

## A magmás petrográfia megszületésétől a kvantitatív kőzettani kutatásokig – tisztelegés SZABÓ Csaba munkássága előtt

HARANGI Szabolcs<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Kőzetan-Geokémiai Tanszék, Budapest, 1117 Pázmány Péter sétány 1/C

<sup>2</sup>HUN-REN-ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport, Budapest, 1117 Pázmány Péter sétány 1/C

E-mail: harangi.szabolcs@ttk.elte.hu

---

### *From the birth of the igneous petrography to the quantitative petrology – A tribute to Csaba SZABÓ's scientific and teaching work*

#### Abstract

Csaba SZABÓ, as a member of the Department of Petrology and Geochemistry at the Eötvös Loránd University, Budapest has carried on the professional legacy of József SZABÓ and Béla MAURITZ and has played a significant role in maintaining and strengthening the field of igneous petrology in Hungary. He taught his students not only the principles of microscopic petrology and petrography, and later geochemistry, but he also delivered them the motivation towards discovery and applied research. He founded the Lithosphere Research Group (LRG) in 1998, later renamed the Lithosphere Fluid Research Laboratory, from where a number of talented scientists have come out and become successful, awarded by prestigious grants such as Lendület and ERC funds. The following brief scientific summary is a tribute to Csaba SZABÓ's excellent work as a teacher and scientist. The preparation of the first thin sections, the construction of the first polarisation microscope enabled to get a detailed insight into the structure of igneous rocks and the formation of petrography, a new viable research tool. With the advance of the instrumental analytical techniques, petrography has been integrated with geochemical studies, thermodynamics and experimental petrology, ultimately leading to the birth of the quantitative petrology. Using this novel discipline, new ideas have been developed on how magma evolves, as well as a paradigm shift occurred concerning the nature of subvolcanic magma reservoirs. The volcano petrology enables a better reconstruction of the processes taking place in the transcrustal magma reservoirs, including the timescale led to the reactivation of non-eruptible crystal mush, causing rapid volcanic eruptions. The quantitative petrology has provided a better understanding of the evolution of the mantle and the crust, involving why and how volcanoes work. Currently, quantitative petrology serves important contribution to society such as in the improvement of natural hazard monitoring, forecast and assessment, which save human lives and properties.

*Keywords: igneous petrology, petrography, microscopy, geothermobarometry, magma reservoir, natural hazard*

---

#### Összefoglalás

SZABÓ Csaba az ELTE TTK Kőzetan-Geokémiai Tanszék munkatársaként tovább vitte SZABÓ József és MAURITZ Béla szakmai örökségét, és meghatározó szerepet játszott a hazai és határon túli magmás kőzettani iskola eredményességében. Diákjainak nemcsak a mikroszkópos kőzettani és petrográfiai, majd a geokémiai alaptudást adta át, hanem a motivációt is a felfedező és alkalmazott kutatás felé. Az általa alapított Litoszféra Kutatócsoport, későbbi nevén Litoszféra Fluidum Kutatólaboratórium számos hazai és nemzetközi szinten is sikeres, többek között Lendület- és ERC-pályázatot nyert szakembert adott a földtudománynak. Az alábbi rövid tudománytörténeti összefoglaló tisztelegés oktatói és iskolateremtői munkássága előtt. A petrográfia kialakulása az első kőzettani vékonycsiszolat és az első polarizációs mikroszkóp megalakításával, majd a mikroszkópos leíró kőzetan tudományterülete forradalmi változást hozott a földtudományban. A műszeres analitikai módszerek fejlődésével, a kőzettani és geokémiai vizsgálatok, valamint a termodinamika és a kísérleti kőzettani eredmények integrálásával jött létre a magmás folyamatok, azok körülményeit számszerűsíteni is tudó kvantitatív kőzetan. Ezáltal jobban értjük a földképeny és földkéreg kialakulását és fejlődését, az új tudományos felfogás új perspektívát nyitott a vulkáni működés megértésében is, például a vulkánok alatti magmatározók természetének és folyamatainak feltárásában. A kőzettani vulkanológia segítségével leírhatók a vulkánkitöréshez vezető folyamatok, beleértve ezek időtartalmát is. Eredményei így hozzájárulnak fontos, a társadalmakat is érintő hatások feltárásához, például a természeti veszélyhelyzetek előrejelzésének és kezelésének jobbításához, ami emberi életet és anyagi javakat óvhat meg.

*Tárgyszavak: magmás kőzetan, petrográfia, mikroszkópia, geothermobarometria, magmatározó, természeti veszély*

## Bevezetés

A tudomány egyik hajtóereje az új műszerek és módszerek megjelenése és gyors bevonása a kutatásokba. Ezek révén sokszor addig nem ismert alkotóelemeket fedeznek fel, új tudományterületek jönnek létre, és akár alapjában változnak meg az addigi nézetek. Ez a fejlődés jelenleg is zajlik, és mozgatja előre bolygónk és az azon túli környezet folyamatainak jobb megértését. Az új tudományos ismeretek alkalmazása és átadása nélkül azonban ez a hajtóerő nem lesz hatékony. A tudományos fejlődés bátyái évszázadok óta az egyetemeken, ahol megtörténik a szakmai tudás átáramoltatása, a tudósoktól a tudás felé forduló és a későbbiekben e tudásra építő fiatal nemzedék felé. Ebben kulcsszerepe van az egyetemi oktatóknak, akik egyben magas szintű kutatást is végeznek, és saját tapasztalataikat, kérdésselvetéseiket, az aktuális tudományos felfedezéseket, de az azokhoz vezető utat is át tudják adni a diákoknak. Át tudják adni úgy, hogy a diákok ne csak egy megtanulandó tananyagot lássanak a kurzusokban, hanem motivációt, hogy ők is felfedező tudósok legyenek, vagy alkalmazzák a kapott tudásanyagot alkalmazott, gyakorlati kérdések megválaszolására. E két irány azonban nem két párhuzamos életút, kiindulási pontja, gyökere ugyanaz: az alapvetési megfigyelések, elemzések, kísérletek, számolások és modellezések elvégzése. Alapvetés nélkül nincs fejlődés, nincs innováció, és ahogy KARIKÓ Katalin esetében is láttuk, sokszor hosszú és kitartó alapvetés szükséges ahhoz, hogy aztán adott esetben a kapott eredmények közvetlen alkalmazást nyerjenek. A tudományos megismerés, a felfedezés iránti kíváncsiság felkeltése az egyetemi oktatók fontos feladata. Ez több, mint a sokszor száraznak tűnő tudásanyag átadása. Hazánk geológus egyetemi oktatói óriási szerepet játszottak abban, hogy a magyar szakemberek a térség vezető kutatói lettek számos területen, nemzetközi ismertséget szereztek és a Kárpát-Pannon térség földtani öröksége, annak értelmezése általánosan is gazdagítja a természeti folyamatok jobb megismerését. Ebbe beletartozik a kőzettan és geokémia, ami SZABÓ József, majd MAURITZ Béla révén nagyon erős alapokat kapott. Az iskolateremtő nagyságok sorába tartozik SZABÓ Csaba is, aki az ELTE TTK Kőzettan-Geokémiai Tanszéken több évtizeden keresztül óriási energiát fektetett be abba, hogy nemzedékeket vezessen tudományos útra, hogy a kőzettani és geokémiai vizsgálatokkal olyan tapasztalatokat szerezzenek, amit ha nem is mindenki a klasszikus tudósvonalon, de akár alkalmazott földtani feladatok megoldásában, akár munkaszervezési és menedzselési munkákban megkerülhetetlen alappal fel tudjanak használni.

Talán megengedhető az, hogy személyes élményeimből is feltárjak néhány mozzanatot Csabával való kapcsolatomból. Az 1980-as években fiatal diákként ide-oda csapódva igyekeztük megismerni, miről is szól a geológia, érkezett a sok, teljesen új ismeretanyag. Én a térképek és a kirándulások szeretetétől hajtva érkeztem az ELTE földtudomány szakára és ismertem meg az ásványokat, kőzeteket és fossziliákat, hogy mit tudunk a Föld kialakulásáról, hallottam első kézből a lemeztektonika folyamatairól, óceáni medencék

kinyílásáról és a kontinensek vándorlásáról. Végül a kőzetek világa fogott meg, a terepgyakorlatok élményei mellett egy bizonyos kurzus, a kőzetmikroszkópia kerített hatalmába. Belenézni egy kőzetbe, ahol feltárul egy új világ, megérteni a fény terjedését és azt, hogy miképpen segítenek az optikai tulajdonságok a kőzeteket alkotó ásványok felismerésében, ez fantasztikus élmény volt. De ehhez kellett valahogy a sors keze is, egy olyan egyetemi tanár, aki ebbe a csöppet sem egyszerű világba be tudta vezetni az érdeklődő, minden újra rácsodálkozó diákot. Szerencsém volt, vagy ennek így kellett lennie? Abba a csoportba kerültem, ahol SZABÓ Csaba oktatta a kőzetmikroszkópiát, és ez a „szakmai kettőtörés” nemcsak a tudás átadását jelentette, hanem a tudományos érdeklődés felkeltését is. A tudományos kapcsolatból aztán szoros emberi kapcsolat lett, hosszú órák beszélgetései, amelyek a szakma mellett az életben való eligazodást is segítették. Hajnali kelések, hogy elinduljunk egy feltárás begyűjtésére, útközben folyamatos beszélgetésekkel és persze sok vitával is, mind-mind erősítette a gondolkodást, a kérdésfelvetést, a megfigyelések tesztelésének fontosságát. Ez vezetett ahhoz, hogy térségünk mezozoos, majd neogén-kvarter vulkáni kőzeteit modern eszközökkel feldolgozzuk, és azt a késztetést, hogy igyekezzünk kitörni a nemzetközi szakmai térbe is, hogy széles szakmai kapcsolatokat létesítsünk. Ennek köszönhető az a meghatározó élmény, hogy megfigyeléseinket, új elgondolásainkat összefoglaló tanulmányokba önthettük, amik a neves *Tectonophysics*, illetve az *International Geology Review* szakfolyóiratokban jelentek meg (SZABÓ et al. 1992, HARANGI et al. 1996). Együtt vettünk részt számos remek szakmai konferencián, többek között 1990-ben a mainzi IAVCEI vulkanológiai rendezvényen, ahol nemcsak a rendszerváltás utáni eufóriát élhettük át, hanem betekintést is kaptunk a modern fizikai és kőzettani vulkanológia világába. Hazafelé, a repülőúton már nagy izgalommal az első hazai vulkanológiai terepgyakorlat ötletét beszélgettünk meg, amit 1991-ben meg is valósítottunk Gércén.

Csaba amerikai tanulmányútja során is folyamatosan tartottuk a kapcsolatot, ő adta a kőzettani alapot, én igyekeztem hozzátenni az új geokémiai ismereteket, a modellszámításokat a közös értelmezéshez, ami egy másik meghatározó tanulmányhoz vezetett. A térség peridotit kőzetzárványaiban lévő ásványfázisok kémiai összetételét felhasználva számszerűsítettük a földköpenyben uralkodó hőmérséklet, nyomás- és redoxviszonyokat (SZABÓ et al. 1995). Ezek mind meghatározó mérföldkövek voltak szakmai pályafutásomban. Együtt gondolkodtunk sok mindenben, megvitattunk számos szakmai és személyi kérdést, álmodoztunk a jövőről, de Csaba mindig tartott egy kis távolságot. Amikor ő visszatért az amerikai, én pedig egy angliai tanulmányútról, egy hosszú beszélgetésben tisztáztuk, hogy Csaba szerint a jövő nem a közös munkában van, hanem külön-külön kell erősnek lennünk, és külön-külön kell felépíteni egy saját tudományos iskolát. A Kőzettan-Geokémiai Tanszéken 1998-ban ő megalapította a Litoszféra Kutatócsoportot (LRG), én pedig a Vulkanológiai csoportot. Bár külön utakon, de egymás mellett dolgoztunk, a két iskola sikeresen megállta a helyét.

SZABÓ Csaba oktatói, kutatói és emberi személyisége meghatározó volt nemcsak számomra, de tucatnyi, ma már kiváló szakember számára is, akik részben itthon, részben külföldön váltak sikeres kutatóvá, egyesek Lendület- és ERC-nyertesek lettek. Fontosnak tartotta a határon túli magyarok szakmai képzését, rendszeresen járt oktatni Kolozsvárra, és jelentős módon hozzájárult a határon túli magyar nyelvű geológus felsőoktatási képzés újraindításához. Úgy gondolom, Csaba tevékenysége méltó folytatása a SZABÓ József és MAURITZ Béla által megalapozott kőzettani hagyományoknak. Az alábbi rövid tudománytörténeti összefoglalóval az ELTE TTK Kőzetan-Geokémiai Tanszék vezetőjeként, a tanszék képviselőjeként és sok munkatársa nevében is igyekszem tisztelni Csaba kiváló oktatói és iskolateremtői munkássága előtt. A klasszikus petrográfia kialakulása, szerepe a földtani megismerésben és tovább fejlődése a kvantitatív kőzetan felé méltón tükrözi azt az álmodást, amiről Csabával annyit beszélgettünk, és aminek mindketten részei lehettünk.

### Az optikai kőzetan, megnyílik egy új világ

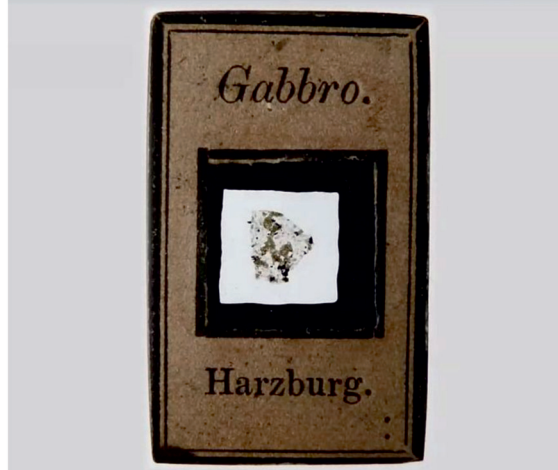
A kőzetek vizsgálata kezdetben szabad szemmel és kézi nagyítóval történt, mindez csupán néhány alapkövet elkülönítését tette lehetővé. Az első nagy áttörést az jelentette, amikor nagy felbontással bele lehetett nézni a kőzetekbe, és a mikroszkópos vizsgálatokkal feltárult a kőzeteket alkotó kristályok sokszínűsége, a kristályok változó megjelenése (TOURET 2012). Ehhez a polarizációs mikroszkóp megalkotása és térnyerése kellett, ami az 1800-as évek második felében történt meg. Ennek révén megszületett a kőzetek elemzését végző petrográfia tudománya. Az 1960-as években a pásztázó elektronmikroszkópok további részleteket tártak fel a kőzetek és kristályok felépítéséről, lehetővé vált a kristályok kémiai összetételének nagy pontosságú meghatározása is. Kiderült, hogy az ásványok kémiai jellegét nemcsak a képletükkel lehet leírni, hanem akár egy kristályon belüli kémiai összetételbeli változással, kémiai zónassággal is. A petrográfia és geokémia együttes alkalmazása számszerűsítette a megfigyeléseket, hozzájárult a numerikus modellek megalkotásához, a kristálymegjelenés, a kőzetszövet és az ásvány kémiai összetétel együttes értelmezéséhez. A kísérleti eredmények bevonásával lehetővé vált a megfigyelésekből következtetni a keletkezés körülményeire, sőt számszerűsíteni a kristályosodás során fennálló hőmérsékletet, nyomást, redoxállapotot, olvadákösszetételt, illótartalmat, illetve ezek változását. A 21. században mindehhez hozzákapcsolódott a folyamatok időbeliségének számszerűsítése is. Ma egy kristályon belüli kémiai összetétel változásából a diffúziós kronometria segítségével megbecsülhetjük különböző földtani folyamatok idejét, és ezek átfordíthatók a társadalom számára fontos következtetések levonására. Így például kiszámolható a magma földkérgen keresztül történő felemelkedési sebessége, a vulkáni működéshez vezető magmatározó folyamatok és a vulkánkitörés közötti idő. A petrográfia és az ásványkémia együttes alkalmazása lehető-

séget ad bonyolult folyamatok feltárására, e körülmények számszerű jellemzésére és ez elvezetett az új, kvantitatív kőzetan tudományának kialakulásához.

A petrográfia tudományának kialakulásához több évtizedes, aprólékos felfedező munka, kísérletezés kellett, továbbá a hatékony kommunikáció, ami személyes találkozások, elmélyült beszélgetések során valósult meg. Az első lépés William NICOL skót fizikus, geológus nevéhez fűződik, aki az izlandi Helgustadir kőfejtő egyik bazaltjában víztiszta kalcitkristályt talált. Rasmus BARTHOLIN 1669-ben már leírta a kristály különlegességét, nevezetesen azt, hogy a beeső fénysugár két különböző, egymásra merőleges rezgési irányt mutató poláros komponensre bomlik, azaz optikailag kettőtörést mutat. Ezt a tulajdonságot vélhetően már a vikingek is felismerték, a középkori izlandi szövegekben megjelenő *sólarsteinn*, azaz napkő kifejezés vélhetően az izlandi pátra utalhat. NICOL ezt a tulajdonságot használta fel, hogy kristályok, kőzetek belső szerkezetét felfedje. A kalcitkristályt a rövidebb átlójánál kettévágta, majd kanadabalzssammal összeragasztotta. A kettőtörés után a kanadabalzssamon az ordinárius sugár teljesen visszaverődött, az extraordinárius sugár pedig kisebb törés után tovább haladt. Az optikai petrográfiai mikroszkóp e poláros fénysugáron alapul. NICOL vékony metszeteket készített kristályokról és megkövesedett fákról, és ezeket e technikával áteső fényben tudta vizsgálni. Habár e módszert már az 1820-as években kifejlesztette, leírás hiányában évtizedeken keresztül nem vált ismertté. Az 1840–60-as években Henry Clifton SORBY és Adolph Friedrich OSCHATZ készített egymástól függetlenül kőzetből vékonycsiszolatokat, hogy azokat áteső poláros fényben elemezze (TOURET 2012). A kőzetdarabokat kanadabalzssammal ragasztották üveglemezre, az áteső poláros fényben pedig feltárult a kristályok különböző optikai tulajdonsága, ami hozzájárult azonosításukhoz. SORBY számos publikációban (pl. SORBY 1858, 1864) különböző mikroszkópos metszeteket mutatott be, köztük a Vezúv kőzetüveges vulkáni képződményeiről (1. ábra), de meteoritokról is. Továbbá, gázbuborék-tartalmú zárványokat azonosított kristályokban és úgy vélte, ezek fontos információkat nyújtanak a kőzetek keletkezéséről. Ezek a szilikátolvadék- és fluidzárványok jó száz évvel később kerültek a tudományos vizsgálatok fókuszába és aztán játszottak központi szerepet SZABÓ Csaba kutatásában is. OSCHATZ ugyancsak gyönyörű vékonycsiszolatokat készített különböző németországi kőzetekről (1. ábra), azonban eredményeit csak helyi konferenciákon mutatta be, így munkája jórészt ismeretlen maradt. SORBY a londoni Földtani Társulatban szenvedélyesen beszélt felfedezéseiről: „there is no connexion between the size of an object and the value of a fact and that, though the objects I have described are minute, the conclusions to be described from the facts are great”, azaz „nincs összefüggés egy tárgy mérete és értéke között, bár az általam leírt tárgyak parányiak, a tényekből levonható következtetések nagyok”. Habár e bejelentéseit nagy vita fogadta, és sokan szkeptikusak voltak a felfedezések és maga a módszer tekintetében, miszerint „hogyan is lehet mikroszkóppal hegyeket vizsgálni”, nem sokkal később forradalmasította a kőzettani kutatásokat.



A.

B. Die Präparate von Dr. phil. A. F. Oschatz -  
einem Pionier der Dünnschliffherstellung

**I. ábra.** A. SORBY rajza a Vezúv egyik lapillidarabjának mikroszkópos megjelenéséről (SORBY 1858); B. OSCHATZ harzburgi gabbrról készült vékonycsiszolata

(<https://www.tmg-tuebingen.de/die-prepare-von-a-f-oschatz-pionier-der-duennschliffherstellung/>)

**Figure 1.** A. SORBY's sketch of microscopic image of a lapilli from Vesuv (SORBY 1858); B. Thin section of a gabbro from Harzburg from the OSCHATZ collection

(<https://www.tmg-tuebingen.de/die-prepare-von-a-f-oschatz-pionier-der-duennschliffherstellung/>)

Az új felfedezések hatékony geológiai alkalmazásához azonban szükséges volt a mikroszkópok fejlesztése. Giovanni Battista AMICI Firenzében a távcsövek kromatizmusának problematikáján dolgozott, és ennek eredményeképpen elkészítette az első akromatikus lencsákat. AMICI az 1830-as években megalkotta az első polarizációs, akromatikus mikroszkópot, ami felkeltette a francia Pierre-Armand DUFRÉNOY érdeklődését, és azonnal rendelt magának egy darabot, hogy a párizsi ásványtani intézetében végzett kutatásokhoz használhassa. Német területen Paul Heinrich GROTH, a kristálytan egyik alapító tudósa folyamodott von Rudolf FUESS szakértelméhez, hogy készítsen neki egy „kristályoptikai univerzális készüléket”. FUESS együtt dolgozott Karl Heinrich Ferdinand ROSENBUSCH professzorral, akivel 1871-ben kifejlesztették az első teljesen felszerelt és küllemre is kiválóan kinéző polarizációs mikroszkópot (2. ábra). A készülék annyira nagy érdeklődést keltett, hogy FUESS cége teljes mértékben átállt a mikroszkópok gyártására.

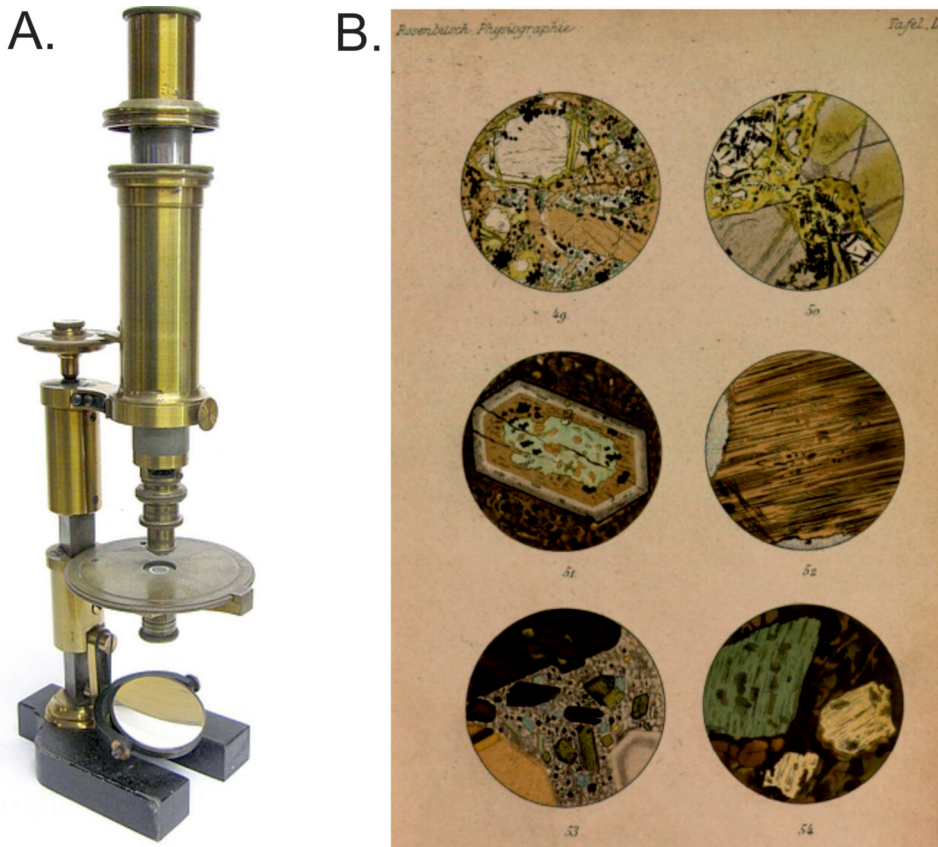
A mikroszkópos vizsgálatok sokáig csak lokális alkalmazást jelentettek, egyrészt a kételkedő hozzáállás, másrészt az ismeretek lassú terjedése, illetve a megfelelő mikroszkópok hiánya miatt. FUESS mikroszkópjai nagy áttörést jelentettek. ROSENBUSCH mellett Ferdinand ZIRKEL, leMBERGI professzor volt az új vizsgálatok úttörő alkalmazója. ZIRKEL egy rajnai hajóúton találkozott SORBYval, akit meghívott otthonába, és a beszélgetés során előkerültek a vékonycsiszolatos felfedezések is. ZIRKEL meglátta ebben a lehetőséget, és rögtön az új módszer híve lett. 1866-ban egy több mint ezeroldalas könyvet publikált (ZIRKEL 1866), aminek címében már szerepel a petrográfia név: *Lehrbuch der Petrographie*. Ezt követte a bazaltok mikroszkópos vizsgálatáról készült munka (ZIRKEL 1870), majd *Microscopical*

*Petrography* című könyvében (ZIRKEL 1876) már különböző kőzetekből készült számos gyönyörű, mikroszkópos szöveti kép rajza jelent meg. ROSENBUSCH *Die mikroskopische Physiographie der Mineralien und Gesteine* című könyvében (2. ábra; ROSENBUSCH 1875) először szerepeltek olyan kifejezések, mint *idiomorf*, *hipidiomorf*, *pilotaxitos*, *hialopilites*, illetve *panidiomorf szemcsés* megjelenés. Ezek a munkák rakták le a kőzetek szöveti és ásványtani elemzésének, azaz a petrográfia tudományának alapkövét.

### A hazai petrográfia kialakulása

SZABÓ József, a hazai geológia, ásványtan és kőzetan egyik legmeghatározóbb alakjának kiválóságát tükrözi az is, ahogy rögtön felismerte az új mikroszkópos eljárás hatékonyságát és mindent megtett azért, hogy ezt alkalmazhassa, sőt bevonja az oktatásba (CSATH 2023). Tudomást szerzett SORBY eljárásáról, miszerint kőzeteket, kristályokat vékonyra csiszolva el lehet érni, hogy az áthatoló fény sugaral új részleteket lehessen felismerni. Hazánkban akkor HANTKEN Miksa már használta a mikroszkópos elemzést foraminiferák felismeréséhez, azonban a kőzetek vizsgálatához egy különleges, polarizációs mikroszkópra volt szükség. SZABÓ már tudott ZIRKEL eredményeiről is, aki Bécsben végzett kutatásokat, és Heinrich FISCHER professzorhoz fordult, hogy közelebbről megismerje a forradalmian új eljárást. Tőle kapott részletes leírást a mikroszkóp mellett a vékonycsiszolatok elkészítéséről is. Beszerezte ZIRKEL és ROSENBUSCH petrográfiai könyveit, kapcsolatot alakított ki FUESS-szel, és a pénzügyi nehézségek ellenére is igyekezett mikroszkópot vásárolni. 1880-ban a mikroszkóp földtani alkalmazásáról tartott előadást a Természettudományi Társulatban, 1883-ban írt könyvének címében már szerepel a petrográfia név (SZABÓ 1883), majd 1891-ben egyértelműen leszögezte elkötelezettségét az új tudomány felé: „A petrográfiai sistematikának eszköze a mikroszkop s az eredmény lényegében a mikroskopi petrografia.” (3A ábra; SZABÓ 1891). A Selmec környéki földtani felépítést leíró munkájában eképpen írt: „Minden vidéken, melyen geológiai kutatást szándékozunk tenni, első, hogy az eltérőnek látszó kőzetekből gyűjtünk, azokat petrográfiai meghatározás után megnevezzük, s így tudomást nyerünk arról, hogy ott e tekintetben mi van”. Leszögezte azonban azt is, hogy a petrográfia egy eszköz a földtani folyamatok részletesebb megismerése felé: „mentől inkább bemélye-





2. ábra. Rudolf FUESS első közzétett polarizációs mikroszkópja (A) és ROSENBUSCH 1875-ös könyvének egyik mikroszkópos petrográfiai képeket tartalmazó illusztrációs táblája (B)

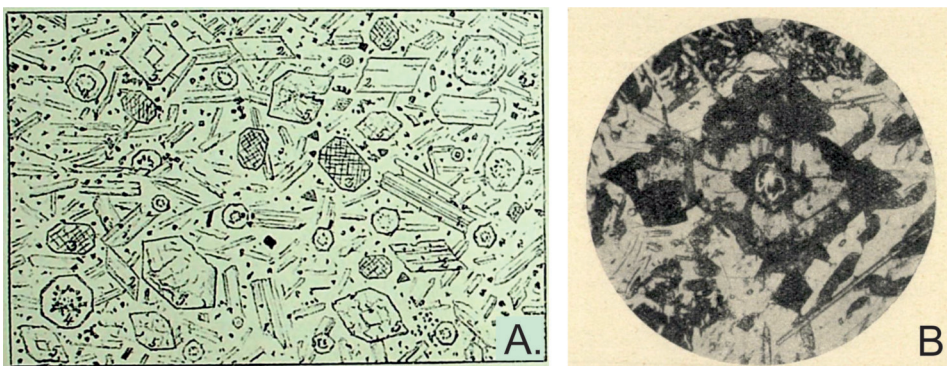
Figure 2. A) The first petrographic polarizing microscope produced by Rudolf FUESS. B) One of the illustration tables of microscopic petrographic pictures of various igneous rocks from the 1875 book of ROSENBUSCH

dünk a részletekbe, annál világosabb lesz előttünk, hogy a petrográfiailag meghatározott kőzetről nem csak azt tudjuk, hogy mi, hanem azt is, hogy miként van ott, mi módon és micsoda relatív időben foglalta el a helyét”. SZABÓ közzétett kutatásainak egyik nagy eredménye volt a trachycsoport osztályozása, ami mellett úttörő módon ismert fel magmakeveredési folyamatokat (SZABÓ 1894). Sőt, már akkor helyesen

cseki alsó kréta vulkáni kőzetekről is (MAURITZ 1913). Fontos hangsúlyozni, hogy MAURITZ felfogása mennyire megelőzte korát. A petrográfiai leírások mellett tanulmányában szerepeltek geokémiai elemzési adatok is, azaz elsők között integrálta a közzétett és geokémiai megfigyeléseket és eredményeket.

### Bepillantás a földköpenybe

A felszínen lévő magmás kőzetek elemzése egyre jobb betekintést adott tulajdonságukról, kialakulásuk körülményeiről, a földkéreg fejlődésében betöltött szerepükről. A mélyebb földköpeny világa időben egy kicsit elmaradva tártul fel a tudósok előtt. Az optikai mikroszkópos szöveti elemzések az 1970-es években vezettek el a földköpeny felső részének jobb közzétett megismeréséhez. A litoszféra al-



3. ábra. A. Vulkanai kőzet vékonycsiszolatának mikroszkópos képe SZABÓ József könyvében, amelyben olivint, piroxént, földpátot, magnetitet és leucitot ismer fel (SZABÓ 1883). B. MAURITZ Béla egyik mikroszkópos metszete, ami iddingszites olivinkristályt mutat a Ság-hegy bazaltjában (MAURITZ & HARWOOD 1937)

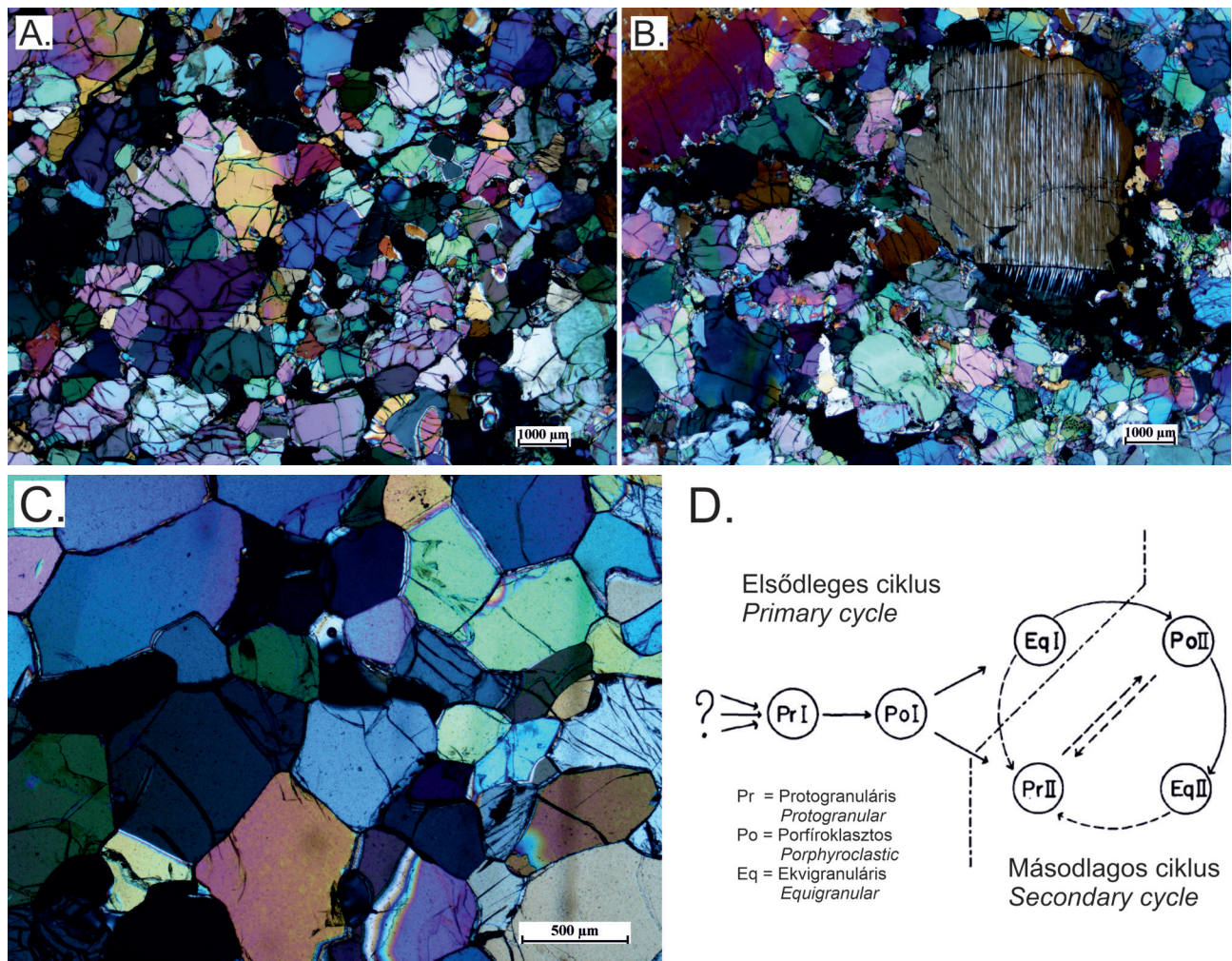
Figure 3. A. Drawing of the microscopic picture of a volcanic rock in the book of SZABÓ (1883). It contains olivine, pyroxene, feldspar, magnetite and leucite. B. Microscopic picture of an iddingsitized olivine in the basalt of Ság Hill (MAURITZ & HARWOOD 1937)



só részét képviselő földköpenyből a bazaltos magmák sodorhatnak magukkal kisebb-nagyobb kőzetdarabokat, és gyors magmafeláramlás esetén ezek eredeti kőzettani és geokémiai tulajdonságukat megtartva felszínre juthatnak, egyedi lehetőséget nyújtva a földköpeny felső részének közvetlen elemzésére. Ezeket a xenolitokat, azaz a mélyben felkapott kőzetdarabok bazaltokban lévő zárványait korábban egyszerűen „olivinbombáknak” nevezték. Az uralkodó olivin-kristályok mellett azonban több-kevesebb rombos (orto-) és monoklin (klino-) piroxént is tartalmaznak piciny spinell kristályok mellett, kőzettanilag peridotitok. Ezek nagy része lherzolit, azaz az olivin és ortopiroxén mellett jelentékeny (>5 tf%) mennyiségű klinopiroxént is tartalmaznak, de vannak klinopiroxén-szegény harzburgitok is, ritkán szinte tisztán olivinkristályokból álló dunitek, illetve ortopiroxénben szegény, az olivin mellett főleg klinopiroxént tartalmazó wehrlitok. A mikroszkópos elemzések a kísérleti kőzettani eredményekkel együtt világosan bizonyították, hogy ezek a

kőzetek alkotják a földköpeny felső részét (KUTOLIN 1970, NICOLAS et al. 1972, MERCIER & NICOLAS 1975).

MERCIER & NICOLAS (1975) nyugat-európai és hawaii peridotitok részletes mikroszkópos elemzése és az eredmények statisztikai feldolgozása alapján rámutatott arra, hogy a földköpeny felső része a viszonylag egyszerű ásványtani összetétel ellenére sem homogén. A kristályok megjelenése, alakja, nagysága, egymáshoz való kapcsolódása a földköpenyben zajló fizikai folyamatokra utal, a kőzetek szövete szilárd fázisban zajló átalakulással reagál. Az eredeti, a Föld kezdeti fejlődése során kialakult magmás litológia a földköpenyben tehát számos átalakuláson megy keresztül, kőzettanilag és kémiaailag is törekedve az egyensúlyi állapot kialakítására. Ebből a szempontból tehát a bazaltokban lévő peridotit xenolitok már inkább metamorf kőzeteknek vehetőek, jóllehet csoportosításuk az úgynevezett magmás ultra-mafikus kőzetcsoportban történik (LE BAS & STRECKEISEN 1991). MERCIER & NICOLAS (1975) a peridotitok három fő



**4. ábra.** A földköpeny kőzetének, a peridotitnak fő szöveti típusai keresztezett nikolos mikroszkópos felvételeken: (A) a legősibb protogranuláris (Pr); és az új körülményekhez alkalmazkodó (B) porfiroklastos (Po) és (C) ekvigranuláris (Eq) szövet és (D) ezek kapcsolata MERCIER & NICOLAS (1975) értelmezésében. A peridotitzárványok Líbiából származnak

**Figure 4.** The main textural types of peridotite, the principal lithology of the upper mantle in cross-polarizing microscopic pictures: A. protogranular (Pr) ancient type; B. porphyroclastic (Po) and C. equigranular (Eq) types equilibrated with the new conditions and D. their relationships as interpreted by MERCIER & NICOLAS (1975). The peridotite xenoliths were collected in Libya

szöveti típusát különítette el a legősbibbtlől az átkristályosodással egyensúlyi állapotot mutató szerkezetig (4. ábra): (a) protogranuláris, amelyben szabálytalan határvonal mentén érintkeznek a különböző méretű kristályok; (b) porfiroklasztos, ahol nagy méretű olivin és vagy/ortopiroxén kristályok (porfiroklaszt) vannak jóval kisebb nagyságú kristályhalmazban és (c) ekvigranuláris, ahol hasonló méretű szemcsék sok esetben 120 fokot bezáró hármasponttal és egyenes szemcsehatárral jellemzett érintkezésben vannak, utalva a fizikai és kémiai egyensúlyi állapotra. Ezek a szöveti csoportok átmeneti típusokkal kapcsolódnak egymáshoz, nem ritkák például a porfiroklasztos ekvigranuláris szövetű peridotitok. A protogranuláris szövet képviseli a magmás peridotit litológiát, míg a (b) és (c) állapot már fokozatos metamorf átalakulást jelent (MERCIER & NICOLAS 1975). A peridotitok jellemzése tehát egyrészt ásványtani és szöveti leírást jelent, amihez nélkülözhetetlen a mikroszkópos elemzés, másrészt geokémiai, ami további bepillantást ad a földköpenyben zajló folyamatokról.

A lherzolit klinopiroxén-tartalmának csökkenése a bazaltos olvadékképződéssel és magmaeltávozással magyarázható, azaz a harzburgitok túlnyomó része olvadékképződésen átesett, visszamaradt kőzetanyagként értelmezhető. A dunitek többnyire reakciófolyamat során alakulnak ki, míg a wehrlitek bazaltos magma szerepére utalnak. A bazaltokban lévő peridotit zárványok uralkodóan spinelltartalmúak, azaz 40–80 kilométer mélységek között származnak. Ahol mélyebb a litoszféra alsó határa, ott előfordulnak gránát-tartalmú peridotitok is, a spinell ugyanis nagyjából 80 kilométer mélység alatti nyomáson már nem stabil, és helyette gránát jelenik meg. A kismértékű olvadással, nagyobb mélységben kialakuló bazaltmagmák kémiai összetétele utal arra, hogy gránát jelenlétében jöttek létre, azaz 80 kilométernél mélyebben, általában az asztenoszférában, míg kőzetdarabokat a merev litoszféra földköpeny területéről tudnak felhozni, ahol spinell-peridotitok vannak. Ez azt jelenti, hogy a bazaltokban lévő peridotit kőzetzárványok nem a bazaltmagmák forrásterületét képviselik, hanem a felette lévő litoszféraköpeny-zónáról adnak információt. Gránát-peridotit kőzetzárványok elsősorban olyan területeken vannak, ahol a bazaltos magma vastag litoszférát tört át. A peridotit xenolitok olykor amfibolt és flogopitot is tartalmazhatnak, amelyek vizes fluidumok és a peridotit kölcsönhatása során történt reakcióval, azaz metasomatózissal alakulnak ki. A fluidum lehet oldat és olvadék is, nagy részük egykori szubdukcióhoz köthető, kisebb részük pedig az asztenoszférából származó kis térfogatú olvadékokat képviseli. A merev, stabil litoszféra-földköpenyből származó peridotitzárványok tehát e módosító folyamatokról is tájékoztatást adnak.

A Kárpát–Pannon térségben lévő miocén–kvarter alkáli bazalt vulkáni mezőket létrehozó magmák nem kevés peridotit-kőzetzárványt hoztak a felszínre, amelyek betekintést adnak a terület alatti legfelső földköpeny jellegéről és az ott zajlott folyamatokról. EMBEY-ISZTIN Antal úttörő vizsgálatait (EMBEY-ISZTIN 1976, EMBEY-ISZTIN et al. 1989, DOWNES et al. 1992) követően SZABÓ Csaba kezdeti vizsgálatai feltárták, hogy térségünkben ennél idősebb magmás kőzetekben,

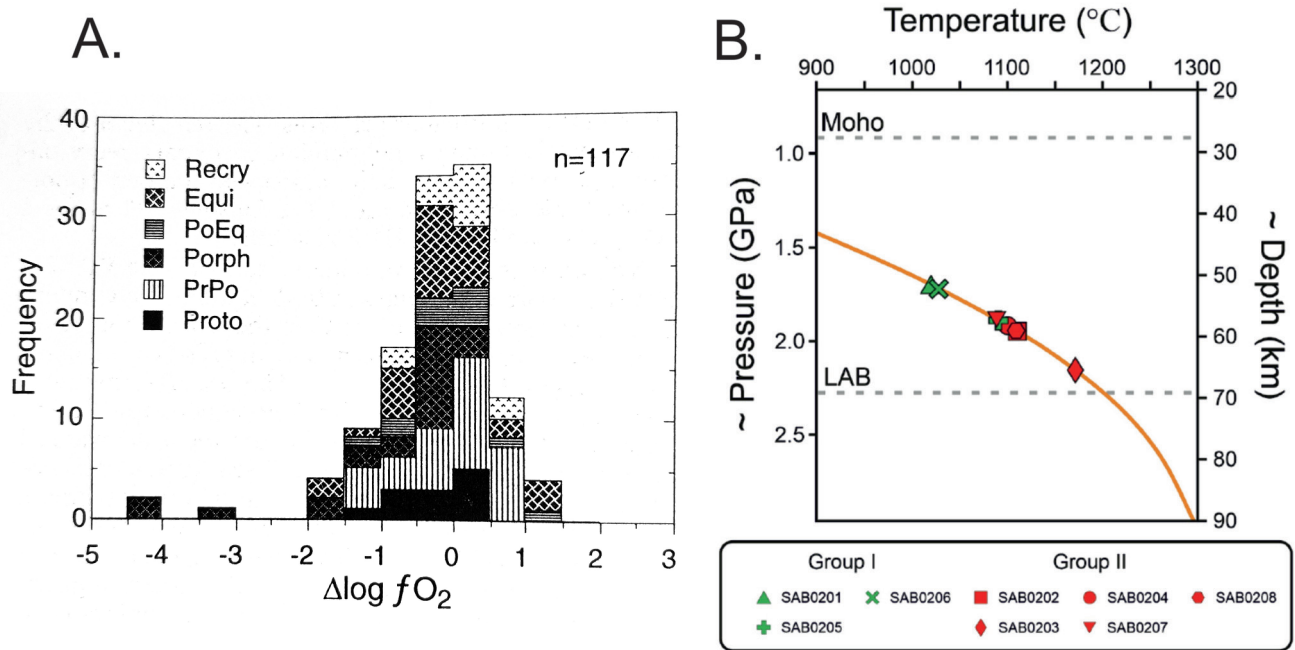
a késő kréta lamprofirókban is nem kevés peridotit-kőzetzárvány van (SZABÓ 1985, SZABÓ et al. 1993, GUZMICS et al. 2008, NÉDLI et al. 2010). A későbbiekben Csaba és tanítványainak kutatási fókuszja a miocén–kvarter alkáli bazaltokban lévő kőzetzárványokra, elsősorban a földköpeny eredetű kőzetekre irányult, ami számos kiváló publikációt eredményezett, nemzetközi szinten is ismertté téve a térség földköpenykutatását (SZABÓ & TAYLOR 1994; SZABÓ et al. 1995, 2004; FALUS et al. 2000, 2008; BALI et al. 2002, 2007, 2008; ZAJACZ & SZABÓ 2003; HIDAS et al. 2007, 2010; ZAJACZ et al. 2007, BERKESI et al. 2012; KOVÁCS et al. 2012; ARADI et al. 2017, 2020; LIPTAI et al. 2017; PATKÓ et al. 2019, 2020, 2021, 2022, 2024). A kőzettani elemzésekben nagy szerepet kaptak a szöveti jellemzések, a kristályorientációs vizsgálatok, amelyek a földköpeny legfelső részében zajló deformációs folyamatokba és reológiai viszonyokba adtak új betekintést. A petrográfiai elemzések geokémiai vizsgálatokkal kombinálva számszerűsítették az uralkodó hőmérséklet, nyomás- és redoxviszonyokat, ezzel feltérképezve az alattunk lévő felső földköpeny állapotát (5. ábra). A következtetések kitértek a litoszféra dinamikus változására is. KOVÁCS et al. (2012), illetve PATKÓ et al. (2024) a Pannon-medence központi részén, a földkéreg alatt elkülönítettek egy ősi litoszféra földköpenyanyagot és alatta egy frissebb, a Pannon-medence alatti kőzetburok-ekenziót követő hűlés során az asztenoszféra felső részéből származó litoszféra földköpenyegységet. A peridotit xenolitokban lévő amfibol és flogopit változatos metasomatikus átalakító folyamatokat rögzít, amiről további részleteket árul el a peridotit ásványfázisaiban megmutatkozó nyomelem összetételbeli változékonyság.

A földköpenyt alkotó peridotit kőzetek megismerése Arthur HOLMES korai, mérföldkövet jelentő megállapításától (HOLMES 1931) a leíró, elemző kőzettani vizsgálatokon keresztül jutott el a kvantitatív kőzettani rekonstrukciókhoz, ahol a petrográfia és geokémia együttes eredményei számszerűsítik a földköpeny fizikai és kémiai tulajdonságait, az uralkodó állapotjelzőket (hőmérséklet, nyomás, redoxviszonyok). Ezek nélkülözhetetlenek a földi és planetáris kvantitatív modellek kialakításában és futtatásában. SZABÓ Csaba és a Litoszféra Kutatócsoport (később Litoszféra Fluidum Kutatólaboratórium) munkatársainak több évtizedes kutatásai és ezek eredményei felhelyezték térségünket a földköpenyről kialakított tudás térképére.

## Kvantitatív petrológia és kőzettani vulkanológia

A vulkáni kőzetek kutatása és a vulkanológia sokáig külön utakat járt, az utóbbi esetében nagyobb szerepet kapott a vulkáni képződmények rétegtani jellemzése és különböző típusú vulkánkitörésekhez való kötése (fizikai vulkanológia). A kőzettani kutatások először a geokémiai elemzésekkel kapcsolódtak össze. Az 1960–70-es években a holdkutatás megerősítette a tudományos hátteret, új műszerek kerültek kifejlesztésre és a tudományba való bevonásra, ezek új



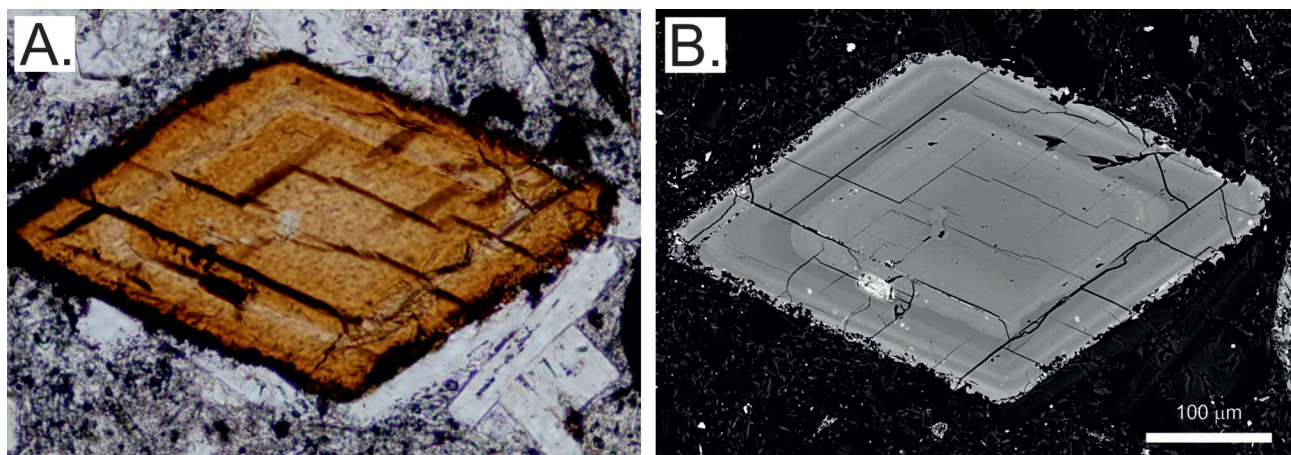


**5. ábra.** Három évtizedes út a földköpeny eredetű peridotitok kvantitatív értelmezése felé: (A) A Kárpát-Pannon térség bazaltjaiban előforduló, különböző szövetű peridotit xenolitokban lévő ásványfázisok (olivin és spinell) kémiai összetételéből számolt oxigén-fugacitás értékek SZABÓ et al. (1995) munkájából és (B) sabari (Balaton-felvidék) peridotitzárványokban lévő piroxének kémiai összetételéből számolt hőmérséklet-értékeknek a térség alatti geotermára illesztése PATKÓ et al. (2024) tanulmányában

**Figure 5.** The progress towards the quantitative interpretation of mantle-derived peridotites over three decades: (A) Oxygen fugacity values were calculated from chemical composition of coexistent olivine and spinel phases found in different textural types of peridotite in the Carpathian-Pannonian Region presented by SZABÓ et al. (1995). (B) Temperature values calculated from chemical composition of pyroxene phases of the peridotite from Sabar, Balaton Highland inserted on the geotherm beneath this area from the publication of PATKÓ et al. (2024)

perspektívákat nyújtottak. Ilyen volt a pásztázó elektronmikroszkóp megjelenése, amelynek képalkotási lehetősége szélesítette az optikai mikroszkóp által nyert ismereteket. A scanning és a visszaszórt elektronképek, valamint a katód-lumineszcens felvételek új információkat adtak, amiben a kémiai összetételváltozás is tükröződött. A visszaszórt elektronképek szürke árnyalatai az ásványfázisok kémiai összetételére érzékeny mintázatot nyújtanak (6. ábra). Minél nagyobb mennyiségben vannak jelen a nagy rendszámú

elemek (pl. vas, kalcium) annál világosabb szürke szín jelenik meg, a sötétebb szürke színek pedig a nagyobb koncentrációjú magnézium-, illetve nátriumtartalomra utalnak. A szürke szín árnyalatainak változásai nagyobb felbontással mutatták be azt, hogy egyes kristályok komplex kémiai összetételűek, azaz kémiailag zónásak. A kémiai összetétel változásáért a kristályosodás körülményei felelősek. A kőzettenhez kapcsolódott a kémiai összetételekkel foglalkozó geokémia, és elválaszthatatlan része lett az értelmezések-



**6. ábra.** A székeleyföldi Csomád dácitjában lévő amfibol optikai polarizációs mikroszkópos (A) és pásztázó elektronmikroszkóppal készült visszaszórt elektronképe (B) Kiss et al. (2014) nyomán

**Figure 6.** (A) Optical polarizing microscopic picture and (B) back-scattered electron image produced by scanning electron microscope of an amphibole crystal in the dacitic volcanic rock of Ciomadul (SE Carpathians) after Kiss et al. (2014)

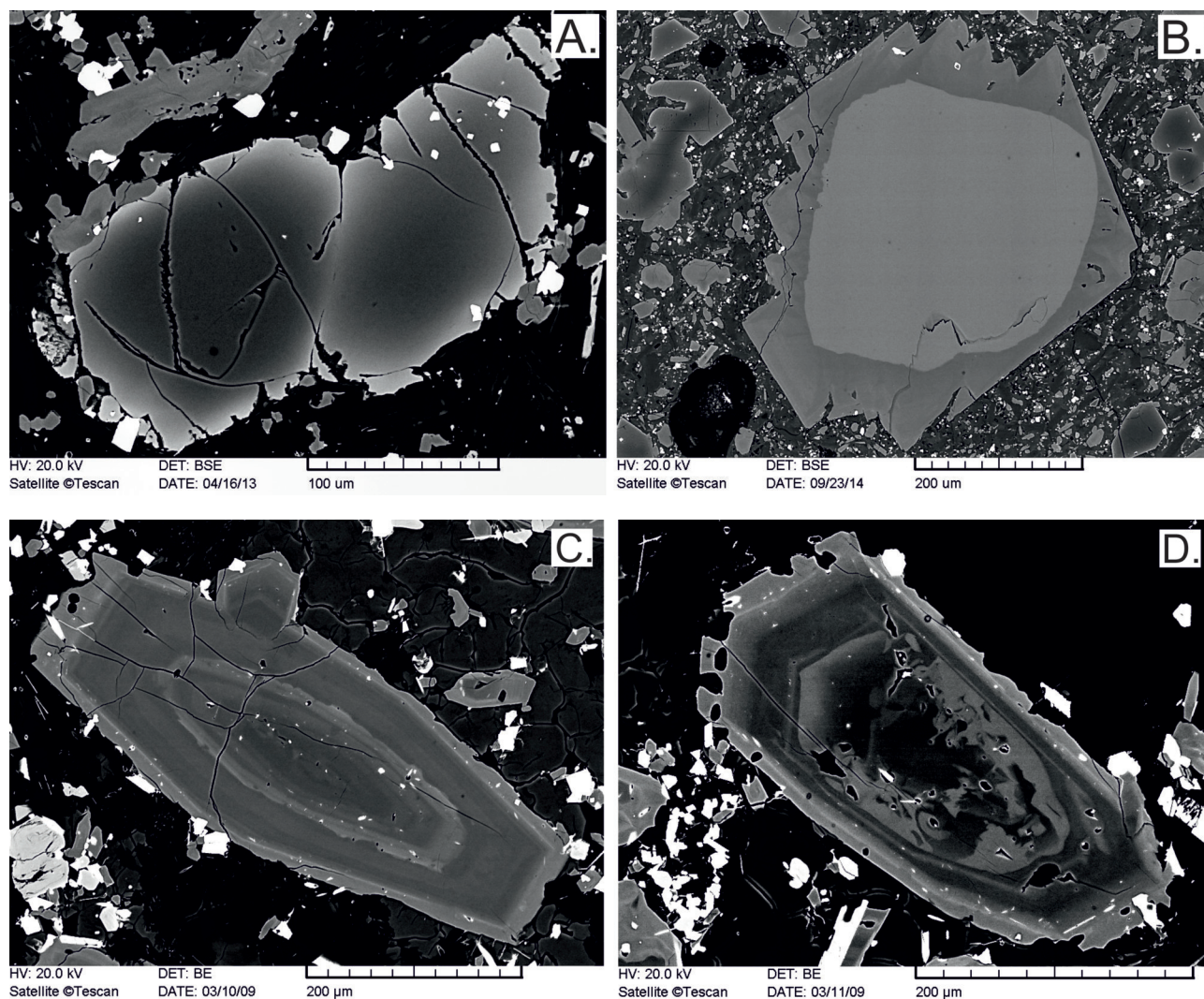
nek a termodinamika is, ami magyarázatot ad az ásványfázisok stabilitására és összetétel-változására is. Egy olvadékból kristályosodó ásványfázis összetétele függ a vele egyensúlyban lévő olvadék kemizmusától, beleértve az oldott illó (víz) tartalmát is, függ a keletkezés során fennálló hőmérséklettől, nyomástól és sok esetben a redox (oxidatív, illetve redukzív) környezettől is. Ha ezek közül bármelyik is változik, az tükröződik a kristály összetételében, azaz akár egy kristály növekedése során a változó körülmények különböző összetételű növekedési zónát eredményeznek. A forradalmi változás e kapcsolatrendszer pontosabb megértése volt, amikor matematikai egyenletekkel lehetett kifejezni ezeket az összefüggéseket (PUTIRKA 2008). Ehhez a közettan, a kémiai összetétel meghatározásának tökéletesítése, a közettani kísérletek eredményeinek és a termodinamika törvényszerűségeinek bevonása volt szükséges.

A kémiai összetétel kristályon belüli pontszerű meghatározását az elektronmikroszkópok, avagy mikroszondák detektorainak fejlesztése tette lehetővé. A hullámhosszdiszperzív detektorok már nagy pontossággal voltak képesek meghatározni számos kémiai elem mennyiségét, amivel akár mikronnyi felbontással lehet követni az összetétel változását. Az optikai mikroszkópok szöveti jellemzése kiegészült a visszaszórt elektronképek nagyobb felbontású kristályméretű elemzéseivel, amihez szorosan kapcsolódtak a pontos kémiai összetételadatok. Az értékelések felbontása is nőtt, a kulcskérdések közé felkerült a kristályok belső szerkezetében megfigyelt tulajdonságok értelmezése, a kémiai zónásság magyarázata (7. ábra). A kristályok innentől kezdve olyan szerepet töltek be, mint a fák évgyűrűi: a növekedési zónák tükrözik a keletkezés körülményeit annak változásait, sőt a jelentős romboló hatásokat is, amikor a kristály nem növekszik, hanem visszaolvad, visszaoldódik (STRECK 2008). A kristáluskálájú elemzések összesítésével a teljes kőzet kialakulására, magmás kőzet esetében a magmás folyamatokra lehetett újszerű magyarázatot adni. A kísérleti közettani eredmények és azok termodinamikai matematikai egyenletekbe való foglalása lehetővé tette a kristályosodás állapotjelzőinek számszerűsítését. Először a vas-titan oxidok, azaz az egyensúlyban kristályosodott Ti-magnetit és ilmenit összetételeiből adták meg a keletkezési hőmérsékletet és a redoxviszonyt leíró oxigénfugacitás értéket (BUDDINGTON & LINDSLEY 1964), majd összefüggést találtak az olivin és az egyensúlyi olvadék kémiai összetétele és a képződési hőmérséklet között (HAKLI & WRIGHT 1967, ROEDER & EMSLIE 1970). Nem sokkal később kvantifikálták a különböző kristályszerkezetben létrejövő egyensúlyi földpátok (STORMER 1975), valamint piroxének összetétele (WOOD & BANNO 1973, WELLS 1977, BREY & KOHLER 1990), továbbá az együtt kristályosodott amfibol és plagioklász összetétele (BLUNDY & HOLLAND 1990, HOLLAND & BLUNDY 1994) és a keletkezési hőmérséklet közötti kapcsolatot. Ma már számos kristály- és olvadékösszetétel geotermométer és geobarométer, oxibarométer létezik, fontos azonban hangsúlyozni, hogy ezek alkalmazása nagy körültekintést igényel, figyelembe kell venni ezek kalibrálásának körülményeit és a használati korlátokat.

Az új kvantitatív petrológia (PUTIRKA 2008, WIESER et al. 2024) további tudományos ajtókat nyitott ki, új világba engedett betekintést és eddig még fel nem tett kérdéseket indukált. Ma már a gépi tanulás algoritmusaival igyekeznek még hatékonyabbá tenni a geotermo-barométerek és geokémométerek eredményeit (PETRELLI et al. 2020, HIGGINS et al. 2022, JORGENSEN et al. 2022, PETRELLI 2024, WEBER & BLUNDY 2024). Az integrált közettani és geokémiai vizsgálati eredmények rámutattak arra, hogy a magmás folyamatok nagy része nyílt rendszerű (STRECK 2008), azaz mind anyag-, mind energia-kölcsönhatás lejátszódik. Másrészt mondván, nem csak hogy nem ritka, hanem általános, hogy különböző magmák keverednek egymással, időben akár nőhet is a hőmérséklet egy magmás rendszerben, amennyiben friss, forró magma érkezik a magmatározóba, a különböző időben és különböző olvadékokból kikristályosodott ásványfázisok keveredhetnek egymással (CZUPPON et al. 2012). Mindezeket a nem egyensúlyi szövetek, a kristályok eltérő szerkezete és zónássági mintázata is tükrözi (pl. egymást egyensúlyi környezetben kizáró ásványfázisok is megjelenhetnek ugyanabban a kőzetben, mint például olivin és kvarc). Az új kérdések új vizsgálati területeket nyitottak, ezekhez új nevezéktan is társult. Ilyen volt például az *antekristály* elnevezés megjelenése. 2001-ben, egy Penrose-konferencián a riolitos magmás rendszerek dinamikája, élet-tartama volt a kiemelt téma. A szakmai vita során felmerült, hogy miképpen lehet elnevezni a méretüket tekintve fenokristálynak, azaz az alapanyagtól elkülönülő, azonban egyéb tulajdonságait tekintve a magmás rendszerben a kitörő magmával nem egyensúlyi viszonyban lévő, a geotermometriai számítások alapján eltérő hőmérsékleten kialakult, kémiai összetételét tekintve a kitörő magmától eltérő összetételű olvadékból létrejövő kristályokat. Wes HILDRETH, a USGS nagy tekintélyű, tapasztalt vulkanológusa, térképező geológusa javasolta azt, hogy ezeknek legyen *antekristály* a nevük, és a terminus azóta meghonosodott (CHARLIER et al. 2005, DAVIDSON et al. 2007). A kitörő magmából létrejövő ásványfázisokat *autokristálynak* nevezhetjük. Az antekristály elnevezés használata a cirkonalapú kutatásokba is bekerült (CHARLIER et al. 2005, MILLER et al. 2007), ahol nemcsak az összetétel és kristály megjelenése, hanem a képződési idő is alátámasztotta azt, hogy ezek a kristályok a vulkáni működéshez képest jóval, akár több tízezer-százezer évvel korábban jöttek létre. Azonban ugyanahhoz a magmás rendszerhez tartoznak, azaz ilyen értelemben kogenetikusak a magmában lévő ásványfázisokkal.

Az antekristály eredet értelmezéséhez integrált petrográfiai és ásványkémiai elemzések szükségesek, amik azt is kideríthetik, hogy akár egyetlen kristályon belül is lehetnek antekristály és autokristály növekedési területek (8. ábra). A vizsgálatok emiatt új eljárásokat, új szemléletet kívántak. Abból kiindulva, hogy a kristály fejlődése a kristálymagtól a kristályperemig tart, a rétegtanban ismert módszerrel, egyfajta *kristálysztratigráfiai* szemlélettel követhető, hogy a kristálymagtól a peremig tartó összetételbeli zónásság és szerkezeti elemek időben hogyan következnek, és milyen magmás folyamatot jelezhetnek (7. és 8. ábra; DAVIDSON et





**7. ábra.** Vulkáni kőzetekben lévő ásványfázisok belső felépítése mikroszkopos visszacsórt elektronképen. A szürke különböző színárnyalatai a kémiai összetétel tükrözik: a sötétebb szürke szín magnéziumban gazdagabb zónát jelöl, azaz primitívebb magmából kristályosodott területet, a világos szürke szín pedig nagyobb rendszámú elemekben, például vasban való gazdagságot jelez, ezek a kristályzónák fejlettebb magmából váltak ki. A kristályok belső zónássága, mint a fák évgyűrűi jelzik a kristály kialakulása során változó környezetet. (A) Normál zónás olivin folyamatos zónahatárral (Fekete-hegy, Balaton-felvidék); (B) Reverz, lépcsős zónás monoklin piroxén a bondorói bazaltban (Balaton-felvidék). (C-D) A bárri leucitben lévő monoklin piroxének komplex belső felépítése: (C) Oszillációs zónás monoklin piroxén. (D) Monoklin piroxén foltos kristálymaggal és normál zónás továbbnövekedéssel

**Figure 7.** Inner structure of various mineral phases in volcanic rocks based on back-scattered electron images. The distinct greyscales reflect the chemical composition: dark grey zones are richer in Magnesium, therefore crystallized from primitive magmas, whereas light grey areas contain elements with larger atomic number, such as iron and this suggests formation from evolved magma. The inner zonation of phenocrysts indicates the changing condition during crystal growth, similarly as tree rings. (A) Normal zonation with continuous boundary in olivine crystal from Fekete Hill (Balaton Highland). (B) Reverse step zoning in clinopyroxene macrocrysts in the basalt from Bondoró (Balaton Highland). (C-D) complex zoning patterns in clinopyroxene macrocrysts of the leucite at Bár (South Hungary): (C) Oscillatory zoning. (D) Patchy crystal core followed by normal zoned overgrowth

al. 2007; STRECK 2008). Amennyiben a kristálymagtól a peremig a kémiai összetételváltozás a hőmérséklet-csökkenéssel összekapcsolható kristályosodásnak felel meg (pl. magnézium csökkenése olivinben, kalcium csökkenése plagioklászban), akkor az *normál zónásság*ként írható le (7A ábra). Ha ezzel ellentétes a kristályon belüli összetételváltozás, akkor *reverz zónásság*ot mondunk (7B ábra). A kémiai összetétel változása lehet viszonylag éles, de lehet folyamatos is. Az előbbi esetnek *lépcsős zónásság* a neve. Van, amikor ritmikusan, visszatérően változnak az eltérő kémiai összetételbeli zónák (ez különösen gyakori a plagioklászok esetében), ennek *oszillációs zónásság* a neve (7C ábra).

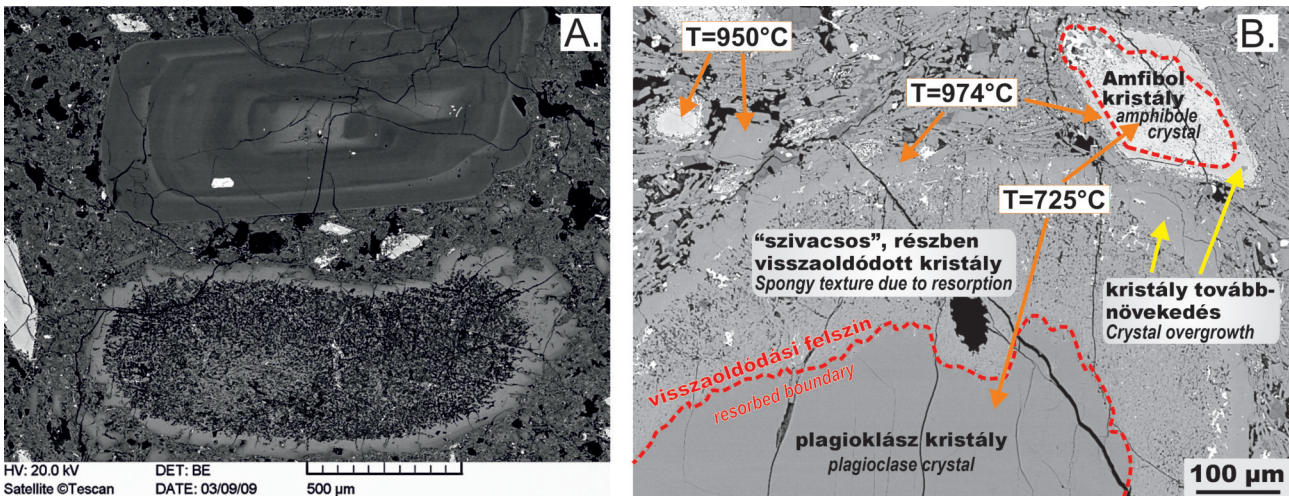
Természetesen fontos a kristály alakja, a sajátalakú, éles kristálylapokkal rendelkező ásványfázisok egyensúlyi kristályosodást jeleznek a környező olvadékkal, amit adott esetben az alapanyag kőzetüvege képviselhet. Ez azonban csak a külsőre, azaz az utolsó időszakra vonatkozik. Számos alkalommal tapasztalható az, hogy a kristály sajátalakú, azonban belsejében lekerekített vagy szabálytalan alakú, eltérő összetételű zónát tartalmaz (7B ábra). Ez azt jelenti, hogy a kristálynövekedés kezdetben más magmában, más állapotjelzők között történt, majd a kristály új környezetbe került, és a legutolsó zóna már a vulkánkitörés előtti állapotot tükrözi. A kristályok e komplex belső felépítése a magmafajlól-



dés nyílt rendszerű, egymást követő, különböző eseményeket tükröző sorrendjét mutatja (7. és 8. ábra). Ilyen esetben, de a kristályok külső peremén is találkozhatunk visszaolvadási felszínnel, ami lehet kerekded, de szabálytalan lefutású is. Ezek azt jelzik, hogy az adott összetételű kristály termodinamikai stabilitása megszűnt, mert valamelyik külső környezeti változóban jelentős változás történt (pl. a kristály jelentősen eltérő összetételű magmába került, vagy nagymértékű hőmérséklet-emelkedés történt). Ezért a kristály elkezd visszaolvadni vagy reakcióba lépni a környező olvadékkal mindaddig, amíg a környezet lehetővé teszi a további kristálynövekedést. Ez azonban már az eltérő viszonyok következtében ugyanazon ásvány kristályán különböző kémiai összetételű növekedési zóna kialakulását okozza. A visszaolvadás során kialakulhat szivacsos vagy szivacsos-sejtes kristályszerkezet (8. ábra), ami mind optikai mikroszkóppal, mind visszaszórt elektronképen jól felismerhető. A petrográfiai vizsgálatok ezzel újfajta aspektust kapnak. Most már nemcsak a kőzetben lévő ásványfázisok felismerése és azok relatív mennyiségének megállapítása fontos, hanem a kristálystratigráfiai elemzésekkel (zónássági és kristályszöveti jellemzők leírása) a magmafejlődési történet feltárása is, azaz egyfajta kőzettani detektív munka.

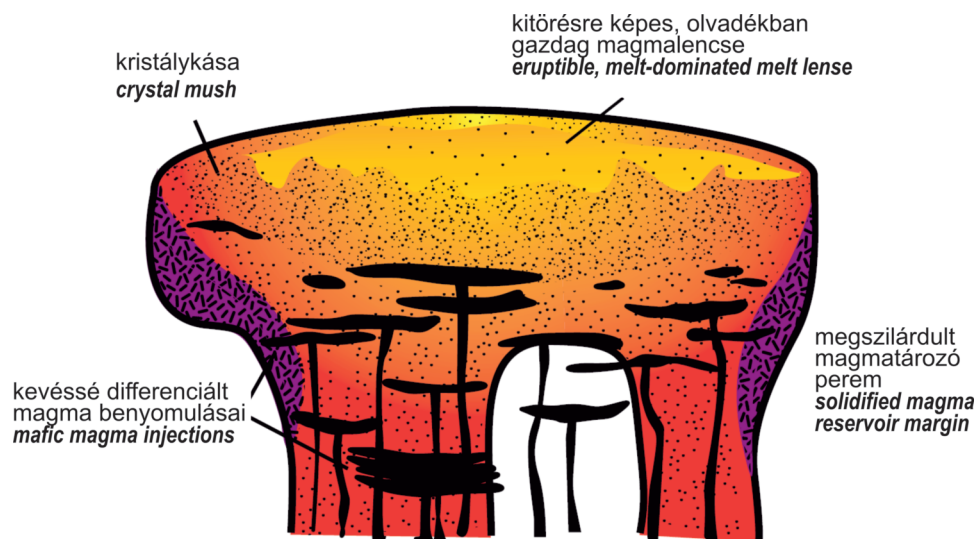
A már említett, 2001-es Penrose-konferencián szintén

HILDRETH fogalmazta meg, hogy a magmatározókat alapvetően kristálygazdag magma alkotja, amit a korábban már használt terminussal (MARSH 1981, 1988, 1996) *crystal mush*-nak, azaz kristálykásának nevezett (9. ábra; HILDRETH 2004; HILDRETH & WILSON 2007). A kristálykása-állapotban a magma több mint 50%-ban szilárd komponenst, azaz kristályokat tartalmaz, és ez azt jelenti, hogy oly mértékben nagy a viszkozitása, hogy fizikailag nem képes a földkéregben mozogni, azaz nem képes vulkánkitörést táplálni. Ahogy azonban változik ez az arány, és az olvadékfrakció kerül túlsúlyba, akkor a viszkozitás nagymértékben csökken, akárcsak a magma sűrűsége, és ezzel kitörésre képes magmatömeg alakul ki. A 21. század eleje tehát jelentős paradigmaváltást hozott: a korábbi, olvadékkal kitöltött magmakamra modelljét felváltotta a kristálykása alkotta magmatározó modellje (BACHMANN & BERGANTZ 2004, HILDRETH 2004, BACHMANN & HUBER 2016, CASHMAN et al. 2017, SPARKS & CASHMAN 2017, SPARKS et al. 2019) és a kapcsolódó kulcskérdés: mi okozza a vulkánkitöréseket, hogyan válik egy magma fizikailag kitörésre alkalmassá (HUBER et al. 2011, PARMIGIANI et al. 2014). A cirkon kormeghatározási vizsgálatok azt is kimutatták, hogy a kristálykása magmatározók hosszú időn keresztül (több tízezer-százezer éven keresztül) képesek fennállni még akkor is, ha a tűzhá-



**8. ábra.** (A) Két nagyon eltérő megjelenésű plagioklász makrokristály egymás mellett a csomádi dácitban: a felső kristály oszcillációs zónásságot mutat, ami a magmatározóban kisebb hőmérséklet-fluktuációt és a magma víztartalmának kismértékű változását jelzi, az alsó kristály magjának erős szivacsos szerkezete azt mutatja, hogy olyan környezetbe került (valószínűleg egy magas hőmérsékletű, mafikusabb olvadékba), ahol részlegesen visszaolvadt, majd a vulkánkitörés előtt növekedett tovább. Ezek a kristályok ugyanannak a magmatározónak eltérő részén, eltérő időben alakultak ki, mindkettő antekristály, és csak a legkülső vékony szegély kristályosodott a kitörő magma olvadékából, azaz autokristály eredetű. (B) A petrográfiaól a kvantitatív petrológiáig és petrogenetikai értelmezésig. A csomádi dácitban lévő plagioklász belső része homogén, Na-ban gazdagabb összetételű, ami az amfibol alumíniumban szegény kristálymagjával együtt 725 °C hőmérsékleten keletkezett egy fejlett magmában. A magmatározóba magas hőmérsékletű, kevésbé differenciált magma érkezett, amiben a plagioklász és amfibol sem volt stabil, ezért mindkét ásványfázis részlegesen visszaolvadt, és szivacsos szerkezetűvé vált. Nem sokkal később, már a vulkánkitörés előtt az új olvadékösszetételnek és hőmérsékletnek megfelelő vékony kristályperem nőtt a plagioklászra és amfibolra is. A geotermometriai számítások szerint a magmatározóban több mint 200 °C-kal emelkedett a hőmérséklet, a kristályperemek 950-975 °C-on alakultak ki. A vulkánkitörés oka a friss magmával való feltöltődés volt, ez reaktiválta (részben felolvasztotta) az alacsony hőmérsékletű kristálykását, és vezetett nagyon rövid idő alatt vulkánkitöréshez.

**Figure 8.** (A) Plagioclase macrocrysts close to one another with very different inner structure in a dacitic volcanic rock of Ciomadul: the upper crystal shows oscillatory zoning, reflecting the subtle fluctuations in temperature and melt water content. The other crystal has a strongly spongy inner structure suggesting resorption in a more mafic magma at higher temperature followed by overgrowth just prior to the eruption. These crystals were formed at different parts and presumably at different times in the same magma reservoir. Both are antecrysts and only the outermost thin margin can be regarded as autocrysts, i.e., crystallized from the erupted magma. (B) From petrography to the quantitative petrology and petrogenetic interpretation. The interior of the plagioclase macrocryst in the Ciomadul dacite is homogeneous and clean. It has Na-rich composition and crystallized coexisting with the crystal core of the Al-poor amphibole macrocryst from an evolved magma at 725 °C temperature. During a recharge event, hot mafic magma intruded into the felsic magma reservoir and this resulted in thorough resorption. Both mineral phases became out of their stability field and therefore partially melted causing spongy texture. Just before the eruption, the condition stabilized and new crystal zones were formed, but with different chemical composition. Using geothermometric calculations, this crystal growth took place at 950-975 °C, i.e., at about 200 °C higher temperature. We can conclude that this magma recharge initiated the reactivation of the low-temperature viscous crystal mush body and rapidly led to volcanic eruption



**9. ábra.** A vulkánok alatti magmatározó új, kristálykása modellje (HILDRETH & WILSON 2007, valamint COOPER 2017 ábrája nyomán). A magmatározó többszöri magma felnyomulása során kialakult kristálykása állapotban van, ami fizikailag kitörésre nem képes magmatömeget jelent. Peremi része a nagy hőmérsékleti gradiens miatt megszilárdulhat, de a belseje hosszú időn keresztül tartalmazhat olvadékfázist. A magmatározóba ismételten érkeznek különböző összetételű és hőmérsékletű magmatömegek. Amennyiben a kristálykása tározóban olvadékfrakcióban gazdag magmatömegek tud elkülönülni, fizikailag kitörésre képes magma jön létre, ami vulkánkitörésre vezethet

**Figure 9.** The new crystal mush concept of the subvolcanic magma reservoir (HILDRETH & WILSON 2007; after the figure by COOPER 2017). The magma reservoir consists of highly crystalline magma called crystal mush, which formed during repetitive magma injection into the shallow crust. This crystal mush physically unable to erupt. The marginal parts are cooled and solidified, but the interior can be kept in melt-bearing stage for prolonged period. During the lifetime of the crystal mush magma reservoir several magma injections occur. If the melt fraction between the crystal phases can be physically separated and accumulated in the upper part of the magma reservoir, the melt-dominated body can segregate and this results in volcanic eruption

nyó hosszú nyugalmi állapotban van (COOPER 2019, LUKÁCS et al. 2021).

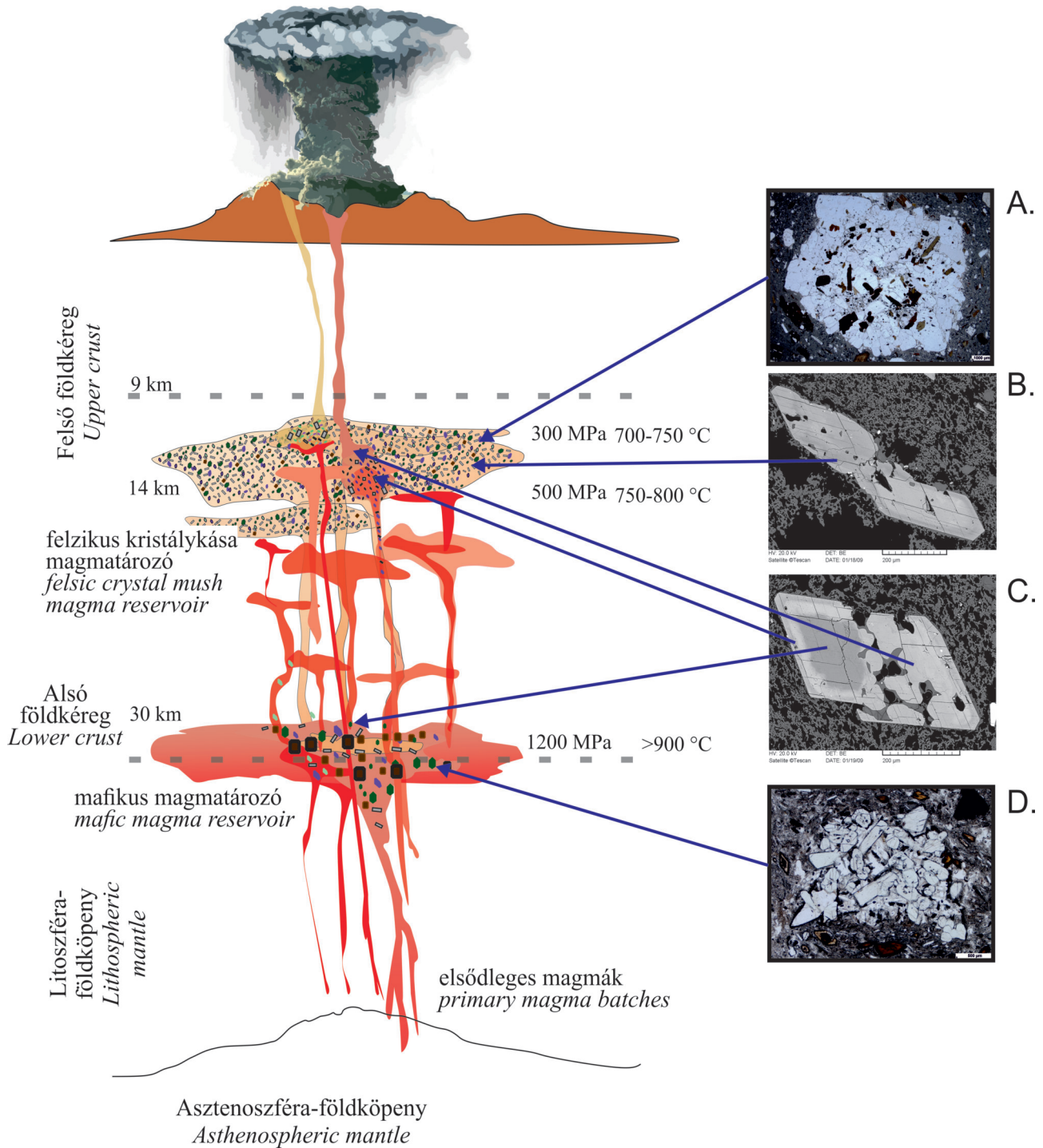
A magmatározó paradigmaváltás létrehozta a kőzettani vulkanológia tudományterületet, azaz a petrológia és a vulkanológia integrációját. Ez szemléletváltást is jelentett: a vulkáni működés megértésének kulcsa most már a magmatározó, avagy a magmás folyamatok jellemzése lett (10. ábra). Sőt, arra a kérdésre is a kőzettani vulkanológia adhatja meg a választ, hogy a kitörés robbanásos vagy effúzív (lávaöntő) lesz-e (CASSIDY et al. 2018, POPA et al. 2021). Ezek pedig már olyan kérdések, amik a vulkáni veszélyértékelésben és veszélykezelésben, a vulkáni kitörés előrejelzésében is alapvető fontosságúak, és a társadalom, az emberélet és az anyagi javak védelmében megkerülhetetlen információkat adnak. A kőzettani vulkanológiai kutatások pedig alapvetően „békeidőben” végezhetőek, amikor az adott tűzhányó esetében éppen nincs aktivitás, és ekkor állítható fel a vulkán egyedi működési kórlapja. Alap kutatás nélkül itt sincs eredmény, a békeidőben végzett kőzettani vulkanológiai kutatások eredményei sosem tudni mikor lesznek nagyon is aktuálisak, mikor óvnak embereket. E kérdéskörben természetesen felmerül az idő kérdése, mint például mennyi idő alatt reaktiválódhat egy kitörésre nem képes kristálykását tartalmazó magmatározó, és alakulhat ki belőle kitörésre már képes magmatömegek, illetve mi okozza ezt a folyamatot.

A magmás folyamatok, különösen a vulkáni működés előtti állapotváltozások időtartamának számszerűsítésére is ma már megvan a lehetőség. Ennek eszköze a diffúziós kronometria (COSTA et al. 2020, COSTA 2021, CHAKRABORTY &

DOHMEN 2022), aminek a lényege az, hogy kémiai zónasságot mutató kristály esetében találni kell olyan kémiai elemet, aminek diffúziós sebessége magmás hőmérsékleten viszonylag nagy (azaz a kémiai különbség kiváltotta elemvándorlás számottevő). Ebben az esetben, ha történik egy olyan magmás esemény, ami jelentős összetételbeli változást okoz a kristály növekedése során, ez egy éles, visszazórt elektromos képen is jól megfigyelhető kémiai összetételbeli (szürke szín) váltásban lesz látható. Az éles határ azonban magmás hőmérsékleten idővel elmosódik, az átmenet folyamatossá válik, aminek az oka egyes kémiai elemek diffúziója. Ahogy a hőmérséklet hirtelen lecsökken, a diffúzió is leáll. A mikroszondamérésekkel ma már nagy felbontással, egy vonal

(profil) mentén is kaphatunk pontos kémiaiösszetétel-adatokat. Ennek lefutása pedig modellezhető a kísérleti munkák során meghatározott diffúziós együtthatók alkalmazásával. A valós kémiai koncentrációváltozás (pl. a magnéziumkoncentráció változása olivinben és rombos piroxénben, illetve plagioklászban, a titán változása kvarcban), és a diffúziós együtthatóval különböző eltelt időkre szerkesztett görbék összeillesztése alapján kiszámolható, hogy mennyi időt töltött a kristály a változást okozó folyamat (pl. egy alacsony hőmérsékletű kristálykása magmatározóba magas hőmérsékletű magma benyomulása) és a vulkánkitörés között a magmában, tehát mennyi idő telt el a kitörésre képes magmatömegek létrehozása és a vulkánkitörés között. A numerikus modellekkel (BURGISSER & BERGANTZ 2011) is összhangban lévő eredmények meglepő, de nagyon is fontos új eredményt hoztak: nyugodt állapotból akár néhány hónap alatt kialakulhat pusztító vulkánkitörés (DRUITT et al. 2012). A diffúziós kronometria az integrált petrográfiai és geokémiai vizsgálatokkal segíti a magmatározóban zajló bonyolult magmakeveredési folyamatok feltárását és annak időbeli lefolyását, ahogy arra MAREN KAHL adott úttörő példát az Etna esetében (KAHL et al. 2011, 2015, 2017). A kvantitatív kőzettannak egyre nagyobb a szerepe a vulkánkitörés előrejelzésében és monitorozásában (GANSECKI et al. 2019, RE et al. 2021, HALLDÖRSSON et al. 2022, KAHL et al. 2022, BAXTER et al. 2023, CARACCILO et al. 2023), ami kiemeli e kutatások fontos társadalmi szerepét és új perspektívát ad a kőzettani vulkanológiai tudományos munkának.





**10. ábra.** A székellyföldi Csomád alatti magmatározó rekonstrukciója az integrált petrográfia és geokémia, valamint kvantitatív kőzettan eszközeinek segítségével (CSERÉP et al. 2023 nyomán). (A)-(D) a dácitban lévő kristályfázisok a földkérget átszelő magmatározó rendszer különböző részeiből származnak. (A) Többfázisú kristálycsomó a felzikus kristálykása darabja; (B) Reverz zónás amfibolkristály, belseje a kristálykása része volt, pereme a kitérés előtt keletkezett hibrid olvadékból. (C) komplex szerkezetű amfibol, sötétebb magja a magmatározó mélyebb részén alakult ki, és a mafikus magmával szállítottott a sekély magmatározóba. A világosabb színű amfibol a kristálykása része volt, a magmafeltöltést jellemző hőhatás következtében rezorbeálódott. (D) a mafikus kristálycsomó a magmatározó mélyebb részén lévő mafikus magmából keletkezett, és a feltöltő magma szállította a sekély magmatározóba közvetlenül a kitérés előtt

**Figure 10.** Reconstruction of the magma reservoir system beneath Ciomadul (SE Carpathians) using integrated petrography observations and geochemical data, and quantitative petrology tools (after CSERÉP et al. 2023). (A)-(D) Crystal phases in the dacite derived from different parts of the magma reservoir. (A) Multi phase crystal clot, a fragment of the shallow felsic crystal mush. (B) Reverse zoned amphibole, the interior was part of the crystal mush, whereas the margin was formed just prior to the eruption from a hybrid magma. (C) Complex zoned amphibole, the darker inner core crystallized from a mafic magma at greater depth and was transported to the shallow magma reservoir by the recharge magma. The light grey amphibole was part of the crystal mush and resorbed when hot recharge magma injected into the shallow magma reservoir. (D) Mafic crystal clot was formed in a mafic magma at the lower crust and was transported into the shallow magma reservoir by the recharge magma just before the eruption



## Zárógondolatok

A polarizációs mikroszkóp használata ma is meghatározó, még egy olyan világban is, amikor a műszeres elemzések ontják a különféle adatokat. Ezek a kémiaiösszetétel-adatok azonban nem érthetőek, nem értelmezhetőek anélkül, hogy magunk is lássuk a kőzeteket alkotó fő és járulékos ásványok megjelenését, a teljes kőzet szövétét. A kristályszerkezet megfigyelések és a pontszerű kémiai mérések eredményei együtt egy új megismerés felé viszik a tudományt, ami már számszerűsíti, kvantifikálja a leírásokat, ahogy SZABÓ József is felismerte és megjegyezte, mindezt azért, hogy mélyebben megismerjük azt is, hogy egy kőzet alkotói miért vannak ott, hogyan és milyen körülmények között keletkeztek. A kvantitatív petrológia ezzel már olyan válaszokat tud adni, ami felhasználható természeti veszélyhelyzetek előrejelzésében és kezelésében, azaz társadalmilag fontos tudományos megállapításokat képes tenni. SZABÓ Csaba az ELTE TTK Kőzetan-Geokémiai Tanszék oktatójaként nemcsak a mikroszkópos kőzettani és petrográfiai, majd geokémiai alaptudást adta át a hazai és határon túli diákoknak, hanem a motivációt is a kutatás, a felfedezés felé. Szerepe SZABÓ Józsefet és MAURITZ Bélát követően megkérdőjelezhetetlen a magyar magmás kőzettani iskola eredményességében. Magam sem tudom jobban zárni összegzésemet, mint hogy ez a cikk nem született volna meg, ha az 1980-as évek elején nem kerülök Csaba kőzetmikroszkópia gyakor-

lat csoportjába, ha nem inspirál a vele folytatott számtalan szakmai és személyes jellegű megbeszélés, valamint álmodozás a tudomány és az élet jobbításának reményében.

## Köszönetnyilvánítás

A magmás kőzetan, a petrográfia és a mikroszkópos kőzetan alapjait SZABÓ Csabától tanultam, a vele való szakmai beszélgetések és viták jelentősen hozzájárultak szakmai gondolkodásom alakulásához. A kőzettani vulkanológia módszereinek alkalmazásában és fejlesztésében sokat jelentettek a kollégáimmal és diákjaimmal végzett közös kutatások. Közülük is különösen nagy köszönettel tartozom az alábbiaknak: Hilary DOWNES, Olivier BACHMANN, Luca CARICCHI, Theo NTAFLOR, Nino SEGHEDEI, Wes HILDRETH, Maurizio PETRELLI, KISS Balázs, JANKOVICS Éva, LUKÁCS Réka, KLÉBESZ Rita, SÁGI Tamás, CSERÉP Barbara és SZEMERÉDI Máté. Köszönöm LUKÁCS Rékának, hogy a kézirat első változatát alaposan átolvasta, és javaslatokkal segítette a végleges kézirat kialakítását. Köszönöm M. TÓTH Tivadar és ARADI László konstruktív bírálói javaslatait. Az integrált kőzettani és geokémiai, valamint kvantitatív petrológiai kutatási módszerek számos projekt alapját képezték, amelyek nélkülözhetetlen anyagi alapot adtak a kutatómunkához, ehhez tartozik a jelenlegi NKFIH OTKA K 135179 sz. projekt.

## Irodalom – References

- ARADI, L. E., HIDAS, K., KOVÁCS, I. J., TOMMASI, A., KLÉBESZ, R., GARRIDO, C. J. & SZABÓ, C. 2017: Fluid-Enhanced Annealing in the Subcontinental Lithospheric Mantle Beneath the Westernmost Margin of the Carpathian–Pannonian Extensional Basin System. – *Tectonics* **36/12**, 2987–3011. <https://doi.org/10.1002/2017TC004702>
- ARADI, L. E., BALI, E., PATKÓ, L., HIDAS, K., KOVÁCS, I. J., ZANETTI, A., GARRIDO, C. J. & SZABÓ, C. 2020: Geochemical evolution of the lithospheric mantle beneath the Styrian Basin (Western Pannonian Basin). – *Lithos* **378–379**, 105831. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105831>
- BACHMANN, O. & BERGANTZ, G. W. 2004: On the Origin of Crystal-poor Rhyolites: Extracted from Batholithic Crystal Mushes. – *Journal of Petrology* **45/8**, 1565–1582. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh019>
- BACHMANN, O. & HUBER, C. 2016: Silicic magma reservoirs in the Earth's crust. – *American Mineralogist* **101**, 2377–2404. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5675>
- BALI, E., SZABÓ, C., VASELLI, O. & TÖRÖK, K. 2002: Significance of silicate melt pockets in upper mantle xenoliths from the Bakony–Balaton Highland Volcanic Field, Western Hungary. – *Lithos* **61/1**, 79–102. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(01\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00075-5)
- BALI, E., FALUS, G., SZABÓ, C., PEATE, D. W., HIDAS, K., TÖRÖK, K. & NTAFLOR, T. 2007: Remnants of boninitic melts in the upper mantle beneath the central Pannonian Basin? – *Mineralogy and Petrology* **90/1**, 51–72. <https://doi.org/10.1007/s00710-006-0167-z>
- BALI, E., ZAJACZ, Z., KOVÁCS, I., SZABÓ, C., HALTER, W., VASELLI, O., TÖRÖK, K. & BODNAR, R. J. 2008: A Quartz-bearing Orthopyroxene-rich Websterite Xenolith from the Pannonian Basin, Western Hungary: Evidence for Release of Quartz-saturated Melts from a Subducted Slab. – *Journal of Petrology* **49/3**, 421–439. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm086>
- BAXTER, R. J. M., MACLENNAN, J., NEAVE, D. A. & THORDARSON, T. 2023: Depth of Magma Storage Under Iceland Controlled by Magma Fluxes. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **24/7**, e2022GC010811. <https://doi.org/10.1029/2022GC010811>
- BLUNDY, J. D. & HOLLAND, T. J. B. 1990: Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **104/2**, 208–224. <https://doi.org/10.1007/BF00306444>
- BREY, G. P. & KOHLER, T. 1990: Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. – *Journal of Petrology* **31**, 1353–1378. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>
- BUDDINGTON, A. F. & LINDSLEY, D. H. 1964: Iron-Titanium Oxide Minerals and Synthetic Equivalents. – *Journal of Petrology* **5**, 310–357. <https://doi.org/10.1093/petrology/5.2.310>

- BURGISSER, A. & BERGANTZ, G. W. 2011: A rapid mechanism to remobilize and homogenize highly crystalline magma bodies. – *Nature* **471**, 212–215. <https://doi.org/10.1038/nature09799>
- CARACCILO, A., BALI, E., HALLDÓRSSON, S. A., GUDFINNSSON, G. H., KAHL, M., ÞÓRÐARDÓTTIR, I., PÁLMAÐÓTTIR, G. L. & SILVESTRI, V. 2023: Magma plumbing architectures and timescales of magmatic processes during historical magmatism on the Reykjanes Peninsula, Iceland. *Earth and Planetary – Science Letters* **621**, 118378. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118378>
- CASHMAN, K. V., SPARKS, R. S. J. & BLUNDY, J. D. 2017: Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes. – *Science* **355**, eaag3055. <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- CASSIDY, M., MANGA, M., CASHMAN, K. & BACHMANN, O. 2018: Controls on explosive–effusive volcanic eruption styles. – *Nature Communications* **9**, 2839. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05293-3>
- CHAKRABORTY, S. & DOHMEN, R. 2022: Diffusion chronometry of volcanic rocks: looking backward and forward. – *Bulletin of Volcanology* **84/6**, 57. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01565-5>
- CHARLIER, B. L. A., WILSON, C. J. N., LOWENSTERN, J. B., BLAKE, S., VAN CALSTEREN, P. W. & DAVIDSON, J. P. 2004: Magma Generation at a Large, Hyperactive Silicic Volcano (Taupo, New Zealand) Revealed by U–Th and U–Pb Systematics in Zircons. – *Journal of Petrology* **46/1**, 3–32. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egh060>
- COOPER, K. M. 2017: What Does a Magma Reservoir Look Like? The “Crystal’s-Eye” View. – *Elements* **13/1**, 23–28. <https://doi.org/10.2113/gselements.13.1.23>
- COOPER, K. M. 2019: Time scales and temperatures of crystal storage in magma reservoirs: implications for magma reservoir dynamics. – *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **377(2139)**, 20180009. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0009>
- COSTA, F. 2021: Clocks in Magmatic Rocks. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **49**, 231–252. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-060708>
- COSTA, F., SHEA, T. & UBIDE, T. 2020: Diffusion chronometry and the timescales of magmatic processes. – *Nature Reviews Earth & Environment* **1/4**, 201–214. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0038-x>
- CSATH B. 2023: A fémnikroszkóp rövid története és magyarországi használatának elterjedése a geológia területén. – *Földtani Közlöny* **153**, 71–80.
- CSEMERÉP, B., SZEMERÉDI, M., HARANGI, S., ERDMANN, S., BACHMANN, O., DUNKL, I., SEGHEDI, I., MÉSZÁROS, K., KOVÁCS, Z., VIRÁG, A., NTAFLÓS, T., SCHILLER, D., MOLNÁR, K. & LUKÁCS, R. 2023: Constraints on the pre-eruptive magma storage conditions and magma evolution of the 56–30 ka explosive volcanism of Ciomadul (East Carpathians, Romania). – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **178/12**, 96. <https://doi.org/10.1007/s00410-023-02075-z>
- CZUPPON, G., LUKÁCS, R., HARANGI, S., MASON, P. R. D. & NTAFLÓS, T. 2012: Mixing of crystal mushes and melts in the genesis of the Bogács Ignimbrite suite, northern Hungary: An integrated geochemical investigation of mineral phases and glasses. – *Lithos* **148**, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.009>
- DAVIDSON, J. P., MORGAN, D. J., CHARLIER, B. L. A., HARLOU, R. & HORA, J. M. 2007: Microsampling and Isotopic Analysis of Igneous Rocks: Implications for the Study of Magmatic Systems. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **35**, 273–311. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140211>
- DOWNES, H., EMBEY-ISZTIN, A. & THIRLWALL, M. F. 1992: Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from the western Pannonian Basin (Hungary): evidence for an association between enrichment and texture in the upper mantle. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **109/3**, 340–354. <https://doi.org/10.1007/bf00283323>
- DRUITT, T. H., COSTA, F., DELOULE, E., DUNGAN, M. & SCAILLET, B. 2012: Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano. – *Nature* **482/7383**, 77–80. <https://doi.org/10.1038/nature10706>
- EMBEY-ISZTIN, A. 1976: Amphibolite/lherzolite composite xenolith from Szigliget, north of the lake Balaton, Hungary. – *Earth and Planetary Science Letters* **31**, 297–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90223-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90223-5)
- EMBEY-ISZTIN, A., SCHARBERT, H. G., DIETRICH, H. & POULTIDIS, H. 1989: Petrology and geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from the Transdanubian Volcanic Region, West Hungary. – *Journal of Petrology* **30**, 79–105. <https://doi.org/10.1093/ptrology/30.1.79>
- FALUS, G., SZABÓ, C. & VASELLI, O. 2000: Mantle upwelling within the Pannonian Basin: evidence from xenolith lithology and mineral chemistry. – *Terra Nova* **12/6**, 295–302. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2000.00313.x>
- FALUS, G., TOMMASI, A., INGRIN, J. & SZABÓ, C. 2008: Deformation and seismic anisotropy of the lithospheric mantle in the southeastern Carpathians inferred from the study of mantle xenoliths. – *Earth and Planetary Science Letters* **272/1**, 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.035>
- GANSECKI, C., LEE, R. L., SHEA, T., LUNDBLAD, S. P., HON, K. & PARCHETA, C. 2019: The tangled tale of Kīlauea’s 2018 eruption as told by geochemical monitoring. – *Science* **366/6470**, eaaz0147. <https://doi.org/10.1126/science.aaz0147>
- GUZMICS, T., KODOLÁNYI, J., KOVÁCS, I., SZABÓ, C., BALI, E. & NTAFLÓS, T. 2008: Primary carbonatite melt inclusions in apatite and in K-feldspar of clinopyroxene-rich mantle xenoliths hosted in lamprophyre dikes (Hungary). – *Mineralogy and Petrology* **94/3**, 225–242. <https://doi.org/10.1007/s00710-008-0014-5>
- HAKLI, T. A. & WRIGHT, T. L. 1967: The fractionation of nickel between olivine and augite as a geothermometer. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **31**, 877–884.
- HALLDÓRSSON, S. A., MARSHALL, E. W., CARACCILO, A., MATTHEWS, S., BALI, E., RASMUSSEN, M. B., RANTA, E., ROBIN, J. G., GUDFINNSSON, G. H., SIGMARSSON, O., MACLENNAN, J., JACKSON, M. G., WHITEHOUSE, M. J., JEON, H., VAN DER MEER, Q. H. A., MIBEI, G. K., KALLIOKOSKI, M. H., REPCZYNSKA, M. M., RÚNARSDÓTTIR, R. H., SIGURÐSSON, G., PFEFFER, M. A., SCOTT, S. W., KIARTANS-DÓTTIR, R., KLEINE, B. I., OPPENHEIMER, C., AIUPPA, A., ILYINSKAYA, E., BITETTO, M., GIUDICE, G. & STEFÁNSSON, A. 2022: Rapid shifting of a deep magmatic source at Fagradalsfjall volcano, Iceland. – *Nature* **609/7927**, 529–534. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04981-x>

- HARANGI, S., SZABÓ, C., JÓZSA, S., SZOLDÁN, Z., ÁRVA-ŐS, 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* **38/4**, 336–360. <https://doi.org/10.1080/00206819709465339>
- HIDAS, K., FALUS, G., SZABÓ, C., SZABÓ, P. J., KOVÁCS, I. & FÖLDES, T. 2007: Geodynamic implications of flattened tabular equigranular textured peridotites from the Bakony–Balaton Highland Volcanic Field (Western Hungary). – *Journal of Geodynamics* **43/4**, 484–503. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.10.007>
- HIDAS, K., GUZMICS, T., SZABÓ, C., KOVÁCS, I., BODNAR, R. J., ZAJACZ, Z., NÉDLI, Z., VACCARI, L. & PERUCCHI, A. 2010: Coexisting silicate melt inclusions and H<sub>2</sub>O-bearing, CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions in mantle peridotite xenoliths from the Carpathian–Pannonian region (central Hungary). – *Chemical Geology* **274/1**, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.03.004>
- HIGGINS, O., SHELDRAKE, T. & CARICCHI, L. 2022: Machine learning thermobarometry and chemometry using amphibole and clinopyroxene: a window into the roots of an arc volcano (Mount Liamuiga, Saint Kitts). – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **177**, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01874-6>
- HILDRETH, W. 2004: Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: several contiguous but discrete systems. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **136/3**, 169–198. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.05.019>
- HILDRETH, W. & WILSON, C. J. N. 2007: Compositional Zoning of the Bishop Tuff. – *Journal of Petrology* **48/5**, 951–999. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm007>
- HOLLAND, T. & BLUNDY, J. 1994: Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **116/4**, 433–447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>
- HOLMES, A. 1931: XVIII. Radioactivity and Earth Movements. – *Transactions of the Geological Society of Glasgow* **18/3**, 559–606. <https://doi.org/10.1144/transglas.18.3.559>
- HUBER, C., BACHMANN, O. & DUFEK, J. 2011: Thermo-mechanical reactivation of locked crystal mushes: Melting-induced internal fracturing and assimilation processes in magmas. – *Earth and Planetary Science Letters* **304/3**, 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.022>
- JORGENSEN, C., HIGGINS, O., PETRELLI, M., BÉGUÉ, F. & CARICCHI, L. 2022: A Machine Learning-Based Approach to Clinopyroxene Thermobarometry: Model Optimization and Distribution for Use in Earth Sciences. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **127/4**, e2021JB022904. <https://doi.org/10.1029/2021JB022904>
- KAHL, M., CHAKRABORTY, S., COSTA, F. & POMPILIO, M. 2011: Dynamic plumbing system beneath volcanoes revealed by kinetic modeling, and the connection to monitoring data: An example from Mt. Etna. – *Earth and Planetary Science Letters* **308**, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.008>
- KAHL, M., CHAKRABORTY, S., POMPILIO, M. & COSTA, F. 2015: Constraints on the nature and evolution of the magma plumbing system of Mt. Etna Volcano (1991–2008) from a combined thermodynamic and kinetic modelling of the compositional record of minerals. – *Journal of Petrology* **56**, 2025–2068. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv063>
- KAHL, M., VICCARO, M., UBIDE, T., MORGAN, D. J. & DINGWELL, D. B. 2017: A branched magma feeder system during the 1669 eruption of Mt Etna: evidence from a time-integrated study of zoned olivine phenocryst populations. – *Journal of Petrology* **58**, 443–472. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx022>
- KAHL, M., MUTCH, E. J. F., MACLENNAN, J., MORGAN, D. J., COUPERTHWAITTE, F., BALI, E., THORDARSON, T., GUÐFINNSSON, G. H., WALSHAW, R., BUISMAN, I., BUHRE, S., VAN DER MEER, Q. H. A., CARACCIOLLO, A., MARSHALL, E. W., RASMUSSEN, M. B., GALLAGHER, C. R., MORELAND, W. M., HÖSKULDSSON, Á. & ASKEW, R. A. 2022: Deep magma mobilization years before the 2021 CE Fagradalsfjall eruption, Iceland. – *Geology* **51/2**, 184–188. <https://doi.org/10.1130/g50340.1>
- KISS, B., HARANGI, S., NTAFLÓS, T., MASON, P. R. D. & PÁL-MOLNÁR, E. 2014: Amphibole perspective to unravel pre-eruptive processes and conditions in volcanic plumbing systems beneath intermediate arc volcanoes: a case study from Ciomadul volcano (SE Carpathians). – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **167**, 986. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-0986-6>
- KOVÁCS, I., FALUS, G., STUART, G., HIDAS, K., SZABÓ, C., FLOWER, M. F. J., HEGEDŰS, E., POSGAY, K. & ZILÁHI-SEBESS, L. 2012: Seismic anisotropy and deformation patterns in upper mantle xenoliths from the central Carpathian–Pannonian region: Asthenospheric flow as a driving force for Cenozoic extension and extrusion? – *Tectonophysics* **514–517**, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.022>
- KUTOLIN, V. A. 1970: Ultrabasic nodules in basalts and the upper-mantle composition. – *Earth and Planetary Science Letters* **7**, 330–2. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(69\)90045-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(69)90045-4)
- LE BAS, M. J. L. & STRECKEISEN, A. L. 1991: The IUGS systematics of igneous rocks. – *Journal of the Geological Society* **148/5**, 825–833. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.148.5.0825>
- LUKÁCS, R., CARICCHI, L., SCHMITT, A.K., BACHMANN, O., KARAKAS, O., GUILLONG, M., MOLNÁR, K., SEGHEDI, I. & HARANGI, S. 2021: Zircon geochronology suggests a long-living and active magmatic system beneath the Ciomadul volcanic dome field (eastern-central Europe). – *Earth and Planetary Science Letters* **565**, 116965. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116965>
- MARSH, B. D. 1981: On the crystallinity, probability of occurrence, and rheology of lava and magma. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **78/1**, 85–98. <https://doi.org/10.1007/BF00371146>
- MARSH, B. D. 1988: Crystal capture, sorting, and retention in convecting magma. – *GSA Bulletin* **100/11**, 1720–1737. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1720:ccsari>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1720:ccsari>2.3.co;2)
- MARSH, B. D. 1996: Solidification fronts and magmatic evolution. – *Mineralogical Magazine* **60/398**, 5–40. <https://doi.org/10.1180/minmag.1996.060.398.03>
- MAURITZ B. 1909: A Mátra-hegység eruptív kőzetei. – *Mathematikai és Természettudományi Közlemények* **30**, 9–11.
- MAURITZ B. 1913: A Mecsek-hegység eruptívus kőzetei. – *A M. Kir. Földtani Intézet Évkönyve* **21**, 171–213



- MAURITZ B. 1948: A dunántúli bazaltok kőzetkémiái viszonyai. – *Földtani Közlöny* **78**, 134–169.
- MAURITZ B. & HARWOOD, H. F. 1937: A celldömölki Sáhegy bazaltos kőzete. – *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* **55**, 938–958.
- MERCIER, J.-C. C. & NICOLAS, A. 1975: Textures and Fabrics of Upper-Mantle Peridotites as Illustrated by Xenoliths from Basalts. – *Journal of Petrology* **16/1**, 454–487. <https://doi.org/10.1093/ptrology/16.1.454>
- MILLER, J. S., MATZEL, J. E. P., MILLER, C. F., BURGESS, S. D. & MILLER, R. B. 2007: Zircon growth and recycling during the assembly of large, composite arc plutons. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **167/1**, 282–299. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.019>
- NÉDLI, Z. M., TÓTH, T., DOWNES, H., CSÁSZÁR, G., BEARD, A. & SZABÓ, C. 2010: Petrology and geodynamical interpretation of mantle xenoliths from Late Cretaceous lamprophyres, Villány Mts (S Hungary). – *Tectonophysics* **489/1**, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.03.013>
- NICOLAS, A., BOUCHEZ, J. L. & BOUDIER, F. 1972: Interpretation cinématique des déformations plastiques dans le massif de Lherzolite de l'Annoy (Alpes piémontaises) — comparaison avec d'autres Massifs. – *Tectonophysics* **14/2**, 143–171. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(72\)90107-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(72)90107-2)
- PARMIGIANI, A., HUBER, C. & BACHMANN, O. 2014: Mush microphysics and the reactivation of crystal-rich magma reservoirs. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **119**, 6308–6322. <https://doi.org/10.1002/2014JB011124>
- PATKÓ, L., LIPTAI, N., KOVÁCS, I. J., ARADI, L. E., XIA, Q.-K., INGRIN, J., MIHÁLY, J., O'REILLY, S. Y., GRIFFIN, W. L., WESZTERGOM, V. & SZABÓ, C. 2019: Extremely low structural hydroxyl contents in upper mantle xenoliths from the Nógrád–Gömör Volcanic Field (northern Pannonian Basin): Geodynamic implications and the role of post-eruptive re-equilibration. – *Chemical Geology* **507**, 23–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.017>
- PATKÓ, L., LIPTAI, N., ARADI, L. E., KLÉBESZ, R., SENDULA, E., BODNAR, R. J., KOVÁCS, I. J., HIDAS, K., CESARE, B., NOVÁK, A., TRÁSY, B. & SZABÓ, C. 2020: Metasomatism-induced wehrlite formation in the upper mantle beneath the Nógrád–Gömör Volcanic Field (Northern Pannonian Basin): Evidence from xenoliths. – *Geoscience Frontiers* **11/3**, 943–964. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.09.012>
- PATKÓ, L., NOVÁK, A., KLÉBESZ, R., LIPTAI, N., LANGE, T. P., MOLNÁR, G., CSONTOS, L., WESZTERGOM, V., KOVÁCS, I. J. & SZABÓ, C. 2021: Effect of metasomatism on the electrical resistivity of the lithospheric mantle – An integrated research using magnetotelluric sounding and xenoliths beneath the Nógrád–Gömör Volcanic Field. – *Global and Planetary Change* **197**, 103389. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103389>
- PATKÓ, L., KOVÁCS, Z., LIPTAI, N., ARADI, L. E., BERKESI, M., CIAZELA, J., HIDAS, K., GARRIDO, C. J., KOVÁCS, I. J. & SZABÓ, C. 2022: Deciphering metasomatic events beneath Mindszentkál (Bakony–Balaton Highland Volcanic Field, western Pannonian Basin) revealed by single-lithology and composite upper mantle xenoliths. – *Frontiers in Earth Science* **10**. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.998391>
- PATKÓ, L., LIPTAI, N., ARADI, L. E., TÖRÖK, K., KOVÁCS, Z., KÖVÁGÓ, Á., GERGELY, S., KOVÁCS, I. J., SZABÓ, C. & BERKESI, M. 2024: Fossil metasomatized and newly-accreted fertile lithospheric mantle volumes beneath the Bakony–Balaton Highland Volcanic Field (central Carpathian–Pannonian region). – *Lithos* **482–483**, 107701. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107701>
- PETRELLI, M. 2024: Machine Learning in Petrology: State-of-the-Art and Future Perspectives. – *Journal of Petrology* **65/5**. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egae036>
- PETRELLI, M., CARICCHI, L. & PERUGINI, D. 2020: Machine Learning Thermo-Barometry: Application to Clinopyroxene-Bearing Magmas. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **125/9**, e2020JB020130. <https://doi.org/10.1029/2020JB020130>
- POPA, R.-G., BACHMANN, O. & HUBER, C. 2021: Explosive or effusive style of volcanic eruption determined by magma storage conditions. – *Nature Geoscience* **14**, 781–786. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00827-9>
- PUTIRKA, K. D. 2008: Thermometers and barometers for volcanic systems. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **69**, 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- RE, G., CORSARO, R. A., D'ORIANO, C. & POMPILIO, M. 2021: Petrological monitoring of active volcanoes: A review of existing procedures to achieve best practices and operative protocols during eruptions. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **419**, 107365. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107365>
- ROEDER, P. L. & EMSLIE, R. F. 1970: Olivine-liquid equilibrium. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **29**, 275–289. <https://doi.org/10.1007/BF00371276>
- ROSENBUSCH, K. H. F. 1875: *Die mikroskopische Physiographie der Mineralien und Gesteine*. – Stuttgart E. Schweizerb. Verlag.
- SORBY, H. C. 1858: On the Microscopical, Structure of Crystals, indicating the Origin of Minerals and Rocks. – *Quarterly Journal of the Geological Society of London* **14/1–2**, 453–500. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1858.014.01-02.44>
- SORBY, H. C. 1864: On the microscopical structure of meteorites. – *Proceedings of the Royal Society of London* **13**.
- SPARKS, R. S. J., ANNEN, C., BLUNDY, J. D., CASHMAN, K. V., RUST, A. C. & JACKSON, M. D. 2019: Formation and dynamics of magma reservoirs. – *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **377**, 20180019. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0019>
- SPARKS, R. S. J. & CASHMAN, K. V. 2017: Dynamic magma systems: implications for forecasting volcanic activity. – *Elements* **13**, 35–40. <https://doi.org/10.2113/gselements.13.1.35>
- STORMER, J. C. 1975: A practical two-feldspar geothermometer. – *American Mineralogist* **60**, 667–674.
- STRECK, M. J. 2008: Mineral Textures and Zoning as Evidence for Open System Processes. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **69/1**, 595–622. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.15>
- SZABÓ, C. 1985: Xenoliths from Cretaceous lamprophyres of Alcsútdoboz-2 borehole, Transdanubian Central Mountains, Hungary. – *Acta Mineralogica-Petrographica* **27**, 39–50.
- SZABÓ, C. & TAYLOR, L. A. 1994: Mantle Petrology and Geochemistry Beneath the Nógrád–Gömör Volcanic Field, Carpathian–Pannonian Region. – *International Geology Review* **36/4**, 328–358. <https://doi.org/10.1080/00206819409465465>

- SZABÓ, C., HARANGI, S. & CSONTOS, L. 1992: Review of Neogene and Quaternary volcanism of the Carpathian–Pannonian region. – *Tectonophysics* **208/1**, 243–256. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90347-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90347-9)
- SZABÓ, C., KUBOVICS, I. & MOLNÁR, Z. 1993: Alkaline lamprophyre and related dyke rocks in NE Transdanubia, Hungary: the Alcsút-doboz-2 (AD-2) borehole. – *Mineralogy and Petrology* **47**, 127–148. <https://doi.org/10.1007/BF01161563>
- SZABÓ, Cs., HARANGI, Sz., VASELLI, O. & DOWNES, H. 1995: Temperature and oxygen fugacity in peridotite xenoliths from the Carpatho-Pannonian Region. – In: DOWNES, H. & VASELLI, O. (eds): Neogene and related magmatism in the Carpatho-Pannonian Region, *Acta Vulcanologica* **7/2**, 231–239.
- SZABÓ, C., FALUS, G., ZAJACZ, Z., KOVÁCS, I. & BALI, E. 2004: Composition and evolution of lithosphere beneath the Carpathian–Pannonian Region: a review. – *Tectonophysics* **393/1**, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.031>
- SZABÓ J. 1883: *Geológia – kiváló tekintettel a petrografiára, vulkánosságra és hidrografiára*. – Budapest, Franklin nyomda, 745 p.
- SZABÓ J. 1891: *Selmec környékének geológiai leírása*. – Budapest.
- SZABÓ J. 1894: Typuskeveredések a dunai trachytsoportban. – *Földtani Közlöny* **24/6–8**, 169–177.
- TOURET, J. 2012: Le microscope polarisant à l’assaut des montagnes. – *Travaux du Comité français d’Histoire de la Géologie*, 3ème série, **26**, 67–80.
- WEBER, G. & BLUNDY, J. 2024: A Machine Learning-Based Thermobarometer for Magmatic Liquids. – *Journal of Petrology* **65/4**. <https://doi.org/10.1093/petrology/egae020>
- WELLS, P. R. A. 1977: Pyroxene thermometry in simple and complex systems. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **62**, 129–139. <https://doi.org/10.1007/BF00372872>
- WIESER, P. E., GLEESON, M. L. M., MATTHEWS, S., DEVITRE, C. & GAZEL, E. 2024: Determining the pressure-temperature-composition (P-T-X) conditions of magma storage. – In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Treatise on Geochemistry*, 3e, 1–69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00024-3>
- WOOD, B. J. & BANNO, S. 1973: Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* **42**, 109–124. <https://doi.org/10.1007/BF00371501>
- ZAJACZ, Z. & SZABÓ, C. 2003: Origin of sulfide inclusions in cumulate xenoliths from Nógrád–Gömör Volcanic Field, Pannonian Basin (north Hungary/south Slovakia). – *Chemical Geology* **194/1**, 105–117. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00273-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00273-5)
- ZAJACZ, Z., KOVÁCS, I., SZABÓ, C., HALTER, W. & PETTKE, T. 2007: Evolution of Mafic Alkaline Melts Crystallized in the Uppermost Lithospheric Mantle: a Melt Inclusion Study of Olivine-Clinopyroxenite Xenoliths, Northern Hungary. – *Journal of Petrology* **48/5**, 853–883. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm004>
- ZIRKEL, F. 1866: *Lehrbuch der petrographie*. – Adolph Marcus, Bonn.
- ZIRKEL, F. 1870: *Untersuchungen über die mikroskopische Zusammensetzung und Struktur der Basaltgesteine*. – Adolph Marcus, Bonn.
- ZIRKEL, F. 1876: *Microscopical Petrography*. – Washington.

Internetes hivatkozások:

<https://www.tmg-tuebingen.de/die-praeperate-von-a-f-oschatz-pionier-der-duennschliffherstellung/>

Kézirat beérkezett: 2024. 08. 01.