

Elasztikus termobarometria – módszertani áttekintés

SPRÁNITZ Tamás^{1,2*}, PORKOLÁB Kristóf¹, HENCZ Mátyás¹, KERESZTES Tamás^{1,2}, SALAMON Botond³,
GILIO, Mattia⁴, ALVARO, Matteo⁴, BERKESI Márta^{1,2}

¹MTA-FI FluidsByDepth Lendület Kutatócsoport, HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, 9400 Sopron, Csatka Endre u. 6-8.

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Közöttani és Geokémiai Tanszék,
Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

³Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Ásványtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

⁴Department of Earth and Environmental Sciences, University of Pavia, Pavia, Italy

*spranitz.tamas@epss.hun-ren.hu

Elastic thermobarometry – a methodological overview

Abstract

The study of metamorphic rocks is a key to understand the ongoing plate tectonic processes, as they commonly preserve the record of several episodes of their geological evolution, like chemical or mechanical equilibrium, metamorphic reactions, fluid-rock interaction over millions (or tens of millions) of years. Inclusions (fluid, melt and mineral inclusions) entrapped in rock-forming minerals preserve chemical compositions and physical states that allow direct study of processes that occurred at higher pressures and/or temperatures, even in the subduction zone. Mineral inclusions are common in metamorphic minerals and can be trapped over a wide range of pressure and temperature (P-T) conditions during the growth of the host mineral and can be used to reconstruct the trapping conditions. The solid crystal inclusions trapped within the rock-forming minerals during growth experience different magnitudes of volume change due to their different elastic compressibility and thermal expansion coefficients. The host and inclusion minerals are therefore subject to differential volume changes during the subsequent P-T path (from entrapment at depth to surface exposure). This „passive” differential volume change results in stress buildup between the host mineral and the inclusion that is characteristic of trapping P-T. Therefore, some host-mineral inclusion pairs can be used as barometers (e.g., quartz in garnets) because of their different mechanical properties, while other pairs can be used as thermometers (zircon in garnet). The residual stress can be determined by carrying out Raman spectroscopic analyses or single-crystal X-ray diffraction, given the appropriate material constants and equations of states, which can be used to determine the trapping conditions (entrapment isomeke). Regarding its increasingly wide application, this overview presents the methodological aspects of elastic thermobarometry based on Raman spectroscopy measurements that can be applied to reconstruct P-T evolution not only of metamorphic, but magmatic rocks as well.

Keywords: *thermobarometry, entrapment conditions, metamorphic P-T history, mineral inclusion, quartz-in-garnet, zircon-in-garnet, Raman spectroscopy*

Összefoglalás

A lemeztektonikai folyamatok megértéséhez kulcsfontosságú a metamorf kőzetek vizsgálata, amelyekben a geológiai fejlődéstörténet több epizódja (kémiai vagy mechanikai egyensúly, metamorf reakciók, fluidum-kőzet-kölcsönhatás) is megőrződhet. A kőzetalkotó ásványokban csapdázódott zárványok (fluidum-, olvadék- és kristályzárványok) olyan kémiai összetételt és fizikai állapotot konzerválnak, amelyek segítségével közvetlenül vizsgálhatók a nagyobb nyomáson és/vagy hőmérsékleten, például a szubdukciós zónákban végbement folyamatok. A metamorf kőzetek ásványjaiban gyakoriak a kristályzárványok, melyek a bezáró ásvány növekedése során széles nyomás- és hőmérséklet- (P-T) tartományban csapdázódhattak, és vizsgálatukkal rekonstruálhatók a csapdázódási körülmények. A kőzetalkotó ásványok által – a növekedés során – bezárt szilárd kristályzárványokat eltérő mértékű térfogatváltozás jellemzi változó nyomás vagy hőmérséklet esetén – a különböző mértékű elasztikus (rugalmas) kompresszibilitási és hőtágulási együtthatójuknak köszönhetően. Ebből kifolyólag a P-T út további szakaszaiban (a nagy mélységben történő bezáródástól a felszínre kerülésig) eltérő mértékű térfogatváltozás hat a befogadó- és zárványkristályokra. Ez a „passzív” térfogati deformáció feszültséget okoz a befogadó ásvány és a zárvány között, amelynek meghatározása lehetővé teszi a csapdázódási P-T-viszonyok megállapítását. Ezért egyes befogadó ásvány –zárvány rendszerek az eltérő mechanikai tulajdonságaik miatt barométerként (pl. kvarc gránátban), míg más párok termométerként (cirkon gránátban) használhatók. A reziduális, azaz megőrző-

dött alakváltozás – a megfelelő anyagi állandók és állapotegyenletek ismeretében – Raman-spektroszkópos vagy egykristály röntgen-diffrakciós mérésekkel meghatározható, amelynek segítségével a csapdázódási körülmények (izomek-görbe) is megadhatók. Jelen áttekintés az egyre szélesebb körben alkalmazott Raman-spektroszkópos méréseken alapuló elasztikus termobarometria módszertanát mutatja be, mely nemcsak metamorf, hanem magmás P-T fejlődés rekonstrukciójára is alkalmas.

Tárgyszavak: termobarometria, csapdázódási körülmények, metamorf P-T-fejlődéstörténet, kristályzárvány, kvarc gránátban, cirkon gránátban, Raman-spektroszkópia

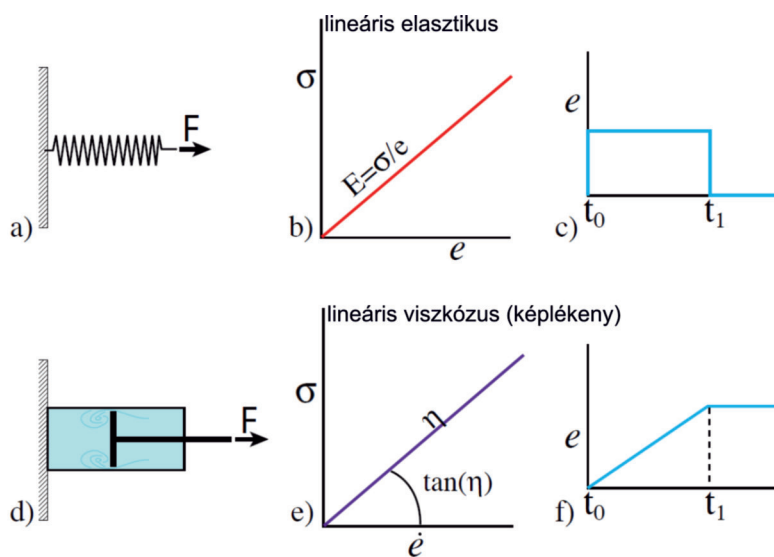
Bevezetés

Az elasztikus termobarometria módszertana a szilárd ásványok alakváltozásán, illetve az alakváltozás és a feszültség közötti kapcsolaton alapul. Ahogy a nevéből is adódik, a módszer az elasztikus deformáció tulajdonságait használja ki kristályzárványok csapdázódási nyomásának és hőmérsékletének becslésére. Az elasztikus, vagyis rugalmas deformáció jellemzője – amit az elasztikus termobarometria is felhasznál –, hogy az anyagban fellépő feszültség arányos a létrejött alakváltozással („strain”; *1. a, b ábra*). A feszültség és az alakváltozás lineáris kapcsolata ugyanis jó közelítést biztosít a végtelenül kicsi alakváltozásokra (*1. b ábra*). Képletesen fogalmazva: a rugalmas feszültség attól függ, mennyire van összenyomva (vagy széthúzva) a „rugó”, nem pedig attól, hogy milyen gyorsan nyomódott össze (vagy húzódtott szét) (*1. a, b ábra*). Az alakváltozás és az erőhatás kapcsolata lehet lineáris vagy nemlineáris, az anyag elasztikus

paramétereitől függően. A rugalmas deformáció továbbá reverzibilis, hiszen a „rugó” visszanyeri eredeti alakját az erőhatás (feszültség) megszűnése után (*1. c ábra*). Ez annak köszönhető, hogy a rugalmas deformáció során a kristályrácsbeli kapcsolatok nem szakadnak meg, hanem pusztán rövidülnek/nyúlnak. Az elasztikus deformációval ellentétben viszkózus (kristályplasztikus) deformáció esetén a feszültség az alakváltozás sebességével („strain rate”; *1. e ábra*) arányos, továbbá az alakváltozás permanens, nem reverzibilis (*1. f ábra*).

Az elasztikus termobarometria alapkoncepciója szerint egy szilárd kristályzárvány más, befogadó ásvány általi csapdázódásakor az adott (csapdázódási) nyomáson és hőmérsékleten nem jön létre különbözeti (differenciális) feszültség és alakváltozás („stress and strain”), tehát a zárvány térfogata pontosan megegyezik a befogadó ásványban lévő üreg vagy lyuk térfogatával, más szóval feszültségmentesen tölti ki azt, azaz mechanikai egyensúlyban vannak (SORBY & BUTLER 1869). A „szabad”, azaz feszültség alatt nem álló kristályokkal szemben a zárványként csapdázódott ásvány nem távolítható vagy húzódhat össze szabadon, ugyanis ebben gátolja az azt körülvevő befogadó ásvány (ALVARO et al. 2020, ANGEL et al. 2024). A nyomás-hőmérséklet (P-T) viszonyok megváltozásával, például a metamorf kőzetek exhumálódásakor, magmás kőzetek vagy xenolitok felszínre kerülésekor a befogadó ásványra és a zárványra eltérő mértékű térfogatváltozás hat (ROSENFELD & CHASE 1961). Mindez a különböző anyagok eltérő hőtágulásának és összenyomhatóságának következménye. A különböző rugalmassági tulajdonságok eltérő mértékű térfogatváltozást eredményeznek az eltérő kristályszerkezetekben. Ez a jelenség nemcsak a kőzetalkotó ásványok zárványainál, hanem például épített környezetünkben is jól megfigyelhető, amit az utcák aszfaltburkolataiba ágyazott fém csatornafedelek körül kialakult radiális repedések példáznak (*2. ábra*).

A befogadó és a zárványfázis eltérő mértékű térfogatváltozása kompressziós (pozitív) vagy tenziós (negatív) alakváltozás kialakulását okozhatja. Az alakváltozás mértékének számszerűsítése teszi lehetővé a kristályzárvány csapdázódási nyomás- és hőmérsékletviszonyainak meghatározását (*3. ábra*). Az

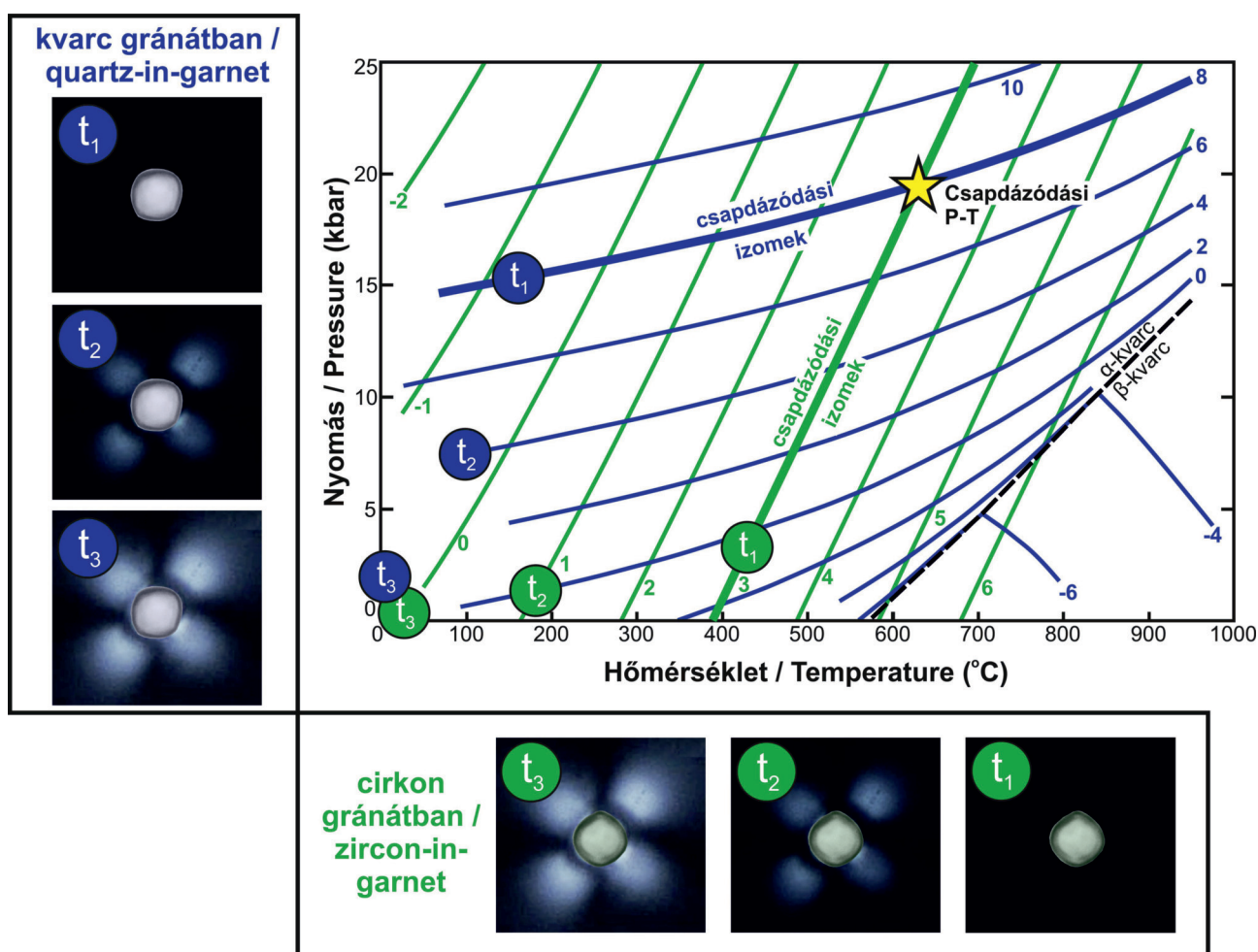


1. ábra. A rugalmas (elasztikus) és képlékeny deformáció alapvető jellemzői F erőhatásra, FOSSEN (2016) után. (a-c) A lineáris elasztikus (rugalmas) deformáció jellemzői. Elasztikus deformáció esetén a feszültség (σ) az alakváltozás (e) nagyságától és az elasztikus állandótól (E , Young-modulus vagy „merevség”) függ. Az alakváltozás reverzibilis: t_1 időpontban, az erőhatás megszűnésekor az alakváltozás ismét 0 lesz. Viszkózus deformáció esetén a feszültség az alakváltozás sebességével ($\dot{e}$) és a viszkozitásával (η) arányos, és az alakváltozás nem reverzibilis.

Figure 1. Basic characteristics of elastic and plastic deformation based on Fossen (2016). (a-c) Characteristics of linear elastic deformation. For elastic deformation, the stress (σ) depends on the magnitude of the deformation (e) and the elastic constant (E , Young's modulus or 'stiffness'). The deformation is reversible: at time t_1 , when the force is removed, the deformation returns to 0. In the case of plastic deformation, the stress depends on the rate of deformation ($\dot{e}$) and the viscosity (η), and the deformation is not reversible.

elasztikus termobarometria tehát a *befogadó* – *zárvány* rendszer eltérő rugalmassági tulajdonságokból adódó „passzív” térfogati deformációján alapul, amely a térfogatváltozásból adódó feszültséghez, nem pedig tektonikus erőkből származó differenciális feszültségekhez kötődik. A módszer egyik legfőbb előnye a klasszikus geotermobarometriai módszerekhez (kationcseré, vagy ásványátalakulási reakciókon alapuló számítások, vagy Gibbs-féle energiaminimum alapú termodinamikai modellezés) képest, hogy független a kémiai egyensúly kialakulásától és fennmaradásától, ugyanis kizárólag az alakváltozást veszi figyelembe (GILIO et al. 2021). Ugyanakkor a befogadó ásvány és a zárvány rugalmassági tulajdonságai nagymértékben függenek azok pontos kémiai összetételétől, tehát szükséges a vizsgált zárványra és a befogadó ásványra vonatkozó állapotegyenletek ismerete (ANGEL et al. 2022).

A P-T-térben csak egyetlen olyan lehetséges útvonal van, az izomek, azaz csapdázódási görbe (angolul 'isomeke'), amelynél a zárvány térfogatváltozása pontosan megegyezik az önmaga által, a befogadó ásványban kitöltött üreg/tér térfogatváltozásával (ROSENFELD & CHASE 1961, ANGEL et al. 2014). Az izomek mentén ebből következően nem lép fel nyomáskülönbség a zárvány és a befogadó ásvány között. Adott zárvány – befogadó ásvány párhoz tartozó izomek meghatározásával megadhatók a csapdázódás P-T-körülményei (4. ábra). Az ásványokra vonatkozó állapotegyenletek és rugalmassági együtthatók egyre széleskörűbben állnak rendelkezésre, így lehetőség nyílik az ásványpárok izomek-jeiire vonatkozó pontos számítások elvégzésére (KOHN et al. 2023). Ezek azt mutatják, hogy metamorf körülmények között az izomek-vonalak nem lineárisak a P-T-térben (4. ábra).



4. ábra. Az elasztikus termobarometria alkalmazásának szemléltetését bemutató P-T-diagram KOHN et al. (2023) alapján. Az egymást metsző görbék a kvarc gránátban (kék) és cirkon gránátban (zöld) zárvány – befogadó ásvány párok izomek görbéi, melyek mentén a csapdázódás történt (t_1). A görbékhez tartozó számok a zárvány légköri nyomáson mérhető reziduális nyomását jelzik (kbar-ban). Az izomek mentén (t_1) a differenciális feszültség értéke nulla, mely a P-T változással egyidejű ($t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$) térfogatváltozás során növekszik; ezt illusztrálja a zárványok körül gyakran megfigyelhető csillagszerű interferencia koszorú keresztezett poláriszűrővel.

Figure 4. P-T diagram showing the application of elastic thermobarometry, based on KOHN et al. (2023). The intersecting curves of two inclusion – host mineral pairs: quartz-in-garnet (blue) and zircon-in-garnet (green) represent the isomeke along which the trapping occurred (t_1). The numbers associated with the curves indicate the residual pressure of the inclusion measured at atmospheric pressure (in kbar). The differential stress along the islets (t_1) is zero, increasing with the change in volume ($t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$) with the change in P-T; this is illustrated by the star-like interference often observed around inclusions with a corona under crossed polarized light.

Habár a módszer alapjául szolgáló összefüggés már több mint 60 éve ismert (ROSENFELD & CHASE 1961), az elasztikus termobarometria alkalmazása az elmúlt évtizedekben került csak a kutatás fókuszába. Ezt igazolja a témakörhöz kapcsolódó publikációk és azok hivatkozásainak száma, mely utóbbi jelenleg meghaladja a 14 ezret (5. ábra). A módszertan dinamikus fejlődésével összhangban az elasztikus termobarometria nemcsak számos PhD doktori kutatás (MURRI 2020, GONZALEZ 2019, BONAZZI 2019, BARATELLI 2025, CAMPOMENOSI 2020), hanem a legnagyobb nemzetközi kutatási pályázatok, mint a European Research Council (ERC) Starting Grant fókuszában is állt (például a 307322 sz., INIDMEDEA rövidítésű, Fabrizio NESTOLA által vezetett [<https://www.unipd.it/en/erc-nestola-inidmedea>] vagy a 714936 sz., TRUE DEPTHS rövidítésű, Matteo ALVARO által vezetett [<https://www.mineralogylab.com/projects/true-depths/>] pályázatok).

A geológiában egyre szélesebb körben alkalmazható piezobarometria területén tapasztalható fejlődés nagymértékben köszönhető az ásványok fizikai adatainak jobb megismerésének, valamint olyan nagy precizitású műszerek fejlődésének és elérhetőségének, mint a Raman-spektroszkópia (MAZZUCHELLI et al. 2021). Ennek elméleti alapja az, hogy a zárványokban megőrződött (reziduális) alakváltozás összefüggést mutat az ugyanolyan anyagú referenciakristályra jellemző karakterisztikus Raman-sávok pozíciójával, így ez a mért eltérés (Δcm^{-1}) függvényében kiszámítható (ANGEL et al. 2019).

A jelenlegi alkalmazások azon a feltételezésen alapulnak, hogy 1) a befogadó és a zárvány ásványai elasztikusan izotrópok, és 2) a kristályzárvány alakja egy izolált gömbbel közelíthető. Ilyen körülmények között a zárványban a

stressz hidrosztatikus nyomást eredményez (CAMPOMENOSI et al. 2024). Ez határozható meg a zárvány karakterisztikus Raman-sávjainak eltolódása vagy a zárvány elemi cellatér-fogata egykristály röntgendiffrakcióval történő mérésével.

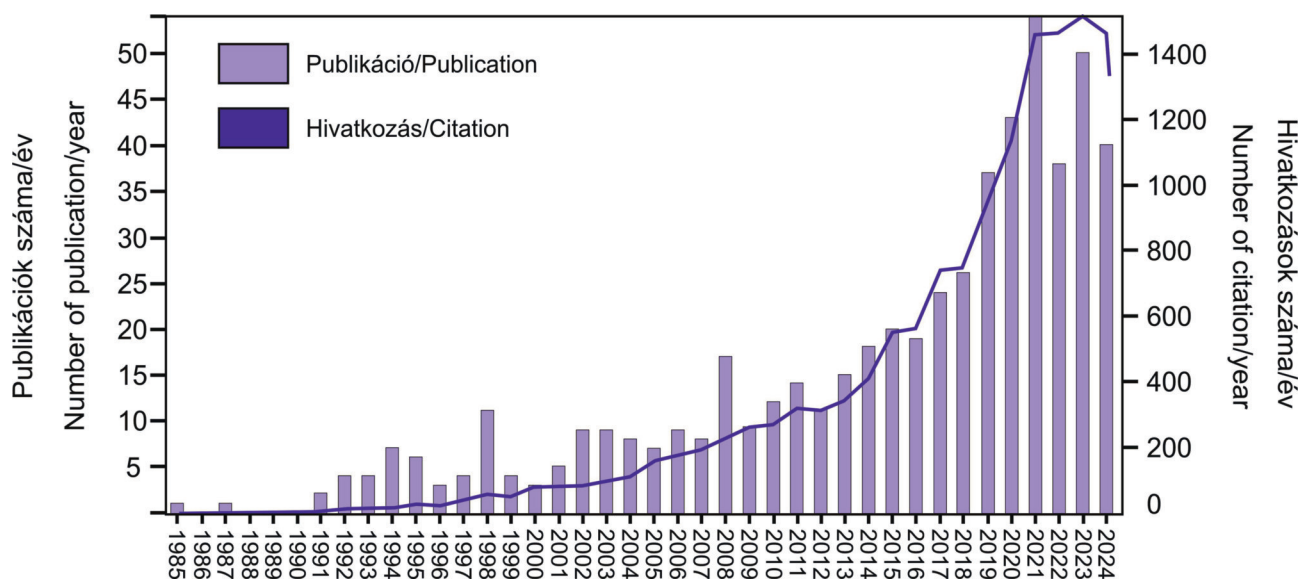
Jelen áttekintés célja, hogy az elasztikus termobarometria egyre szélesebb körben alkalmazott, Raman-spektroszkópián alapuló módszertanát a legkorszerűbb eljárások és esettanulmányok alapján mutassa be.

A mérés módszertana

A módszer elméleti háttere

Az egyes ásványok elasztikus alakváltozásainak műszeres vizsgálata és az ásványokhoz tartozó állapotegyenletek (equation of state – továbbiakban: EoS) alkotják az elasztikus termobarometria kvantitatív alkalmazásának lényegi sarokköveit.

Az EoS meghatározza, hogy hogyan változnak a befogadó és a zárványfázisok termodinamikai tulajdonságai a nyomás és a hőmérséklet függvényében. Ez megadható hőtágulási és kompresszibilitási paraméterekkel, valamint kifejezhető térfogatban (térfogati EoS) vagy kristálytani tengelyek mentén (tengely EoS). Az EoS ismerete adott ásványok esetén lehetővé teszi, hogy a Raman-spektroszkópos vizsgálatokkal mért alakváltozási értékek alapján kiszámítsuk azokat a nyomás- és hőmérsékleti viszonyokat, amelyek mellett az alakváltozási állapot egyensúlyban volt a befogadó ásvány és a zárvány között (= izomek, avagy csapdázódási görbe; KOHN et al. 2023).



5. ábra. Az elasztikus termobarometria tudománymetriai rekordja az elmúlt 40 évben a megjelent publikációk és az azokra érkezett hivatkozások éves bontása szerint. Forrás: Web of Science adatbázis (www.webofscience.com, 2025. május 20). A lekérdezés napjáig az adatbázis szerint 561 kapcsolódó (elastic thermobarometry, residual pressure, mineral inclusion kulcsszavak esetén) publikáció született, melyekre összesen 14355 hivatkozás érkezett.

Figure 5. The scientific metrics record of elastic thermobarometry over the last 40 years, by yearly breakdown of publications and citations. Source: Web of Science database (www.webofscience.com 20 May 2025). As of the date of the query, the database shows 561 related publications (for keywords elastic thermobarometry, residual pressure, mineral inclusion) with a total of 14355 citations.

Szemléltetésképpen: amennyiben egy gránát zárványa-ként előforduló kvarcban a – referencia/sztenderd kvarc-hoz képest mért – Raman-eltolódási sávok pozíciója pozitív irányba mozdul el, valamint csökken az egyes csúcsok közötti távolság, úgy kompressziós erőhatás van jelen a zárványban (ENDO et al. 2012), míg tenziós erőhatás esetében ezen jelenségek ellentéte figyelhető meg (KOHN et al. 2023). A metamorf kőzetek exhumációs P-T-útja és a befogadó ásvány (például gránát) kristályplasztikus deformációja elsősorban nagy és ultranagy nyomású rendszerek esetén döntően befolyásolhatja az eredeti csapdázódási körülmények megőrződését cirkonzárványok esetén, mely függ a zárványok kompressziós avagy tenziós feszültségi tartományba kerülésétől (lásd Esettanulmányok című fejezet és 8. ábra).

Ideális esetben mind a befogadó ásvány, mind a zárvány elasztikus értelemben izotróp, és a zárvány közelíti egy tökéletes gömb alakját (ZHONG et al. 2020). A valóságban azonban sok esetben vagy a befogadó ásvány, vagy a zárvány anizotróp (MAZZUCHELLI et al. 2019), tehát a nyomásra adott „válasza” irányfüggő. Ebben a rendszerben a Raman-eltolódásérték alapján történő nyomás meghatározása csak egy bonyolultabb inverzióval oldható meg. Az inverzió ebben az esetben azt jelenti, hogy a mért Raman-sáv eltolódásértékekből visszaszámolható az anyag ún. „merevségi tenzora” (KOHN et al. 2023). A merevségi tenzorral azt lehet jellemezni, hogy az adott irányú nyomás milyen irányú és mértékű alakváltozást okoz egy anizotróp rendszerben. A számítások elvégzésére alkalmas szoftverekkel (például EntraPT) kiszámolható a mért Raman-eltolódásból az alakváltozás mértéke (Grüneisen tenzor; GRÜNEISEN 1926), a zárványban uralkodó átlagos mechanikai alakváltozás, majd ebből a csapdázódási (izomek) görbe (MAZZUCHELLI et al. 2019). Amennyiben a befogadó ásvány (például gránát) egyazon növekedési zónájában kétféle kristályzárvány (például kvarc és cirkon) együtt csapdázódott, az izomek-görbék metszete megadja a csapdázódási P-T-körülményeket (GILIO et al. 2022, KOHN et al. 2023, SPRÁNITZ et al. 2023). Alternatívát jelenthet a csapdázódási nyomás meghatározására, ha egy zárványhoz tartozó izomek-görbe mellett ismerjük a csapdázódási hőmérsékletet például termodinamikai egyensúly-meghatározás vagy nyomelem-termometria vizsgálatok (Zr rutilban vagy Ti kvarcban) alapján (ENDO et al. 2012, GILIO et al. 2021, KOHN et al. 2023, SPRÁNITZ et al. 2023, ZHONG et al. 2019).

Mintaelőkészítés

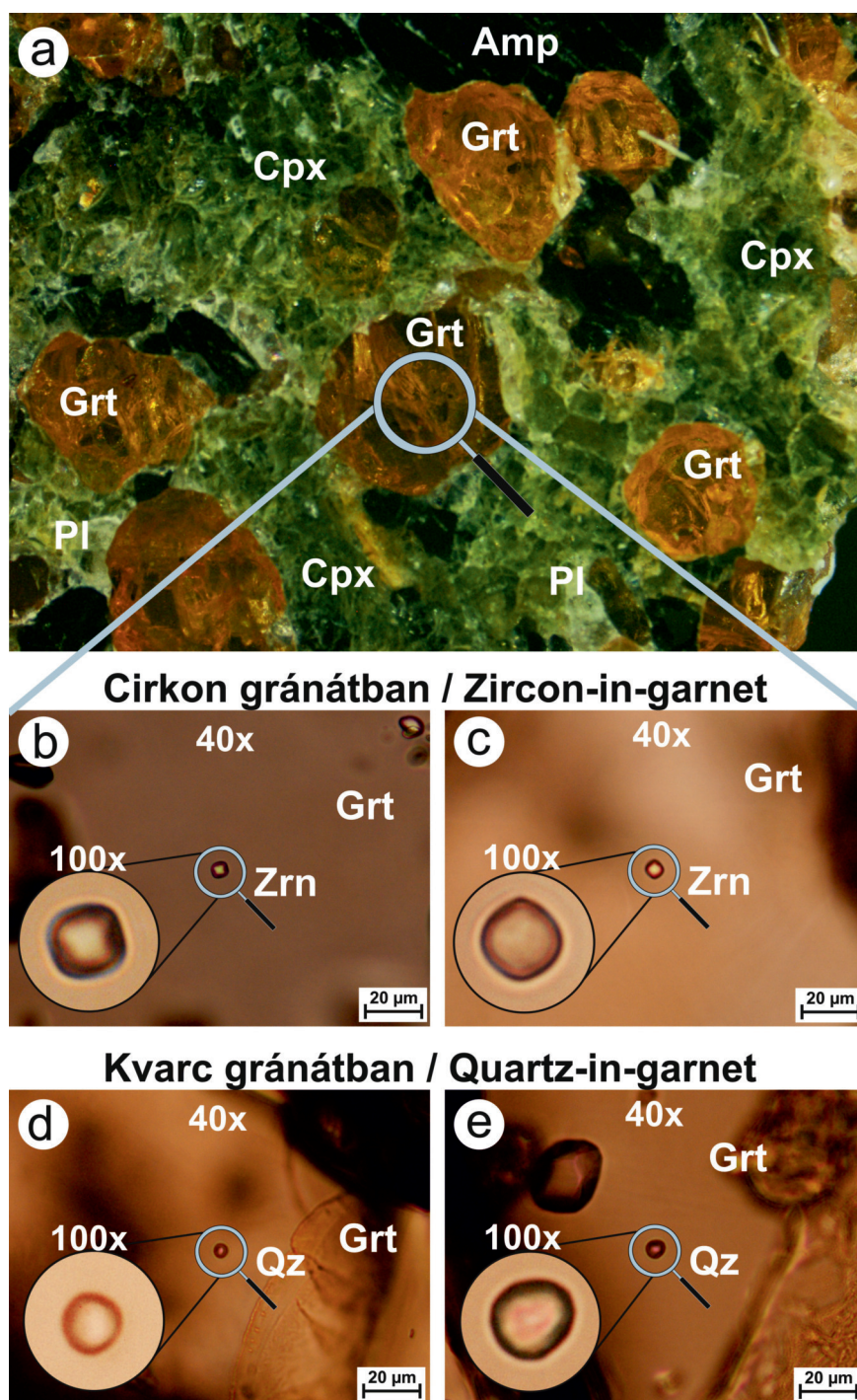
Az elasztikus termobarometriai mérések pontossága szorosan összefügg a mintaelőkészítés minőségével, melynek célja a petrográfiai elemzés mellett a megfelelő zárványok kiválasztása. A kristályzárvány-petrográfia előkészítéséhez mindkét oldalán kiválóan polírozott vastagsziszolat szükséges, mely vastagabb a fluidumzárvány-vizsgálatokhoz hagyományosan alkalmazott, kb. 100 µm-es csiszolattal. A jellemzően 200-300 µm-es csiszolatvastagság választásának oka, hogy a szigorú szöveti feltételeknek (Bo-

NAZZI et al. 2019, CAMPOMENOSI et al. 2020) megfelelő kristályzárványokat a minta nagyobb térfogatában lehessen kijelölni. A csiszolat elkészítéséhez a polírozást követően a tárgylemezről leoldható ragasztó (például pillanatragasztó) szükséges, ami kiküszöböli a Raman-spektroszkópos mérések során a ragasztó jelenlétéből fakadó háttér zavaró hatását.

A kristályzárványok kiválasztásának kritériumai

A kristályzárványok (például cirkon, kvarc, rutil) kiválasztása és dokumentálása optikai, polarizációs mikroszkopos vizsgálatokkal végezhető el. A zárványok kiválasztása szigorú kritériumok alapján valósulhat meg, elsősorban a zárványok alakja, mérete és szöveti helyzete alapján. A zárványok kiválasztásának fő szabálya, hogy a lehető legideálisabb zárvány – befogadó ásvány geometriai feltételek valósuljanak meg, például egy nagyon kis méretű (jellemzően 1-15 µm sugarú), izometrikus zárvány a befogadó ásvány „végtelen” térfogatában. Más szóval az esetleges feszültségvesztés elkerülése érdekében csak azokat a zárványokat célszerű kiválasztani BONAZZI et al. (2019) és CAMPOMENOSI et al. (2020) tanulmányaival összhangban, amelyek izoláltak, és bármely inhomogenitástól (a csiszolat felszíne, a befogadó ásvány szegélye, repedés vagy más zárvány) olyan távolságra vannak, mely meghaladja a zárványok sugarának 2-3-szorosát (6. ábra). A kiválasztott zárványoknak – lehetőség szerint – tisztának, homogénnek és zárványmentesnek kell lenniük (6. ábra). A zárványok elektron-mikroszkopos elemzéssel ellenőrzött homogén főelem-geokémiai összetétele kiemelt jelentőséggel bír, ugyanis például a cirkon 1,5-2 wt. %-os mennyiséget meghaladó Hf és U-tartalma befolyásolja a karakterisztikus Raman-sávok pozícióját (CAMPOMENOSI et al. 2020, NASDALA et al. 2002). A természetben mindazonáltal nem létezik „tökéletes” zárvány és teljes izoláltság. Ezért az elasztikus termobarometria alkalmazásakor a legjobb megközelítés a vizsgált mintában nagyobb számú (általában legalább 5-10), egyazon petrográfiai helyzetben előforduló zárvány mérése, majd a kapott reziduális nyomásértékek átlagának számítása.

A kristályzárványok kijelölése során célszerű a tárgylemezről leoldott és megtisztított, ezáltal kedvező átláthatósággal rendelkező közetszelet(ek)et mindkét oldaláról először kisebb (20×-os objektívet használva, tehát 10×-es okulár esetén 200-szoros), majd nagyobb (100×-os objektívet használva, tehát 10×-es okulár esetén 1000-szeres) nagyításon áteső, síkpolarizált (1N) fényben a fókuszmezlységet folyamatosan változtatva, szükség szerint kúposított fény segítségével átvizsgálni. Az elasztikus termobarometriában leggyakrabban használt, gránát zárványaként csapdázódott kvarc és cirkon elkülönítését segíti az a megfigyelés, mely szerint kisebb nagyítással (20-40× objektívvel) a cirkonzárványok általában éles kontúrral és élénkzöld-citromsárga, míg a kvarczárványok leggyakrabban elmosódott kontúrral és halványlila színárnyalattal jelennek meg (6. ábra).



6. ábra. Elasztikus termobarometriai vizsgálatokra kiválasztott kristályzárványok (b-c: cirkon, d-e: kvarc) jellemző petrográfiai tulajdonságai ÉNy-spanyolországi granulitmintában (Cabo Ortegal Komplexum). Rövidítések: Grt - gránát, Cpx - klinopiroxén, Pl - plagioklász, Amp - amfibol, Zrn - cirkon, Qz - kvarc.

Figure 6. Typical petrographic properties of mineral inclusions (b-c: zircon, d-e: quartz) selected for elastic thermobarometric analysis in a granulite sample from NW Spain (Cabo Ortegal Complex). Abbreviations: Grt - garnet, Cpx - clinopyroxene, Pl - plagioclase, Amp - amphibole, Zrn - zircon, Qz - quartz.

A mérés folyamata

A megőrződött alakváltozás meghatározásához a kvarc esetében a 128, 206, 263 és 464 cm^{-1} -nél, a cirkon esetében 201, 213, 224, 356, 438, 975 and 1009 cm^{-1} -nél megjelenő Raman-sávok nagy felbontású mérése szükséges (7. ábra).

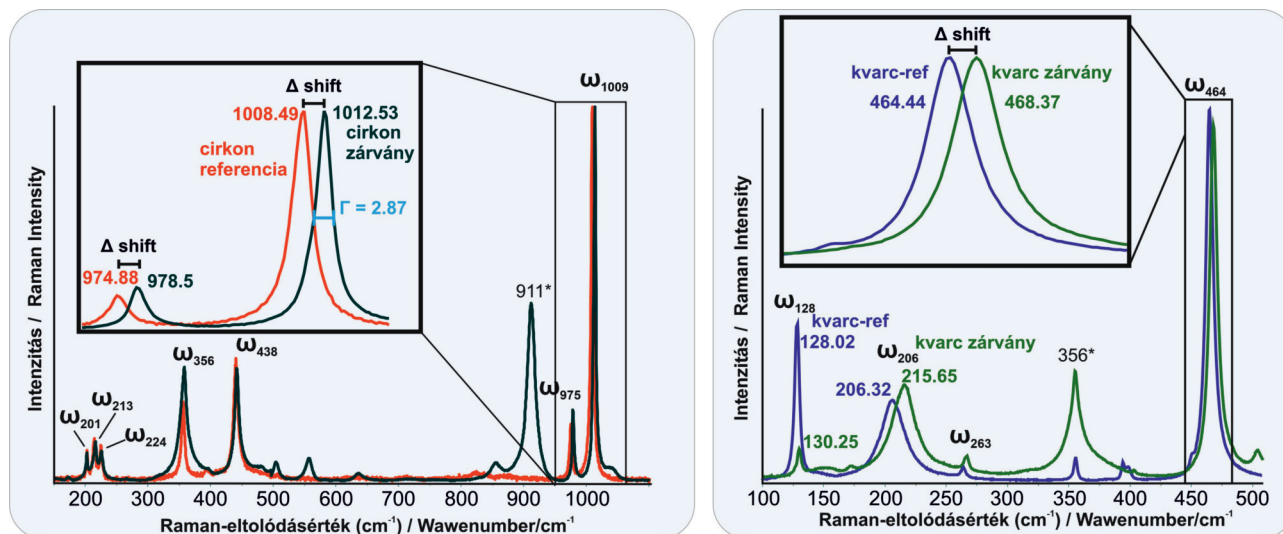
A pontelemzéshez az alábbi mérési paraméterek javasoltak: 532 nm hullámhosszú lézer, 1800 rovátka/mm-es optikai rács, 100× objektív, 50-100 μm -es konfokális apertúra, 50-300 másodperces mérési idő, 3× ismétlés és különböző szűrők (100%, 50%, 25%) a minták túlmelegedésének elkerülése érdekében (ZHONG et al. 2019). A javasolt 1800-as rácsozat nagy ($0,7 \text{ cm}^{-1}$) spektrális felbontást tesz lehetővé. A zárvány méretétől és mélységétől függően célszerű a konfokális túlyukat és az adatgyűjtési időt változtatni. Ezen beállítások optimalizálása a legmegfelelőbb zárvány – befogadó ásvány Raman-sáv-intenzitásarány elérését tűzi ki célul. A kristályzárványok Raman-eltolódásértékének meghatározására szabadon álló, reziduális alakváltozástól mentes referenciakristályokat kell alkalmazni. A műszerstabilitásból eredő, esetleges sávpozíció-eltolódás kiküszöbölése és a pontos hullámszám kalibrációjának érdekében a referenciakristályokat és a neon emissziós sávokat minden egyes zárványmérést követően azokkal azonos mérési paraméterekkel szükséges lemérni.

A zárványok alakutani sajátosságaiból fakadó módosító hatások csökkentése érdekében a Raman-spektrumokat a zárványok középpontjából vagy annak jól definiált pontjából szükséges felvenni (MAZZUCHELLI et al. 2018). Az elasztikus termobarometriára csak azok a cirkonzárványok alkalmasak, amelyek 1009 cm^{-1} -nél mért Raman-sávjának félértékszélessége nem haladja meg az 5 cm^{-1} -t (CAMPOMENOSI et al. 2020). Ennek oka, hogy a módszer nagyobb mértékű sugárkárosodáson (metamiktizáción) átesett cirkonkristályoknál nem alkalmazható.

Az adatfeldolgozás menete

A reziduális alakváltozás meghatározásához elengedhetetlen a vizsgált kristályzárványok és a megfelelő

referenciakristályok Raman-spektrumainak nagy pontosságú csúcsillesztése, mivel már csekély Raman-eltolódás is számottevő különbséget eredményez az alakváltozási értékekben. E célra megbízható megoldást biztosít az OriginPro (<https://www.originlab.com>) vagy a Fityk



7. ábra. Gránátban kristályzárványként csapdázódott cirkon és kvarc karakterisztikus Raman-spektrumai. Ez az ábra a cirkon és kvarc zárványok Raman-sávjainak pozícióját (ω) egy-egy feszültségmentes referenciakristályéhoz viszonyítva mutatja be. A befogadó ásvány 356 cm^{-1} és 911 cm^{-1} -nél jelzett sávjai csillaggal vannak jelölve, míg a $\Gamma = 2.87$ a cirkon 1009 cm^{-1} -nél mérhető csúcsának a félértékszélességét jelzi (módosítva SPRÁNTZ et al. 2023 alapján).

Figure 7. Characteristic Raman spectra of zircon and quartz measured as mineral inclusion trapped in garnet. This figure shows the position (ω) of the Raman bands of zircon and quartz inclusions relative to a free unstrained reference crystal. The bands at 356 cm^{-1} and 911 cm^{-1} of the host mineral are marked with an asterisk, while $\Gamma = 2.87$ indicates the Full Width at Half Maximum of the peak measured at 1009 cm^{-1} of the zircon (modified after SPRÁNTZ et al. 2023).

(<https://fityk.nieto.pl/>) szoftver, amelyek megfelelő alkalmazása lehetővé teszi a Raman-sávok pozícióinak pontos meghatározását. A nyers Raman-spektrumok feldolgozására az alábbi lépések javasoltak: alapvonal-illesztés, mérési időre való normálás, sávpozíció és csúcs alatti terület integrálása pseudo-Voigt függvények szerint.

A Raman-sávok pozícióinak a referenciakristályokétól mért különbségei alapján – a stRAInMAN szoftver segítségével (ANGEL et al. 2019) – kiszámítható a zárványon belüli reziduális alakváltozás. A kapott alakváltozási értékek, valamint az alkalmazott anyagi állandók, elasztikus tenzorok (MURRI et al. 2018, STANGARONE et al. 2019) és állapot-egyenletek ismeretében a zárványokban megőrzött reziduális nyomás, illetve a zárvány – befogadó ásvány rendszerre jellemző csapdázódási feltételek (izomek-görbe) határozhatók meg. E görbék kiszámítására és grafikus megjelenítésére az EntraPT szoftver (MAZZUCHELLI et al. 2021; <https://www.mineralogylab.com/software/entrapt/>) nyújt korszerű és széles körben alkalmazott megoldást. Az izomek számolásához a gránát mint a legszélesebb körben alkalmazott befogadó ásvány esetén annak legújabb állapotegyenletei (ANGEL et al. 2022) javasoltak, valamint a szélsőtagokhoz tartozó értékek aktuális, mikroszondás mérés által meghatározott gránát főelem-geokémiai összetételre vonatkozó átlagszámítása szükséges.

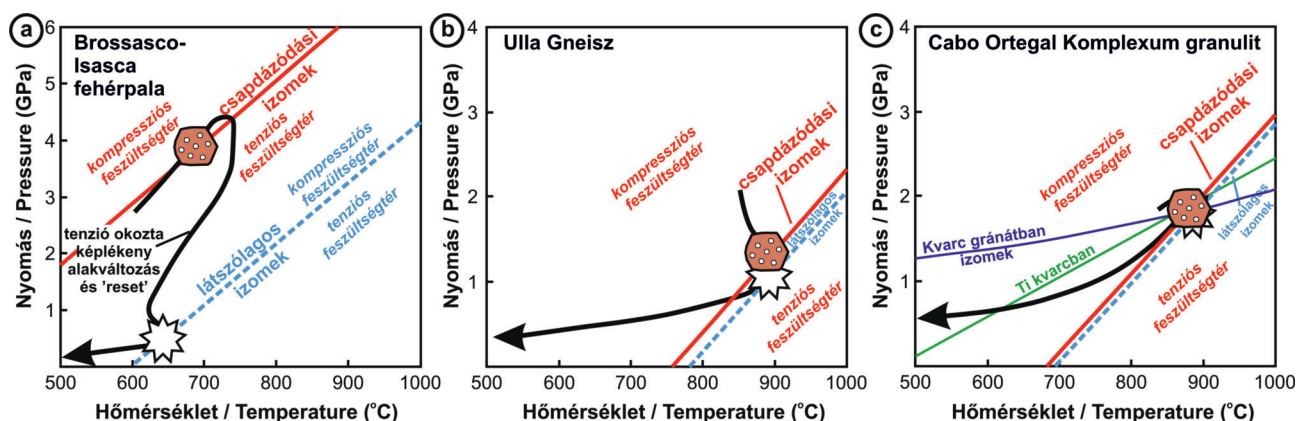
Esettanulmányok

Esettanulmányok nagy nyomású metamorf területekről

GILIO et al. (2022) a norvégiai Fjórtoft-szigeten előforduló, proterozoos Ulla gneisz formáció kvarc–gránát ér és a

kaledóniai Blåhø takaró gránát–kianit gneisz ásványain alkalmazták az elasztikus termobarometria módszerét. A kutatás során gránát zárványaként együtt előforduló (tehát egyszerre csapdázódott) kvarc- és cirkonkristályokon végeztek Raman-spektroszkópos méréseket, amelyek eredményeit Zr-alapú rutil termometriával kombinálták. Az Ulla kvarc–gránát ér gránátjának zárványdús magja és pereme eltérő P-T-körülményeket mutatott. A mag eredetileg nagyobb nyomáson (1,5–2,5 GPa, 750–800 °C) keletkezett, míg a perem 1,2 GPa és 880 °C-on újrakristályosodott. Ez utóbbi körülmény korrelál a Blåhø gneisz gránátjának csúcsmetamorf körülményeivel, mely alapján a P-T-viszonyoknál kerülhetett egymással kapcsolatba a Blåhø és az Ulla egység. Ez a megfigyelés bizonyítékul szolgál arra, hogy a szubdukció utáni exhumáció során egy késői termális esemény mindkét egységet érintette. A GILIO et al. (2022) által készített kutatás jól demonstrálja az elasztikus termobarometria alkalmazásának jelentőségét a metamorf P-T-útvonalak pontos jellemzéséhez nagy nyomású metamorf rendszerekben.

Az ultranagy nyomású (UHP) rendszerekben csapdázott cirkon ugyanakkor nem feltétlenül tükrözi megfelelően a csapdázódás P-T-körülményeit (CAMPOMENOSI et al. 2023). Ennek oka az elasztikus relaxáció, ugyanis a gránát képes kristályplasztikusan deformálódni a zárvány körül. Ennek során feloldódik/felülíródik a zárványban kialakult alakváltozás (strain reset), így az nem a csapdázódás P-T-viszonyait fogja tükrözni. Amennyiben az exhumációs P-T-út meredekebb az eredeti csapdázódási izomeknél, a cirkon relaxálódhat (újra egyensúlyba kerülhet) a gránátban (8. ábra). A zárvány tágulása ugyanis tenziós feszültségtérben a csapdázódáskor jellemző alakváltozást felülírja, így az elasztikus termobarometriai vizsgálatokkal csupán látszólagos izomek görbe állapítható meg (8. ábra). Ha azonban az exhumációs pálya laposabb, mint a csapdázódási izomek, akkor a cir-



8. ábra. Különböző HP-HT) metamorf területek P-T fejlődéstörténeti összehasonlítása a cirkon gránátban csapdázódási (piros összefüggő) és látszólagos (kék szaggatott) izomek-görbék feltüntetésével (CAMPOMENOSI et al. 2023, GILIO et al. 2022, SPRÁNITZ et al. 2023 alapján). A sematikus barna színű, zárványos gránát jelöli a 'valódi', míg a fehér csillag jelöli a zárványok látszólagos csapdázódási tartományát. a) A Brossasco-Isasca fehérpala esetén a gránátban csapdázódott cirkonzárványok a P-T-fejlődés során tenziós feszültségtérbe kerülnek, ahol a képlékeny deformáció a csapdázódáskori alakváltozás relaxációját ('reset') okozza. Ezzel szemben az Ulla Gneissben (b) és a Cabo Ortegal Komplexum granulitban (c) csapdázódott cirkonzárványokra a kőzetekre jellemző exhumációs út alapján kompressziós feszültségtér hat, mely az eredeti, csapdázódási alakváltozás-értékek megőrződésének kedvez. A Cabo Ortegal Komplexum granulit esetében ezt támogatja alá továbbá a cirkonnal egyszerre csapdázódott kvarczárványokból számolt kvarc gránátban izomek és a Ti kvarcban termométer is (SPRÁNITZ et al. 2023).

Figure 8. Comparison of P-T evolution history of different HP-HT) metamorphic terrains using zircon-in-garnet elastic thermobarometry showing both the trapping (red solid) and the apparent (blue dashed) isomeke curves, based on CAMPOMENOSI et al. (2023), GILIO et al. (2022), SPRÁNITZ et al. (2023). The schematic brown-colored garnet with inclusions indicates the 'real', while the white star indicates the apparent trapping range of inclusions. a) In the case of the Brossasco-Isasca white schist, zircon inclusions trapped in the garnet are subjected to tensile stress field during P-T evolution, where ductile deformation causes relaxation ('reset') of the strain during trapping. In contrast, zircon inclusions trapped in the Ulla Gneiss (b) and Cabo Ortegal Complex granulite (c) are subjected to compressive stress fields, based on the exhumation pathway typical of these rocks, which favour the preservation of the original trapping strain values. In the case of the Cabo Ortegal Complex granulite, this is further supported by the quartz-in-garnet isomeke calculated from quartz inclusions trapped simultaneously with zircon and also by Ti-in-quartz thermometry (SPRÁNITZ et al. 2023).

konzárványok nagyobb valószínűséggel őrzik meg az eredeti csapdázódási körülményeket, mivel a zárványok folyamatosan kompressziós feszültségi tartományban maradnak (8. ábra; CAMPOMENOSI et al. 2023, SPRÁNITZ et al. 2023). Ezzel szemben a kvarc-gránát-rendszerek izomekjei sokkal laposabbak, mint a cirkon-gránát-rendszereké, tehát termobarometriai alkalmazhatóságuk kevésbé függ az exhumációs úttól. A nagy nyomású kőzetek típusos, óramutató járásával megegyező exhumációs pályája azonnal a kompressziós feszültségi tartományba viszi a kvarczárványokat, így azok megőrizhetik az eredeti csapdázódási körülményekre utaló feszültséget és alakváltozást (CAMPOMENOSI et al. 2023), amint ezt az Ulla gneissre vonatkozó esettanulmány is jelzi (GILIO et al. 2022).

Újabb vizsgálatok rámutattak arra, hogy egy befogadó ásványban egyazon növekedési zónában megjelenő kristályzárványok elasztikus termobarometriájával megadható a velük egyszerre bezáródott fluidumzárványok csapdázódási P-T-je is (SPRÁNITZ et al. 2023). Ezzel az információval lehetőségünk nyílik arra, hogy jobban megismerjük a szubdukciós vagy egyéb nagy nyomáson/hőmérsékleten csapdázódott fluidumok tér és időbeli szerepét, ami hozzájárul ahhoz, hogy több ismeret szerezzünk a szubdukciós metamorfózisról és az illó elemek globális körforgásáról. A kvarc és cirkon kristályzárványok csapdázódási nyomás- és hőmérséklet-tartományát kétféle, egymástól független módszerrel becsülték meg. Az egyik a tisztán elasztikus termobarometriai megközelítés, melynél a kvarc gránátban izomek (barométer) és cirkon gránátban izomek (termométer) metszéspontja jelöli ki a csapdázódási körülményeket. Ezek alapján a kvarc gránátban izomek és a cirkon gránátban izomek metszése által kijelölt nyomás-hőmérsékleti tartomány

$1,8 \pm 0,2$ GPa és 880 ± 70 °C (SPRÁNITZ et al. 2023). A kristályzárványok csapdázódási körülményei megadhatók továbbá a kvarc gránátban izomek és Ti-kvarcban izopletek metszéspontja szerint ($P = 1,8 \pm 0,2$ GPa and $T = 860 \pm 70$ °C), mely módszer a cirkonalapú elasztikus termobarometriai validálását jelenti (8. ábra). Ez a csapdázódási tartomány jó egyezést mutat továbbá a vizsgált granulit csúcsmetamorf körülményeivel (PUELLES et al. 2005). A multifázisú fluidumzárványok jelenléte és tanúsága alapján tehát a vizsgált granulit csúcsmetamorf fejlődése során kulcsszerepet játszott a CO₂-gazdag fluidumok jelenléte, mindemellett olvadákfázis megjelenése a nagy hőmérséklet ellenére is kevésbé valószínűsíthető.

Esettanulmány nagy hőmérsékletű metamorf területről

GIOVANNI et al. (2024) elasztikus termobarometriát alkalmaztak (kvarc gránátban barometria és cirkon-gránát-termometria) a Sierra Valle Fértil – La Huerta területről (Argentína) származó metapélit kőzetsorozaton, mely egy korai paleozoós szubdukciós zóna részét képezi. A vizsgált kéregszelvény ideális terepet biztosít az elasztikus és a hagyományos, termodinamikai alapú geotermobarometriai módszerek összehasonlító értékelésére. A meghatározott csapdázódási nyomás- és hőmérsékletértékek 240–1330 MPa és 691–1574 °C. Ezek az értékek kizárólag az α-kvarc stabilitási tartományban képződött zárványok esetén mutattak jó összhangot a konvencionális geotermobarometriai becslésekkel. Azoknál a zárványoknál, amelyek a β-kvarc stabilitási tartományában csapdázódtak, a Raman-spektroszkópia-alapú reziduális nyomásértékek szignifikánsan túlbecsülték a ha-

gyományos módszerekkel kapott eredményeket, melyek szerint a vizsgált kőzet csúcsmetamorfózisa maximum 800–870 °C-ot érhetett el az irreálisnak tekinthető, 1500 °C-ot meghaladó hőmérsékleti értékek helyett. A pozitív (kompressziós) reziduális alakváltozást megőrző zárványok esetén a számított nyomásértékek jobban közelítették a várható csapdázódási körülményeket. A csapdázódási hőmérséklet-értékeknél jellemzőek ugyanakkor a jelentős szórás és a hagyományos termometriai módszerekkel kapott hőmérsékleteknél számottevően (több 100 °C-kal) nagyobb értékek. A nagy léptékű összehasonlító vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az elasztikus termobarometria nagy hőmérsékleten képződött kőzetek esetében torzított vagy nem megbízható csapdázódási körülményeket eredményezhet. A pontatlanságok forrásai között szerepel a kvarc α – β fázisátmenetének modellezési nehézsége, a zárványalak-módosulás, a kristályplasztikus deformáció, valamint a cirkonban fellépő sugárzás okozta károsodás (metamiktésedés) jelensége (CAMPOMENOSI et al. 2020, CESARE et al. 2021, MINGARDI et al., 2025).

Az elasztikus termobarometria alkalmazása magmás rendszereknél

Az utóbbi években az elasztikus termobarometria alkalmazása a metamorf képződmények mellett magmás környezetben is lehetővé vált, így a magmatározó-rendszerben jellemző nagy nyomás és hőmérsékleti körülmények között kristályosodó ásványok képződési körülményei is meghatározhatók (BEFUS et al. 2018, CISNEROS & BEFUS 2020). A magmás ásványok közül különösen a merevebb, kevésbé összenyomható ásványok (például olivin, piroxén) és a rugalmasabb zárványok (például apatit, plagioklász) kombinációi szolgálhatnak ígéretes *zárvány – befogadó ásvány* párokként az elasztikus termobarometria alkalmazásához.

BEFUS et al. (2018) rámutattak arra, hogy különböző földpátok karakterisztikus Raman-sávjainak változása olyan összefüggést mutat a nyomással, amelynek alapján alkalmazhatók lehetnek elasztikus termobarometriai vizsgálatoknál. A tanulmány fő célja az volt, hogy kidolgozzanak egy új, a földpátásványok Raman-spektroszkópiái vizsgálatán alapuló elasztikus termobarométert, amely alkalmas lehet a magmás (és metamorf) környezetekben kristályosodott földpátzárványok P-T-viszonyainak meghatározására. A különböző kémiai összetételű és szerkezetű földpátok Raman-aktív rezgési sávjainak nyomásfüggő eltolódásértékeinek kalibrálásával ugyanis megbízható nyomás- és hőmérsékletbecslés adható földpátzárványos rendszerekre, különösen akkor, amikor más módszerek nem alkalmazhatók. A kutatók kilenc, összetételében eltérő földpátmintán végeztek kísérleteket 3,5–3,6 GPa nyomásig. Minden vizsgált földpátösszetétel esetén lineáris eltolódást figyeltek meg magasabb frekvenciák irányába növekvő nyomás mellett. Az eredményeket rugalmas modellbe illesztve, ismert termodinamikai paraméterekkel kiegészítve a kutatás során meghatározták, hogy különböző befogadó ásványokban (például gránát, klinopiroxén, olivin) található földpátzárva-

nyok milyen nyomás-hőmérséklet viszonyokat jeleznek. A vizsgálat szerint a legmegbízhatóbb barométer az albitos plagioklász, mivel ennek hőmérséklet-érzékenysége minimális, ezt követik az alkáli földpátok és az anortitos plagioklász. Ez a kalibráció lehetővé teszi, hogy a földpátok Raman-spektroszkópos vizsgálatát különböző földtani környezetek (a magmás kőzetek mellett metamorf kőzetek, köpenyeredetű kőzetek) nyomás- és hőmérsékletviszonyainak számszerűsítésére alkalmazzák.

CISNEROS & BEFUS (2020) munkájában vulkáni környezetből (Yellowstone-kaldera) származó olivin fenokristályokban lévő apatitzárványokat vizsgáltak, ugyanis az olivin–apatit-rendszer eltérő elasztikus tulajdonságai miatt ma is őrzi a képződéskor jellemző hőmérsékleti és nyomásviszonyok nyomait. A Yellowstone esetében például a mért termobarometriai adatokból kiszámított kristályosodási körülmények többszintű magmatározó létét igazolták, vagyis a magma különböző mélységekben és eltérő időpontokban kristályosodott. A módszertannak legfontosabb korlátai vulkáni környezetben a *zárvány – befogadó ásvány* párok anizotrópiája, az esetleges átkristályosodás, illetve a mikroszkopikus repedések, melyek befolyásolhatják a mért alakváltozás állapotot. Ezért minden egyes mintát geológiai kontextusában kell értelmezni, és szükséges a laboratóriumi kalibrációk, modellezések és más termobarometriai módszerek alkalmazása is. Összességében az elasztikus termobarometria egyre fontosabb eszközzé válhat a magmás rendszerek kutatásában, mivel nemcsak a nyomás- és hőmérsékleti viszonyok feltárására alkalmas, hanem hozzájárul a vulkáni működés dinamikájának és veszélyeinek jobb megértéséhez is.

Következtetések, korlátok és jövőbeli lehetőségek

A nagy mélységben zajló geológiai folyamatok jobb megértéséhez kulcsfontosságú a kőzetképződés P-T-körülményeinek megismerése. A kőzetek komplex geológiai fejlődéstörténetének rekonstruálására számos módszert fejlesztettek ki, melyek közül a geotermobarometria a leggyakrabban alkalmazott. A hagyományos termobarometriai megközelítést általában az ásványkialakulás P-T-feltételeinek meghatározására használják. Ezek a módszerek a koegzisztens ásványegyüttesekre és a kémiai összetételekre támaszkodnak, és a számítás alapfeltétele a hidrosztatikus nyomás alatti kémiai termodinamikai egyensúly (POWELL & HOLLAND 2008). Ezzel szemben a Raman-spektroszkópián alapuló elasztikus termobarometria *in situ* módszert jelent a kőzetalkotó ásványokban lévő kristályzárványok csapdázódási P-T-feltételeinek becslésére a felszíni körülmények között mérhető reziduális feszültség vagy alakváltozás alapján. Ez a módszer a zárvány és a befogadó ásvány elasztikus és hőtágulási tulajdonságainak különbözőségén alapul, és közvetlen információval szolgál a metamorf petrogenetikai folyamatok során fellépő alakváltozás (és az ebből kiszámolható nyomás) és hőmérsékleti viszonyok meghatározásához (ANGEL et al. 2019). Az elasztikus termobarometria széles-

körü alkalmazásának egyik legfőbb előnye, hogy a kémiai egyensúlytól alapvetően független, hátránya azonban, hogy jelenleg még csak kevés rendszer (zárvány – befogadó ásvány pár) esetében alkalmazható. A módszer hitelességének igazolásához a különböző ásványok karakterisztikus Raman-sávjainak szélesebb körű nyomáskontrollált kalibrációja szükséges, továbbá az elasztikus tulajdonságok P-T függvényében történő változásának pontosabb megismerése, melyhez elengedhetetlen a további kísérleti munkák elvégzése. Ezek a kísérletek jellemzően gyémánttűlős nyomáscella (diamond anvil cell = DAC) használatával a speciális előkészítés ellenére általában gyorsan elvégezhetők (KOHN et al. 2023). A legfrissebb kutatások alapján az alábbi zárvány – befogadó ásvány rendszerek is várhatóan alkalmazhatók a közeljövőben: apatit epidotban, kvarc epidotban, apatit olivinben, rutil gránátban, omfacit gránátban (CISNEROS & BEFUS 2020, CISNEROS et al. 2021, BARATELLI et al. 2025).

A megfelelő zárvány – befogadó ásvány rendszer kiválasztása mellett a módszer alkalmazhatóságának számos további korlátja van. Az alábbi lista a korábban részletezett legfőbb kiválasztási feltételek és az eredeti csapdázódási körülmények felülíródását/eltörlését eredményező hatások összefoglalójaként szolgál:

i) adott petrográfiai helyzetben elegendő számú (legalább 5-10 darab), tiszta, homogén és megfelelő szöveti paraméterekkel rendelkező zárvány kiválasztása (méret, alak, izoláltság, csiszolat felszínétől mért távolság)

ii) megfelelő minőségű Raman-spektrumok gyűjtése és nagy pontosságú sávillesztése a kiválasztott zárványokból és referenciakristályokból (alacsony háttér és nagy intenzitású sávok, nincs zavaró, átfedő hatása a befogadó ásványnak, melyekhez javasolt nagy felbontóképességgel ($<1 \text{ cm}^{-1}$) rendelkező műszer használata hosszú mérési idővel és kis ($50 \mu\text{m}$) konfokális apertúrával)

iii) a vizsgált zárvány anyagával megegyező, megfelelő referenciakristályok használata (főképp a cirkon esetében kritikus fontosságú, ugyanis a kémiai összetétel (Hf-tartalom), kristályosság és a metamiktesedés nagymértékben befolyásolja a karakterisztikus Raman-sávok eltolódásértékét, ezáltal azok különbségét is a zárványokban mértékhez képest (például Ratanakiri cirkon; SPRÁNITZ et al. 2023)

iv) cirkonzárványok vizsgálata esetén csak azok alkalmazásak, amelyek 1009 cm^{-1} -nél mért Raman-sávjának félértékszélessége nem haladja meg az 5 cm^{-1} -t, továbbá Hf-, és

U-tartalma nem haladja meg az 1,5-2 wt. %-ot (CAMPOMENOSI et al. 2020)

v) habár a kritályzárványoknál pontosan megadható azok termodinamikai sajátosságait leíró állapotegyenlete, a befogadó ásványban (például gránát) ez csupán a szélsőtagokra jellemző értékek átlagával becsülhető

vi) a csapdázódást követő, eredeti alakváltozási értéket felülíró hatások vizsgálata, például a zárványalak-módosulás/fejlődés (shape maturation; CESARE et al. 2021), viszkózus és kristályplasztikus deformáció (ZHONG et al. 2020), továbbá nagy és ultranagy nyomású metamorf rendszereknél az elasztikus feloldódás/felülíródás (elastic relaxation/reset) jelensége a zárvány-izomek és az exhumáció P-T-térbeli görbéjének viszonya alapján (CAMPOMENOSI et al. 2023).

Az elasztikus termobarometria szélesebb körben, így geológiai környezetben való alkalmazásához fontos lenne több ismeretet szerezni, többek között 1) az anizotrópia hatásáról a reziduális nyomásra; 2) a tenziós alakváltozás határértékeiről; 3) az egydimenziós elasztikus modellezés korlátairól; és a 4) nemideális geometria pontos hatásairól (KOHN et al. 2023). Amennyiben az elasztikus tulajdonságok és a csapdázódást követő zárvány és befogadó ásvány változások alaposabban és több rendszer esetén is jobban megismerhetők, az elasztikus termobarometria technikája egyedülálló közettani lehetőségeket hordoz, és különböző földköpeny, metamorf, magmás vagy akár extraterresztrikus környezetben lezajlott geológiai folyamatok P-T-viszonyainak rekonstruálását teszi lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők szeretnék megköszönni M. TÓTH Tivadar vendégszerkesztő felkérését a kézirat elkészítésére. A rendkívül alapos, konstruktív javaslatokért és javításokért köszönettel tartozunk a kézirat bírálóinak, SCHUBERT Félixnek és KORONAI Balázsnak. BERKESI Márta, HENCZ Mátyás, PORKOLÁB Kristóf és SPRÁNITZ Tamás munkáját az MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatási projekt (LP2022-2/2022) támogatta. A kézirat témájához kötődő kutatást BERKESI Márta és SPRÁNITZ Tamás számára a 132418 sz. FK_OTKA projekt támogatta, Porkoláb Kristóf számára a 143377 sz. PD_OTKA projekt támogatta. Jelen tanulmány a Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium 144. publikációja.

Irodalom – References

- ALVARO, M., MAZZUCHELLI, M. L., ANGEL, R. J., MURRI, M., CAMPOMENOSI, N., SCAMBELLURI, M., NESTOLA, F., KORSKOV, A., TOMILENKO, A. A., MARONE, F. & MORANA, M. 2020: Fossil subduction recorded by quartz from the coesite stability field. – *Geology* **48/1**, 24–28. <https://doi.org/10.1130/g46617.1>
- ANGEL, R. J., MAZZUCHELLI, M. L., ALVARO, M., NIMIS, P. & NESTOLA, F. 2014: Geobarometry from host-inclusion systems: The role of elastic relaxation. – *American Mineralogist* **99/10**, 2146–2149. <https://doi.org/10.2138/am-2014-5047>
- ANGEL, R. J., MURRI, M., MIHAILOVA, B. & ALVARO, M. 2019: Stress, strain and Raman shifts. – *Zeitschrift für Kristallographie-Crystal-line Materials* **234/2**, 129–140. <https://doi.org/10.1515/zkri-2018-2112>
- ANGEL, R. J., GILIO, M., MAZZUCHELLI, M. & ALVARO, M. 2022: Garnet EoS: a critical review and synthesis. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **177/5**, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01918-5>
- ANGEL, R. J., ALVARO, M. & FERRERO, S. 2024: A brief history of solid inclusion piezobarometry. – *European Journal of Mineralogy* **36/3**, 411–415. <https://doi.org/10.5194/ejm-36-411-2024>
- BARATELLI, L. 2025: *The interplay between cation ordering and elasticity of omphacites to unravel P-T paths of metamorphic rocks.* – Doktori értekezés. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra e dell'ambiente, Università di Pavia, 261 p.
- BARATELLI, L., MURRI, M., ALVARO, M., MIHAILOVA, B., BALLARAN, T. B., DOMENEGHETTI, M. C. & CÁMARA, F. 2025: The effect of cation ordering in omphacite on the phonon compressibility: A step towards Raman elastic geothermobarometry. – *Chemical Geology* **122650**. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2025.122650>
- BEFUS, K. S., LIN, J. F., CISNEROS, M. & FU, S. 2018: Feldspar Raman shift and application as a magmatic thermobarometer. – *American Mineralogist* **103/4**, 600–609. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6157>
- BONAZZI, M. 2020: *Elastic geobarometry methods: validation through synthesis and characterization of host-inclusion pairs by means of Raman spectroscopy.* – Doktori értekezés. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra e dell'ambiente, Università di Pavia, 103 p.
- BONAZZI, M., TUMIATI, S., THOMAS, J. B., ANGEL, R. J. & ALVARO, M. 2019: Assessment of the reliability of elastic geobarometry with quartz inclusions. – *Lithos* **350**, 105201. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105201>
- CAMPOMENOSI, N. 2020: *Elastic-thermobarometry: methods and applications to ultrahigh pressure metamorphic rocks.* – Doktori értekezés. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra Università degli studi di Genova, 244 p.
- CAMPOMENOSI, N., RUBATTO, D., HERMANN, J., MIHAILOVA, B., SCAMBELLURI, M. & ALVARO, M. 2020: Establishing a protocol for the selection of zircon inclusions in garnet for Raman thermobarometry. – *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* **105/7**, 992–1001. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7246>
- CAMPOMENOSI, N., ANGEL, R. J., ALVARO, M. & MIHAILOVA, B. 2023: Resetting of zircon inclusions in garnet: Implications for elastic thermobarometry. – *Geology* **51/1**, 23–27. <https://doi.org/10.1130/g50431.1>
- CAMPOMENOSI, N., ANGEL, R. J., MIHAILOVA, B. & ALVARO, M. 2024: Mineral host inclusion systems are a window into the solid-state rheology of the Earth. – *Communications Earth & Environment* **5/1**, 660. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01814-9>
- CESARE, B., PARISATTO, M., MANCINI, L., PERUZZO, L., FRANCESCHI, M., TACCHETTO, T., REDDY, S., SPIESS, R., NESTOLA, F. & MARONE, F. 2021: Mineral inclusions are not immutable: Evidence of post-entrapment thermally-induced shape change of quartz in garnet. – *Earth and Planetary Science Letters* **555**, 116708. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116708>
- CISNEROS, M. & BEFUS, K. S. 2020: Applications and limitations of elastic thermobarometry: Insights from elastic modeling of inclusion–host pairs and example case studies. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **21/10**. <https://doi.org/10.1029/2020gc009231>
- CISNEROS, M., BARNES, J. D., BEHR, W. M., KOTOWSKI, A. J., STOCKLI, D. F. & Soukis, K. 2021: Insights from elastic thermobarometry into exhumation of high-pressure metamorphic rocks from Syros, Greece. – *Solid Earth Discussions* **2020**, 1–27.
- CRAWFORD, M. L. & HOLLISTER, L. S. 1986: Metamorphic fluids: the evidence from fluid inclusions. – In: *Fluid–Rock Interactions during Metamorphism*, 1–35. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4896-5_1
- ENDO, S., WALLIS, S. R., TSUBOI, M., TORRES DE LEÓN, R. & SOLARI, L. A. 2012: Metamorphic evolution of lawsonite eclogites from the southern Motagua fault zone, Guatemala: insights from phase equilibria and Raman spectroscopy. – *Journal of Metamorphic Geology* **30/2**, 143–164. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00960.x>
- FOSSEN, H. 2016: *Structural Geology*. – Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781107415096>
- GILIO, M., ANGEL, R. J. & ALVARO, M. 2021: Elastic geobarometry: How to work with residual inclusion strains and pressures. – *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* **106/9**, 1530–1533. <https://doi.org/10.2138/am-2021-7928>
- GILIO, M., SCAMBELLURI, M., ANGEL, R. J. & ALVARO, M. 2022: The contribution of elastic geothermobarometry to the debate on HP versus UHP metamorphism. – *Journal of Metamorphic Geology* **40/2**, 229–242. <https://doi.org/10.1111/jmg.12625>
- GIOVANINI, E., BEFUS, K. S., OTAMENDI, J. E., CRISTOFOLINI, E., GUERREIRO, T. & CISNEROS, M. 2024: Elastic thermobarometry on metapelites across the crustal section of the Famatinian Arc, Argentina. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **179/4**, 35. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02115-2>
- GONZALEZ, J. P. 2019: *Applications of Elastic Modeling, Thermobarometry, and Thermal History Modeling to (Ultra) high-Pressure Metamorphic Rocks.* – Doktori értekezés, Syracuse University, 191 p.
- GRÜNEISEN, E. 1926: Zustand des festen Körpers. – *Thermische Eigenschaften der Stoffe*, 59 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-99531-6_1
- KOHN, M. J., MAZZUCHELLI, M. L. & ALVARO, M. 2023: Elastic thermobarometry. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **51/1**, 331–366. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-031621-112720>
- MAZZUCHELLI, M. L., BURNLEY, P., ANGEL, R. J., MORGANTI, S., DOMENEGHETTI, M. C., NESTOLA, F. & ALVARO, M. 2018: Elastic geothermobarometry: Corrections for the geometry of the host-inclusion system. – *Geology* **46/3**, 231–234. <https://doi.org/10.1130/g39807.1>

- MAZZUCHELLI, M. L., REALI, A., MORGANTI, S., ANGEL, R. J. & ALVARO, M. 2019: Elastic geobarometry for anisotropic inclusions in cubic hosts. – *Lithos* **350**, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105218>
- MAZZUCHELLI, M. L., ANGEL, R. J. & ALVARO, M. 2021: EntraPT: An online platform for elastic geothermobarometry. – *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* **106/5**, 830–837. <https://doi.org/10.2138/am-2021-7693ccbyncnd>
- MINGARDI, G., GASC, J., ARDIT, M., ANGEL, R. J., CRICHTON, W. A., DRUZHBIN, D., AUBREY, J., SCHUBNEL, A. & ALVARO, M. 2025: New experimental constraints on seismic velocities and densities across the – quartz transition at deep crustal conditions. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **180/3**, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00410-025-02206-8>
- MURRI, M. 2020: *From Raman elastic geobarometry to impact structures: the role of oriented stresses*. – Doktorai értekezés. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra e dell' Ambiente, Università di Pavia, 225 p.
- MURRI, M., MAZZUCHELLI, M. L., CAMPOMENOSI, N., KORSKOV, A. V., PRENCIPE, M., MIHAILOVA, B. D., SCAMBELLURI, M., ANGEL, R. & ALVARO, M. 2018: Raman elastic geobarometry for anisotropic mineral inclusions. – *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* **103/11**, 1869–1872. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106716>
- NASDALA, L., LENGAUER, C. L., HANCHAR, J. M., KRONZ, A., WIRTH, R., BLANC, P. & SEYDOUX-GUILLAUME, A. M. 2002: Annealing radiation damage and the recovery of cathodoluminescence. – *Chemical Geology* **191/1–3**, 121–140. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00152-3](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00152-3)
- O'BRIEN, P. J. 2008: Challenges in high-pressure granulite metamorphism in the era of pseudosections: reaction textures, compositional zoning and tectonic interpretation with examples from the Bohemian Massif. – *Journal of Metamorphic Geology* **26/2**, 235–251. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00758.x>
- POWELL, R. & HOLLAND, T. J. B. 2008: On thermobarometry. – *Journal of Metamorphic Geology* **26/2**, 155–179. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00756.x>
- PUELLES, P., ÁBALOS, B. & GIL IBARGUCHI, J. I. 2005: Metamorphic evolution and thermobaric structure of the subduction-related Bacariza high-pressure granulite formation (Cabo Ortegal Complex, NW Spain). – *Lithos* **84/1–2**, 125–149. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.01.009>
- ROSENFELD, J. L. & CHASE, A. B. 1961: Pressure and temperature of crystallization from elastic effects around solid inclusions in minerals? – *American Journal of Science* **259/7**, 519–541. <https://doi.org/10.2475/ajs.259.7.519>
- SORBY, H. C. & BUTLER, P. J. 1869: I. On the structure of rubies, sapphires, diamonds, and some other minerals. – *Proceedings of the Royal Society of London* **17**, 291–302. <https://doi.org/10.1098/rspl.1868.0050>
- SPRÁNITZ, T., PADRÓN-NAVARTA, J. A., SZABÓ, Cs., SZABÓ, Á. & BERKESI, M. 2022: Abiotic passive nitrogen and methane enrichment during exhumation of subducted rocks: primary multiphase fluid inclusions in high-pressure rocks from the Cabo Ortegal Complex, NW Spain. – *Journal of Metamorphic Geology* **40/8**, 1291–1319. <https://doi.org/10.1111/jmg.12666>
- SPRÁNITZ, T., SZABÓ, Cs., GILIO, M., ALVARO, M., BLÁŽEKOVÁ, M., KONEČNÝ, P., VÁCZI, T. & BERKESI, M. 2023: Estimation of PT entrapment conditions of a subduction fluid using elastic thermobarometry: A case study from Cabo Ortegal Complex, Spain. – *Lithos* **448**, 107171. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107171>
- STANGARONE, C., ANGEL, R. J., PRENCIPE, M., CAMPOMENOSI, N., MIHAILOVA, B. & ALVARO, M. 2019: Measurement of strains in zircon inclusions by Raman spectroscopy. – *European Journal of Mineralogy* **31/4**, 685–694. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2851>
- ZHONG, X., ANDERSEN, N. H., DABROWSKI, M. & JAMTVEIT, B. 2019: Zircon and quartz inclusions in garnet used for complementary Raman thermobarometry: application to the Holsnøy eclogite, Bergen Arcs, Western Norway. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **174/6**, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1584-4>
- ZHONG, X., MOULAS, E. & TAJČMANOVÁ, L. 2020: Post-entrapment modification of residual inclusion pressure and its implications for Raman elastic thermobarometry. – *Solid Earth* **11/1**, 223–240. <https://doi.org/10.5194/se-11-223-2020>

Kézirat beérkezett: 2025. 06. 23.