limited differences are present, all within the same boundary conditions of lower stage of post-reduction processing and tools used. An interesting point is the difference between the Iron Age samples from Jakab-hegy (compacted) and Verebce-bérc (reheated). Comprehensive comparative analysis of these differences is not possible due to available limited sample quantity and archaeological contextual and temporal determination of the samples (**Table 4.**), however, it can be stated that the differences in processing are substantial. The sample from Verebce-bérc (**Table 4: Sample 18**) was recovered as a surface find in 2007 within a hoard of similar semi-products (Török et al. 2011). Although the find context does not allow precise chronological attribution, the sample originates from within the spatial extent of the site Dédestapolcsány-Verebce-bérc, where subsequent archaeological investigations identified a large number of iron semi-products and objects deposits (approximately 30), attributed to the Early Iron Age in the Carpathian Basin (Szabó et al. 2022). Several samples from one deposit, containing total of 96 iron semi-products, dated to end of the 7th century – beginning of the 6th century BC, were metallographically analysed (Török et al. 2024). These samples show great similarity to the here analysed, both in weight (around 1.54 kg a piece) and the processing level - they were defined as very well compacted, standing somewhere between bloom and a bar. This is completely in line with results obtained by simple density measurement within this research, by which the bloom can be defined as a heavily purified bloom, reheated and consolidated by wooden hammer to a maximum achievable level. The use of an iron hammer in

interpretation of such archaeological objects cannot of course be excluded, however, the structure of the outer surface of the sample does not imply such treatment. The sample is only a part of the original bloom, and represents approximately one sixth of the original bloom and exhibits cutting surfaces on two sides. Multiple sectioning of a bloom of this size would have required substantial reheating, which may explain the comparatively advanced reheating stage observed. This reheating stage can thus be interpreted as a technological requirement for subdividing an initially large bloom into smaller, more manageable semi-products intended for further processing. Comparable morphologies have been documented in metallographically analysed semi-products (Török et al. 2024, Fig. 2: 1, 46).

The Early Medieval samples from Somogyfajsz (**Table 4: 10–12**) fall within the range of uncompacted iron sponges to compacted iron blooms. The shape of the blooms and their surface texture suggest a low degree of compaction. This limited treatment is consistent with the archaeological context, as the blooms were found together directly in front of a smelting furnace embedded in the wall of a working pit at the iron-smelting site in Somogyfajsz (Gömöri 2000, 153–164, Fig. 112). The samples exhibit pronounced differences in volume and size (**Fig. 10**) and minor differences in density and mass. However, normalisation to estimated metallic iron mass (**Table 4: $m_{\text{metallic iron}}$**), reveals pronounced similarity in metallic iron yield among the blooms. This pattern may indicate a marked uniformity in smelting output — primarily reflecting the amount of ore charged into the furnace — accompanied by only limited variation in post-reduction processing

The half-bloom sample from the Pusztakovácsi site (**Table 4: 9**), potentially dating to the same period as the nearby Somogyfajsz site samples (Somogy County, Hungary), exhibits a somewhat higher degree of purification yet ultimately yields a very similar estimated mass of metallic iron. As the specimen represents only half of a single bloom, the original bloom would be expected to have contained approximately twice the iron content. Although the precise chronological relationship between the Somogyfajsz and Pusztakovácsi samples remains uncertain, if these semi-products were in circulation contemporaneously, the observed pattern could indicate variability in smelting outcomes alongside standardisation of semi-products through post-reduction processing. Such standardisation could have been achieved by regulating weight (not size or level of post-reduction processing), that is, by controlling the content of forgeable iron within semi-products intended for further distribution.

Table 4.: Measured (weight, density) and estimated (Fe%, $m_{\text{metallic iron}}$ and P%) values for archaeological iron semi-products, based on a review of the literature and available archaeological finds.

4. táblázat: Régészeti vasbucákra meghatározott sűrűség adatok (irodalmi adatokkal kiegészítve) és ez alapján a becsült vastartalom (Fe%), a bennük lévő tiszta fém vas tömege ($m_{\text{metallic iron}}$) és porozitásuk (P%)

Sample	Site	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fe (%)	$m_{\text{metallic iron}}$ (kg)	P (%)	Period*	Datation	Context	Note	Bibliography
		measured		calculated							
1	Klášťov 1**	0.72	4.01	63.9	0.46	26.1	EM	8-9 th century	Moravia, CZ (Vysoké Pole – Klášťov) – early medieval sacral place or a hilltop settlement. Blooms found in hoards via metal detector prospecting.	half	Merta 2019
2	Klášťov 2**	0.95	5.75	79.9	0.76	8.6				half	
3	Klášťov 3**	1.03	4.47	68.1	0.70	20.6				half	
4	Klášťov 4**	3.10	4.49	68.3	2.12	20.4				complete	
5	Klášťov 5**	1.66	3.69	60.9	1.01	30.3				half	
6	Staré zámky u Líšně**	1.45	4.69	70.1	1.02	18.2			Moravia, CZ – hillfort settlement. Blooms found outside the rampart of the outer bailey of the hillfort, via metal detector prospecting. The site is considered a place from which iron production in the nearby smelting centre in the central part of the Moravian Karst was organised (Olomučany), and to which the output of the smelting workshops most likely flowed.	half(?); estimated total weight 2.2-2.3 kg	
7	Olomučany I**	2.15	3.91	63.0	1.36	27.4			Moravia, CZ. Iron production site (98/1). Blooms (2x) found burried in front of a smelting furnace.	complete	

Sample	Site	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fe (%)	m _{metallic iron} (kg)	P (%)	Period*	Datation	Context	Note	Bibliography
		measured		calculated							
8	Lábod-Petesimalom***	9.55	5.03	73.3	7.00	14.8	EM	8-9 th century	Somogy county, HU. Surface find near an excavated iron production site.	wedged	Gömöri 2000; 2018; Török et al. 2017; 2018
9	Pusztakovácsi***	1.97	4.28	66.4	1.31	22.8		10 th -11 th century	Somogy county, HU. Surface find near smelting slag surface finds. Area close to the Somogyfajsz smelting site and in contextual relation (Gömöri 2000: 164, 138).	half	unpublished, Ripl Rónai Museum, Kaposvár, Hungary; site registered: Gömöri 2000: 138
10	Somogyfajsz***	2.45	3.33	57.6	1.41	35.3		middle - end of 10 th century	Somogy county, HU. Iron production site - working pit no. 1, found in front of the smelting furnace no.6. Workspace dated to middle to end of 10th century.	complete	Gömöri 2000: 153-164, fig. 112; 2006; 2018; Pleiner 2000
11	Somogyfajsz***	2.41	3.97	63.5	1.53	26.6				complete	
12	Somogyfajsz***	2.00	4.18	65.5	1.31	24.0	complete				
13	Jakab-hegy (394/8)***	2.43	3.41	58.4	1.42	34.2	EIA- LIA	9 th -6 th or 3 rd -1 st century BC (?)	Baranya county, HU. Shallow pit deposit, hoard (29 blooms) associated with multi-period site - Early Iron Age settlement and burial mounds (Ha C/D) or La Tene (Lt C/D).	complete	unpublished, Janus Pannonius Museum, Pécs, Hungary
14	Jakab-hegy (394/16)***	2.36	4.03	64.1	1.51	25.8				complete	
15	Jakab-hegy (394/15)***	3.59	3.82	62.1	2.23	28.5				complete	
16	Jakab-hegy (394/6)***	3.46	3.93	63.2	2.19	27.1				complete	
17	Jakab-hegy (394/22)***	2.50	4.75	70.7	1.76	17.6				complete	

Sample	Site	m (kg)	ρ (g/cm ³)	Fe (%)	m _{metallic iron} (kg)	P (%)	Period*	Datation	Context	Note	Bibliography
		measured		calculated							
18	Verebce-bérc***	1.29	5.91	81.4	1.05	7.5	EIA	end of the 7 th century – beginning of the 6 th century BC (?)	Bükk Mountains, HU. Surface find, hoard found in 2007 in the area of Early Iron Age hillfort settlement Dédestapolcsány-Verebce-bérc.	slice (two cut surfaces), 1/6 of initial bloom	Finds: Török et al. 2011 Reference to the site: Szabó et al. 2022, Török et al. 2024

*EM - Early Medieval Period; EIA - Early Iron Age; LIA - Late Iron Age

** weight and density present in primary publication

*** measured within this research

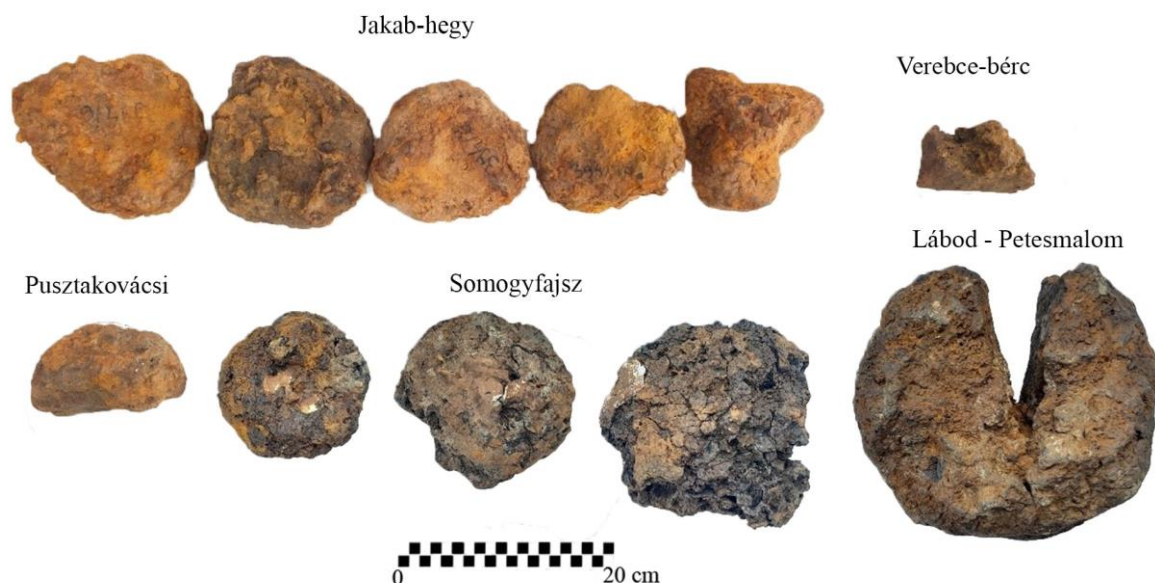


Fig. 10.: Samples of iron blooms from archaeological context dated to Iron Age and Early Medieval period, measured for density

10. ábra: Sűrűségmérésbe bevont régészeti vasbucák (vaskoriak és középkoriak)

Variability in smelting outcomes may reflect either technological choices made by individual workshops or factors that were difficult to control, such as the quality of the ores used. This interpretation is consistent with the generally variable quality of bog iron ores, the type of ore exploited in Somogy County during the Early Middle Ages (Gömöri 2000). Bog ores exhibit naturally variable iron–gangue ratios and may therefore result in variable smelting efficiencies even under otherwise similar operational parameters. This interpretation is supported by experimental smelting studies conducted on bog iron ores from the same production region, those in Somogy County, Hungary, and the Podravina region in Croatia (Karavidović 2020; Karavidović & Brenko 2022) as well as analysis of ores from Early Medieval archaeological contexts in the Podravina region (Brenko et al. 2021).

Discussion

Applicability and Limitations of the Proposed Models

The establishment of characteristic density ranges for varying degrees of refinement provides a valuable means of inferring technological practices employed in the production of iron semi-products. The density measurement can be achieved through a straightforward, simple and non-destructive measurement method based on water displacement (the Archimedes principle), highly applicable on any archaeological find or alternatively through volume calculation via 3D modelling. If combined with more commonly used analytical approaches,

such as visual inspection and/or metallographic analysis of iron semi-products (Bauvais & Fluzin 2009; Galili et al. 2015; Merta 2019; Saage et al. 2018; Török et al. 2018, 2022, 2024; Strobl et al. 2010; Souchopova & Stransky 1999), they could yield comprehensive insights into the technology of iron semi-product production.

However, it must be emphasised that in cases involving lower levels of refinement, the proposed density thresholds should be regarded as somewhat variable. This is particularly evident at the transitional boundaries between the uncompacted and compacted, and heavily compacted and reheated bloom states. Such potential variation is linked to differences in ore composition, smelting parameters, and post-smelting handling – predictably variable within different archaeological contexts. The nature of the ore (primarily quality in terms of iron to gangue ratio) and the smelting process parameters can influence the formation, structural coherence and initial density of the sponge iron, which in turn affects the subsequent efficiency of compaction. Furthermore, the latter can be influenced by the rate at which hammering is applied within the limited timeframe during which the iron sponge remains sufficiently hot and malleable following extraction from the smelting furnace. A higher hammering rate, potentially achievable through the coordinated efforts of multiple smiths – as opposed to the single-person operation employed in experimental reconstructions – could improve compaction efficiency.

Nevertheless, this potential variability should be considered limited to the borderline values of the

proposed density ranges, as each stage of the technological process is inherently constrained by practical and material limitations. For instance, a denser iron sponge – resulting from lower slag inclusion – would typically be less coherent structurally, more brittle, and less malleable, increasing the risk of fragmentation during compaction. It would also cool more rapidly than slag-rich sponge, reducing the window for effective forging and limiting the degree of consolidation achievable without reheating. This practical constraint highlights the ethnographically, historically and morphologically documented use of wooden hammers and softer surfaces (wooden log as an anvil) during the initial stages of bloom refinement (Pleiner 2000). Given the fragility of the bloom upon removal from the smelting furnace, the application of a wooden hammer allows for a gentler, more controlled compaction, thereby reducing the risk of damage and limiting the force and rate of hammering. This, in turn, defines the maximum density attainable prior to reheating, around 5 g/cm³ according to experimental testing. Likewise, the density attainable using a wooden hammer, even during repeated reheating, is limited by its low force transmission, which prevents the expulsion of finer slag and the reduction of smaller internal voids. Archaeological evidence of wooden hammer and a form of anvil made of wood (for instance a log) use is observable in surface texture characteristics and shape of the vast majority of blooms, and the overall density ranges of analysed experimental blooms support the conclusion that significant reduction in porosity and moderate levels of purification – up to approximately 6 g/cm³ (c. 82% iron, 5% porosity) – could be achieved using wooden hammers and base surface such as wood during reheating and refinement. The majority of published and examined archaeological blooms from across Europe – irrespective of chronological period, geographic region, or cultural context – exhibit densities between 3.5 and 6 g/cm³ (Pleiner 2000; 2003; Merta 2019; Espelund 2000; Dungworth 2015). These values are consistent with the density range observed in experimental material (**Table 1 and 2**) and case study archaeological samples (**Table 5**), extending from unprocessed iron sponge through to compacted and, ultimately, blooms heavily refined with wooden hammer – implicating applicability of the classification model. The boundary density value of around maximum of 6 g/cm³ achieved by wooden hammer corresponds quite well with archaeological data, implicating similar mechanical constraints in archaeological records, i.e. an applicable boundary condition.

The model for calculating iron content based on density (Eq. 4), derived from the purification of both experimentally produced blooms and an archaeological sample, yielded an approximation with a high coefficient of determination ($R^2 \approx 0.95$),

indicating strong model reliability and predictive accuracy by explaining the vast majority of the variability observed. Quantification of iron and porosity from digital cross-section surface analysis of semi-products at different stages of refinement falls within the compositional ranges for iron sponges, blooms, and bars estimated by Equation 4, thereby providing independent validation of the density-based model. Image-based cross-section measurements offer an alternative approach for estimating iron, slag, and porosity contents; however, given the inherent heterogeneity of phase distribution within blooms, reliable results can only be obtained when a complete cross-section of the object is analysed. Small samples, typical of metallographic examination, may therefore yield biased results due to localised compositional heterogeneity. If used as a standard comparative reference, the bulk semi-product density-based model offers a valuable tool for archaeometallurgical studies. However, it should be noted that the model is somewhat limited. For greater accuracy, it would be worthwhile to determine the correlation (Eq. 4) separately for different size/weight and density ranges on multiple samples. As is, the proposed model demonstrates very good predictive accuracy and is best suited for application to archaeological finds of iron sponges and blooms weighing between 1 and 5 kg, with densities ranging from 3–6 g/cm³, as well as more heavily purified semi-products with densities reaching nearly the pure iron density up to approx. 7.7 g/cm³. The model may be extended to heavier blooms, as a standard comparative reference, bearing in mind that a slight underestimation of iron content is possible.

The correlation of the model with archaeological samples is further supported by the inclusion of one archaeological bloom in the experimental forging (**Table 2: 6***, **Figure 7**). The basic structural characteristics (relative slag and porosity ratio), present in the cross-section of the sample, are quite similar to refinement category presumed by density measurement, the compacted blooms. However, among experimentally forged samples, the archaeological specimen exhibits the greatest mass loss per unit of density increase between the initial compacted bloom stage and the final forged bar (**Fig. 9a: 6 and 6***, **Table 3**). The somewhat higher mass loss per density observed in the archaeological sample may reflect its different state of preservation relative to the experimentally produced blooms. While the sample still exhibits typical characteristics of bloomery iron semi-product, classified here as compacted, its surface is affected by a stratified corrosion layer, and internal corrosion may have weakened its structural integrity. The corrosion layer on buried archaeological iron artefacts, as observed on the outer surface of the sample (**Figure 5**), typically consists

of goethite (α -FeO(OH)), magnetite (Fe_3O_4), lepidocrocite (γ -FeOOH), and maghemite (Fe_2O_3) minerals (Neff et al. 2005; Pons 2002). In many archaeological contexts, burial deposits such as clay, sand, and other mineral particles become embedded within the corrosion layer (Neff et al. 2005). All of these minerals have densities lower than the metallic iron – the iron oxy(hydroxide)s between 3.3–4.3 g/cm³ (goethite) and 4.9–5.7 g/cm³ (magnetite) and other even lower in the case of clayey and sandy minerals (Anthony et al. 2016). The presence of this composite corrosion layer may therefore alter both the measured mass and volume of the bloom, resulting in a lower apparent density when treated as a three-phase material (metallic iron, slag, air). During purification, corroded and structurally weakened areas are prone to cracking and flaking. As a consequence, both non-metallic corrosion products and structurally compromised metallic iron may be lost more readily (burn-off), contributing to elevated mass loss values. Accordingly, the mass loss relative to density increase is somewhat higher than that observed in experimental samples, where surface corrosion is absent and structure is more stable (**Table 3: 6***). Nevertheless, the mass loss percentage value of the archaeological bloom (**Table 3**) falls within the broader range defined for compacted blooms refined into bars with a density of approximately 7.5 g/cm³ (21–40%). When compared directly with an experimental sample of similar initial density (**Table 3: Sample 1 vs. Sample 6***), the higher burn-off loss of the archaeological specimen may also be partially attributed to differences in initial mass. Larger blooms (as experimental sample 1) tend to exhibit lower proportional metallic iron losses owing to a smaller specific surface area exposed during forging. This size/mass-dependent effect, should be understood as universal, is applicable to both experimental and archaeological material. Taken together, the data indicate that experimentally produced samples can replicate structural or compositional characteristics observed in the archaeological bloom, such as high initial slag content, refinement level, or comparable microstructural porosity. It also implies that post-depositional changes do not significantly alter the bloom's properties, allowing for a high degree of agreement and comparability.

Limited variability should be expected in estimation of the mass of semi-product at any given density (Eq. 5) and the metallic iron mass of an archaeological object. These values in principle reflect the yield attainable under historically plausible post-reduction conditions. In the experimental purification of blooms into bars, a power hammer was employed, allowing for short forging cycles (4–5 reheats) and minimal iron loss through burn-off, taken as a boundary state for further calculation. However, the power hammer

simulates the output of two or three highly skilled smiths working in unison. If, instead, production involved a single smith or a less skilled team, the number of reheats required would likely increase due to limited deformation and slag expulsion per cycle, resulting in greater burn-off iron losses. This factor remains difficult to quantify experimentally and is subject to variation between individual archaeological contexts. While experimental quantification can provide generalised standards – such as estimates of metallic iron yield mass ($m_{\text{metallic iron}}$), iron content (Fe%) or mass of a semi-product at any given density ($m_{\text{semi-product}}$) – it cannot yield precise predictions and account for the inherent variability of past production conditions, shaped by latent and often unquantifiable factors such as the number of smiths, their skill level, and specific working practices.

Conclusion

The experimental testing of post-reduction techniques of refinement yielded a stage-based classification system, based on density measurement that can be applied reliably to archaeological iron semi-products. Since the density of an iron semi-product reflects its internal structure, including porosity and slag inclusion, it can be used to calculate the percentage of iron (Fe%) and metallic iron content ($m_{\text{metallic iron}}$) within a given semi-product as well as potential mass of a semi-product at any given density (m_{sp}).

The predictive models for stage-based classification and calculation of iron content can be taken as proxies for evaluation of some key archaeological questions:

Degree of refinement and techniques applied

Different types of iron semi-products may have varying densities depending on post reduction refinement characteristics. Based on comparative experimental data these can inform of technique, degree of refinement and forgeable iron content: (1) $\rho = 3\text{--}4\text{ g/cm}^3$ – uncompacted iron sponge, product of direct reduction, containing between 55% and 64% of forgeable iron; (2) $\rho = 3.5\text{--}5\text{ g/cm}^3$ – compacted iron bloom, hammered with wooden tools while hot (subsequent to extraction from the smelting furnace), containing between 59% and 73% of forgeable iron; (3) $\rho = 5\text{--}6\text{ g/cm}^3$ – reheated and purified bloom, using wooden hammer on a wooden anvil, containing 73–82% of forgeable iron; (4) $\rho \approx 7.3\text{--}7.7\text{ g/cm}^3$ – iron bar, further reheated and hammered with iron hammer on an iron anvil, containing ca. 93–98% of iron. The density of an object increases in correlation with the degree of purification achieved during the refining process, ultimately approaching – but remaining slightly below – the density of pure iron (7.87 g/cm³) in the case of iron bars. Densities over

$6 - \approx 7.3 \text{ g/cm}^3$ can be regarded as heavily refined (iron hammer and anvil) iron blooms or bars, depending on other morphological factors, containing between 82 and 93% of iron.

For archaeological samples, density measurements may be slightly affected — typically lowered — by corrosion, especially if untreated. However, analysis of experimentally forged bloom from archaeological context indicates that these discrepancies are not highly altering and align well within established predictive models. As a result, predictive modelling of both density and iron content remains valid and applicable.

Technological efficiency and quantification of iron produced

Density data, when combined with experimentally derived iron content prediction ($\text{Fe}\% = 9.24\rho + 27.2$), allow for estimation of mass of the semi-product at any density, ranging from the uncompacted iron sponge through post-reduction processing to an iron bar ($m_{\text{semi-product}} = m_0 \cdot (9.24\rho_0 + 27.2) / (9.24\rho + 27.2)$). This, in turn, can inform further reconstructions of post-reduction and even reduction efficiency and resource management (e.g. ore-to-metal ratio) as well as quantification of total iron available for further processing.

Functional assessment and comparative analysis

The density of iron semi-products (e.g. sponge, compacted or consolidated bloom, bar) varies according to their stage of refinement in the *chaîne opératoire*. If degree of purification is taken as a technological choice, it may reflect the intended function of an object. Calculating density and iron content can help identify functional standards and support comparative studies across sites and time-frames, revealing technological choices, cultural practices, socio-economic conditions, and resource management.

Non-destructive evaluation

Especially when obtained via Archimedes principle, 3D scanning or gas pycnometry in combination with water displacement, density offers a non-invasive method to assess internal integrity and gain additional information about the object, without cutting or sampling rare or fragile artefacts.

Application of density measurement and iron content calculation transforms iron semi-products from descriptive typologies into quantifiable technological indicators. It bridges the gap between material remains and the decisions, knowledge, tradition and evolution as well as constraints that shaped past metallurgical practices.

Contribution of authors

Ádám Thiele Writing - Original Draft, Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing – Review & Editing, Visualization. **Tena Karavidović** Writing – Original Draft, Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing – Review & Editing, Visualization.

Acknowledgements

This work was supported by the Croatian Science Foundation through the project Cultural Landscapes of Iron Metallurgy During Antiquity and the Early Middle Ages in the Sava and Drava River Basin – KulturFER [IP-2022-10-1846].

Bibliography

ANTHONY, J.W., BIDEAUX, R.A., BLADH, K. W. & NICHOLS, M.C. (2016): Handbook of mineralogy. Mineralogical Society of America, Chantilly, VA, USA.
<http://www.handbookofmineralogy.org/>, accessed 20.07.2025.

BAUVAIS, S. & FLUZIN, P. (2009): Archaeological and archeometrical approaches of the chaîne opératoire in iron and steelmaking: methodology for a regional evolution study. In: ROUX, V. & ROSEN, S. (eds.), *Techniques and people: anthropological perspectives on technology in the archaeology of the proto-historic and early historic periods in the southern Levant*, Paris: De Boccard, 157–178.

BERRANGER, M. & FLUZIN, P. (2011): From raw iron to semi-product: quality and circulation of materials during the Iron Age in France. *Archaeometry* **54/4** 664–684.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00641.x>

BIELENIN, K. (1977): Einige Bemerkungen über das altertümliche Eisenhüttenwesen im Burgenland. *Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* **59** 49–62.

BRENKO, T., BOROJEVIĆ ŠOSTARIĆ, S., RUŽIČIĆ, S. & SEKELJ IVANČAN, T. (2020): Evidence for the formation of bog iron ore in soils of the Podravina region, NE Croatia: geochemical and mineralogical study. *Quaternary International* **536** 13–29.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.11.033>

BRENKO, T., BOROJEVIĆ ŠOSTARIĆ, S., KARAVIDOVIĆ, T., RUŽIČIĆ, S. & SEKELJ IVANČAN, T. (2021): Geochemical and mineralogical correlations between the bog iron ores and roasted iron ores of the Podravina region, Croatia. *Catena* **204** 105353.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105353>

- BUCHWALD, V.F. (2005): Iron and steel in ancient times. *Historisk-filosofiske Skrifter* **29** The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen, 352 pp.
- CREW, P. (1991): The experimental production of prehistoric bar iron, *Journal of the Historical Metallurgy Society* **25** 21–36.
- CREW, P. & CREW, S. (1994): The experimental production of bar iron. In: MANGIN, M. (ed.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen* (Besançon conference 1993): 175–176.
- DILLMANN, P., FLUZIN, P. & URTEAGA, M. (1997): Refining of an experimental Biscayan bloom from Agorregi. In: CREW, P. & CREW, S. (eds.), *Early ironworking in Europe: archaeology and experiment. Abstracts of an international conference symposium, Plas Tan y Bwlch, 19–25 September 1997*, 73–75. Maentwrog: Plas Tan y Bwlch, Snowdonia National Park Study Centre.
- DUNGWORTH, D. (2015): Iron bloom. In: ATKINSON, M. & PRESTON, S.J. *Heybridge: A Late Iron Age and Roman settlement, Excavations at Elms Farm 1993–5*. Internet Archaeology 40. <http://dx.doi.org/10.1114/ia.40.1.dungworth1>
- ESCHENLOHR, L. & SEERNELS, V. (1991): Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU/Suisse). *Cahier de archéologie jurassienne* **3** Porrentruy: Office du Patrimoine Historique, Société Jurassienne d'Émulation, p. 144.
- ESPELUND, A. (2013): *The evidence and the secrets of ancient bloomery ironmaking in Norway – with an extension to the beginning of the industrial period*. Trondheim: Arketype Forlag, 319 pp.
- GALILI, E., BAUVAIS, S., ROSEN, B. & DILLMANN, P. (2015): Cargoes of iron semi-products recovered from shipwrecks off the Carmel coast, Israel. *Archaeometry* **57/3** 505–535. <https://doi.org/10.1111/arc.12077>
- GÖMÖRI, J. (2000): Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannoniában: Magyarország iparrégészeti lelőhelykatasztere I. Vasművesség. Sopron: Soproni Múzeum, p. 373.
- GÖMÖRI, J. (2018): Technológia-kontinuitási kérdések a somogyi vasvidék „izzó” vasbucái fényében. In: VARGA, M. & SZENTPÉTERI, J. (eds.), *Két világ határán. Természet- és társadalomtudományi tanulmányok a 70 éves Költő László tiszteletére*. Kaposvár: A Kaposvári Rippl-Rónai Múzeum Közleményei **6** 77–87.
- JOOSTEN, I., JANSEN, J. & KARS, H. (1998): Geochemistry and the past: estimation of the output of a Germanic iron production site in the Netherlands. *Journal of Geochemical Exploration* **62** 129–137.
- KARAVIDOVIĆ, T. (2020): Močvarna željezna ruda – eksperimentalno testiranje utjecaja prženja rude na postupak taljenja i krajnji proizvod. *Annales Instituti Archaeologici XVI/1* 143–152.
- KARAVIDOVIĆ, T. & BRENKO, T. (2022): Nature of the deposit and properties of bog iron ore at the Kalinovac – Hrastova Greda. *Prilozi Instituta za arheologiju u Zagrebu* **39/2** 219–261. <https://doi.org/10.33254/piaz.39.2.5>
- KERBLER, L.J. & KREINZ, A. (2013): Ein frühmittelalterlicher Eisenverhüttungsplatz in Dörfel, Burgenland. *Beiträge zur Mittelalterarchäologie in Österreich* **29** (Nearchos Sonderheft 20) 105–114.
- KERCSMÁR, Zs. & THIELE, Á. (2015): A belsősomogyi gypvasércek genetikája és geokémiai jellemzői, földtani és archeometallurgiai megközelítés alapján. *Földtani Közlöny* **142/1** 53–71.
- MEHOFER, M. (2010): Archäologische und technologische Untersuchungen zur Eisenverhüttung und Verarbeitung in der awarischen Siedlung von Zillingtal/Burgenland. In: HEROLD, H. (ed.), *Die awarische Siedlung von Zillingtal* **80/2** 207–234. Eisenstadt.
- MERTA, O. (2019): Znamé nálezy raně středověkých železářských naseknutých lup z území Moravy. *Archeologia Technica* **30** 4–13.
- NEFF, D., DILLMANN, P., BELLOT-GURLET, L. & BERANGER, G. (2005): Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: characterisation of the corrosion system. *Corrosion Science* **47** 515–535. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.029>
- PLEINER, R. (2000): Iron in archaeology: the European bloomery smelters. Praha: Archeologický ústav Akademie věd České republiky, p. 400.
- PLEINER, R. (2003): European iron blooms. In: NORBACH, L. (ed.): *Prehistoric and medieval direct iron smelting in Scandinavia and Europe: aspects of technology and science*. Aarhus University Press, Aarhus, 183–189, 305–307.
- PLEINER, R. (2006): *Iron in archaeology: early European blacksmiths*. Praha: Archeologický ústav. Akademie věd České republiky, p. 261.
- PONS, E. (2002): Long term corrosion of iron and non-alloy or low-alloy steels in clay soils: physico-chemical characterisation and electrochemical study of archaeological analogues. Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval (France). Unpublished PhD thesis, p. 252.
- SAAGE, R., PEETS, J., KULU, P., PEETSALU, P. & VILJUS, M. (2018): Metallographic investigation of iron blooms and bars from the

smithy site of Käku, Estonia. *Fennoscandia Archaeologica* **XXXIV** 46–58.

SEKELJ IVANČAN, T. & KARAVIDOVIĆ, T. (2021): Archaeological record of iron metallurgy along the Drava River. In: SEKELJ IVANČAN, T. & KARAVIDOVIĆ, T. (eds.), *Interdisciplinary research into iron metallurgy along the Drava River in Croatia – The Transfer project*. Oxford: Archaeopress Publishing Ltd., 43–91.

<http://doi.org/10.32028/9781803271026-4>

SENN, M., GFELLER, U., GUÉNETTE–BECK, B., LIENEMANN, P. & ULRICH, A. (2010): Tools to qualify experiments with bloomery furnaces. *Archaeometry* **52/1** 131–145.

<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2009.00461.x>

STROBL, S., HAUBNER, R. & KLEMM, S. (2010): Metallographic investigations of a historical bloom found in Styria – Austria. In: LONGAUEROVA, M. (ed.), *Acta Metallurgica Slovaca Conference, Special Issue, 14th International Symposium on Metallography 1*: 655–660.

SOUCHOPOVÁ, V. & STRÁNSKÝ, K. (1999): Raněstředověké středoevropské polotovary železa, *Archeologia technica* **11** 22–30.

SOUCHOPOVÁ, V. (1986): Hutnictví železa v 8.–11. století na západní Moravě. Studie Archeologického ústavu Československé akademie věd v Brně XIII/1. Praha: Academia, p. 109.

SZABÓ, G.V., BARCSI, M., BÍRÓ, P., TANKÓ, K., VÁCZI, G. & MOGYORÓS, P. (2022): Investigations of an Early Iron Age siege. Preliminary report on the archaeological research carried out at Dédestapolcsány–Verebce-bérc between 2020 and 2022. *Dissertationes Archaeologicae ex Instituto Archaeologico Universitatis de Rolando Eötvös Nominatae*, Ser. 3, **10** 277–299.

<https://doi.org/10.17204/dissarch.2022.277>

THIELE, Á. & TÖRÖK, B. (2011): Vastermelés, vaskihozatal és a kohósított gypvasércek minimalisan szükséges vastartalma az avar és Árpád-kori vasbucakohászatban. *Archeometriai Műhely* **IV/4** 345–350.

TÖRÖK, B., BARKÓCZY, P., KOVÁCS, Á., KÖLTŐ, L., FEHÉR, A. & SZÓKE, B.M. (2018): Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata. *Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat*, Budapest **151/3** 1–4.

TÖRÖK, B., BARKÓCZY, P. & SZABÓ, G. (2022): First archaeometrical approach to the examination of Iron Age ferrous fragments from Regöly and Bükkábrány (Hungary): the inception of iron working in the Carpathian Basin? *Interdisciplinaria Archaeologica – Natural Sciences in Archaeology* **XIII/2** 143–154.

TÖRÖK, B., KOVÁCS, A., BARKÓCZY, P., KÖLTŐ, L., FEHÉR, A. & SZÓKE, B.M. (2017): A complex comparative study of early medieval split blooms from Pannonia. International Conference *Iron in Archaeology, Bloomery Smelters and Blacksmiths in Europe and Beyond*, Prague, 30 May–1 June 2017, poster presentation.

TÖRÖK, B., BARKÓCZY, P. & SZABÓ, G. (2024): Huge amounts of iron raw material from the Early Iron Age settlement of Dédestapolcsány–Verebce (N-Hungary) – a preliminary archaeometallurgical study. *Archeometriai Műhely* **XXI/4** 285–294.

<https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2024-023>

TÖRÖK, B., KOVÁCS, Á., P., FISCHL, K., BARTHA, Zs., THIELE, Á. (2011): Vasdepók problémája Mályinka-Verebce bérce, *Archeometriai Ankét*, Budapest, Hungary, poster presentation.

https://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/Poszter+rovidcikk/Poszter_AA2011.jpg. Accessed 20.07.2025

TYLECOTE, R.F., AUSTIN, J.N. & WRAIGHT, A.E. (1971): The mechanism of the bloomery process in shaft furnace. *Journal of the Iron and Steel Institute* **209** 342–363.

KÖZLEMÉNYEK

*



1. ábra: Antoni Judit (Vargyas 2021)

Fig. 1.: Judit Antoni (Vargyas 2021)

Elhunyt Antoni Judit (1951-2026) •

A short obituary for Judit Antoni (1951-2026), archaeologist and ethnographer

Abstract

In Judit, we have lost a researcher who made a lasting impact in the fields of both prehistoric archaeology and ethnography. Her professional career started in the museums of Transdanubia (W-Hungary), in Székesfehérvár and Tata. Among her excavations, Csabdi-Télizöldes (1978-1984) is standing out as a settlement of the Lengyel culture with central significance, similar to Aszód-Papi földek. Later on she joined large surface rescue excavations in Hungary and abroad, as well as performed significant fieldwork in Oceania. She has also elaborated collections of several researchers of those regions, stored in Hungarian museum collections.

Judit was an excellent photographer and drawer. Her works are not simply illustrations but important scientific communications on material culture, which have also stood their ground independently in exhibition circumstances. Probably her most important and lasting contributions to both fields were the presentations, exhibitions reaching an audience far beyond the circle of professionals.

Archaeometry Workshop is planning to dedicate one of its forthcoming issues to her memory.

•doi: [10.55023/issn.1786-271X.2026-004](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2026-004)



2. ábra: A „Sziklától kőbaltáig” vándorkiállítás egyik tablója a gyűjteménykezelői szobában (Puskás József felvétele)

Fig. 2.: One of the tableaux of the exhibition „From rock to axe” (courtesy and photo by József Puskás)

Az archeometria lényege az inter- sőt multi-diszciplinaritás, „megtámogatván” más szempontú megközelítéssel/vizsgálatokkal, a történeti – elsősorban régészeti – jelenségeket, adatokat. Ez többnyire természettudományos, anyagtudományi megközelítést jelent. Kevesebb figyelem jut mostanában a hagyományos, humán társadalmi tudományokra – így a néprajz, nyelvészet és a különféle történeti „segédtudományok” felé.

Antoni Judit személyében olyan kutatót veszítettünk el, aki mind az ősrégészet, mind a néprajz területén maradandót alkotott. Munkásságát ezért is minden bizonnyal több oldalról fogja összegezni, értékelni a kutatás. Erre már korábban is történt kísérlet (**1. ábra**, Vargyas 2021).

Szakmai pályáját dunántúli megyei múzeumokban kezdte, így a székesfehérvári István Király Múzeumban, később Tatán, a Kuny Domonkos Múzeumban. Ásatásai közül kiemelkedő Csabdi-Télizöldes (1978-1984) anyaga, amely Aszód-Papi földekhez hasonlóan a lengyeli kultúra központi jelentőségű települése. Az ásatást jelentős mértékben önkéntesek munkájára alapozta, és a feltárás mellett technológiai kísérleteket is végeztek, így pl. kőbaltá elő-

állítás és használata tárgyában (Antoni 1990, 1997). Éveken keresztül dolgozott külföldön (Svájcban), nagy felületű megelőző feltárásokon, amikor Magyarországon ezt a műfajt még kevéssé ismerték. Később a nagy felületű megelőző feltárások hazai programjaiban is jelentős részt vállalt.

Judit kitűnően fotózott és rajzolt. Ilyen irányú munkái nem egyszerűen illusztrációk, hanem a tárgyi anyag – anyagi kultúra lényegét bemutató tudományos közlemények voltak. Fotói önállóan is megállták a helyüket kiállítási körülmények között is.

Talán legfontosabb és legmaradandóbb munkái a pillanatnak szóló kiállítások voltak. Ez az első olvasatra ellentmondásos megállapítás a világhoz és a tudományhoz való különleges hozzáállást takar - elmesélni, bemutatni mindazt, amit tudunk, a természeti népekről és ezek kutatóiról, valamint a velük azonos vagy hasonló körülmények között élt őskori emberek mindennapjairól. Nekem két alkalommal is megadatott, hogy ezen kiállítások megszületését belülről – munkatársként, illetve „kurír-ként” élvezhessem. Az első a nagy sikerű „Sziklától kőbaltáig...” kiállítás volt, ami 2016 és 2021 között legalább 6 helyszínen (Szekszárd, Wosinszky Mór Múzeum; Szombathely, Savaria Múzeum; Veszprém, Laczkó Dezső Múzeum; Kaposvár, Rippl Rónai Múzeum; Marosvásárhely, Maros megyei Múzeum; Nyíregyháza, Jósa András Múzeum) adott élményt és ismereteket a neolitikum „névadó” leletéről és annak néprajzi, modern kori, de ősi technikájú párhuzamairól. Szombathelyen a kiállítást a fiatal látogatók öröme kiállítási multi-média kvíz is gazdagította. A kiállítás jelentős mértékben a Magyar Nemzeti Múzeum Ebenhöch gyűjteményére alapozódott, ezért alkalmam volt megbízott muzeológusként végig követni annak útját, a kiállítás felépülését a különböző helyszíneken. Minden múzeumban Judit beépítette a múzeum saját őskori anyagát a kiállításba, helyszínenként megújítva, felfrissítve azokat és egyben közelebb hozva a helyi látogatók szívéhez. A kiállítás veszprémi helyszínének maradványai ma is tovább élnek (2. ábra). A másik kiállítás, ahol együtt dolgoztunk, a 2019-ben Magyarországon megrendezett obszidián konferencia tiszteletére Sárospatakon bemutatott kiállítás volt, ahol az ikonikus nyersanyag földtani, régészeti és néprajzi jelentőségét, adatait mutattuk be (3-4. ábra, Sárospatak 2019 kiállítás fotói).



3. ábra: 2019. évi nemzetközi obszidián konferencia (IOC) és kiállítás Sárospatakon. A kiállítás rendezése. A képen Antoni Judit és Váradi László, kiállításrendező. (T. Biró K. felvétele).

Fig. 3.: IOC – International Obsidian Conference and exhibition at Sárospatak in 2019. Arrangement of the exhibition with Judit Antoni and László Váradi (Photo by K.T. Biró).

Munkásságát terveink szerint az *Archeometriai Műhely* egy következő számában szeretnénk részletesen is bemutatni.

T. Biró Katalin

Magyar Nemzeti Múzeum

tbk@ace.hu

Felhasznált irodalom

VARGYAS G.: Antoni Judit 70 éves. *Néprajzi Hírek*, 2021/2 60–65.

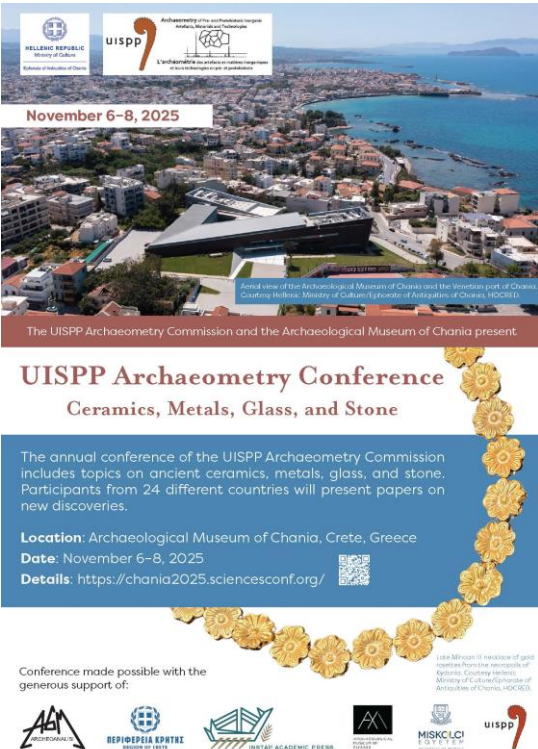
ANTONI J. (1990): Neolitikus eszközkészítés és használat. (A lengyeli kultúra eszközanyaga, valamint annak technológiai párhuzamai Melanéziában). *Kandidátusi disszertáció*. Budapest, 248 p.

ANTONI J. (1997): Ethnoarcheológiai kísérletek. I. Csiszolt kőeszközök készítése és használata. *Komárom-Esztergom Megyei Önkormányzat Múzeumainak Közleményei* 5 57–75.



4. ábra: 2019. évi nemzetközi obszidián konferencia (IOC) és kiállítás Sárospatakon. Részlet a kiállítási multimédiából (Antoni J. felvételének felhasználásával)

Fig. 4.: IOC – International Obsidian Conference and exhibition at Sárospatak in 2019. Details from the exhibition multimedia (using the photo by J. Antoni)



November 6-8, 2025

The UISPP Archaeometry Commission and the Archaeological Museum of Chania present


UISPP Archaeometry Conference

Ceramics, Metals, Glass, and Stone

The annual conference of the UISPP Archaeometry Commission includes topics on ancient ceramics, metals, glass, and stone. Participants from 24 different countries will present papers on new discoveries.

Location: Archaeological Museum of Chania, Crete, Greece
Date: November 6-8, 2025
Details: <https://chania2025.sciencesconf.org/>

Conference made possible with the generous support of:



Konferencia beszámoló

Nemzetközi archeometriai konferencia a kréti Chaniában •

A UISPP (International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences, <https://uispp.net/>) szervesen anyagok és technológiák archeometriájával foglalkozó nemzetközi komissziója (Commission on Archaeometry of Prehistoric and Protohistoric Inorganic Artefacts, Materials and their Technologies, <https://uispp.net/en/commissions/archaeometry>) 2025-ben ünnepelte alapításának tizedik évfordulóját. Mint minden évben, természetesen ekkor is megszervezte az immár hagyományosnak mondható, komisszió ülésel egybekötött, éves nemzetközi szakmai konferenciáját, ez alkalommal november 6-8. között Kréta szigetén, Chania városában (<https://chania2025.sciencesconf.org/?lang=en>).

A konferencia helyszíne a középkori, velencei stílusú óvárosáról híres Chaniában 2022-ben megnyílt, teljesen újszerű régészeti múzeum épülete volt (**1. ábra**), amely a város egyik történelmi részén, Chalepa külvárosában található, és csodálatos kilátást nyújt a város nagy részére, különösen a kikötőre és tengerpartra. A múzeum őskori részlegének állandó kiállítása főként a paleolitikumtól kezdve a neolitikumon és a minószi kultúrán átívelő leleteket mutat be, de természetesen a jellegzetes római kori és középkori tárgyak is megtalálhatók.

•doi: [10.55023/issn.1786-271X.2026-005](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2026-005)

Mint minden évben, a komisszió tagjainak előadásai mellé olyan prezentációkat vártunk a világ minden tájáról, amelyek fókuszában az őskortól a középkori protohistorikus kultúrákig és civilizációkig terjedő időszakok szervesen anyagai (kő, kerámia, üveg és fém), illetve a hozzájuk rendelhető korabeli technológiák állnak. Természetesen kiemelt figyelmet kaptak a kapcsolódó archeometriai vizsgálati módszerek, az analitikai eredmények, teljesítmények minősége.

A konferencia egyik alapvető szakmai célja volt, hogy világszerte jól ismert szakemberek bemutassák, a szervesen anyagokkal kapcsolatos általános problémák hogyan oldhatók meg különböző analitikai, szerkezetvizsgálati módszerek alkalmazásával, illetve melyek a legújabb módszertani eredmények e téren. Másrészt természetesen esettanulmányokat vártunk ősi kőbányákról, lelőhelyekről, különböző kontextusokból származó kőeszközök gyártásáról, kerámia- és üvegleletek vizsgálatáról – beleértve a színezésükhöz használt pigmenteket, festékeket is –, illetve a hozzájuk tartozó készítési technikák tanulmányozásáról, rekonstrukciójáról, valamint valamennyi történelmi fém előállításáról, olvasztásáról, alakításáról, ötvöztetéséről és öntéséről áruklódó maradványok elemzéséről, fémműhelyek maradványairól.



1. ábra: A Chaniai Régészeti Múzeum épülete és kiállítása

Fig. 1.: The building and exhibits of the Archaeological Museum of Chania



2. ábra: A konferencia résztvevői
Fig. 2.: The conference participants



3. ábra: Az ősi Kydonia maradványainak részlete Chania-ban
Fig. 3.: A detail of the ruins of ancient Kydonia in Chania

További cél volt – a legújabb eredmények és tapasztalatok megosztása mellett – a különböző vizsgálati módszerek és technológiák összehasonlítása, illetve a vizsgálati és adatbázis-protokollok további szabványosítási lehetőségeinek feltárása.

Mindezek tükrében a program 48 szóbeli előadást és 8 poszteres prezentációt tartalmazott. A 15 perces előadások előadói között valamennyi kontinens számos országa képviseltette magát (**2. ábra**), részben köszönhetően az online kapcsolatnak és közvetítésnek is. A három nap alatt 11 szekcióban zajlott a konferencia, az egyes anyag típusok beosztásában, de szándékosan elkerültük a párhuzamos szekciókat. Természetesen a helyszín miatt a görög-kréai fókuszú témák voltak relatíve a legnagyobb számban, az előadások mintegy negyedét tették ki. Magyar részről *Török, B., Bubonyi, T., Barkóczy, P., Kovács, Á., Grazi, F., Cantini, F., Scherillo, A.: Comparison of the Results of the Examinations of LBA Bronze Objects Obtained by Destructive and Non-destructive Methods*, című előadás hangzott el, a szerzőcsapat legfiatalabb kutatója, Bubonyi Tamás előadásában, aki egyébként a konferencia honlapját is készítette, a nevezéseket és regisztrációkat kezelte, a Miskolci Egyetem részéről.

Hazai és határon túli magyarok közös prezentációjaként említendő *Pánczél, Sz.P., Bitay, E., Csavdári, A.A., Nagy, Zs.Sz., Bíró, S.R.Zs.: Iron Arrowheads from the Roman Military Site of Călugăreni / Miháza* című posztere, ahol a szerzők romániai múzeumokból, részben ottani, magyar

érdekeltségű egyetemről, illetve a Pázmány Péter Katolikus Egyetemről jöttek.

A konferencia programjához tartozott még az archeometriai nemzetközi komisszió ülése, amelyen a tagsági kérdések mellett, többek között döntés született egy immár szintén hagyományos archeometriai szekció szervezéséről a UISPP 2026-ban, Poznańban tartandó XXIst World Congress-én, amelynek főszervezője e sorok írója, a komisszió elnöke.

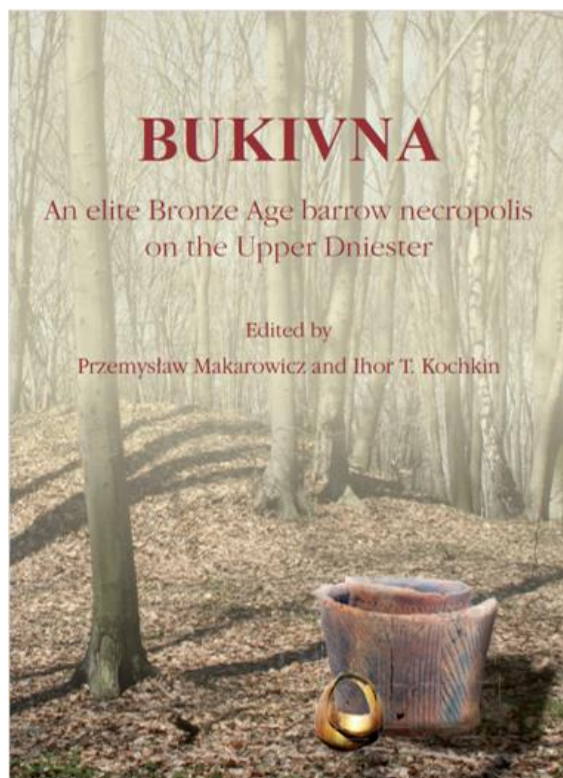
A konferencia előadásainak publikálása kapcsán a rendezők azt tervezik, hogy mintegy 20-22 cikk a *Materials and Manufacturing Processes* c. Q1 minőségű, neves szakmai folyóiratban, míg az előadások másik része – főként a kréai, illetve környékbeli témák vonatkozásában – a *UISPP Journal* tematikus számában jelenik meg, 2026-ban.

Az igen jó hangulatú három nap szakmai kirándulásokkal zárult, amelyeken a házigazda kollégák idegenvezetésével megtekinthettük Chania óvárosát, a velencei stílusú történelmi kikötőjét, a parton a Kréai Tengerészeti Múzeumot és a Firkas-erődöt. Ezekon kívül az ásatást vezető régész vezetésével végig kalauzolták a résztvevőket az ősi Kydonia romjai között a Kastelli-hegyen (**3. ábra**).

Török Béla

Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet

bela.torok@uni-miskolc.hu



Könyvismertetés

MAKAROWICZ, Przemysław & KOCHKIN, Ihor T. (eds.): *Bukivna. An elite Bronze Age barrow necropolis on the Upper Dniester.*

Archaeologia Bimaris Monographies vol. 10. Poznań, 2025. p. 374 •

Bevezetésként két mellőzhetetlen gondolattal kezdem ezt a könyvismertetést. Az érintett és feldolgozott Bukivna középső bronzkori, a Komarow kultúrához sorolt halomsíros temető Nyugat-Ukrajnában, a Felső-Dnyeszter medencéjében található. A kötet a 2009–2016 közötti régészeti terepmunkákat és a feldolgozás eredményeit mutatja be, de felhasználja az 1937-ben megismert adatokat is. Folyóiratunk szempontjából a természettudományos elemek emelendők ki, amelyeket lejjebb szándékomban áll bemutatni. A tudományos projekt a poznańi Adam Mickiewicz Egyetem Östörténeti Intézete és a kijevi Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia Régészeti Intézete, valamint a Vaszyl Stefanyk Kárpátaljai Egyetem Etnológia és Régészet tanszéke együttműködésének keretében valósult meg. A monográfia a Poznańi Egyetem Alapítványa és a Lengyel Nemzeti Tudományos Központ támogatásainak köszönhetően jelent meg. A monográfiát sokkal korábban kellett volna kiadni, de az Ukrajna ellen indított

orosz háború gyökeresen megváltoztatta az eredeti kiadási tervet. Ezzel rá is tértem a második gondolatra, miszerint Lengyelország fantasztikus gazdasági fejlődést produkált az Unióba lépése óta. Gondoljunk csak az ezredforduló magyarországi „lengyel piacaira”. Napjaink lengyel gazdasági prosperitásából pedig következik a tudomány, s abban a régészettudomány támogatása, akár egy másik országban is. A szerkesztői előszóban ki is fejezik reményüket, hogy egy győztes ukrán háború utáni folytatódó tudományos együttműködést remélnek. Itt nem mehetek el szó nélkül amellett, hogy ne utaljak arra: nem egyedülálló esetről van szó. Ugyanis például Kakucs–Turján 2018-ban megjelent monográfiáját is a Lengyel Nemzeti Tudományos Központ finanszírozta, ahogy a balti borostyánkővek 2023-ban publikált magyarországi feldolgozását is. Mindezek az esetek pedig hazánk régészettudományának meglehetősen lehangoló anyagi hátterét igazolják.

A továbbiakban, periodikánk profiljának megfelelően nem a bukivnai halomsírmező régészeti jelenségeire és azok tárgyi emlékeinek régészeti elemzésére fókuszálok, de elismeréssel mutatom be a halomsírmezővel összefüggő archeometriai kutatások lényegét. Ezek „*Szakértői elemzések*” főcímmel a kötet záró harmadát képezik.

A könyv *I. fejezetét* (p. 9–28) azonban, amelyet Iwona Hildebrandt-Radke neve fémjelez, nem szabad elfelejtenem. Ennek az az egyszerű magyarázata, hogy az ilyen bevezetés néha hiányzik a mi őskori lelőhelyeinket tárgyaló, kevés monográfiánkban (pl. Pilismarót–Basaharc, regölyi tumulus). Hildebrandt-Radke helyezi el a régészeti lelőhelyet a földrajzi tájban, Ivano-Frankivszki megye területén, a Dnyeszter felső folyásának jobb partján, a Dél-Opelei hegységben (Fig. I. 13). Természetföldrajzi szempontból a terület az Elő-Kárpát-síkság, más néven Kárpátalja (Keleti-Kárpátalja), és az Elő-Kárpát-síkság határvidékén fekszik. A halmok lapos, 330 és 350 m tengerszint feletti magasságú hegylejtőn emelkednek. Vázolja a szűkebb régió tektonikai folyamatait, leírja geológiáját, vízrajzát, éghajlatát és növényzetét, de még a halomsírmező területének talajtakaróját (Fig. I. 17) is megadja. Márpedig mindezek a temető létrehozó emberi közösség szempontjából egyáltalán nem közömbös szempontok.

Ide kívánczik még a magnetométeres felmérést tárgyaló *III. fejezet* (p. 39–58), amelyet Mateusz Cwaliński, Jakub Niebieszczański, Cezary Bahyrycz és Przemysław Makarowicz jegyeznek. Manapság, az autópályák megelőző feltárásait követően egyre elterjedtebb ennek a módszernek a használata Magyarországon is. A temetkezések relatív és abszolút időrendjét a kerámia és fém-mellékletek (bronz, arany), valamint a radiokarbon

•doi: [10.55023/issn.1786-271X.2026-006](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2026-006)

mérések alapján az *V. fejezet* egy részlete tartalmazza (p. 188–201).

A számunkra, illetve a folyóirat iránt érdeklődő tudományos közösség számára fontosabb feldolgozások közül az első a *VII. fejezet* (p. 221–266), amelyben Mariusz Kowalewski a *kovaköveket* tárgyalja. 2010, 2012, 2013-ban és 2014-ben hat halmot vizsgáltak meg, s ezekben összesen 2094 db kovakövet találtak. A vizsgált halmokba, egy kivételével a középső bronzkorban (Kr. e. 1800–1500) temetkeztek. Az 1/II/2013-as halom egy kora bronzkori (Kr. e. 2400–2200), a Zsinórdíszes kerámia kultúrája tevékenységének eredménye. A halom temetkezéséből előkerült kovakövek (92 db) mellett a korábbi paleolitikus és neolitikus/eneolitikus leletek dominálnak (1071 db 92,1% = VII. 1. táblázat). A könyvben természetesen csak a halom temetkezésével összefüggésbe hozható 92 darabot és a középső bronzkori Komaróv kultúra idejéből 948 példányt tárgyal (VII. 2. táblázat). A változatos leletanyagból a nyílhegyek, a kések és a sarlók vágóélei különösen érdekesek számomra (VII. 3. táblázat, Fig. VII. 3). Ezek 10–20%-án égésnyomok látszanak, amelyek talán a temetési rituállal hozhatók összefüggésbe. Szinte az összes nyersanyag helyi, ún. volhíniai, kréta korú kovakő. Mellettük néhány, szintén kréta kori fekete változat is előfordul.

Tatyana Hoshkoa *VIII. fejezetben* (p. 267–270) a *fém tárgyak* mérési eredményeit ismertette. A viaszveszélytől elvárt eljárással készített, meglehetősen korrodált tűk és csüngők sprektálanálízise éppen úgy megtörtént, ahogy az arany hajkarikáé (Lockenring). Az előbbieket a 2/I/2010, 2012. halom női temetkezésének önbronzai. A 3/I/2012. halomból származó arany ékszer (Fig. IV. 50.) főalkotói: 75,25% arany és 23,39% ezüst, 1%-nyi réz, továbbá nyomokban vas, bárium és ón. Vagyis elektrumról beszélhetünk.

Tetiana Slobodian és Anita Szczepanek a *IX., anthropológiai fejezetben* (p. 271–280) tették közé munkájuk eredményeit. Én ezt a fejezetet a szakértői munkák sorában az első helyre tettem volna, hiszen az ember tevékenységének tárgyai, hatásai és eredményei csak őt magát követhetik. Slobodian a két tüvel és csüngővel a 2/I/2010, 2012 halomsírba, a hamvasztást követően eltemetett 20–35 éves nője esetében meg tudta állapítani azt is, hogy egyes testrégiói milyen hőfokon égtek (Fig. IX. 7). Szerencsés elosztásban maradt meg ugyanis a 342 grammot nyomó 581 db csonttöredék. A 6/I/2014 halomban egymáshoz közel két iker, fahalottasház volt. Az 1. számúból három gyerek (a legidősebb 7–15 éves), a 2. számúból öt ember maradványait határozta meg Szczepanek. Az „A” részben egy 20–35 éves férfi és egy 4–5 éves gyermek, míg a „B” helyen egy 30–40 éves férfi, alatta pedig egy 20–35 éves talán nő és egy 3 éves korában elhunyt gyermek égett csontjai voltak. Az

utóbbi gyermek mellett két, faragott csont tű töredéket találtak (Fig. IV. 81).

A halmok anyagának *litológiai* és *geokémiai* leírását Iwona Hildebrandt-Radke és Waldemar Spychalski a *X. fejezetben* adják (p. 281–306). Eszerint a sírhalmokat a környező löszös altalajból építették, ami destabilizálta a talajtakarót és a növényzetet. Megállapításaik közül számomra, a régész számára a legizgalmasabbak, hogy a mikrogeokémiai elemzések során az edényekben magas foszfát tartalmat mutattak ki. A bronzokat tartalmazó sírok földjének esetében pedig cink és réz nyomelemeket detektáltak. A hasonló jellegű magyar szakirodalomból Vészto–Bikeri kora rézkori településének és a Sajó melletti Zsolca, hatalmas, szkíta kori ikerhalmának talajtani feldolgozására hivatkoznak. Ezek irodalmi gyűjtésük esetlegességére utalnak, hiszen Pető Ákos és Barcsi Attila Oxfordban kiadott, az Alföld kurgánjait tárgyaló munkáját nem kerülhették volna meg.

Öt halomból gyűjtött 52 db *faszénminta* feldolgozásának eredményeit Tomasz Stepnik a *XI. fejezetben* közli (p. 307–312). A minták közel felét, egyúttal a legtöbbet, 22 darabot a 6/I/2014. halomból emelték ki. Számomra ez a legizgalmasabb síremlék, hiszen arra két fából ácsolt iker halottasházat alapoztak, amelynek a teteje és egyik oldala nyitott volt (Fig. IV. 61a-b). Ezekben találtak meg a fent már bemutatott 8 emberhez tartozó maradványokat. A temetési szertartás során a halmok sír építményeit szándékosan felgyújtották, így ebben a halomban is. Ennek ellenére én arra következtetek, hogy a hozzátartozók és a közösség tagjai bármikor (?) láthatták őket és követhették, ahogy az időjárás és a madarak, a ragadozók teszik a dolgukat. Úgy vélem a sírok faépítményeinek felgyújtása akár a testek elhelyezését követően később is megtörténhetett. Egyébként a halom közepén is állt egy faszerkezet, s annak északi oldalán edények voltak, amelyeket koncentrált fatöredékeken tártak fel. Értelmezhetem ezeket étel felajánlásoknak egy asztallapon? – teszem fel a kérdést. A halomban több helyen tűzrakásra utal a fatöredékek állaga. A sír 22 mintája több száz fatöredékének mindegyike tölgy (*Quercus* sp.), amelyek állaguk miatt dendrokronológiai vizsgálatra alkalmatlanok voltak. Két halom esetében a tölgy mellett égerfát is találtak, ami a tölgyhöz képest egy rendkívül értéktelen fa. Ez a képlet a tölgy szándékos kiválasztását sejteti pl. értéke, de a hozzá fűződő későbbi hiedelmek és sajátos tabuk miatt is. A felgyújtás, a tűz, az élők és holtak világa közötti átmenet lezárásaként értelmezhető vajon, ahogy ezt a szerző teszi? Ugyanakkor megjegyzi, hogy a tűz a halmok különböző szintjeiben jelen volt, végig kísérté annak építését, de az eredeti humusz szinten is jelen volt. Vagyis temetési és későbbi, a halottak tiszteletére rendezett ismétlődő szertartásokat

feltételez. Ezek nagyon fontos észrevételek, amely konzekvenciákat – németbányai halomsírokban tett megfigyeléseim alapján – jómagam is levontam.

Joanna Rennwanz a *XII. fejezetben* (p. 313–316) az *archeobotanikai* analízisnek csupán a negatív eredményéről adhatott számot, ugyanis a négy halomból kiemelt földmintákban mindössze egyetlen magmaradványt lehetett meghatározni. Ez a 2, 0,5 és 0,2 mm-es szitasoron leiszapolt 14. számú mély tálban (p. 72; Tab. IV.1. 9; IV.18.1.10) talált árpszem (*Hordeum vulgare*) volt a 1/I/2010. halomból.

A *XIII. fejezetben* (p. 317–322) 17 db megvizsgált kerámiatöredék állati és növényi eredetű ételekre utaló szerves maradványairól Joanna Kałużna-Czaplińska és Angelina Rosiak adnak számot. Az identifikálás alapja a kromatográfias eljárás, amellyel a lipid frakcióból kimutatható zsírsavakat vizsgálták. Az edények többségében növényi eredetű étel lehetett, amelyek között a magvakat és a dióféléket vélik dominánsnak. Sajnálatos, hogy feldolgozásuk nem tartalmazza az edénytöredékek és a halmok jelenségeinek összekapcsolását, de mindenféle erre irányuló keresésem a kötet egészében sikertelen volt.

Zhanna M. Matviishyna és Oleksandr H. Parkhomenko feldolgozásukban (*XIV. fejezet*: p. 323–346) a kora bronzkori, a Zsinórdíszes kerámia kultúrájához tartozó 1/II/2013. és a Komarów kultúrához sorolt 2/I/2010, 2012. halom talajmintá révén a *talajképződési folyamatokat* vizsgálták referenciaárkok segítségével. Az utóbbinál a rétek és réti erdős tájak megjelenését, valamint egy sötétszürke, vastag humuszszint kialakulását írták le a magas réti gyepek alatt, a mainál hűvösebb és kontinentálisabb éghajlaton. Amikor az éghajlat a szubboreális időszak lehülési maximuma miatt kissé hűvösebb és kontinentálisabb volt, mint ma. A Zsinórdíszes kerámia kultúrája előtt, a kora bronzkort megelőző időszakban a vizsgált területet bükkös-gyertyános erdők foglalták el, amelyek a barna színű és telített erdőtalajok megjelenését eredményezték. A Zsinórdíszesek idején ezt a tájat vegyes réti erdő váltotta fel, amely az erdőssztyepp zóna északi részén gyakori erdőtípusok egyike. A sötétszürke podzolos talaj jellege az erdő természetes eltűnésére vagy emberi tevékenységek miatti erdőirtásra utal. Helyesen feltételezik, hogy a sírhalmokat erdőtisztásokon emelték. Az uralkodó körülmények kedveztek az emberi létezésnek: a föld termékeny volt és művelhető, míg a környező erdők fát, gombákat és bogyókat adtak. Az étrendet vadászattal és halászattal is ki lehetett egészíteni. Továbbá a talaj könnyű mechanikai összetétele kedvezett a mezőgazdaságnak, mivel a földművelés nem igényelt sok erőfeszítést. Az erdőirtott területeket pedig legeltetésre is lehetett használni. Megjegyzem: az erdőket szintén.

Mirosław Makohonienko és Monika Panfil a *XV. fejezetben a növényzet holocén kori változását* mutatják be a természeti és az emberi kulturális hatásának összefüggésében (p. 347–369) A halomsírműzötől csak viszonylag távol, 26 km-re északnyugatra és 27 km-re délre sikerült palinológiai vizsgálatra alkalmas fúrásponokat találni. E kötetben csak az egyik, a régészeti lelőhelytől északnyugatra, Halicstól 4 km-re északra és a Komarów kultúra névadó lelőhelyétől 10 km-re északkeletre található egy folyó holtágába 648 cm-ig mélyített zavartalan magfúrás feldolgozását adják közre. A 160 [4660±110 BC] és 265 cm-es [5875±115 BC] mélységből vett 14C mintákat vették csak figyelembe, mivel a 366 cm-ről kiemelt túl régi dátumot adott (Fig. XV.9). Velük egyetértve csak további radiokarbon adatokkal lehetséges a mag kronológiáját és az üledékképződés sebességét pontosítani. Egyébként mindkét koradat a bukviai halomsírműző létezési idejét több mint 2000 évvel előzi meg. Az ezt követő palinológiai adataik ezért kortalanul „lebegnek”. Régészeti megközelítem szerint a legfontosabb eredményeik az alábbiak: 1.) a kora holocénben minden valószínűség szerint erdőssztyepp létezett, nagyrészt erdővel borított területen. Ekkor mezolitikus vadászok és gyűjtögetők barangoltak a régióban. 2.) A lombohullató erdők csökkenése Kr. e. 5800 után megindult, ami a neolitikus és eneolitikus társadalmak tevékenységével lehet összefüggésben. 3.) A litológiai és palinológiai adatok arra utalnak, hogy a holtág vízszintje az előbbi időponttól szintén csökkent. A holocén későbbi szakaszából származó üledékekben a sporomorfaák rossz állapota szárazabb környezetre utal, legalábbis lokálisan. 4.) A Zsinórdíszes és a Komarów kultúra népessége valószínűleg akkor élt és terjeszkedett itt, amikor a felső-Dnyeszter élőhelyei kiszáradáson mentek keresztül. Ez a szelvényben egy pollenszinttel azonosítható.

Három „segédtudomány” beszámolója ismertetésben hosszabbnak tűnhet. Ennek magyarázata egyszerű. Az egyik esetben (a faszénminták kapcsán) a régészeti jelenségek (pl. iker „halottasházak”) szokatlansága, máskor a feldolgozás (talajképződés, palinológia) remek eredményei vagy tanulságai készítettek bővebb kifejtésre.

A könyv esztétikus borítóján az erdőben sírhalmot és jellegzetes tárgyak (arany ékszer, edény) képét látjuk. Természetesen szemlélésére csak pdf formában volt lehetőségem. Így azonban lehetővé vált, hogy a december második felében megjelent monográfiát a karácsonyt megelőző napokban letölthettem a netről és bemutathatom az érdeklődőknek.

Ilon Gábor
régész

ilon.gabor56@gmail.com

Irodalom

BONDÁR M. (2015): *The Late Copper Age Cemetery at Pilismarót-Basaharc. István Torma's excavations (1967, 1969–1972)*. Institute of Archaeology, Research Centre for the Humanities, Hungarian Academy of Sciences; Archaeolingua, Budapest, 381 p.

ILON G. (1996): A késő halomsíros – kora urnamezős kultúra temetője és tell települése Németbánya határában. Das Gräberfeld und Tell der Späthügelgräber–Frühurnenfelderkultur in der Gemarkung Németbánya. *Pápai Múzeumi Értesítő*, **6** 89–208.

PETŐ, Á. & BARCZI, A. eds., (2011): *Kurgan Studies: An environmental and archaeological multiproxy study of burial mounds in the Eurasian steppe zone*. BAR International Series 2238, Oxford, 365 p.

SARRIS, A.; GALATY, M.L.; YERKES, R.W.; PARKINSON W.A.; GYUCHA, A.; BILLINGSLEY D.M. & TATE, R. (2004): Geophysical prospection and soil chemistry at the Early Copper Age settlement of Vesző-Bikeri, Southern Hungary. *Journal of Archaeological Science* **31** 927–939.

SZABÓ G. & FEKETE M. (2024): A regölyi pannon tumulus. A vaskori Európa technológiai robbanásának gyökerei I-II. Martin Opitz Kiadó, Budapest, I: 368 p., II: 654 p.

TÓTH, CS. A.; PETHE, M. & HATHÁZI, Á. (2014): The application of earth science-based analyses on a twin-kurgan in Northern Hungary. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **9/1** 11–20.