

NEUTRONOKKAL BOMBÁZOTT KŐBALTÁK: A BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR HOZZÁJÁRULÁSA A KŐESZKÖZÖK NYERSANYAGEREDETÉNEK KUTATÁSÁHOZ

STONE AXES BOMBARDED WITH NEUTRONS: THE CONTRIBUTION OF THE BUDAPEST RESEARCH REACTOR TO THE PROVENANCE RESEARCH OF STONE TOOLS*

KASZTOVSZKY Zsolt 

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

Email: kasztovszky.zsolt@ek.hun-ren.hu

Abstract

Prompt-gamma activation analysis (PGAA) is a non-destructive analytical method, applicable to quantitatively determine the bulk elemental composition of a sample, without prior compositional information. The analytical features of the method make them exclusively suitable to measure the major components and some exotic trace elements quantitatively, and thus to provide data for provenance research of archaeological stone tools. The paper summarizes the major achievements of the more than 25 years long cooperation between the Budapest Neutron Centre, the ELTE Department of Petrology and Geochemistry and the Hungarian National Museum. The author pays his homage to György Szakmány's lifetime achievements.

Kivonat

A prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA) elemösszetétel mennyiségi meghatározására használható roncsolásmentes nukleáris analitikai módszer, a minták összetételére vonatkozó előzetes információ nélkül. Analitikai jellemzői alkalmassá teszik különböző kőzetek fő összetevőinek és néhány különleges nyomelemnek a kimutatására, ezen keresztül kőeszközök provenienciájának kutatásában való alkalmazásra. Jelen cikk a témában több mint 25 éves, a Budapesti Neutron Centrum, a Magyar Nemzeti Múzeum és az ELTE Kőzettan-Geokémiai Tanszék közötti együttműködés főbb eredményeit mutatja be. Az írás tisztelgés Szakmány György archeometriai munkássága előtt.

KEYWORDS: POLISHED STONE TOOLS, PROVENANCE, ELEMENTAL COMPOSITION, PGAA

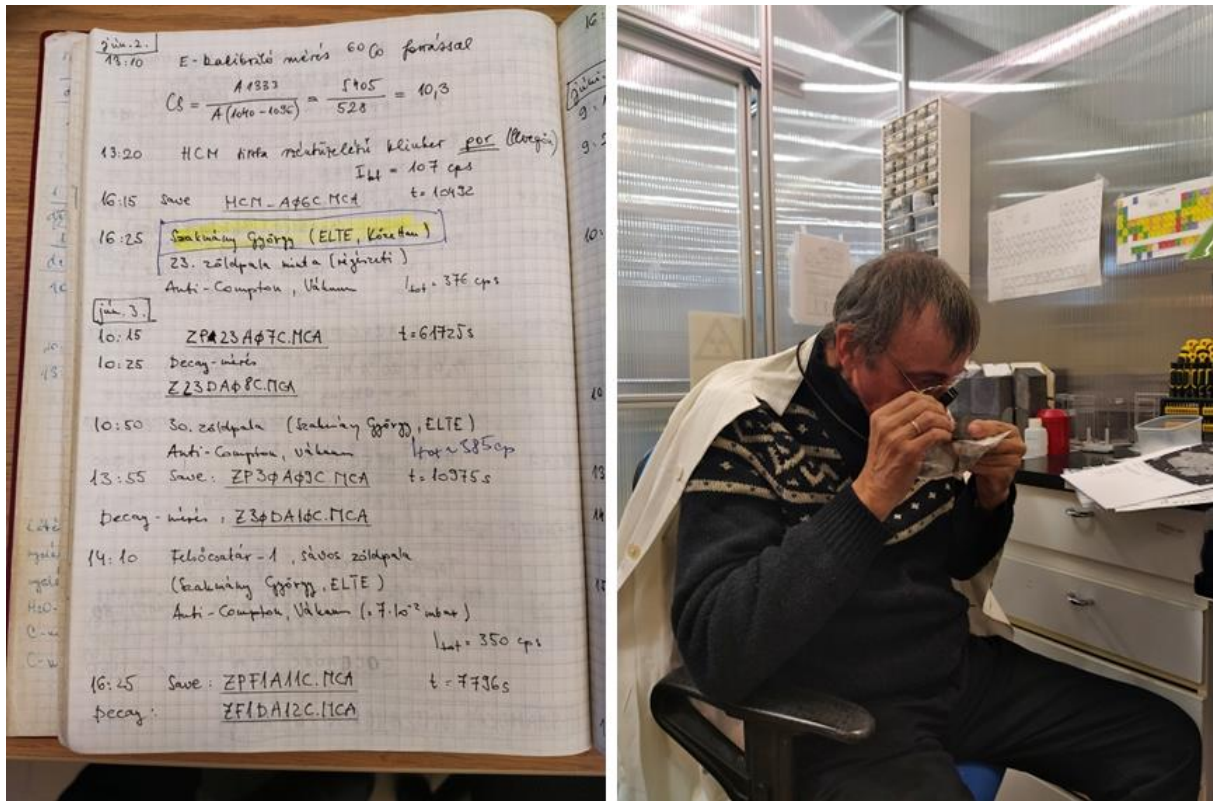
KULCSSZAVAK: CSISZOLT KŐESZKÖZ, PROVENIENCIA, ELEMÖSSZETÉTEL, PGAA

Szubjektív előszó

1996 őszén, a doktori iskolát befejezve, de a PhD. oklevél után még csak vágyakozva, fiatal kutatóként kerültem a Budapesti Kutatóreaktorhoz, az akkori MTA Izotópkutató Intézetébe, néhai Molnár Gábor osztályába. Az akkor frissen megépült prompt-gamma aktivációs analitikai (PGAA) berendezéshez kerestek kutatókat. Választhattam: műszerfejlesztéssel vagy a ritkaság-számba menő módszer alkalmazásaival szeretnék inkább foglalkozni? Érdeklődésemhez az utóbbi állt közelebb, így Révay Zsolt irányításával megkezd-tük az első próbaméréseket a PGAA lehetséges alkalmazásainak felderítése céljából.

Nemzetközi példák alapján – akkor a világon csak a japán JAERI és az amerikai NIST PGAA-berendezése működött – láttuk, hogy a módszer kiválóan alkalmas geológiai minták, kőzetek, ásványok, környezeti és talajminták fő össze-tevőinek, és néhány, ritkán mérhető nyomelemnek (H, B, Cl, Cd, Hg, egyes ritka földfémek) a mennyiségi kimutatására. A módszer fejlesztésével párhuzamosan felvettük a kapcsolatot hazai egyetemekkel, kutatóintézetekkel, és próbame-réseket végeztünk geológiai (eredeti és porított kőzet, talaj), biológiai (száritott növény) és anyagtudományi (fémek, fémüvegek, katalizátorok) mintákon is.

* How to cite this paper: KASZTOVSZKY, Zs., (2024): Neutronokkal bombázott kőbalták: a Budapesti Kutatóreaktor hozzájárulása a kőeszközök nyersanyageredetének kutatásához / Stone axes bombarded with neutrons: The contribution of the Budapest Research Reactor to the provenance research of stone tools [In Hungarian with English Abstract], *Archeometriai Műhely* **XXI/2** 71–88.
doi: [10.55023/issn.1786-271X.2024-008](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2024-008)



1. ábra. (a) A PGAA mérési napló fotója az első zöldpala kőbaltá méréséről, 1998. június 2. (b) Szakmány György egy köeszközt tanulmányoz nagyítóval, a budapesti PGAA laborban, 2023. február 8-án.

Fig. 1. (a) Photo of the PGAA experimental logbook, about the first measurement on a greenschist axe, 2. June 1998. (b) György Szakmány is studying a polished stone tool with hand lens at the Budapest PGAA laboratory, on 8. February 2023.

Szerveztünk egy informális találkozót, ahol többek között Weiszburg Tamással (ELTE), Bartha Andrással (MÁFI) beszélgettünk a PGAA-ban rejlő lehetőségekről a geológia számára.

Ekkor, 1996-1997-ben még egyik lehetséges PGAA-alkalmazásnak sem volt kitüntetett szerepe számunkra. 1997-ben a Fizinfo-n olvastam, hogy az MTA VEAB Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága ülést szervez Veszprémben, amelynek célja, mint később megtudtam, az 1998-as budapesti Nemzetközi Archeometriai Szimpózium (ISA 1998) előkészítése. Gondoltam egy nagyot, és engedélyt kértem főnökeimtől, hogy részt vehessek a veszprémi találkozón.

Itt ismerkedtem meg T. Biró Katalinnal (Magyar Nemzeti Múzeum) valamint Vaday Andreával (MTA Régészeti Intézet), és kötetlen, baráti beszélgetést folytattunk, a mindnyájunk számára újnak számító PGAA-módszer lehetséges archeometriai alkalmazásairól. Szakmány Gyuri is minden bizonnyal jelen volt Veszprémben, de rá sajnos nem emlékszem akkorról. Néhány héttel-hónappal később azonban vele is beszélgettünk, hiszen a mérési napló tanúsága szerint 1998. június 2-án végeztük az első hazai PGAA-méréseket

Felsővadász, Bicske, Mucsfa, Györe, Endröd és Zengővárkony lelőhelyekről származó „zöldpala” (ekkor még egységesen így neveztük a kontakt metabázis nyersanyagokat) köeszközökön (1.a ábra). Így, a későrómai bronzfibulák és az obszidián pattintott köeszközök mellett a csiszolt köeszközök voltak az általunk PGAA-val elsőként vizsgált régészeti leletek.

Több okból is nagy öröm volt számomra, hogy egy új kutatási témába, új típusú együttműködésbe kapcsolódhatok. Egyik ok tagadhatatlanul az volt, hogy az archeometria, a múzeumok, műtárgyak közelsége, a régészekkel, geológusokkal folytatott beszélgetések egyfajta felüdülést jelentettek számomra a fizika „szigorúsága” mellett. Ezen felül, mind Gyuri, mind Biró Kati révén újra rendszeresen útra ejthettem a Múzeum körutat, egyetemi éveim kedves helyszínét, a megbeszélések után beugorhattam valamelyik antikváriumba, vagy lemezoltba.

Szerencsére az együttműködésünk az ELTE-vel, azaz Gyurival és a Nemzeti Múzeummal, elsősorban Biró Kattal hosszú életűnek bizonyult, a mai napig tart (1.b ábra). Több közös pályázatban (OTKA, TÉT, DAAD) vettünk részt,

számokban kifejezve, 1998-tól napjainkig több mint 1300 csiszolt és ugyanennyi pattintott (pl. obszidián, silex, kvarcporfir) kőszköz és nyersanyagai PGAA-mérését végeztük el. A számokon túl, az évek során sok-sok órát, napot töltöttünk el együtt laborokban, múzeumi raktárakban, a Múzeum kisbuszában vagy Kati autójában, terepen, konferenciákon, értekezleteken. Eközben kialakult egy nagyon hatékony és összetartó, nemzetközileg is ismert és elismert, baráti csapat, tanárok és tanítványaik együtt: Szakmány Gyuri, Józsa Sanyi, T. Biró Kati, Markó András, Péterdi Bálint, Szilágyi Vera, Bendő Zsolt, Váczi Benő, Kereskényi Erika, Szilágyi Kata, Sági Tamás, Kovács Zoltán, Miklós Dóri – egyik legfontosabb kutatási területünk a pattintott és csiszolt kőszközök proveniencia-vizsgálata. Köszönjük, Gyuri!

Bevezetés

A csiszolt kőszközök archeometriai kutatásának egyik fő feladata az előforduló nyersanyagok földrajzi eredetének meghatározása, vagyis a proveniencia-kutatás. A nyersanyagelőhely és a régészeti előkerülés távolsága szerint megkülönböztetünk helyi nyersanyagokat (<30 km távolságból), közeli vagy másként regionális nyersanyagokat (30–200 km távolságból), valamint távolsági import nyersanyagokat (>200 km távolságból). Az utóbbiak általában rendkívül jó minőségű nyersanyagok, ezzel magyarázható, hogy nagy távolságra eljutottak. A proveniencia vizsgálat elvi alapja, hogy a régészeti leletek anyagának különböző fizikai-kémiai tulajdonságait (a kőzetek ásványos és kémiai összetétele, mágneses szuszceptibilitása, stb. összehasonlítjuk a feltételezett nyersanyagelőhelyekről származó referenciaminták azonos tulajdonságaival.

A legtöbb esetben a vizsgálat tárgya pótolhatatlan, ezért a vizsgálati módszerek közül előnyt élveznek a roncsolást nem okozó fizikai, kémiai módszerek. A különböző neutronaktivációs módszerek az atommagok neutronbefogását követő karakterisztikus gammasugárzás detektálásán alapulnak. A hagyományos, ún. „instrumentális” neutronaktivációs analízis (INAA vagy NAA) roncsolásos, viszont igen érzékeny számos geokémiai fő-, mellék- és nyomelemre (Glascock & Neff 2003). A neutronaktiváció egy speciális változata a kivezetett neutronnyalábot alkalmazó prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA vagy PGNA), amely nem igényel mintavételt. A mérés során a mintát egy kivezetett neutronnyaládba helyezik, a besugárzás és a gammasugárzás detektálása egyidőben történik (Révay & Belgya 2004). Jelen cikk témája – a PGAA alkalmazása csiszolt kőszközök proveniencia kutatására – az elmúlt 25 év közös munkájának rövid összefoglalása.

Bár a prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA) fizikai alapját képező magreakciót, az ún. sugárzásos neutronbefogást vagy, az (n,γ) reakciót már az 1930-as években felfedezték (Lea 1934), az első elemanalitikai kísérleteket azonban csak az 1960-as évek végén, az 1970-es évek elején végezték el Saclay-ben, Grenoble-ban, illetve a Massachusetts Institute of Technology-n (Greenwood 1967; Lombard et al. 1968; Comar et al. 1969; Henkelmann & Born 1973). A PGAA-módszer alkalmas egy ismeretlen minta elemösszetételének panorámaanalízis-szerű meghatározására, azaz egyetlen spektrumból elvileg minden, a kimutatási határt meghaladó mennyiségben jelen lévő összetevő meghatározható.

Mivel a prompt-gamma aktivációs analízis során a vizsgálandó mintát egy, a neutronforrástól (kutatóreaktor, neutrongenerátor) elvezetett nyaládba helyezük, a vizsgált tárgy mérete kevésbé korlátozott, nagyobb tárgyakból sem szükséges mintát venni. A kivezetett nyalábok viszonylag kis (10^6 – 10^9 cm⁻²·s⁻¹) intenzitása miatt a mintákban nem történik sem makroszkopikusan, sem mikroszkopikusan észlelhető fizikai-kémiai változás, továbbá az indukált radioaktivitás is gyorsan lecseng (Kasztovszky et al. 2022). A fenti tulajdonságok kiválóan alkalmassá teszik a PGAA-t értékes, egyedi minták, pótolhatatlan kulturális és természeti kincseink, például régészeti leletek vizsgálatára.

Meg kell jegyezni, hogy az ún. nagyberendezésekhez (kutatóreaktorokhoz, gyorsítókhöz, szinkrotronokhoz) kapcsolódó vizsgálatok költségeit jelentősen megnöveli a nagyberendezések fenntartása. Ugyanakkor a hagyományos, kisebb költségű elemzési módszerek (pl. optikai mikroszkópia, transzmissziós- és pásztázó elektronmikroszkópia) továbbra is fontosak az archeometriában. Az általam ismertett kutatásokban – elsősorban a csiszolt kőszközök nyersanyageredet-vizsgálatában – a mikroszkópos vizsgálatok fontos kiegészítő módszerek.

Vizsgált anyagok és vizsgálati módszerek

A csiszolt kőszközök fő nyersanyagfajtáinak osztályozása




A csiszolt kőszközök nyersanyagaként mindhárom fő kőzettípust: magmás, üledékes és metamorf kőzeteket is megtaláljuk (T. Biró Katalin 2008). Az előforduló kőzetek színe igen változatos, a fehértől, a világosszürkétől az egészen sötét, feketés árnyalatig változik. A kőzetek egy jelentős csoportja zöldes árnyalatú, ezeket – geológiai szempontból pontatlanul – egységesen „zöldkőveknek” is nevezik.

1. táblázat. A Kárpát-medencében és környezetében előforduló fő kőszköz nyersanyagtypusok, lelőhelyeik, jellegzetes baltaalakok, és néhány vonatkozó irodalom (Szakmány Gy. 2009 alapján, kiegészítve)

Table 1. The main raw material types of stone tools, their occurrences in the Carpathian Basin and surrounding areas, typical shapes and references. (According to Gy. Szakmány 2009, extended)

Kőzettípus	Előfordulás	Néhány jellegzetes kőbalta / Irodalom
<p>1. Kontakt metabázis, zöldpala-amfibolit</p>	<p>Krkonoše-Jizera Kristályos Egység (Železný Brod, Želešice); Kis-Kárpátok - Csehország; Felsőcsatár - Magyarország; Gömörikum-Veporikum – Szlovákia; Száva-Vardar Zóna (?) - Szerbia; Máramarosi Kristályos öv (?); Erdélyi khg. (?) Déli Kárpátok (?) – Románia</p>	 <p>Koller 1985; Bradák et al. 2009; Šida & Kachlík 2009; Szakmány & Kasztovszky 2004; Szakmány et al. 2011; Kereskényi et al. 2020.</p>
<p>2. Kékpala</p>	<p>Mellétei-egység: Sűgő (Šugov)-völgy, Szádelői (Zadie)-völgy, Ájfalucska (Hačava); Pieniny szirt öv (Rudnik) – Szlovákia</p>	 <p>Faryad 1997; Józsa et al. 2001; Hovorka et al. 2000; Kereskényi et al. 2018.</p>
<p>3. Nefrit</p>	<p>Jordanów – Lengyelország; Központi (Svájci)-Alpok (Oberhalbstein és környéke) – Svájc, Ausztria</p>	 <p>Péterdi et al. 2014.</p>
<p>4. Nagynyomású metamorfít / Nagynyomású metaofiolit (Napiroxenit, eklogit, jadeitit)</p>	<p>Rivanazzano (Észak-Appeninek nyugati lába); Mon Viso (Nyugati-Alpok) – Olaszország</p>	 <p>D’Amico et al. 2003; Szakmány et al. 2013; Bendő et al. 2014; Váczi et al. 2017; Bendő et al. 2019; Váczi et al. 2019.</p>

1. táblázat, folyt.**Table 1. cont.**

<p>5. Szerpentinit</p>	<p>Alsó-Szilézia – Lengyelország; Möll-völgy; Keleti-Alpok – Penninikum; Dél-Szlovákia; Vardar-öv; Nyugati-Alpok</p>	 <p>Péterdi et al. 2014</p>
<p>6. Bazalt / Dolerit-metadolerit, metagabbro / Alkáli bazalt, alkáli dolerit, alkáli mikrogabbro, tefrit, fonolit</p>	<p>Kisalföld, Balaton-felvidék, Nógrád-Gömör, Szarvaskő – Magyarország, Maros-völgy – Románia, Vardar-öv (?) – Szerbia, Keleti-Alpok (?) – Ausztria/ Mecsek – Magyarország</p>	 <p>Harangi 1994, 2001; Dobosi et al. 1995; Harangi et al. 1996, Fűri et al. 2004; Péterdi et al. 2011; Szakmány et al. 2011.</p>
<p>7. Mész-szilikát szaruszirt (hornfels)</p>	<p>Délkeleti-Kárpátok (Ruszkahavasok), Erdélyi-középhegység – Románia</p>	 <p>Hovorka et al. 2001; Szakmány et al. 2009, 2016</p>
<p>8. „Fehér-kő” (magnezites kovakő típus, finomszemcsés mészkő, diatomit, agyagos (kaolinites) agyagkő)</p>	<p>Száva-Vardar zóna – Szerbia, Szlovákia</p>	 <p>Szakmány et al. 2009; Starnini et al. 2015</p>

A kőeszközök nyersanyagaként használt fő kőzettípusok helyes azonosítása és csoportosítása nagy mértékben köszönhető annak, hogy a prompt-gamma aktivációs analízissel sikeresen meghatároztuk a kőzetek fő kémiai összetevőit (Szakmány & Kasztovszky 2004). Az **1. táblázat**-ban összefoglalom a csiszolt kőeszközök nyersanyagaként – részben a PGAA-méréseknek köszönhetően – eddig ismert fő kőzettípusokat, és

ezek ismert vagy feltételezett földrajzi lelőhelyét (Szakmány 2009), valamint megadtunk az egyes kőzettípusokra vonatkozó néhány fontosabb újabb irodalmi hivatkozást. Saját eredményeinket részletesen ismertetjük ebben a fejezetben.

A fő kőzettípusok azonosítása és elkülönítése során az alkalmazott vizsgálati módszerek általában az egyszerűbb, kevésbé költségestől a bonyolultabb,

költségesebb műszerigényűek felé haladnak. A kőzetek színének, szemcseméretének, szöveti jellegének szabad szemmel vagy kézi nagyítóval történő megfigyelése, valamint a mágneses szuszeptibilitás mérése előzetes csoportosítást tesz lehetővé. Amennyiben vékonycsiszolatok készítése megengedett, polarizációs mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp segítségével további ásvány-kémiai elemzéseket végeztünk. Értékes régészeti leletek esetén kizárólag roncsolásmentes vizsgálatok engedhetők meg.

Az 1998-ban kezdődött és jelenleg is tartó kutatásaink fő célkitűzése a Kárpát-medence területén fellelt csiszolt kőeszközök nyersanyagának meghatározása, és a lehetséges nyersanyag-lelőhelyek azonosítása. Ebben a kutatásban jelentős szerepe van a prompt-gamma aktivációs analízisnek, mint abszolút roncsolásmentes módszernek.

2023-ig munkatársaimmal közösen több mint 1300 töredékes vagy ép csiszolt kőeszköz (balta, bárd, véső, őrlőkő, csiszológő), illetve potenciális nyersanyag minta PGAA-mérését végeztük el. Az utóbbi években megkezdtük a szerszámkövek (elsősorban homokkövek) vizsgálatát is. A csiszolt kőeszközök proveniencia kutatását az ELTE Kőzetan-Geokémiai Tanszékével indult kezdeti ad hoc együttműködést követően 2006–2011, 2012–2017 és 2019–2024 között három OTKA/NKFI pályázat keretében, továbbá nemzetközi együttműködő partnerek bevonásával (2008–2009 – Olasz-magyar TÉT, 2009–2014 – CHARISMA EU FP7, 2015–2019 – IPERION CH és 2020–2024 – IPERION HS EU HORIZON 2020 programok) folytattuk, és folytatjuk jelenleg is. A hazai geológus oldalról a kutatásokat Szakmány György koordinálja az ELTE Kőzetan-Geokémiai Tanszékéről, múzeumi-régészeti oldalról pedig T. Biró Katalin a Magyar Nemzeti Múzeumból.

A PGAA-mérésekben Szilágyi Veronika, Maróti Boglárka és Harsányi Ildikó működött közre. Az elektronmikroszkópos vizsgálatokban Judik Katalin (akkor MTA Geokémiai Kutatóintézet), Szakmány György, Bendő Zsolt (akkor ELTE), Váczi Benjámín (akkor ELTE), Sági Tamás (ELTE), Oláh István (akkor MNM Régészeti Intézet) Fehér Béla és Kereskényi Erika (akkor Herman Ottó Múzeum), Illés Levente, Szilágyi Veronika (EK), Kovács Zoltán (ELTE, EK) végezte. A vékonycsiszolatokat Józsa Sándor (ELTE) készítette. Röntgen diffrakciós vizsgálatokat Kristály Ferenc (Miskolci Egyetem Ásványtani-Földtani Intézet) végzett. Az újabb kutatásokba bekapcsolódott régészeti oldalról Szilágyi Kata is (akkor Móra Ferenc Múzeum, Szeged).

A minták tömbi („bulk”) elemösszetételének a mérésére PGAA-t, míg a felszín közeli összetétel meghatározására az ún. „eredeti felszín” SEM-EDX-módszert alkalmaztuk. Mindkét módszer

abszolút roncsolásmentesnek tekinthető, így nélkülözhetetlen a viszonylag nagyméretű, értékes régészeti leletek vizsgálatában. A rutinmódszernek számító pásztázó elektronmikroszkóphoz kapcsolt energia diszperzív röntgen spektrometria (SEM-EDX) egy új, roncsolásmentes változatát, az ún. „eredeti felszín” (OS) SEM-EDX módszert a 2010-es évek elején dolgozták ki Bendő Zsolt és munkatársai. (Bendő et al 2013). Jelen kutatásban az ELTE Kőzetan-Geokémiai Tanszékén, valamint az Energiatudományi Kutatóközpont Mikroelektronikai Laboratóriumában végeztünk OS SEM-EDX-méréseket. A kőzetek összetétel vizsgálatát megelőző csoportosításra makroszkópos megfigyelést és a mágneses szuszeptibilitás mérését is alkalmaztuk. A roncsolásmentes vizsgálatokon túlmenően a rendelkezésre álló töredékes kőeszköz leletek lehetőséget nyújtottak roncsolással járó vizsgálatokra, pl. mintavélt igénylő neutronaktivációs analízisre, illetve vékonycsiszolatok készítésére. Jelen dolgozatban a PGAA-mérésekre, és az ezek alapján nyert eredményekre összpontosítok. Meg kell jegyezni azonban, hogy a csiszolt kőeszközök proveniencia kutatása a PGAA módszer önmagában nem minden kőzettípusnál szolgáltat döntő fontosságú eredményeket, jellemzően a fentebb ismertetett több módszer együttes alkalmazása szolgáltatja a legteljesebb körű eredményt.

A PGAA-módszer validálása csiszolt kőeszközök nyersanyagának vizsgálatára

A Budapesti Kutatóreaktornál az 1990-es évek első felében kezdődött a vízszintes neutronvezetők építése. A 1. számú neutronvezető végén az akkori MTA Izotópkutató Intézet Magfizikai Osztály munkatársai 1995–96-ban alakították ki a prompt-gamma aktivációs (PGAA) mérőhelyet, Molnár Gábor vezetésével (Molnár et al. 1997). A módszer standardizálását, a prompt γ -módszer kidolgozását, a PGAA-könyvtár adatainak mérését Révay Zsolt végezte el, lehetővé téve a kvantitatív elemzést (Révay 2009). A berendezés jelenlegi állapotát Szentmiklósi László és munkatársai írták le (Szentmiklósi et al. 2010).

Az archeometriai kutatások szempontjából a PGAA legfontosabb tulajdonsága, hogy szinte tetszőlegesen nagyméretű tárgy (10–15 cm méretű kőbalta, egyéb műtárgy vagy nyersanyagtömb) behelyezhető a kivezetett neutronnyaládba, és a kibocsátott karakterisztikus gammasugárzás detektálásával a neutronok által „bevilágított” néhány cm^3 mintatér fogat elemösszetétele meghatározható. A neutronnyalábok viszonylag kis (10^6 – $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) intenzitása miatt a mintában nem keletkezik szabad szemmel látható vagy mikroszkópius károsodás, továbbá a csekély mértékű indukált radioaktivitás is néhány órán-napon belül

lecseng, és a vizsgált tárgy károsodás nélkül visszaadható tulajdonosának.

Az első hazai PGAA-mérések 1996 őszén kezdődtek. Ekkor a budapesti volt az egyetlen működő PGAA-berendezés Európában. Európán kívül az 1990-es években a japán JAERI (Yonezawa 1993) és az Egyesült Államok Maryland állambeli NIST (Paul & Lindstrom 2000) PGAA-laborjaiban folytak számottevő alkalmazott kutatások. A PGAA geológiai, illetve régészeti alkalmazásai céljából az 1990-es évektől a Missouri University Research Reactor (MURR), a NIST, a japán JAERI, majd a 2000-es évek elejétől – a Budapesti Neutron Centrum mellett – a németországi FRMII-ben (Kudejova et al. 2008) zajlottak kutatások. A kezdeti kísérleteket az említett laborok egyikében sem követték szisztematikus vizsgálatok, az archeometria vagy örökségtudomány nem vált a PGAA-módszer fő alkalmazási területévé. Ennek oka feltehetően az a tény, hogy a viszonylag kis intenzitású neutronnyalábokkal végzett PGAA nem alkalmas több száz mintából álló sokaság gyors elemzésére, így a gyors, ugyanakkor néha a kevésbé pontos (pl. hordozható XRF), esetenként a roncsolásos (pl. INAA) mérési technika előnyösebb a teljesen roncsolásmentes PGAA-val szemben. A BNC-ben 1996-ban indult budapesti PGAA-berendezésnél a lehetséges alkalmazások között az elsők között foglalkoztunk a régészeti leletek, ezen belül csiszolt kőeszközök és nyersanyagaik vizsgálatával (Szakmány & Kasztovszky 2004).

A PGAA módszer alkalmazhatóságát a csiszolt kőeszközök és nyersanyagaik elemösszetételének a mérésére bazalt és andezit nemzetközi standard referencia minták (SRM) mérésével vizsgáltuk, a PGAA-módszert a laborunkban elérhető JB-1A, JB-2 és JB-3 bazalt, valamint JA-2 és JA-3 andezit referencia minták mérésével validáltam (Kasztovszky et al. 2022).

A bazalt mintegy 44–53 m% SiO₂-tartalmú vulkanikus kőzet. A JB-1A, JB-2 és JB-3 standard mintákat a Japán Geológiai Szolgálat (Geological Survey of Japan – GSI) bocsátotta ki (Imai et al. 1995). A JB-1A ún. alkáli bazalt, a JB-2 ún. tholeiites bazalt, a JB-3 nagy alumíniumtartalmú bazalt. Az andezit mintegy 53–64 m% SiO₂-tartalmú vulkáni kőzet. A JA-2 olivin andezit, a JA-3 olivin tartalmú andezit.

A standard mintákban az összes fő- és mellékösszetevőt – SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, H₂O –, valamint a nyomelemek közül a B-t, Cl-t, Sm-t és Gd-t, esetenként Sc-t, V-t tudtuk mennyiségileg (kvantitativ), néhány % relatív pontossággal meghatározni (Szakmány et al. 2011). A szilikátos

kőzetekre érvényes közelítő kimutatási határokat korábban bemutattuk (Kasztovszky et al. 2022). A kimutatási határok természetesen függenek a mérés hosszától, a minta mennyiségétől, és a spektrumokban előforduló interferenciáktól is. A Kasztovszky et al. 2022 360. oldalán szereplő 2. táblázatban jellemző, 1 óra hosszú mérésekre és minimum 1 g mintára vonatkozó közelítő kimutatási határokat mutatunk be. Hosszabb mérések esetén a tipikus értékeknél kisebb koncentrációk is kimutathatók.

A PGAA nagy előnye, hogy a legtöbb előforduló kőzettípus esetén a fő geokémiai összetevők jól mérhetők. Ugyanakkor bizonyos fő- vagy mellék-elemek, pl. a Mg egyes kőzettípusoknál a kimutatási (kvantifikálási) határ (DL_{Mg}~1,5%) alatt lehetnek. Bár a csiszolt kőeszközök provenienciakutatásában nincs nagy jelentősége, ismét megemlítjük, hogy a PGAA egyedülállóan érzékeny módszer a H, B és Cl mérésére.

A névleges és a mért értékek viszonyát, valamint a számított „*u-score*” értékeket a Kasztovszky et al. 2022 361. oldalán szereplő 3. táblázatban és a **3. ábrán** mutatjuk be. Az „*u-score*” definíciója a következő:

$$u = \frac{|x - X_A|}{\sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_A)^2}} \quad (1)$$

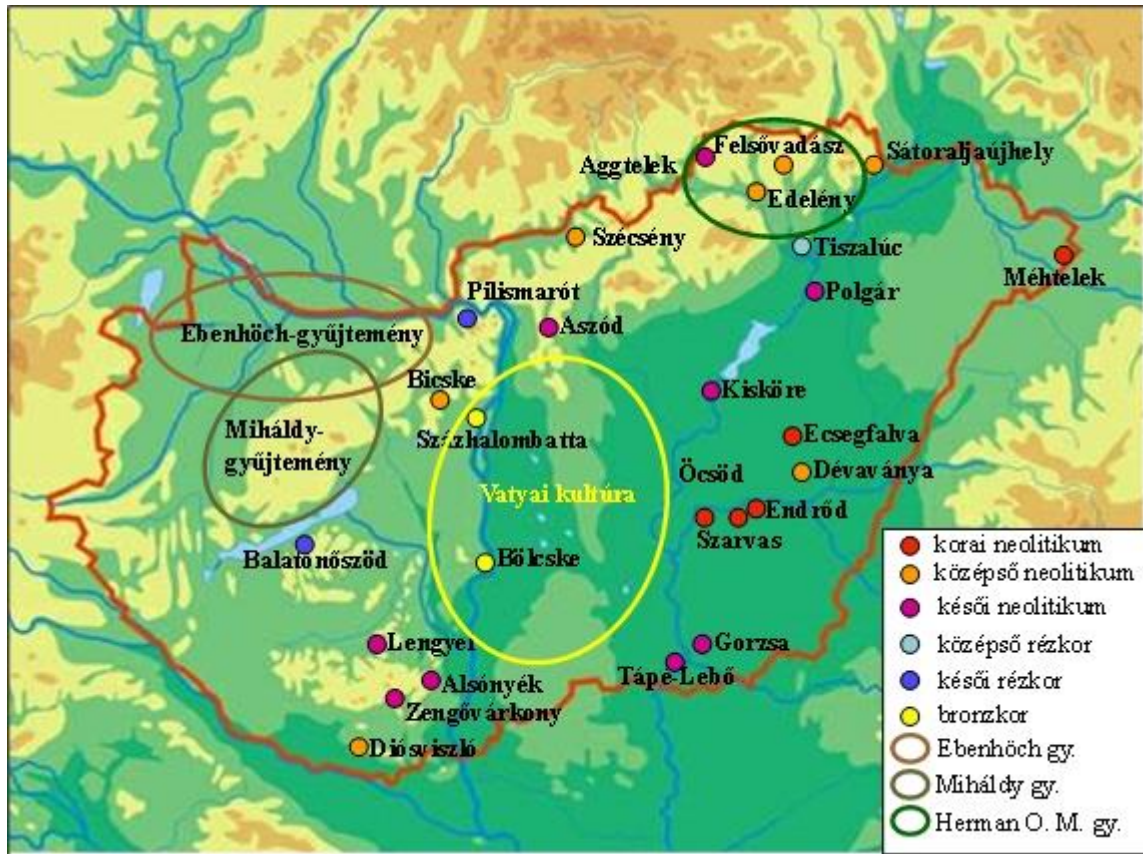
ahol x a PGAA-val mért koncentráció érték, X_A a névleges koncentráció érték, σ_x és σ_A ezek standard deviációja (szórása). Definíció szerint, ha $u \leq 1,64$ – a mért értékek nem különböznek számottevően a névleges értéktől. (IAEA 2013).

A PGAA-val mért értékeket a névleges értékekkel összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a fő összetevők koncentrációit legtöbb esetben néhány % relatív bizonytalansággal tudjuk mérni.

A Kasztovszky et al. 2022 362. oldalán szereplő 2. ábrán összehasonlítottuk a JA-1, JA-2, JB-1A, JB-2, és JB-3 standard minta, valamint több mint 670 régészeti csiszolt kőeszköz minta tipikus koncentrációtartományait a PGAA kimutatási határaival, 1 óra mérési időt feltételezve. A budapesti PGAA mérőrendszer „teljesítő-képességét” összegezve elmondhatjuk, hogy az esetek túlnyomó többségében a PGAA alkalmas a csiszolt kőeszközök kőzetei fő összetevőinek, valamint a mellék- és nyomelemek közül a H, B, Cl, Sm, Gd, esetenként a Sc, V, Nd mennyiségi kimutatására.

Célkitűzések

Kutatásunk kezdeti célja annak megállapítása volt, hogy az **1. táblázatban** felsorolt fő kőzettípusokat mennyire tudjuk egymástól elkülöníteni prompt-gamma aktivációs analízissel.



2. ábra: A Magyarországon fellelt és többségében PGAA-val is vizsgált csiszolt kőeszközök főbb régészeti lelőhelyei a térképen. Az összes vizsgált lelőhely: Szarvas, Endrőd (Starnini & Szakmány (1998)), Pitvaros, Ecsegfalva (Délkelet-Magyarország, Starnini et al. (2007)) – a korai neolitikumból; Bicske (Dunántúl, (Szakmány (1996)), Felsővadász (Északkelet-Magyarország) – a középső neolitikumból; Hódmezővásárhely-Gorzsa (Szakmány et al. (2009, 2011), Tápé-Lebő, Ócsöd, Dévaványa (Délkelet-Magyarország), Aszód, Borsod-Edelény, Aggtelek-Baradla, Polgár-Csőszhalom (Északkelet-Magyarország), Lengyel, Alsónyék, Zengővárkony (Dél-Magyarország, (Schléder & Biró (1999)) – a késő neolitikumból; Szegvár-Tűzköves, Ecséd-Gárdony, Tarnabod, Tiszalúc, Kisköre (Kelet-Magyarország); Balatonőszöd (Dunántúl) – a rézkorból. Szakmány 2009 alapján, kiegészítve)

Fig. 2.: Map of the major archaeological sites, from where the objects have been analyzed with PGAA. The list of all the investigated sites: Szarvas, Endrőd (Starnini & Szakmány (1998)), Pitvaros, Ecsegfalva (Southwest Hungary, Starnini et al. (2007)) – Early Neolithic; Bicske (Transdanubia, (Szakmány (1996)), Felsővadász (Northeast Hungary) – Middle Neolithic; Hódmezővásárhely-Gorzsa, Southeast Hungary (Szakmány et al. (2009, 2011), Tápé-Lebő, Ócsöd, Dévaványa (Southeast Hungary), Aszód, Borsod-Edelény, Aggtelek-Baradla, Polgár-Csőszhalom (Northeast Hungary), Lengyel, Alsónyék, Zengővárkony (South Hungary, (Schléder & Biró (1999)) – a Late Neolithic; Szegvár-Tűzköves, Ecséd-Gárdony, Tarnabod, Tiszalúc, Kisköre (East Hungary); Balatonőszöd (Transdanubia) – Copper Age (based on Szakmány 2009, extended)

További célunk volt, hogy a vizsgált különbségeket kimutassuk régészeti leleteken és a leleteket egyértelműen hozzá tudjuk rendelni a nyersanyagcsoportokhoz. A sikeres hozzárendelés alapján geológus és régész kollégák segítségével megkíséreltük rekonstruálni a Kárpát-medence fő kőeszköz-nyersanyagellátási útvonalait.

A vizsgált minták közül mintegy 900 régészeti lelet volt, amelyek hazai múzeumok (Magyar Nemzeti Múzeum, Herman Ottó Múzeum, Laczkó Dezső Múzeum, Móra Ferenc Múzeum, Tornyai János Múzeum, Wosinszky Mór Múzeum)

gyűjteményeiből, valamint ásatásokról származnak. A főbb lelőhelyeket a **2. ábrán** mutatom be.

Az ismert régészeti kontextusból származó leletek mellett vizsgáltuk neves 19. századi gyűjtemények – a Mihálydy- és az Ebenhöch-gyűjtemények – darabjait is, amely darabok szórványleletek, pontos régészeti lelőhelyük nem minden esetben ismert. Az Ebenhöch-gyűjteményről ismert, hogy a darabjai a Kisalföldről, valamint a Dunántúl északnyugati részéről származnak. A Mihálydy-gyűjtemény darabjait feltehetően a Bakony területén gyűjtötték a 19. században (Horváth, 2001). A legnagyobb

mintaszámmal a gorzai (126), alsónyéki (100), polgári (23), lengyeli (20), öcsödi (20), aggteleki (15) és felsővadászi (11) lelőhelyek, valamint a Mihály-gyűjtemény (56) és Ebenhöch-gyűjtemény (42) kőszköz anyagát vizsgáltuk (Szakmány 2011, Friedel et al. 2008, 2011).

A régészeti ásatások leletanyagában méréseink alapján azonosított közettípusok, valamint az irodalmi geológiai adatok alapján kijelöltük a lehetséges nyersanyaglelőhelyeket. A régészeti leletek vizsgálatával párhuzamosan, terepbejárások, illetve múzeumi mintacserék révén vizsgáltuk a lehetséges nyersanyagforrások kőzetanyagát. Az egyes kőzetfajtákat, előfordulásukat és az irodalmi hivatkozásokat az **1. táblázatban** foglaltam össze. A fő nyersanyagtípusok elkülönítése, és a lelőhelyek minél pontosabban azonosítása részben a kutatásaink során, a PGAA mérési eredmények értelmezésével sikerült. Kutatásaink során geológiai összehasonlító anyagként mintegy 350 feltételezett nyersanyagminta PGAA-elemzését végeztük el.

Valamennyi vizsgált régészeti leletre általánosságban igaz, hogy a Kárpát-medencében, többségében a mai Magyarország területén vagy annak közvetlen környezetéből került elő. Ugyanakkor több jelentős feltételezett nyersanyagforrás a Kárpátokon kívül helyezkedik el (Cseh-masszívum, Keleti-Alpok, Erdélyi-érchegység, Száva-Vardar zóna). Így a vizsgált leletcsoport és a problémakör ideális az őskori nyersanyag-felhasználási stratégiák, a távolsági kereskedelem, és a társadalmi interakciók szemléltetésére.

Eredmények

Csiszolt kőszközök fő nyersanyagtípusainak elkülönítése PGAA-mérések segítségével

A csiszolt kőszközök provenienciája meghatározásának további pontosítása céljából, 2011-ig mintegy 189 őskori (neolitikus és rézkori csiszolt kőszköz, és 42, terepi munka során a feltételezett nyersanyagterületekről származó kőzetminták PGAA-méréseit végeztük el (Szakmány et al. 2011).

A terepen gyűjtött geológiai referenciaminták közül makroszkópos és mikroszkópos megfigyelések, valamint mágneses szuszceptibilitás mérések alapján választottuk ki a reprezentatív, további vizsgálatra szánt mintákat (Bradák et al. 2009).

Mind a geológiai referenciamintákban, mind a régészeti mintákban a fő geokémiai összetevők, valamint néhány nyomelem – B, Cl, Sm és Gd, esetenként Sc, V – mennyiségét tudtuk PGAA-val meghatározni. A mért összetevők közül az alkáliatartalom ((Na₂O+K₂O)/SiO₂ illetve Al₂O₃) és a vastartalom (Fe₂O₃/SiO₂), valamint a TiO₂ tartalom (TiO₂/Al₂O₃) bizonyult a leginkább diszkriminatívnak vizsgált fő kőzetcsoportok, bázit-

metabázit, átmeneti vulkanit, ultrabázit-metaultrabázit, szaruszirt, „fehér kő”, kvarcit-kvarc-homokkő között (Szakmány et al. 2011).

2010-ben, az addigi PGAA-mérések eredményeit összegezve, 215 db, főként bazalt, zöldpala, kékpala, metadolerit, hornfels, andezit anyagú kőszköz és nyersanyagminta összetétel adatai alapján kíséreltük meg a minták csoportosítását. A PGAA-val mért TiO₂- és alkáliatartalom alapján pl. a finomszemcsés dolerit megkülönböztethető a bazalttól, amelyeket makroszkópos (vizuális) vizsgálattal nem tudunk megkülönböztetni (Szakmány et al. 2011). A dolerit anyagtípuson belül a Magyarország délkeleti, valamint az északnyugati részén előkerült régészeti leletek jól láthatóan elkülönülnek, ami különböző regionális nyersanyagforrásokat és ellátási útvonalakat feltételez. A régészeti leletek egy részéhez nem találtunk nyersanyagforrást a Kárpát-medencén belül, a régészeti minták kémiai összetétele különbözik a Szarvaskőn, illetve az Erdélyi-érchegységben található jura korú bazalttól, illetve dolerittől-metadolerittől.

2023-ban, kibővítve az újonnan vizsgált nyersanyagtípusokkal (nefrit, szerpentin, homokkő, „fehér kő”, stb.) és a régészeti lelőhelyekkel (Alsónyék, Polgár-Csőszhalom, Öcsöd, Aggtelek-Baradla barlang), mintegy 870 minta PGAA-eredményeit statisztikai módszerekkel (főkomponens analízissel – PCA) elemeztem. A főkomponens analízis eredményeiből a PGAA- csiszolt kőszközök provenienciájának kutatásában való alkalmazhatóságával kapcsolatos általános következtetéseket vontam le. Meg kell jegyezni, hogy további, mintegy 400 minta PGAA-méréseinek feldolgozása folyamatban van, a közeljövőben új adatokkal fogjuk bővíteni a statisztikus elemzést.

A PGAA-mérések alapján vizsgált minták többségénél (766 esetben) sikeresen elkülönítettük a fő nyersanyagtípusokat, a **2. táblázat** szerint. Néhány esetben a kőzetek jelentős mállottsága miatt módosult a PGAA-val mért átlagösszetétel, ezeket a mintákat nem használtuk fel a tipikus koncentrációtartományok meghatározásánál.

Az egyes csoportokra jellemző koncentrációtartományokból látható, hogy pl. a zöldpalák és kontakt metabázitok, amfibolitok és kékpalak fő összetevőinek mennyisége nagyon hasonló egymáshoz. Az amfibolitok kisebb TiO₂-tartalmukkal (átlagosan 1,69 m%), a kékpalak K₂O-tartalmukkal különböznek (átlagosan 2,75 m%, szemben a zöldpalák, kontakt metabázitok és amfibolitok átlagos 0,5 m% tartalmával). A nefritek összetétele is ezekhez hasonló, de MgO- és CaO-tartalmuk lényegesen nagyobb az előző típusoknál (átlagosan 19,8 m%, illetve 11,1 m%). Egyes nefritekre nagy mangántartalom (3,9–8,2 m% MnO) jellemző.

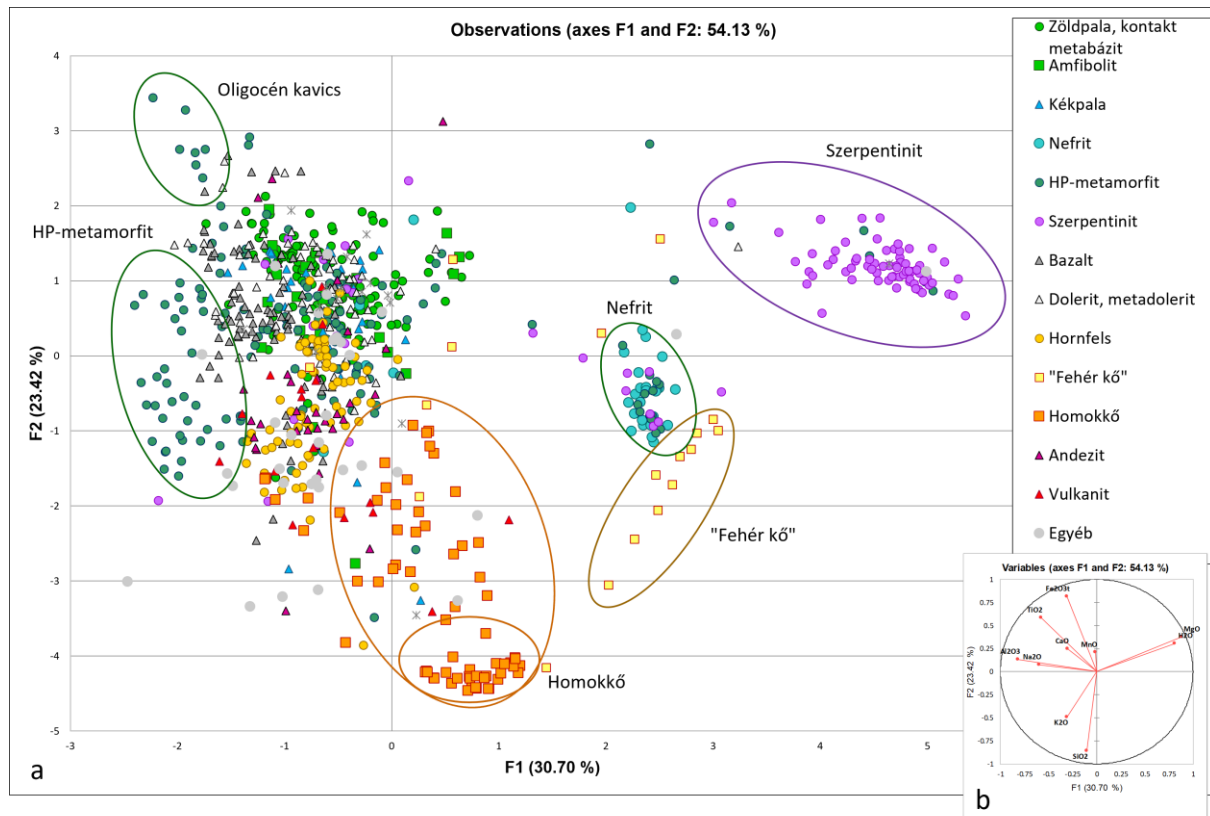
2. táblázat. A főbb kőszköz nyersanyag típusok PGAA-val mért összetétele, a főelemek minimum-maximum értékei, és átlagai m%-ban kifejezve.

Table 2. Composition of the main rock types, the minimum, maximum and average values in m%, measured with PGAA.

Kőzet	db	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Zöldpala, kontakt mb.	119	44,0- 64,7	0,45- 4,98	7,4-20,3	4,5-17,4	0,071- 0,652	2,9-16,9	1,6-15,1	<k.h.- 7,00	<k.h.- 4,02
		49,6	2,18	14,0	12,0	0,223	7,9	9,3	2,20	0,5
Amfibolit	27	37,8- 59,0	0,178- 4,50	7,5-19,1	5,4-15,6	0,090- 0,390	2,6-16,6	4,4-15,2	0,73- 5,03	0,13- 1,79
		49,1	1,69	14,1	11,2	0,193	7,8	9,9	2,28	0,53
Kékpala	32	44,0- 66,2	0,46- 3,57	11,9- 16,7	5,1-16,5	0,071- 0,933	2,0-10,4	2,6-11,6	0,66- 5,15	0,09- 5,94
		50,5	2,01	14,5	11,7	0,207	6,5	7,3	3,25	2,75
Nefrit	29	48,8- 61,5	0,017- 1,23	0,21- 16,8	0,1-10,0	0,059- 8,19	6,3-23,4	6,9-15,3	<k.h.- 4,3	0,09- 4,8
		55,7	0,173	3,7	4,88	0,688	19,8	11,1	0,61	0,32
HP- metamorfít	128	42,8- 59,5	0,046- 6,58	0,46- 22,1	0,1-19,9	0,040- 0,72	0,87- 22,2	1,85- 17,7	0,2- 14,2	0,09- 4,5
		51,7	1,57	14,9	9,5	0,194	6,2	7,3	7,20	0,48
Szerpentinit	91	33,5- 58,7	0,01-3,6	0,24- 23,2	3,2-25,0	0,037- 1,95	8,0-40,4	<k.h.- 19,4	<k.h.- 1,9	<k.h.- 0,78
		42,6	0,253	3,8	8,3	0,117	32,1	2,5	0,19	0,08
Bazalt	80	41,2- 68,2	0,558- 4,81	10,8- 18,3	6,4-16,0	0,090- 0,41	2,4-13,0	3,9-17,3	1,73- 6,36	0,09- 6,69
		47,9	2,44	15,2	11,1	0,183	7,0	8,9	3,56	2,00
Dolerit, metadolerit	65	41,0- 58,4	0,244- 5,32	5,5-19,3	5,1-16,1	0,100- 0,322	2,5-27,0	1,2-18,1	0,13- 7,10	<k.h.- 2,45
		49,3	2,05	14,3	12,0	0,192	7,2	8,3	3,58	0,60
Hornfels	70	44,5- 61,5	0,526- 1,13	12,1- 18,8	4,23- 14,5	0,035- 0,4	1,93-8,9	4,2-27,3	0,48- 3,8	<k.h.- 6,1
		51,6	0,734	15,3	6,6	0,137	5,3	15,8	1,68	1,76
„Fehér kő”	15	25,7- 78,9	<k.h.- 0,687	<k.h.- 16,5	<k.h.-6,2	<k.h.- 0,435	2,4-26,9	0,5-34,7	<k.h.- 2,68	<k.h.- 2,05
		50,4	0,076	1,8	1,0	0,100	15,9	8,5	0,43	0,21
Homokkő	66	46,4- 96,4	0,032- 1,26	1,0-20,0	0,1-6,7	<k.h.- 0,373	<k.h.-2,0	<k.h.- 24,5	<k.h.- 7,10	0,18- 5,60
		80,6	0,33	7,5	2,2	0,028	0,1	2,5	0,90	1,77
Andezit	31	42,0- 68,5	0,21- 4,09	6,9-21,3	3,3-14,1	0,021- 0,39	1,6-7,8	0,60- 14,6	0,63- 5,1	0,19- 5,9
		57,7	1,04	15,4	6,8	0,120	3,6	6,3	3,27	2,36

A nagynyomású metamorfítok összetételük szerint nem egységesek, közülük az eklogitokra nagy (1,9–6,3 m% TiO₂) titán- és (10,4–19,4 m% Fe₂O₃) vastartalom jellemző. A szerpentinitekre a kiemelkedően nagy (átlagosan 32,1 m%) MgO-tartalom és a nagy (átlagosan 8,3 m%) vastartalom jellemző. A szerpentinitek szilíciumtartalma szélesebb határok (33,5–58,7 m% SiO₂) között változik.

A bazaltokra és a dolerit-metadoleritokra egyaránt a nagyobb (átlagosan 2,4 m% TiO₂) titántartalom és átlagosan 11–12 m% vastartalom jellemző. A hornfelszekre (szaruszirtokra) szintén jellemző a kiemelkedően nagy (átlagosan 15,8, de akár 27,3 m% CaO) kalciumtartalom, és a viszonylag nagy, átlagosan 6,6 m% vastartalom. A „fehér kövek” keletkezési körülménye változatos, általánosan jellemző rájuk a nagyobb (2,4–26,9 m%) MgO-tartalom és az akár 34,7 m% CaO-tartalom. A homokkővek szilíciumtartalma széles határok között (46,4–96,4 m% SiO₂) között változhat.



3. ábra: (a) 870 db csiszolt kőeszköz, szerszámkő és nyersanyag minta csoportosítása főkomponens analízis segítségével. (b) Az egyes kémiai összetevők járuléka a főkomponensekhez.

Fig. 3.: (a) Classification of 870 stone tools and raw materials with PCA, based on their compositions, measured with PGAA (b) The weighting factors of the individual components to the major components.

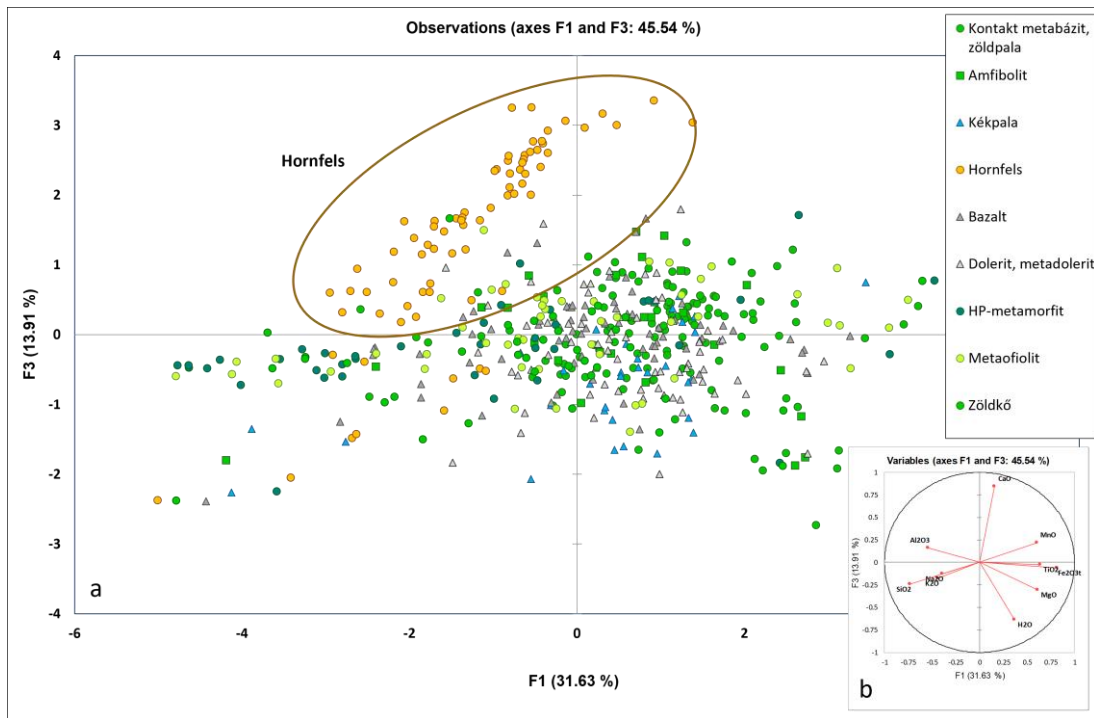
A fenti csoportosítás megerősítésére, illetve további alcsoportok elkülönítésére 870 PGAA-mérés eredményeit statisztikus vizsgálatoknak, nevezetesen főkomponens analízisnek (PCA) vetettem alá. Az eredményül kapott **3.a-b ábra** jól mutatja a PGAA-módszer erősségét és korlátait.

Elsőként az összes (870 db) mért kőeszköz és nyersanyagminta főösszetevőire – SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O –, mint változókra végeztem el a főkomponens analízist, *XLSTAT Basic 2022.5.1.* programot használva. A program lefuttatásához a nem mérhető, azaz kimutatási határ alatti koncentráció adatokat „0” értékkel helyettesíttem. A **3.a ábrán** a PCA számítás eredményeként az egyes mintákat az F1 és F2 főkomponens szerint ábrázoltam.

Az előzetes ismereteink szerint a következő kőzettípusok elkülöníthetőségét vizsgáltam: 1a. Zöldpala, kontakt metabázit, 1b. Amfibolit; 2. Kékpala; 3. Nefrit; 4. HP-metamorfit, HP-metaofiolit, Jadeitit, Eklogit; 5. Szerpentinit; 6a. Bazalt; 6b. Dolerit, metadolerit, 7. Hornfels (szarusirt), 8. „Fehér kő”; 9. Homokkő; 10. Andezit; 11. Egyéb vulkanitok, 12. Egyéb

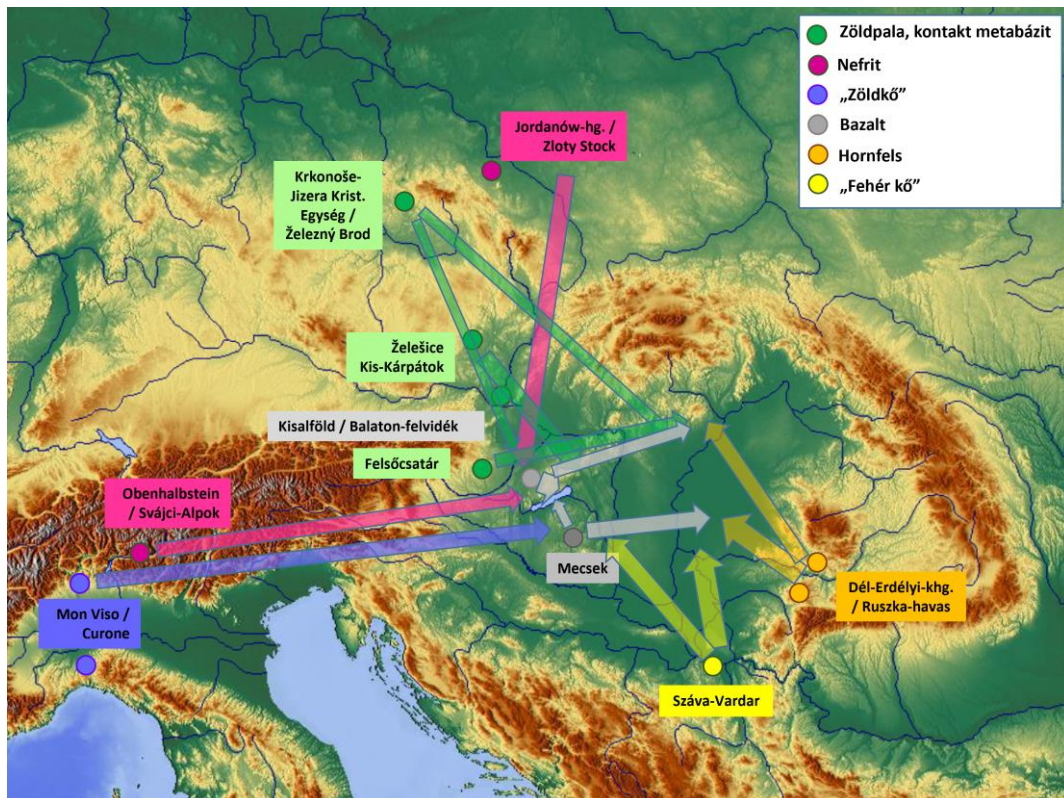
kőzetek (fonolit, metabázit, metaultrabázit, stb.); 13. Ismeretlen (nem azonosított anyagú) minták. Bár a homokkő nem a hagyományos értelemben vett csiszolt kőeszközök, hanem szerszámkövek nyersanyaga, módszertani szempontból fontos ezen anyag típus elkülönítése, ezért szerepel a statisztikailag elemzett adathalmazban.

A **3.a ábrán** jól elkülöníthető, kompakt csoportot alkotnak a szerpentinitek ($3,00 < F1 < 5,35$ és $0,57 < F2 < 1,84$), a nefritek ($2,17 < F1 < 2,65$ és $-1,15 < F2 < 0,34$), valamint az ún. „fehér kövek” egy része, nevezetesen a nagy Mg-tartalmú ún. magnezites szilicitek ($1,44 < F1 < 3,04$ és $-4,15 < F2 < 0,84$) emellett a vörös homokkövek egy része ($0,31 < F1 < 1,20$ és $-4,46 < F2 < -4,02$). A zöldkövek (metaofiolitok) csoportján belül néhány, makroszkópos leírás alapján szerpentinitnek feltételezett kőeszköz a PGAA mérések alapján nefritek vagy hornfelszek csoportjába esik. A geokémiai szempontból leginkább diszkriminatív összetevők a SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 és MgO (**3.b ábra**).



4. ábra: (a) Megismételt főkomponens analízis eredménye a kevésbé elkülöníthető kőzettípusokon. (b) Az egyes kémiai összetevők járuléka a főkomponensekhez.

Fig. 4.: (a) The result of the repeated PCA on a less separable subgroup of the investigated objects. (b) The weighting factors of the individual components to the major components.



5. ábra: A Kárpát-medencében fellelt csiszolt kőszerszók fő nyersanyagtípusainak valószínűsíthető forrásai. A következtetéseket nem kizárólag, de nagymértékben a PGAA-mérések alapján vontuk le.

Fig. 5.: The most likely provenances of the polished stone tools found in the Carpathian Basin. The conclusions are drawn not exclusively but to a great extent on the basis of the PGAA data

A PGAA-módszer korlátait mutatja ugyanakkor, hogy a zöldpalák és kontakt metabázitok csupán a fő kémiai összetevőik alapján nem különíthetők el jól egymástól, a kékpálaktól, szaruszirtektől, egyéb HP-metamorfitoktól (jadeitit, eklogit), és bazalt, dolerit-metadolerit, andezit stb. kőzetektől sem. Ha a főkomponens analízist megismételjük a jól elkülönülő minták elhagyásával megmaradt mintákra, akkor azt tapasztaljuk, hogy a Kontakt metabázit – Amfibolit – Kékpala – Hornfels – Bazalt-metadolerit – HP-metamorfit – Metaofiolit – „Zöldkő” csoportosulásból csupán a hornfelsek különíthetők el több-kevesebb megbízhatósággal (4.a ábra). A leginkább diszkriminatív összetevőknek a CaO, SiO₂ és TiO₂ (és avval korrelálva a Fe₂O₃) bizonyultak (4.b ábra).

A csiszolt kőeszközök és nyersanyagok analitikai eredményére alapozva, a következő megállapításokat tehetjük bizonyos nyersanyag típusok eredetére vonatkozóan (5. ábra)

- A zöldpala és kontakt metabázit kőeszközök – elsősorban titán- és alkáliatartalmuk alapján – két fő csoportba sorolhatók. Az észak-csehországi Krkonoše-Jizera Kristályos Masszívumból származó kontakt metabázit minták jól elkülönülnek a többi nyersanyagtól. A másik fő csoport legalább három további tagból áll: 1. felsőcsatári zöldpala (az Alpok Penninikum egységének legkeletibb része); 2. a Kis-Kárpátokból származó metabázit, illetve 3. a Dél-Cseh Masszívumhoz tartozó Želešicéből származó kontakt metabázit (Szakmány et al. 2011).
- A vizsgált nefrit balták ún. S-típusú nefritként azonosíthatók, valószínűsíthető nyersanyag-lelőhelyük Jordanów környéke (Szilézia), illetve a Középső (Svájci)-Alpok (Péterdi et al. 2014).
- Az ún. „zöldkő” (nagynyomású metamorfit, metaofiolit, jadeitit, eklogit) balták anyaga jó egyezést mutat az észak-olaszországi Mon Viso térségéből és a Curone folyó völgyéből származó nyersanyagminták anyagával (Váczai et al. 2017 és 2019).
- A bazaltból készült balták Sm- és Gd-, valamint Ti- és Fe-tartalma alapján nyersanyaga jellemzően a Kisalföld, Balaton-felvidék, illetve a Medves térségéből származó fiatal bazalt, nem a mecseki idősebb (alsó kréta korú) bazalt (Péterdi et al. 2011).
- Eddigi adataink alapján a mész-szilikát szaruszirtből (hornfelsből) készült balták nyersanyaglelőhelyeként – Ca- és Si-tartalmuk alapján – az Erdélyi-középhegységet, illetve a Ruzska-havasokat tudtuk azonosítani. A két, egymástól mintegy 50 km-re lévő lelőhely

között azonban a PGAA-mérésekkel és más módszerekkel nem tudunk egyértelműen különbséget tenni (Szakmány et al. 2016).

- A nagy Mg-tartamú magnezites szilicit kőzetek forrásaként nagy valószínűséggel a Kárpát-medencétől délre fekvő Száva-Vardar zóna azonosítható, de ennek megerősítéséhez még további összetételadatokra van szükség (Szakmány et al. 2009, Starnini et al. 2015).

Összegzés

A PGAA-módszer vitathatatlan előnye, hogy a kivezetett neutronyalábokkal szinte tetszőleges méretű tárgy „tömbi” összetételét meg lehet határozni mintavétel, valamint a tárgy károsítása, mikroszkopikus vagy makroszkopikus roncsolása nélkül. A nyert összetételi adatok általában nyersanyag eredet (proveniencia) meghatározására, műhelyazonosításra, illetve hamisítványok kiszűrésére alkalmasak. Ugyanakkor a módszer hátránya, hogy néhány kivételtől (H, B, Cl, Nd, Sm, Gd) eltekintve elsősorban a geológiai főelemek mennyiségi kimutatására alkalmas, érzékenysége számos, az archeometriában fontos nyomelemnél nem éri el az NAA és LA-ICP-MS módszerek érzékenységét. A neutronok kutatóreaktorokban történő előállítása ezen felül költséges, a kísérleti berendezések helyhez kötöttek, ami megnehezítheti egyes értékes, korlátozottan szállítható műtárgyak elemzését.

Az 1998-tól napjainkig zajló, csiszolt kőeszközök proveniencia kutatásainak tapasztalatai alapján elmondhatjuk, hogy a prompt-gamma aktivációs analízis, mint a fő geokémiai összetevők tömbi mennyiségi meghatározására alkalmas roncsolásmentes módszer lehetővé teszi a mai Magyarország területén fellelt őskori (neolitikumi és rézkori) csiszolt kőeszközök fő nyersanyag típusainak jellemzését és részleges elkülönítését egymástól. Ezen túlmenően, bizonyos kőzettípusok esetén, kellő számú geológiai referenciaminta mérésével és más módszerekkel (mágneses szuszceptibilitás mérés, SEM-EDX) kiegészítve a potenciális – sok esetben a Kárpátokon túli – forrásterületekről, a régészeti leletanyaghoz nagy megbízhatósággal nyersanyaglelőhelyet is rendelhetünk.

A csiszolt kőeszközök nyersanyag eredetének meghatározásában a PGAA mérési eredmények a fentebb tárgyalt esetekben (zöldpala-kontakt metabázit, zöldkő, bazalt, hornfels, magnezites szilicit „fehér kő”) sikerrel felhasználhatók.

Eredményeink szerint a PGAA-módszer mérsékeltén alkalmazható az amfibolit, illetve kékpala kőzetek eredetének a meghatározására (Kereskényi et al. 2018), mivel a mért összetevők alapján ezek a kőzetek nem különülnek el jól a zöldpálaktól és a kontakt metabázitoktól. Eddigi eredményeink alapján meg kell állapítanunk, hogy a PGAA nem

sikeres a szerpentinit nyersanyaglelőhely meghatározásában, bár a módszer a közettípust megbízhatóan azonosítja. A PGAA mellett további ujjlenyomat-szerű nyomelemek mérésére, illetve elektronmikroszkópos SEM-EDX vizsgálatok hozhatnak eredményt.

Ha a Kárpát-medencében fellelt kőeszközök anyaguk szerinti területi eloszlását tekintjük, akkor – elsősorban a PGAA-mérések alapján – a következő megállapításokat tehetjük. Az őskori csiszolt kőeszköz nyersanyaguk származási helye szerint Magyarország területén három fő régió jelölhető ki (Szakmány 2009).

- A Dunántúlon a „zöldpala” jellegű (elsősorban a kontakt metabázit, de a felsőcsatári zöldpala is viszonylag jelentős), bazaltos és a szerpentinites kőzetek dominálnak. Ezen belül az észak-dunántúli részen a Krkonoše-Jizera kontakt metabázit, a felsőcsatári zöldpala és a plio-pleisztocén bazalt az uralkodó közettípus, míg a dél-dunántúli részen az alsó kréta korú mecseki bazalt és alkáli dolerit.
- Az észak- és északkelet-magyarországi területek kőeszközeinek jellemző nyersanyaga a plio-pleisztocén bazalt, a metadolerit, és a „zöldpala” jellegű kőzetek. Elszórtan szaruszirt (hornfels), andezit és kékpala is előfordul.
- A Tiszántúlon (a Nagyalföld keleti felén) jellemzően előforduló nyersanyag típus a szaruszirt (hornfels), metadolerit és a mecseki típusú bazalt. Elsősorban a déli részeken szórványosan az ún. „fehér kő” is előfordul.

Ily módon, a roncsolásmentes prompt-gamma aktivációs analízis hasznos adatokat szolgáltat az őskor távolsági kereskedelmi viszonyainak rekonstrukciójára. Az elmúlt időszakban vizsgált nagyobb régészeti anyag – Alsónyék, Öcsöd, Lengyel – mérési eredményeinek feldolgozása, valamint az újabb adatok kiértékelése és értelmezése jelenleg is folyamatban van.

A cikkben ismertetett, évtizedeken átívelő kutatás kezdeményezésében, véghezvitelében, összefogásában, időnként életben tartásában pótolhatatlan és eléggé nem hangsúlyozható szerepe, jelentősége van Gyurinak. Köszönjük!

A szerző tudományos közreműködése

Kasztovszky Zsolt Eredeti és javított kézirat.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik az NKFIH-nak a K 62874, K 100385 és K 131814 sz. kutatási projektekben nyújtott támogatásért.

Irodalom

BENDŐ Zs.; OLÁH I.; PÉTERDI B.; SZAKMÁNY Gy. & HORVÁTH E. (2013): Csiszolt kőeszközök és ékkövek roncsolásmentes SEM-EDX vizsgálata: lehetőségek és korlátok. *Archeometriai Műhely* **X/1** 51–66.

BENDŐ, Zs., SZAKMÁNY, Gy., KASZTOVSZKY, Zs., MARÓTI, B., SZILÁGYI, Sz., SZILÁGYI, V. & BIRÓ, K.T. (2014): Results of non-destructive SEM-EDX and PGAA analyses of jade and eclogite polished stone tools in Hungary, *Archeometriai Műhely* **XI/4** 187–205.

BENDŐ, Zs., SZAKMÁNY, Gy., KASZTOVSZKY, Zs., BIRÓ, K. T., OLÁH, I., OSZTÁS, A., HARSÁNYI, I. & SZILÁGYI, V. (2019): High pressure metaophiolite polished stone implements found in Hungary, *Archaeological And Anthropological Sciences* **11** 1643–1667. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0618-6>

BIRÓ K.T. (2008): Kőeszköz-nyersanyagok Magyarország területén. – Raw materials for stone tools in Hungary. In: Az ásványok és az ember a mai Magyarország területén a XVIII. század végéig. Bányászat Geotudományok. *A Miskolci Egyetem Közleménye* **74** Szerk. Szakáll S. Miskolc 11–38.

BRADÁK, B., SZAKMÁNY, Gy., JÓZSA, S. & PŘICHYSTAL, A. (2009): Application of magnetic susceptibility on polished stone tools from Western Hungary and the Eastern part of the Czech Republic (Central Europe), *Journal Archaeological Science*, **36/10** 2437–2444. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.07.001>

COMAR, D., CROUZEL, C., CHASTELAND, M., RIVIERE, R. & KELLERSHOHN, C. (1969): The Use of Neutron Capture Gamma Radiations for the Analysis of Biological Samples. In: DeVoe, J.R. (ed.) *Modern Trends in Activation Analysis* (NBS Spec. Pub. 312), vol. 1. pp. 114–127. National Bureau of Standards, Washington, DC

D'AMICO, C., STARNINI, E., GASPAROTTO, G. & GHEDINI, M. (2003): Eclogites, jades and other HP-metaophiolites employed for prehistoric polished stone implements in Italy and Europe, *Periodico di Mineralogia* **73/3** 17–42.

FARYAD, S.W. (1997): Lithology and metamorphism of the Meliata unit high-pressure rocks. In: GRECULA, P., HOVORKA, D. & PUTIŠ, M. eds., *Geological evolution of the Western Carpathians. – Mineralia Slovaca – Monograph*, Bratislava, 131–144.

- FRIEDEL, O., BRADÁK, B., SZAKMÁNY, Gy., SZILÁGYI V. & T. BIRÓ K. (2008): Az Ebenhöch csiszolt kőeszköz gyűjtemény archeometriai vizsgálatának eredményei, *Archeometriai Műhely* **V/3** 1–12.
- FRIEDEL, O., BRADÁK, B., SZAKMÁNY, Gy., SZILÁGYI, V. & BIRÓ, K.T. (2011): Archaeometric Processing of Polished Stone Artefacts from the Ebenhöch Collection (Hungarian National Museum, Budapest, Hungary). In: TURBANTI-MEMMI, I., ed., *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry*, 12–16 May 2008, Siena, Italy, 211–219. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14678-7>
- FÜRI, J., SZAKMÁNY, Gy., KASZTOVSZKY, Zs. & BIRÓ, K. T. (2004): The origin of the raw material of basalt polished stone tools in Hungary, *Proceedings of 5th Workshop of the IGCP/UNESCO Project No. 442, 2002, Bratislava, Slovak Geological Magazine* **10/1-2** 97–104.
- GLASCOCK, M. D. & NEFF, H. (2003): Neutron activation analysis and provenance research in archaeology. *Measurement Science and Technology* **14** 1516–1526. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/9/304>
- GMÉLING, K., SIMONITS, A., SZIKLAI LÁSZLÓ, I. & PÁRKÁNYI, D. (2014): Comparative PGAA and NAA results of geological samples and standards, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **300/2** 507–516. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3032-2>
- HARANGI, Sz. (1994): Geochemistry and petrogenesis of the Early Cretaceous continental rift-type volcanic rocks of the Mecsek Mountains, South Hungary. *Lithos* **33** 303–321.
- HARANGI, Sz., SZABÓ, Cs., JÓZSA, S., SZOLDÁN, Zs., ÁRVA-SÓS, E., BALLA, M. & KUBOVICS, I. (1996): Mesozoic igneous suites in Hungary: Implications for genesis and tectonic setting in the Northwestern part of Tethys. *International Geology Review* **38** 336–360.
- HARANGI, Sz. (2001): Neogene to quaternary volcanism of the Carpathian-Pannonian region – a review, *Acta Geologica Hungarica* **44** 223–258.
- HENKELMANN, R. & BORN, H.J. (1973): Analytical Use of Neutron-Capture Gamma- Rays. *Journal of Radioanalytical Chemistry* **16** 473–481.
- HOVORKA, D., KORIKOVSKY, S. & SOYÁK, M. (2000): Neolithic/Aeneolithic blueschist axes: Northern Slovakia, *Geologica Carpathica* **51** 345–351.
- HOVORKA, D., ILLÁŠOVÁ, L. & SPIŠIAK, J. (2001): Plagioclase-clinopyroxene hornfels: raw material of 4 Lengyel Culture axes (Svodín, Slovakia) Bratislava: Dionýz Štúr publishers, *Slovak Geological Magazine* **7/3** 303–308.
- IAEA Worldwide: Open Proficiency Test for X Ray Fluorescence Laboratories (Issue December), IAEA Laboratories, 2013 Seibersdorf, 89 p.
- IMAI, N., TERASHIMA, S., ITOH, S. & ANDO, A. (1995): 1994 compilation values for GSJ reference samples, Igneous rock series, *Geochemical Journal* **29/1** 91–95. <https://doi.org/10.2343/geochemj.29.91>
- JÓZSA, S., SZAKMÁNY, Gy., ORAVECZ, H. & CSENGERI, P. (2001): Preliminary petrographic report on blueschists, the materials of Neolithic polished stone tools from Hungary, *Slovak Geological Magazine* **7/4** 351–354.
- IONESCU, C. & HOECK, V. (2010): Mesozoic ophiolites and granitoids in the Apuseni Mts. IMA2010 Field Trip Guide RO2. *Acta Mineralogica et Petrographica (Szeged). Field Guide Series*, **20** 1–44.
- KASZTOVSZKY, Zs., MARÓTI, B., SZENTMIKLÓSI, L. & GMÉLING, K. (2022): Applicability of prompt-gamma activation analysis to determine elemental compositions of silicate-based cultural heritage objects and their raw materials, *Journal of Cultural Heritage* **55** 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.04.011>
- KERESKÉNYI E., SZAKMÁNY Gy., FEHÉR B., KASZTOVSZKY Zs., KRISTÁLY F. & RÓZSA P. (2018): New archaeometrical results related to Neolithic blueschist stone tools from Borsod-Abaúj-Zemplén County, Hungary. *Journal of Archaeological Science: Reports*, **17** 581–596. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.024>
- KERESKÉNYI, E., SZAKMÁNY, Gy., FEHÉR, B., HARSÁNYI, I., SZILÁGYI, V., KASZTOVSZKY, Zs. & TÓTH, M.T. (2020): Archaeometrical results related to Neolithic amphibolite stone implements from Northeast Hungary, *Journal of Archaeological Science: Reports* **32** 102437. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102437>
- KOLLER, F. (1985): Petrologie und Geochemie der Ophiolite des Penninikums am Alpenstrand. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Wien*, **128** 83–150.
- KUDĚJOVA, P., MEIERHOFER, G., ZEITELHACK, K., JOLIE, J., SCHULZE, R., TÜRLER, A. & MATERNA T. (2008): The new PGAA and PGAI facility at the research reactor FRM II in Garching near Munich, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **278/3** 691–695. <https://doi.org/10.1007/s10967-008-1506-9>
- LEA, D.E. (1934): Combination of Proton and Neutron. *Nature* **133** 24.

- LOMBARD, S.M. & ISENHOUR, T.L. (1968): Neutron Capture Gamma-Ray Activation Analysis Using Lithium Drifted Germanium Semiconductor Detectors. *Analytical Chemistry* **40** 1990–1994.
- MOLNÁR, G., BELGYA, T., DABOLCZI, L., FAZEKAS, B., RÉVAY, Zs., VERES, Á., BIKIT, I., KIS, Z. & ÖSTÖR, J. (1997): The new prompt gamma-activation analysis facility at Budapest, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **215** 111–115. <https://doi.org/10.1007/BF02109886>
- PAUL, R.L. & LINDSTROM, R.M. (2000): Prompt gamma-ray activation analysis: Fundamentals and applications, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **243** 181–189. <https://doi.org/10.1023/A:1006796003933>
- PÉTERDI B., SZAKMÁNY G., JUDIK K., DOBOSI G., KOVÁCS J., KASZTOVSZKY Zs. & SZILÁGYI V. (2011): Bazalt anyagú csiszolt kőeszközök közzétani és geokémiai vizsgálata (Balatonöszöd - Temetői dűlő lelőhely), *Archeometriai Műhely* **VIII/1** 33–68.
- PÉTERDI, B., SZAKMÁNY, Gy., BENDŐ, Zs., KASZTOVSZKY, Zs., BIRÓ, K. T., GIL, G., HARSÁNYI, I., MILE, V. & SZILÁGYI, Sz. (2014): Possible provenances of nephrite artefacts found on Hungarian archaeological sites (preliminary results), *Archeometriai Műhely*, **XI/4** 207–222.
- RÉVAY, Zs. & BELGYA, T. (2004): Principles of PGAA method, in: Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams, (G.L. Molnár ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/New York, pp.1–30.
- RÉVAY, Zs. (2009): Determining elemental composition using prompt γ activation analysis, *Analytical Chemistry* **81** 6851–6859. <https://doi.org/10.1021/ac9011705>
- SCHLÉDER, Zs. & BIRÓ, K.T. (1999): Petroarchaeological studies on polished stone artifacts from Baranya county, Hungary, *Janus Pannonius Múzeum Évkönyve*, Pécs, **43** 75–101.
- ŠÍDA, P. & KACHLÍK, V. (2009): Geological setting, petrology and mineralogy of metabasites in a thermal aureole of Tanvald granite (northern Bohemia) used for the manufacture of Neolithic tools, *Journal of Geosciences* **54** 269–287. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.042>
- STARNINI, E. & SZAKMÁNY, Gy. (1998): The lithic industry of the Neolithic sites of Szarvas and Endrőd (South-Eastern Hungary): technotypological and archaeometrical aspects, *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **50** 279–342.
- STARNINI, E., SZAKMÁNY, Gy. & WHITTLE, A. (2007): Polished, ground and other stone artefacts. In: WHITTLE, A., ed., The Early Neolithic on the Great Hungarian Plain. Investigation of the Körös culture site of Ecesfalva 23, County Békés. – *Varia Archaeologica Hungarica* **XXI** Budapest, 667–676.
- STARNINI, E., SZAKMÁNY, Gy., JÓZSA, S., KASZTOVSZKY, Zs., SZILÁGYI, V., MARÓTI, B., VOYTEK, B. & HORVÁTH, F. (2015): Lithics from the Tell Site Hódmezővásárhely-Gorzsa (Southeast Hungary): typology, technology, use and raw material strategies during the Late Neolithic (Tisza Culture). In: Hansen S, Raczky P, Anders A, Reinburger A (eds) Neolithic and Copper Age between the Carpathians and the Aegean Sea: chronologies and technologies from the 6th to the 4th millennium BCE, *Archäologie in Eurasien* **31** 105–128.
- SZAKMÁNY, Gy. (1996): Results of the petrographical analysis of some samples of the ground and polished stone assemblage. In: MAKKAY, J., STARNINI, E. & TULOK, M., eds., Excavations at Bicske Galagonyás (part III). The Notenkopf and SopotBicske cultural phases. - *Società per la Preistoria e Protostoria della Regione Friuli-Venezia Giulia*, Quaderno **6** Trieste, 224–241.
- SZAKMÁNY, Gy. & KASZTOVSZKY, Zs. (2004): Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA), a new method in the archaeological study of polished stone tools and their raw materials, *European Journal of Mineralogy* **16/2** 285–295. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2004/0016-0285>
- SZAKMÁNY Gy. (2009): Magyarországi csiszolt kőeszközök nyersanyag típusai az eddigi archeometriai kutatások eredményei alapján, *Archeometriai Műhely*, **VI/1** 11–29.
- SZAKMÁNY, Gy., KASZTOVSZKY, Zs., SZILÁGYI, V., STARNINI, E., FRIEDEL, O. & BIRÓ, K.T. (2011): Discrimination of prehistoric polished stone tools from Hungary with non-destructive chemical Prompt Gamma Activation Analyses (PGAA), *European Journal of Mineralogy* **23** 883–893. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2011/0023-2148>
- SZAKMÁNY Gy., T. BIRÓ K., KRISTÁLY F., BENDŐ Zs., KASZTOVSZKY Zs. & ZAJZON N. (2013): Távolsági import csiszolt kőeszközök nagynyomású metamorfítokból Magyarországon, *Archeometriai Műhely* **X/1** 83–92.
- SZAKMÁNY Gy., JÓZSA S., BENDŐ Zs., KASZTOVSZKY Zs. & HORVÁTH F. (2016): Magyarországon előkerült hornfels (mész-szilikát szaruszirt) anyagú csiszolt kőeszközök nyersanyaglelőhelyének felkutatása, *Archeometriai Műhely* **XIII/1** 43–54.

SZENTMIKLÓSI, L., BELGYA, T., RÉVAY, Zs. & KIS, Z. (2010): Upgrade of the prompt gamma activation analysis and the neutron-induced prompt gamma spectroscopy facilities at the Budapest Research Reactor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **286** 501–505.

<https://doi.org/10.1007/s10967-010-0765-4>

VÁCZI B., SZAKMÁNY Gy., KASZTOVSZKY Zs., STARNINI E. & NEBIACOLOMBO F. (2017): Előzetes eredmények a magyarországi nagy nyomású metaofiolit anyagú csiszolt kőeszközök származási helyének pontosításához, *Archeometriai Műhely* **XIV/2** 69–84.

VÁCZI, B., SZAKMÁNY, Gy., STARNINI, E., KASZTOVSZKY, Zs., BENDŐ, Zs., NEBIACOLOMBO, F. A., GIUSTETTO, R. & COMPAGNONI, R. (2019): High-pressure meta-ophiolite boulders and cobbles from northern Italy as possible raw-material sources for “greenstone” prehistoric tools: petrography and archaeological assessment, *European Journal of Mineralogy* **31/ 5-6** 905–917.

<https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2859>

YONEZAWA, C. (1993): Prompt γ -Ray Analysis of Elements Using Cold and Thermal Reactor Guided Neutron Beams, *Analytical Sciences* **9** 185–193. <https://doi.org/10.1007/BF02784228>

