Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji

Klára Votavová

Metody studia pórovitosti granitů ve vztahu k vnitřní stavbě
Methods of study of porosity of granitic rocks in relation to rock fabric

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: prof. Mgr. Richard Přikryl, Dr.

Praha, 2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání stejného nebo jiného akademického titulu.

V Praze 7. 8. 2018 ----------

Podpis

Poděkování:

V první řadě poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce prof. Mgr. Richardu Přikrylovi, Dr., za cenné rady, odborné konzultace a vstřícnost při vypracování bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině, která mě ve studiu vždy podporovala.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o granitech, které jsou často využívány jako stavební materiály. Granity jsou horniny s velmi nízkou pórovitostí, která však může narůst v důsledku zvětrávacích procesů. Nárůst pórovitosti je pak doprovázen zhoršením dalších fyzikálních vlastností a poklesem trvanlivosti. Po uvedení petrografické a petrogenetické problematiky granitoidních hornin se práce věnuje zejména definici pórovitosti jakožto fyzikální vlastnosti a různým metodám jejího stanovení. Vždy jsou diskutovány přednosti i nedostatky probíraných metod. Další část práce se věnuje třem případovým studiím, které poukazují na význam studia pórovitosti granitů buď kombinací několika metod, nebo aplikací nekonvenčních metod, které posléze dovolují interpretovat fyzikální chování daných materiálů. Z těchto podkladů byly posléze souhrnně interpretovány limity využití diskutovaných metod. Z dostupných údajů vyplývá, že pro studium pórovitosti a jejího vztahu k vnitřní stavbě hornin je třeba použít kombinaci vždy několika metod, zahrnujících jak prosté petrofyzikální stanovení otevřené a celkové pórovitosti, tak zobrazovací metody mikroskopické, případně doplněné o porosimetrické stanovení pomocí rtuťové porosimetrie. Jako doplňková metoda při potřebě stanovení prostorové distribuce mikrotrhlin v granitoidech se jako účelná jeví metoda mnohosměrného ultrazvukového prozařování.

Abstract

This bachelor thesis focuses on granitic rocks, which are often used as a building material. Granite are generally rocks with very low porosity, which can be modified (augmented) due to e.g. weathering processes. Increase of porosity is accompanied with deterioration of other physical parameters and decrease of durability. The thesis focuses, after introducing basic petrographical and petrogenetic characteristics of granitic rocks, on the definition of porosity as a physical property, and on various methods used for its determination. Next part of the thesis discusses some case studies which underpin the significance of porosity of granitic rocks by either using combination of several methods, or by using unconventional ones. According to available data, study of porosity and its relationship to rock fabric should be performed by combining several methods of study, encompassing simple petrophysical determination of open and bulk porosities, and microscopic methods allowing for visualisation of pore space – mineral grains relationships. These can be accompanied with less common method of multidirectional ultrasonic sounding allowing for determination of spatial distribution of microcracks present in granitic rocks.

OBSAH

1. Úvod	1
2. Granit	2
2.1. Základní vymezení	2
2.2. Vnitřní stavba	3
2.3. Vznik granitů	5
2.4. Formy výskytu a tvary magmatických těles	5
2.5. Zvětrávací procesy	6
2.6. Granity v České republice	7
3. Pórovitost a její stanovení	8
3.1. Základní definice a význam pórovitosti	8
3.2. Vztah pórovitosti k vnitřní stavbě a typy pórovitosti	10
3.3. Metody stanovení pórovitosti	10
3.3.1. Petrofyzikální metody	10
3.3.2. Zobrazovací metody	11
3.3.3. Nepřímé stanovení a odvození	12
3.3.3.1. Úvod	12
3.3.3.2. Rtuťová porosimetrie	12
3.3.3.3. Mnohosměrné ultrazvukové prozařování a prostorová distribuce pórů	13
4. Možnosti využití různých metod při studiu granitoidů	15
4.1. Odolnost vůči zvětrávání	15
4.2. Studium pórového prostředí horniny hlubinných úložišť	17
4.3. Geomechanické modely	18
4.4. Porovnání metod	21
5. Závěr	22
6. Literatura	23

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Příklady starověkých památek z granitu: vlevo Kleopatřin obelisk (15. st. před Kr.) asuánská žula, původně vztyčený v Luxoru (Egypt), později přemístěný do New Yorku. (zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/Cleopatra%27s_Needle_(New_York_City)#/media/File:Central_Park_New_York_May_2017_004.jpg), nahoře: Gandž Náme (Kniha pokladu) trojjazyčný epigrafický nápis z 6.-5. st. před Kr. na žulovém bloku v blízkosti hory Alvand nedaleko Hamadánu, Irán (zdroj: https: //www.123rf.com/photo_92021664_ganj-nameh-treasure-epistle-is-an-ancient-inscription-on-the-side-of-alvand-mountain-in-iran-the-ins.html).

Obr. 2. QAPF diagram klasifikace hlubinných magmatických hornin felsického složení, založený na modálním zastoupení křemene (Q), alkalických živců (A), plagioklasů (P) či zástupců živců – foidů (F) (upraveno na základě podkladů z ČSN EN 12670 (2001) a původního klasifikačního schématu Streckeisena (1974)).

Obr. 3. Příklad submagmatických mikrostaveb s mikrotrhlinami v dříve vykrystalovaných fázích z pyrenejských granitoidů – granodioritů a tonalitů z plutonu Mont-Louis-Andorra (B, C, E, F, G, H a granitu / granodioritu z plutonu Foix (A, D, I). Qz = křemen, Bi = biotit, Felds = živce bez rozlišení, Plag = plagioklas, KF = draselný živec, An = mol % anortitové složky v plagioklasu, Or = mol % ortoklasu v draselném živci, S = sfén. Převzato z Boucheze et al. (1992).

Obr. 4. Hypotetický řez zemskou kůrou s různými typy tepelného toku a distribucí zdrojových oblastí magmatu a oblastí vmístění granitoidních těles (převzato z Wedepohla 1995).

Obr. 5. Vztah mezi mocností (T), délkou (L) a plošným rozsahem (A) granitoidních intruzí s ohledem na jejich klasifikační tvarové členění (převzato z Browna 2013).

Obr. 6. Příklad typických makroskopicky rozeznatelných zvětrávacích forem granitu na památkách (a,b = románský kostel S. Pedro de Rates, Portugalsko, c = fasáda domu, Skotsko): drolivý rozpad do hloubky kamene (a), odprýskávání tenké povrchové vrstvy (b), tvorba druhotných usazenin pojených sádrovcem a následné puchýřování a odprýskávání druhotné vrstvy (a,b převzato z Begonhy 2009, c převzato z Young 2007).

Obr. 7. Synoptický přehled rozšíření prevariských a variských plutonických těles v Českém masívu (převzato z Klomínského a Dudka 1978). 1 = oblast Smrčin a Krušných hor, 2 = oblast lugika (krkonošsko-jizerská oblast, silesikum), 3 = drobná granitoidní tělesa jz. a z. Čech, 4 = středočeský plutonický komplex, 5 = Nasavrcko-skutečský pluton, 6 = Pošumavské granity a moldanubický plutonický komplex.

Obr. 8. Grafické vyjádření podílu pevné hmoty a pórů v hornině. Převzato a upraveno dle Schöna (2004).

Obr. 9. Porovnání mikrostavby vybraných horninotvorných minerálů (při pozorování v polarizovaném světle) a jejich vztahu k okolním fázím v jednom typu španělských granitů (granit Zarzalejo) a distribuce pórového prostoru dle pozorování v odraženém ultrafialovém světle (snímky s mikrotrhlinami vpravo). Převzato z Freire-Lista et al. (2016).

Obr. 10. Porovnání typu pórů v oolitickém vápenci dle elektronového mikroskopu (vlevo: (a) mezičásticové (intergranularní) póry v základní hmotě,(b) mezičásticové (intergranulární) dutiny, (c) intraolitické mikropóry (d) intraolitické dutiny mikropórově propojené) a distribuční křivky relativního objemového zastoupení pórů dle rtuťové prosimetrie (a) a počítačové analýzy obrazu mikroskopického snímku (b) (vpravo). Převzato z Roelse et al. (2001)

Obr. 11. Grafické zobrazení závislosti mezi rostoucím všesměrným tlakem a rychlostí P-vln, dokumentující počáteční nelinearitu v důsledku zavírání mikrotrhlin. Z vlastního měření je nejprve vypočtena rychlost P-vln (V_P), následně jsou dopočítány odvozené parametry: V_0 (aproximovaná rychlost P-vln v materiálu prostém pórů), V_{dif} (rozdíl rychlostí mezi změřenou a aproximovanou rychlostí P-vln za atmosférického tlaku), a k_V (koeficient elastické anisotropie materiálu bez trhlin). Převzato z Přikryla et al. (2007).

Obr. 12. Mikrofotografie 4 různých typů španělských granitů (AL = granit Alpedrete, CA = granit Cadalso de los Vidrios, CO = granit Colmenar Viejo, ZA = granit Zarzalejo) v přirozeném stavu (levý sloupec), po 21 cyklech tepelného namáhání (prostřední sloupec) a po 42 cyklech tepelného namáhání (pravý sloupec). Uvedené snímky jsou složené z obrazu pozorovaného v polarizovaném světle e v ultrafialovém odraženém světle. Vysvětlivky zkratek minerálů: Bt = biotit, K-Fsp = draselný živec, Qz = křemen, Pl % plagioklas. Převzato z Freire-Lista et al. (2016).

Obr. 13. Relativní distribuce pórových hrdel (vyjádřeno jako průměr průřezovou plochou) 4 různých typů španělských granitů v přirozeném stavu (tečkované křivky v horních 4 grafech, plná křivka ve spodních 4 grafech) a po 280 cyklech zmrazování/rozmrazování (horní 4 grafy) a 42 cyklech tepelného namáhání (spodní 4 grafy). Převzato z Freire-Lista et al. (2015b, 2016).

Obr. 14. Vztah mezi počtem cyklů tepelného namáhání a nárůstem hustoty mikrotrhlin 4 různých typů španělských granitů (AL = granit Alpedrete, CA = granit Cadalso de los Vidrios, CO = granit Colmenar Viejo, ZA = granit Zarzalejo). Převzato z Freire-Lista et al. (2016).

Obr. 15. Příklad autoradiografického zpracování mikrotrhlin v granitu. A = mikroskopický snímek (SEM/EDS ve zpět odražených elektronech) jednoho ze studovaných granitů (vzorek E8) po částečné transformaci odstínů šedi (křemen je černý, plagioklas tmavě šedý, K=živec světle šedý, těžké minerály bílé), B = autoradiografický snímek té samé oblasti dokumentující rozdílnou hustotu pórovitosti (póry vyznačeny temně šedou až černou), C = histogram četnosti přítomných pórů ve vztahu k jednotlivým horninotvorným minerálům. Převzato z Kelokaski et al. (2006).

Obr. 16. Příklad prostorového zobrazení experimentálních dat získaných mnohosměrným ultrazvukovým prozařování boršovské žuly za různých úrovní všesměrného tlaku (I.) a odvozených rychlostních rozdílů (II.) a elastických parametrů dle Obr. 11 (III.). Plusové znaménko označuje maximální hodnotu daného parametru. Z izoliniové mapy rozdílů změřených a vypočtených rychlostí (V_{dif}) v řádku III. je dobře patrné přednostní transversálně isotropní uspořádání přítomných mikrotrhlin. Převzato z Přikryla et al. (2007).

Obr. 17. Kompilace vlivu prvků vnitřní stavby hornin na vybrané fyzikální vlastnosti, zejména na vztah mezi rychlostí elastických vln a všesměrného tlaku, na prostorové uspořádání rychlostí P-vln, a na přetvárné chování hornin typu granitoidů v hlavních směrech při jednoosém statickém zatížení. Nelineární odezva na tlakově-rychlostních diagramech a na přetvárných diagramech je způsobena přítomností orientovaných systémů mikrotrhlin. Symetrie prvků vnitřní stavby může být nahodilá, resp. isotropní (R), transversálně isotropní (TI) nebo ortorombická (OR), nižší symetrie nebyla uvažována. Převzato z Přikryla et al. (2007).

Obr. 18. Porovnání rozsahu velikosti pórů, které lze zachytit různými pozorovacími a analytickými metodami. Převzato z Anovitz a Cole (2015).

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Základní charakteristiky čtyř hlavních typů granitů (dle Johannese a Holtze 1996).

Tab. 2. Stanovení dvou základních typů pórovitosti přírodního kamene dle ČSN EN 1936 (2000).

Tab. 3. Přehled vybraných používaných postupů při vizualizaci mikrotrhlin / pórů v horninách (upraveno dle Přikryla 2015).

Tab. 4. Porovnání různých metod studia pórovitosti s ohledem na získaný typ dat. Navržené hodnocení (+ = metoda vhodná, ± = metoda vhodná s určitým omezením, × = metoda nevhodná / nelze použít) je uzpůsobeno tvarově anizotropním pórům – mikrotrhlinám, typickým pro hlubinné vyvřelé horniny typu granitoidů.

1. Úvod

Granity patří k nejvíce rozšířeným horninám zemské kůry, zejména její svrchní části (Wedepohl 1995). Již od starověku byly vyhledávaným stavebním materiálem (Winkler 1997). U granitu byl – i přes obtížnou opracovatelnost – ceněn příznivý, v mnoha případech velmi atraktivní vzhled, a rovněž značná odolnost vůči zvětrávacím procesům. Proto se také lze v mnoha oblastech světa setkat s architektonickými památkami či sochařskými díly, vytvořenými z granitických hornin (např. Dodge 1988, De Vecchi et al. 2000, Klemm a Klemm 2001, Fort et al. 2013, Momeni et al. 2015, Obr. 1).

Obr. 1. Příklady starověkých památek z granitu: vlevo Kleopatřin obelisk (15. st. před Kr.) asuánská žula, původně vztyčený v Luxoru (Egypt), později přemístěný do New Yorku. (zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/Cleopatra%27s_Needle_(New_York_City)#/media/File:Central_Park_New_York_May_2017_004.jpg), nahoře: Gandž Náme (Kniha pokladu) trojjazyčný epigrafický nápis z 6.-5. st. před Kr. na žulovém bloku v blízkosti hory Alvand nedaleko Hamadánu, Irán (zdroj: https://www.123rf.com/photo_92021664_ganj-nameh-treasure-epistle-is-an-ancient-inscription-on-the-side-of-alvand-mountain-in-iran-the-ins.html).

V současnosti jsou granity, vedle vápenců, nejčastěji využívaným přírodním stavebním kamenem (Pivko 2004), hojně využívaným zejména pro leštěné obklady a dlažby. V mnoha zemích rovněž poskytují hodnotnou zdrojovou horninu pro výrobu drceného kamene (Tuğrul a Zarif 1999, Smith a Collis 2001). Nejinak je tomu i v České republice – více než 2/3 produkce tzv. dekoračního kamene (tj. přírodního kamene pro výlom bloků) a přes 10 % hornin pro drcený kámen pochází ze světlých hlubinných vyvřelých hornin (Starý et al. 204), které lze v širším slova smyslu označit jako granity, resp. granitoidy. Kromě výše zmíněného využití patří granitoidní tělesa k vážným kandidátům na umístění trvalých hlubinných úložišť radioaktivního odpadu (Pusch 1994). Tato volba je ovlivněna jak velikostí granitoidních těles, tak jejich příznivými fyzikálními vlastnostmi (mj. nízkou pórovitostí, malou propustností) a nízkým rozpukáním.

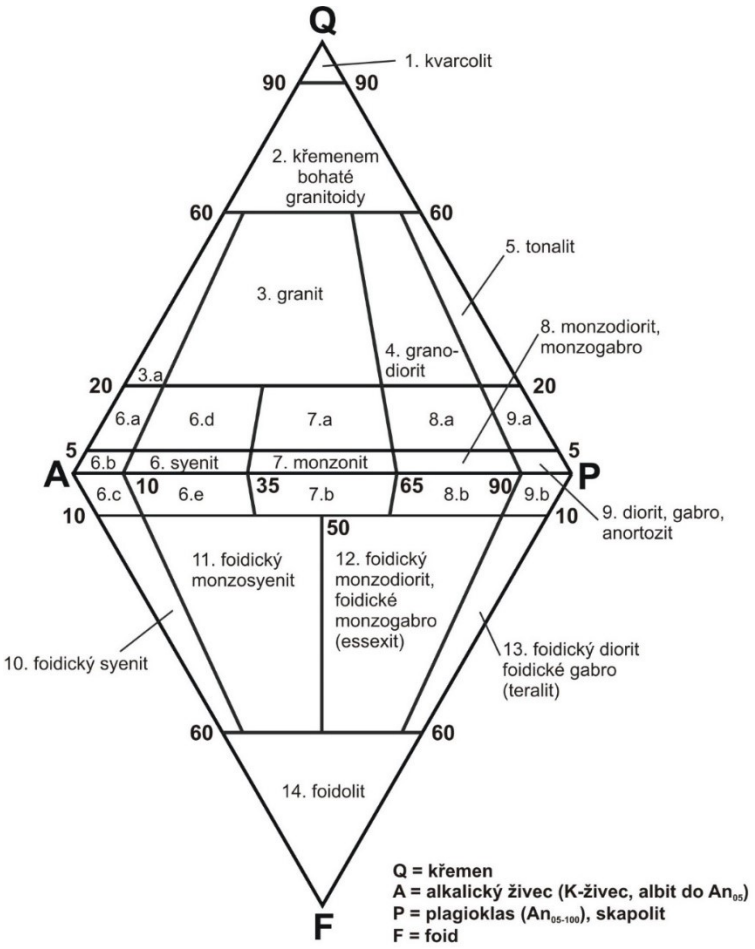
Tato bakalářská práce si klade za cíl podat souhrnný přehled znalostí o pórovitosti granitů, které jsou považovány za materiály s velmi nízkou, resp. zanedbatelnou pórovitostí (zpravidla pod 1 obj. %, zřídka nad 2 obj. % - viz Mosch a Siegesmund 2007). Práce se soustředila na vznik, možnosti určení i vztah pórovitosti k dalším fyzikálním vlastnostem granitů nebo významu pórovitosti pro jejich další využití. Přítomnost pórů má přímý dopad např. na mechanické vlastnosti (přetvárné a pevnostní charakteristiky hornin); v případě propojených pórů však také výrazně zvyšuje náchylnost hornin k porušení různými zvětrávacími procesy, zejména fyzikálního charakteru (Sousa 2014). Poznatky z dříve zveřejněných výzkumných prací přitom ukazují na význam komplexního studia pórovitosti hornin, u nichž pórový prostor tvoří jen velmi malou část jednotkového objemu.

2. Granit

2.1. Základní vymezení

Dnes všeobecně rozšířený a v řadě jazyků běžně používaný termín „granit“ je přisuzován Andreu Cæsalpinovi (lat. *Granitum* in Cæsalpino 1596, blíže viz např. Le Maitre ed. 2004). Jak uvádí Johannes a Holtz (1996), jeden z prvních popisů granitu přinesl známý německý geolog Abraham G. Werner (1787), zastávající neptunistické pozice; jednoznačně magmatický původ granitu poté interpretuje proslulý skotský geolog James Hutton (1794). Čeština používá jak mezinárodně rozeznatelný termín granit, tak ekvivalentní „žula“, vzniklý počeštěním německého die Sohle (Rybařík 1994).

Granit je hlubinná magmatická hornina, složená hlavně z křemene, alkalických živců (draselné živce a sodné plagioklasy), s minoritní příměsí slíd (muskovit, biotit), případně i amfibolu (Dudek et al. 1984). Naprosto převažující zastoupení světlých (felsických) horninotvorných minerálů umožňuje klasifikaci granitů v mezinárodně uznaném schématu světlých hlubinných vyvřelých hornin dle Streckeisena (1974). V tomto klasifikačním diagramu obsazuje rozsáhlé pole mezi 20-60 mod. % křemene a 35-90 mod. % alkalických živců (Obr. 2). Zejména v angloamerické literatuře se v chápání granitů vymezují dva dílčí horninové typy – syenogranity (s vyšším podílem alkalických živců) a plagioklasy bohatší monzogranity (dříve též adamelity) (blíže viz Le Maitre ed. 2004). S narůstajícím zastoupením plagioklasu na úkor draselného živce přecházejí granity do granodioritů a ty do tonalitů. V technické praxi se často vymezují granity spolu s granodiority a tonality jako granity v širším slova smyslu či granitoidy nebo také světlé hlubinné vyvřeliny, resp. jako žuly (Rybařík 1994).



Obr. 2. QAPF diagram klasifikace hlubinných magmatických hornin felsického složení, založený na modálním zastoupení křemene (Q), alkalických živců (A), plagioklasů (P) či zástupců živců – foidů (F) (upraveno na základě podkladů z ČSN EN 12670 (2001) a původního klasifikačního schématu Streckeisena (1974)).

Výše uvedené petrografické vymezení je velice obecné vzhledem k rozmanitosti prostředí, v nichž se granitoidní horniny vyskytují i k značné variabilitě složení a uvažovaných zdrojových horninách (protolitech), z nichž granitoidní magma vzniká (Brown 2013). Proto bylo v minulých desetiletích navrženo několik přístupů pro detailnější klasifikaci granitů, s jejichž pomocí by měly být odhadnuty petrogenetické procesy i podmínky jejich vzniku.

K nejrozšířenějším a nejvíce oblíbeným, byť nikolivěk univerzálně využitelným bez předchozího kritického studia, patří mineralogicko-geochemický přístup, vymezující tzv. I-, S-, A- a M-typy granitů (podrobněji viz např. Johannes a Holtz 1996 a citace zde uvedené, též viz Tab. 1). Při studiu australských granitů zjistili Chappel s Whitem (Chappel a White 1974, White a Chappel 1976) výrazně odlišné geochemické charakteristiky dvou základních typů – tzv. I-granitů (I = igneous, vyvřelých) a S-granitů (S = sedimentary, sedimentární), které jim umožnily interpretovat první skupinu jakožto horniny vzniklé krystalizací z magmatu, zatímco u druhé skupiny je předpokládán vznik tavením sedimentárního protolitu (Johannes a Holtz 1996).

Později definovaný A-typ (A = anorogenní) granitů (Loiselle a Wones 1979) se vyznačuje vysokoteplotním tavením s deficitním obsahem vody. Rovněž později popsaný M-typ (M = mantle, plášťový) granitů je typický pro prostředí ostrovních oblouků a bývá interpretován jakožto magmatická hornina vzniklá frakcionací magmat při parciálním tavení subdukované oceánské desky (White 1979, Whalen 1985).

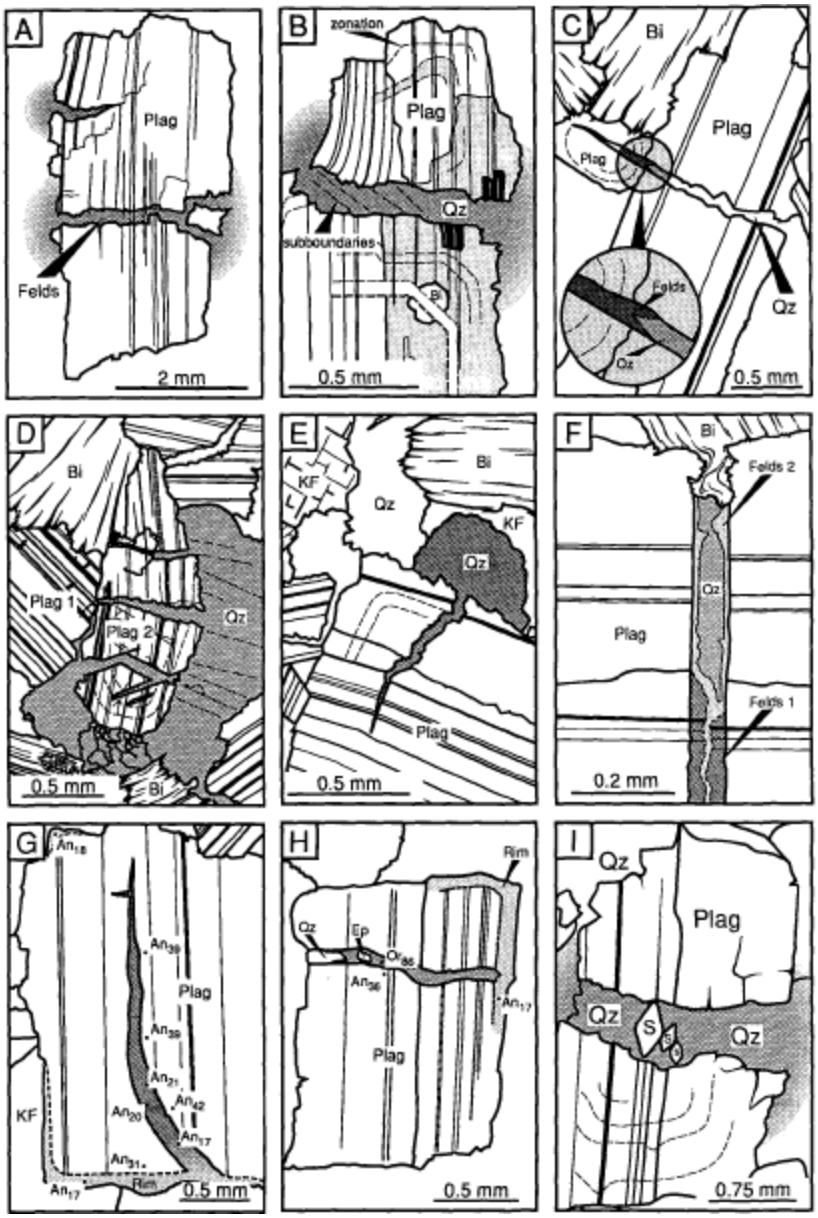
Tab. 1. Základní charakteristiky čtyř hlavních typů granitů (dle Johannese a Holtze 1996).

Obsah či poměr složek	**I-typ**	**S-typ**	**A-typ**	**M-typ**
SiO_2	Široké rozpětí	Relativně vysoké	Vysoké	Široké rozpětí
Na_2O, K_2O, CaO	Na_2O relativně vysoké	Na_2O relativně nízké	Vysoké Na_2O a K_2O	Vyšší Na_2O a CaO a nižší K_2O než I-typ
Na_2O/K_2O	Relativně vysoké	Relativně nízké		
Mol $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$	< 1,1	> 1,1	Metaluminický, též peralkalický a peraluminický	
Iniciální $^{87}Sr/^{86}Sr$	< 0,706	> 0,706	Velmi variabilní (0,703-0,720)	~ 0,704
$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$	Relativně vysoké	Relativně nízké	Relativně vysoké	Relativně vysoké
Charakteristické minerály v inkluzích nebo matrix	Biotit, amfibol	Alumosilikáty, granát, cordierit	Biotit, alkalický amfibol a pyroxen	Amfibol, biotit, pyroxen

2.2. Vnitřní stavba

Pod termínem vnitřní stavba se rozumí všechny geometrické aspekty horninotvorných součástí dané horniny, tedy vzájemné uspořádání horninotvorných minerálů a pórového prostředí mezi nimi (Přikryl 2006). Vnitřní stavba je termín zastřešující jak tvarové aspekty vnitřní stavby: tj. strukturu (tvarové přednostní uspořádání horninotvorných součástí, tvar a velikost jednotlivých zrn apod.), tak i (mikro)texturní charakteristiky (krystalografické přednostní uspořádání horninotvorných minerálů). Protože pórový prostor tvoří nedílnou součást vnitřní stavby všech hornin, lze popis a kvantifikaci tvarových charakteristik aplikovat i na něj.

Během krystalizace granitoidního magmatu se postupně vytváří propojení dříve vykrystalovaných fází – tzv. magmatické mikrostavby (blíže viz Nédélec a Bouchez 2015). Tyto fáze (např. plagioklasy) mají tendenci se chovat křehce za přítomnosti zbytkové taveniny, přičemž dochází ke vzniku prvotních křehkých porušení – mikrotrhlin, vyplněných později vykrystalovanými fázemi (Obr. 3). Takto vzniklé stavby bývají označovány jako submagmatické (Bouchez et al. 1992).



Obr. 3. Příklad submagmatických mikrostaveb s mikrotrhlinami v dříve vykrystalovaných fázích z pyrenejských granitoidů – granodioritů a tonalitů z plutonu Mont-Louis-Andorra (B, C, E, F, G, H a granitu / granodioritu z plutonu Foix (A, D, I). Qz = křemen, Bi = biotit, Felds = živce bez rozlišení, Plag = plagioklas, KF = draselný živec, An = mol % anortitové složky v plagioklasu, Or = mol % ortoklasu v draselném živci, S = sfén. Převzato z Boucheze et al. (1992).

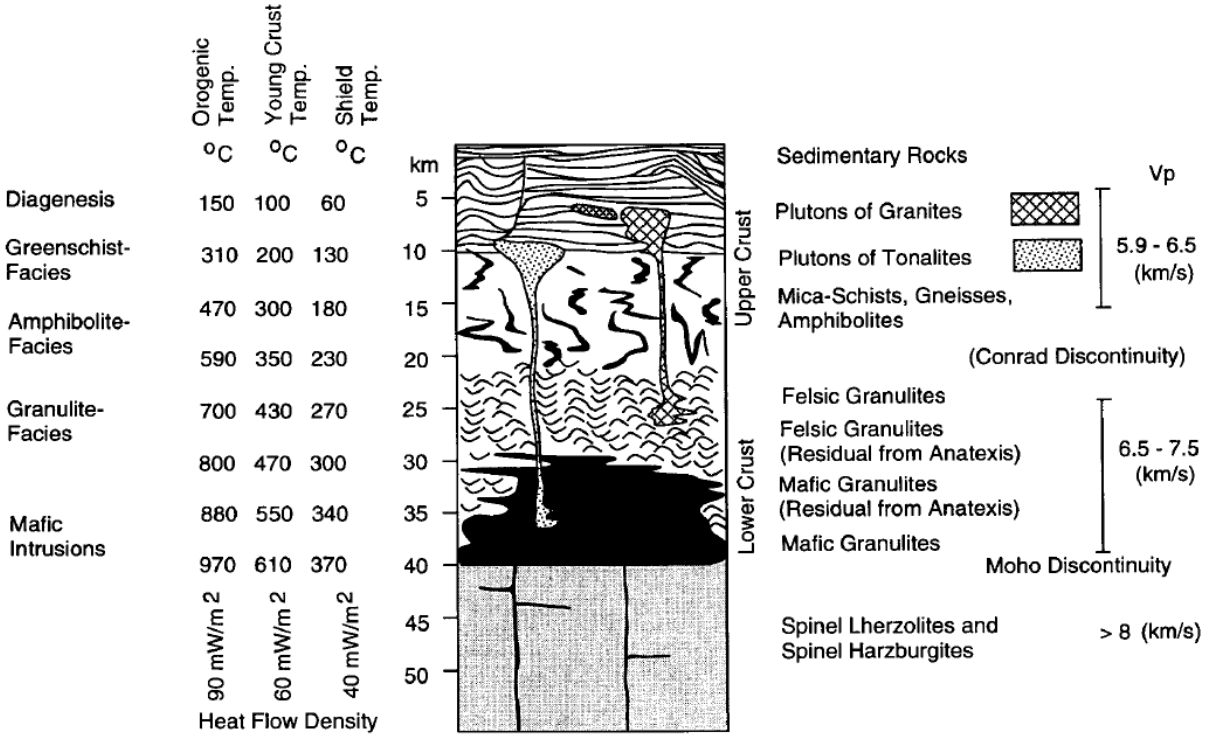
Granity jakožto hlubinné magmatické horniny mají plně krystalickou vnitřní stavbu, která může být jak rovnoměrně, tak nerovnoměrně zrnitá (porfyrická) (Dudek et al. 1984). U rovnoměrně zrnitých variet je velikost zrna zpravidla středně zrnitá (první mm) (Dudek et al. 1984), méně často se lze setkat s odrůdami hrubo- až velkozrnnými, i drobnozrnnými (Přikryl 2001). Základní vnitřní stavba granitoidů se označuje jako **granitická**, jež se vyznačuje přítomností zrn hypidiomorfně omezených slíd a plagioklasů, a alotriomorfně omezenými zrny draselných živců a křemene. Porfyrické vyrostlice nerovnoměrně zrnitých granitoidů mohou přesahovat i 10 cm (Dudek et al. 1984).

Zvláštním případem vnitřní stavby granitoidů jsou **kulovité (orbikulární)** vnitřní stavby některých žul ze Skandinávie (žuly typu rapakivi) i jiných částí světa (Haapala a Rämö 1999). Tyto žuly se vyznačují překvapivou variabilitou složení matrix i vyrostlic (Leveson 1966).

2.3. Vznik granitů

Granity jsou nejčastěji zastoupenou magmatickou horninou svrchní části kontinentální kůry, tvořící téměř 90 % obsahu všech hlubinných magmatických hornin (Wedepohl ed. 1969). Studium granitů proto poskytuje jedno ze základních vodítek pro pochopení magmatických procesů i deformačních mechanismů v zemské kůře (Johannes a Holtz 1996).

Tvorba granitoidní kontinentální kůry bývá interpretována jako vícestupňový proces, zahrnující: (1) vznik mafických hornin parciálním tavením ultramafického pláště, (2) vznik mafických granulitů a tonalitů v rané kůře parciálním tavením hydratovaných mafických hornin (amfibolitů) a segregací taveniny, a (3) parciální tavení a frakcionaci tonalitů za vzniku granitických magmat a granulitových restitů (Wedepohl 1995). Parciální tavení metasedimentů, tonalitů a mafických hornin ve spodní kůře (Obr. 4) vyžaduje zvýšený přísun tepla, které je mimo jiné zajišťováno z intruzí svrchnoplášťového materiálu (Wedepohl 1995, Johannes a Holtz 1996).



Obr. 4. Hypotetický řez zemskou kůrou s různými typy tepelného toku a distribucí zdrojových oblastí magmatu a oblastí vmístění granitoidních těles (převzato z Wedepohla 1995).

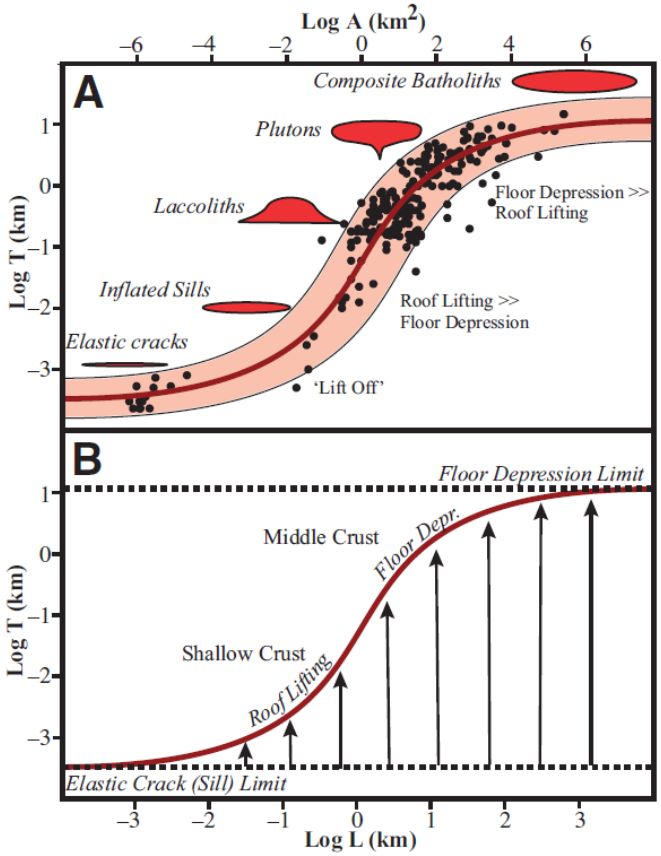
Dostatečné tavení (zpravidla nad 7 % obj. % taveniny, kdy je dosaženo jejího propojení) vhodných horninových protolitů může začít při relativně nízkých teplotách (~750°C) a středních až vyšších korových tlacích. Při tavení korových hornin hraje významnou úlohu přítomnost vody, resp. fluid, které umožňují tavení vhodných protolitů – např. pelitů či drob – již při teplotách 650-700°C (Brown a Korhonen, 2009, Sawyer 2010). Po vzniku dostatečného množství taveniny ve větších korových hloubkách následuje její výstup a vmístění do mělčích korových úrovní, kde dochází ke krystalizaci taveniny a vzniku magmatických těles různých tvarů (Brown 2013).

2.4. Formy výskytu a tvary magmatických těles

Utuhnutím magmatu v tělesech určitého tvaru, umístěných ve svrchní kůře (Obr. 4) vrcholí proces vzniku granitoidů (Brown 2013). Granitoidy vytvářejí řadu morfologicky odlišných těles, jež se liší svým plošným i vertikálním rozsahem (blíže k členění na základě poměru hlavních rozměrů viz Obr. 5).

Vedle plošně nejrozsáhlejších složených batolitů (či plutonických komplexů), se lze setkat s plošně méně rozsáhlými plutony, či mocností výrazně menšími lakolity či lopolity. Granitoidní horniny však mohou vyplňovat i rozsahem výrazně menší ložní žíly či trhliny v zemské kůře (Obr. 5).

Pro granitoidní intruze je často charakteristické poměrně značné časové rozpětí vzniku a vmísťování magmatu v jedné oblasti; výsledkem jsou potom kompozitní plutony (plutonické komplexy). V Českém masívu je typickým příkladem např. středočeský plutonický komplex (viz Holub et al. 1997, Žák et al. 2005 a citace zde uvedené).



Obr. 5. Vztah mezi mocností (T), délkou (L) a plošným rozsahem (A) granitoidních intruzí s ohledem na jejich klasifikační tvarové členění (převzato z Browna 2013).

2.5. Zvětrávací procesy

Podobně jako ostatní horniny, ani granity nejsou imunní vůči zvětrávacím procesům v supergenních podmínkách (Winkler 1997). Zvětrávací procesy zahrnují jak fyzikální změny horniny působením převážně mechanických sil (např. mrznutím vody či krystalizací solí v pórovém prostředí, objemovými změnami vyvolanými kolísáním teploty či cyklickými změnami obsahu vody), tak změny chemické (např. hydrolýza, hydratace/dehydratace, oxidace, rozpouštění), které mění chemické i fázové složení horniny, granity nevyjímaje (Bland a Rolls 1998). Zvětrávací procesy se významně (zpravidla negativně) projevují na fyzikálních i užitných vlastnostech granitoidních hornin (Sousa et al. 2005). Na druhou stranu některé typy zvětrávacích procesů granitoidních hornin (např. hydrolýza živců) vede ke vzniku kaolínových ložisek (např. Murray et al. 1993).

Negativní dopad zvětrávacích procesů granitoidů je v posledních letech intensivně studován zejména v souvislosti s ochranou stavebních či sochařských památek (Porto et al. 1991, Schiavon et al. 1995, Momeni et al. 2015). Četné případové či experimentální studie ukázaly, že v řadě prostředí mohou granitoidní horniny poměrně rychle degradovat za přispění různých mechanismů jako je kontrast

v tepelné roztažnosti jednotlivých horninotvorných minerálů (Gómez-Heras et al. 2006, Siegesmund et al. 2018), krystalizace solí (Winkler 1980, García-Talegón et al. 1999, Alonso et al. 2008, Begonha 2009, Freire-Lista et al. 2016, Sousa et al. 2018) nebo mrznutí vody v pórovém systému (Freire-Lista et al. 2015b). Ke zvětrávání granitů na památkách přispívá znečištěné městské ovzduší (Schiavon et al. 1995, Baptista-Neto et al. 2006), které v některých případech vede až k prokazatelnému rozvoji kaolinizace (Schiavon 2007). Zvětrávání granitu ve stavebních konstrukcích usnadňuje též interakce s dalšími stavebními hmotami – např. maltou (Cooper et al. 1991, O'Brien et al. 1995) nebo přítomnost biologické složky – řas, mechů či lišejníků (Lamas et al. 1995). K rozšířeným jevům patří také tvorba povrchových patin či barevné změny povrchu způsobené usazováním cizorodých částic, které následně přispívají k zrychlenému zvětrávání buď chemickou cestou (interakcí se substrátem) nebo změněnými fyzikálními parametry (např. Warscheid a Braams 2000, Carballal et al. 2001).

Výše uvedené mechanismy vedou ke vzniku různých makroskopicky rozeznatelných zvětrávacích forem, z nichž se nejčastěji uplatňuje zrnitý (drolivý) rozpad, odprýskávání povrchové vrstvy, či tvorba a odprýskávání exokrust (Obr. 6).

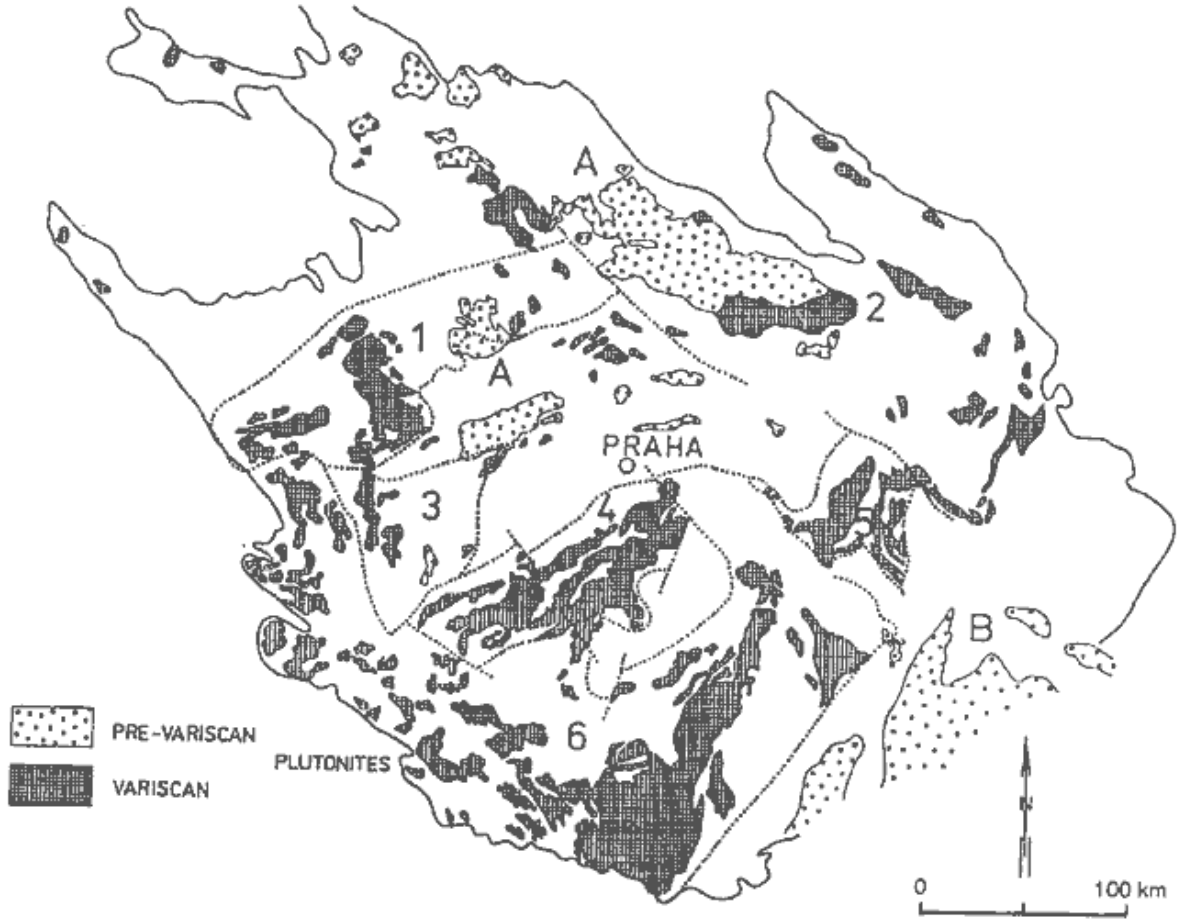
Obr. 6. Příklad typických makroskopicky rozeznatelných zvětrávacích forem granitu na památkách (a,b = románský kostel S. Pedro de Rates, Portugalsko, c = fasáda domu, Skotsko): drolivý rozpad do hloubky kamene (a), odprýskávání tenké povrchové vrstvy (b), tvorba druhotných usazenin pojených sádrovcem a následné puchýřování a odprýskávání druhotné vrstvy (a,b převzato z Begonhy 2009, c převzato z Young 2007).

V dalších studiích byla rovněž prokázána souvislost mezi uspořádáním pórového prostředí granitů a jejich náchylností ke zvětrávání (Iñigo et al. 2000). Z těchto důvodů je studium pórového systému granitoidních hornin pokládáno za jeden z nejúčinnějších přístupů jak porozumět dopadu výše zmíněných procesů na trvanlivost přírodního kamene (Freire-Lista et al. 2015b, 2016).

2.6. Granity v České republice

Území České republiky se i přes relativně malou rozlohu vyznačuje nebývalou pestrostí geologické stavby a vývoje (Chlupáč et al. 2002). V plošně převažujícím Českém masivu jsou v krystalickém základu zastoupena četná granitoidní tělesa jako prevariská, tak zejména variská (Klomínský a Dudek 1978, Obr. 7). Značné množství granitoidů z Českého masivu bylo v minulosti předmětem těžby, v některých lomech jsou tyto horniny lámány dodnes (viz např. Rybařík 1994). Kromě vysoké obliby

místních granitů pro výlom bloků a výrobu kamenických výrobků (štípaných i leštěných), se zdejší žuly rovněž využívají k výrobě drceného kamene (Rybařík 1983, Habarta 1992).



Obr. 7. Synoptický přehled rozšíření prevariských a variských plutonických těles v Českém masívu (převzato z Klomínského a Dudka 1978). 1 = oblast Smrčin a Krušných hor, 2 = oblast lugika (krkonošsko-jizerská oblast, silesikum), 3 = drobná granitoidní tělesa jz. a z. Čech, 4 = středočeský plutonický komplex, 5 = Nasavrcko-skutečský pluton, 6 = Pošumavské granity a moldanubický plutonický komplex.

V případě bloků je objemově nejrozšířenější těžba soustředěna do oblasti středočeského plutonického komplexu (např. žuly požárská, kozárovická, vápenická, nečínská, hudčická, blatenská, ad.), moldanubického plutonického komplexu (např. žula mrákotínská, řásenská, mysletická, boršovská, pavlovská, lipnická, ad.), krkonošsko-jizerského plutonického komplexu (žula liberecká, tanvaldská) či slezského plutonu – žulovského masívu (slezská žula) (Rybařík 1994). Z hlediska vzhledové atraktivity je velice významným horninovým typem žula tiská (čistecko-jesenický komplex). Z menších žulových těles, v nichž dosud probíhá těžba, lze dále zmínit např. štěnovický masiv (štěnovická žula) u Plzně, železnohorskou oblast (žula hlinecká, skutečská, prosetínská) (Rybařík 1994).

Žuly Českého masivu se nevyznačují takovou vzhledovou atraktivitou jako např. světově proslulé skandinávské žuly, ale ve středoevropském prostoru dosáhly velké obliby. Jejich intensivní průmyslová těžba započala v druhé polovině 19. století (Rybařík 1994), i když místní využívání zejména navětralejších, snáze opracovatelných (ale více pórovitých) partií lze doložit mnohem dříve. Právě v těchto případech má studium pórovitosti velký význam, protože může přispět k objasnění trvanlivosti artefaktů z těchto žul zhotovených.

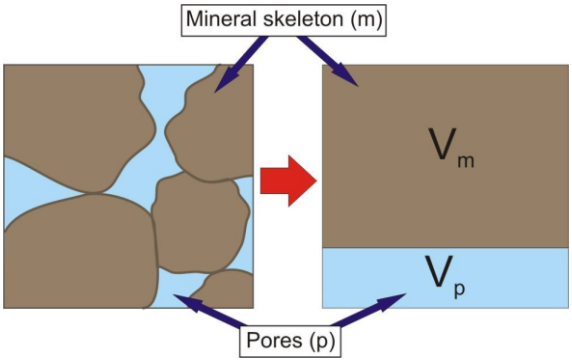
3. Pórovitost a její stanovení

3.1. Základní definice a význam pórovitosti

Pórovitost je jednou ze základních fyzikálních vlastností, majících význam v řadě inženýrsko-geologických aplikací (Goodman 1989). V inženýrské geologii a mechanice hornin je řazena mezi tzv. indexové fyzikální vlastnosti, které mají skalární rozměr (např. Goodman 1989, Schön 2004). Pórovitost (ϕ) lze definovat jako poměr mezi objemovým zastoupením pórů (V_p) vůči celkovému jednotkovému objemu (V) horniny (Schön 2004):

$$\Phi = \frac{V_p}{V} \cdot 100.$$

Pórovitost se vyjadřuje v obj. % jako ta část celkového jednotkového objemu (Obr. 8), která není zaplněna pevnou hmotou (Schön 2004).



Obr. 8. Grafické vyjádření podílu pevné hmoty a pórů v hornině. Převzato a upraveno dle Schöna (2004).

S ohledem na vztah k dalším fyzikálním vlastnostem, zejména k propustnosti, má velký význam rozlišení mezi **otevřenou (efektivní)** a **uzavřenou pórovitostí**, které v součtu definují **pórovitost celkovou** (Schön 2004). Otevřená pórovitost reprezentuje tu část pórů, které jsou mezi sebou hydraulicky propojeny, tedy umožňují efektivní přenos kapalin. Uzavřená pórovitost naopak zahrnuje navzájem nepropojené, s okolím nekomunikující póry.

Pórovitost je numerické, bezrozměrné vyjádření přítomného pórového prostoru, které však nic nevypovídá o genetickém typu, tvaru pórů či stupni jejich propojení, tedy jejich příspěvku k vnitřní stavbě horniny. Přitom právě tyto charakteristiky zásadně ovlivňují řadu dalších fyzikálních vlastností a přispívají k různé míře odolnosti vůči zvětrávacím procesům (Přikryl 2013). Z řady vědeckých studií je patrná přímá souvislost mezi pórovitostí a propustností, či vlivem pórovitosti na dynamické i statické přetvárné vlastnosti, měrný elektrický odpor, tepelnou vodivost ad. (viz Schön 2004 a citace zde uvedené). Rostoucí pórovitost negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti, přičemž existuje inversní nelineární vztah mezi pórovitostí a pevností (Přikryl 2001 a citace zde uvedené).

Pórovitost má zásadní vliv na odolnost hornin vůči zvětrávacím procesů, neboť propojené póry umožňují migraci vody nebo rozpuštěných látek, a v případě přítomnosti pórů určité velikosti i jejich delší zadržení v hornině (Přikryl 2013). V případě nasycení pórového prostoru vodou a jejím zamrznutí vznikají tlaky, které při opakovaném působení rozrušují horninu (Potts 1970); podobně jsou horniny rozrušovány při krystalizaci solí (Winkler 1997). Podrobné znalosti pórových charakteristik se proto využívá i při predikci trvanlivosti hornin (Yu a Oguchi 2010, Přikryl 2013).

3.2. Vztah pórovitosti k vnitřní stavbě a typy pórovitosti

Póry jsou nedílnou součástí vnitřní stavby hornin (Kranz 1983, Přikryl 2006). Jejich přítomnost souvisí jak s vlastními genetickými procesy (pórovitost vzniklá během nich se v petrofyzice označuje jako primární – viz např. Schön 2004), tak s postgenetickým vývojem při diagenetických nebo orogenních procesech nebo během výzdvihu a denudace horninových těles. Zejména u některých sedimentárních hornin (např. karbonátových) se rozlišuje, zda póry mají vztah k mikrostavbě horniny (pórovitost stavebně selektivní) či nikoliv (pórovitost stavebně neselektivní) (Choquette a Pray 1970). Pro jiné typy hornin není tento pohled uplatňován. Při diagenetických procesech sedimentů dochází k výrazné redukci pórovitosti, která má však odlišný vývoj u hornin s různou zrnitostí (Schön 2004). Takto vzniklá pórovitost se někdy označuje jako sekundární. V supergenních podmínkách dochází k rozvoji tzv. terciární pórovitosti, jež je spojena se zvětrávacími procesy (Delgado Rodrigues 1994).

Dalším důležitým aspektem pórového prostoru je geometrie přítomných pórů. Zde se v principu rozlišují jednak póry zhruba ekvidimensionální (typické pro úlomkovité sedimentární horniny – viz např. Schön 2004) a póry plochého tvaru, označované zpravidla jako mikrotrhliny (Kranz 1983) případně jako štěrbinové póry (Weishauptová a Přikryl 2004).

Z výše uvedených důvodů je proto třeba věnovat zvýšenou pozornost nejen stanovení pórovitosti jako fyzikální veličiny, ale též vztahu přítomných pórů k dalším prvkům vnitřní stavby horniny. Přitom lze využít řady přístupů, jejichž klady i zápory jsou vysvětleny v dalším textu.

3.3. Metody stanovení pórovitosti

3.3.1. Petrofyzikální metody

K nejjednodušším stanovením pórovitosti jakožto fyzikální veličiny patří metody zde souhrnně označované jako petrofyzikální. Těmito metodami lze stanovit pórovitost otevřenou, případně celkovou (Tab. 2) a vyjádřit ji numericky jakožto % podíl jednotkového objemu horniny.

Nejjednodušším způsobem lze stanovit otevřenou pórovitost gravimetricky, kdy zkušební těleso pravidelných rozměrů je nejprve přesně změřeno a zváženo. Po výpočtu objemové hmotnosti se vysušené zkušební těleso nechá nasáknout vodou (ve vakuu) a na hydrostatických vahách se stanoví hmotnost nasyceného vzorku (ČSN EN 1936 (2000)).

Pro stanovení celkové pórovitosti je zapotřebí znát objemovou i měrnou hmotnost. Přesné stanovení měrné hmotnosti je náročnější a zpravidla vyžaduje zjištění přesného objemu pomocí heliové pyknometrie (Schön 2004, Weishauptová a Přikryl 2004).

I když výše uvedené postupy patří v geologické a zkušební praxi k nejrozšířenějším a nelze se jim v žádném případě vyhnout, má stanovení otevřené či celkové pórovitosti jedno zásadní omezení: nepřináší žádné informace o typu pórovitosti z hlediska geneze či vztahu pórů k přítomným minerálním zrnům a k vnitřní stavbě. Rovněž neumožňuje kvantifikovat přítomnost pórů různé velikosti.

Tab. 2. Stanovení dvou základních typů pórovitosti přírodního kamene dle ČSN EN 1936 (2000).

Pórovitost	Symbol	Rovnice	Popis
otevřená	ϕ_o	$\phi_0 = \left(\frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \right) \cdot 100$	m_s je hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou ve vakuu stanovená vážením na vzduchu v g, m_d je hmotnost vysušeného zkušebního tělesa v g a m_h je hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou ve vakuu stanovená vážením ve vodě v g.
celková	ϕ	$\phi = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r} \right) \cdot 100$	ρ_b je objemová hmotnost v kg/m^3 a ρ_r je měrná hmotnost v kg/m^3

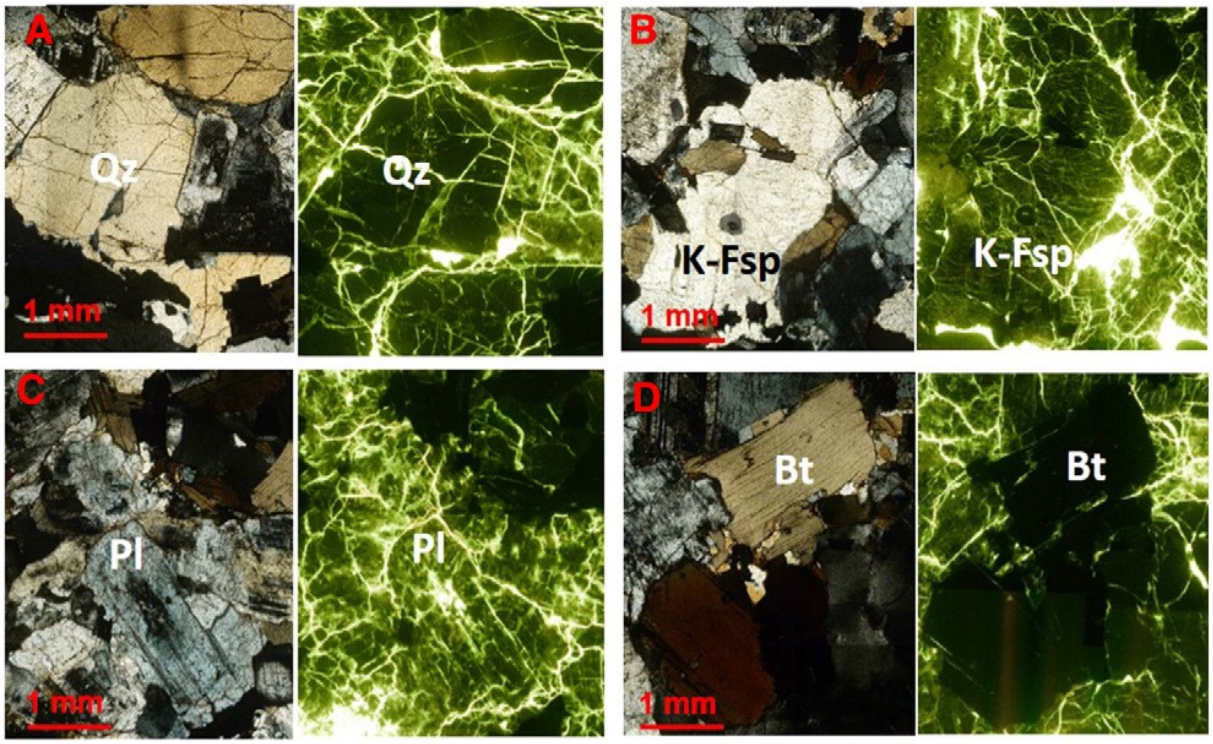
3.3.2. Zobrazovací metody

Přímé zobrazení pórového prostoru během mikroskopických pozorování je jedním z přístupů, který dovoluje dobře prozkoumat vztah pórů k ostatním prvkům vnitřní stavby horniny (tedy k horninotvorným minerálům). Pro většinu pozorování jsou používány plošné preparáty (výbrusy, nábrusy), jež jsou následně zkoumány pomocí optického nebo elektronového mikroskopu, případně jinými detekčními metodami. Před vlastním pozorováním je zpravidla nutné použít některou z četných metod úpravy preparátů (Tab. 3), jimiž se zvýrazní přítomné pórové prostory.

Tab. 3. Přehled vybraných používaných postupů při vizualizaci mikrotrhlin / pórů v horninách (upraveno dle Přikryla 2015).

Postup přípravy vzorku před pozorováním	Způsob pozorování	Citace
Selektivní úprava povrchu paprskem iontů (ion thinning)	SEM, TEM	Barber (1970), Sprunt a Brace (1974)
Usazování uhlíku vysrážením z furfurylalkoholu (furan-2-ylmethanolu)	OM	Simmons a Richter (1976)
Elektrochemické usazování mědi v mikrotrhlinách	OM	Simmons a Richter (1976)
Nasycení mikrotrhlin indexovým olejem v evakuovaném vzorku	OM	Simmons a Richter (1976)
Replikace pórového prostoru vhodným plastem a následné odloužení horninového materiálu (vhodné pro některé karbonátové horniny)	OM	Nuss a Whiting (1947), Pittman a Duschatko (1970)
Aplikace fluorescenčního barviva na leštěném povrchu	makroskopické pozorování	Ali a Weiss (1968), Gradner a Pincus (1968)
Zvýraznění (obarvení) pórového prostoru výbrusu po jeho přípravě	OM	Ruzyla a Jezek (1987)
Zvýraznění (obarvení) pórového prostoru celkového vzorku aplikací různých rozpustných činidel (např. fluorescein)	OM, SEM	Rassineux et al. (1987), Alber a Hauptfleisch (1999)
Zaplnění pórového prostoru kovem s nízkým bodem tání (např. Woodův kov)	OM, SEM	Scrivener a Nemati (1996)
Audioradiografické mapování trhlin (např. s využitím vzorků s pórovým prostorem zaplněným polymetylmetakrylátem s ^{14}C)	fotocitlivý papír	Kelosaki et al. (2006)
Zvýraznění (obarvení) pórového prostoru celkového vzorku směsí pryskyřice (např. epoxydové) s fluorescenčním barvivem a následná příprava výbrusu	UV OM	Anselmetti et al. (1998), Nishiyama a Kusuda (1994, 1996), Chen et al. (2000), Přikryl (2015)

Jedním z nejrozšířenějších přístupů přípravy vzorků před vlastním pozorováním v optickém mikroskopu, je napouštění pórového prostoru směsí epoxidové pryskyřice s barvivem, které zvýrazní pórový prostor ve viditelném nebo ultrafialovém světle (viz např. Nishiyama a Kusuda 1994, 1996, Tab. 3). Výhodou tohoto přístupu je možnost porovnat mikrostavbu studovaného materiálu v procházejícím či polarizovaném světle s distribucí mikrotrhlin např. v ultrafialovém světle (Obr. 9). Při takovém pozorování mohou být odhaleny mikrotrhliny, které by při běžném pozorování mohly být považovány za uzavřené rozhraní dvou minerálních fází (Obr. 9). Další výhodou tohoto přístupu je možnost kvantifikace četnosti zastoupení mikrotrhlin, či odlišení různých morfologických typů pórového prostoru.



Obr. 9. Porovnání mikrostavby vybraných horninotvorných minerálů (při pozorování v polarizovaném světle) a jejich vztahu k okolním fázím v jednom typu španělských granitů (granit Zarzalejo) a distribuce pórového prostoru dle pozorování v odraženém ultrafialovém světle (snímky s mikrotrhlinami vpravo). Převzato z Freire-Lista et al. (2016).

I přes značné výhody tohoto postupu (přímé pozorování vztahu mezi pórovým prostorem a pevnou hmotou horniny, možnost kvantifikace pozorovaných jevů), má i tento postup určitá omezení. V první řadě je třeba zdůraznit, že pozorování probíhá v ploše, kdežto pórový prostor je složitý trojrozměrný systém, který nelze z plošného pozorování jednoduše aproximovat. Druhým omezením je skutečnost, že tento způsob studia pórového prostoru neumožňuje oddělit otevřenou a uzavřenou pórovitost.

3.3.3. Nepřímé stanovení a odvození

3.3.3.1. Úvod

V posledních desetiletích došlo k rozvoji řady postupů, které dovolují stanovit pórovitost nebo některé porometrické charakteristiky řadou dalších metod. Tyto metody jsou zde souhrnně nazývány jako nepřímé a to zejména z důvodu, že pórový prostor nezobrazují přímo, či ho odvozují z jiné fyzikální charakteristiky. Z řady přístupů budou dále podrobněji diskutovány dva – rtuťová porosimetrie a odvození distribuce pórového prostoru z mnohasměrného ultrazvukového prozařování.

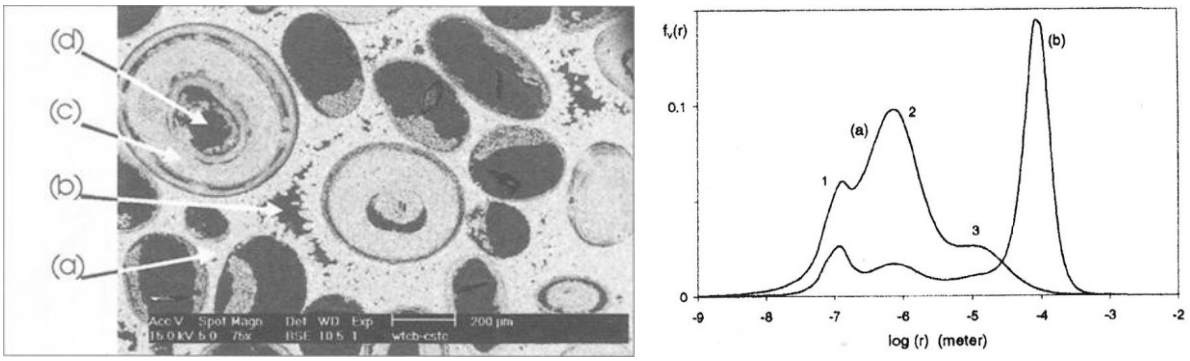
3.3.3.2. Rtuťová porosimetrie

Rtuťová porosimetrie je široce rozšířená měřící metoda, umožňující kvantifikovat velikostní distribuci pórových propojení v rozmezí prvních nm až stovek μm (Rübner a Hoffmann 2006). Metoda je založena na vtláčení nesmáčivé kapaliny (rtuti), která při růstu všesměrného tlaku v tlakové ampuli s měřeným vzorkem proniká do stále menších pórů. Washburn (1921, viz též Drake 1949) dovodil jako první závislost mezi tlakem (P), nutným pro vtlačení nesmáčivé kapaliny do kapilárního průřezu určitého poloměru (r):

$$r = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \varphi}{P},$$

kde γ je povrchové napětí rtuti a φ úhel smáčení stěn póru rtutí.

Po zpracování naměřených dat lze získat informace o otevřené pórovitosti, distribuci velikosti pórů, resp. pórových hrdel (viz dále), kumulativním a celkovém objemu pórů či jejich měrném povrchu. Při výpočtu je vždy uvažován určitý „modelový" tvar pórů, který nemusí přesně odpovídat skutečnému tvaru pórů. Značným omezením této metody je skutečnost, že pro určitý obor použitého všesměrného tlaku není zjištěno objemové zastoupení pórů odpovídající úrovni použitého tlaku, nýbrž objemové zastoupení všech pórových prostor s takovým průřezem vstupních pórových hrdel, umožňující průchod rtuti za dané tlakové úrovně (Rübner a Hoffmann 2006**)**. Tím dochází k nadhodnocení objemového zastoupení pórů o menším průřezu, což bylo doloženo srovnáním výstupů rtuťové porosimetrie a počítačové analýzy obrazu mikroskopických snímků (Obr. 10).



Obr. 10. Porovnání typu pórů v oolitickém vápenci dle elektronového mikroskopu (vlevo: (a) mezičásticové (intergranularní) póry v základní hmotě,(b) mezičásticové (intergranulární) dutiny, (c) intraolitické mikropóry (d) intraolitické dutiny mikropórově propojené) a distribuční křivky relativního objemového zastoupení pórů dle rtuťové prosimetrie (a) a počítačové analýzy obrazu mikroskopického snímku (b) (vpravo). Převzato z Roelse et al. (2001).

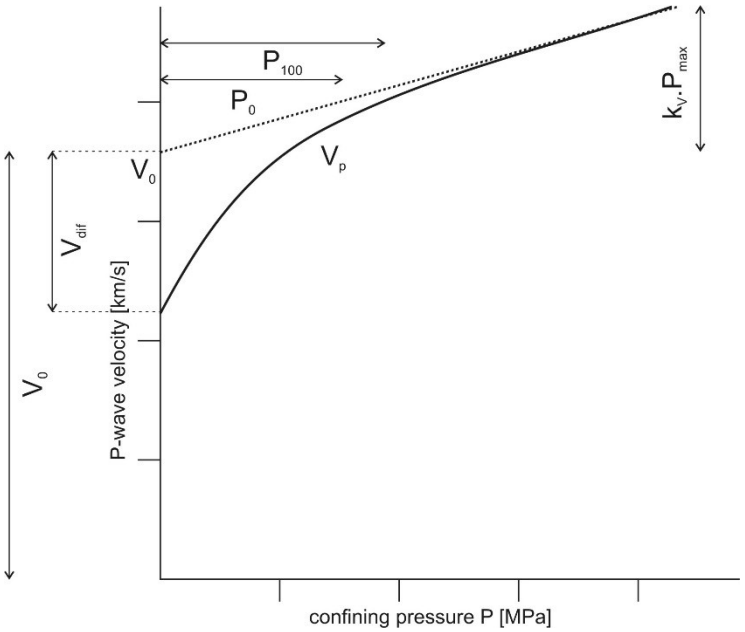
I přes uvedenou nevýhodu má rtuťová porosimetrie široké použití a to zejména při porovnání série vzorků ze stejného materiálu, u nichž lze doložit např. různý stupeň porušení v důsledku zvětrávacích procesů.

3.3.3.3. Mnohosměrné ultrazvukové prozařování a prostorová distribuce pórů

Metoda mnohosměrného ultrazvukového prozařování kulových vzorků hornin za různých tlakových úrovní byla rozpracována pracovníky Geofyzikálního ústavu AV v Praze již od 60. let 20. st. (podrobnosti viz např. Pros et al. 1998). Třebaže tato metoda byla primárně určena pro laboratorní zjišťování elastických vlastností hornin a následnou možnou korelaci se seismickými daty z terénních měření, později došlo ke zkoumání možné aplikace získaných dat i pro zjištění celkové symetrie vnitřní stavby hornin a odvození symetrie uspořádání pórového prostoru a minerálního skeletu (Přikryl et al. 2007).

Vlastní měření je založeno na prozařování kulového vzorku o průměru 50 mm ultrazvukovým signálem ve 132 různých směrech (to je umožněno vzájemnou rotací kulového vzorku a držáku s vysílačem a snímačem ultrazvukového signálu) za různých úrovní všesměrného tlaku (Pros et al. 1998). Po registrování příchozího signálu a odečtu prvního nasazení P-vlny, lze při známé dráze vypočítat rychlost P-vlny v každém měřeném směru. Po vynesení dat na spodní polokouli je prostorová distribuce rychlostí P-vln zpravidla zobrazena pomocí izolinií.

S ohledem na známou nelineární závislost mezi rostoucím všesměrným tlakem a rychlostí P-vln anorganických látek s póry (Pros et al. 1998), je možné vymezit dvě oblasti (Obr. 11): počáteční výrazně nelineární část této závislosti, způsobenou zavíráním orientovaných plochých mikrotrhlin, a část (kvasi)lineární, vyjadřující elastickou odezvu vlastní minerální matrix horniny (Pros et al. 1998, Přikryl et al. 2007). Z odvozených parametrů má pro znázornění prostorové distribuce hustoty pórovitosti význam zejména rozdíl mezi skutečnou a aproximovanou rychlostí P-vln, neboť ve směru kolmém k větší hustotě orientovaných mikrotrhlin bude parametr V_{dif} dosahovat větších hodnot než ve směru s nižší hustotou mikrotrhlin (Přikryl et al. 2007).



Obr. 11. Grafické zobrazení závislosti mezi rostoucím všesměrným tlakem a rychlostí P-vln, dokumentující počáteční nelinearitu v důsledku zavírání mikrotrhlin. Z vlastního měření je nejprve vypočtena rychlost P-vln (V_P), následně jsou dopočítány odvozené parametry: V_0 (aproximovaná rychlost P-vln v materiálu prostém pórů), V_{dif} (rozdíl rychlostí mezi změřenou a aproximovanou rychlostí P-vln za atmosférického tlaku), a k_V (koeficient elastické anisotropie materiálu bez trhlin). Převzato z Přikryla et al. (2007).

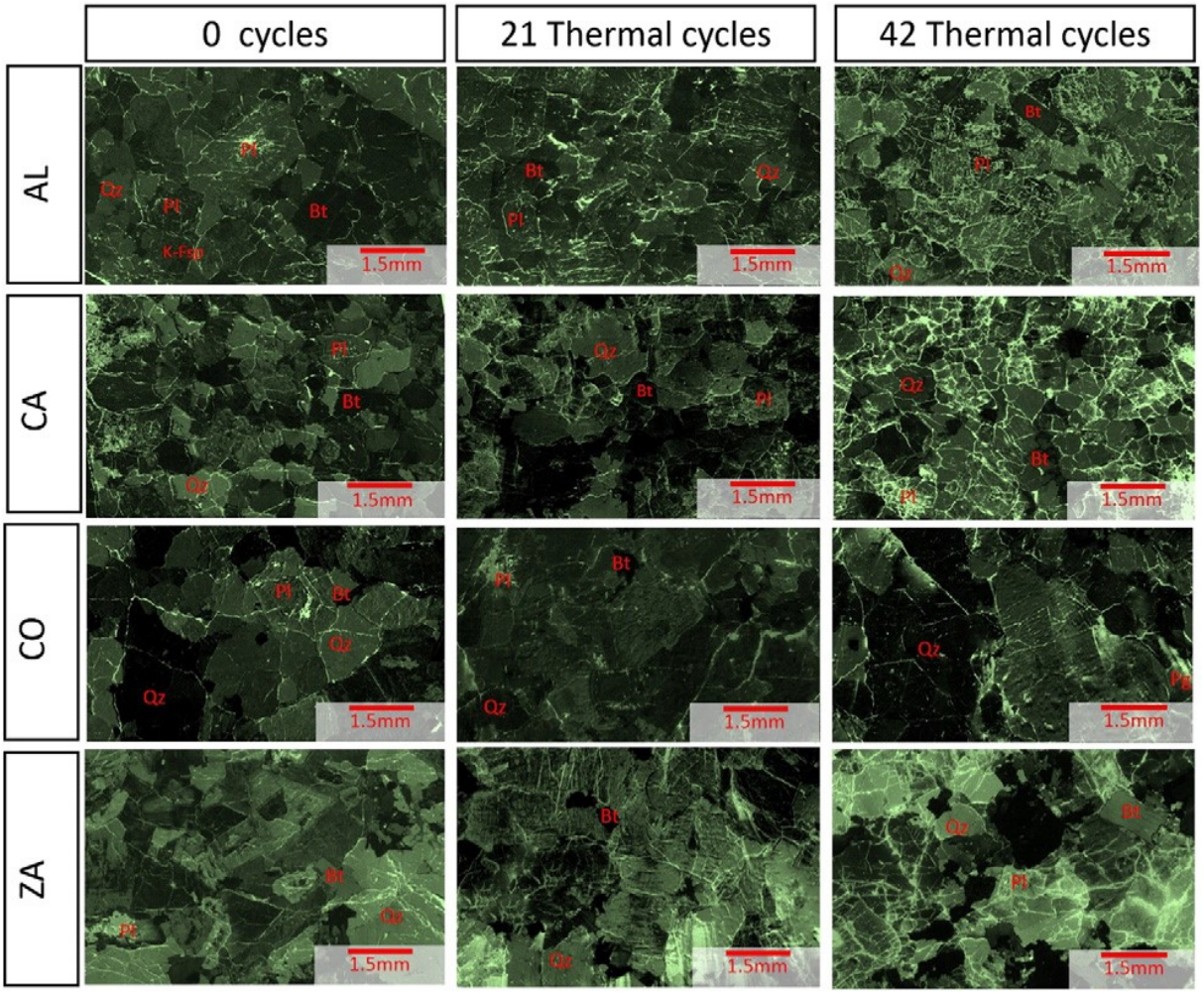
Výše uvedený přístup nelze použít k přímému vyjádření pórovitosti, což je jeho největší nevýhoda. Naopak, jako jediný z dostupných metod, umožňuje zobrazení prostorové distribuce hustoty pórů, čehož lze využít např. v geomechanických studiích, zabývajících se příspěvkem různých typů anisotropie vnitřní stavby hornin na jejich přetvárné a pevnostní charakteristiky (viz kapitola 4.3).

4. Možnosti využití různých metod při studiu granitoidů

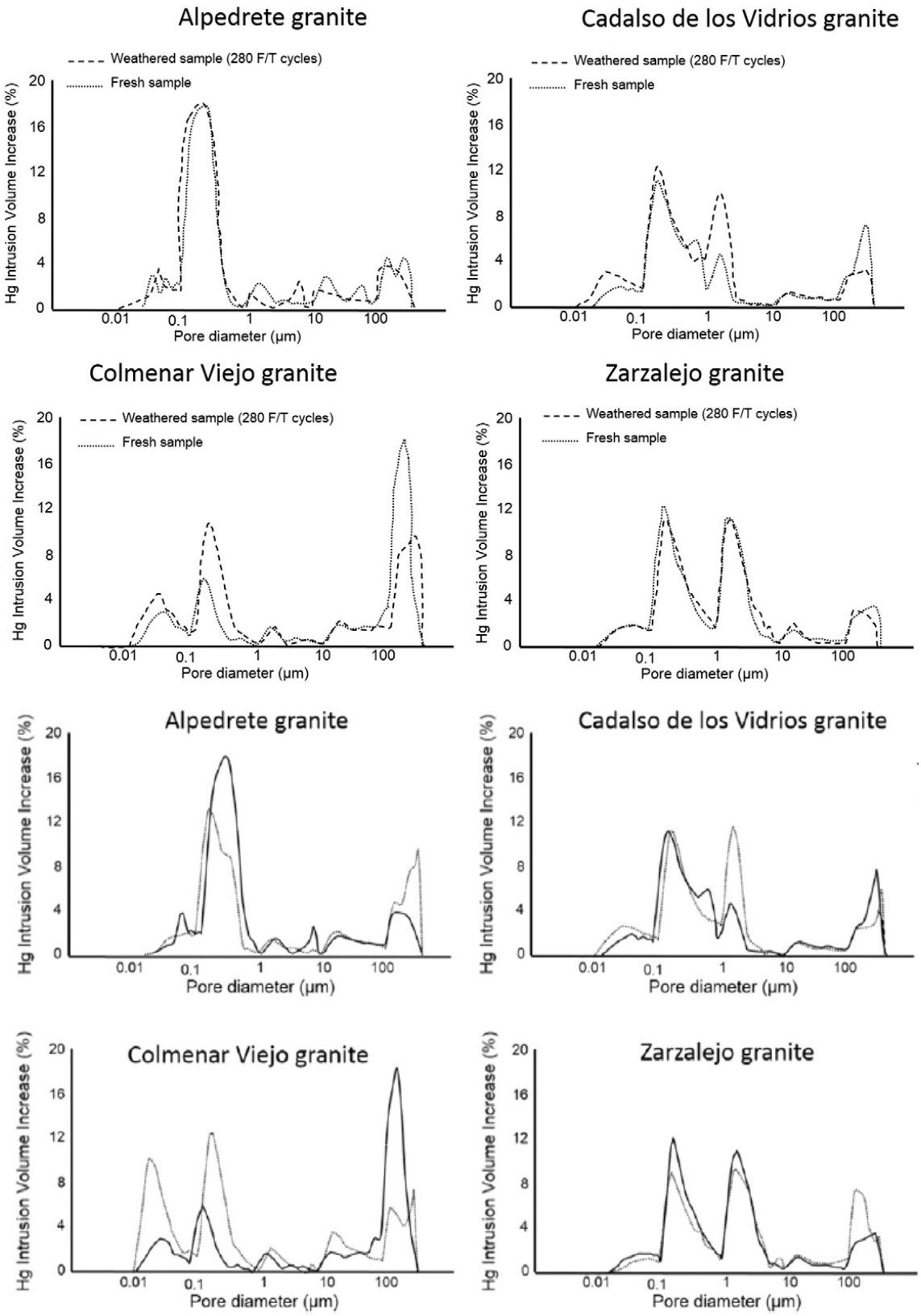
4.1. Odolnost vůči zvětrávání

Jak již bylo zmíněno dříve, pórovitost a porosimetrické charakteristiky jsou jedním z důležitých údajů při predikci trvanlivosti přírodního kamene (Přikryl 2013). Využití dvou metod kvantitativního stanovení porosimetrických charakteristik a jejich využití při interpretaci odolnosti granitů lze dobře ilustrovat na dvou experimentálních studiích, publikovaných Freire-Listou et al. (2015b, 2016). Autoři použily 4 různé typy španělských granitů, využívaných ve stavebnictví a architektuře.

Při laboratorních pokusech simulovali jednak účinek opakovaného zmrazování a rozmrazování vody v pórovém systému (Freire-Lista et al. 2015b) a opakované teplotní šoky (Freire-Lista et al. 2016). Změny v mikrostavbě studovaných hornin hodnotili mimo jiné pomocí optické mikroskopie s využitím preparátů sycených směsí epoxidové pryskyřice s fluorescenčním barvivem (Obr. 12) a pomocí rtuťové porosimetrie (Obr. 13). Z výstupů optické mikroskopie je dobře patrný nárůst hustoty mikrotrhlin (Obr. 12); výsledky rtuťové porosimetrie navíc prokazatelně odhalily změnu distribuce velikosti pórových hrdel (Obr. 13), vyvolanou křehkým porušením studovaných granitů v důsledku použitých zatěžkávacích klimatických cyklů.

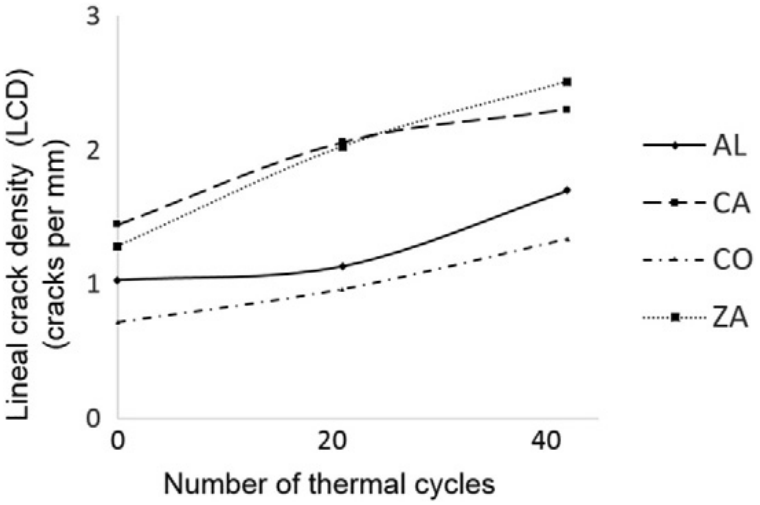


Obr. 12. Mikrofotografie 4 různých typů španělských granitů (AL = granit Alpedrete, CA = granit Cadalso de los Vidrios, CO = granit Colmenar Viejo, ZA = granit Zarzalejo) v přirozeném stavu (levý sloupec), po 21 cyklech tepelného namáhání (prostřední sloupec) a po 42 cyklech tepelného namáhání (pravý sloupec). Uvedené snímky jsou složené z obrazu pozorovaného v polarizovaném světle e v ultrafialovém odraženém světle. Vysvětlivky zkratek minerálů: Bt = biotit, K-Fsp = draselný živec, Qz = křemen, Pl % plagioklas. Převzato z Freire-Lista et al. (2016).



Obr. 13. Relativní distribuce pórových hrdel (vyjádřeno jako průměr průřezovou plochou) 4 různých typů španělských granitů v přirozeném stavu (tečkované křivky v horních 4 grafech, plná křivka ve spodních 4 grafech) a po 280 cyklech zmrazování/rozmrazování (horní 4 grafy) a 42 cyklech tepelného namáhání (spodní 4 grafy). Převzato z Freire-Lista et al. (2015b, 2016).

Výše zmíněná experimentální data autoři (Freire-Lista et al. 2016) dále kvantifikovali pomocí počítačové analýzy obrazu a vyjádřena pomocí lineární hustoty mikrotrhlin (počet mikrotrhlin na mm délky). V případě rostoucí počtu cyklů je dobře patrná positivní lineární korelace (Obr. 14).

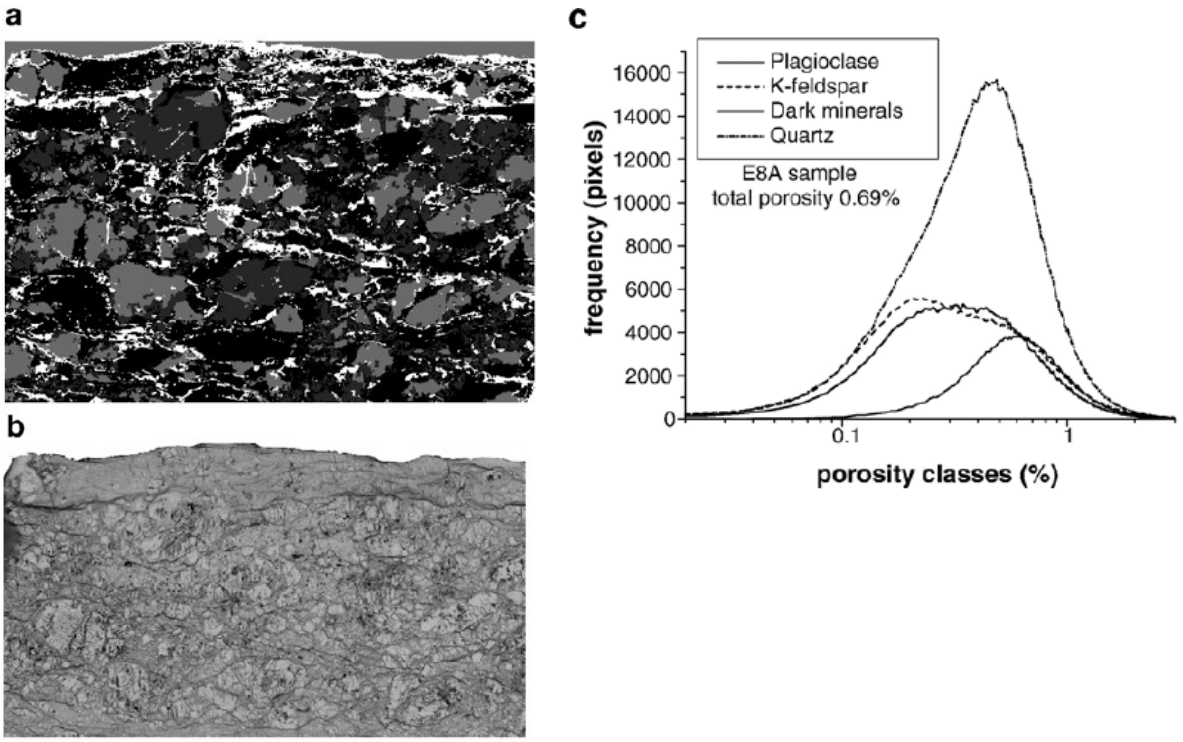


Obr. 14. Vztah mezi počtem cyklů tepelného namáhání a nárůstem hustoty mikrotrhlin 4 různých typů španělských granitů (AL = granit Alpedrete, CA = granit Cadalso de los Vidrios, CO = granit Colmenar Viejo, ZA = granit Zarzalejo). Převzato z Freire-Lista et al. (2016).

4.2. Studium pórového prostředí horniny hlubinných úložišť

Trvalé uložení radioaktivního odpadu je v řadě zemí plánováno v tzv. hlubinných úložištích v krystaliniku, resp. ve velkých granitoidních plutonech či batolitech (Pusch 1994). Jedním z důvodů této volby je nízký stupeň rozpukání i velice malá propustnost granitů nepostižených zvětrávacími či tektonickými procesy. Ale i v tak málo pórovitých horninách, jakými jsou granitoidy, má studium pórového prostředí a potenciálních transportních drah fluid či radionuklidů nesmírný význam z hlediska dlouhodobé bezpečnosti úložiště.

Jednou z metod, která byla navržena pro detailní studium pórového prostředí včetně jeho vazby k pevné hmotě horniny, spočívá v penetraci pórového prostoru směsí nízkoviskózního akrylátu smíchaného se značkovačem (^{14}C) a následném snímkování pomocí autoradiografie (Kelokaski et al. 2006). Výhodou tohoto přístupu je možnost pozorování přítomných pórů v rozměrech od cm do mm spolu s možností souběžného studia horninotvorných minerálů mikroskopickými metodami (Obr. 15). Matematickým zpracováním získaných snímků (Obr. 15a), doplněné o autoradiografický záznam distribuce pórů (Obr. 15b) a následné kvantitativní vyhodnocení pomocí počítačové analýzy obrazu potom dovoluje klasifikovat různé typy pórovitosti i ve vazbě k jednotlivým mineralogickým fázím (Obr. 15c).

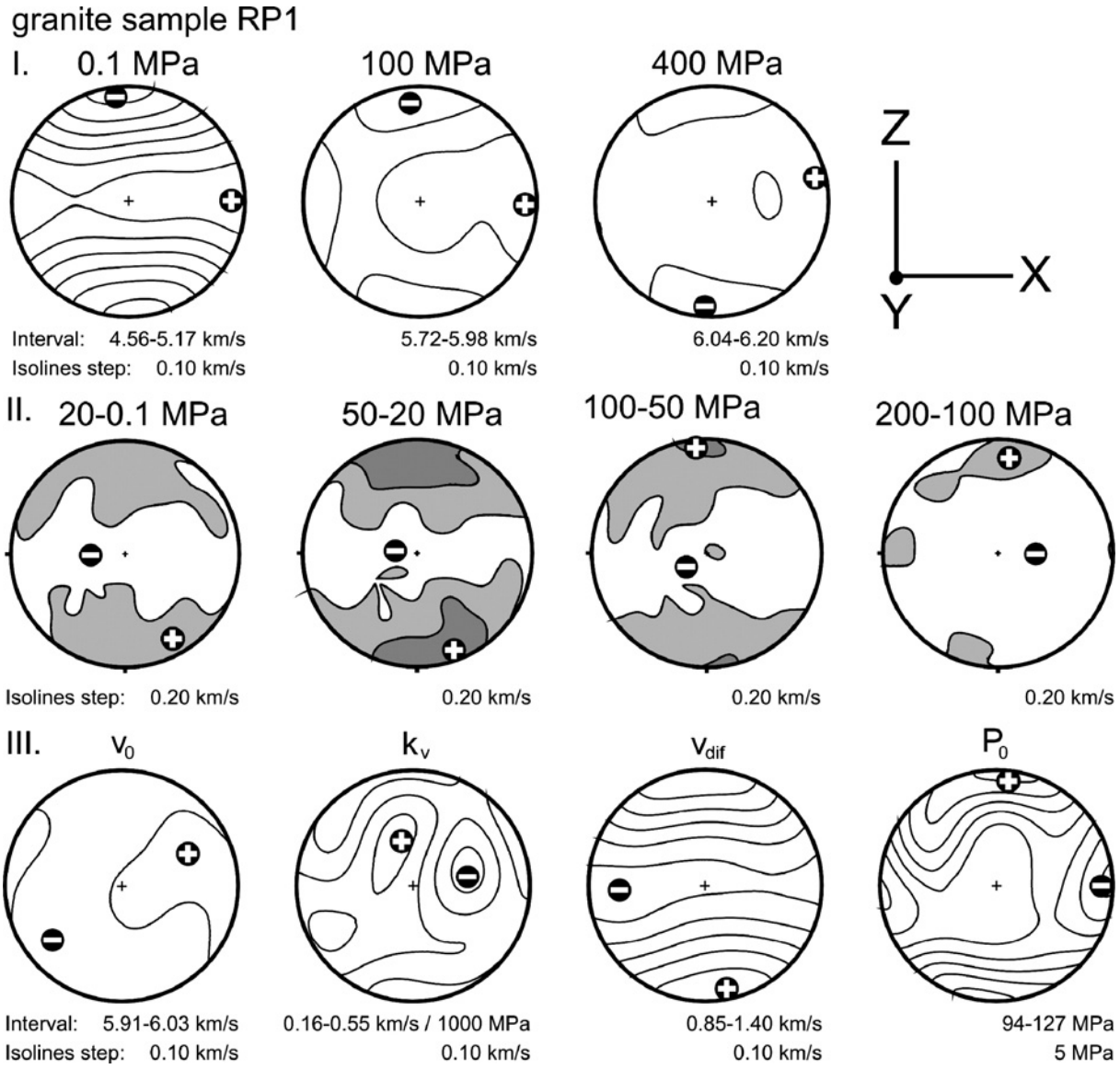


Obr. 15. Příklad autoradiografického zpracování mikrotrhlin v granitu. A = mikroskopický snímek (SEM/EDS ve zpět odražených elektronech) jednoho ze studovaných granitů (vzorek E8) po částečné transformaci odstínů šedi (křemen je černý, plagioklas tmavě šedý, K=živec světle šedý, těžké minerály bílé), B = autoradiografický snímek té samé oblasti dokumentující rozdílnou hustotu pórovitosti (póry vyznačeny temně šedou až černou), C = histogram četnosti přítomných pórů ve vztahu k jednotlivým horninotvorným minerálům. Převzato z Kelokaski et al. (2006).

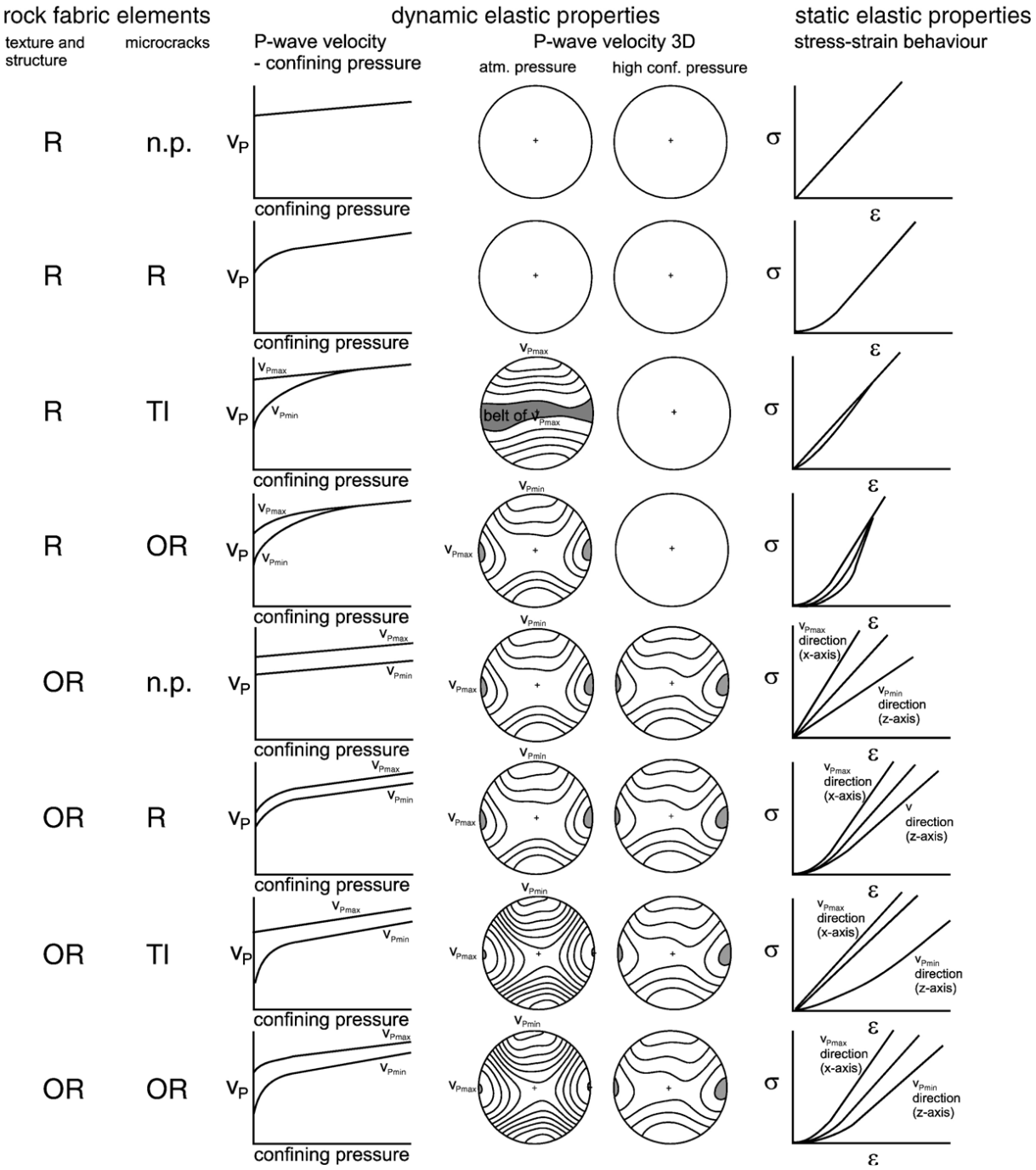
4.3. Geomechanické modely

Posledním příkladem studia pórovitosti, který bude v této práci rozebrán, se týká možnosti využití dat, získaných během mnohasměrného ultrazvukového prozařování. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, vlastní měření probíhá na pečlivě opracovaných zkušebních tělesech tvaru koule, jež jsou v 132 nezávislých směrech prozařována ultrazvukovým signálem za různých úrovní všesměrného tlaku (v rozsahu od atmosférického tlaku do 400 MPa). Nárůst všesměrného tlaku vede k postupnému uzavírání přítomných mikrotrhlin, přičemž od určité tlakové úrovně se daný materiál začíná chovat elasticky (rychlost průchodu elastických vln tedy závisí pouze na elastických parametrech přítomných horninotvorných minerálů). Při dalším matematickém zpracování naměřených dat a jejich zobrazení (např. promítnutí distribuce rychlosti P-vln na spodní polokouli), je možné zobrazit např. přednostní nárůst rychlosti podélných vln v určitém směru (řádek II. na obr. 16), který odpovídá směru, v němž dochází k největší deformaci v důsledku uzavírání přítomných mikrotrhlin.

Výše uvedené odvození, podpořené experimentálními výzkumy následně posloužilo využito k definování určitých základních typů geomechanické odezvy hornin na základě různých typů uspořádání vnitřní stavby (isotropní, transversálně isotropní, anizotropní) a vlivu přítomných mikrotrhlin s různou symetrií prostorového uspořádání (viz Obr. 17, Přikryl et al. 2007).



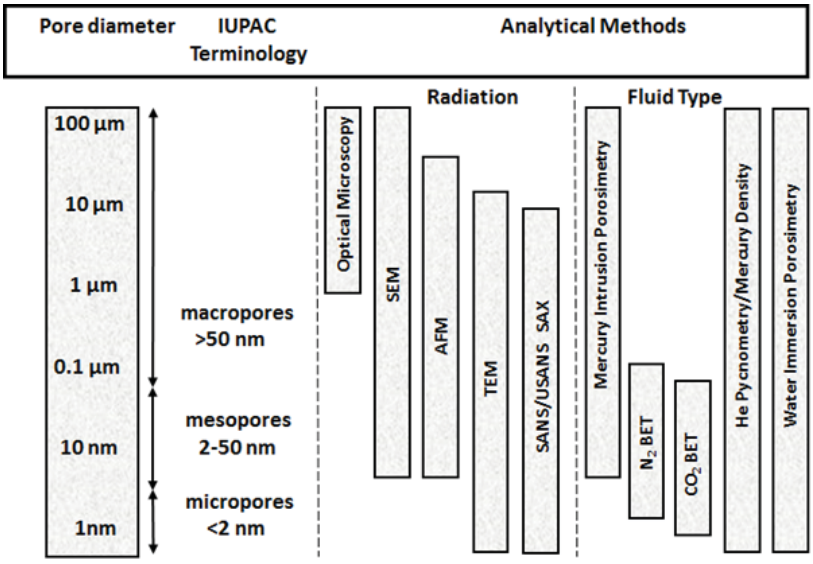
Obr. 16. Příklad prostorového zobrazení experimentálních dat získaných mnohosměrným ultrazvukovým prozařování boršovské žuly za různých úrovní všesměrného tlaku (I.) a odvozených rychlostních rozdílů (II.) a elastických parametrů dle Obr. 11 (III.). Plusové znaménko označuje maximální hodnotu daného parametru. Z izoliniové mapy rozdílů změřených a vypočtených rychlostí (V_{dif}) v řádku III. je dobře patrné přednostní transversálně isotropní uspořádání přítomných mikrotrhlin. Převzato z Přikryla et al. (2007).



Obr. 17. Kompilace vlivu prvků vnitřní stavby hornin na vybrané fyzikální vlastnosti, zejména na vztah mezi rychlostí elastických vln a všesměrného tlaku, na prostorové uspořádání rychlostí P-vln, a na přetvárné chování hornin typu granitoidů v hlavních směrech při jednoosém statickém zatížení. Nelineární odezva na tlakově-rychlostních diagramech a na přetvárných diagramech je způsobena přítomností orientovaných systémů mikrotrhlin. Symetrie prvků vnitřní stavby může být nahodilá, resp. isotropní (R), transversálně isotropní (TI) nebo ortorombická (OR), nižší symetrie nebyla uvažována. Převzato z Přikryla et al. (2007).

4.4. Porovnání metod

Metody studia pórovitosti, popsané v předchozí kapitole (3) a na konkrétních případech více rozebrané v předcházejících oddílech této kapitoly, se značně liší svou vypovídací schopností. Týká se to nejen rozsahu velikosti pórových prostor, které jsou jednotlivé metody schopny zachytit (Obr. 18), ale zejména možností kvantifikovat přítomné póry dle velikosti, propojení či vztahu v dalším stavebním součástem studovaného materiálu či možností vyjádřit prostorovou orientaci tvarově anizotropních pórů.



Obr. 18. Porovnání rozsahu velikosti pórů, které lze zachytit různými pozorovacími a analytickými metodami. Převzato z Anovitz a Cole (2015).

Při zohlednění výše jmenovaných kritérií a porovnání jednotlivých metod je patrné, že ani jedna z metod není schopná přinést vyčerpávající soubor dat (Tab. 4). Výběr metod studia pórovitosti hornin, včetně zde diskutovaných granitoidů tak bude vždy záviset zejména na účelu studia a tom, jaká data budou vyžadována pro případné srovnání s jinými fyzikálními parametry nebo dalšími údaji (např. o trvanlivosti).

Tab. 4. Porovnání různých metod studia pórovitosti s ohledem na získaný typ dat. Navržené hodnocení (+ = metoda vhodná, ± = metoda vhodná s určitým omezením, × = metoda nevhodná / nelze použít) je uzpůsobeno tvarově anizotropním pórům – mikrotrhlinám, typickým pro hlubinné vyvřelé horniny typu granitoidů.

Metody stanovení	**Stanovení pórovitosti (numerické)**	**Kvantitativní distribuce velikosti pórů**	**2D zobrazení včetně vztahu k horninotvorným minerálům**	**Zobrazení prostorové distribuce**
Petrofyzikální	+	×	×	×
Mikroskopické		±	+	×
Rtuťová porosimetrie	+	±	×	×
Mnohosměrné ultrazvukové prozařování	×	×	×	+

5. Závěr

Granity jako typické hlubinné magmatické horniny mají holokrystalickou vnitřní stavbu s velmi nízkým podílem pórového prostoru (1-2 obj. % v případě nezvětralých hornin). Přítomné póry mají zpravidla plošně protáhlé tvary (v přesném slova smyslu se jedná o mikrotrhliny či tzv. štěrbinové póry) s různou vazbou k dalším horninotvorným součástem (např. mikrotrhliny na hranicích zrn, štěpné mikrotrhliny atd.). Přítomnost mikrotrhlin v granitoidních horninách odráží široké spektrum procesů od submagmatického stádia, přes křehké porušení utuhlých těles působením regionálního napětí až po mikrotrhliny vzniklé v důsledku odlehčení erozí nadložních vrstev nebo v důsledku zvětrávacích procesů v supergenních podmínkách.

S ohledem na skutečnost, že granity patří k nejrozšířenějším stavebním kamenů současnosti, má studium jejich pórovitosti zásadní význam nejen kvůli vazbě na další vlastnosti (např. vliv na přetvárné a pevnostní vlastnosti, vztah k propustnosti), ale též významnému vlivu na trvanlivost. Pórovitost granitoidů lze vyjádřit jednoduše jako petrofyzikální veličinu (otevřená či celková pórovitost reprezentující % podíl pórů na jednotkovém objemu. Toto stanovení však neposkytuje žádnou informaci o typech pórů ve smyslu genetickém či ve vztahu k vnitřní stavbě. Z těchto důvodů je nutné doplnit základní petrofyzikální stanovení podrobnějším studiem pórového prostoru.

Z metod, které byly dosud používány, se jako účelná kombinace jeví podrobné mikroskopické studium, doplněné o instrumentální kvantifikaci pomocí rtuťové porosimetrie. Přes omezení, kterými každá z těchto metod trpí (nemožnost přímého pozorování v případě rtuťové porosimetrie, obtížnost 3D pozorování mikroskopickými metodami), se oba přístupy vhodně doplňují a v případě souběžného použití převažují výhody nad již zmíněnými nedostatky.

Z méně častých metod, které se pro studium pórového prostoru nabízejí, lze v určitých případech doporučit mnohosměrné ultrazvukové prozařování za různých úrovní všesměrného tlaku. V případě studia hornin s pórovým systémem representovaným převažujícími mikrotrhlinami, což je případ granitoidů, způsobí růst všesměrného tlaku uzavření mikrotrhlin, jež je doprovázeno nelineární odezvou v rychlosti průchodu ultrazvukového signálu a přechodem k elastické odezvě pevné matrix horniny. Následným matematickým zpracováním prostorové distribuce příslušných elastických parametrů lze odvodit intensitu prostorového uspořádání mikrotrhlin. Tím je daný přístup unikátní v porovnání s ostatními měřícími přístupy; je však nutné brát ho jako doplněk k výše uvedeným „standardnějším“ metodám stanovení.

6. Literatura

Alber M., Hauptfleisch U., 1999. Generation and visualization of microfractures in Carrara marble for estimating fracture toughness, fracture shear and fracture normal stiffness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 8(36): 1065–1071.

Ali S.A., Weiss M.P., 1968. Fluorescent dye penetrant technique for displaying obscure structures in limestone. *Journal of Sedimentary Research* 38(2): 681–682.

Alonso F.J., Vázquez P., Esbert R.M., Ordaz J., 2008. Ornamental granite durability: evaluation of damage caused by salt crystallization. Materiales de Construcción 58(289-290): 191–201.

Anovitz L.M., Cole D.R., 2015. Characterization and analysis of porosity and pore structures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 80: 61–164.

Anselmetti F.S., Luthi S., Eberli G.P., 1998. Quantitative characterization of carbonate pore systems by digital image analysis. *AAPG Bulletin* 82(10): 1815–1836.

Barber D.J., 1970. Thin foils of non-metals made for electron microscopy by sputter-etching. *Journal of Materials Science* 5(1): 1–8.

Baptista-Neto J.A., Smith B.J., McAllister J.J., Silva M.A.M., Castanheira F.S., 2006. Surface modification of a granite building stone in central Rio de Janeiro. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 78(2): 317–330.

Begonha A., 2009. Mineralogical study of the deterioration of granite stones of two Portuguese churches and characterization of the salt solutions in the porous network by the presence of diatoms. *Materials Characterization* 60(7): 621–635.

Bland W., Rolls D., 1998. *Weathering*. Arnold, London.

Bouchez J.L., Delas C., Gleizes G., Nédélec A., Cuney M., 1992. Submagmatic microfractures in granites. *Geology* 20(1): 35–38.

Brown M., 2013. Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin* 125(7-8): 1079–1113.

Brown M., Korhonen F.J., 2009. Some remarks on melting and extreme metamorphism of crustal rocks. In: Dasgupta S. (ed.) *Physics and Chemistry of the Earth's Interior*. Springer, New York, str. 67–87.

Brown M., Korhonen F.J., 2009. Some remarks on melting. *Geological Society of America Bulletin* 125(7-8): 1079–1113.

Carballal R., Paz-Bermúdez G., Sanchez-Biezma M.J., Prieto B., 2001. Lichen colonization of coastal churches in Galicia: biodeterioration implications. *International Biodeterioration & Biodegradation* 47(3): 157–163.

Cæsalpino A., 1596. *De metallici libri tres*. Zannetti A., Roma, 222 str.

Cooper, T. P., Dowding, P., Lewis, J. O., Mulvin, L., O'Brien, P., Olley, J., & O'Daly G. (1991). Contribution of calcium from limestone and mortar to the decay of granite walling. In: Baer N.S., Sabbioni C., Sors A.I. (eds.) *Science, Technology and European Cultural Heritage*. Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, str. 456–461.

ČSN EN 1936 (72 1143), 2000. *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti*. Český normalizační institut, Praha.

ČSN EN 12670 (72 1402), 2001. *Přírodní kámen – terminologie*. Český normalizační institut, Praha.

De Vecchi G., Lazzarini L., Lünel T., Mignucci A., Visonà D., 2000. The genesis and characterisation of '*Marmor Misium*' from Kozak (Turkey), a granite used in antiquity. *Journal of Cultural Heritage* 1(2): 145–153.

Delgado Rodrigues, J. 1994. Measurement and significance of physical properties on granitic rocks. In: Fassina V. (ed.) *Stone material in monuments: diagnosis and conservation*. Second Course, Community of Mediterranean Universities, Heraklion, Crete, May 24-30, 1993, str. 71–81.

Dodge H., 1988. Decorative stones for architecture in the Roman Empire. *Oxford Journal of Archaeology* 7(1): 65–80.

Drake L.C., 1949. Pore-size distribution in porous materials. Application of high pressure mercury. *Industrial and Engineering Chemistry* 41: 780–785.

Dudek A., Malkovský M., Suk M., 1984. *Atlas hornin*. Academia, Praha, 312 str.

Fort R., de Buergo M.A., Perez-Monserrat E.M., Gomez-Heras M., Varas-Muriel M.J., Freire D.M., 2013. Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 46(4): 421–429.

Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J., 2015a. Alpedrete Granite (Spain). A Nomination for the "Global Heritage Stone Resource" Designation. *Episodes* 38(2): 106–113.

Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J., 2015b. Freeze–thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology* 113: 40–51.

Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J., 2016. Thermal stress-induced microcracking in building granite. *Engineering Geology* 206: 83–93.

García-Talegón J., Vicente M.A., Molina E., 1999. Decay of granite monuments due to salt crystallization in a non-polluted urban environment. *Materiales de Construcción* 49(253): 17–27.

Gardner R.D., Pincus H.J., 1968. Fluorescent dye penetrants applied to rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 5(2): 155–156.

Gómez-Heras M., Smith B.J., Fort R., 2006. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology* 78(3-4): 236–249.

Goodman R.E., 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 562 str.

Haapala I., Rämö O.T., 1999. Rapakivi granites and related rocks: an introduction. *Precambrian Research* 95(1-2): 1–7.

Habarta P., 1992. Stavební kámen. In: Kužvart M. (ed.) *Ložiska nerudních surovin ČR II*. Univerzita Karlova, Praha, str. 421–442.

Holub F.V., Cocherie A., Rossi P., 1997. Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex (Czech Republic): constraints on the chronology of thermal and tectonic events along the Moldanubian-Barrandian boundary. Comptes Rendus de L'Academie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science 325(1): 19–26.

Hutton J., 1794. Observations on granite. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 3: 77–81.

Chabas A., Jeannette D., 2001. Weathering of marbles and granites in marine environment: petrophysical properties and special role of atmospheric salts. *Environmental Geology* 40(3): 359–368.

Chappell B.W., White A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology* 8: 173–174.

Chen Y., Nishiyama T., Terada M., Iwamoto Y., 2000. A fluorescent approach to the identification of grout injected into fissures and pore spaces. *Engineering Geology* 56(3-4): 395–401.

Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z., 2002. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 str.

Choquette P.W., Pray L.C., 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG bulletin* 54(2): 207–250.

Iñigo A.C., Vicente M.A., Rives V., 2000. Weathering and decay of granitic rocks: its relation to their pore network. *Mechanics of Materials* 32(9): 555–560.

Johannes W., Holtz F., 1996. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Springer Verlag, Berlin, 334 str.

Kelokaski M., Siitari-Kauppi M., Sardini P., Möri A., Hellmuth K.H., 2006. Characterisation of pore space geometry by ^{14}C-PMMA impregnation—development work for in situ studies. *Journal of Geochemical Exploration* 90(1-2): 45–52.

Klemm D.D., Klemm R., 2001. The building stones of ancient Egypt–a gift of its geology. *Journal of African Earth Sciences* 33(3-4): 631–642.

Klomínský J., Dudek A., 1978. The plutonic geology of the Bohemian Massif and its problems. *Sborník geologických věd, Geologie* 31: 47–69.

Kranz R.L., 1983. Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics* 100(1-3): 449–480.

Lamas B.P., Brea M.R., Hermo B.S., 1995. Colonization by lichens of granite churches in Galicia (northwest Spain). *Science of the Total Environment* 167(1-3): 343–351.

Le Maitre R.W., ed., 2004. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. 2nd ed., Blackwell, Oxford, 236 str.

Leveson D.J., 1966. Orbicular rocks: a review. *Geological Society of America Bulletin* 77(4): 409–426.

Loiselle M.C., Wones D.R., 1979. Characteristics of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 11: 468.

Momeni A., Khanlari G.R., Heidari M., Bagheri R., Bazvand E., 2015. Assessment of physical weathering effects on granitic ancient monuments, Hamedan, Iran. *Environmental Earth Sciences* 74(6): 5181–5190.

Mosch S., Siegesmund S., 2007. Statistisches Verhalten petrophysikalischer und technischer Eigenschaften von Naturwerksteinen. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 158(4): 821–868.

Murray H., Bundy W., Harvey C., eds., 1993. *Kaolin Genesis and Utilization*. Special Publication No. 1. The Clay Minerals Society, Boulder (CO), 341 str.

Nédélec A., Bouchez J.-L., 2015. *Granites. Petrology, Structure, Geological Setting, and Metallogeny*. Oxford University Press, Oxford, 335 str.

Nishiyama T., Kusuda H., 1994. Identification of pore spaces and microcracks using fluorescent resins. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 31(4): 369–375.

Nishiyama T., Kusuda H., 1996. Application of a fluorescent technique to the study of the weathering process. *Engineering Geology* 43(4): 247–253.

Nuss W.F., Whiting R.L., 1947. Technique for reproducing rock pore space. *AAPG Bulletin* 31(11): 2044–2049.

O'Brien P.F., Bell E., Santamaria S.P., Boyland P., Cooper T.P., 1995. Role of mortars in the decay of granite. *Science of the Total Environment* 167(1-3): 103–110.

Pittman E.D., Duschatko R.W., 1970. Use of pore casts and scanning electron microscope to study pore geometry. *Journal of Sedimentary Research* 40(4): 1153–1157.

Pivko D., 2004. World's quarries of commercial granites – localization and geology. In: Přikryl R. (ed.) *Dimension stone*. A.A.Balkema, Leiden, str. 147–152.

Porto M.C., Hermo B.S., Rodrigues J.D., 1991. Agents and forms of weathering in granitic rocks used in monuments. In: Baer N.S., Sabbioni C., Sors A.I. (eds.) *Science, Technology and European Cultural Heritage*. Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, str. 439–442.

Potts A.S., 1970. Frost action in rocks: some experimental data. *Transactions of the Institute of British Geographers* 49: 109–124.

Pros Z., Lokajíček T., Klíma K., 1998. Laboratory approach to the study of elastic anisotropy on rock samples. *Pure and Applied Geophysics* 151: 619–629.

Přikryl R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38(5): 671–682.

Přikryl R., 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology* 87(3-4): 149–162.

Přikryl R., 2013. Durability assessment of natural stone. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 46(4): 377–390.

Přikryl R., 2015. Fluorescent microscopy of stained thin sections: A direct tool for the evaluation of pore space characteristics in porous rocks. In: Lollino G., Giordan D., Marunteanu C., Christaras B., Yoshinori I., Margottini C. (eds.) *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 8: Preservation of Cultural Heritage*. Springer, Cham, str. 539–542.

Přikryl R., Lokajíček T., Pros Z., Klíma K., 2007. Fabric symmetry of low anisotropic rocks inferred from ultrasonic sounding: Implications for the geomechanical models. *Tectonophysics* 431(1-4): 83–96.

Pusch R., 1994. *Waste Disposal in Rock*. Developments in Geotechnical Engineering 76, Elsevier, Amsterdam, 490 str.

Rassineux F., Beaufort D., Meunier A., Bouchet A., 1987. A method of coloration by fluorescein aqueous solution for thin-section microscopic observation. *Journal of Sedimentary Research* 57(4): 782–783.

Roels S., Elsen J., Carmeliet J., Hens H., 2001. Characterisation of pore structure by combining mercury porosimetry and micrography. *Materials and Structures* 34(2): 76–82.

Rübner K., Hoffmann D., 2006. Characterization of mineral building materials by mercury-intrusion porosimetry. *Particle & Particle Systems Characterization* 23(1): 20–28.

Ruzyla K., Jezek D.I., 1987. Staining method for recognition of pore space in thin and polished sections. *Journal of Sedimentary Research* 57(4): 777–778.

Rybařík V., 1983. Stavební kámen. In: Kužvart M. (ed.) *Ložiska nerudních surovin ČR II*. Univerzita Karlova, Praha, str. 408–458.

Rybařík V., 1994. *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské v Hořicích v Podkrkonoší, Hořice v Podkrkonoší, 218 str.

Sanjurjo-Sánchez J., Vázquez E.V., 2013. Characterizing weathering of granite buildings by multifractal analysis of mercury intrusion porosimetry. *Vadose Zone Journal* 12(3): 10 str.

Sawyer E.W., 2010. Migmatites formed by water-fluxed partial melting of a leucogranodiorite protolith: Microstructures in the residual rocks and source of the fluid. *Lithos* 116(3-4): 273–286.

Scrivener K.L., Nemati K.M., 1996. The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete. *Cement and Concrete Research* 26(1): 35–40.

Schiavon N., 2007. Kaolinisation of granite in an urban environment. *Environmental Geology* 52(2): 399–407.

Schiavon N., Chiavari G., Schiavon G., Fabbri D., 1995. Nature and decay effects of urban soiling on granitic building stones. *Science of the Total Environment* 167(1-3): 87–101.

Schön J.H., 2004. *Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics*. Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration, Vol. 18, Elsevier, Amsterdam, 600 str.

Siegesmund S., Sousa L., Knell C., 2018. Thermal expansion of granitoids. *Environmental Earth Sciences* 77(2): 41.

Simmons G., Richter D., 1976. Microcracks in rocks. In: Strens R.G.J. (ed.) *The physics and chemistry of minerals and rocks*. John Wiley & Sons Incorporated, New York, str. 105–137.

Smith M.R., Collis L., eds., 2001. *Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. 3rd ed., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 17.

Sprunt E.S., Brace W.F., 1974. Direct observation of microcavities in crystalline rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 11(4): 139–150.

Sousa L.M., 2014. Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(2): 569–588.

Sousa L.M., del Río L.M.S., Calleja L., de Argandona V.G.R., Rey A.R., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology* 77(1-2): 153–168.

Sousa L., Siegesmund S., Wedekind W., 2018. Salt weathering in granitoids: an overview on the controlling factors. *Environmental Earth Sciences* 77(13): 502.

Sprunt E.S., Brace W.F., 1974. Direct observation of microcavities in crystalline rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 11(4): 139–150.

Starý J., Sitenský I., Mašek D, Hodková T., Vaněček M., Novák J., Horáková A., Kavina P., 2014. *Surovinové zdroje České republiky. Nerostné suroviny, stav 2013*. Ministerstvo životního prostředí, Česká geologická služba – Geofond, Praha, 383 str.

Streckeisen A., 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau* 63(2): 773–786.

Tuğrul A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology* 75(3-4): 215–227.

Tuğrul A., Zarif I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology* 51(4): 303–317.

Warscheid T., Braams J., 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation* 46(4): 343–368.

Washburn E.W., 1921. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 7(4): 115–116.

Wedepohl K.H., ed., 1969. *Handbook of geochemistry*. Vol. 1, Springer, Berlin, 442 str.

Wedepohl K.H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(7): 1217–1232.

Weishauptová Z., Přikryl R., 2004. Porosimetric studies in rocks: methods and application for weathered building stone. In: Přikryl R. (ed.) *Dimension stone. New perspectives for a traditional building material*. A.A.Balkema Publishers, Leiden, str. 237–241.

Werner A.G., 1787. *Kurze Klassifikation und Beschreibung der verschiedenen Gebirgsarten*. Waltherischen Hofbuchhandlung, Dresden, 28 str.

Whalen J.B., 1985. Geochemistry of an island-arc plutonic suite: the Uasilau-Yau Yau intrusive complex, New Britain, PNG. *Journal of Petrology* 26(3): 603–632.

White A.J.R., 1979: Sources of granite magmas. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 11: 539.

White A.J.R., Chappel B.W., 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics* 43: 7–22.

Winkler E.M., 1980. Historical implications in the complexity of destructive salt weathering: Cleopatra's Needle, New York. *Bulletin of the Association for Preservation Technology* 12(2): 94–102.

Winkler E.M., 1997. *Stone in Architecture. Properties, Durability*. 3rd revised ed., Springer-Verlag, Berlin, 313 str.

Young M.E., 2007. Dampness penetration problems in granite buildings in Aberdeen, UK: causes and remedies. *Construction and Building Materials* 21(9): 1846–1859.

Yu S., Oguchi C.T., 2010. Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. *Engineering Geology* 115(3-4): 226–236.

Žák J., Holub F.V., Verner K., 2005. Tectonic evolution of a continental magmatic arc from transpression in the upper crust to exhumation of mid-crustal orogenic root recorded by episodically emplaced plutons: the Central Bohemian Plutonic Complex (Bohemian Massif). *International Journal of Earth Sciences* 94(3): 385–400.