

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 528*

ISSN 1213-418X

**Lukáš Krmíček**

**POSOUZENÍ VLIVU PŘÍTOMNOSTI  
KOMPOZIČNĚ ODLIŠNÝCH ENKLÁV  
NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI  
ZÁKLADOVÝCH HORNIN Z ŽULOVÉHO  
A SYENITOVÉHO MASIVU:  
PILOTNÍ STUDIE Z ČR**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav geotechniky

**RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.**

**POSOUZENÍ VLIVU PŘÍTOMNOSTI KOMPOZIČNĚ ODLIŠNÝCH  
ENKLÁV NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI  
ZÁKLADOVÝCH HORNIN Z ŽULOVÉHO  
A SYENITOVÉHO MASIVU: PILOTNÍ STUDIE Z ČR**

**EFFECT OF THE PRESENCE OF COMPOSITIONALLY DISTINCT  
ENCLAVES ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES  
OF ROCKS FROM GRANITE AND SYENITE MASSIFS:  
A PILOT STUDY FROM THE CZECH REPUBLIC**

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE  
OBOR: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



BRNO 2016

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

mechanika hornin, systém enkláva-granitoid, systém enkláva-syenitoid, skleroskopická tvrdost, pevnost v jednoosém tlaku, pevnost v příčném tahu

## **KEYWORDS**

rock mechanics, enclave-granitoid system, enclave-syenitoid system, rebound hardness, uniaxial compressive strength, rock tensile strength

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno.

# OBSAH

1	ÚVOD .....	6
2	MAFICKÉ MIKROGRANULÁRNÍ ENKLÁVY .....	6
2.1	Základní charakteristika .....	6
2.2	Horniny s mafickými mikrogranulárními enklávami ve stavební praxi .....	7
3	VYBRANÉ FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN .....	9
3.1	Ultrazvukové prozařování .....	9
3.2	Skleroskopická tvrdost .....	9
3.2.1	<i>Shoreho skleroskop</i> .....	10
3.2.2	<i>Schmidtovo kladívko</i> .....	10
3.3	Pevnost v jednoosém tlaku .....	11
3.4	Pevnost v příčném tahu .....	11
4	STUDOVANÉ LOKALITY .....	12
5	METODIKA .....	13
6	HLAVNÍ DOSAŽENÉ VÝSEDKY .....	14
6.1	Skleroskopická tvrdost .....	14
6.2	Pevnost v jednoosém tlaku .....	19
6.3	Pevnost v příčném tahu a dynamické elastické parametry .....	20
7	DISKUZE .....	23
7.1	Vliv přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv na fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin .....	23
7.2	Zařazení do kontextu předchozích studií .....	23
7.2.1	<i>Jednoosá tlaková pevnost v rámci sledovaného regionu</i> .....	23
7.2.2	<i>Korelace mezi Schmidtovou skleroskopickou tvrdostí a jednoosou tlakovou pevností</i> .....	25
7.2.3	<i>Korelace mezi Shoreho skleroskopickou tvrdostí a jednoosou tlakovou pevností</i> .....	26
7.2.4	<i>Korelace mezi pevností v příčném tahu a jednoosou tlakovou pevností</i> .....	27
7.3	Modelování systému enkláva-granotid a enkláva-syenitoid a implikace pro Mechaniku hornin .....	28
7.4	Predikce možných dopadů realizované studie v rámci vědní disciplíny Mechanika hornin .....	30
8	ZÁVĚR .....	33
9	SEZNAM LITERATURY .....	34
	ABSTRAKT: .....	38
	ABSTRACT: .....	38

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

### Jméno a příjmení:

Lukáš Krmíček

### Datum a místo narození:

21. prosinec 1981, Brno

### Bydliště:

Žitná 1478/15, 621 00 Brno

### Adresa do zaměstnání:

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav geotechniky

Veveří 331/95, 602 00 Brno

Tel.: 541 147 230

E-mail: krmicek.l@fce.vutbr.cz



### Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

1997–2001 Gymnázium, Brno, Vídeňská 47

2001–2006 Masarykova univerzita, PřF, Geologie, titul Mgr.

2006–2011 Masarykova univerzita, PřF, Geologie, titul Ph.D.

2013 Masarykova univerzita, PřF, Geologie, titul RNDr.

### Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

2006–2011 Masarykova univerzita, Fakulta přírodovědecká, Ústav geologických věd (odborný pracovník)

od 2011 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební – hlavní pracovní poměr (od r. 2011 „Junior Researcher“, od r. 2012 odborný asistent)

od 2014 Geologický ústav AV ČR, v. v. i. – vedlejší pracovní poměr (vědecký pracovník)

### Odborné a výzkumné zaměření:

Integrovaný výzkum mineralogických, geochemických a fyzikálně-mechanických vlastností netradičních geomateriálů

### Grantové projekty:

2012–2013 Studium petrologických a fyzikálně-mechanických vlastností v systému enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid (FAST-S-12-1774; VUT v Brně); role v projektu: hlavní řešitel

2012–2015 Podpora tvorby excelentních týmů mezioborového výzkumu na VUT (CZ.1.07/2.3.00/30.0005; MŠMT); role v projektu: člen řešitelského týmu F (Mechanika hornin)

od 2015 Laboratorní testování geomateriálů a identifikace vstupních parametrů materiálových modelů s využitím optimalizačních metod (FAST-S-15-2743; VUT v Brně); role v projektu: člen řešitelského týmu

od 2015 AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie (LO1408; MŠMT); role v projektu: klíčový člen řešitelského týmu

### **Výběr ze zahraničních vědeckých stáží:**

2008 (2 měsíce)	Mapování hornin a geologických rizik v SZ Íránu (provincie Východní Ázerbájdžán) v rámci zahraničního rozvojového projektu České geologické služby
2012–2015	Krátkodobé vědecké pobyty (6 měsíců) v Německém národním centru pro geovědy v Postupimi (Wissenschaftspark Albert Einstein). V rámci stáží bylo prováděno komplexní studium netradičních geomateriálů. Autor zde jako první na světě stanovil izotopové poměry $\delta^7\text{Li}$ u studovaných typů geomateriálů.
2013 (3 měsíce)	Pobyt na vědecké stanici Johanna Gregora Mendela v Antarktidě; iniciace vybudování unikátní VUT laboratoře na testování urychleného stárnutí plastů v podmínkách Antarktidy
2014 (1 týden)	Vědecký pobyt na „Qeqertarsuaq Arctic Station“ na grónském ostrově Disko
2014 (2 týdny)	Vědecký pobyt na Islandu
2014 (1 měsíc)	Vědecký pobyt na Faerských ostrovech
2015 (1 měsíc)	Ladakh (Malý Tibet v indickém Himálaji): orientační průzkum podloží lokality, na které je budována 33 metrů vysoká socha Buddha

### **Publikační a tvůrčí činnost:**

- 10 článků v impaktovaných vědeckých časopisech s impakt faktorem (IF) větším než 0,500
- 20 článků ve vědeckých časopisech bez IF
- 33 citací (s vyloučením autocitací) podle Web of Science
- 16 abstraktů ve sbornících světového nebo evropského kongresu
- 13 abstraktů ve sbornících národního nebo mezinárodního kongresu
- Recenzent vědeckých článků v impaktovaných časopisech: The Canadian Mineralogist, Chemical Geology, Journal of Geosciences, Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie
- Člen redakční rady recenzovaného časopisu Acta Musei Moraviae, Scientiae Geologicae, ISSN: 1211–8796

### **Pedagogická činnost:**

FAST VUT v Brně:	BF01 Geologie (přednášky v anglickém jazyce)
	BF01 Geologie (cvičení v anglickém jazyce)
	BF01 Geologie (cvičení v českém jazyce)
	BF92 Základy regionální geologie České republiky pro stavební inženýry (přednášky, nově zavedeno)
	BF92 Základy regionální geologie České republiky pro stavební inženýry (cvičení, nově zavedeno)
PřF MU:	G9271 Principy moderního geochemického modelování v magmatické petrologii (přednášky, nově zavedeno)

### **Členství v mezinárodních organizacích:**

od 2011	The Mineralogical Society of America
od 2013	European Association of Geochemistry

### **Ocenění:**

2011	Cena rektora Masarykovy univerzity pro nejlepší studenty doktorských programů
2013	Bronzová medaile „Signum excellentiae“ děkana Fakulty stavební VUT v Brně

# 1 ÚVOD

*Mechanika hornin* je dynamicky se vyvíjející vědní disciplína, která integruje řadu moderních geologických a geotechnických přístupů. Tato vědní disciplína, která bývá zpravidla rozvíjena na technických vysokých školách, je zcela nezastupitelná při studiu chování geomateriálů a horninového masivu ovlivněného inženýrským dílem. V horninových masivech nezdědka nacházíme různé typy uzavřenin (enkláv), které ovlivňují, nebo alespoň mohou ovlivnit celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti. Přítomnost velkého objemu uzavřenin může hrát, společně s ostatními faktory (např. tektonika), významnou roli při hodnocení geotechnických vlastností horninového masivu.

Z hlediska stavební praxe jsou horninové masivy obsahující enklávy využívány jak při zakládání plošných či liniových staveb, při ušlechtilé kamenické výrobě, tak i při výrobě jednotlivých frakcí stavebního kameniva. Přitom je zřejmé, že fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin, obsahujících kompozičně (mineralogicky a geochemicky) odlišné enklávy, se musejí zákonitě odlišovat od fyzikálně-mechanických vlastností hornin bez enkláv. Lze očekávat, že v bezkřemenných (syenitoidních) horninách může mít přítomnost enkláv vyšší vliv na jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti. Do dnešního dne však zatím nebyla představena ucelená studie, která by se zabývala předmětnou problematikou.

Jak tato zkrácená verze habilitační práce, tak habilitační práce samotná náleží do geotechnické vědní disciplíny *Mechanika hornin* v rámci oboru „K“ (Konstrukce a dopravní stavby) na FAST VUT v Brně a jejím hlavním cílem bylo pilotní posouzení fyzikálně-mechanických vlastností enkláv a porovnání těchto vlastností s jejich hostitelskými granitoidními (dvousložkový systém enkláva-granitoid) a syenitoidními (dvousložkový systém enkláva-syenitoid) horninami odebranými v rámci brněnského a třebíčského masivu. Práce a fotodokumentace v ní obsažená<sup>1</sup> je výsledkem autorova systematického studia a vychází z jeho působení na Fakultě stavební VUT v Brně v rámci interdisciplinárního projektu „EXCELLENT TEAMS“ (CZ.1.07/2.3.00/30.0005) v týmu s vědeckým zaměřením na mechaniku hornin. Horniny byly testovány jak v „Laboratoři mechaniky hornin“ na Ústavu geotechniky Fakulty stavební VUT v Brně, tak v „Laboratoři fyzikálních vlastností hornin“ při Geologickém ústavu AV ČR v Praze. Za svou práci v rámci výše uvedeného interdisciplinárního projektu byl autor oceněn medailí „SIGNUM EXCELLENTIAE“ děkana Fakulty stavební VUT v Brně. Práce byla rovněž finančně podpořena dvěma dvouletými granty specifického výzkumu na VUT v Brně s označením FAST-S-12-1774 „*Studium petrologických a fyzikálně-mechanických vlastností v systému enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid*“ a FAST-S-15-2743 „*Laboratorní testování geomateriálů a identifikace vstupních parametrů materiálových modelů s využitím optimalizačních metod*“.

## 2 MAFICKÉ MIKROGRANULÁRNÍ ENKLÁVY

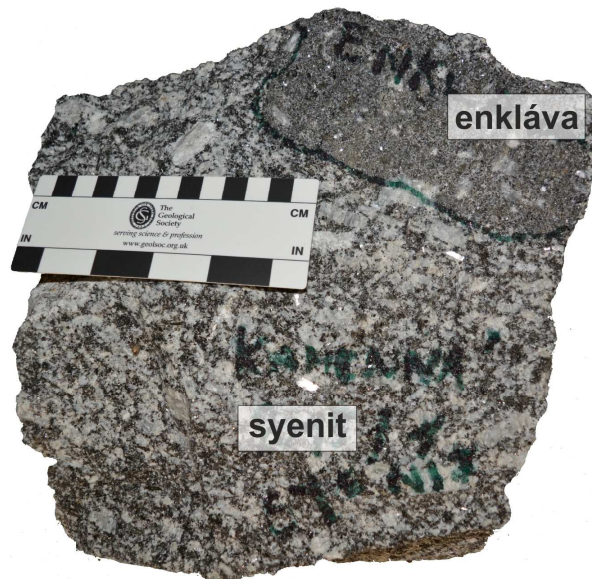
### 2.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA

Jak u křemenem bohatých žulových (granitoidních) hornin, tak u křemenem chudých syenitoidních hornin bývají nejběžnějšími uzavřeninami tzv. mafické mikrogranulární enklávy (např. Didier a Barbarin 1991; Best 2003; Moita et al. 2015). Tvar mafických mikrogranulárních enkláv je většinou vejčitý a jejich velikost se může pohybovat v centimetrových až metrových řádech (obr. 1). Mafické mikrogranulární enklávy bývají zpravidla přednostně orientovány (protáženy) ve směru toku magmatu a mohou se seskupovat do větších těles, které označujeme termínem synplutonické žíly. Jak název napovídá, enklávy se liší od okolních hostitelských hornin svým tmavým (mafickým) zbarvením a jemnozrnější (mikrogranulární) stavbou. Tmavé zbarvení

---

<sup>1</sup> Všechny fotografie, které jsou součástí zkrácené verze habilitační práce, byly pořízeny jejím autorem.

je dáno vyšším zastoupením mafických minerálů oproti hostitelské hornině, zatímco jemnozrnná stavba ukazuje na relativně rychlejší utuhnutí (obr. 1). Geneticky můžeme mafické mikrogranulární enklávy považovat za „kapky“ bazičtější taveniny, která se nedokonale mísila s okolní taveninou charakterizovanou relativně vyššími obsahy  $\text{SiO}_2$  (Vernon 1990; Barbarin 2005; Šlaby a Martin 2008; Šlaby et al. 2008).



**Obr. 1** – Ukázka studované mafické mikrogranulární enklávy (lokalita Kamenná) na kontaktu s hostitelskou horninou syenitového složení. Váha vzorku je 17 kg.

Mafické mikrogranulární enklávy představují (s ohledem na jejich rozšíření) typ enkláv, které byly společně s jejich hostitelskými horninami podrobně studovány v autorově habilitační práci. Mimo mafických mikrogranulárních enkláv mohou horninové masivy obsahovat také další genetické typy uzavřenin, jako jsou například fragmenty cizorodých krystalů (xenokrasty), fragmenty cizorodých hornin (xenolity) nebo různé typy nahloučenin krystalovaných minerálů (kumuláty), které v důsledku vyšší hustoty klesají v magmatickém rezervoáru k jeho dnu (Didier a Barbarin 1991).

## 2.2 HORNINY S MAFICKÝMI MIKROGRANULÁRNÍMI ENKLÁVAMI VE STAVEBNÍ PRAXI

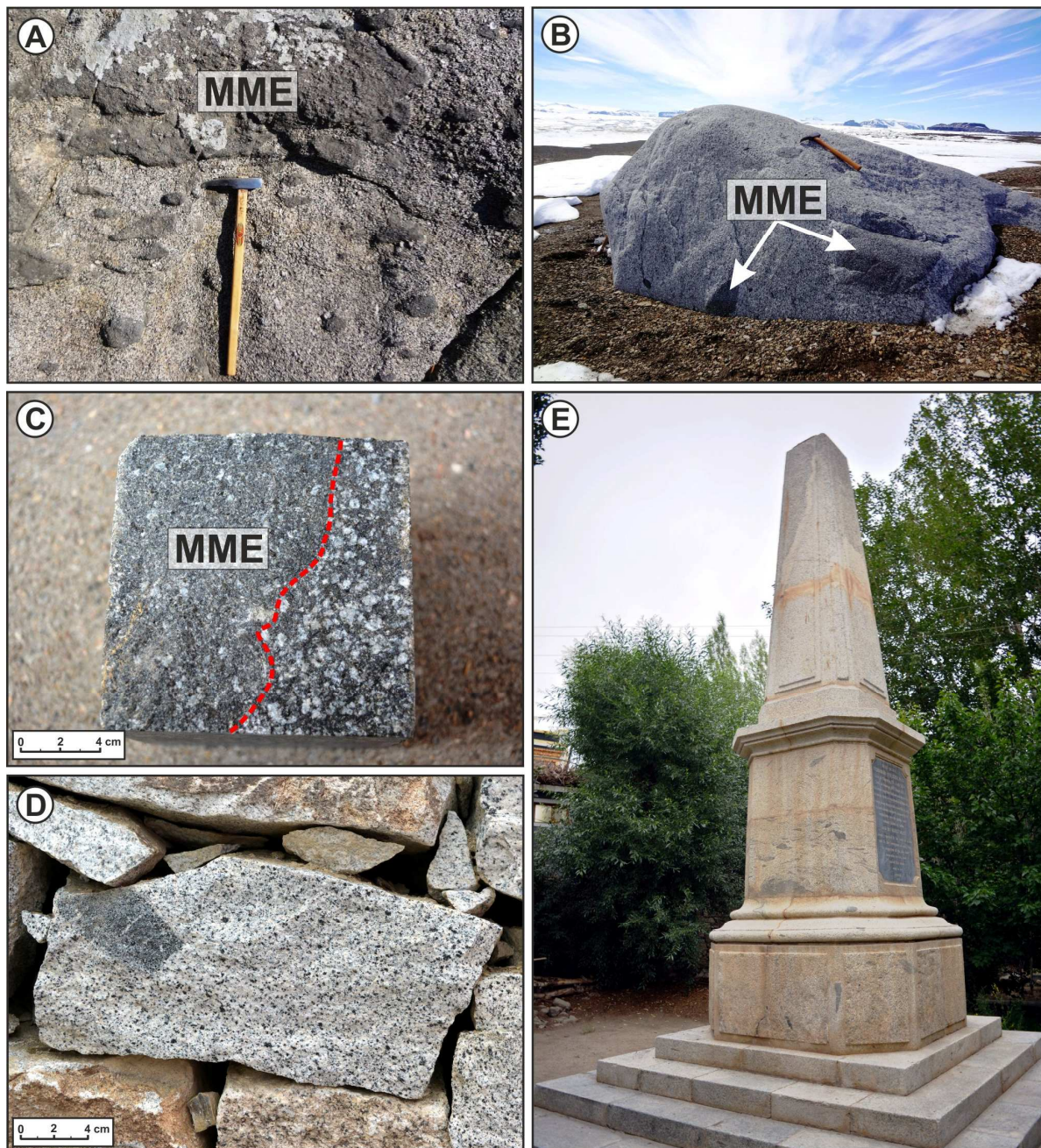
Mafické mikrogranulární enklávy jsou rozšířeny v horninových masivech variabilního geologického stáří. Nejmladší hlubinné vyvřelé horniny, které obsahují mafické mikrogranulární enklávy, vystupují v rámci plio-pleistocenních (třetihory/čtvrtohory) ostrovních oblouků, u kterých již eroze umožnila odkrytí hlubších partií vulkanicko-plutonických intruzivních komplexů (obr. 2A).

Běžně jsou masivy s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv využívány k zakládání staveb, což je v přímé souvislosti s geograficky širokým rozšířením hornin s obsahem enkláv. Autor práce měl možnost sledovat tyto horniny od arktické části Grónska na severu až po Antarktidu na jihu (obr. 2B).

Mimo případy, kdy tyto horniny představují (velmi kvalitní) základovou půdu staveb či prostředí (opět standardně velmi dobré), ve kterém se zřizují podzemní stavby, bývají horniny s enklávami předmětem těžby, a to jak pro ušlechtilou kamenickou výrobu (horniny obsahující tmavé uzavřeniny mají přidanou estetickou hodnotu), tak pro výrobu jednotlivých frakcí drceného kameniva, kdy jednotlivé fragmenty (s ohledem na jejich velikost a četnost výskytu mafických enkláv) mohou být až ze sta procent tvořeny pouze předmětnými enklávami (obr. 2C, 2D, 2E).



Z uvedených skutečností je zřejmé, jak je důležité pro potřeby stavební praxe znát, mimo fyzikálně-mechanických vlastností hostitelských hornin, také fyzikálně-mechanické vlastnosti mafických mikrogranulárních enkláv a také to, jak jejich přítomnost ovlivňuje celkové vlastnosti horninového masivu. Lze například oprávněně očekávat, že místo kontaktu jemnozrnné enklávy s hruběji zrnitou hostitelskou horninou se při dostatečném zatížení může stát predisponovanou plochou nespojitosti, podél které bude docházet k porušení.



**Obr. 2** – Ukázky hornin s mafickými mikrogranulárními enklávami (MME) a jejich užití ve stavební praxi: A – plasticky vyvětralé mafické mikrogranulární enklávy, které jsou součástí mladého (plio-pleistocenního) ostrovního oblouku (ostrov Kos, Řecko); B – žulový bludný balvan s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv (ostrov Jamese Rosse, Antarktida); C – dlažební kostka s vysokým podílem mafické mikrogranulární enklávy; D – příklad užití žulového bloku s enklávou při konstrukci kamenné zídky; E – pomník českého geologa Ferdinanda Stoliczky zhotovený z granitu obsahujícího velké množství enkláv (Leh, Ladakh, indický Himálaj).

### 3 VYBRANÉ FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

Fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin jsou klíčovým parametrem, který je sledován ve stavební praxi (např. Kahraman 2001; Yaşar a Erdoğan 2004; Altindag a Güney 2010 a další). Pro determinaci některých vlastností lze použít paralelně více metodických postupů. Z těchto důvodů již v minulosti byla širokým kolektivem českých autorů vypracována studie nazvaná „Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin“ (Zavoral et al. 1987). Stanovení některých fyzikálně-mechanických vlastností popisují příslušné normy ČSN, respektive ČSN EN-ISO. Studie věnované standardizaci postupů v nadnárodním měřítku byly publikovány jak Americkou asociací pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials – ASTM 1984, 1995, 2004), tak Mezinárodní společností pro mechaniku hornin (International Society for Rock Mechanics – ISRM 1981, 2007, 2015). V neposlední řadě byly některé metodické postupy publikovány v rámci individuálních článků v mezinárodních časopisech *Engineering Geology* nebo *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.

Následující podkapitoly přináší výběr z fyzikálně-mechanických vlastností hornin, které jsou zmiňovány v kapitole 6 „Hlavní dosažené výsledky“ zkrácené verze habilitační práce.

#### 3.1 ULTRAZVUKOVÉ PROZAŘOVÁNÍ

Ultrazvukové prozařování patří v dnešní době mezi standardně využívané nedestruktivní metody sloužící také k charakterizaci hornin (ISRM 2007, 2015). Pro stanovení rychlosti podélných a příčných seismických vln slouží nejčastěji tzv. „pulse transmission technique“ (Winkler a Plona 1982), kdy je pomocí páru piezokeramických snímačů generováno a zachyceno ultrazvukové vlnění prošlé testovaným vzorkem. Z naměřeného času průchodu a známé vzdálenosti mezi snímači jsou vypočteny rychlosti šíření podélné a příčné vlny. Rychlost průchodu vln je závislá jak na minerálním složení horniny (včetně tvaru a velikosti krystalů), tak i na vzájemném uspořádání minerálních fází a volných prostor horniny.

Z rychlostí průchodu ultrazvukových vln a hodnot objemové hmotnosti vzorku je možné, na základně níže uvedených vztahů, stanovit seismické/dynamické elastické parametry horniny, jako jsou Youngův modul ( $E_d$ ) a Poissonův poměr ( $\nu_d$ ) (Zisman 1933; ISRM 2007):

$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad [\text{MPa}] \qquad \nu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$$

kde:  $\rho$  ... objemová hmotnost vzorku [ $\text{kgm}^{-3}$ ]  
 $v_p$  ... rychlost podélné vlny [ $\text{ms}^{-1}$ ]  
 $v_s$  ... rychlost příčné vlny [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Uvedené vztahy platí pro homogenní izotropní prostředí.

#### 3.2 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST

Měření skleroskopické tvrdosti (neboli vzpruživosti) patří mezi nejvíce propracované indexové zkoušky v mechanice hornin. Stanovení skleroskopické tvrdosti je založeno na pružném odrazu závaží (kladiva), které dopadá na zkoušené těleso z předepsané výšky, nebo které je vrženo na těleso energií vyvolanou pružinou zkušebního zařízení. Fyzikální princip této metody je podrobně rozepsán v práci Pavlíka (1973) a Hajna (2011). V případě testování hornin nárazovým kladívkem se jedná o nedokonale pružný náraz dvou těles. Prvním tělesem je vlastní závaží kladívka a druhé je představováno pevnou stranou horniny. Při každém rázu vznikají v obou

tělesech deformace a zapříčiňují tak vznik deformačních sil. Princip měření skleroskopické tvrdosti tak spočívá ve srovnání energie před nárazem kladiva a po jeho nárazu (Hajn 2011).

### 3.2.1 Shoreho skleroskop

Shoreho skleroskop je standardně využíván pro laboratorní stanovení tvrdosti materiálu pomocí pružného odrazu (např. Yaşar a Erdoğan 2004; Shalabi et al. 2007). Shoreho skleroskop pracuje na principu odrazu závaží, které se spouští svisle z výšky a dopadá na vodorovný povrch zkoušeného materiálu volným pádem. V době mimo používání skleroskopu je závaží drženo v horní části pomocí magnetu. Přístroj je uveden do provozu stisknutím tlačítka, které přesune závaží mimo silové působení magnetu. V tomto stavu pak na závaží působí pouze tíhové zrychlení. Závaží je ve tvaru ocelového válečku, který je zakončen diamantovým hrotem. Zkušební těleso je nutné upnout do čelistí svěraku, popřípadě uložit na masivní ocelovou podložku. Po dopadu na zkušební těleso se kladívko odrazí a výška odrazu je ukazatelem povrchové tvrdosti zkoušeného tělesa odečítána na stupnici. Shoreho skleroskop je vhodný jednak ke zkoušení rovnoměrnosti povrchového zakalení kovů, jednak pro určování povrchové tvrdosti hornin. U hornin hrot závaží vniká mezi jednotlivá minerální zrna horniny, nebo se od nich odráží, což ovlivňuje výsledky měření, a tím i jejich rozptyl. Studovaná plocha musí být dostatečně hladká, neboť jakékoliv vychýlení skleroskopu ze svislého směru vede ke zkreslení výsledků vlivem tření kladiva o těleso korpusu (Shalabi et al. 2007; Hajn 2011).

Objem testovaného vzorku může ovlivnit hodnotu odskoku hrotu Shoreho skleroskopu. Jak ukázala studie Altindag a Güney (2006a, 2006b), dosahuje tzv. kritický objem vzorku hodnoty 80 cm<sup>3</sup>. Nad tímto objemem již nedochází k podstatnému ovlivnění naměřených výsledků.

### 3.2.2 Schmidtovo kladívko

Při zkoušce skleroskopické tvrdosti Schmidtovým kladívkem se, obdobně jako u Shoreho skleroskopu, měří velikost odrazu závaží přístroje od zkoušeného povrchu, ze které se stanoví tvrdost (Ayđın 2015). Schmidtovo kladívko se skládá z pouzdra, ve kterém se na vodící tyči pohybuje úderné závaží (kladivo). Kladivo je po uvolnění západky hnáno smrštěním pružiny na úderný čep opírající se o povrch testovaného vzorku. Závaží se po dopadu na tento čep odrazí vlivem dynamické pružnosti horniny. Při tomto zpětném pohybu je společně se závažím unášen i ukazatel stupnice, který následně zůstává v odrazové výšce.

Schmidtovo kladívko je používáno především pro nedestruktivní zkoušení hotových betonových konstrukcí či sledování tvrdnutí betonu na straně jedné a pro testování hornin na straně druhé. Je vyráběno v několika variantách, které se mezi sebou liší velikostí nárazové energie. V mechanice hornin se pro testování používají především typy L a N. Empiricky je možné ověřit existenci pozitivní korelace mezi hodnotami jednoosé tlakové pevnosti a hodnotami stanovenými pomocí Schmidtova kladívka, kdy velikost tvrdosti naměřené Schmidtovým kladívkem je navíc závislá na orientaci kladívka vůči vzorku i na objemové tíze horniny (např. Bieniawski 1984).

Schmidtovo kladívko typu L (*Leicht*) má nízkou rázovou energii, a tím i malou aktivní zónu. Je velmi vhodné především pro testování horninových vzorků v laboratoři. Jeho nárazová energie je rovna 1/3 základního typu N a má hodnotu 0,74 J. V případě měření Schmidtovým kladívkem typu L je nezbytná pevná fixace horninového vzorku.

Schmidtovo kladívko typu N (*Normal*) je vhodné pro terénní testování tvrdosti jednotlivých horninových bloků. Nárazová energie přístroje dosahuje hodnoty 2,207 J. V terénu naměřené hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu N je však nutné nejprve korigovat na vodorovný směr nárazu (Pavlík 1973).



### 3.3 PEVNOST V JEDNOOSÉM TLAKU

Měření pevnosti v jednoosém (prostém) tlaku je klíčový laboratorní parametr sledovaný v mechanice hornin (např. ASTM 1995; ISRM 2007). Tato pevnost odpovídá síle, kterou zkušební těleso snese při namáhání jednoosým tlakem. Jednoosá tlaková pevnost bývá stanovena na pravidelných tělesech (nejčastěji hranol nebo válec) pomocí testovacího lisu. V ideálním případě by měl poměr výšky a šířky testovaného tělesa (štíhlostní poměr) odpovídat hodnotě 2 až 3. Při zkoušení je těleso horniny namáháno jednoosým tlakem  $\sigma_1$ , který se postupně zvyšuje až do porušení testovaného vzorku, kdy druhá dvě napětí  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  (Goodman 1989). Výslednou pevnost lze stanovit jako (ČSN EN 1926:2000):

$$\sigma_c = \frac{F_{tlak}}{A} \text{ [MPa]}$$

kde:  $F_{tlak}$  ... maximální osová síla v době tlakového porušení vzorku [N]  
 $A$  ... počáteční průřezová plocha [cm<sup>2</sup>]

Z pohledu mafických mikrogranulárních enkláv představuje měření jednoosé tlakové pevnosti zásadní mechanický parametr pro jejich charakteristiku v povrchových podmínkách. Poměrně často bývá porovnávána pevnost v jednoosém tlaku stanovená po nasáknutí těles vodou s pevností stanovenou v tzv. „dodaném stavu“. Výslednou hodnotu označujeme jako koeficient změknutí.

Mimo jednoosé tlakové pevnosti bývá méně často stanovována také trojosá tlaková pevnost. Stanovení této pevnosti je z pohledu mechaniky hornin méně sledovaným parametrem, neboť tato pevnost, na rozdíl od jednoosé tlakové pevnosti, necharakterizuje mechanické vlastnosti horniny v jejím aktuálním stavu, ale ve stavu, ve kterém by hornina teoreticky mohla být uložena v určité hloubce v rámci horninového masivu. Navíc, laboratorně bývá zpravidla stanovena pouze tzv. „nepravá“ trojosá pevnost, u které uvažujeme rovnost napětí  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  (Horák 2000).

### 3.4 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Pro stanovení pevnosti v příčném tahu bývá v mechanice hornin nejčastěji aplikována tzv. „brazilská zkouška“ (Carneiro 1943). Podrobný princip této metody přináší ve své souborné publikaci autoři Li a Wong (2013). Výsledky z pevnosti v příčném tahu jsou srovnatelné s výsledky pevnosti v jednoosém tahu. Například poměr pevnosti v příčném a jednoosém tahu může být jak u granitu, tak u syenitu ~1 (srov. Mellor a Hawkes 1971; Andreev 1991a, 1991b).

Při zkoušce v příčném tahu je zkušební těleso horniny namáháno mezi dvěma ocelovými čelistmi. V rámci testovaného tělesa (nejčastěji válcového tvaru), na které působí tlak čelistí, dochází k vektorovému rozkladu tlakové síly na tahovou sílu. Porušení zkušební tělesa nastává při překročení pevnosti v tahu, a to v předem dané rovině, která je vymezena spojnicí protilehlých zatěžujících čelistí. Brazilská zkouška může mít několik modifikací podle tvaru testovaných vzorků. Výpočet pevnosti v příčném tahu pro zkušební těleso válcového tvaru určuje následující vzorec (ČSN EN 12390-6:2001):

$$\sigma_t = \frac{2F_{tah}}{\pi dt} \text{ [MPa]}$$

kde:  $F_{tah}$  ... maximální osová síla dosažená při porušení vzorku příčným tahem [N]  
 $d$  ... průměr válcového zkušební tělesa [mm]  
 $t$  ... tloušťka válcového zkušební tělesa [mm]

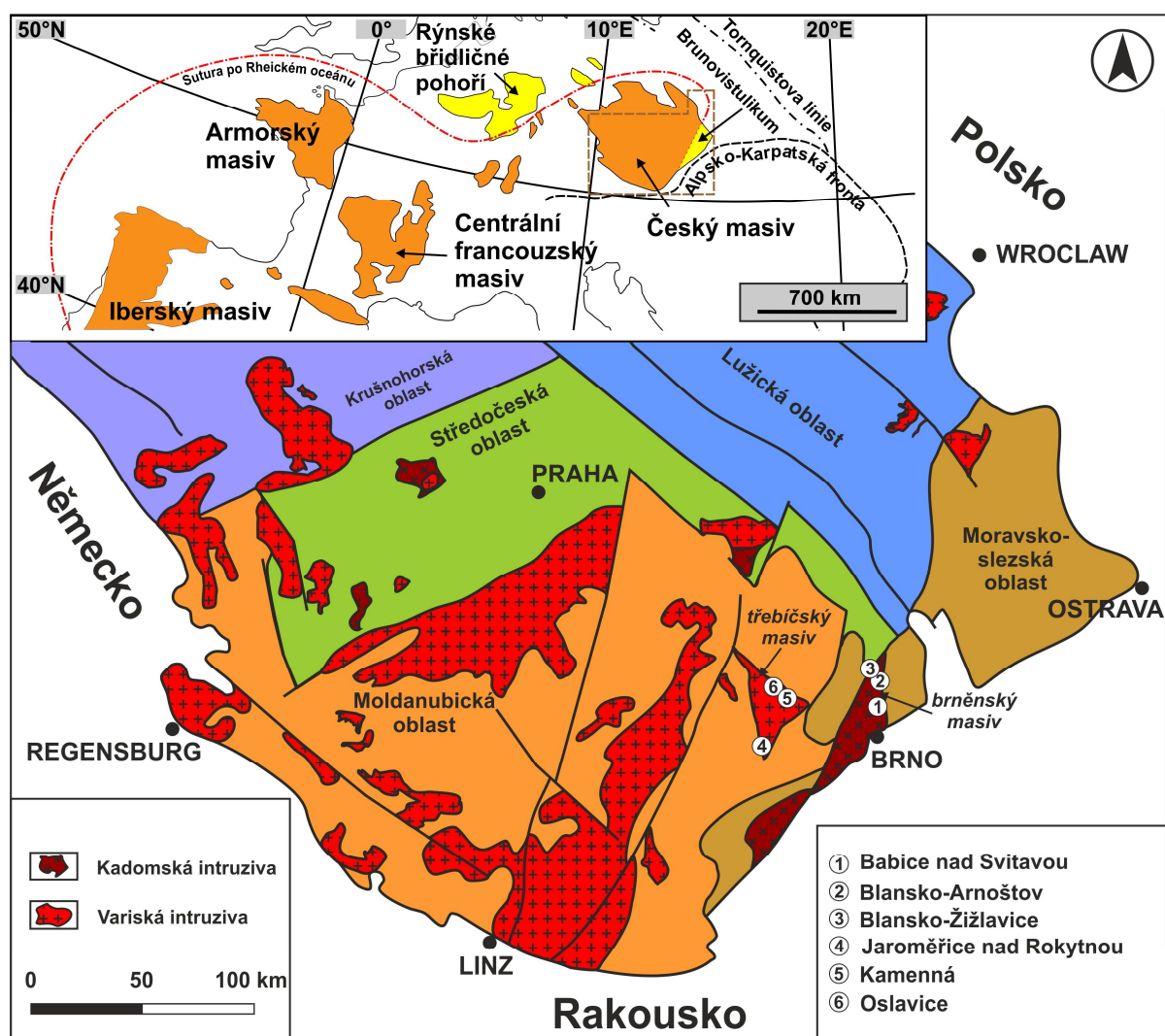
## 4 STUDOVANÉ LOKALITY

Složení hlubinných vyvřelin, které obsahují mafické mikrogranulární enklávy, může být petrograficky variabilní. V zásadě je však lze rozdělit do dvou hlavních horninových skupin, a to na syenitoidy a granitoidy. V případě syenitoidů jde o produkty krystalizace magmatu deficitního na  $\text{SiO}_2$ . Syenitoidy jsou proto chudé křemenem a jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti se díky tomu mohou lišit od granitoidů, které představují produkty krystalizace magmatu přesyceného  $\text{SiO}_2$ .

Přesná lokalizace studovaných výchozů a jejich charakteristika je uvedena v habilitační práci autora (Krmíček 2015).

V případě enkláv v granitoidních horninách byly studovány lokality vystupující v rámci tzv. východní granitoidní zóny brněnského masivu. Studované vzorky byly odebírány z přirozených skalních výchozů a zářezů cest na lokalitách Babice nad Svitavou, Blansko-Arnoštov a Blansko-Žižlavice (obr. 3).

V případě enkláv v syenitodech probíhal terénní výzkum na lokalitách, které jsou geologicky vázány na těleso třebíčského syenitového masivu. Vzorky byly odebírány jak z aktivních lomů (lokality Jaroměřice nad Rokytnou a Kamenná), tak v rámci zářezů cest (lokality Oslavice; obr. 3).



**Obr. 3** – Pozice Českého masivu v rámci evropských variscid (Nance et al. 2010) a jeho základní regionálně geologické členění (Chlupáč a Vrána 1994). Kolečka s čísly odpovídají studovaným lokalitám v rámci brněnského a třebíčského masivu.

## 5 METODIKA

Petrografická klasifikace vzorků východní granitoidní zóny brněnského masivu nejčastěji kolísá (dle modálního obsahu jednotlivých minerálů) mezi granodioritem a tonalitem. Pro zjednodušení jsou dále v textu tyto horniny označovány termínem granitoid a studované vzorky jsou považovány za součást systému enkláva-granitoid. Obdobně petrografická variabilita hornin třebíčského masivu může kolísat nejčastěji mezi melasyenitem až melagranitem. Autor této práce označuje horniny třebíčského masivu souborným termínem syenitoidy, kdy studované vzorky jsou považovány za součást systému enkláva-syenitoid.

Výchozy granitoidních a syenitoidních hornin s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv byly v terénu studovány pomocí Schmidtova kladívka typu N (Proceq). Hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu N byly opraveny na vodorovný směr nárazu podle metodiky Pavlíka (1973) a korekčním koeficientem pro použité kladívko dle metodiky ISRM (2007). Hodnota korekčního koeficientu byla stanovena na Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně.

Terénním studiem bylo ověřeno, že nevhodnější vzorky z hlediska jejich čerstvosti i dostatečné velikosti je možné odebrat pouze v aktivně těžených lomech (obr. 1). Z těchto důvodů bylo pro laboratorní testování mechanických vlastností syenitoidů třebíčského masivu využito vzorků odebraných z lomových stěn na lokalitách Kamenná a Jaroměřice nad Rokytnou. V rámci východní granitoidní zóny brněnského masivu bylo možné v terénu studovat pouze přirozené horninové výchozy. Zde jediná lokalita Blansko-Arnoštov umožňovala odběr relativně čerstvých i dostatečně velkých vzorků vhodných pro zhotovení laboratorních testovacích tělísek.

Před vlastním laboratorním testováním fyzikálně-mechanických vlastností enkláv a jejich hostitelských hornin bylo třeba zhodnotit všechny jejich kompoziční aspekty. Provedená petrografická a geochemická analýza, která však není součástí této zkrácené veze habilitační práce, byla využita jako vhodný doplněk laboratorního studia fyzikálně-mechanických vlastností.

Laboratorní testování skleroskopické tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka typu L (Proceq), Shoreho přístroje – model D (The Shore Instrument & MFG. Co. USA) a stanovení pevnosti v jednoosém tlaku pomocí lisu (VEB WPM Leipzig) bylo provedeno v Laboratoři mechaniky hornin na Ústavu geotechniky FAST VUT v Brně. Před vlastním laboratorním studiem byla z odebraných vzorků zhotovena rozsáhlá série testovacích tělísek kvádrového tvaru, včetně tělísek tvořených z poloviny enklávou a z poloviny hostitelskou horninou. Orientace testovaných tělísek byla volena tak, aby se co nejvíce mechanicky projevil případný vliv kontaktu mezi enklávou a hostitelskou horninou. Objem testovacích tělísek byl dostatečně veliký s průměrnou hodnotou 83 cm<sup>3</sup>. Z tohoto důvodu nemusela být na hodnoty naměřené pomocí Shoreho skleroskopu aplikována korekce navržená v práci Altindag a Güney (2006a, 2006b). Horninová tělíska byla testována jednak v tzv. dodaném stavu, jednak ve vodou saturovaném stavu, kdy byla před vlastním testováním na 48 hodin zcela ponořena do vody. Testování ve vodou saturovaném stavu bylo realizováno z důvodu ověření vlivu mafických mikrogranulárních enkláv na pevnost horninového masivu, který se nachází pod hladinou podzemní vody. Hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu L byly opraveny podle metodiky Bieniawského (1984) a korekčním koeficientem pro použité kladívko.

Vybrané vzorky zdravých enkláv byly dodatečně testovány v Laboratoři fyzikálních vlastností hornin na Geologickém ústavu AV ČR v Praze. Ze vzorků byly zhotoveny testovací tělíska válcového tvaru, u kterých bylo provedeno testování pomocí ultrazvukového prozařování doplněné o stanovení pevnosti v příčném tahu pomocí brazilské zkoušky. Testování ultrazvukem bylo uskutečněno párem piezokeramických snímačů „Panametrics V153“ s rezonanční frekvencí 1 MHz. Brazilská zkouška byla realizována v zatěžovacím lisu MTS 815 (MTS Systems Corporation USA).

## 6 HLAVNÍ DOSAŽENÉ VÝSEDKY

V rámci této kapitoly je podán souhrn nezajímavějších výsledků studia systému enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid z pohledu vědní disciplíny *Mechanika hornin*. Text jednotlivých kapitol se opírá o terénně i laboratorně zjištěná data, která jsou primárně uvedena v rámci jednotlivých tabulek a příloh vlastní habilitační práce autora (Krmíček 2015).

### 6.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST

Terénní měření skleroskopické tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka typu N přineslo zajímavé výsledky. Jak enklávy uzavřené v rámci granitoidů, tak enklávy v syenitoidních horninách vykazují prokazatelně vyšší hodnoty skleroskopické tvrdosti oproti hostitelským horninám. V rámci křemenem bohatého systému enkláva-granitoid mají enklávy v průměru o 11 až 13 % vyšší hodnoty skleroskopické tvrdosti. V rámci křemenem chudého systému enkláva-syenitoid je rozdíl mezi skleroskopickou tvrdostí stanovenou pomocí Schmidtova kladívka typu N ještě markantnější a může dosahovat až 20 %.

Konkrétní hodnoty velikosti odskoku Schmidtova kladívka typu N dosahují u granitoidů brněnského masivu v průměru hodnoty 39 (Blansko-Arnoštov), respektive 42 (Blansko-Žižlavice). Syenitoidy třebíčského masivu vykazují průměrné hodnoty odskoku kladívka 37 (Oslavice) a 46 (Jaroměřice nad Rokytnou a Kamenná). Velikost odskoku kladívka u enkláv uzavřených v granitoidech nabývá v průměru hodnot odskoku 43 (Blansko-Arnoštov), případně 47 (Blansko-Žižlavice). Syenitoidy vykazují hodnoty odskoku 44 (Oslavice), 51 (Kamenná) a 52 (Jaroměřice nad Rokytnou).

Zjištěná skleroskopická tvrdost horninového materiálu je korelovatelná (s využitím níže uvedeného dvouparametrického vztahu) s pevností horniny v jednoosém tlaku (např. Pavlík 1973; Horák 2000). Pro hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu N v systému enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid a laboratorně stanovené hodnoty pro jednoosou tlakovou pevnost (viz kapitola 6.2) tak byly vytvořeny průběhy korelačních křivek (obr. 4 a 5). Křivky byly konstruovány podle dvouparametrického vztahu uvedeného v publikaci Broula (1969):

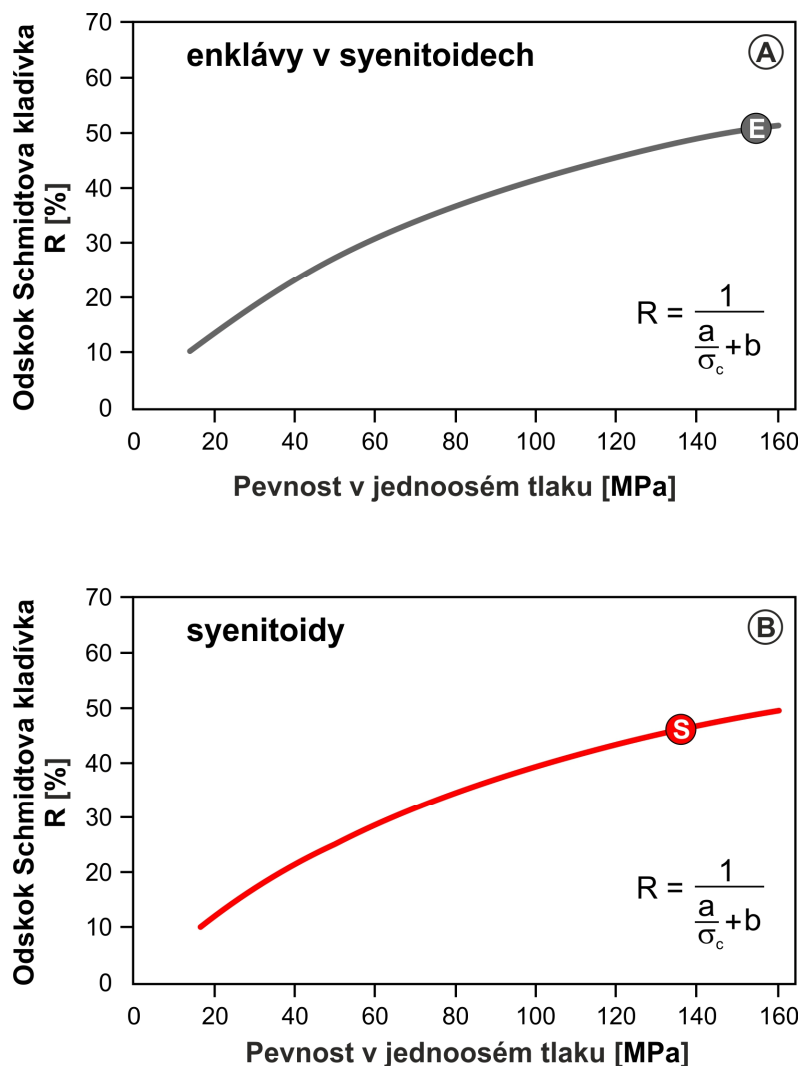
$$R = \frac{1}{\frac{a}{\sigma_c} + b} [\%]$$

kde:  $R$  ... velikost odskoku Schmidtova kladívka typu N [%]  
 $\sigma_c$  ... pevnost horniny v jednoosém tlaku [MPa]  
 $a$  ... parametr křivky [MPa]  
 $b$  ... bezrozměrný parametr křivky

Laboratorní testování horninových vzorků pomocí Schmidtova kladívka typu L ukázalo, obdobně jako u testů kladívkem typu N, na vyšší skleroskopickou tvrdost enkláv v rámci obou sledovaných masivů. S využitím korelačního grafu Bieniawského (1984) byly pro studované granitoidy, syenitoidy a jejich enklávy určeny odpovídající rozsahy hodnot pevností v jednoosém tlaku.

Pro syenitoidy třebíčského masivu kolísají rozsahy pevností v jednoosém tlaku stanovené korelací ze Schmidtova kladívka typu L v rozmezí 41 až 100 MPa s průměrnou hodnotou 56 MPa (obr. 6). Enklávy uzavřené v syenitoidech vykazují vyšší rozsah hodnot pevností (33–98 MPa) a vyšší průměr zjištěných hodnot korelované pevnosti v jednoosém tlaku (68 MPa), tj. o 22 %.

U granitoidů brněnského masivu kolísají hodnoty v užším rozpětí 47 až 56 MPa. Enklávy z těchto hornin vykazují v průměru o 9 % vyšší hodnoty korelované pevnosti v jednoosém tlaku (57 MPa) spojené s celkově vyšším rozpětím hodnot této pevnosti mezi 40 až 68 MPa (obr. 7).



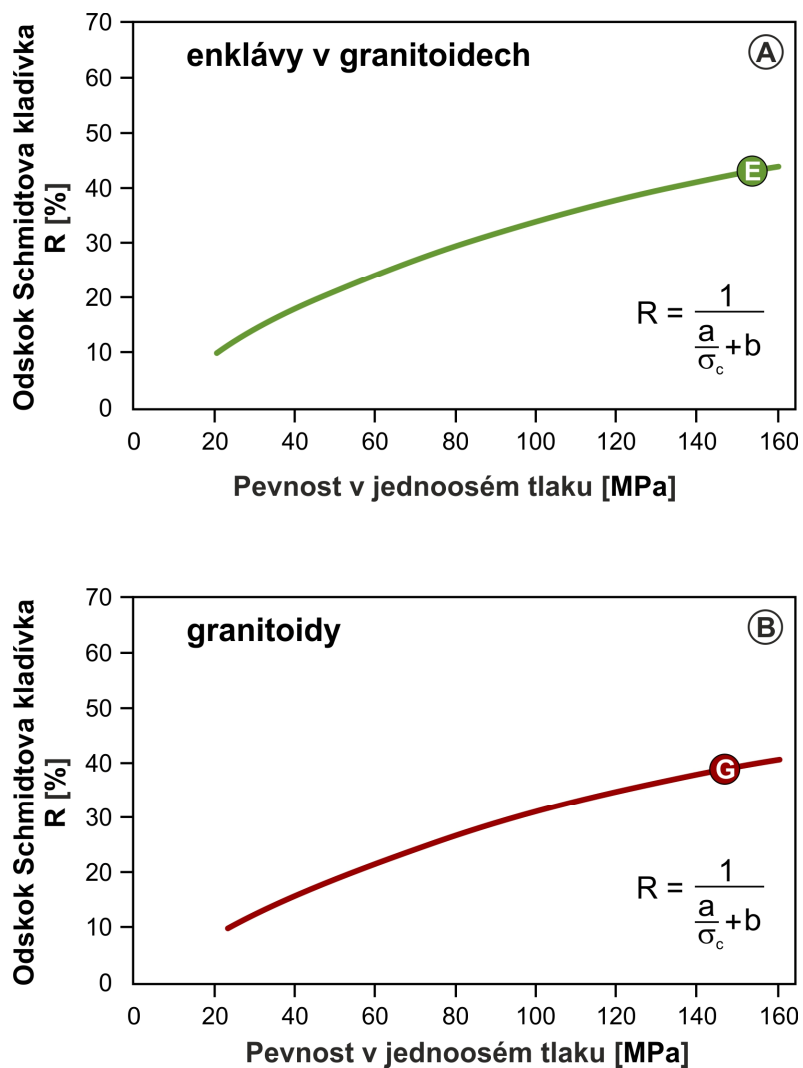
**Obr. 4** – Závislost odskoku Schmidtova kladívka typu N na pevnosti horniny v jednoosém tlaku u mafických mikrogranulárních enkláv (A) a jejich hostitelských syenitoidních hornin (B). Korelační křivky byly konstruovány pro průměry naměřených hodnot skleroskopické tvrdosti a pevnosti horniny v jednoosém tlaku u syenitoidů (S) a enkláv (E) v dodaném (vodou nesaturovaném) stavu. Dvouparametrický vztah podle Broula (1969) byl zjednodušen dosazením empiricky ověřené hodnoty parametru  $b$  ( $b = 0,0115$ ) (srov. Pavlík 1973; Horák 2000).

Měření pomocí Shoreho skleroskopu (model D) umožnilo laboratorně studovat skleroskopickou tvrdost v řádu rozlišení jednotlivých minerálních zrn, a to jak u enkláv a jejich hostitelských hornin, tak na kontaktu mezi nimi. Při srovnání s měřením pomocí Schmidtova kladívka typu N a L vykazují studované systémy enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid opačné trendy.

Enklávy v granitoidech brněnského masivu mají v průměru o 2 % nižší hodnoty odskoku závaží Shoreho skleroskopu oproti jejich hostitelským horninám. Kontakt enklávy a granitoidu není místem se sníženou skleroskopickou tvrdostí a v průměru dosahuje hodnot odskoku srovnatelných s hostitelskou horninou.

V případě enkláv třebíčského masivu mohou být hodnoty odskoku závaží Shoreho skleroskopu až o 9 % nižší oproti hostitelským syenitoidům. Rovněž v systému enkláva-syenitoid není kontakt enklávy místem, které by vykazovalo snížené hodnoty skleroskopické tvrdosti. Zpravidla je hodnota odskoku závaží Shoreho skleroskopu na kontaktu hornina/enkláva srovnatelná, či mírně vyšší oproti enklávě.

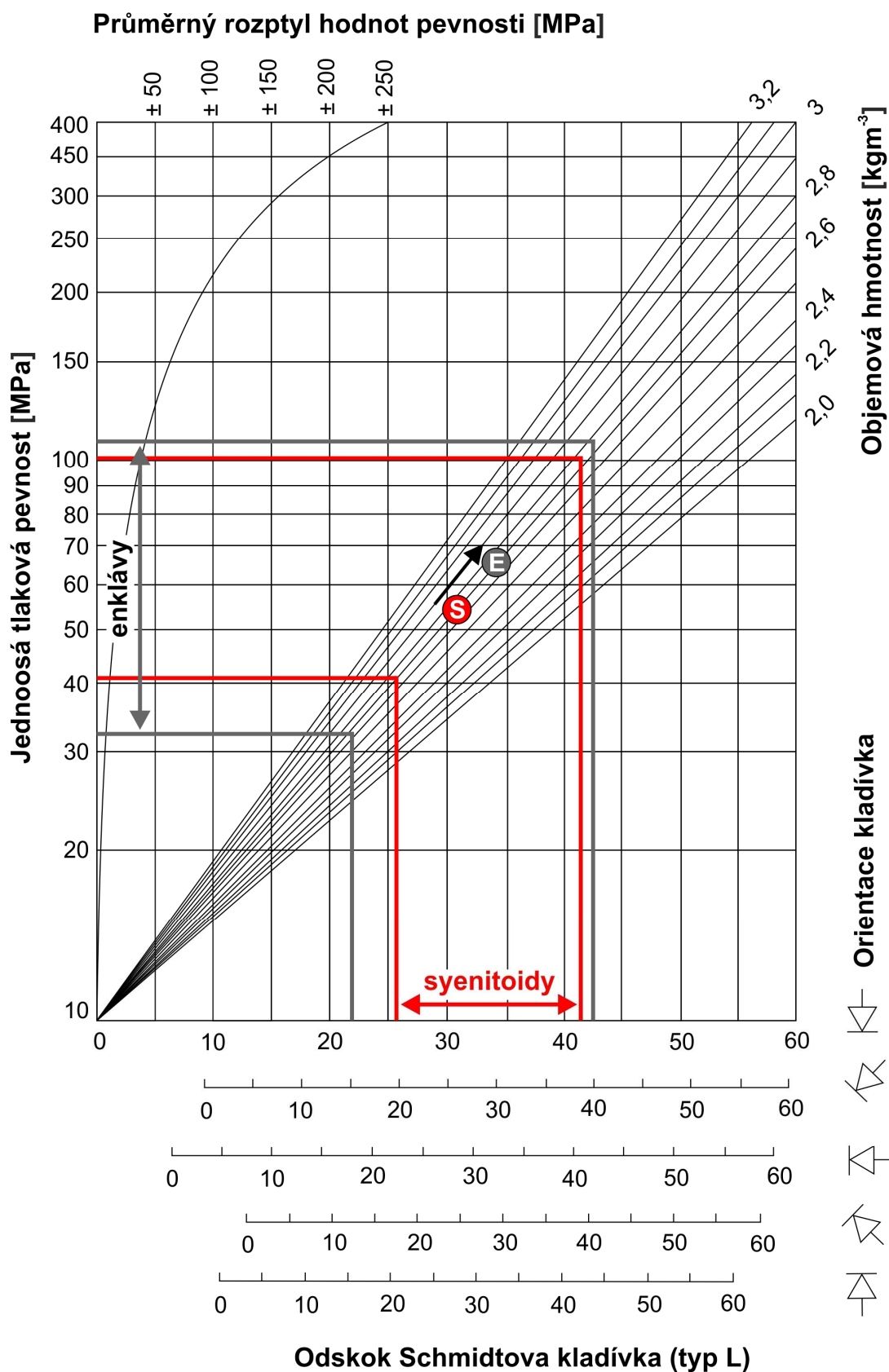




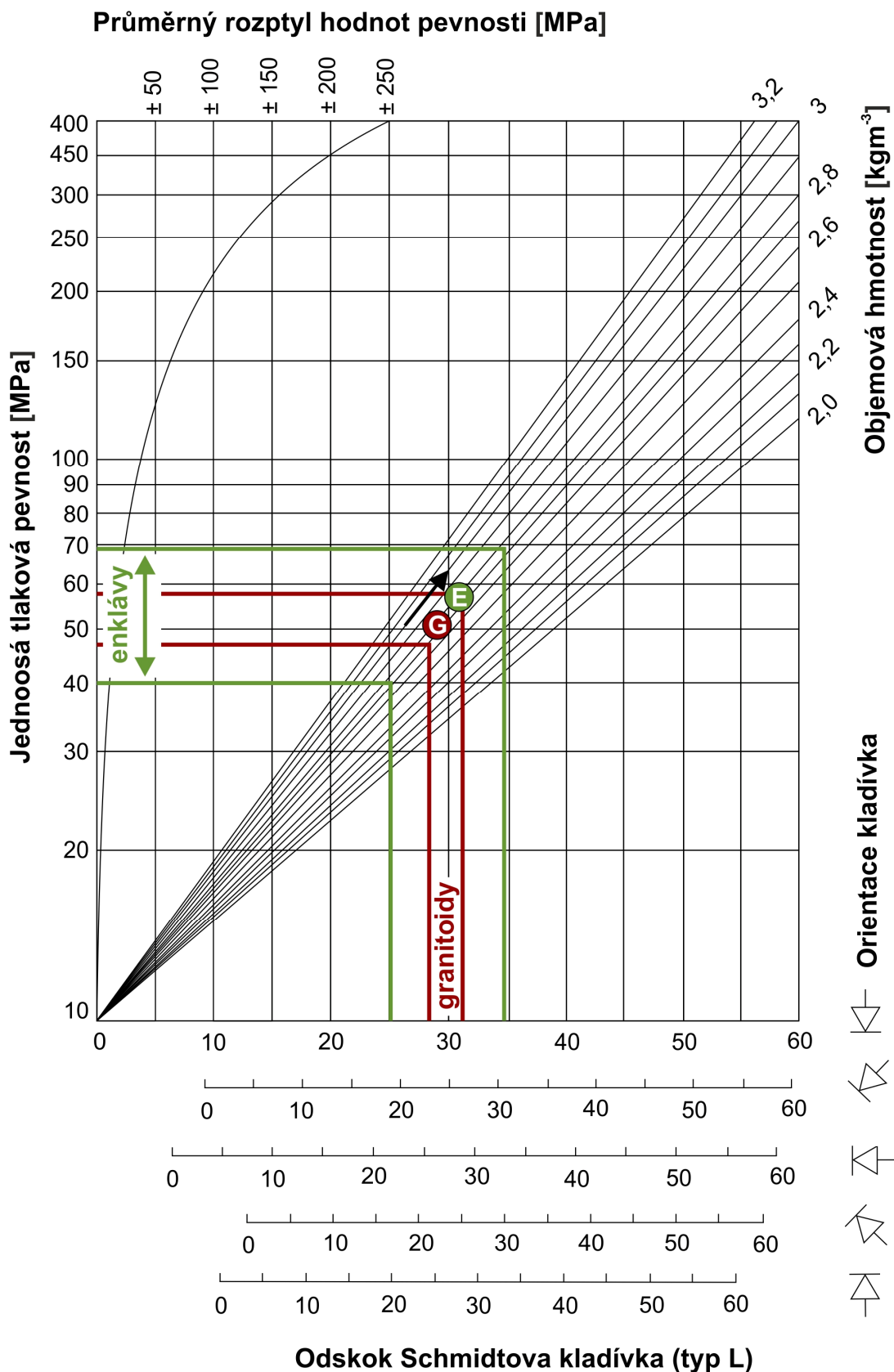
**Obr. 5** – Závislost odskoku Schmidtova kladívka typu N na pevnosti horniny v jednoosém tlaku u mafických mikrogranulárních enkláv (A) a jejich hostitelských granitoidních hornin (B). Korelační křivky byly konstruovány pro průměry naměřených hodnot skleroskopické tvrdosti a pevnosti horniny v jednoosém tlaku u granitoidů (G) a enkláv (E) v dodaném (vodou nasaturovaném) stavu. Dvouparametrický vztah podle Broula (1969) byl zjednodušen dosazením empiricky ověřené hodnoty parametru  $b$  ( $b = 0,0115$ ) (srov. Pavlík 1973; Horák 2000).

Hodnoty naměřené Shoreho skleroskopem byly korelovány na hodnoty jednoosé tlakové pevnosti podle vztahů různých autorů. Srovnáním s výsledky laboratorně stanovené pevnosti v jednoosém tlaku (kapitola 6.2) jsou vypočtené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti podle Wuerkera (1953) a Atkinsona (1993) zřetelně posunuty do vyšších hodnot s maximy dosahujícími 314 MPa (Wuerker 1953), respektive 354 MPa (Atkinson 1993) – takovéto mimořádně vysoké pevnosti lze považovat za nereálné, respektive použitou korelaci za nepřilíš vhodnou.

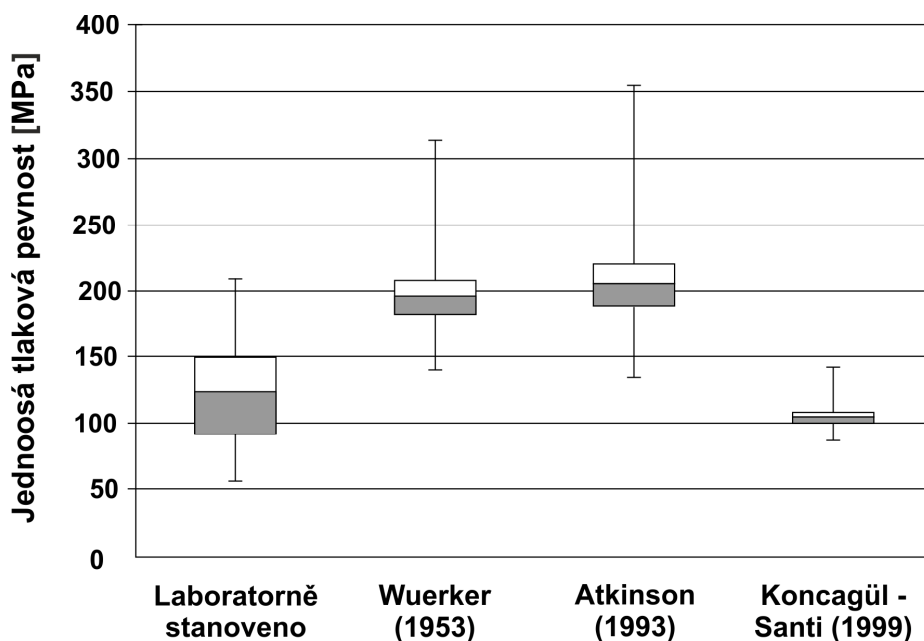
Aktuální, laboratorně stanovené výsledky se přitom částečně překrývají s hodnotami korelovanými podle Koncagüla a Santiho (1999). Rozptyl hodnot vypočtených podle těchto autorů leží mezi 87 a 142 MPa. Odpovídá tudíž rozpětí 25. a 75. percentilu (92–149 MPa) výsledků zde laboratorně stanovené pevnosti v jednoosém tlaku (obr. 8).



**Obr. 6** – Průměrné hodnoty odskoku Schmidta kladívka typu L u syenitoidů a enkláv třebíčského masivu ve vodou nenasurovaném stavu. Hodnoty jsou korelovány na pevnost v jednoosém tlaku podle Bieniawského (1984). S – průměr zjištěných hodnot pro syenitoidy; E – průměr zjištěných hodnot pro enklávy.



**Obr. 7** – Průměrné hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu L u granitoidů a enkláv brněnského masivu ve vodou nesaturovaném stavu. Hodnoty jsou korelovány na pevnost v jednoosém tlaku podle Bieniawského (1984). G – průměr zjištěných hodnot pro granitoidy; E – průměr zjištěných hodnot pro enklávy.



**Obr. 8** – Krabicový graf s výsledky laboratorně stanovených hodnot jednoosé tlakové pevnosti studovaných horninových vzorků a jejich korelace s hodnotami vypočtené jednoosé tlakové pevnosti podle různých autorů pro Shoreho skleroskop.

## 6.2 PEVNOST V JEDNOOSÉM TLAKU

Laboratorní stanovení pevnosti v jednoosém tlaku přineslo zásadní vzhled do problematiky pevnosti mafických mikrogranulárních enkláv a jejich hostitelských hornin. Z hlediska chování zkušebních tělísek bylo možné konstatovat následující:

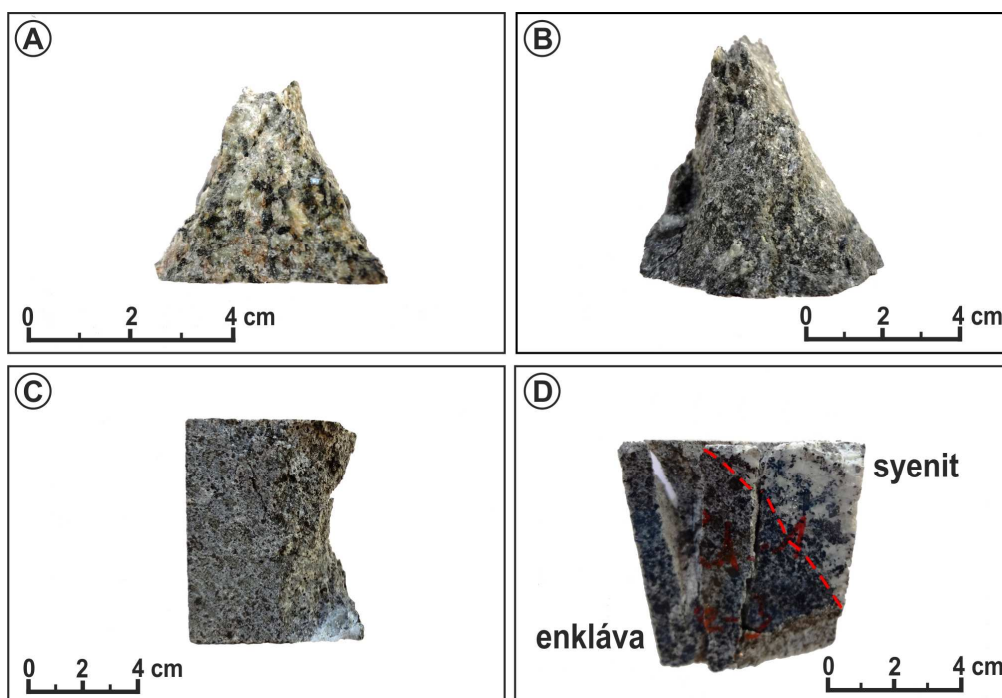
- 1) jak hostitelské horniny, tak enklávy se porušují výrazně křehce,
- 2) zbytkové úlomky horninových tělísek vykazují po tlakovém testu typický tvar části „přesýpacích hodin“ (obr. 9A, B),
- 3) v případě mafických mikrogranulárních enkláv nemusí docházet k tak výraznému porušení do tvaru „přesýpacích hodin“ testovaného vzorku, jako u hostitelské horniny (obr. 9C),
- 4) u zdravých (nezvětralých) vzorků není pravidlem, že by zóna kontaktu mezi mafickou mikrogranulární enklávou a hostitelskou horninou nezbytně musela být plochou, na které přednostně dochází ke křehkému porušení (obr. 9D).

Z naměřených hodnot jednoosé tlakové pevnosti bylo možné vyčíst následující skutečnosti:

- 1) pevnost enkláv v systému enkláva-granitoid i enkláva-syenitoid je vždy vyšší,
- 2) testovací tělíska, která byla zhotovena tak, aby byla tvořena z poloviny enklávou a z poloviny hostitelskou horninou, nevykazují při porušení v jednoosém tlaku nápadně nižší hodnoty pevnosti, než je pevnost samotné hostitelské horniny bez enkláv,
- 3) při saturaci vodou roste význam přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv v horninovém masivu, neboť tyto vykazují ještě větší rozdíly v pevnosti oproti hostitelské hornině.

Vodou nesaturovaná zkušební tělíska zhotovená z enkláv uzavřených v syenitoidech třebíčského masivu vykazují hodnoty jednoosé tlakové pevnosti, která v průměru odpovídá 129 MPa (Jaroměřice nad Rokytnou) a 182 MPa (Kamenná). Enklávy zde mají o 7 až 19 % vyšší

pevnost oproti hostitelským syenitoidům. Horninová tělíska zhotovená z kontaktu mezi syenitoidem a enklávou potom v průměru vykazují o 3 až 4 % vyšší tlakovou pevnost, než je pevnost syenitoidu bez enkláv, avšak hodnota mediánu je oproti okolní hornině snížena (obr. 10). V případě lokality Kamenná významně narůstá vliv přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv u vodou saturovaných vzorků. Enklávy tak vykazují až o 32 % vyšší pevnost v jednoosém tlaku oproti hostitelské hornině. Rozdíl v chování vodou saturovaného a vodou nesaturovaného systému enkláva-syenitoid lze velmi dobře graficky vyjádřit prostřednictvím krabicových grafů (obr. 11).

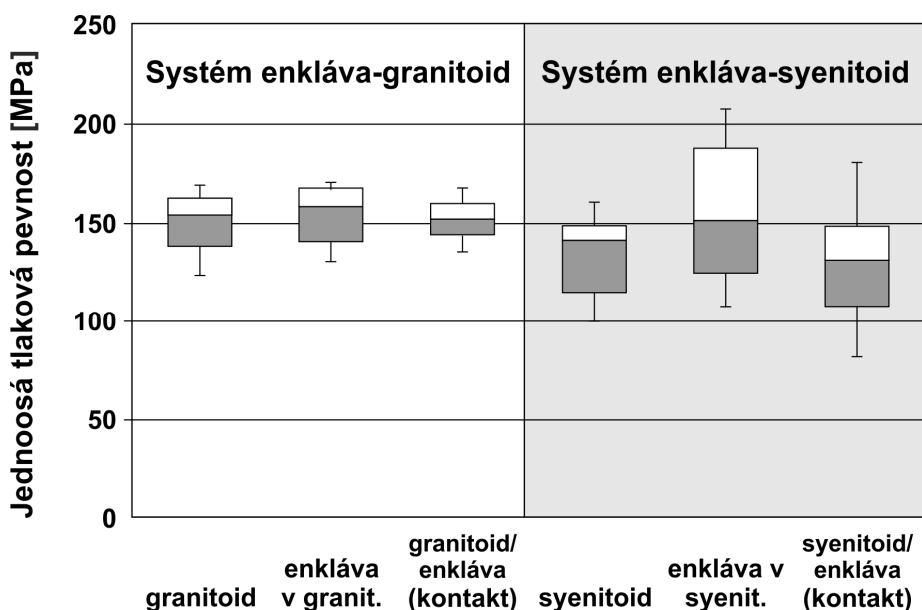


**Obr. 9** – Ukázka zbytkových úlomků z horninových tělísek po testu v jednoosém tlaku: A – typický tvar části „přesýpacích hodin“ způsobený střížným porušením vzorku granitoidu vyvolaným kombinací svislého tlaku a příčného tahu (Blansko-Arnoštov); B – obdobný typ porušení horninového tělíska mafické mikrogranulární enklávy (Blansko-Arnoštov); C – díky kompaktnějšímu charakteru mafických mikrogranulárních enkláv nemusí dojít k tak výraznému porušení tvaru „přesýpacích hodin“ testovaného vzorku (Kamenná); D – plochy porušení jsou u vzorku, který je tvořený z poloviny syenitem a z poloviny mafickou mikrogranulární enklávou, vyvinuty kose ke kontaktu obou horninových typů (lokality Kamenná).

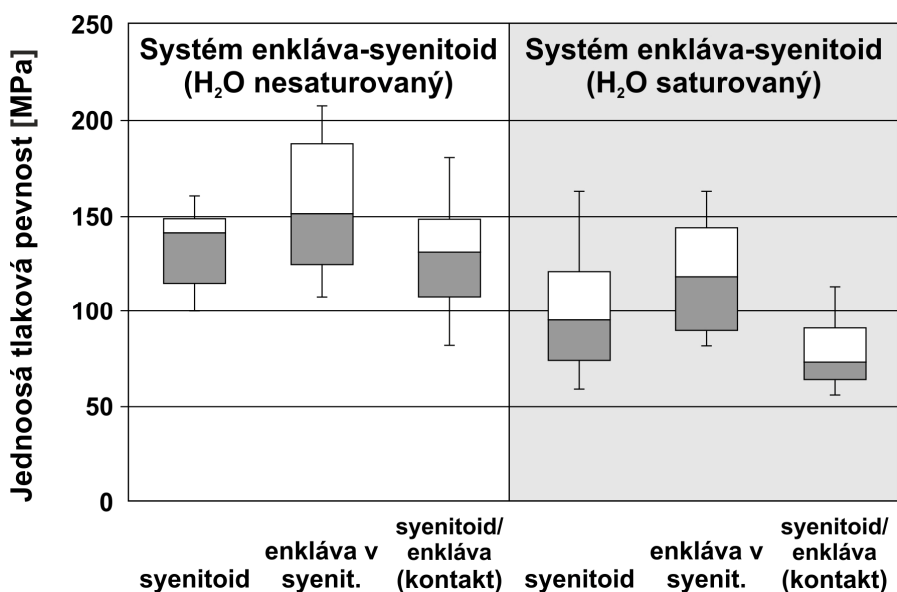
### 6.3 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU A DYNAMICKÉ ELASTICKÉ PARAMETRY

Studium pevnosti v příčném tahu bylo realizováno pouze na vzorcích enkláv odebraných v aktivních lomech na syenitoidy třebíčského masivu. Důvodem tohoto doplňkového studia bylo posouzení vlivu přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv na hostitelské vyvřelé horniny. Kvůli ověření vhodnosti horninové matérie s ohledem na identifikaci skrytých ruptur s možnou fluidní výplní bylo u vybraných vzorků provedeno ultrazvukové prozařování. Z rychlostí průchodu ultrazvukových vln byly následně dopočteny dynamické elastické parametry enkláv (viz habilitační práce autora).

Hodnota rychlosti průchodu podélných vln kolísá u studovaných vzorků v rozmezí 4,102–4,975 km/s, což jsou hodnoty charakteristické pro pouze velmi slabě navětralé horniny (Bell 2007). Seismicky stanovené hodnoty Youngova modulu, které se pohybují v rozmezí 43 až 60 GPa, jsou indikátory, které ukazují na velmi nízkou až nízkou deformabilitu studovaných enkláv (Bell 2007).



**Obr. 10** – Grafické vyjádření distribuce laboratorně stanovených hodnot jednoosé tlakové pevnosti u vodou nesaturovaného systému enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid v krabicovém grafu.



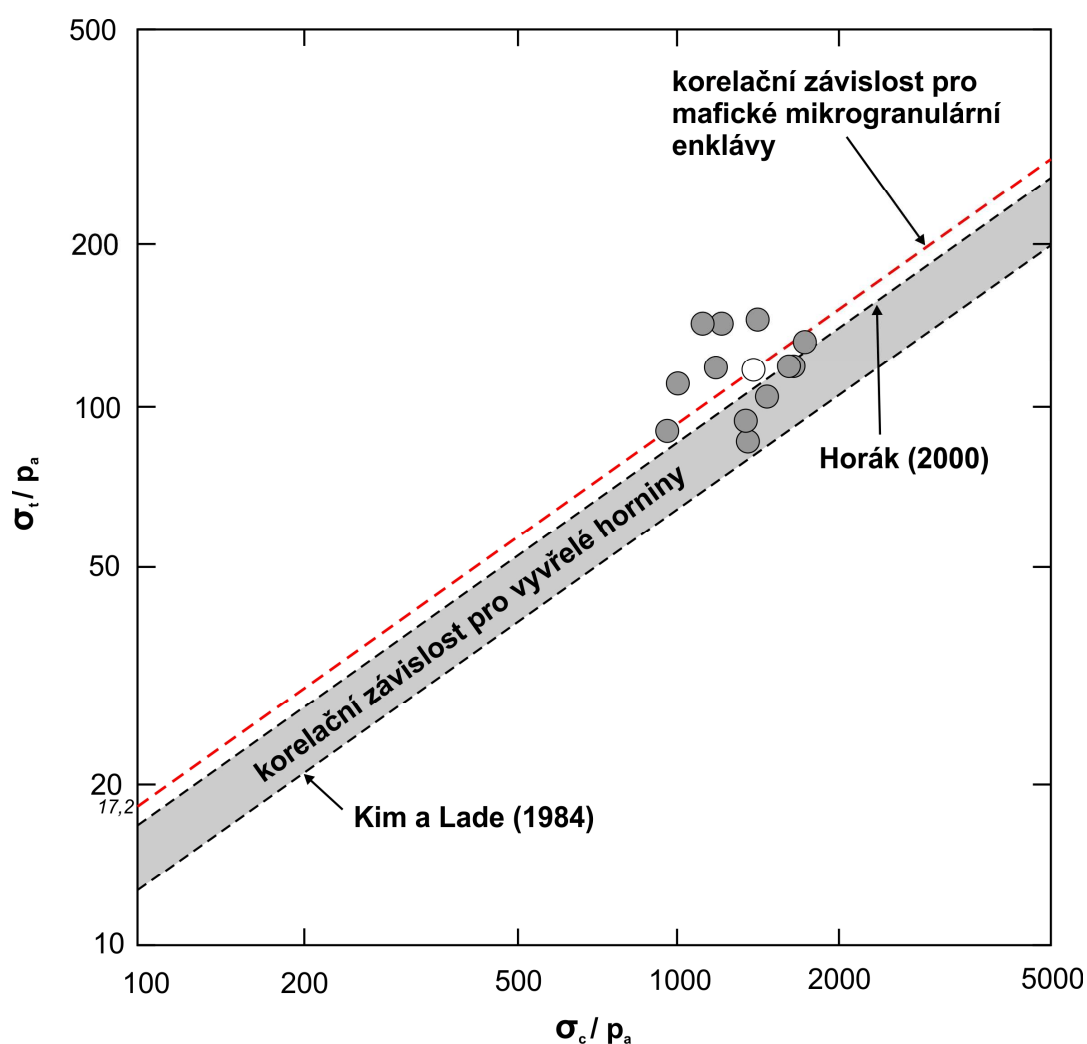
**Obr. 11** – Grafické vyjádření distribuce laboratorně stanovených hodnot jednoosé tlakové pevnosti u vodou nesaturovaného a vodou saturovaného systému enkláva-granitoid v krabicovém grafu.

Obecně je průběh korelace pevnosti v příčném tahu, respektive v jednoosém tahu, s pevností v jednoosém tlaku pro vyvřelé horniny známý a lze jej matematicky vyjádřit s užitím exponenciální funkce navržené v práci Kima a Ladeho (1984):

$$\sigma_t = T \times p_a \left( \frac{\sigma_c}{p_a} \right)^t$$

kde:  $\sigma_t$  ... pevnost horniny v jednoosém tahu [MPa]  
 $\sigma_c$  ... pevnost horniny v jednoosém tlaku [MPa]  
 $T, t$  ... bezrozměrné parametry  
 (pro vyvřelé horniny je parametr  $T = 0,53$ ;  $t = 0,7$  – Kim a Lade 1984)  
 $p_a$  ... atmosférický tlak ve stejných jednotkách jako  $\sigma_t$  a  $\sigma_c$

Hodnoty tahových pevností jsou vždy výrazně nižší, než jsou stanovené hodnoty pevností v jednoosém tlaku. Maximální osová síla v době porušení vzorku kolísá u studovaných enkláv v rozmezí 10,3 až 31,4 kN. Přepočtením na plochu zkušebního tělesa je rozsah pevností v příčném tahu 8,2 až 15,3 MPa. Pro mafické mikrogranulární enklávy byla autorem sestrojena korelační křivka, která je oproti vyvřelým horninám, a to včetně granitoidů brněnského masivu, posunuta do vyšších hodnot tlakových a tahových pevností (obr. 12). Studium pevnosti v příčném tahu tedy ukázalo na pozitivní vliv přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv na pevnost vyvřelých hornin.



**Obr. 12** – Korelační závislost mezi pevností v příčném tahu a pevností v jednoosém tlaku při zachování bezrozměrného parametru  $t = 0,7$ . Pole pro vyvřelé horniny vymezeno podle prací Kima a Ladeho (1984) a Horáka (2000). Korelační závislost dle Horáka (2000) byla z podstatné části stanovena studiem vzorků z brněnského masivu. Výsledky laboratorních analýz mafických mikrogranulárních enkláv ukazují, oproti vyvřelým horninám bez enkláv, na viditelný posun do vyšších hodnot. Bílý bod reprezentuje průměr analýz studovaných enkláv.

## 7 DISKUZE

### 7.1 VLIV PŘÍTOMNOSTI MAFICKÝCH MIKROGRANULÁRNÍCH ENKLÁV NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

Podle výchozí pracovní hypotézy autora měla přítomnost kompozičně odlišných mafických mikrogranulární enkláv v rámci hostitelských horninových masivů negativně ovlivnit jejich celkové mechanické vlastnosti. Zjištěná data ovšem tuto pracovní hypotézu nepodpořila. Naopak, ukázalo se, že přítomnost mafických mikrogranulární enkláv celkově zvyšuje pevnost hostitelské horniny.

Na základě výsledků petrografického a mineralogického studia (výsledky nejsou prezentovány v rámci této zkrácené verze habilitační práce) lze konstatovat, že mafické mikrogranulární enklávy obsahují, na rozdíl od hostitelských hornin, vyšší podíl minerálů s výbornou štěpností. V případě studovaného křemenem bohatého systému enkláva-granitoid v enklávě převládají minerály ze skupiny amfibolu nad minerály ze skupiny tmavých slíd. V případě studovaného křemenem chudého systému enkláva-syenitoid v enklávě převládají minerály ze skupiny tmavých slíd nad minerály ze skupiny amfibolu. Paradoxně, vyšší zastoupení těchto minerálů nemusí být na překážku celkově lepším mechanickým vlastnostem studovaných enkláv. Zdá se, že mnohem důležitější, než mineralogické složení, je textura vlastní horniny. Mafické mikrogranulární enklávy jsou vždy jemnozrnější, než je hostitelská hornina, a distribuce jednotlivých minerálů je více „pravidelnější“. Tato texturní charakteristika je tak klíčová pro pozorované chování. V případě křemenem bohatého systému není rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi enklávy a hostitelské horniny tak markantní, jako v křemenem chudém systému enkláva-syenitoid. Zdá se tedy, že přítomnost křemene v hostitelské hornině určitým způsobem „vyrovnává“ rozdíly v mechanických vlastnostech. Dále je možné konstatovat, že v případě, že se hornina s enklávou bude nacházet pod hladinou podzemní vody, bude rozdíl mezi pevnostní charakteristikou enklávy a okolní horniny ještě zřetelnější. Díky své vyšší jemnozrnnosti spojené s pravidelnou distribucí minerálů je pro molekuly H<sub>2</sub>O obtížnější v enklávě pronikat podél hranic jednotlivých zrn a fungovat tak jako „mazadlo“ v případě působení zvýšeného tlaku (srov. Záruba a Mencl 1974).

Dílcím z bodů autorovy výchozí pracovní hypotézy byl předpoklad, že kontakt mezi enklávou a hostitelskou horninou bude fungovat jako plocha, na které při působení vnějšího tlaku bude docházet k přednostnímu porušení. Ani tento předpoklad však nebyl provedeným studiem spolehlivě ověřen. Hornina na kontaktu vykazuje spíše pevnostní charakteristiky, které stojí někde mezi vlastní horninou a enklávou. Lze tedy konstatovat, že jak v systému enkláva-granitoid, tak v systému enkláva-syenitoid jsou mafické mikrogranulární enklávy integrální součástí hostitelské horniny, s níž jsou zpravidla dostatečně pevně propojeny.

S ohledem na provedené studium se autor práce domnívá, že bude-li základová hornina v žulovém nebo syenitovém masivu obsahovat v nezanedbatelném množství mafické mikrogranulární enklávy, bude výsledná pevnost a s ní spojená únosnost takové horniny ekvivalentně vyšší. Přesná kvantifikace takového pozitivního vlivu ovšem není triviální, neboť záleží jak na tom, kolik z celkového objemu horniny bude připadat na mafické mikrogranulární enklávy, tak na tom, jestli půjde o křemenem bohatý nebo křemenem chudý systém.

### 7.2 ZAŘAZENÍ DO KONTEXTU PŘEDCHOZÍCH STUDIÍ

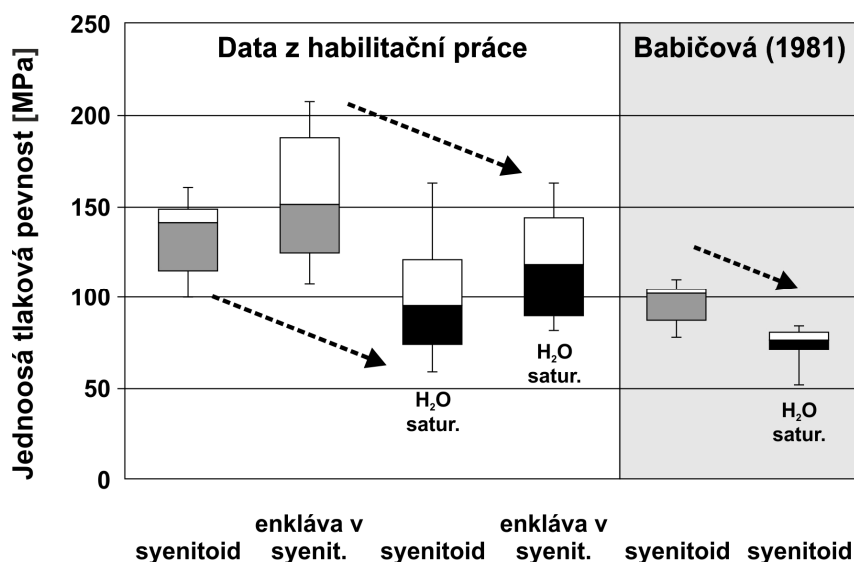
#### 7.2.1 Jednoosá tlaková pevnost v rámci sledovaného regionu

Dostupná srovnávací data jak ke granitoidním horninám brněnského masivu, tak k syenitoidům třebečského masivu se z pohledu klíčové mechanické vlastnosti – pevnosti v jednoosém tlaku – v zásadě omezují jen na výsledky nevelkého počtu nepublikovaných zpráv. Jejich autoři



se zabývali výhradně hostitelskými horninami a neposuzovali případný vliv mafických mikrogranulárních enkláv.

V případě syenitoidů třebíčského masivu provedla E. Babičová analýzu mechanických vlastností syenitového kameniva odebraného na lokalitě Kožichovice (Babičová 1981). Důvodem provedeného studia bylo zjištění vhodnosti využitelnosti syenitoidů jako materiálu ke stabilizační části přehrady. Při srovnání výsledků laboratorního stanovení jednoosé tlakové pevnosti u vzorku z Kožichovic, který autorka klasifikovala jako zdravý, s výsledky dosaženými v rámci systému enkláva-syenitoid v autorově habilitační práci je třeba konstatovat, že vzorek z Kožichovic vykazuje nápadně nižší hodnoty pevnosti (obr. 13). Pozorovaný rozdíl může indikovat metodickou správnost výběru lokalit studovaných v habilitační práci, které obecně obsahovaly horniny s vyšší tlakovou pevností. Pevnost zdravých syenitoidů z třebíčského masivu může být tedy vyšší. Na druhou stranu, trend úbytku pevnosti po saturaci horniny vodou je jak u studovaných hornin, tak na lokalitě Kožichovice obdobný. Koeficient změknutí, který tento úbytek vyjadřuje, se pro syenitoidy pohybuje v rozmezí 0,7–0,8. Popsaný trend může naznačovat obecnou charakteristiku, a to, že se pevnost základových hornin tvořených různě navěralými syenitoidy v případě, že se budou nacházet pod hladinou podzemní vody, bude zhoršovat obdobným způsobem. Z výsledků zkoušek jednoosé tlakové pevnosti tak teoreticky mohou být predikovány také možné výsledky pro vodou saturované vzorky.



**Obr. 13** – Grafické vyjádření distribuce laboratorně stanovených hodnot jednoosé tlakové pevnosti u hornin třebíčského masivu prostřednictvím krabicového grafu. Dobře viditelné jsou obdobné trendy v úbytku pevnosti po saturaci horniny vodou (H<sub>2</sub>O satur.).

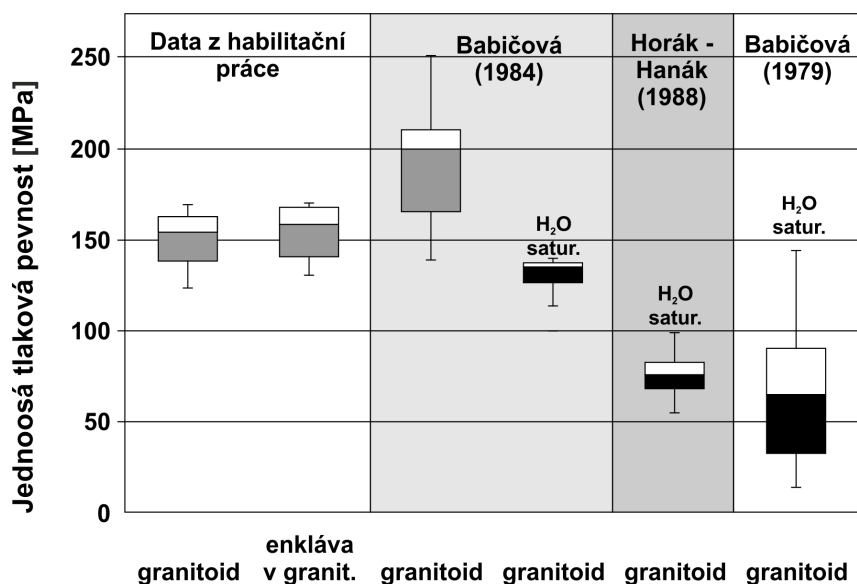
V případě hornin východní granitoidní zóny brněnského masivu existuje dostupná srovnávací databáze jak pro typ Královo Pole (Babičová 1979), tak pro typ Blansko (Babičová 1984, Hanák a Horák 1988).

V rámci geotechnického průzkumu 500 m dlouhé štoly Brno-Špilberk studovala E. Babičová (1979) jak vzorky metabazitů, tak vzorky granitoidů brněnského masivu. Tyto vzorky vykazují ve srovnání s výsledky dosaženými v habilitační práci nápadně snížené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti na straně jedné a velmi vysoké rozpětí těchto hodnot na straně druhé (obr. 14). Pozorované chování je možné přičíst vlivu tektonického porušení granitoidů, které se nacházejí nedaleko tektonického kontaktu s metabazitovou zónou.

V roce 1984 bylo provedeno zhodnocení mechanických vlastností horninového bloku pocházejícího z výlomu na lokalitě Blansko-Klamovka (Babičová 1984). Důvodem bylo

posouzení možného využití horniny při výstavbě balvanitého skluzu na řece Svitavě. Hornina byla klasifikována jako diorit, avšak v rámci předmětné zprávy její petrologický popis absentuje. Studovaná hornina poskytla poměrně vysoké hodnoty jednoosé tlakové pevnosti s průměrem 191 MPa v suchém stavu. V porovnání se studovanými vzorky z okolí Blanska má tedy tato hornina vyšší pevnost (obr. 14). Otázkou ovšem zůstává, zda-li studovaný blok odpovídal mafické mikrogranulární enklávě dioritového složení nebo granitoidu.

Hanák a Horák (1988) publikovali krátkou studii zaměřenou na geotechnické vlastnosti granitoidů východní granitoidní zóny brněnského masivu. Autoři přináší zprůměrované hodnoty jednoosé tlakové pevnosti jak pro vodou nasycené vzorky biotitických granitoidů odebrané při geotechnickém průzkumu na ulici Čápkova, tak pro vodou nasycené vzorky biotit-amfibolických granitoidů zastížených v železničním tunelu č. 8 (Adamov-Blansko) na trati z Brna do České Třebové. Dle výsledků jejich studia vykazují vzorky velmi nízkou pevnost, která se pohybuje v rozmezí 54 MPa u tektonicky porušeného vzorku po 99 MPa u zdravé horniny (obr. 14). Kdybychom jako výchozí pevnost v nesaturovaném stavu dosadili hodnoty získané v habilitační práci, musel by být koeficient změknutí ~0,6, nebo i nižší. Vezme-li se dále do úvahy, že enklávy ve studovaném granitoidním systému dosahují díky své jemnozrnnosti hodnoty koeficientu změknutí pouze ~0,8, přináší práce Hanáka a Horáka (1988) zcela nepochybně geotechnické vlastnosti granitoidů bez mafických mikrogranulárních enkláv.



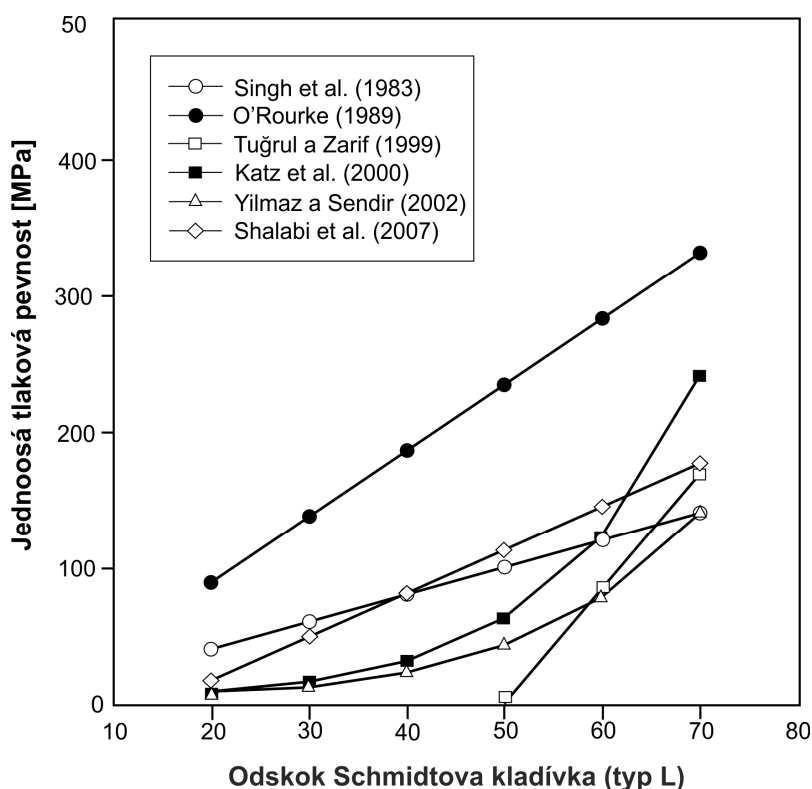
**Obr. 14** – Grafické vyjádření distribuce laboratorně stanovených hodnot jednoosé tlakové pevnosti u hornin brněnského masivu prostřednictvím krabicového grafu. Velmi zřetelné jsou trendy v úbytku pevnosti po saturaci horniny vodou (H<sub>2</sub>O satur.).

### 7.2.2 Korelace mezi Schmidtovou skleroskopickou tvrdostí a jednoosou tlakovou pevností

Průběh korelace mezi skleroskopickou tvrdostí stanovenou v terénu Schmidtovým kladívkem typu N a laboratorně zjištěnou jednoosou tlakovou pevností ukazuje na jejich silnou pozitivní závislost. Ze srovnání průběhu korelačních křivek stanovených v této práci pro enklávy a jejich pro hostitelské horniny a průběhu dostupných křivek pro syenitoidy a granitoidy studované oblasti (např. Pavlík 1973; Rech 1979; Hanák a Horák 1988) je patrné, že v předchozích studiích byla závislost mezi velikostí odskoku Schmidtova kladívka typu N a jednoosou tlakovou pevností více exponenciální, kdy již při relativně nízkých hodnotách tlakové pevnosti pod 100 MPa docházelo k poměrně výraznému nárůstu hodnot odskoku kladívka až na hodnotu 60 %, či dokonce více. Takový trend u studovaných hornin však autor na zjištěném souboru dat nezaznamenal. Podíváme-

li se však na korelační závislost mezi hodnotami odskoku kladívka typu L a pevností v jednoosém tlaku, tak u většiny publikovaných studií je tato závislost buď přímo lineární (např. Singh et al. 1983; Bieniawski 1984; O'Rourke 1989; Tuğrul a Zarif 1999; Shalabi et al. 2007), nebo lineární se blížící (např. Katz et al. 2000; Yilmaz a Sendir 2002) (obr. 15). Přitom mezi hodnotami odskoku kladívka typu L a kladívka typu N existuje velmi silná přímá korelační závislost (Aydin 2015). Laboratorní testování horninových vzorků pomocí Schmidtova kladívka typu L ukázalo, obdobně jako v terénu u kladívka typu N, na vyšší skleroskopickou tvrdost enkláv (v průměru o 9 až 22 %) v rámci obou sledovaných masivů, i když je třeba zdůraznit, že korelace podle diagramu Bieniawského (1984) dává celkově nižší korelované hodnoty jednoosé tlakové pevnosti oproti laboratorně stanoveným pevnostem (obr. 6 a 7).

Ve světle výše uvedených prací se jeví stanovený průběh závislosti mezi velikostí odskoku Schmidtova kladívka typu N a jednoosou tlakovou pevností jako logický. Obecně lze konstatovat, že vyšší hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu N i L velmi dobře ukazují na vyšší tlakovou pevnost enkláv oproti jejich hostitelským horninám.



**Obr. 15** – Výsledky korelační závislosti mezi hodnotami pevností v jednoosém tlaku a odskoku kladívka typu L podle různých autorů.

### 7.2.3 Korelace mezi Shoreho skleroskopickou tvrdostí a jednoosou tlakovou pevností

Rozsah stanovených pevnostních charakteristik autorovi habilitační práce poskytuje dobrou příležitost k určení korelační závislosti mezi Shoreho skleroskopickou tvrdostí a jednoosou tlakovou pevností, a to jak u enkláv, tak u jejich hostitelských hornin. Korelační vztahy publikované v předchozích studiích problematiku přítomnosti jednoho systému tvořeného dvěma kompozičně odlišnými horninovými typy nezohledňují (srov. Wuerker 1953; Atkinson 1993; Koncagül a Santi 1999; Shalabi et al. 2007; Altindag a Güney 2010). Ze srovnání vybraných vztahů použitých v této práci vychází jako nejlepší ten, který ve své práci navrhli Koncagül a Santi (1999) (obr. 8). Paradoxně, zmínění autoři pozorovali pouze 33% shodu mezi jimi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Obecně lze ale říci, že mezi hodnotami Shoreho skleroskopické tvrdosti

a jednoosé tlakové pevnosti, minimálně při nižších hodnotách, existuje zřetelná pozitivní lineární závislost (obr. 16).

Aplikací lineární regrese metodou nejmenších čtverců (při 95% intervalu spolehlivosti) je možné matematicky formulovat závislost mezi hodnotami Shoreho skleroskopické tvrdosti na straně jedné a příslušejícími hodnotami laboratorně stanovené jednoosé tlakové pevnosti na straně druhé (např. Yaşar a Erdoğan 2004). Pomocí lineární regresní analýzy lze závislost mezi hodnotami Shoreho skleroskopické tvrdosti a pevností v jednoosém tlaku u studovaných mafických mikrogranulárních enkláv nejlépe vyjádřit pomocí následující rovnice:

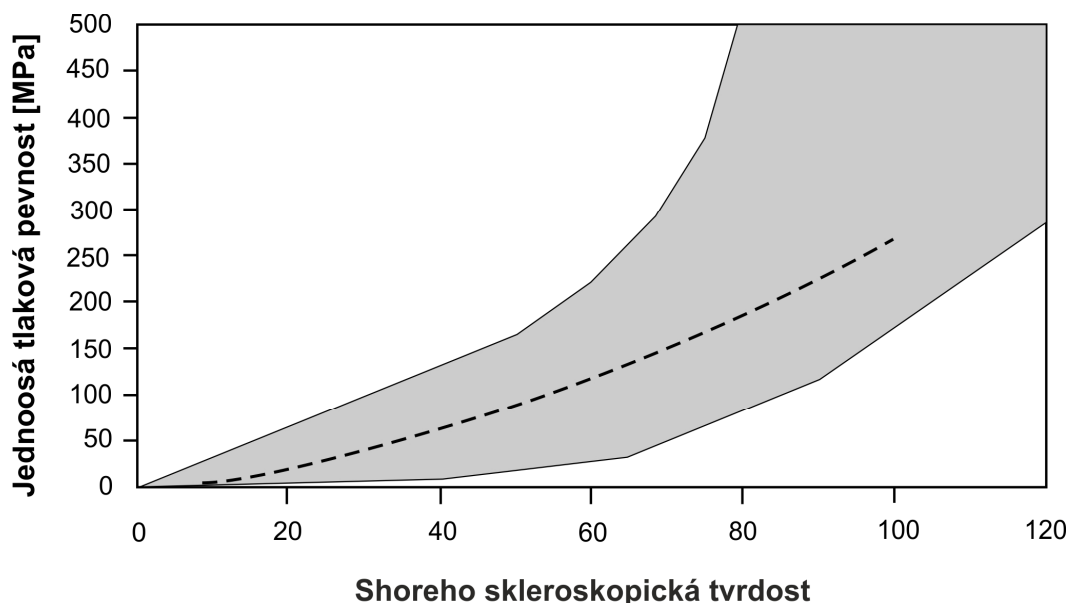
$$JTP = 1,1878 \times SST + 47,429 \text{ [MPa]}$$

kde: *JTP* ... jednoosá tlaková pevnost  
*SST* ... Shoreho skleroskopická tvrdost

Obdobně závislost mezi hodnotami Shoreho skleroskopické tvrdosti a pevností v jednoosém tlaku u hostitelských granitoidních a syenitoidních hornin nejlépe vystihuje rovnice:

$$JTP = 0,9318 \times SST + 49,891 \text{ [MPa]}.$$

Obecnější platnost v práci odvozených empirických vztahů, obdobně jako u těch dříve publikovaných, je třeba brát s určitou rezervou, neboť jak ukazují předchozí studie, dochází u hodnot Shoreho skleroskopické tvrdosti vyšších než 60 k poměrně výraznému snížení spolehlivosti korelace.



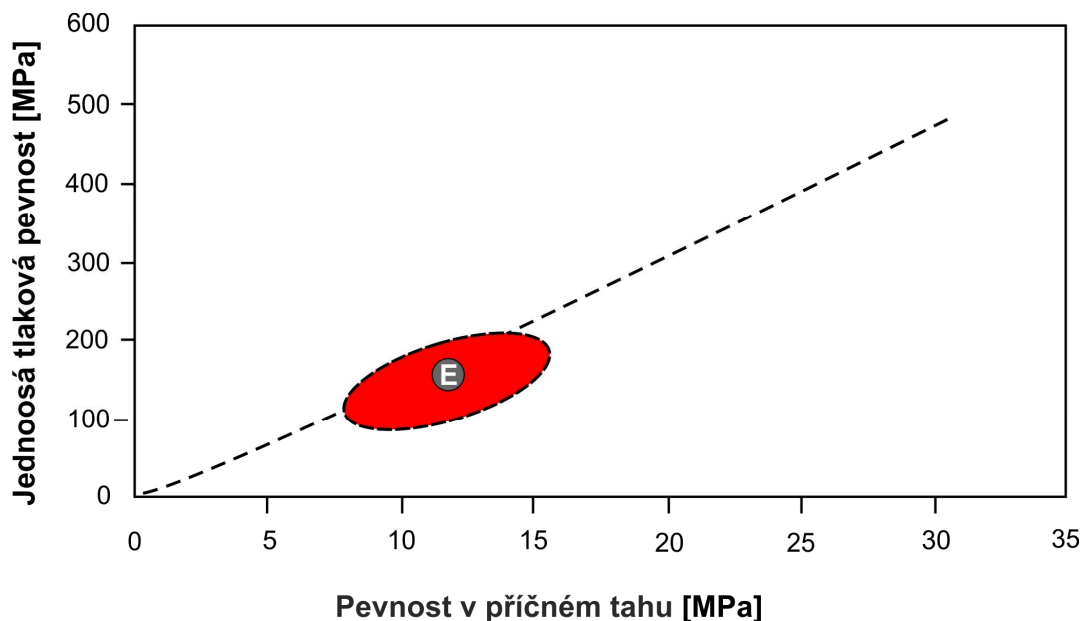
**Obr. 16** – Korelace mezi jednoosou tlakovou pevností a Shoreho skleroskopickou tvrdostí. Šedé pole zobrazuje rozptyl publikovaných hodnot. Na základě dat řady autorů, kteří mj. studovali i různé typy ve stavebnictví užívaných granitoidních hornin (např. Jennings a Wright 1989; Buyuksagis 2007), sestavili Altindag a Güney (2010).

#### 7.2.4 Korelace mezi pevností v příčném tahu a jednoosou tlakovou pevností

S rostoucí pevností v příčném tahu dochází u většiny horninových typu k lineárnímu nárůstu jednoosé tlakové pevnosti (Altindag a Güney 2010). V rámci doplňkového studia tak mohla být

hlavní pozornost věnována zejména testování hypotézy, podle které mafické mikrogranulární enklávy vykazují srovnatelné trendy jako ostatní horniny. Podíváme-li se na chování enkláv ze širší perspektivy, tak v rámci grafu sestrojeného obecně pro metamorfity, magmatity i sedimenty dohromady, studované enklávy nijak nevybočují z pozitivního trendu nárůstu pevnosti v příčném tahu s rostoucí jednoosou tlakovou pevností (obr. 17). Bod sestrojený z průměru všech analýz mafických mikrogranulárních enkláv velice dobře sedí na korelační křivce.

Podíváme-li se na mafické mikrogranulární enklávy pouze z pohledu hlubinných vyvěřelin, tak u studovaných mafických mikrogranulárních enkláv můžeme pozorovat posun do vyšších hodnot. Zmíněné chování je velice dobře patrné v klasickém grafu Kima a Ladeho (1984) pro vyvěřelé horniny (obr. 12).



**Obr. 17** – Průběh korelace mezi jednoosou tlakovou pevností a pevností v příčném tahu. V grafu je vyznačen rozsah analýz u studovaných mafických mikrogranulárních enkláv společně s průměrnou hodnotou (E). Graf na základě dat řady autorů, kteří mj. studovali i různé typy ve stavebnictví užívaných granitoidních hornin (např. Jennings a Wright 1989; Buyuksagis 2007), sestavili Altindag a Güney (2010).

### 7.3 MODELOVÁNÍ SYSTÉMU ENKLÁVA-GRANIOTID A ENKLÁVA-SYENITOID A IMPLIKACE PRO MECHANIKU HORNIN

Přesná kvantifikace pozitivního vlivu přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv není jednoduchá. Autor se o tuto kvantifikaci pokusil prostřednictvím propojení geochemického modelování s výsledky laboratorně stanovených pevnostních charakteristik.

Lze oprávněně očekávat, že mezi studovanými horninami a jejich enklávami existuje genetická vazba. Sílu genetické vazby lze diskutovat pomocí geochemického modelování. Pro potřeby tohoto modelování je možné využít obecné rovnice pro míšení dvou systémů (Langmuir et al. 1978):

$$C_M = X_A \times C_A + (1 - X_A) \times C_B \text{ [hmot. \%]}$$

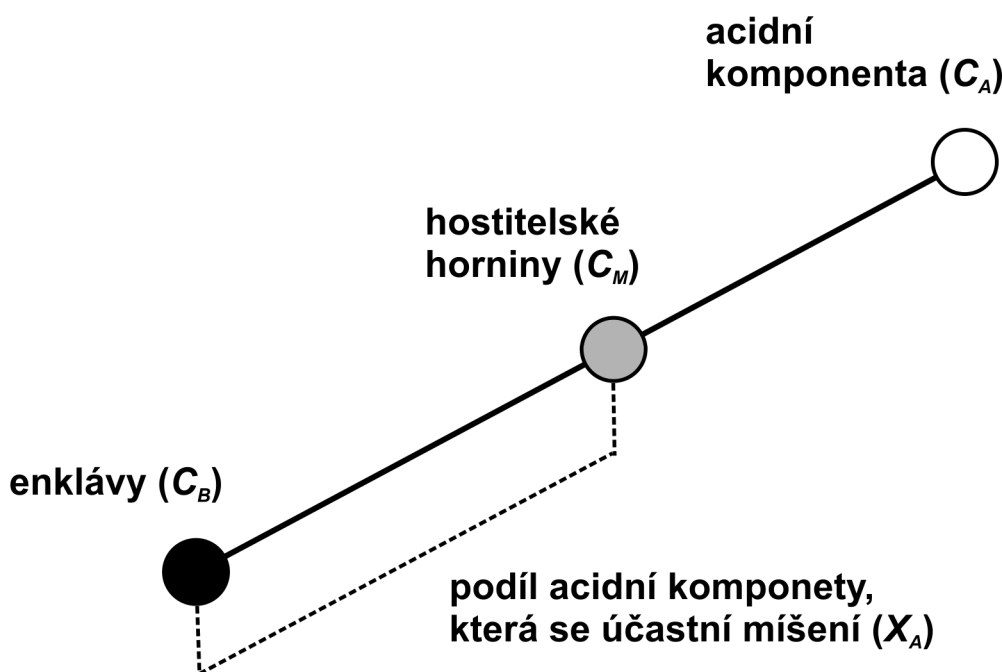
kde:  $C_M$  ... koncentrace chemického prvku v tavenině, která je výsledkem míšení mezi acidním a bazickým členem [hmot. %]

$X_A$  ... podíl acidní komponenty [%]

$C_A$  ... koncentrace chemického prvku v acidní tavenině, která se účastní míšení [hmot. %]

$C_B$  ... koncentrace chemického prvku v bazické tavenině (utuhlé nyní do podoby mafických mikrogranulárních enkláv), která se účastní míšení [hmot. %]

Aplikace výše uvedené rovnice je založena na předpokladu, že horniny v rámci systému enkláva-granitoid a enkláva-syenitoid jsou výsledkem míšení mezi relativně bazickou taveninou, která u konkrétního horninového masivu utuhla v podobě mafických mikrogranulárních enkláv, a kyselější typem taveniny (obr. 18).



**Obr. 18** – Obecné schéma lineární závislosti mezi míšením bazického členu (nyní utuhlého do podoby enkláv) s acidní komponentou.

Z rovnice pro míšení dvou systémů lze vyjádřit člen zahrnující podíl acidní komponenty jako:

$$X_A = \frac{C_M - C_B}{C_A - C_B} [\%]$$

V případě, že mezi kyselou a bazickou taveninou bude docházet k míšení, budou jednotlivé chemické prvky v diagramu  $(C_M - C_B)$  versus  $(C_A - C_B)$  ležet na přímce, jejíž sklon rozhodne o procentuálním podílu acidního, respektive bazického členu (Fourcade a Allegre 1981).

U systému enkláva-granitoid byly pro potřeby modelování definovány následující vstupní parametry:

- 1) Nejvíce  $\text{SiO}_2$  bohatá chemická analýza granitoidů východní granitoidní zóny brněnského masivu z práce Gadase a Gregerové (2006) byla, po přepočtu na bezvodou bázi, využita jako acidní člen  $C_A$ .
- 2) Analýza mafické mikrogranulární enklávy z lokality Blansko-Arnoštov (Krmíček 2015) byla v modelu využita jako bazický člen  $C_B$ .

- 3) Analýza hostitelské horniny mafické mikrogranulární enklávy z lokality Blansko-Arnoštov (Krmíček 2015) byla v modelu testována jako hybridní člen  $C_M$ , který vznikl míšením  $C_A$  a  $C_B$ .

V rámci systému enkláva-syenitoid byly definovány tyto vstupní parametry:

- 1) Pro potřeby geochemického modelování byl na lokalitě Jaroměřice nad Rokytnou autorem odebrán vzorek  $\text{SiO}_2$  bohatého členu durbachitové série (Krmíček 2015). Složení tohoto vzorku bylo v modelu využito jako acidní člen  $C_A$ . Analyzovaná hornina je kompozičně srovnatelná s teoretickým acidním členem durbachitové série podle Holuba (1997).
- 2) Analýza mafické mikrogranulární enklávy z lokality Kamenná (Krmíček 2015) byla v modelu využita jako bazický člen  $C_B$ .
- 3) Analýza hostitelské horniny mafické mikrogranulární enklávy z lokality Kamenná (Krmíček 2015) byla v modelu využita jako hybridní člen  $C_M$ .

Výsledky modelování jasně ukázaly, že jak systém enkláva-granitoid, tak systém enkláva-syenitoid lze úspěšně modelovat pomocí rovnice pro míšení dvou systémů. Korelační koeficient ve výsledných grafech překračuje hodnotu 0,99 (obr. 19).

Na testované lokalitě Blansko-Arnoštov mohlo v rámci vznikajícího horninového masivu docházet k míšení přibližně 18 % kyselého členu a 82 % bazického členu. Na této lokalitě se tedy velmi výrazně projevil vliv hybridizace mafickou taveninou, která v místních granitoidech, dle výsledků terénního studia, utuhla až do podoby mnohametrových enkláv.

V rámci testované lokality Kamenná je poměr acidního a bazického členu více vyrovnaný. V průběhu formování místních syenitoidů zde mohlo docházet k míšení přibližně 47 % kyselého členu a 53 % bazického členu.

Autor habilitační práce se domnívá, že na výše uvedené výsledky geochemického modelování lze nahlížet rovněž v kontextu vědní disciplíny *Mechanika hornin*. Vezmeme-li v úvahu výsledky jednoosé tlakové pevnosti pro enklávy a hostitelské granitoidy na lokalitě Blansko-Arnoštov, tak při 82% zastoupení bazické komponenty bude masiv v průměru jako celek díky přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv teoreticky pevnější až o 50 %. Obdobně výsledky jednoosé tlakové pevnosti pro lokalitu Kamenná ukazují, že při 53% zastoupení bazického členu bude masiv teoreticky jako celek pevnější téměř o 70 %.

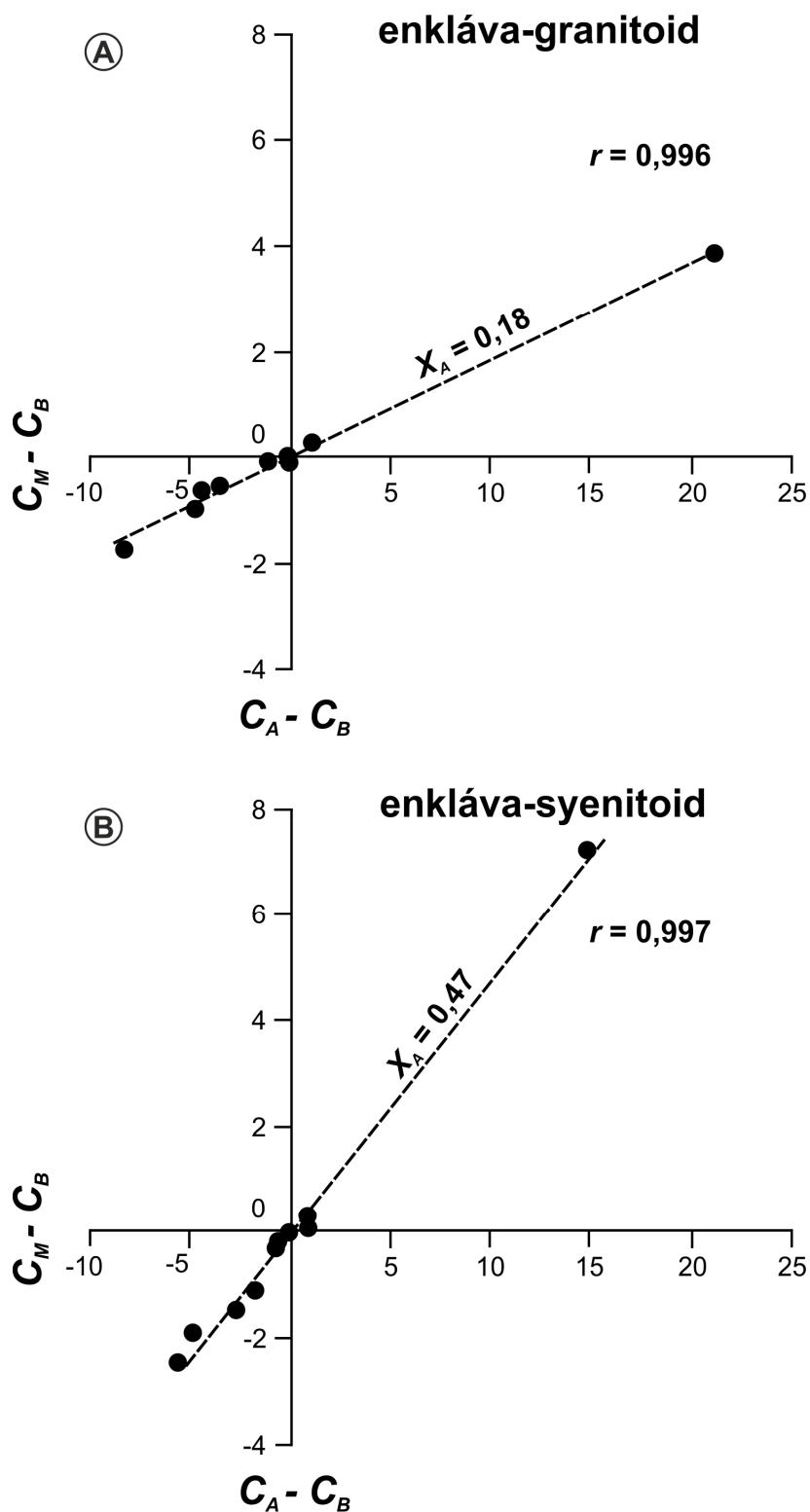
Uvedená čísla jsou velmi vysoká a naznačují, jak významná může přítomnost mafických mikrogranulárních enkláv z pohledu mechanických vlastností horninového masivu být. Na tato čísla je ovšem třeba nahlížet s jistou rezervou, neboť vychází ze zastoupení bazické komponenty na konkrétní lokalitě a toto zastoupení se bude v rámci masivu nepochybně měnit. Navíc bazická komponenta nemusí při míšení utuhnout výhradně v podobě enkláv, ale může být „rozptýlena“ na úrovni zrn nebo intersticiálních prostor, na což částečně ukazují výsledky nezbytného petrografického studia, kdy enklávy i hostitelské horniny obsahují krystaly zonálních živců, které vykazují znaky růstu v obou typech tavenin (Krmíček 2015). Mezi tyto znaky patří například starší magmaticky korodovaná jádra u plagioklasů hornin brněnského masivu nebo draselné živce třebíčského masivu s charakteristickou tmavě a světle modrou luminiscencí relativně Ba obohacených a ochuzených zón svědčících o opakovaném růstu ve dvou různých typech tavenin (srov. Šlaby et al. 2008).

## **7.4 PREDIKCE MOŽNÝCH DOPADŮ REALIZOVANÉ STUDIE V RÁMCI VĚDNÍ DISCIPLÍNY MECHANIKA HORNIN**

V rámci vědní disciplíny Mechanika hornin je zřetelným dlouhodobým vývojovým trendem integrace laboratorních a in-situ zjištěných parametrů geomateriálů a hledání způsobů jejich



korelace. Trend je reflektován i v této habilitační práci, která tak přináší nové korelační křivky a matematické vztahy pro systém enkláva-hostitelská hornina, jež vychází z terénních a laboratorních měření fyzikálně-mechanických vlastností. Práce ukazuje možnosti kombinovaného geologického a geotechnického studia vícesložkových geomateriálů, které vedou k velmi zajímavým a (původně) neočekávaným výsledkům.

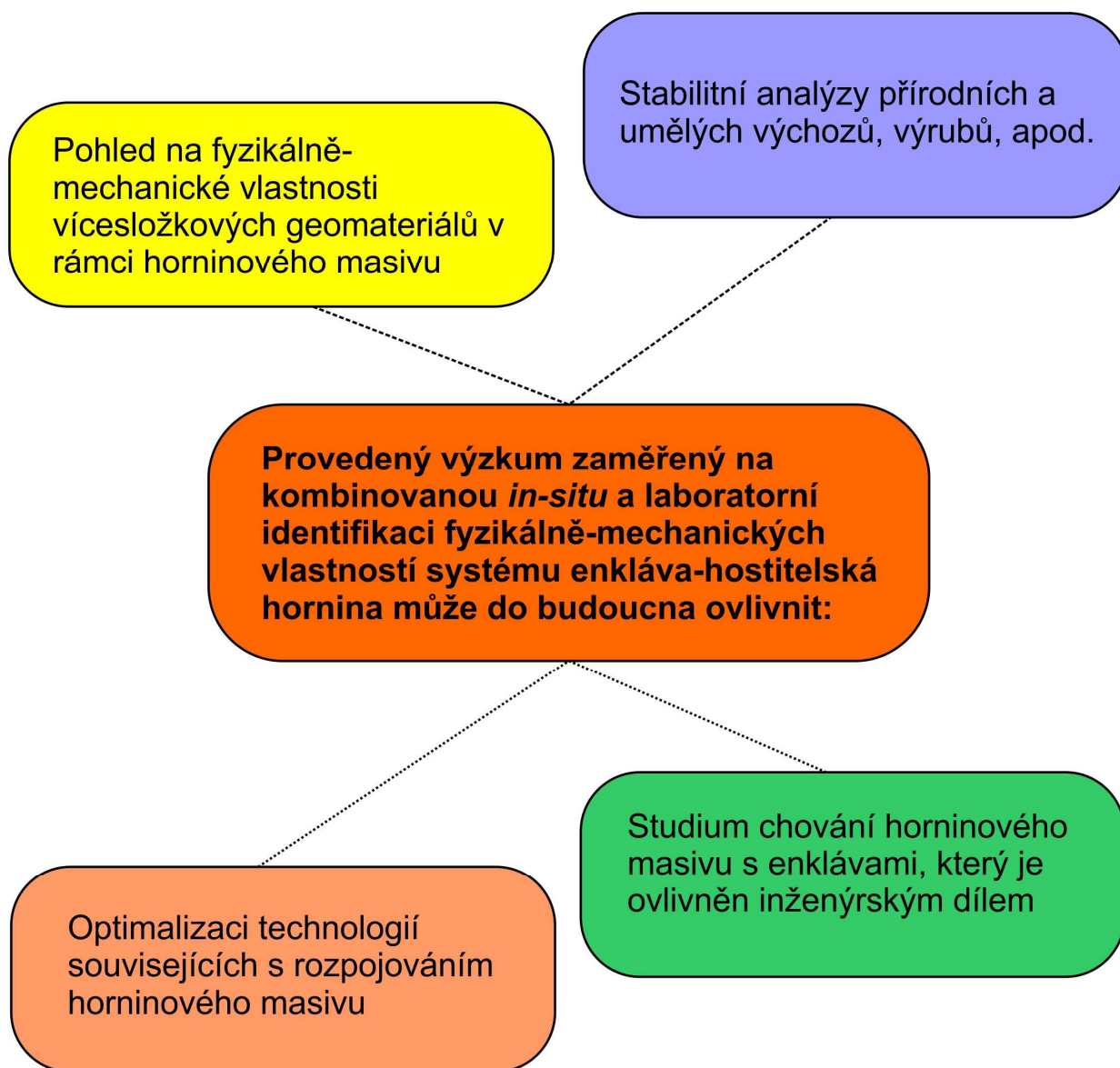


**Obr. 19** – Výsledek modelování v rámci studovaného systému enkláva-granitoid na lokalitě Blansko-Arnoštov (A) a enkláva-syenitoid na lokalitě Kamenná (B).



Autor se pokusil o možnou predikci dopadů provedené studie na řešení základních úloh v rámci vědní disciplíny *Mechanika hornin* vyjádřit graficky (obr. 20). Z klíčových úloh, které mohou být studií ovlivněny, se jedná především o stanovení fyzikálně-mechanických vlastností dvousložkových geomateriálů a horninového masivu s obsahem mafických mikrogranulárních enkláv a dále o studium jeho chování v případě, že bude ovlivněn inženýrským dílem.

### **Predikce možných dopadů pilotní studie v rámci vědní disciplíny *Mechanika hornin***



**Obr. 20** – Predikce možných dopadů výzkumu fyzikálně-mechanických vlastností vícesložkových geomateriálů na řešené úlohy v rámci vědní disciplíny *Mechanika hornin*. Stupeň možného ovlivnění je vyjádřen vzdáleností od středové bubliny.

## 8 ZÁVĚR

Práce přináší nové korelační křivky a empirické vztahy pro systém enkláva-hostitelská hornina. Pilotní studie ukazuje možný směr výzkumu v rámci vědní disciplíny *Mechanika hornin*. Hlavní závěry kombinovaného výzkumu základových hornin z žulového a syenitového masivu s obsahem kompozičně odlišných mafických mikrogranulárních enkláv lze formulovat do následujících bodů:

- 1) na základě výsledků petrografického a mineralogického studia lze konstatovat, že mafické mikrogranulární enklávy obsahují, na rozdíl od hostitelských hornin, vyšší podíl minerálů s výbornou štěpností,
- 2) u křemenem bohatého systému enkláva-granitoid v enklávě převládají minerály ze skupiny amfibolu (magneziostastingsit, magneziohornblend), zatímco u křemenem chudého systému enkláva-syenitoid v enklávě převládají minerály ze skupiny tmavých slíd (biotit, flogopit),
- 3) výsledky studia mechanických vlastností ukazují, že důležitější, než minerální složení, je textura studovaných horninových typů,
- 4) mafické mikrogranulární enklávy, které vykazují ve srovnání s hostitelskou horninou vyšší hodnoty jednoosé tlakové pevnosti i pevnosti v příčném tahu, jsou vždy jemnozrnnější, než je hostitelská hornina, a distribuce jednotlivých minerálů je u enkláv více „pravidelnější“,
- 5) v případě křemenem bohatého systému není rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi enklávy a hostitelské horniny tak markantní, jako v křemenem chudém systému enkláva-syenitoid,
- 6) v případě, že se hornina s enklávou bude nacházet pod hladinou podzemní vody, bude rozdíl mezi pevnostní charakteristikou enklávy a okolní horniny ještě zřetelnější,
- 7) kontakty enklávy s okolní horninou nejsou místy s výrazným oslabením mechanických vlastností a mafické mikrogranulární enklávy jsou tak integrální součástí hostitelské horniny,
- 8) výsledky provedeného modelování ukazují, že vliv přítomnosti mafických mikrogranulárních enkláv může být pro hostitelský horninový masiv z hlediska jeho pevnosti velmi výrazný.

## 9 SEZNAM LITERATURY

- [1] ALTINDAG, R.; GÜNEY, A. ISRM suggested method for determining the Shore hardness value for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006a, 43, 19–22.
- [2] ALTINDAG, R.; GÜNEY, A. ISRM suggested method for determining the Shore hardness value for rock – reply. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006b, 43, 998–999.
- [3] ALTINDAG, R.; GÜNEY, A. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific Research and Essays*, 2010, 5, 2107–2118.
- [4] ANDREEV, G. E. A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: calculation formula. *International Journal of Mining Science and Technology*, 1991a, 13, 445–456.
- [5] ANDREEV, G. E. A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part II: contact conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*, 1991b, 13, 457–465.
- [6] ASTM. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Soil and Rock, Building Stones. In: *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1984.
- [7] ASTM. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In: *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1995, D 2938–2986.
- [8] ASTM. *Annual book of ASTM standards. Soil and rocks (I)*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2004, D 420–5611.
- [9] ATKINSON, R. H. Hardness tests for rock characterisation. In: *Rock testing and site characterization – compressive rock engineering*, 1993, 3, 105–117.
- [10] AYDIN, A. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In: *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Cham: Springer international publishing Switzerland, 2015, 25–33.
- [11] BABIČOVÁ, E. *Brno-Špilberk, průzkumná štola: Výsledky laboratorních rozborů hornin*. Nepublikovaná zpráva. Brno: GEOTEST, 1979, 68 s.
- [12] BABIČOVÁ, E. *Kožichovice: Laboratorní rozborů hornin*. Nepublikovaná zpráva. Brno: GEOTEST, 1981, 11 s.
- [13] BABIČOVÁ, E. *Blansko-Klamovka: Laboratorní rozborů hornin*. Nepublikovaná zpráva. Brno: GEOTEST, 1984, 5 s.
- [14] BARBARIN, B. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 2005, 80, 155–177.

- [15] BELL, F. G. *Engineering geology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, 592 s.
- [16] BEST, M. G. *Igneous and Metamorphic Petrology*. New York: WH Freeman, 2003, 729 s.
- [17] BIENIAWSKI, Z. T. *Rock mechanics design in mining and tunnelling*. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1984, 272 s.
- [18] BUYUKSAGIS, I. S. Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183, 399–406.
- [19] BROUL, J. Polní expres metodika KPL pro určování technické charakteristiky hornin in situ. In: *Sborník symposia Hornická Příbram – sekce mechanika hornin*, 1969.
- [20] CARNEIRO, F. L. L. B. A new method to determine the tensile strength of concrete. In: *Proceedings of the 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules, Section 3*, 1943, 126–129.
- [21] ČSN EN 1926. *Zkušební metody přírodního kamene – stanovení pevnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2000, 11 s.
- [22] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – část 6: pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2001, 12 s.
- [23] DIDIER, J.; BARBARIN, B. *Enclaves and granite petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1991, 625 s.
- [24] FOURCADE, S.; ALLEGRE, C. J. Trace elements behavior in granite genesis: A case study the calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrénées, France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1981, 76, 177–195.
- [25] GADAS, P.; GREGEROVÁ, M. Mafické enklávy z granitoidů vystupujících v širším okolí Blanska. *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 2005*, 2006, 13, 89–94.
- [26] GOODMAN, R. E. *Introduction to rock mechanics*. New York: Wiley, 1989, 576 s.
- [27] HAJN, J. *Tvrdoměrné metody v mechanice hornin*. Bakalářská práce. Brno: FAST VUT, 2011, 118 s.
- [28] HANÁK, J.; HORÁK, V. Geotechnické vlastnosti granodioritů východní granitoidové zóny brněnského masivu. In: *Ročenka GMS 1986–1987*. Brno: GEOTEST, 1988, 219–231.
- [29] HOLUB, F. V. Ultrapotassic plutonic rocks of the durbachite series in the Bohemian Massif: Petrology, geochemistry and petrogenetic interpretation. *Sborník geologických věd, ložisková geologie, mineralogie*, 1997, 31, 5–24.
- [30] HORÁK, V. *Experiment v mechanice hornin a jeho realizace*. Habilitační práce. Brno: FAST VUT, 2000, 177 s.
- [31] CHLUPÁČ, I.; VRÁNA, S. Regional geological subdivision of the Bohemian Massif on the territory of the Czech Republic (Report of the Working Group for Regional Geological Classification of the Bohemian Massif at the former Czechoslovak Stratigraphic Commission). *Journal of Geosciences*, 1994, 39, 127–144.

- [32] ISRM. *Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon press, 1981, 211 s.
- [33] ISRM. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Ankara: International Society for Rock Mechanics, 2007, 628 s.
- [34] ISRM. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Cham: Springer international publishing Switzerland, 2015, 94 s.
- [35] JENNINGS, M.; WRIGHT, D. Guidelines for sawing stone. *Industrial Diamond Review*, 1989, 49, 70–75.
- [36] KAHRAMAN, S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38, 981–994.
- [37] KATZ, O.; RECHES, Z.; ROEGIERS, J. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37, 723–728.
- [38] KIM, M. K.; LADE, P. V. Modelling rock strength in three dimensions. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Oxford: Pergamon press, 1984, 21–33.
- [39] KONCAGÜL, E. C.; SANTI, P. M. Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36, 139–153.
- [40] KRMÍŘEK, L. *Posouzení vlivu přítomnosti kompozičně odlišných enkláv na fyzikálně-mechanické vlastnosti základových hornin z žulového a syenitového masivu: pilotní studie z ČR*. Habilitační práce. Brno: FAST VUT v Brně, 2015, 116 s.
- [41] LANGMUIR, C. H.; VOCKE, R. D.; HANSON, G. N.; HART, S. R. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 37, 380–392.
- [42] LI, D.; WONG, L. N. Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. *Rock mechanics and rock engineering*, 2013, 46, 269–287.
- [43] MELLOR, M.; HAWKES, I. Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli. *Engineering Geology*, 1971, 5, 173–225.
- [44] MOITA, P.; SANTOS, J. F.; PEREIRA, M. F.; COSTA, M. M.; CORFU, F. The quartz-dioritic Hospitais intrusion (SW Iberian Massif) and its mafic microgranular enclaves – Evidence for mineral clustering. *Lithos*, 2015, 224, 78–100.
- [45] NANCE, R. D.; GUTIÉRREZ-ALONSO, G.; KEPPIEC, J. D.; LINNEMANN, U.; MURPHY, J. B.; QUESADA, C.; STRACHAN, R. A.; WOODCOCK, N. H. Evolution of the Rheic ocean. *Gondwana Research*, 2010, 17, 194–222.
- [46] O’ROURKE, J. E. Rock index properties for geoenvironmental engineering in underground development. *Mining Engineering*, 1989, 8, 106–110.

- [47] PAVLÍK, J. *Srovnání tvrdosti hornin zjištěných Schmidovým kladívkem in situ s některými laboratorními zkouškami*. Nепublikovaná zpráva. Brno: GEOTEST, 1973, 27 s.
- [48] RECH, S. *Brno-Špilberk, průzkumná štola: Hodnoty odskoku Schmidova kladívka typu N v levé stěně štoly*. Nепublikovaná zpráva. Brno: GEOTEST, 1979, 12 s.
- [49] SHALABI, F. I.; CORDING, E. J.; AL-HATTAMLEH, O. H. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Engineering Geology*, 2007, 90, 138–147.
- [50] SINGH, R. N.; HASSANI, F. P.; ELKINGTON, P. A. S. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. In: *Proceedings of the 24<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics*. College Station: Texas A&M University, AEG, 1983, 599–609.
- [51] SŁABY, E.; GÖTZE, J.; WÖRNER, G.; SIMON, K.; WRZALIK, R.; ŚMIGIELSKY, M. K-feldspar phenocrysts in microgranular magmatic enclaves: a cathodoluminescence and geochemical study of crystal growth as a marker of magma mingling dynamics. *Lithos*, 2008, 105, 85–97.
- [52] SŁABY, E.; MARTIN, H. Mafic and felsic magma interaction in granites: the Hercynian Karkonosze Pluton (Sudetes, Bohemian Massif). *Journal of Petrology*, 2008, 49, 353–391.
- [53] TUĞRUL, A.; ZARIF, I. H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 1999, 51, 303–317.
- [54] VERNON, R. H. Crystallization and hybridism in microgranitoid enclave magmas: microstructural evidence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95, 17849–17859.
- [55] WINKLER, K. W.; PLONA, T. J. Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 1982, 87, 10776–10780.
- [56] WUERKER, R. G. The status of testing strength of rocks. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1953, 1108–1113.
- [57] YAŞAR, E.; ERDOĞAN, Y. Estimation of rock physicomachanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 2004, 71, 281–288.
- [58] ZÁRUBA, Q.; MENCL, V. *Inženýrská geologie*. Praha: Academia, 1974, 511 s.
- [59] ZAVORAL, J. a kolektiv autorů. *Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin. III. Mechanika hornin*. Praha: Český geologický úřad, 1987, 90 s.
- [60] ZISMAN, W. A. Comparison of the statically and seismologically determined elastic constants of rocks. *Geology*, 1933, 19, 680–686.

## **ABSTRAKT:**

Zkrácená verze habilitační práce ukazuje možný trend studia v rámci geotechnické vědní disciplíny *Mechanika hornin*. V práci je komplexně testován vliv přítomnosti kompozičně odlišných enkláv na fyzikálně-mechanické vlastnosti hostitelských hornin z křemenem bohatého granitoidního masivu (dvousložkový systém enkláva-granitoid) na straně jedné a z křemenem chudého syenitoidního masivu (dvousložkový systém enkláva-syenitoid) na straně druhé.

Teze habilitační práce přináší nové korelační křivky a empirické vztahy z hlediska skleroskopické tvrdosti stanovené pomocí Schmidtova kladívka a Shoreho skleroskopu, pevnosti v jednoosém tlaku a pevnosti v příčném tahu pro horninové masivy s obsahem kompozičně (petrograficky, mineralogicky, geochemicky) odlišných enkláv.

## **ABSTRACT:**

The habilitation thesis (shortened version) shows a possible research trend in the geotechnical engineering discipline of *Rock mechanics*. The effect of the presence of compositionally distinct enclaves on the physico-mechanical properties of host rocks, both from a quartz-rich granitic massif (two-component system enclave-granitoid) and from a quartz-poor syenitic massif (two-component system enclave-syenitoid), is comprehensively tested in this work.

The habilitation thesis presents new correlation curves and empirical equations based on the Schmidt hammer and Shore scleroscope hardness, uniaxial compressive strength and rock tensile strength of rock bodies containing compositionally (petrographically, mineralogically, geochemically) distinct enclaves.