

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 Mórág 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, $\delta^{18}\text{O}_{\text{p}}$ 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, $\delta^{18}\text{O}_{\text{p}}$ -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 $\delta^{18}\text{O}_{\text{p}}$ 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 izotóppeokémiai módszerek, melyek segítségével széles spektrumú betekintést nyerhetünk a múltbeli közösségek életébe. A csontok és fogak szervesen alkotó karbonáttartalmú hidroxipatit oxigén-, és stronciumizotóp-összetételének vizsgálata lehetőséget kínál az egyének és közösségek mobilitási mintázatainak feltárására. Bár ez a kombinált izotóppeokémiai 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-Rádpuszt, Romtemplom mellett 67/5. lelőhely, Balatonszentgyörgy-Faluvégi dűlő 2. lelőhely, Orosháza, Bónum, Faluhely (Orosháza 10.) lelőhely) összesen 77 egyénén keresztül. A balatonlelle-i késő rézkori sírok esetében a rendhagyó temetkezési szokások és gazdag mellékletek ellenére mindkét elemzett egyén helyi származású volt, életük során nem végeztek izotóppeokémiai 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 csapadékvizét (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 stabilizotópjá 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,

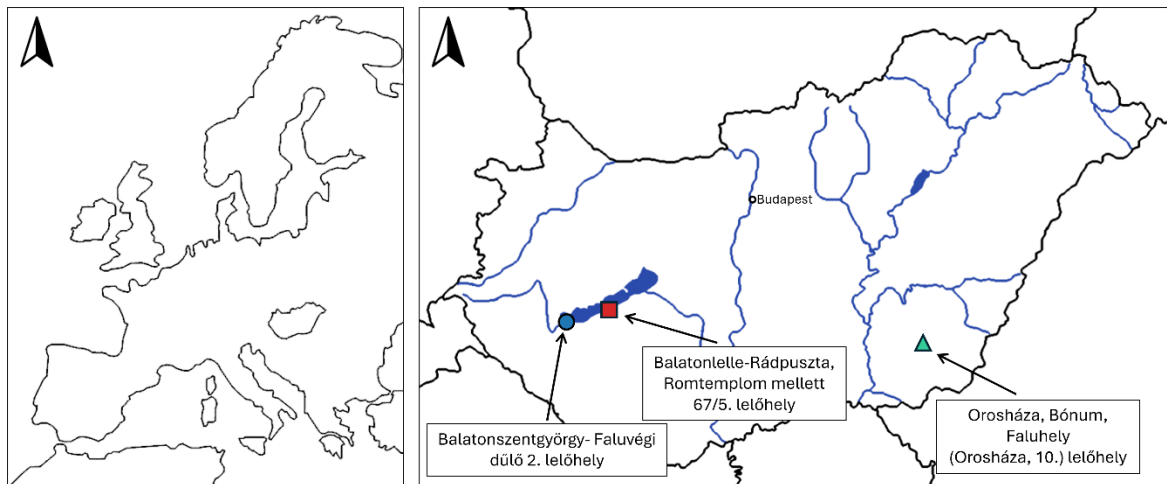
hiszen a hasonló eredetű, a Föld köpenyéből feltörő magma megszilárdulásából képződő kőzeteknek hasonló lesz a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya is. A Balatonfelvidéki és nógrádi bazaltok $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya 0,7037 és 0,7042 között (Embey-Isztin et al. 1993), a németországi Eifel 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. Érdekes 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 előfordulású „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-összetételei vizsgálatához a feltárások Gugora et al. (2018, 2022) alapján történtek. A finom porrá (180 μm) őrlt 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).

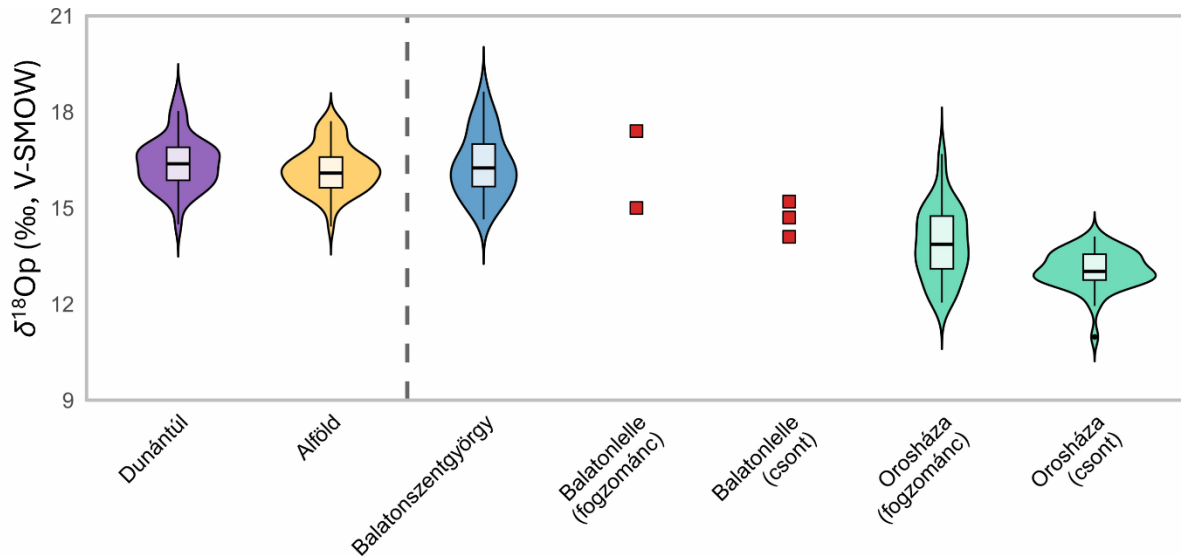
A stronciumizotóp-vizsgálatokhoz a mintaelőkészítés Gugora et al. (2022) alapján történt. A fogzománc minták mechanikai tisztítás után 1 M-os ecetavas kezeléssel (diagenetikus karbonát eltávolítása) estek át. Ezt követően háromszori milliQ vízzel való öblítés után 60 °C-os szárítószekrényben száradtak 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 ismételt 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

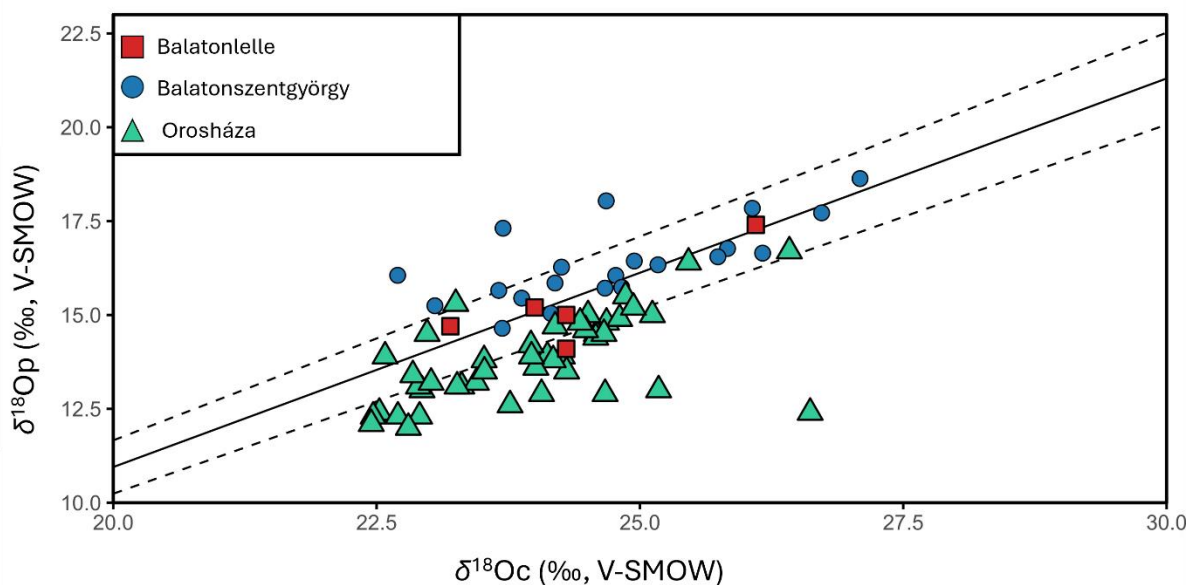
Balatonlelle

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-összetételei 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.



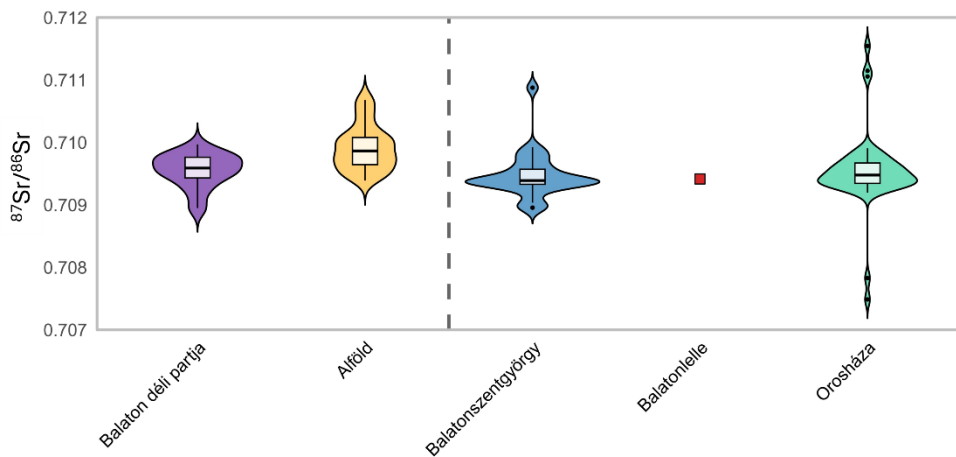
2. ábra: A vizsgált egyének fogzománcából és csontmintájából mért foszfát-oxigénizotóp-összetételek ($\delta^{18}\text{Op}$, ‰, V-SMOW) összehasonlítása Depaermentier et al. (2020a) által publikált dunántúli és alföldi értékekkel. A hegedűdiagramok külső kontúrja az adott csoport $\delta^{18}\text{Op}$ 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.



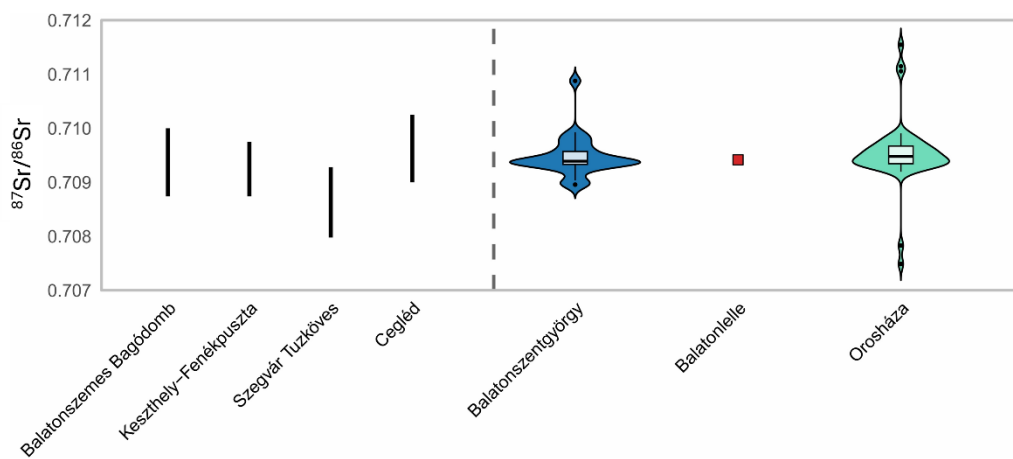
3. ábra: Fogzománc foszfát ($\delta^{18}\text{Op}$) és karbonát ($\delta^{18}\text{Oc}$) oxigénizotóp-összetételek a három különböző lelőhelyről a két érték között fennálló egyensúlyi vonal mentén (Chenery et al. 2012).

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 becült 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 becült 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.

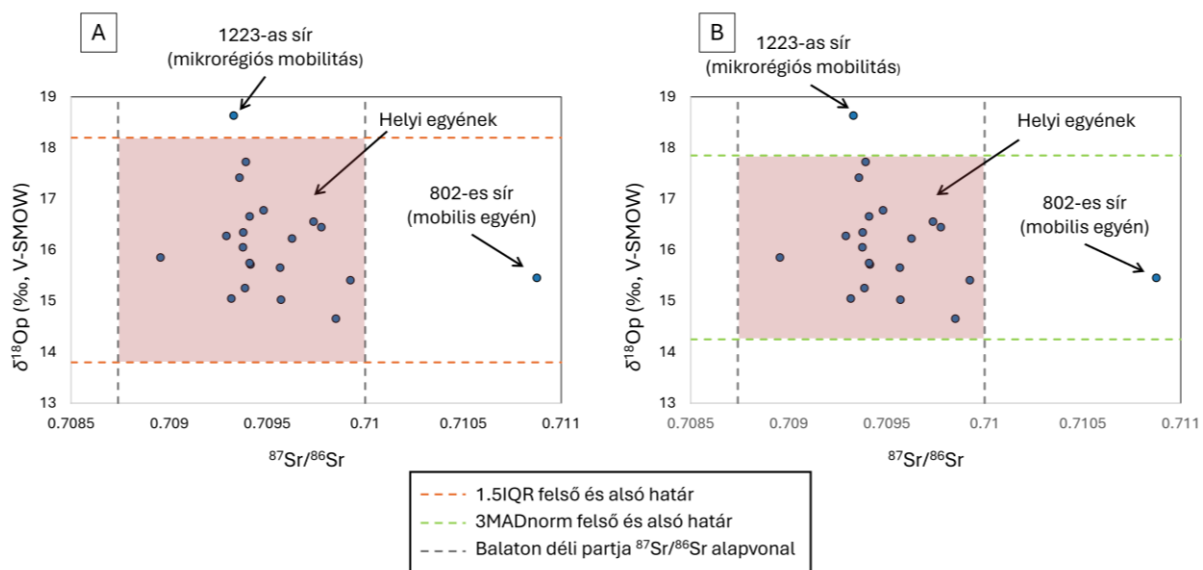
A balatonszentgyörgyi késő rézkori temetőből vizsgált egyének közül négy esetben (768, 794, 1214, 1196) lehetett kimutatni a foszfátból és karbonátból mért $\delta^{18}\text{O}$ értékek között fennálló egyensúlytól való eltérést (**3. ábra**). E négy esetben az egyensúlyi vonaltól való eltérés oka a 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.

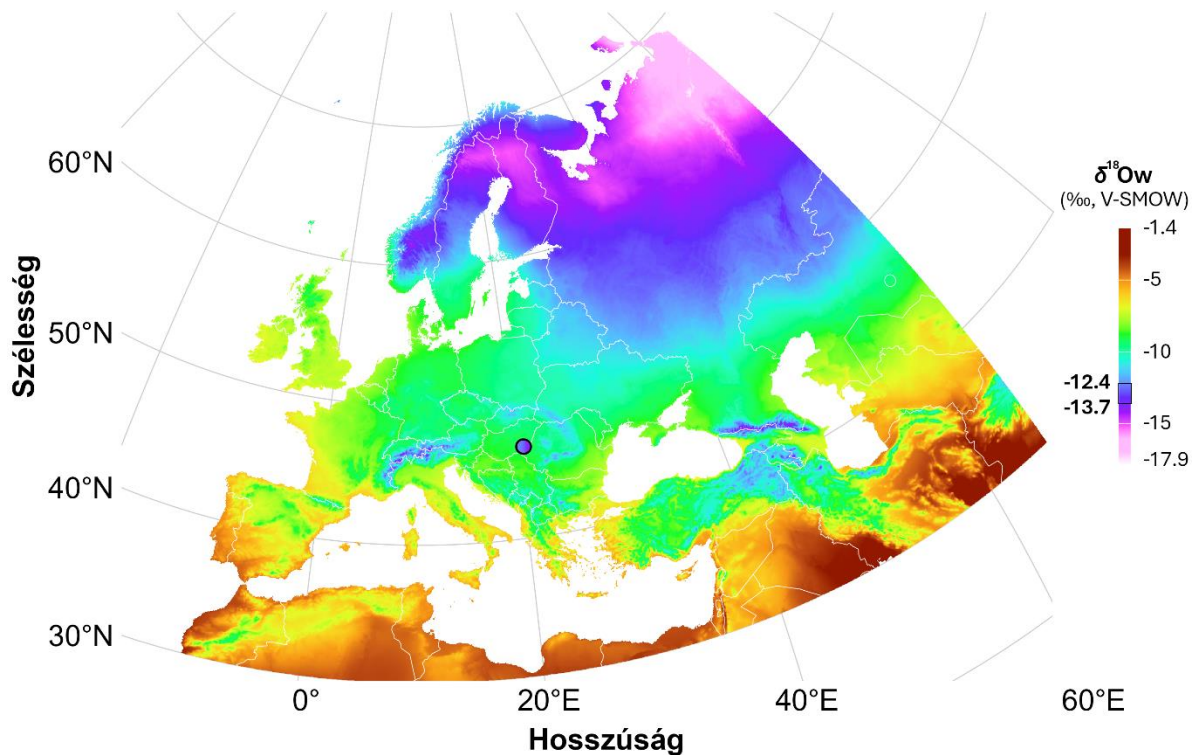
Nagyfokú egyezés figyelhető meg a Hernád-völgyi stronciumizotóp-adatok (Depaermentier et al. 2020a) és a 802-es egyén $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értéke között. Ennek magyarázata, hogy a Hernád kárpáti eredetű, nagy kiterjedésű hordalékkúpot épít (Gábris & Nádor 2007), így az azon képződött talajokba 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).

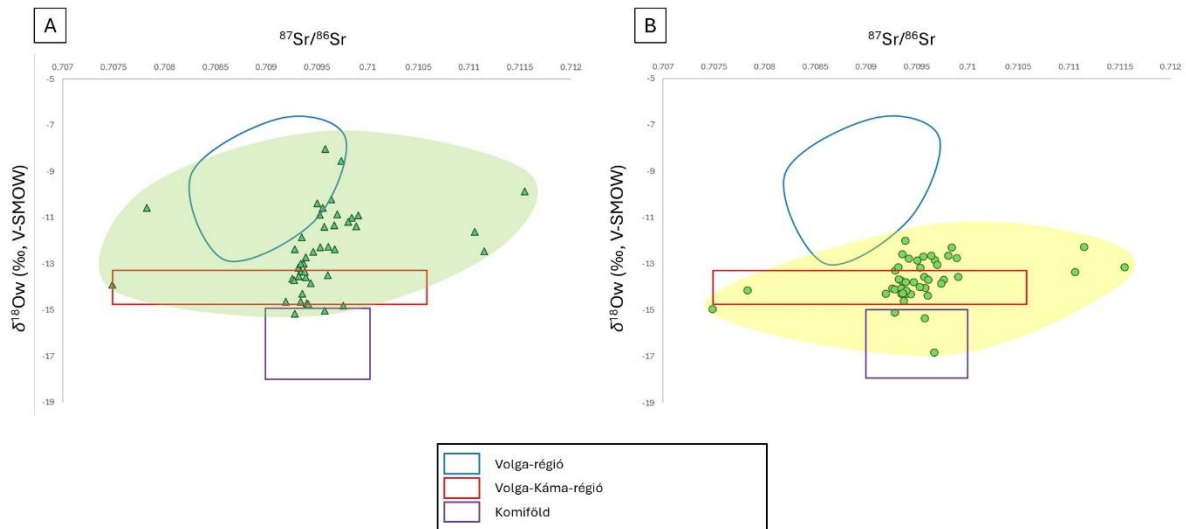
Fig. 7.: The average precipitation $\delta^{18}\text{O}$ distribution in Europe for the period 1960–2016, calculated with the RCWIP2 model (Terzer-Wassmuth et al. 2021). The black circle marks Orosháza, where the mean $\delta^{18}\text{O}_w$ values determined from the tooth enamel and ribs of individuals 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 tekintetűek 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-Rádpusza, 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. & DUBLYANSKY, 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): ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 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-Rádpusztza 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 $^{87}/^{86}\text{Sr}$) 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 Rb⁸⁷-Sr⁸⁷ 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., MAKHORYKH, 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 ^{18}O 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. & KRISTIANSEN, 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)