

Uporaba analiz izotopov v raziskavah skeletnih tkiv v arheologiji

The use of Isotope Analyses in Research on Skeletal tissues in Archaeology

© Tamara Leskovar

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo, Center za interdisciplinarne raziskave v arheologiji; tamara.leskovar@ff.uni-lj.si

© Marta Hlad

Vrije Universiteit Brussel, Archaeology, environmental changes and geo-chemistry (AMGC) & Université Libre de Bruxelles, Department of anthropology and human genetics; marta.hlad@vub.be

© Christophe Snoeck

Vrije Universiteit Brussel, Analytical, Environmental & Geo-Chemistry (AMGC); christophe.snoeck@vub.be

© Carina Gerritzen

Vrije Universiteit Brussel, Analytical, Environmental & Geo-Chemistry (AMGC); carina.gerritzen@vub.be

© Matija Črešnar

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo, Center za interdisciplinarne raziskave v arheologiji; matija.cresnar@ff.uni-lj.si

Izvilleček: Analize izotopov so pomemben in izpoveden vir podatkov o življenju v preteklosti. Omogočajo raziskovanje različnih življenjskih navad, predvsem prehranjevanja, mobilnosti in migracij, morebitne izpostavljenosti fiziološkemu stresu ter raziskovanje okolja in ekologije. Kljub izrednemu prispevku analiz izotopov v arheološkem raziskovanju je treba k analizam pristopiti z zadostno mero razumevanja njihovih prednosti in slabosti.

V prispevku na kratko predstavljamo možnosti in omejitve, ki jih analize izotopov nudijo v kontekstu arheoloških raziskav. V predstavitev so vključeni tudi primeri raziskav, ki neposredno ponazarjajo možnosti uporabe ter izpostavijo pomen arheološkega konteksta za interpretacijo rezultatov. Prispevek se osredotoča predvsem na analize skeletnih človeških posmrtnih ostankov, vendar je na enak ali podoben način mogoče analizirati tudi skeletna tkiva živali.

Ključne besede: analize izotopov, analize izotopov stroncija, skeletni človeški posmrtni ostanki, arheološki kontekst

Abstract: The analysis of isotopes serves as a crucial and revealing source of data about past populations. These analyses offer insights into various aspects of historical life, particularly dietary habits, migrations, and potential physiological stress exposure, as well as environmental and ecological conditions. Despite the significant contributions of isotope analysis to archaeological research, it is important to approach these analyses with a comprehensive understanding of their strengths and limitations.

In this article, we succinctly present the potential and boundaries presented by isotope analyses within the realm of archaeological investigations. Our presentation is complemented by case studies that directly illustrate the practical applications and underscore the importance of considering the archaeological context for interpreting results. While our primary focus remains on the analysis of skeletal human remains, it is worth noting that similar methodologies can be applied to skeletal remains of animals in a comparable fashion.

Keywords: isotope analyses, strontium isotope analyses, skeletal human post-mortem remains, archaeological context

Uvod

Arheološke raziskave prehrane, zdravja ter mobilnosti in migracij ljudi v preteklosti v veliki meri temeljijo na proučevanju bioloških ostankov rastlin, živali in ljudi. Pri tem so poleg makroskopskih in mikroskopskih analiz izredno uporabne analize izotopov, ki so zaradi izpovednosti pogosto vključene v različne raziskovalne postopke. Rezultati tovrstnih analiz namreč omogočajo poglobljeno raziskovanje prehrane, ekologije in okolja v

preteklosti ter skozi arheološki kontekst omogočajo boljše razumevanje tako posameznih oseb kot družbe, njene strukturiranosti in življenjskih navad.

V prispevku so predstavljene osnovne možnosti uporabe analiz izotopov ogljika, dušika, žvepla, kisika in stroncija na skeletnih tkivih, odkritih pri arheoloških raziskavah. Na kratko je predstavljeno teoretsko ozadje ter možnosti, ki jih analize različnih izotopov oz. njihovih kombinacij omogočajo v kontekstu raziskav človeških skeletnih

ostankov iz arheoloških kontekstov. Ker gre za zelo široko področje, se pričujoči prispevek osredotoča na analize izotopov, ki jih izvajamo na človeških skeletnih posmrtnih ostankih. Metodološko sicer na enak način obravnavamo tudi skeletna tkiva živali, kjer pa so lahko zastavljena raziskovalna vprašanja nekoliko drugačna. Poleg tega je v analize poleg skeletnih mogoče vključiti tudi druga tkiva, denimo nohte in lase, ki pa so v arheoloških kontekstih izredno redko ohranjena in v tem prispevku niso obravnavana.

Uporaba analiz izotopov v arheologiji je v nadaljevanju ponazorjena z različnimi primeri, ki nazorno predstavljajo možnosti njihove uporabe v arheologiji. Ker so objavljeni rezultati analiz izotopov, opravljenih na človeških posmrtnih ostankih iz slovenskih arheoloških kontekstov, zelo redki (Nicholls, Koon 2016; Nicholls *et al.* 2020a; Nicholls *et al.* 2020b; Škvor Jernejčič, Price 2020; Armit *et al.* 2023), pri tem uporabimo primere iz tujine.

Teoretsko ozadje

Izotopi so atomi elementa, ki ima enako število protonov in različno število nevtronov. Posledično imajo različni izotopi istega elementa, kot na primer v arheoloških raziskavah najpogosteje uporabljeni stabilni izotopi ogljika (^{12}C , ^{13}C), dušika (^{14}N , ^{15}N), žvepla (^{32}S , ^{34}S), kisika (^{16}O , ^{18}O), stroncija (^{86}Sr , ^{87}Sr)¹ in cinka (^{64}Zn , ^{66}Zn), tudi različno maso in jih je z masno spektrometrijo mogoče ločevati ter kvantificirati. Različni izotopi istega elementa se v naravi pojavijo v različnih količinah (Pollard *et al.* 2007, 230–233). Arheološke raziskave se osredotočajo na razmerje med različnimi izotopi istega elementa (na primer $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), pri čemer je razmerje s pomočjo uporabe referenčnih standardov podano kot δ vrednost (Roberts *et al.*, 2018). Ker stabilni izotopi v organizem pridejo skoraj izključno s prehrano (vključno z vodo), različne skupine živil in živila določenega geografsko-geološkega porekla vsebujejo različna izotopska razmerja ($\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; $\delta^{34}\text{S}$; $\delta^{18}\text{O}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; $\delta^{66}\text{Zn}$). Ker stabilni izotopi s časom ne razpadajo (pri ^{87}Sr pa gre za predvidljiv in izračunljiv razpad rubidij-stroncij), je njihove analize mogoče uporabiti kot sledilnike v bioloških sistemih. Ko organizem zaužije hrano, jo predela in potrebne elemente vgradi v tkiva, pri čemer se ohranijo izvirne razlike v izotopskih razmerjih. Tako so izotopska razmerja v tkivih orga-

nizmov kazalniki zaužitih živil ter omogočajo vpogled v vrsto in izvor hrane in vode, s katero se je organizem prehranjeval (Schoeninger, Moore 1992; Katzenberg, Saunders 2008; Brown, Brown 2011; Malainey 2011; Mays *et al.* 2013; Nehlich 2015; Reitsema 2015;).

Stanje ohranjenosti in primernost tkiv

V arheoloških kontekstih analize izotopov najpogosteje izvajamo na skeletnih tkivih – kosteh in zobeh oz. na kolagenu iz kosti in dentina zob ter na bioapatitu iz kosti in sklenine zob. Vendar so skeletna tkiva po smrti organizma izpostavljena tafonomskim dejavnikom, ki spremenijo njihove fizične in kemične lastnosti. S tem se spremeni tudi izvorna izotopska sestava kolagena in bioapatita v tkivih, kar lahko vpliva na interpretacijo pridobljenih rezultatov (Collins *et al.* 2002; Hedges 2002; Lee-Thorp 2008; Wright, Schwarcz 1996). Z ustreznim razumevanjem osnovne strukture tkiv in tafonomije so bili v različnih raziskavah vzpostavljeni protokoli priprave vzorcev, ki omogočajo, da je v večini primerov tafonomske spremembe mogoče prepoznati in zaobiti, pri čemer pridobljeni rezultati potrebujejo preverbo s pomočjo različnih kriterijev kakovosti (Ambrose 1990; Daniel Bryant *et al.* 1996; Iacumin *et al.* 1996; van Klinken 1999; Lee-Thorp 2008; Nehlich, Richards 2009). Vendar so nekatere tafonomske spremembe preobsežne ali preveč nepredvidljive, da bi jih bilo mogoče zaobiti. Posledično niso vse analize izotopov primerne za vse vrste ali vsa stanja ohranjenosti skeletnih tkiv. Z vidika tkiv je treba ločevati med kostjo in dentinom, ki sta dovzetna za tafonomske spremembe, ter sklenino, ki je zaradi visoke vsebnosti minerala odpornejša. Z arheološkega vidika je treba ločevati med kremacijami in inhumacijami, saj je struktura kremiranih posmrtnih ostankov zaradi izpostavljenosti visokim temperaturam povsem spremenjena. Nekremirani posmrtni ostanki tako zaradi manj izrazitih oz. bolj predvidljivih tafonomskih sprememb omogočajo analize več izotopov, rezultati katerih so osredotočeni predvsem na prehrano in z njo povezane življenjske navade obravnavane osebe oz. skupnosti. Ob primerni ohranjenosti je mogoče izvesti analize organskega ogljika ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), dušika ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) in žvepla ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) iz kolagena (kosti in dentina), analize ogljika ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in kisika ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) iz bioapatita kosti ter analize kisika ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) in stroncija ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) iz sklenine (Bentley 2006; Lee-Thorp 2008). Analiz izotopov stroncija ni priporočljivo izvajati na kosteh (ne na mineralu, ne na kolagenu), saj

¹ ^{87}Sr sicer nastane z razpadom radiogenega rubidija, vendar bo v kontekstu prispevka vključen v izraz analize stabilnih izotopov.

so le-te zaradi diagenetskih procesov lahko kontaminirane (Dahl *et al.* 2001, Snoeck *et al.* 2015). Analize cinka ($^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$) izvajamo na mineralu kosti in sklenine (Jaouen *et al.* 2016). Pri kremacijah z izpostavljenostjo visokim temperaturam pride do izrazitih sprememb v strukturi skeletnih tkiv. Najprej pride do dehidracije, ko kost izgubi vodo, s časom in višjimi temperaturami sledijo dekompozicija zaradi izgube organskih snovi, inverzija z izgubo karbonatov, rast kristalov ter pri izredno visokih temperaturah ($> 1600^\circ\text{C}$) fuzija oz. taljenje mineralnih kristalov (Mayne-Correia 1997). Tako izrazite spremembe onemogočijo analize izotopov, ki obravnavajo enaka vprašanja kot pri inhumacijah. Izjema so analize izotopov stroncija ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) povsem kalciniranih (popolna odsotnost organskega dela) skeletnih tkiv, saj kalcinacija kost spremeni v odporen in za tafonomske spremembe nedovzeten material (Snoeck *et al.* 2015). Na drugi strani je na kremiranih posmrtnih ostankih analize izotopov, predvsem ogljika in kisika, mogoče uporabiti za boljše razumevanje pogrebnih ritualov, saj deloma odražajo okoliščine sežiga trupla (Salesse *et al.* 2021; Stamataki *et al.* 2021).

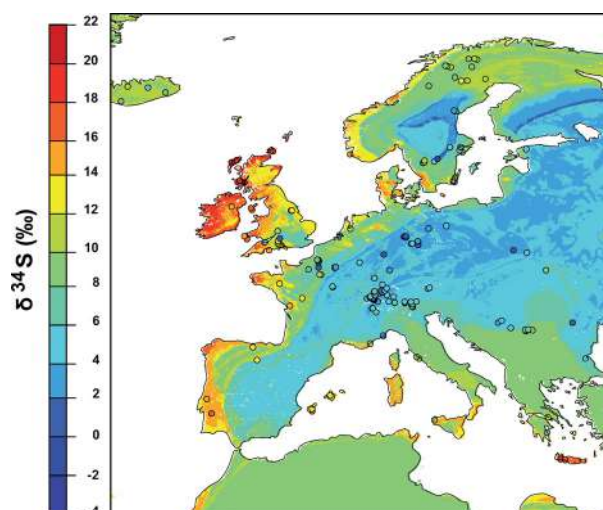
Temeljne vrednosti (baseline)

Pri uporabi rezultatov analiz izotopov so ključnega pomena temeljne vrednosti (angl. *baseline*), ki vzpostavijo izotopske signale za obdobja in območja, ki jih proučujemo. Običajno so pridobljene z analizami izotopov rastlin in živali proučevanega obdobja in prostora, saj odražajo hrano, ki so jo ljudje uživali. Na osnovi rezultatov je mogoče izdelati karte prostorske razprostranjenosti razmerij izotopov (angl. *isoscape*) (Slika 1) (Snoeck *et al.* 2019). Temeljne vrednosti omogočijo razumevanje spremenljivosti vrednosti izotopov raziskovanega časa in prostora (Fernandes, Jaouen 2017) ter so osnova za primerjave in interpretacije rezultatov analiz izotopov človeških skeletnih tkiv.

Raziskovanje prehrane

Pri raziskovanju prehrane v preteklosti najpogosteje uporabljamo analize izotopov oz. delta vrednosti² ogljika ($\delta^{13}\text{C}$) in dušika ($\delta^{15}\text{N}$), v zadnjem času pa tudi žvepla ($\delta^{34}\text{S}$) in cinka ($\delta^{66}\text{Zn}$), izvedene na kolagenu in bioapatitu

2 Delta vrednosti (označene z δ) predstavljajo način izražanja razmerja izotopov elementa v vzorcu glede na standardni referenčni material. Te vrednosti so izražene v enotah na tisočinke.



Slika 1. Prostorska razprostranjenost vrednosti izotopov žvepla ($\delta^{34}\text{S}$) v Evropi, izdelana na osnovi zbira vzorcev človeških in živalskih zob iz različnih obdobj od neolitika dalje (Bataille *et al.* 2021, Fig. 2).

Figure 1. Isoscape of $\delta^{34}\text{S}$ across Europe, developed based on the human and animal teeth from post-mesolithic times (Bataille *et al.* 2021, Fig. 2).

kosti ter dentinu in sklenini zob. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ iz kolagena in dentina kažejo predvsem na količino zaužitih beljakovin (Krueger, Sullivan 1984), medtem ko vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ iz apatita v kosteh in sklenini kažejo na prehransko energijo, pridobljeno iz ogljikovih hidratov in maščob (Katzenberg, Saunders 2008). Zaradi različnih poti fotosinteze vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ omogočajo tudi razločevanje med različnimi vrstami rastlin, denimo med večino žit, zelenjave in sadja (C3 tip fotosinteze) ter travami, koruzo, prosom, čičeriko in sladkornim trsom (C4 tip fotosinteze) (Malainey 2011). $\delta^{13}\text{C}$ vrednosti C4 rastlin so namreč približno 17 ‰ višje v primerjavi z vrednostmi C3 rastlin. Poleg tega imajo morske rastline približno 7 ‰ višje $\delta^{13}\text{C}$ vrednosti kot kopenske rastline. $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti so odvisne predvsem od trofične ravni organizma, saj se s frakcionacijo³ med presnovo dušika $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti zvišujejo. Tako imajo mesojedci višje $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti kot vsejedci in slednji višje kot rastlinojedci (Steele, Daniel 1978; O'Connell *et al.* 2012). Vrednosti $\delta^{34}\text{S}$ v kolagenu odražajo zaužite

3 Beseda »frakcioniranje« označuje proces delitve snovi ali elementov na različne frakcije (delčke) glede na njihove fizikalne ali kemijske lastnosti. Na primer, izotopno frakcioniranje se nanaša na proces, pri katerem se izotopi elementa ločijo glede na njihovo maso med naravnimi kemijskimi procesi ali laboratorijskimi tehnikami.

beljakovine, vendar pa se vrednosti močno razlikujejo v različnih tkivih različnih organizmov. Koncentracije žvepla, denimo, so višje v mišicah kot v kosteh, poleg tega imajo mišice rib višje koncentracije kot mišice goveda (Beveridge 1947; Eastoe 1955; Eastoe 1967). V splošnem je mogoče prepoznati razlike med morskimi in sladkovodnimi organizmi (Leach 2003) ter med vodnimi in kopenskimi organizmi (Privat, O'Connell, Hedges 2007), vendar je pri interpretacijah potrebno razumevanje zunanjih dejavnikov, predvsem oddaljenosti od morske obale, podnebja in geokemičnih lastnosti okolja (Richards, Fuller, Hedges 2001; Nehlich *et al.* 2011; Nehlich 2015). Posledično je treba $\delta^{34}\text{S}$ vrednosti interpretirati ločeno za vsako arheološko in ekološko okolje (Nehlich 2015).

$\delta^{13}\text{C}$ vrednosti iz kolagena, dentina in apatita skupaj z $\delta^{15}\text{N}$ vrednostmi iz kolagena in dentina omogočajo določitev trofične ravni in umestitev organizma v prehranjevalno verigo (rastlinojedci, vsejedci, mesojedci), saj so vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ iz kolagena v organizmu 1–5 ‰, vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ iz apatita pa okoli 11 ‰ višje od vrednosti v hrani, ki jo je organizem zaužil (Slika 2). Poleg tega $\delta^{15}\text{N}$ in $\delta^{34}\text{S}$ iz kolagena omogočijo razločevanje med morskimi, sladkovodnimi in kopenskimi viri beljakovin ter oceno oddaljenosti virov od obale, saj vrednosti $\delta^{34}\text{S}$ z izzvenenjem vpliva morske vode padajo (DeNiro 1984; Richards *et al.* 2001; Passey *et al.* 2005; Katzenberg, Saunders 2008; Nehlich 2015).

Kljub temu, da analize izotopov stroncija ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) večinoma uporabljamo za iskanje izvora hrane, naj bi bila koncentracija stroncija povezana tudi s količino zaužitih živalskih beljakovin. Ker koncentracije Sr z vnosom živalskih beljakovin upadajo, lahko kažejo na večjo oz. manjšo količino živalskih beljakovin v prehrani (Montgomery, Evans, Cooper 2007).

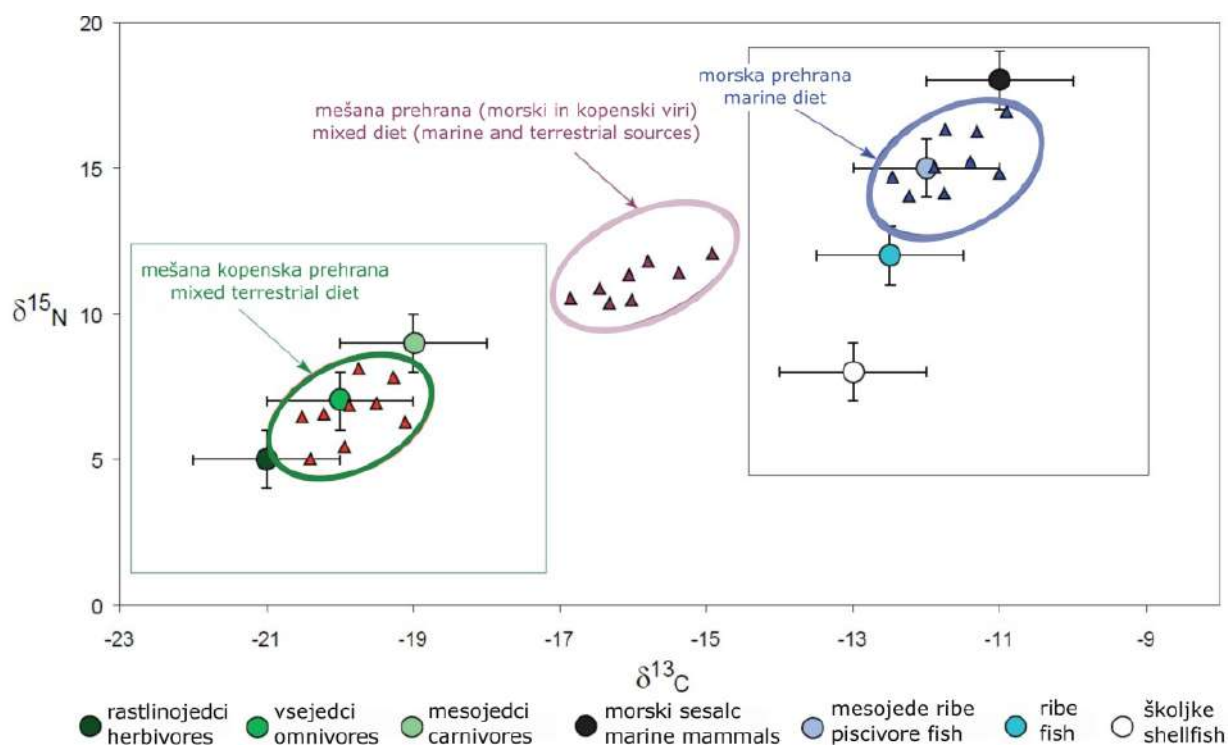
Dodatne informacije o prehrani lahko dobimo tudi z analizo $\delta^{66}\text{Zn}$. Ta pristop je sicer še v povojih, vendar se je že izkazal kot pomemben za boljše razumevanje podatkov, pridobljenih z analizo $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ (Jaouen *et al.* 2022). Analize cinkovih izotopov so še posebej uporabne v primerih, kjer kolagen ni ohranjen (pri vzorcih iz tropskega okolja ali zelo starih vzorcih) (Jaouen *et al.* 2020). Na $\delta^{66}\text{Zn}$ vrednosti v kosteh in sklenini vplivata dva glavna prehranska dejavnika. Prvi je izotopska sestava zaužite hrane, drugi pa proces absorpcije hrane v prebavilih. Fitati v rastlinski prehrani namreč povzročijo večjo absorpcijo težjih izotopov. Tako imajo rastlinojedci

v primerjavi z mesojedci v različnih obdobjih in okoljih do 0,63 ‰ višje $\delta^{66}\text{Zn}$ vrednosti (Albarede *et al.* 2016; Jaouen *et al.* 2016). Različna tkiva v telesu imajo različno izotopsko sestavo cinka, procesi presnove pa vplivajo tudi na absorpcijo cinka pri dojenju. Najvišje $\delta^{66}\text{Zn}$ vrednosti opazimo med dojenjem, znižujejo pa se z uvajanjem goste hrane (Jaouen *et al.* 2020). Pri analizah cinka je treba tudi upoštevati, da na njegovo izotopsko sestavo vpliva geološka podlaga (Moynier *et al.* 2017). Za ustrezno interpretacijo $\delta^{66}\text{Zn}$ vrednosti v analiziranih vzorcih so torej potrebne temeljne vrednosti rastlin in živali na danem območju in v danem obdobju.

Dober primer tega, kako analize izotopov prispevajo podrobne informacije o življenju preteklih skupnosti, je študija Toso in sodelavcev (Toso *et al.* 2019). Izvedli so analize dušika in ogljika v kombinaciji z osteološko analizo na 27 osebah iz gradu São Jorge na Portugalskem. Glede na pisne vire gre za muslimane visokega družbenega statusa. Rezultati analiz so pokazali, da so imeli pripadniki različnih starosti in spolov nekoliko drugačno prehrano. Moški so imeli višje $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti kot ženske in otroci, ki so imeli podobne vrednosti. Z višjimi vrednostmi $\delta^{15}\text{N}$ izstopajo le nekateri otroci, mlajši od treh let (Slika 3). Višje vrednosti $\delta^{15}\text{N}$ pri moških kažejo na z beljakovinami bogatejšo hrano, verjetno gre za več mesa, v primerjavi z ženskami in otroki. Pri izstopajočih mlajših otrocih visoke vrednosti $\delta^{15}\text{N}$ verjetno kažejo na dojenje, ki poviša vrednosti $\delta^{15}\text{N}$ (Toso *et al.* 2019). Rezultati so skladni z zgodovinskimi viri o organizaciji bogatejših gospodinjstev v tem obdobju in delitvijo dela glede na spol, kjer so imeli moški drugačno prehrano kot ženske in otroci.

Raziskovanje mobilnosti in migracij

Za raziskovanje mobilnosti in migracij v preteklosti se najpogosteje uporabljajo izotopi kisika in stroncija. Pri tem je treba razumeti, da raziskovanje mobilnosti in migracij ljudi ter živali poteka posredno, prek razumevanja izvora živil, ki so jih ti zaužili. Tako vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v tkivih ljudi odražajo vrednosti okolja, iz katerega so pridobivali hrano in vodo. Ker izotopi stroncija v prehranjevalno verigo pridejo preko rastlin, ki stroncij vgrajujejo iz zemljine, temelječe na lokalni geologiji, so vrednosti $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ odvisne predvsem od geološke podlage (vrste in starosti) (Montgomery 2010). Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v organizmu v največji meri odražajo pitno vodo, izvor katere je lahko meteorna (dež in sneg) ali recikli-



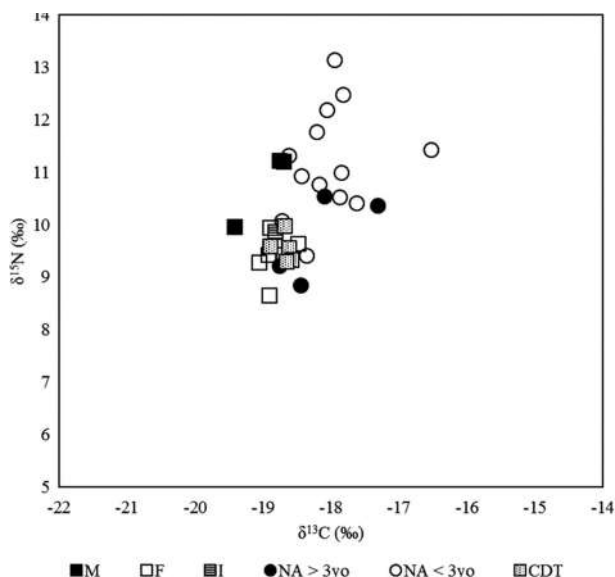
Slika 2. Graf stabilnih izotopov ogljika in dušika, ki predstavlja osnovna načela interpretacije rezultatov za razumevanje prehrane (krogi predstavljajo tipične $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti različnih vrst hrane; trikotniki predstavljajo $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti izotopov, izmerjenih na kosteh ljudi, umeščenih v prehranjevalno verigo na osnovi prehrane) (prirejeno po Montgomery *et al.* 2009, Fig. 5.1).

Figure 2. Graph of stable isotopes of carbon and nitrogen, illustrating the fundamental principles of result interpretation for understanding diet (circles represent typical $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of different food types; triangles represent $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of individuals placed in the dietary food chain based on diet) (adapted from Montgomery *et al.* 2009, Fig. 5.1).

rana voda (jezera, reke, izviri), manjši delež pa lahko odpade na vnos s hrano in zrakom (White, Longstaffe, Law 2004). Tako so $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti močno odvisne od geografske širine, količine padavin, vlažnosti, temperature, nadmorske višine in oddaljenosti lokacije od morja. Dodatno lahko na izotopsko sestavo vode vplivajo tudi človekove aktivnosti, kot je na primer kuhanje (Brettell, Montgomery, Evans 2012), zato je treba rezultate analiz izotopov kisika interpretirati na ravni populacije in ne zgolj posameznikov.

V splošnem in zelo poenostavljeno velja, da če so ljudje uživali hrano in vodo lokalnega izvora, bodo vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v njihovih tkivih podobne temeljnim vrednostim $\delta^{18}\text{O}$ in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ lokalnega okolja, medtem ko bodo v nasprotnem primeru vrednosti odstopale od temeljnih vrednosti lokalnega okolja (Slika 4) (Ambrose,

Krigbaum 2003; Bentley 2006; Evans, Chenery, Montgomery 2012). Vendar je treba pri tem upoštevati, da se lahko geografske značilnosti in geološka podlaga znotraj območja pridobivanja prehranskih virov lokalne skupnosti spreminjajo oz. je hrana prihajala z različnih geografskih območij (Montgomery *et al.* 2007). Posledično je za interpretacijo rezultatov ključno upoštevati možnost mešanja signalov oz. vrednosti različnih geografskih območij (Snoeck *et al.* 2019). Zanimariti ne gre niti vira prehrane, saj mleko in meso vsebujeta veliko nižje koncentracije stroncija kot rastline, ki so tako glavni vir stroncija v tkivih. Primerjave razmerij izotopov, geoloških in podnebnih podatkov, skupaj z arheološkim in zgodovinskim kontekstom, lahko nudijo tudi izhodišča za ugotavljanje geografskega izvora priseljenih prebival-



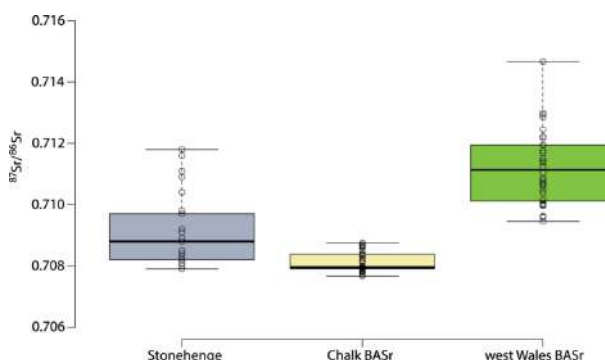
Slika 3. Graf prikazuje $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ vrednosti različnih starostnih skupin in spolov (M = moški, F = ženske, I = nedoločljiv spol, NA>3yo = otroci, starejši od 3 let, NA<3yo = otroci, mlajši od 3 let, CDT = muslimani iz sodobne Lizbone) z najdišča São Jorge, kot primerjava pa so vključeni prebivalci sodobne Lizbone (Toso *et al.* 2019, Fig. 4).

Figure 3. Graph depicting $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of different age groups and genders (M=male, F=female, I=indeterminate gender, NA>3yo=children older than 3 years, NA<3yo=children younger than 3 years, CDT=Muslims from modern Lisbon) from São Jorge site, with a comparison including modern Lisbon residents (Toso *et al.* 2019, Fig. 4).

cev (Pollard *et al.* 2007; Killgrove, Montgomery 2016; Snoeck *et al.* 2018).

Kot primer uporabe izotopov stroncija za proučevanje mobilnosti in migracij v preteklosti lahko navedemo študijo iz Velike Britanije, v kateri so raziskovalci ugotovili, da so Vikingi pri mobilnosti in migracijah iz Skandinavije v Anglijo v 9. stoletju s seboj pripeljali tudi živali. Na gomilnem žarnem grobišču Heath Wood, ki je v zgodovinskih virih edino iz tega obdobja jasno povezano z vikinško prisotnostjo, so našli kremirane ostanke odraslih, otrok in živali. Za potrebe analiz so raziskovalci najprej analizirali rastline na območju najdišča, da bi dobili temeljne vrednosti stroncija v regiji, za kasnejšo primerjavo z rezultati analiz na ljudeh. Analizirali so ostanke iz gomil 50 in 56. Na podlagi primerjave s temeljnimi vrednostmi rastlin so ugotovili, da ena odrasla oseba in

tri živali iz gomile 50 niso odrasli v okolju, v katerem so bili pokopani. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iz njihovih kosti se ujema s temeljnimi vrednostmi rastlin, ki rastejo na geološki podlagi nekaterih delov Velike Britanije, pa tudi Baltskega ščita, torej na območju današnje Norveške, osrednje ter severne Švedske in Finske. Glede na arheološki in zgodovinski kontekst opisanih najdb raziskovalci domnevajo, da je odrasla oseba skupaj z živalmi (konjem, psom in prašičem) pripotovala iz Skandinavije v današnjo Anglijo. Tam so precej hitro po prihodu tudi umrli, sicer bi se z obnovo kosti zmanjšala razlika med lokalnimi temeljnimi vrednostmi in vrednostmi v analiziranih kosteh. Odrasla oseba iz gomile 56 in otrok iz gomile 50 sta pokazala vrednosti, ki se ujemajo s temeljnimi vrednostmi v 25-kilometrskega radiju okrog najdišča Heath Wood,



Slika 4. Graf rezultatov $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ kremiranih človeških posmrtnih ostankov iz Stonehengea in temeljnih vrednosti biološko dostopnega stroncija (BASr) za apnenec na območju Wessex in za zahodni Wales. Osebe z vrednostmi $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pod 0,790 kažejo podobne vrednosti kot lokalni apnenec in so tako razumljene kot »lokalno prebivalstvo«, medtem ko so osebe z vrednostmi nad 0,791 morale uživati hrano izven »lokalnega« območja in so razumljene kot »nelokalno prebivalstvo«. Predvsem osebe z vrednostmi nad 0,7110 kažejo, da so se prehranjevale s hrano, ki je najverjetneje izvirala iz jugozahodne Anglije in Walesa (Snoeck *et al.* 2018, Fig. 4).

Figure 4. Graph for cremated human remains from Stonehenge, compared to biologically available strontium values - baseline (BASr) from the Wessex and west Wales. Individuals with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ below 0.790 have comparable values to the local chalk and are considered as »locals«. Individuals with values above 0.791 consumed foods from the non-local environment and are considered »non-locals«. Especially individuals with values above 0.7110 indicate food sources most likely from JW Enagland and Wales (Snoeck *et al.* 2018, Fig. 4).

Geological formation

1) Carboniferous - Bowland High Group and Craven Group | n=4

2) Triassic mud-, silt-, and sandstone - Mercia Mudstone Group | n=8

3) Triassic sandstone and conglomerate, interbedded – Sherwood Sandstone Group | n=5

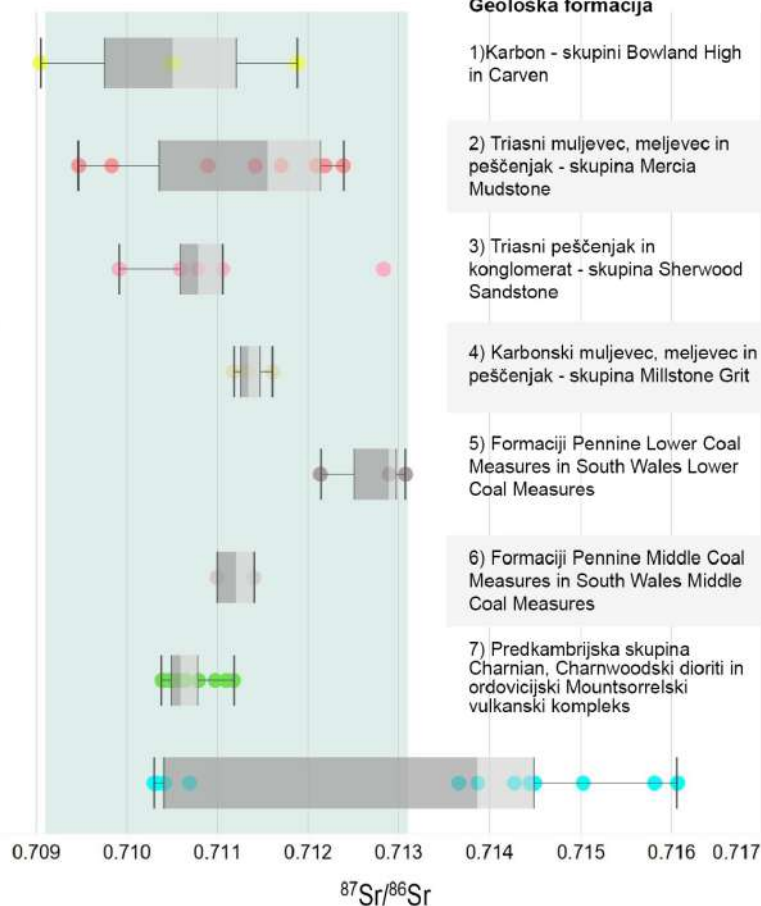
4) Carboniferous mud-, silt-, sandstone - Millstone Grit Group | n=3

5) Pennine Lower Coal Measures Formation And South Wales Lower Coal Measures Formation | n=3

6) Pennine Middle Coal Measures Formation And South Wales Middle Coal Measures Formation | n=2

7) Precambrian Charnian Supergroup, Charnwood Diorites and Ordovician Mountsorrel Igneous Complex (Johnson 2018; Johnson et al. 2022) | n=13

Calcined animal and human bone | n=13
Žgane živalske in človeške kosti



Slika 5. Graf prikazuje temeljne vrednosti z najdišča Heath Wood (z zeleno osenčen stolpec) na podlagi rastlin (1–7) ter podatke analiz stroncija za kalcinirane človeške in živalske ostanke z grobišča (zadnja vrstica). Izstopajoče vrednosti (izven temeljnih vrednosti) nakazujejo na drugačen geografski izvor oseb in živali (Löffelman *et al.* 2023, Fig. 5).

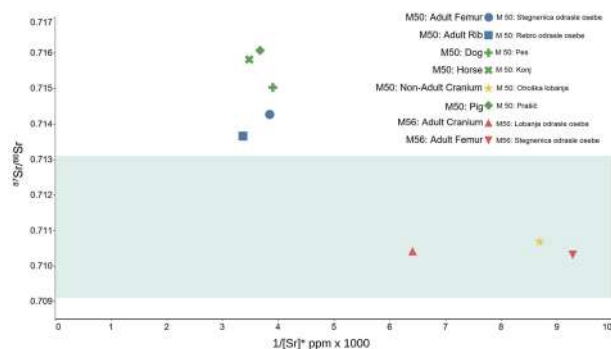
Figure 5. Graph illustrating baseline values from the Heath Wood site (green shaded) based on plants and strontium analysis data for calcined human and animal remains from the burial site. Outlying values (beyond baseline) indicate different geographical origins of individuals and animals (Löffelman *et al.* 2023, Fig. 5).

kar pomeni, da sta večino časa preživela na tem območju (Sliki 5 in 6) (Löffelman *et al.* 2023).

Raziskovanje življenjskih obdobj

Ker se telesna tkiva razvijajo in obnavljajo različno hitro, je z izotopskimi razmerji mogoče preučevati različna življenjska obdobja osebe. Večina kosti se v življenju neprenehoma obnavlja, pri čemer je hitrost obnove odvisna od skeletnega elementa, starosti, spola, zdravstvenega stanja ipd. Z obnavljanjem novi elementi ter s tem

podatki o prehrani in zdravstvenem stanju organizma nadomestijo obstoječe elemente. To pomeni, da izotopska razmerja v kosteh predstavljajo večletno povprečje za določeno obdobje življenja, odvisno od hitrosti obnove. Rebra se, denimo, obnavljajo razmeroma hitro in pri odraslem vsebujejo povprečje izotopskih razmerij zadnjih nekaj let življenja, medtem ko stegnenica za obnovo potrebuje več časa in vsebuje povprečje izotopskih razmerij za zadnjih nekaj desetletij življenja, odvisno od starosti ob smrti (Hedges *et al.* 2007; Feng, McDonald 2011; Fahy *et al.* 2017). Za razliko od kosti se zobje po



Slika 6. Graf prikazuje $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in koncentracije $[\text{Sr}]$ za kalcinirane kosti ljudi in živali iz gomil 50 in 56 z grobišča Heath Wood. Zelen pas v spodnjem delu grafa predstavlja vrednosti $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in koncentracije $[\text{Sr}]$ v radiju 25 km okrog najdišča. Jasno je razvidno, da se vrednosti iz gomil 50 (vrednosti izven 25-kilometerskega radija) in 56 (vrednosti znotraj 25-kilometerskega radija) za $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in koncentracije precej razlikujejo (Löffelman *et al.* 2023, Fig. 6).

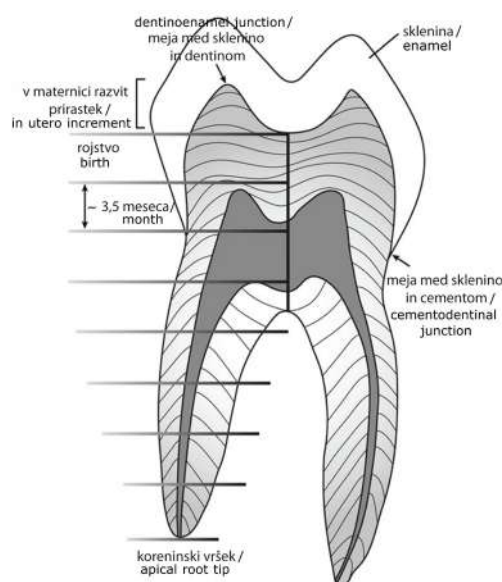
Figure 6. The graph shows $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $[\text{Sr}]$ for calcined bones of humans and animals from the mounds 50 and 56 from the Heath Wood cemetery. The green band in the lower part of the graphs represents the values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $[\text{Sr}]$ for the 25km radius around the site. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $[\text{Sr}]$ values differ significantly between the individuals from mounds 50 (non-local values) and 56 (local values) (Löffelman *et al.* 2023, Fig. 6).

koncu rasti ne obnavljajo, tako dentin in sklenina vsebujeta le izotopska razmerja iz časa rasti zob (otročvo in najstništvo) (Hillson 1986; Nanci 2008). Mlečni zobje se začnejo razvijati v 30. tednu nosečnosti in so popolnoma razviti do starosti 3,5 leta $\pm$ 3 meseci. Stalni zobje se začnejo razvijati pri starosti 4,5 meseca $\pm$ 3 meseci in so popolnoma razviti do 23. leta starosti (AlQahtani, Hector, Liversidge 2010). Zaradi enakomerne rasti zob 1 mm dentina mlečnega zoba predstavlja približno 3,5 meseca življenja, 1 mm dentina stalnega zoba pa predstavlja 9–12 mesecev življenja (Dean, Scandrett 1995; Beaumont *et al.* 2013; Beaumont *et al.* 2015). Inkrementalno vzorčenje dentina s prečno razdelitvijo zoba na manjše rezine (Slika 7) tako omogoča visoko časovno resolucijo – tako rekoč po mesecih – izotopskih razmerij ter ponuja vpogled v kratkotrajne spremembe v prehrani in zdravstvenem stanju posameznih oseb. Na ta način je poleg preučevanja različnih življenjskih obdobjev možen vpogled v prakse dojenja in prehoda na gosto hrano (Slika 8) (Fuller *et al.* 2006; Dupras, Tocheri 2007; Beaumont *et al.* 2015; Schmidt, Kwok, Keenleyside 2015),

ki med drugim močno vplivajo na rast in razvoj otrok ter s tem na morebitne zdravstvene težave in smrtnost (Katzenberg, Herring, Saunders 1996; Butte *et al.* 2000; Waters-Rist, Hoogland 2018).

Raziskovanje zdravstvenega stanja

Na izotopska razmerja v tkivih organizma vplivajo tudi spremembe v fiziologiji telesa, ki nastopijo zaradi prehranskega ali fiziološkega stresa, kot so pomanjkanje hranil, nosečnost, bolezni ipd. Ker je organizem naravnan k doseganju homeostaze, torej k zagotavljanju optimalnega poteka fizioloških procesov, s hrano vnesene snovi uravnava s potrebami po energiji, rasti in obnovi. Tako organizem z anaboličnimi in kataboličnimi spremembami v telesu tudi sam spreminja izotopska razmerja v tkivih. Ob fiziološkem stresu in pomanjkanju hranil (postenje, slaba prehrana, bolezni) v organizmu lahko primanjkuje beljakovin in kalorij, kar vodi v katabolno stanje, recikliranje dušika v telesu in dvig $\delta^{15}\text{N}$ v tkivih. Ob vnosu zadostne količine hranil ponovno nastopi anabolično stanje in $\delta^{15}\text{N}$ v tkivih pade (Waters-Rist, Katzenberg 2010;



Slika 7. Tehnika inkrementalnega vzorčenja za izotopske analize dentina zoba (mlečni drugi kočnik) (Mays *et al.* 2017, Fig. 2).

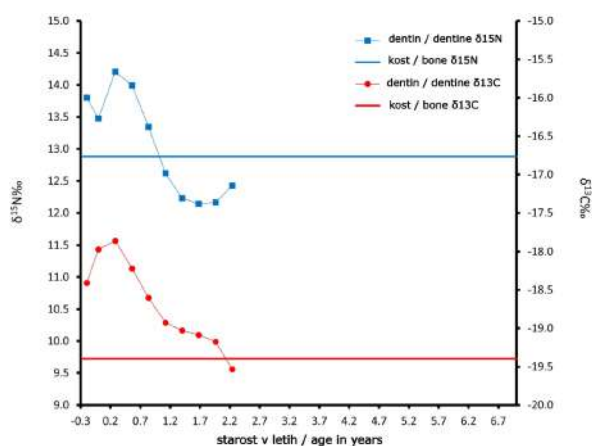
Figure 7. Incremental sampling techniques for dentine isotopic analysis (deciduous second molar) (Mays *et al.* 2017, Fig. 2).

Beaumont, Montgomery 2016). Pri fiziološkem stresu so sicer najizrazitejše spremembe v vrednostih $\delta^{15}\text{N}$, vendar so spremembe vidne tudi pri vrednostih $\delta^{13}\text{C}$, ki ob pomanjkanju hranil rahlo padejo (Slika 9) (Beaumont, Montgomery 2016).

Zaključek

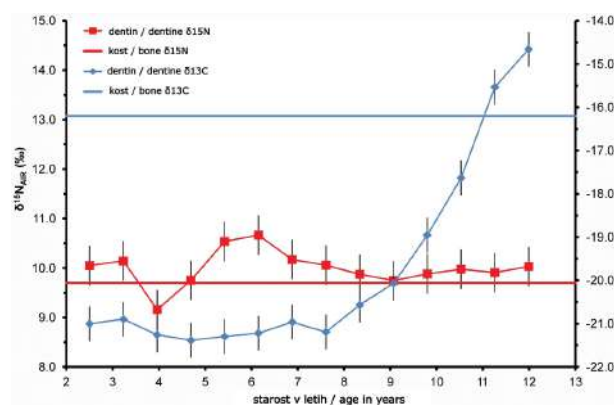
Analize izotopov posmrtnih skeletnih ostankov iz arheoloških najdišč lahko pomembno prispevajo k razumevanju vsakodnevnega življenja v preteklosti. Omogočajo natančnejši vpogled v prehranske navade in fiziološki stres različnih družbenih skupin glede na starost, spol in družbeni status. Izluščimo lahko tudi, kateri so bili glavni in stranski prehranski viri na določenem območju (živalski produkti kopenskih ali morskih živali, različne

vrste rastlin), kar omogoča tudi sklepanje o poljedelskih, živinorejskih in lovskih praksah. Natančneje, inkrementalno vzorčenje in/ali vzorčenje več skeletnih elementov iste osebe dovoljuje vpogled v prehranske ali fiziološke spremembe v življenju osebe skozi čas, kot so morebitne spremembe prehrane/izpostavljenosti fiziološkemu stresu v različnih življenjskih obdobjih ter prehod iz dojenja na gosto hrano. Poleg tega je predvsem z analizami izotopov stroncija, če je le mogoče, pa tudi z izotopi drugih elementov, mogoče raziskovanje mobilnosti in migracij oseb in skupnosti. Kljub navidezni jasnosti rezultatov tovrstnih analiz je treba opozoriti, da moramo za oprijemljive in zanesljive interpretacije upoštevati veliko dejavnikov. V prvi vrsti je ključna izbira vzorcev, ki mora ustrezati zastavljenim raziskovalnim vprašanjem, vrsti skeletnega tkiva in stanju ohranjenosti posmrtnih ostankov. Pomemben del analiz je tudi vzpostavitev temeljnih vrednosti raziskovanega prostora in časa, saj se vrednosti izotopov močno spreminjajo v odvisnosti od različnih



Slika 8. Primer rezultatov inkrementalne analize stabilnih izotopov ogljika in dušika na zobu ter analize stabilnih izotopov ogljika in dušika na stegenici otroka, ki je umrl v starosti okoli 7 let. Sočasen dvig vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ v zobu tik po rojstvu kaže na dojenje, sočasen upad $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ pa na postopen prehod na gosto hrano v starosti od približno 6 mesecev do 2 let. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ in $\delta^{15}\text{N}$ v kosti kažejo povprečje zadnjih let življenja (Leskovar *et al.* 2019).

Figure 8. Example of incremental analysis results of stable carbon and nitrogen isotopes in a tooth and stable carbon and nitrogen isotopes in a child's femur bone, who died at around 7 years of age. Simultaneous rise in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in the tooth just after birth indicates breastfeeding, while simultaneous decrease in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values suggests gradual transition to solid food between approximately 6 months and 2 years of age. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in bone represent the average of the last years of life (Leskovar *et al.* 2019).



Slika 9. Primer nihanja vrednosti $\delta^{15}\text{N}$ dentina in $\delta^{13}\text{C}$ dentina otroka, ki je bil v starosti 4,5–7 let podhranjen, v starosti 8,5–13 let pa se je prehranjeval pretežno z živili iz koruze (Beaumont, Montgomery 2016, Fig. 4). Vrednosti dentina so pridobljene z inkrementalno metodo in tako omogočajo veliko boljšo resolucijo kot vrednosti kosti (stegenice), ki predstavljajo večletno povprečje.

Figure 9. Example of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ value fluctuations in a child, who was malnourished in the ages 4.5 to 7 years and consumed predominantly corn-based foods between the ages of 8.5 and 13 years (Beaumont, Montgomery 2016, Fig. 4). Values from the dentine are obtained by using incremental sampling and thus provide a much higher resolution in comparisons to bone (femur), which provides an average of several years.

lastnosti okolja. Zanimariti ne gre razumevanja arheološkega konteksta, ki je ključen tako za izbiro primernih vzorcev glede na zastavljena raziskovalna vprašanja kot za kasnejšo kontekstualizacijo rezultatov. Opozoriti velja, da gre za destruktivne analize, ki povsem uničijo izbrane vzorce. Ker gre pri arheoloških raziskavah za edinstveno, neponovljivo dediščino, pri človeških skeletnih tkivih pa za nekoč živeče osebe, je treba upoštevati etična načela za ravnanje s človeškimi posmrtnimi ostanki iz arheoloških kontekstov (Squires, Errickson, Márquez-Grant 2019). K tovrstnim raziskavam moramo pristopiti metodično, z ustreznim načrtom dela, primernimi strokovnjaki ter jasnimi, glede na arheološki kontekst in stanje tkiv smiselno zastavljenimi vprašanji. Le z upoštevanjem vseh dejavnikov bodo pridobljeni rezultati zanesljivi, analize pa bodo prispevale k boljšemu razumevanju preteklosti in znanstvenoraziskovalnemu napredku.

Zahvale

Prispevek je nastal kot del sodelovanja v projektih SEXI (From Survey and EXcavation to Isotope analyses of skeletal remains from archaeological contexts), CRIME (Cremation or Inhumation of ancient populations? A Multidisciplinary question on the European level) ter v programski skupini Arheologija (P6-0247).

Literatura / References

- ALBAREDE, F., P. TÉLOUK, V. BALTER, V. P. BONDANESE, E. ALBALAT, P. OGER, P. BONAVENTURA, P. MIOSSEC, T. FUJII 2016, Medical applications of Cu, Zn, and S isotope effects. – *Metallomics* 8/10, 1056–1070.
- ALQAHTANI, S. J., M. P. HECTOR, H. M. LIVERSIDGE 2010, Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. – *American Journal of Physical Anthropology* 142/3, 481–490.
- AMBROSE, S. H. 1990, Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. – *Journal of Archaeological Science* 17/4, 431–451.
- AMBROSE, S. H., J. KRIGBAUM 2003, Bone chemistry and bioarchaeology. – *Journal of Anthropological Archaeology* 22/3, 193–199.
- ARMIT, I., C. E. FISCHER, H. KOON, R. NICHOLLS, I. OLALDE, N. ROHLAND, J. BUCKBERRY, J. MONTGOMERY, P. MASON, M. ČREŠNAR, L. BÜSTER, D. REICH 2023, Kinship practices in Early Iron Age South-east Europe: genetic and isotopic analysis of burials from the Dolge njive barrow cemetery, Dolenjska, Slovenia. – *Antiquity* 97/392, 403–418.
- BATAILLE, C. P., K. JAOUEN, S. MILANO, M. TROST, S. STEINBRENNER, É. CRUBÉZY, R. COLLETER 2021, Triple sulfur-oxygen-strontium isotopes probabilistic geographic assignment of archaeological remains using a novel sulfur isoscape of western Europe. – *PLOS ONE* 16/5, e0250383.
- BEAUMONT, J., A. GLEDHILL, J. LEE-THORP, J. MONTGOMERY 2013, Childhood Diet: A closer examination of the Evidence from Dental Tissues using Stable Isotope Analysis of Human Dentine. – *Archaeometry* 55/2, 277–295.
- BEAUMONT, J., J. MONTGOMERY 2016, The Great Irish Famine: Identifying Starvation in the Tissues of Victims Using Stable Isotope Analysis of Bone and Incremental Dentine Collagen. – *PLOS ONE* 11/8, e0160065.
- BEAUMONT, J., J. MONTGOMERY, J. BUCKBERRY, M. JAY 2015, Infant mortality and isotopic complexity: New approaches to stress, maternal health, and weaning.

- *American Journal of Physical Anthropology* 157/3, 441–457.
- 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.
- BEVERIDGE, J. M. R. 1947, Sulphur Distribution in Fish Flesh Proteins. – *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 7a/2, 51–54.
- BRETTELL, R., J. MONTGOMERY, J. EVANS 2012, Brewing and stewing: the effect of culturally mediated behaviour on the oxygen isotope composition of ingested fluids and the implications for human provenance studies. – *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 27/5, 778–785.
- BROWN, T. A., K. BROWN 2011, *Biomolecular archaeology: an introduction*. – Wiley-Blackwell, Chichester.
- BUTTE, N. F., W. W. WONG, J. M. HOPKINSON, E. O. SMITH, K. J. ELLIS 2000, Infant Feeding Mode Affects Early Growth and Body Composition. – *Pediatrics* 106/6, 1355 LP – 1366.
- COLLINS, M. J., C. NIELSEN-MARSH, J. HILLER, C. SMITH, J. P. ROBERTS, R. V. PRIGODICH, T. J. WESS, J. CSAPO, A. R. MILLARD, G. TURNER-WALKER 2002, The survival of organic matter in bone: a review. – *Archaeometry* 44/3, 383–394.
- DAHL, S. G., P. ALLAIN, P. J. MARIE, Y. MAURAS, G. BOIVIN, P. AMMANN, Y. TSOUDEROS, P. D. DELMAS, C. CHRISTIANSEN 2001, Incorporation and distribution of strontium in bone. – *Bone* 28/4, 446–453.
- DANIEL BRYANT, J., P. L. KOCH, P. N. FROELICH, W. J. SHOWERS, B. J. GENNA 1996, Oxygen isotope partitioning between phosphate and carbonate in mammalian apatite. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60/24, 5145–5148.
- DEAN, M. C., A. E. SCANDRETT 1995, Rates of dentine mineralization in permanent human teeth. – *International Journal of Osteoarchaeology* 5/4, 349–358.
- DUPRAS, T. L., M. W. TOCHERI 2007, Reconstructing infant weaning histories at Roman period Kellis, Egypt using stable isotope analysis of dentition. – *American Journal of Physical Anthropology* 134/1, 63–74.
- EASTOE, J. E. 1955, The amino acid composition of mammalian collagen and gelatin. – *Biochemical Journal* 61/4, 589–600.
- EASTOE, J. E. 1967, Composition of collagen and allied proteins. – *Treatise on collagen* 1, 1–72.
- EVANS, J., C. CHENERY, J. MONTGOMERY 2012, A summary of strontium and oxygen isotope variation in archaeological human tooth enamel excavated from Britain. – *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 27, 754–764.
- FAHY, G. E., C. DETER, R. PITFIELD, J. J. MISZKIEWICZ, P. MAHONEY 2017, Bone deep: Variation in stable isotope ratios and histomorphometric measurements of bone remodelling within adult humans. – *Journal of Archaeological Science* 87, 10–16.
- FENG, X., J. M. MCDONALD 2011, Disorders of bone remodeling. – *Annual review of pathology* 6, 121–145.
- FERNANDES, R., K. JAOUEN 2017, Isotopes in archaeology. – *Archaeological and Anthropological Sciences* 9/7, 1305–1306.
- FULLER, B. T., T. I. MOLLESON, D. A. HARRIS, L. T. GILMOUR, R. HEDGES 2006, Isotopic Evidence for Breastfeeding and Possible Adult Dietary Differences from Late/Sub-Roman Britain. – *American Journal of Physical Anthropology* 129/1, 45–54.
- HEDGES, R. 2002, Bone diagenesis: an overview of processes. – *Archaeometry* 44/3, 319–328.
- HEDGES, R., J. G. CLEMENT, C. D. L. THOMAS, T. C. O'CONNELL 2007, Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: Modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. – *American Journal of Physical Anthropology* 133/2, 808–816.
- HILLSON, S. 1986, *Teeth*. – Cambridge Manuals in Archaeology, Cambridge, UK.
- IACUMIN, P., H. BOCHERENS, A. MARIOTTI, A. LONGINELLI 1996, 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, 1–6.
- JAOUEN, K., M. BEASLEY, M. SCHOENINGER, J. J. HUBLIN, M. P. RICHARDS 2016, Zinc isotope ratios of bones and teeth as new dietary indicators: results from a modern food web (Koobi Fora, Kenya). – *Scientific Reports* 6/1, 26281.
- JAOUEN, K., M. TROST, N. BOURGON, R. COLLETTER, A. LE CABEC, T. TÜTKEN, R. ELIAS OLIVEIRA, M. L. PONS, P. MÉJEAN, S. STEINBRENNER, J. CHMELEFF, A. STRAUSS 2020, Zinc isotope variations in archeological human teeth (Lapa do Santo, Brazil) reveal dietary transitions in childhood and no contamination from gloves. – *PLOS ONE* 15/5, e0232379.
- JAOUEN, K., V. VILLALBA-MOUCO, G. M. SMITH, M. TROST, J. LEICHLITER, T. LÜDECKE, L. MONTES 2022, A Neandertal dietary conundrum: Insights provided by tooth enamel Zn isotopes from Gabasa, Spain. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119/43, e2109315119.
- KATZENBERG, M. A., D. A. HERRING, S. R. SAUNDERS 1996, Weaning and infant mortality: Evaluating the skeletal evidence. – *American Journal of Physical Anthropology* 101/S23, 177–199.
- KATZENBERG, M. A., S. R. SAUNDERS 2008, *Biological anthropology of the human skeleton*. – Chichester, UK.
- KILLGROVE, K., J. MONTGOMERY 2016, All Roads Lead to Rome: Exploring Human Migration to the Eternal City through Biochemistry of Skeletons from Two Imperial-Era Cemeteries (1st–3rd c AD). – *PLOS ONE* 11/2, e0147585.
- KRUEGER, H. W., C. H. SULLIVAN 1984, Models for Carbon Isotope Fractionation Between Diet and Bone. – *ACS Symposium Series* 258, 205–220.
- LEACH, P. G. L. 2003, Equivalence classes of second-order ordinary differential equations with only a three-dimensional Lie algebra of point symmetries and linearisation. – *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 284/1, 31–48.
- LEE-THORP, J. A. 2008, On isotopes and old bones. – *Archaeometry* 50/6, 925–950.
- LESKOVAR, T., J. BEAUMONT, N. LISIĆ, S. MCGALLIARD 2019, Auditory ossicles: a potential biomarker for maternal and infant health in utero. – *Annals of Human Biology* 46/5, 1–11.
- LÖFFELMANN, T., C. SNOECK, J. D. RICHARDS, L. J. JOHNSON, P. CLAEYS, J. MONTGOMERY 2023, Sr analyses from only known Scandinavian cremation cemetery in Britain illuminate early Viking journey with horse and dog across the North Sea. – *PLOS ONE* 18/2, e0280589.
- MALAINÉY, M. E. 2011, *A consumer's guide to archaeological science: analytical techniques*. – New York, Springer.
- MAYNE-CORREIA, P. M. 1997, Fire Modification of Bone. – V / In: Haglund, M. D., M. H. Sorg (ur. / eds.), *Forensic Taphonomy: The postmortem fate of human remains*. – Boca Raton, Routledge, 275–293.
- MAYS, S., J. ELDERS, L. HUMPHREY, W. WHITE, P. MARSHALL 2013, *Science and the dead: a guideline for the destructive sampling of archaeological human remains for scientific analysis*. – London, English Heritage.
- MAYS, S., R. GOWLAND, S. HALCROW, E. MURPHY 2017, Child Bioarchaeology: Perspectives on the Past 10 Years. – *Childhood in the Past* 10/1, 38–56.
- MONTGOMERY, J. 2010, Passports from the past: Investigating human dispersals using strontium isotope analysis of tooth enamel. – *Annals of Human Biology* 37/3, 325–346.
- MONTGOMERY, J., J. A. EVANS, R. E. COOPER 2007, Resolving archaeological populations with Sr-isotope mixing models. – *Applied Geochemistry* 22/7, 1502–1514.
- MONTGOMERY, J., G. MÜLDNER, A. GLEDHILL, R. ELLAM 2009, Isotope analysis of bone collagen and tooth enamel. – V / In: Lowe, C. (ur. / ed.), *Clothing for the Soul Divine: Burials at the Tomb of St Ninian. Excavations at Whithorn Priory 1957–67*. – Edinburgh, Historic Scotland, 63–80.

- MOYNIER, F., D. VANCE, T. FUJII, P. SAVAGE 2017, The Isotope Geochemistry of Zinc and Copper. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 82/1, 543–600.
- NANCI, A. 2008, *Ten Cate's Oral Histology: Development, Structure, and Function*. – Missouri, USA.
- NEHLICH, O. 2015, The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: A review. – *Earth-Science Reviews* 142/Supplement C, 1–17.
- NEHLICH, O., B. T. FULLER, M. JAY, A. MORA, R. A. NICHOLSON, C. I. SMITH, M. P. RICHARDS 2011, Application of sulphur isotope ratios to examine weaning patterns and freshwater fish consumption in Roman Oxfordshire, UK. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75/17, 4963–4977.
- NEHLICH, O., M. P. RICHARDS 2009, Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen. – *Archaeological and Anthropological Sciences* 1/1, 59–75.
- NICHOLLS, R. A., J. BUCKBERRY, M. ČREŠNAR, I. ARMIT, P. MASON, H. KOON 2020a, Interdisciplinarna študija človeških ostankov s starejšeželeznodobnega grobišča v Zagorju ob Savi. – *Arheološki vestnik* 71, 487–498.
- NICHOLLS, R. A., J. BUCKBERRY, J. BEAUMONT, M. ČREŠNAR, P. MASON, I. ARMIT, H. KOON 2020b, A carbon and nitrogen isotopic investigation of a case of probable infantile scurvy (6th–4th centuries BC, Slovenia). – *Journal of Archaeological Science: Reports* 30, 102206.
- NICHOLLS, R., H. E. C. KOON 2016, The Use of Stable Light Isotopes as a Method of Exploring the Homogeneity and Heterogeneity of diet in Late Bronze Age and Early Iron Age Temperate Europe: A Preliminary Study. – V / In: Armit, I., H. Potrebica, M. Črešnar, P. Mason, L. Büster (ur. / eds.), *Cultural Encounters in Iron Age Europe*. Budapest, Archaeolingua, 145–164.
- O'CONNELL, T. C., C. J. KNEALE, N. TASEVSKA, G. G. C. KUHNLE 2012, The diet-body offset in human nitrogen isotopic values: a controlled dietary study. – *American Journal of Physical Anthropology* 149/3, 426–434.
- PASSEY, B. H., T. F. ROBINSON, L. K. AYLIFFE, T. E. CERLING, M. SPONHEIMER, M. D. DEARING, B. L. ROEDER, J. R. EHLENGER 2005, Carbon isotope fractionation between diet, breath CO₂, and bioapatite in different mammals. – *Journal of Archaeological Science* 32/10, 1459–1470.
- POLLARD, A. M., C. M. BATT, B. STERN, S. M. M. YOUNG 2007, *Analytical Chemistry in Archaeology*. – Cambridge Manuals in Archaeology. – Cambridge, Cambridge University Press.
- PRIVAT, K. L., T. C. O'CONNELL, R. HEDGES 2007, The distinction between freshwater- and terrestrial-based diets: methodological concerns and archaeological applications of sulphur stable isotope analysis. – *Journal of Archaeological Science* 34/8, 1197–1204.
- REITSEMA, L. J. 2015, Laboratory and field methods for stable isotope analysis in human biology. – *American Journal of Human Biology* 27/5, 593–604.
- RICHARDS, M. P., B. T. FULLER, R. HEDGES 2001, Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe: implications for human palaeodiet, residence mobility, and modern pollutant studies. – *Earth and Planetary Science Letters* 191/3, 185–190.
- ROBERTS, P., R. FERNANDES, J. SWIFT, J. ZECH, O. CRAIG, A. LUCQUIN, T. LARSEN 2018, Calling all archaeologists: guidelines for terminology, methodology, data handling, and reporting when undertaking and reviewing stable isotope applications in archaeology. – *Rapid communication in Mass Spectrometry* 32/5, 361–372.
- SALESSE, K., E. STAMATAKI, I. KONTOPOULOS, G. VERLY, R. ANNAERT, M. BOUDIN, G. CAPUZZO, P. CLAEYS, S. DALLE, M. HLAD, G. de MULDER, C. SABAUX, A. SENGELOV, B. VESELKA, E. WARMBOL, M. VERCAUTEREN, C. SNOECK 2021, These boots are made for burnin': Inferring the position of the corpse and the presence of leather footwear during cremation through isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) and infrared (FTIR) analyses of experimentally burnt skeletal remains. – *PLOS ONE* 16/10, e0257199.
- SCHMIDT, J., C. KWOK, A. KEENLEYSIDE 2015, Infant feeding practices and childhood diet at Apollonia

Pontica: Isotopic and dental evidence. – *American Journal of Physical Anthropology* 159, 284–299.

SCHOENINGER, M. J., M. J. DENIRO 1984, Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48/4, 625–639.

SCHOENINGER, M. J., K. MOORE 1992, Bone Stable Isotope Studies in Archaeology. – *Journal of World Prehistory* 6/2, 247–296.

SNOECK, C., J. LEE-THORP, R. SCHULTING, J. DE JONG, W. DEBOUGE, N. MATTIELLI 2015, Calcined bone provides a reliable substrate for strontium isotope ratios as shown by an enrichment experiment. – *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 29/1, 107–114.

SNOECK, C., J. POUNCETT, P. CLAEYS, S. GODERIS, N. MATTIELLI, M. PARKER PEARSON, C. WILLIS, A. ZAZZO, J. A. LEE-THORP, R. J. SCHULTING 2018, Strontium isotope analysis on cremated human remains from Stonehenge support links with west Wales. – *Scientific Reports* 8/10790, 1–8.

SNOECK, C., S. RYAN, J. POUNCETT, M. PELLEGGRINI, P. CLAEYS, A. N. WAINWRIGHT, N. MATTIELLI, J. A. LEE-THORP, R. J. SCHULTING 2019, Towards a biologically available strontium isotope baseline for Ireland. – *Science of The Total Environment* 712, 136248.

SQUIRES, K., D. ERRICKSON, N. MÁRQUEZ-GRANT (ur. / eds.) 2019, *Ethical Approaches to Human Remains: A Global Challenge in Bioarchaeology and Forensic Anthropology*. – Cham, Springer.

STAMATAKI, E., I. KONTOPOULOS, K. SALESSE, R. MCMILLAN, B. VESELKA, C. SABAU, R. ANNAERT, M. BOUDIN, G. CAPUZZO, P. CLAEYS, S. DALLE, M. HLAD, A. SENGELOV, M. VERCAUTEREN, E. WARMENBOL, D. TYS, G. DE MULDER, C. SNOECK 2021, Is it hot enough? A multi-proxy approach shows variations in cremation conditions during the Metal Ages in Belgium. – *Journal of Archaeological Science* 136, 105509.

STEELE, K. W., R. M. DANIEL 1978, Fractionation of nitrogen isotopes by animals: a further complication to the use of variations in the natural abundance of ^{15}N for tracer studies. – *The Journal of Agricultural Science* 90/1, 7–9.

ŠKVOR JERNEJČIČ, B., T. D. PRICE 2020, Isotopic investigations of human cremations from the Late Bronze Age/Early Iron Age cemetery of Ljubljana – Dvorišče SAZU, Slovenia. – *Journal of Archaeological Science: Reports* 34, 102594.

TOSO, A., S. GASPAR, R. BANHA DA SILVA, S. J. GARCIA, M. ALEXANDER 2019, High status diet and health in Medieval Lisbon: a combined isotopic and osteological analysis of the Islamic population from São Jorge Castle, Portugal. – *Archaeological and Anthropological Sciences* 11/8, 3699–3716.

VAN KLINKEN, G. J. 1999, Bone Collagen Quality Indicators for Palaeodietary and Radiocarbon Measurements. – *Journal of Archaeological Science* 26/6, 687–695.

WATERS-RIST, A., M. HOOGLAND 2018, The Role of Infant Feeding and Childhood Diet in Vitamin D Deficiency in a Nineteenth-Century Rural Dutch Community. – *Bioarchaeology International* 2, 95–116.

WATERS-RIST, A., M. A. KATZENBERG 2010, The effect of growth on stable nitrogen isotope ratios in subadult bone collagen. – *International Journal of Osteoarchaeology* 20/2, 172–191.

WHITE, C., F. J. LONGSTAFFE, K. R. LAW 2004, Exploring the effects of environment, physiology and diet on oxygen isotope ratios in ancient Nubian bones and teeth. – *Journal of Archaeological Science* 31/2, 233–250.

WRIGHT, L. E., H. P. SCHWARCZ 1996, Infrared and Isotopic Evidence for Diagenesis of Bone Apatite at Dos Pilas, Guatemala: Palaeodietary Implications. – *Journal of Archaeological Science* 23/6, 933–944.

The use of Isotope Analyses in Research on Skeletal tissues in Archaeology

(Summary)

The article discusses archaeological research related to diet, health, and migration of people in the past, primarily focusing on the analysis of isotopes found in human skeletal tissues. Isotopes such as carbon, nitrogen, sulphur and oxygen, and strontium isotopes are commonly used to study past diets and environments. These isotopic analyses offer insights into individuals' lifestyles, societies, and migration patterns. The text describes the theoretical background and methodologies for conducting isotope analyses on human skeletal remains, with a focus on carbon, nitrogen, sulphur, oxygen, and strontium isotopes. The results of these analyses provide information about diet, ecological context, and migration patterns.

The text also discusses the preservation and suitability of different tissues for isotope analysis, highlighting the challenges posed by taphonomic processes (changes to remains after death) and the need to consider tissue types and burial practices. The concept of baseline values is introduced, which involves establishing isotopic signals for specific time periods and geographical areas. Baseline values are crucial for interpreting isotopic data from human skeletal tissues.

The text explores how isotopes are used to study diet in the past, focusing on carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotopes (Figures 2 and 3), as well as sulphur ($\delta^{34}\text{S}$) and zinc ($\delta^{66}\text{Zn}$) isotopes. These isotopes can reveal information about protein consumption, dietary energy sources, weaning practices (Figures 7 and 8) and food origins. Additionally, the text discusses how isotopes can provide insights into health conditions, such as physiological stress and malnutrition (Figure 9), and how they can indicate migration through the analysis of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) isotopes (Figures 4–6).
