

## 1. ÚVOD

Předkládaná práce popisuje etapy a výsledky výzkumu petrofyzikálních vlastností arkóz z vybrané lokality Březín v západních Čechách.

Má za cíl přehledně zpracovat výsledky fyzikálně-mechanických laboratorních zkoušek zájmové horniny, získané z externích pracovišť, a dále rozšířit tento soubor poznatků prostřednictvím dalších zkušebních a analytických postupů. Mezi nimi i zkouškou hydraulické roztažnosti. Vedle samotných výsledků byla pozornost věnována odkrývání možných závislostí v rámci samotného souboru petrofyzikálních veličin.

Zkoumanou horninou byla potenciální surovina na výrobu blokového stavebního kamene. S ohledem na toto zamýšlené cílové použití byla zkušební tělesa vzorkované horniny podrobována příslušným technologickým testům, které měly zjistit úrovně relevantních vlastností.

Částečné posouzení výsledků vybraných fyzikálně-mechanických zkoušek proběhlo za využití klasifikačních schémat, dostupných ve vědecké literatuře.

Tato práce, zahrnující základní petrofyzikální výzkum, může částečně posloužit jako výchozí datový rámec pro případné hodnocení trvanlivosti zkoumané horniny.

## 2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1. Petrografické charakteristiky

Petrografické charakteristiky představují soubor makroskopických a mikroskopických znaků, vzniklých během vlastní geneze horniny i při pozdějších zvětrávacích pochodech. Jedná se nejen o vlastní mineralogické složení horniny, ale též o prostorové uspořádání horninových součástí a dále o typ a rozmístění pórového prostoru, které dohromady vytvářejí charakteristickou vnitřní stavbu horniny.

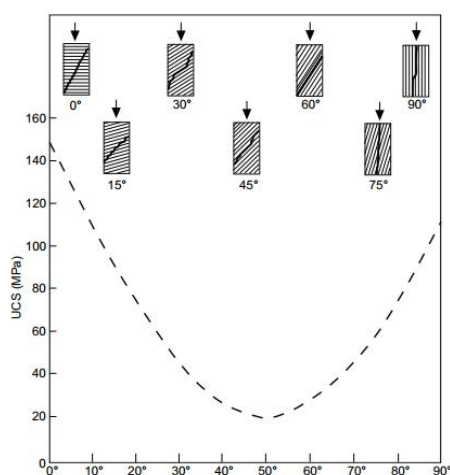
#### 2.1.1. Pevné fáze

Mineralogicko-petrografický rozbor přírodního kamene v makro- i mikroměřítku je nezbytnou součástí studia hornin, jenž přináší údaje potřebné pro správnou interpretaci fyzikálních vlastností a trvanlivosti.

Z řady experimentálních prací (např. Hawkins a McConnell 1992, Hawkins 1998, Chen a Hu 2003, Schön 2011, Siegesmund a Dürrast 2011) vyplývá, že již znalost samotného modálního složení může v některých případech přispět k částečné predikci vybraných fyzikálních vlastností. Ještě zřetelnější je potom např. vztah mezi zrnitostí a mechanickými vlastnostmi petrograficky příbuzných hornin (Příkryl a kol. 2001).

Kromě hlavních a vedlejších horninotvorných minerálů jsou analytické metody pevných fází zaměřeny i na jílové minerály a minerály tvořící tmel. Výsledky předešlých prací naznačují, že vliv těchto látek na mechanické vlastnosti hornin může být značný, přestože je jejich zastoupení v některých litotypech velmi nízké (Rodriguez-Navarro a kol. 1997, Delgado-Rodrigues 2001). Význam může mít i forma, v jaké se jílové minerály v hornině vyskytují (Colas a kol. 2011).

Dreesen a Dusar (2004) poukázali na význam zrnitosti a vyřídění siliciklastických sedimentárních hornin ve vztahu k jejich technologickým vlastnostem.



Obr. 1. Vliv orientace vrstevních ploch (osa x) na pevnost v prostém tlaku (UCS; Brown a kol. 1977).

Orientovaná textura hornin a přednostní orientace krystalů, například u slíd či amfibolů, mají pak prokazatelný vliv především na mechanické vlastnosti (Obr. 1), ale i na anizotropii propustnosti (Sebastian a kol. 2007).

Analýzu horninové mikrostruktury lze provést pomocí mikroskopovacích metod, případně softwarovou analýzou obrazu. Určení přibližné zrnitosti z petrografických výbrusů lze provést (Delesse 1848), toto měření je však vždy zatíženo určitou mírou chyby, pro což již byly navrženy opravné výpočty (Dullien 1992).

### 2.1.2. Pórový prostor

Snaha o hlubší pochopení vztahu vnitřní stavby a makroskopických vlastností kamene vedla k pokusům co možná nekomplexněji uchopit výzkum součásti stavebního kamene zvané pórový prostor. Důležitost tohoto výzkumu v oblasti stavebního kamene dokládají empirické práce, které uvádějí, že od vlastností pórového prostoru se odvíjí pevnost a celková budoucí trvanlivost struktury kamene vystavená vnějším podmínkám (Ordóñez a kol. 1997). Vysoký stupeň negativní korelace hodnot pórovitosti s výsledky dynamických a statických mechanických zkoušek popsal Benavente a kol. (2006). Jako nástroje slouží při výzkumu pórového prostoru mimo jiné empirické modely, jež se pro jednotlivé litologické typy neustále zpřesňují. Stále však existuje určitá míra skepse ohledně předpovědi makroskopického chování hornin a interpretací naměřených parametrů. Z dřívějších prací je však jisté, že chování porézního materiálu a neporézního materiálu se v mnoha aspektech zásadně liší (Dullien 1992).

Pojem pórový prostor zahrnuje „volný“ prostor horniny. Jedná se o veškeré dutiny, kanálky či mezery přítomné v hornině, označované jako póry. Jedná se též o objemový podíl, který v hornině mohou zaujímat fluidní látky (Schön 2011). Pórovitost celková je negenetický termín, vztahující se na póry jakéhokoliv původu. Příklady způsobů klasifikace pórovitosti jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1. Příklady klasifikace pórovitosti.

Kritérium rozdělení	Kategorie	Rozměry pórů
Relativní stáří	Primární, sekundární, terciární	x
Pozice vůči klastům	Intergranulární, intragranulární, puklinová, pórovitost matrix	x
Geometrie*	Kulovitá, válcovitá, štěrbinovitá...	x
Pozice vůči ostatním pórům a povrchu kamene	Izolovaná, slepá („dead-end“), pórovitost s úzkými hrdly („ink-bottle“)	x
Velikost*	Mikropórovitost, mesopórovitost, makropórovitost	< 2 – 50nm<
Způsob přenosu vlhkosti	Subkapilární, kapilární, pórovitost umožňující volný pohyb vody	<0,1 – 2500μm<

\*samotný pojem rozměru pórů je problematický a předpokládá silné zjednodušení pórové geometrie (Dullien 1992). Moderním přístupem je pojetí pórového prostoru z hlediska geometrie fraktálů (Lay Lian a kol. 2004).

Vzhledem k tomu, že ne všechny póry přispívají k makroskopickým vlastnostem horniny stejnou měrou, došlo v odborné literatuře na rozlišování jejích podtypů. Patrně nejdůležitější je dělení na

pórovitost uzavřenou a otevřenou (Dullien 1992). Uzavřené póry jsou naprosto izolované od svých susedů. Ovlivňují makroskopické vlastnosti jako hustotu, mechanickou pevnost a tepelnou vodivost, ale neovlivňují procesy jako adsorpci plynu apod. Na druhé straně póry, které mají spojitě kanálky propojené s externím povrchem kamene, tvoří pórovitost otevřenou (Pechoušek 2010).

Z hlediska hydraulického chování hornin došlo dále k vymezení termínu pórovitosti efektivní. Toto označení však může nabývat nejednotného významu. V anglické literatuře se pod pojem efektivní pórovitost („effective porosity“) může označovat podíl maximálního objemu vody absorbované horninou ve vakuu s tím, že předchozí fyzikálně vázané vlhkosti byla hornina zbavena (Cueto a kol. 2009). Často se však pod stejným pojmem rozumí doplněk pórovitosti uzavřené, čili ekvivalent výše uvedené pórovitosti otevřené (Dullien 1992, Buj a Gisbert 2010). Oproti tomu vystupuje v české literatuře definice efektivní pórovitosti i jako podíl pórů umožňující za normálních podmínek volný pohyb vody (Juračková 2009, Tesař 2010), čímž se stává podmnožinou pórovitosti otevřené. Rozdíl mezi těmito spočívá v objemu fyzikálně vázané vody, jež obsazuje část objemu otevřených pórů, ale není za normálních podmínek volně pohyblivá. I toto pojetí efektivní pórovitosti se objevuje v anglicky psané literatuře (Ezekwe 2010). Vázaná voda je zde označována jako CBW („clay-bound water“, Prammer a kol. 1996). Související termín zdánlivá pórovitost odpovídá podílu objemu vody absorbované horninou během zkoušky nasákavosti za atmosférického tlaku.

Za nejdůležitější charakteristiky pórového prostoru označili Buj a Gisbert (2010) pórovitost, velikostní distribuci pórů, geometrii pórů a jejich propojenost. Právě tyto faktory mohou dle autorů ovlivňovat absorpci fluid a rovněž předurčovat fyzikální vlastnosti (nasákavost, odolnost vůči účinkům krystalizace solí).

Tab. 2. Vybrané způsoby stanovení pórovitosti.

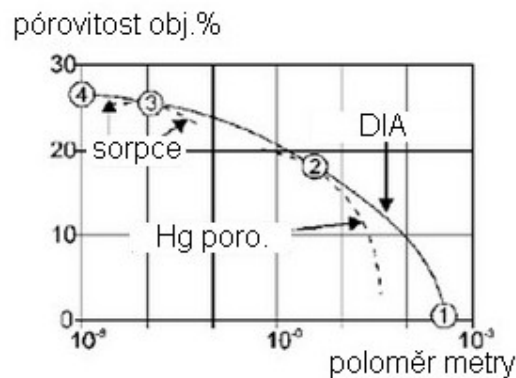
Název zkoušky či měření	Anglický ekvivalent	Princip metody
Zkouška nasákavosti vodou ve vakuu	Porosity accessible to water	Vážení a výpočet
Zkouška nasákavosti vodou za atmosférického tlaku	Free porosity	Vážení a výpočet
Analýza obrazu	Image analysis	Součet ploch zaujímaný póry ve výbrusu
Adsorpce dusíku	Nitrogen adsorption	Měření spotřeby plynu z aplikovaného tlaku
Vysokotlaká rtuťová porozimetrie	Mercury intrusion porosimetry	Měření spotřeby rtuti z aplikovaného tlaku
Algoritmus MINLITH	MINLITH algorithm	Výpočet měrné a objemové hmotnosti

Další parametr ve vztahu pórovitosti a trvanlivosti stavebního kamene představil Ordóñez a kol. (1997). Popisuje rozsah tzv. „ink-bottle“ systému horniny, odvozeného od množství zachycené rtuti při jejím vytlačování v rámci měření rtuťovou porozimetrií. „Ink-bottle“ zde podle autora odráží podíl

úzkých pórových hrdel v pórovém systému, které způsobují dlouhodobé zadržování vody v pórech, čímž dlouhodobě zhoršují mechanické vlastnosti kamene.

Vedle dělení pórovitosti podle velikosti pórů byl vymezen rozměrový rozsah kapilární pórovitosti na 0,1 – 2500  $\mu\text{m}$  (Ordóñez a kol. 1997, Buj a Gisbert 2010). Z označení vyplývá, že póry v tomto rozsahu odpovídají za transport vody kapilárním mechanismem. Právě vysoký podíl pórů spadajících do tohoto rozmezí výrazně přispívá k „citlivosti“ kamene na vodní prostředí.

Naměřená hodnota pórovitosti je závislá na zvolené metodě (Dullien 1992). Vybrané způsoby stanovení pórovitosti jsou uvedeny v tabulce 2. Pro dosažení co nejpřesnějšího popisu pórového prostoru je vhodné použití více metod (Obr. 2).



Obr. 2. Vhodná volba metody měření pórovitosti v závislosti na pórových poloměrech; sorpce - adsorpce plynu, Hg-poro - rtuťová porozimetre, DIA - analýza obrazu (upraveno podle Meng 1993).

## 2.2. Fyzikální vlastnosti

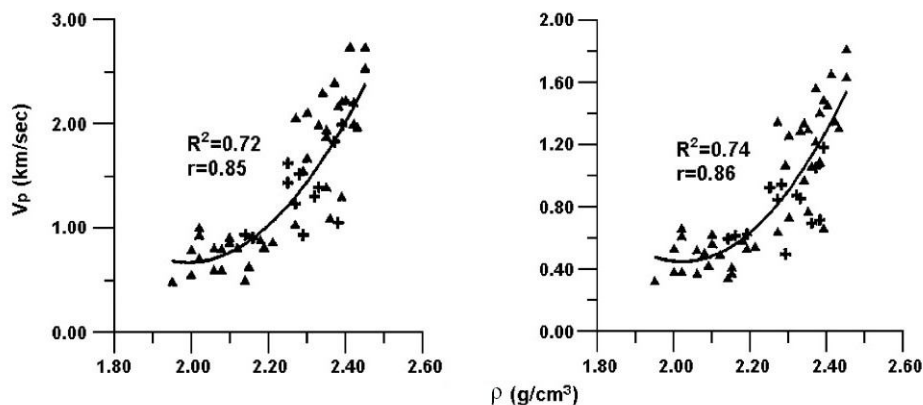
### 2.2.1 Indexové vlastnosti

Jako indexové se uvádějí základní fyzikální vlastnosti hornin a stavebních kamenů (Příkryl a kol. 2009). Vedle pórovitosti se jedná o měrnou hmotnost, objemovou hmotnost a nasákavost.

Objemová hmotnost je vztažena na celý objem kamene (tj. včetně pórů), měrná hmotnost pouze na hustotu pevné fáze horniny („nepropustných“ fází, Bourgés 2006). Měrná hmotnost tak poskytuje informaci o složení pevné fáze (Siegesmund a Dürrast 2011).

Hlavními faktory ovlivňujícími objemovou hustotu jsou: zrnitost, vytřídění, opracování klastů a kompaktnost kamene (Bourgés 2006). Důležitou úlohu hraje i přítomnost, chemické složení a zastoupení horninového tmelu (Cueto a kol. 2009). Teorii uspořádání zrn a jeho vliv na indexové vlastnosti rozpracoval Scheidegger (1960).

Objemová hmotnost je parametrem ovlivňujícím rychlost šíření seismických vln. Tento vztah prokázali Chen a Hu (2003) u vybraných siliciklastických sedimentů jako exponenciální (Obr. 3). Siegesmund a Dürrast 2011 poukázali na vliv objemové hmotnosti na pevnost v prostém tlaku a ohybu a též na hodnoty Youngova modulu. Platnost těchto vztahů je dle Kaplana (1959) omezena na zvolený litotyp a daný metodický postup.



Obr.3. Závislost rychlosti šíření primárních seismických vln (osa y) na objemové hmotnosti (osa x, Chen a Hu 2003)

S charakterem pórového prostoru úzce souvisí schopnost hornin absorbovat vodu. Vzhledem k povaze horninových pórů jsou rychlost absorpce, vyjádřená formou koeficientu nasákavosti, a celková hodnota možného objemu absorbované vody (tj. nasákavost) řízeny kapilárním mechanismem transportu kapalin. K jeho popsání slouží Hagen-Poiseuillova rovnice vyjadřující rychlost laminárního proudění vody v kapiláře (1).

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l} \cdot r^4, \quad (1)$$

kde  $Q$  je objemová rychlost proudění,  $\eta$  dynamická viskozita fluida,  $l$  délka kapiláry,  $r$  poloměr kapiláry.

Na přímo úměrný vztah mezi koeficientem nasákavosti a propustností hornin poukázali Zimmerman a Bodvarsson (1991), za předpokladu převládajícího podélně válcovitého tvaru pórů.

Mosquera a kol. (2000) popsal vztah mezi koeficientem nasákavosti a pórovitostí dle vztahu (2).

$$C = p\rho \sqrt{\frac{r\gamma \cos \theta}{2\eta}}, \quad (2)$$

kde  $p$  je pórovitost,  $\rho$  hustota fluida,  $r$  poloměr póru,  $\gamma$  povrchové napětí,  $\theta$  úhel smáčení a  $\eta$  dynamická viskozita fluida.

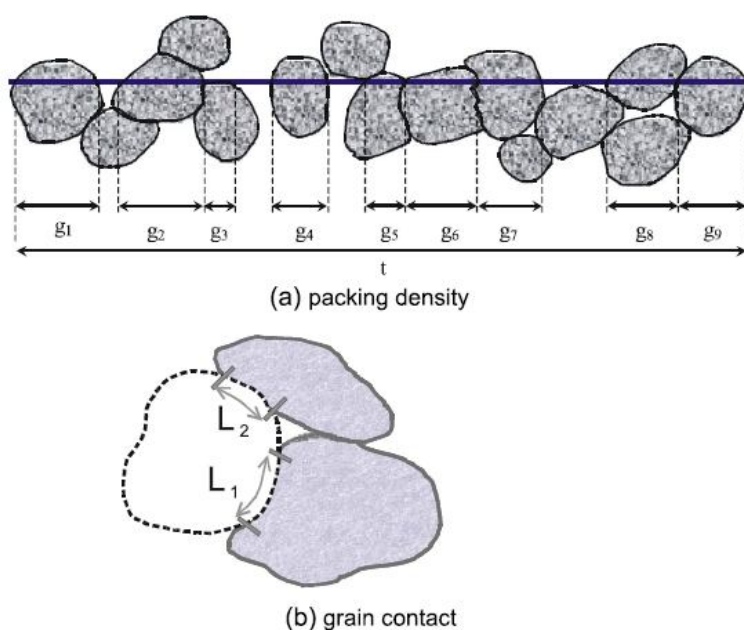
Z rovnice (1) je patrný zásadní vliv průměru kapiláry/póru na rychlost absorbování. Pórové rozměry spolu s pórovitostí a její prostorovou distribucí tak mohou být hlavními faktory ovlivňujícími schopnost absorpce a tím i trvanlivost (Benavente a kol. 2002, Benavente a kol. 2006, Graue a kol. 2011).

## 2.2.2 Mechanické vlastnosti

Od 60. let 20. století panuje v geotechnických vědách snaha sjednotit a zpřesnit termín pevnosti jakožto základní charakteristiky, a to především pro účely inženýrsko-geologické praxe. Tomuto tématu se věnovali například Coates (1964), Deer a Miller (1966) či Bienawski (1973). Podle Hawkinse (1998) se pevností obecně rozumí „schopnost odolat napětí, což v důsledku představuje kvalitu těles schopných vydržet aplikovaný tlak, aniž by došlo k jejich porušení“. Hlavní parametr, kterým je vyjadřována pevnost je pevnost v prostém tlaku (UCS).

Jak popsali Dyke a Dobereiner (1991) či Smith (1999), UCS je komplexním ukazatelem tlakové pevnosti struktury, na jejíž výslednou hodnotu má vliv více proměnných. Tyto proměnné mají původ ve vnitřní struktuře horniny, její mineralogii a chemismu.

Pevnost je odrazem hustoty uspořádání zrn ve struktuře, což lze vyjádřit následujícími parametry GC a GAR.



Obr. 4. Zobrazení parametru hustoty uspořádání zrn (a) a podílu kontaktního obvodu (b) jakožto vstupní hodnoty do rovnice 3 (Dyke a Dobereiner 1991)

Dyke a Dobereiner (1991) poukázali na vliv podílu celkového „kontaktního“ obvodu (GC - „grain contact“) všech zrn na prostou pevnost (Obr. 4b). Výpočet tohoto obvodu v procentech je proveden dle rovnice (3). Podobný parametr týkající se hustoty uspořádání, GAR - „grain area ratio“ publikovali Ersoy a Waller (1995). Ten je vyjádřen jako podíl objemu zrn a objemu horniny (4).

$$GC(\%) = \frac{L}{TL}, \quad (3)$$

kde  $L$  je součet kontaktních délek a  $TL$  celkový obvod klastů.

$$GAR(\%) + matrix(\%) + \phi(\%) = 100, \quad (4)$$

kde  $\phi$  je pórovitost.

Jeng a kol. (2004) využili parametr kvantifikace hustoty uspořádání zrn dle Kahna (1956; „packing density“, Obr. 4a). Vysoké hodnoty tohoto parametru odpovídaly vysokým hodnotám pevnosti v prostém tlaku.

Hodnotu UCS silně ovlivňuje stupeň nasycení, přítomnost a rozměry diskontinuit, doba „uzrání“ kamene po jeho vylomení z masívu a v malé míře i zvolená metoda stanovení pevnosti, spolu s rozměry zkušebních těles (Hawkins 1998).

Strukturní anizotropie hornin, způsobená např. vrstevnatostí, má přímý dopad na pevnost kamene v různých směrech. V případě závislosti UCS na pórovitosti jsou výsledky nekoherentní a podle litotypu a hodnoty pórovitosti se mohou lišit (Alfes 1991). Jako hlavní faktory ovlivňující pevnostní charakteristiky pískovců označila Bourgeois (2006) distribuci pórů spolu se zrnitostí.

Chen a Hu 2003 poukázali na zásadní vliv zastoupení křemene a jílových minerálů (resp. matrix) na pevnosti v tlaku sedimentárních hornin. Jako důležitý se jejich poměr rovněž ukázal při procesu hydraulického měknutí (viz níže).

Vedle tlakové pevnosti nabyly na technologickém významu zkoušky pevnosti v tahu. V současnosti je tento druh namáhání popsán i jako důsledek působení krystalizačních tlaků vodorozpustných solí v pórovém prostoru (Angeli a kol. 2006).

Pevnost v tahu může být ovlivňována pórovitostí a jejím rozmístěním, orientací vrstevních ploch, minerálních zrn i samotných krystalových struktur (Siegesmund a Dürrast 2011). Anizotropie pevnosti v tahu je v případě pískovců uváděna až 40% (Koch a Siegesmund 2005). Podle těchto autorů jsou tyto proměnné odpovědné i za veliké rozdíly v tahové pevnosti u litologicky příbuzných sedimentů. Roli zde může hrát též propojování intergranulárních a intragranulárních puklin při namáhání (Walsh a Brace 1966).

Metodika stanovení tahové pevnosti není jednotná, ale převládajícím způsobem je zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilská zkouška). Její výsledky se podle autorů Kim a Lade (1984) velmi blíží prosté tahové pevnosti. Oproti tomu starší výsledky Peschela (1977) poukazují na poměr výsledků příčného a prostého tahu blíží se 2:1.

Dle Peschela (1977) hodnoty UCS vykazují vysoký stupeň korelace s výsledky Brazilské zkoušky (s hodnotami v poměru 1:10). Toto není v souladu s výsledky Hirschwalda (1912), který k bližší korelaci hodnot těchto zkoušek nedospěl (poměry hodnot kolísaly v rozmezí 1:10 a 1:15).

Pro účely této práce budou pod přetvárné charakteristiky spadat Youngův elastický modul, sřížný modul a Poissonův poměr.

Youngův modul je základním parametrem charakterizujícím elastické chování materiálu (Ide 1936). Jedná se o směrnici deformační křivky v počáteční oblasti namáhání tělesa tlakovou (resp. tahovou) silou, na kterou se vztahuje platnost Hookeova zákona.

Podobně jako v případě pevnosti, odrážejí výše zmíněné moduly složení, vnitřní stavbu, anizotropii a vlhkost podrobovaného horninového tělesa (Jeng a kol. 2004). V případě stavebního kamene odrážejí moduly i stupeň „zachování“ (Siegesmund a Dürrast 2011).

Z předchozích prací je zřejmý vysoký stupeň korelace mezi Youngovým modulem a pevností v prostém tlaku (Dyke a Dobereiner 1991, Jeng a kol. 2004, Siegesmund a Dürrast 2011).



Značné rozdíly mezi výsledky stanovení Youngova modulu statickou ( $E_{stat}$ ) a dynamickou metodou byly popsány v rámci předešlých prací. Vyšší výsledky  $E_{dyn}$  byly popsány v publikaci Ide (1936), a to o 4 až 20% oproti  $E_{stat}$ . Na obecně nižší hodnoty statického modulu v porovnání s dynamickým poukazují i King (1970), Eissa a Kazi (1988), Schön (2004), Siegesmund a Dürrast (2011).

Převažující názor na příčinu rozdílu hodnot těchto modulů spočívá dle posledně citovaných autorů v roli mikrotrhlin a pórů, které ovlivňují statické testy více než dynamické, jejichž průběh je velmi rychlý. Toto tvrzení je podepřeno pozorováním, kdy vzorky s vyšší pórovitostí vykazují vyšší rozdíly mezi  $E_{stat}$  a  $E_{dyn}$ . Vyšší stupeň korelace s prostou pevností pak dává statická metoda (King 1970).

Střížný modul je konstantou úměrnosti v režimu střížného napětí. Představuje tak obdobu Youngova modulu v případě, kdy je těleso namáháno střížnou silou.

Dle Dobereinera a Oliveiry (1986) je střížný modul méně závislý na obsahu vlhkosti než Youngův modul.

Hodnota střížného modulu klesá s rostoucím obsahem jílu a pórovitostí (Castagna a kol. 1985). Podle dřívějších výsledků Tosayi (1982) je pak tento modul více závislý na pórovitosti.

Poissonovo číslo udává schopnost odolat napětí ve směru orientovaném kolmo k tomuto napětí (Gercek 2006). Hodnoty dosahují v případě hornin nejčastěji rozmezí 0 až 0,5 a mění se v závislosti na aplikovaném napětí a vzniku mikrotrhlin (změna hodnot nastává při přechodu z lineárně elastické oblasti namáhání; Bienawski 1967). V případě vysoce anizotropních hornin jsou známy i případy hornin s poměrem vyšším než 0,5. K vyššímu poměru přispívá i saturace materiálu.

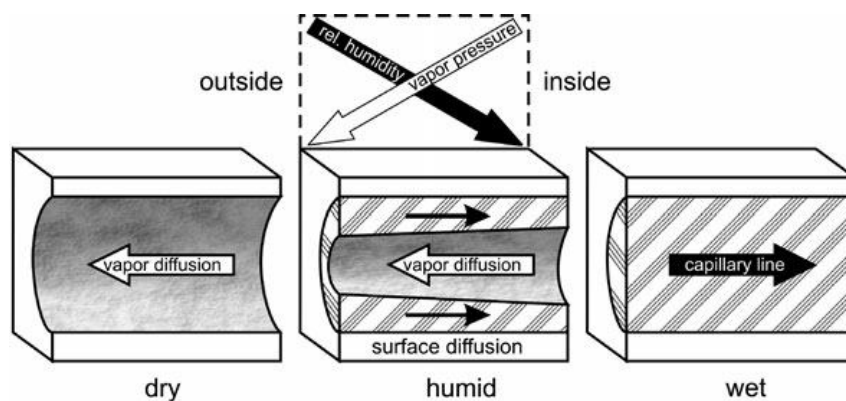
### **2.3. Metody odhadu citlivosti stavebního kamene vůči vodnímu prostředí**

Předešlé výsledky (Schön 2011, Dreesen a Dusar 2004, Siegesmund a Dürrast 2011, Colas a kol. 2011) naznačují, že vysoké hodnoty pevnostních ani přetvárných vlastností stavebního kamene nemusejí být zárukou jeho odolnosti vůči vodnímu prostředí.

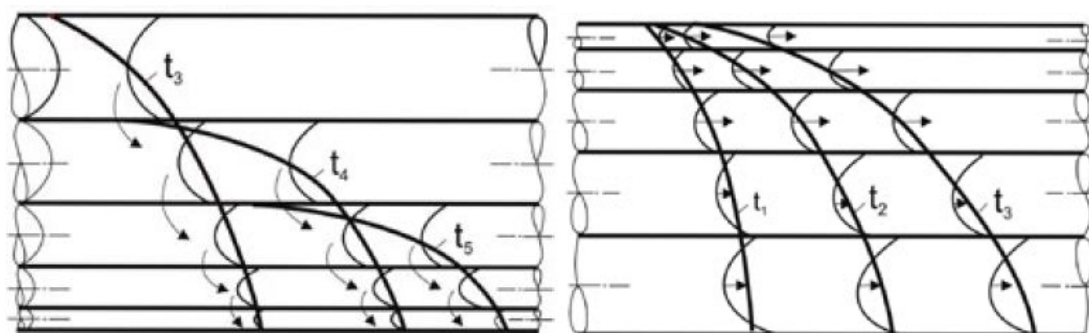
Příčinou této nezávislosti je povaha některých petrofyzikálních parametrů, jejichž význam narůstá při přechodu do vodního prostředí. Jedná se o konektivitu a zakřivenost pórového prostoru a velikostní rozdělení pórových hrdel. Vedle tohoto má význam i charakter kontaktů mezi zrny a forma matrix (Buj a Gisbert 2010).

Studium citlivosti kamene na vodní prostředí (tj. zjištění hydraulických parametrů) by podle Félix (1995) mělo být nedílnou součástí výzkumu a hodnocení kvality a trvanlivosti stavebního kamene. Podle Ordóñez a kol. (1997) jsou naopak výsledky fyzikálních zkoušek hydraulických parametrů dlouhodobě nekonzistentní a měly by být nahrazeny detailní analýzou pórového prostoru, především pórovitostí „ink-bottle“, jejíž výsledky jsou v lepší shodě s matematickými modely.

V anglické literatuře jsou pod pojmem „hygric properties“ popsány jevy týkající se přenosu vlhkosti v hornině od 0 do 95% relativní vlhkosti (RV, Delgado Rodrigues a Charola 1996). Převládajícím způsobem přenosu je v tomto případě difúze vodních par, poháněná nerovnoměrným rozložením jejich tlaků ve struktuře horniny, a doprovázená tvorbou sorpčních vrstev na povrchu pevných částic. Při tomto procesu dochází rovněž ke kondenzaci vody v nejužších kapilárách. Schéma hlavních způsobů přenosu vlhkosti je na obrázku (5).



Obr. 5. Hlavní způsoby přenosu vlhkosti v hornině a jejich řídicí síly (Holm 2001).



Obr. 6. Modelový průběh rychlosti kapilárního vzlínání v čase. Rychlost vysychání (vlevo) i vzlínání (vpravo) je vyšší při větším poloměru kapiláry. Vyšší síla menších kapilár má navíc tendenci natahovat vodu z okolních kapilár (upraveno dle Kruse 1995)

Další vlastnosti, označované jako „hydraulic properties“ popisují jevy spojené s činností kapalné vody. Ty probíhají mechanismy kapilárního vzlínání a volného proudění.

Pro běžné typy siliciklastických sedimentů je nejvýznamnější způsob přenosu kapilární vzlínání způsobené nerovnováhou mezi povrchovým napětím vody a adsorpčními silami (obvykle) smáčivých minerálních stěn v hornině. Jedná se tak o proces dosahování rovnováhy mezi adhezivními a kohezivními silami, přičemž užší póry představují prostředí s vyšší kapilární silou a nižší rychlostí sukce, což má vliv na rychlost a rozsah přenosu vody do kamene a z něj (Krus 1995, Obr. 6).

Řada prací (např. Fitzner a Snethlage 1982, Winkler 1994, Cueto a kol. 2009) se zabývala vymezením tzv. kapilární pórovitosti, jež je za atmosférických podmínek „odpovědná“ za transport vody v rámci horniny. Na základě těchto prací lze konstatovat, že v pórech větších (resp. širších) jak 2500  $\mu\text{m}$  jsou kapilární síly natolik oslabené, že transport vody kapilárním mechanismem je v těchto velmi malého významu. Oproti tomu póry o rozměrech pod 0,1  $\mu\text{m}$  neumožňují za atmosférického tlaku volný pohyb vody. Z výše uvedeného vyplývá předpoklad vyšší náchylnosti struktury kamene vůči vodnímu prostředí v případě, že značná část jejich pórů a pórových hrdel spadá do rozmezí 0,1 - 2500  $\mu\text{m}$ . Vedle velikostní distribuce pórů je rychlost přenosu vlhkosti dále ovlivněna konektivitou a zakřiveností (tortuositou) pórového prostoru (Buj a Gisbert 2010).

### 3. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ A STUDOVANÉ VZORKY

#### 3.1. Regionální vymezení zkoumané lokality

Vzorky hornin, analyzované v rámci této práce, pocházejí z oblasti Manětínska, z průzkumného území okolí tzv. „Zlatého lomu“. Ten je situován v jižní části geologické jednotky manětínské pánve, v okrese Plzeň-sever.

Geomorfologicky spadá tato oblast do západní části celku Rakovnické pahorkatiny (ČÚZK 1996). Dále se Manětínsko rozkládá na území dvou podcelků, z větší části Manětínské vrchoviny, východním okrajem pak Žihelské pahorkatiny. Samotná Manětínská vrchovina zahrnuje dva okrsky: Manětínskou kotlinu a Lomskou vrchovinu. Jejich rozhraní probíhá západovýchodním směrem přes Manětín.

Manětínská vrchovina představuje denudačními procesy modelovanou vrchovinu plochého charakteru se střední nadmořskou výškou 540 m, na řadě míst protknutou neovulkanickými tělesy. Severnější okrsek, Manětínská kotlina, je regionální sníženinou. Sedimentární a slabě metamorfované podloží je místy střídáno výraznými geomorfologickými prvky v podobě vulkanických stolových hor, které tvoří nejvýše položená místa vrchoviny (Doubravický vrch 660 m n.m., Chlumská hora 651 m n.m.). Hydrologická povodí obou okrsků jsou povětšinou odvodňována Manětínským potokem, který je přítokem Střely.

Jižní okrsek, Lomská vrchovina, je tvořen výše položeným reliéfem obdobného podloží (sedimenty, slabě metamorfované komplexy) se strukturálně-denudačními hřbety a s menším množstvím vulkanických kuželů (Špičák 611 m.n.m.). Zvětvování hornin je na několika místech kaolinického charakteru. Převládajícím půdním typem jsou vzhledem k pahorkatinnému reliéfu a slabě kyselé půdní reakci (arkóзовé podloží) kyselé hnědé půdy (Tomášek 2000). Klimaticky lze oblast Manětínska zařadit do mírně teplé a mírně vlhké oblasti s průměrnou roční teplotou 6°C a ročním úhrnem srážek okolo 600 mm.

#### 3.2. Geologické poměry Manětínské pánve

Území manětínské pánve se rozkládá na více než 300 km<sup>2</sup> a je protáhlé v severojižním směru. Je jednou ze soustavy limnických permokarbonských pánví Českého masívu, podoblasti středočeské a západočeské limnické pánve (Pešek 1996, Obr. 7).

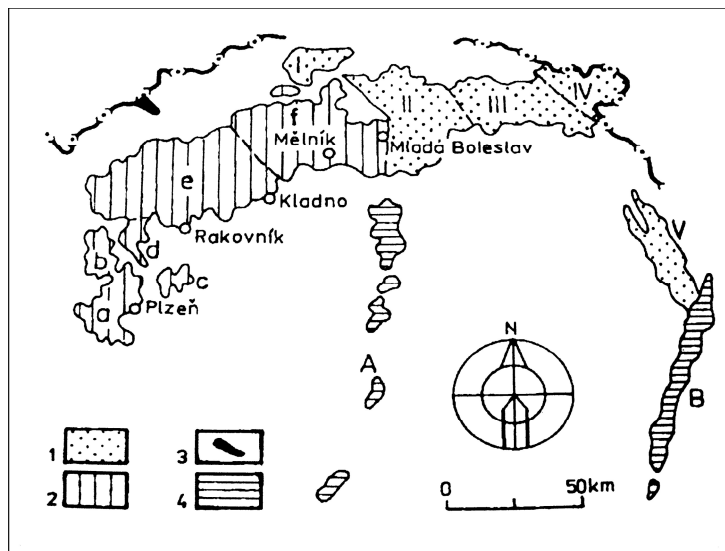
Vznik této pánve byl spjat s poklesy území navazujících na úpatí formujícího se variského pohoří. Novotvořené variské vyvýšeniny byly společně se staršími kadomskými jednotkami zdrojem klastického materiálu pro permokarbonské pánevní uložení. Podloží pánve a její bezprostřední okolí jsou tvořena metamorfovanými horninami tepelsko-barrandienské oblasti. Převažujícím horninovým typem jsou zde krystalické břidlice.

Sedimentární výplň pánve tvoří čtyři svrchnokarbonská souvrství: kladenské, týnecké, slánské a líňské (Tásler a Skoček 1963). Petrografie těchto souvrství zahrnuje siliciklastické sedimenty s proměnlivým zastoupením slepenců, pískovců a aleuropelitů (Tab. 3). Nejvyšší mocnost výplně je zaznamenána v severní části pánve a činí 320 m (Obr. 8). Úklony sedimentárních vrstev v manětínské pánvi nepřesahují 5°. Zjištěné tektonické struktury v pánvi jsou výhradně poklesového charakteru (Tásler a Skoček 1963).

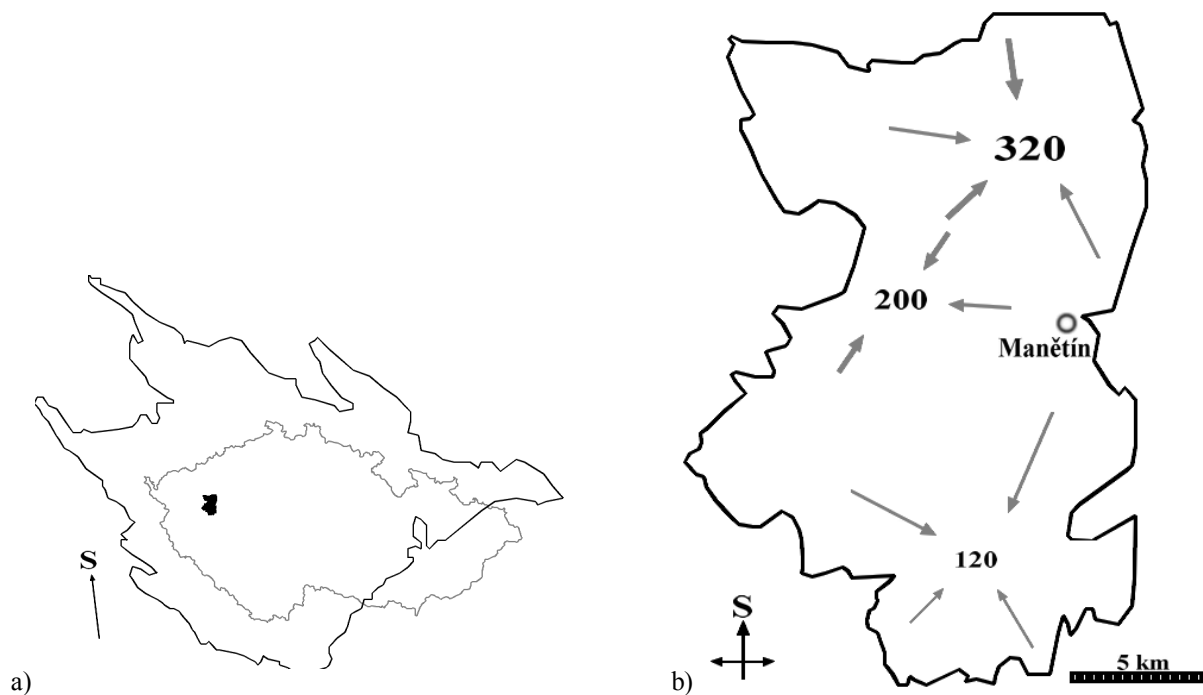
Tab. 3. Stratigrafická tabulka manětínského permokarbonu

útvár	oddělení	stupeň*	souvství / vrstvy	charakteristický litologický znak	rozsah mocností / průměrná mocnost m	
perm			líňské	cyklická stavba – jemnozrné pískovce, jílovce, výrazně červené zbarvení, nízká uhlonosnost	35,5 - 166,5 / 113,5	
karbon (355 až 290 milionů let)	svrchní	stefan	B	slánské	jílovce, pískovce, minimální mocnosti slepenců, tenké uhelné polohy, tufogenní polohy	48,6 - 84,4 / 68,8
			A	týnecké	cyklická stavba – jílovce, pískovce s karbonátovým a železitým tmelem, hrubozrné slepence, nálezy araukaritů	12,3 - 52,0 / 32,3
			C			
		westfal	D	kladenské nýřanské	výrazná cyklická stavba – pískovce, slepence, jílovce, tenké uhelné polohy	16,8 - 77,7 / 45,1
			C	radnické	nepřítomny	0
			B			
	spodní	namur			stratigrafický hiát	0
		visé				
		tournai				

\* názvy stupňů vycházejí z britské klasifikace



Obr. 7. Rozmístění českého permokarbonu (Pešek 1996). Pánve: a-plzeňská, b-manětínská, c-radnická, d-žihelská, e-kladensko-rakovnická, f-mšensko-roudnická, I-českokamenická, II-mnichovohradišťská, III-podkrkonošská, IV-dolnoslezská, V-orlická; brázdy: A-blanická, B-boskovická.



Obr. 8. Poloha manětínské pánve v Českém masívu (a) a schéma narůstání mocnosti permokarbonsu v manětínské pánvi (b); čísla znázorňují absolutní mocnosti v metrech (upraveno podle Peška 1996).

### 3.2.1. Zlatý lom

Tzv. „Zlatý lom“ leží na jižním okraji k.ú. Březín, přibližně 1,5 km jižně od centra obce (Obr. 9). Vzdálenost od Manětína je okolo 8 km. Od r. 1940 je tento lom nečinný, do tohoto roku je uváděn jako místní zdroj stavebních surovin (Sklenář 2005). Celková výměra lomového prostoru je cca 2 ha.

Jedná se o jednoetážový lom, otevřený na severním svahu. Lom je od severu přístupný slabě zpevněnou cestou, v okolí lomu obklopenou odvaly o výšce až 5 m. Vzhledem k rozmístění těchto odvalů a orientaci lomové stěny je prostor lomu vůči zbylým světovým stranám uzavřený. Dno lomu je zarostlé sporým lesním porostem.

Lomová stěna tvaru podkovy vytváří téměř nepřerušovaný výchoz. Výška stěny lomu nepřesahuje 5 m. Na jejím odkryvu lze pozorovat rytmické a gradační zvrstvení poloh okrových pískovců a slepenců (Obr. 10). Aleuropelitické horniny se vyskytují jen nevýznamně. Zvětralinový pokryv včetně půdních horizontů má v rámci sedimentárního profilu mocnost okolo jednoho metru.



- Vysvětlivky:
- Proterozoikum (středočeská oblast)
    - svorový fylit
    - fylit
  - Paleozoikum/svrchní karbon (Manětínská pánev)
    - arkózovitý pískovec, arkóza ,slepenec, prachovec, jílovec - kladenské a týnecké souvrství
    - prachovec, pískovec, arkózovitý pískovec, jílovec - slánské souvrství
  - Terciér
    - alkalický bazalt
  - Kvartér
    - kamenitý až hlinito-kamenitý sediment

Obr. 9. Geologická mapa okolí obce Březín s vyznačenou polohou „Zlatého lomu“ (●).  
Mapový podklad ČGS (2014).

„Zlatý lom“ leží v jižní části manětínské pánve, v místě výskytu kladenského a týneckého souvrství (Obr. 9). Nejstarší kladenské souvrství je tvořeno nýřanskými vrstvami (Feistmantel 1882, Tásler a Skoček 1963).

Tyto vrstvy se projevují cyklicky uspořádanými sledy bělošedých a okrových psamitů s občasným výskytem aleuropelitů. Na bázi vrstev se vyskytují polohy slepenců. Převládajícím sedimentačním prostředím byla říční koryta; sedimentární facie je proto označována za facii říčních klastik (Pešek 1996).

Svrchní týnecké souvrství stáří stefan A (Pešek 1996), resp. stefan B (Wagner 1977) se ukládalo v nadloží souvrství kladenského. Sedimenty týneckého souvrství jsou tvořeny kvalitativně stejnými sedimenty jako podloží kladenského souvrství. Jedná se o oligomiktní až polymiktní slepence, a dále bělavé, šedoběžové, místy načervenalé arkózové pískovce s vyšším podílem hydroxidů železa či obsahem karbonátu ve tmelu.

Přechod mezi kladenským a týneckým souvrstvím je obtížně rozlišitelný z důvodu podobných podmínek sedimentace v obou jednotkách (fluviolakustrinní prostředí). Celý profil „Zlatého lomu“ je

vyvinut jako komplex arkózových pískovců a slepenců. Tásler a Skoček (1963) navrhli způsoby vymezení hranice těchto dvou souvrství, podle nichž lze z důvodu absence pestrobarevné jílovité polohy považovat sedimenty „Zlatého lomu“ za součást nýřanských vrstev kladenského souvrství.



Obr. 10. Charakteristické střídání poloh slepenců a pískovců ve Zlatém lomu.

### 3.3. Studované vzorky

Vzorky, studované v této práci, byly odebrány v rámci dosud probíhajícího ložiskově-geologického průzkumu oblasti „Zlatého lomu“. Objednatel prací je Magistrát hl. m. Prahy. Práce jsou prováděny v rámci smluv o dílo a navazují na předchozí průzkumné práce na lokalitě.

Předmětem výzkumu byly vzorky vrtných jader a povrchových bloků. Zkušební tělesa, pocházející ze vzorků horninových bloků, odebraných na povrchu, nesla označení „85/“. Tělesa zhotovená z vrtných jader pak byla označena písmeny „JB“ a pořadovým číslem vrtu.

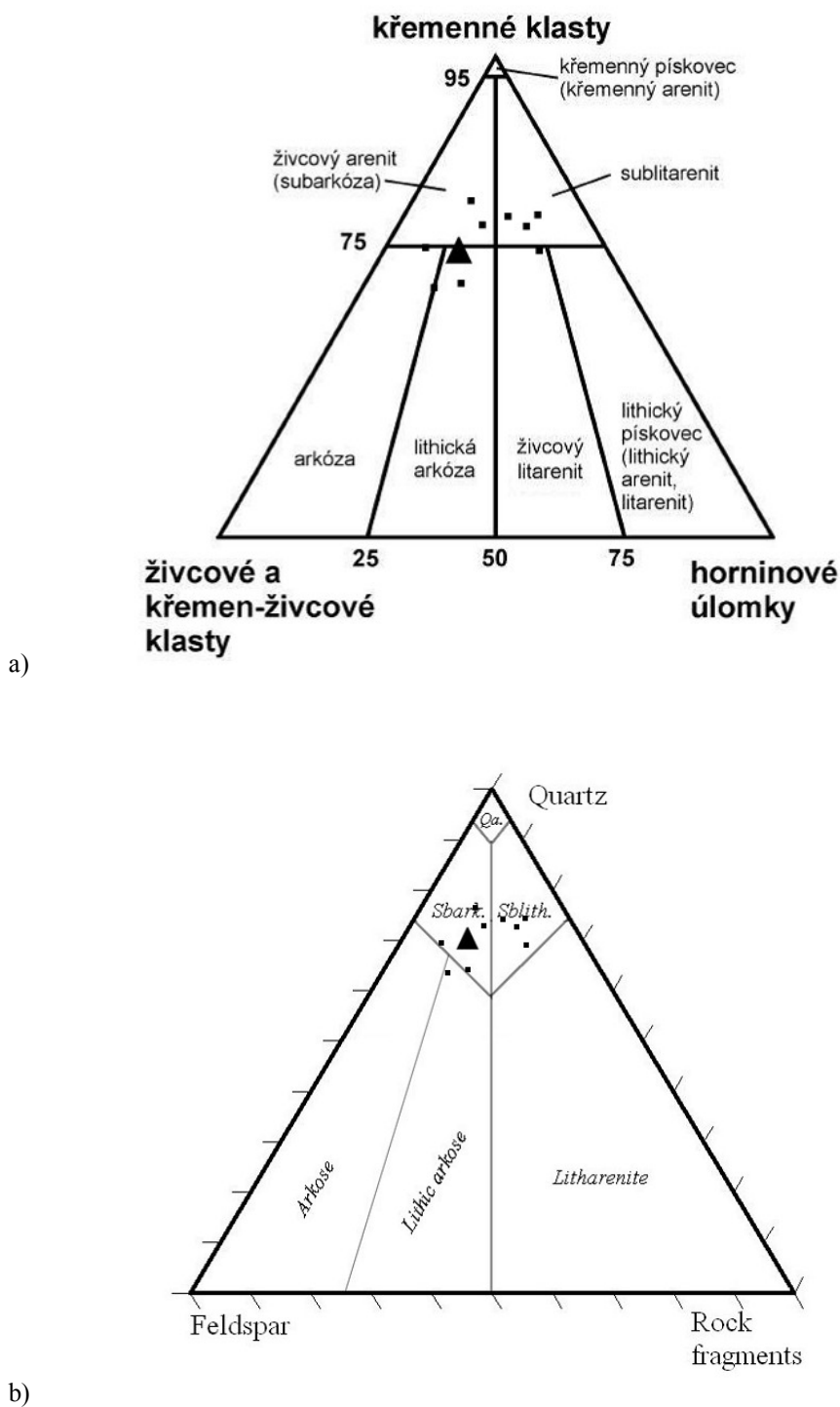
Odběr veškerých vzorků, jež byly autorovi této práce laskavě poskytnuty, byl učiněn v rámci dvou probíhajících akcí. Jednalo se o projekt „Atlas stavebních kamenů a jejich zdrojových lokalit“ a dále o ložiskově-geologický průzkum lokality „Zlatého lomu“ a jejího okolí.

Provedené jádrové vrtky byly ukončeny v rozmezí 9,0 m a 12,4 m, na rozhraní jílovitého proplásku, tvořícího podloží zájmového horizontu.

Ze vzorků studovaného kamene byla vyřezána válcovitá zkušební tělesa pro účely laboratorních zkoušek: průměr těchto těles byl 50 mm, délka 100 mm. Dále byly vyhotoveny mikroskopické preparáty o tloušťka 30  $\mu\text{m}$ , jež byly podrobeny pozorování v optickém mikroskopu a analýze obrazu. Rovina provedených řezů pro vyhotovení výbrusů byla kolmo vůči rovině sedimentární vrstevnatosti. Pórový prostor byl pro účely mikroskopického pozorování napuštěn kontrastní látkou - epoxidem. Vzhledem k zaměření této práce byla v rámci mikroskopie věnována pozornost především těm mikrostrukturním jevům, u kterých se předpokládá výrazný vliv na fyzikální vlastnosti kamene. Výsledky laboratorních zkoušek byly až na zkoušky hydraulické roztažnosti převzaty z laboratorních pracovišť Akademie věd ČR, kde byly zkoušky provedeny.

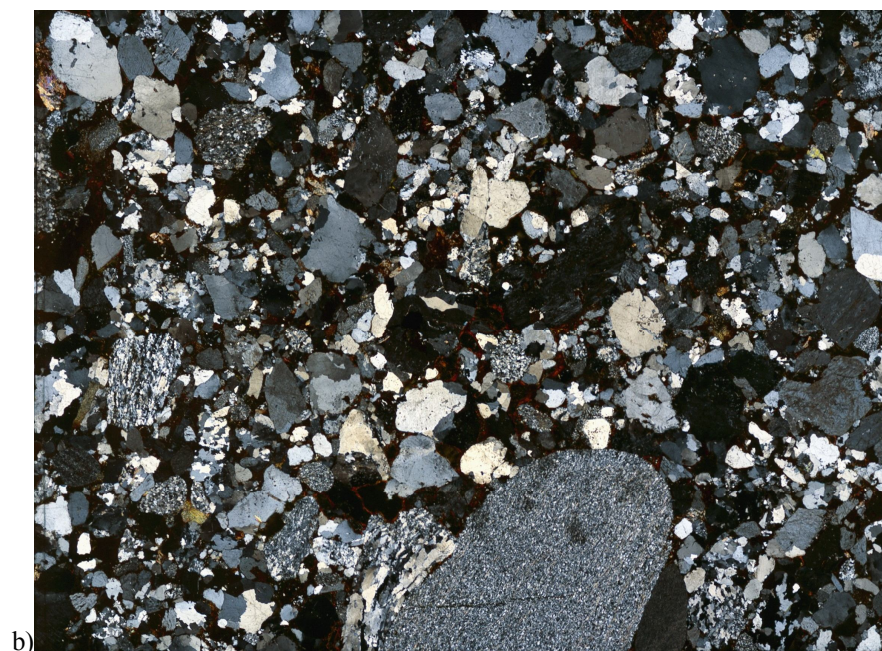
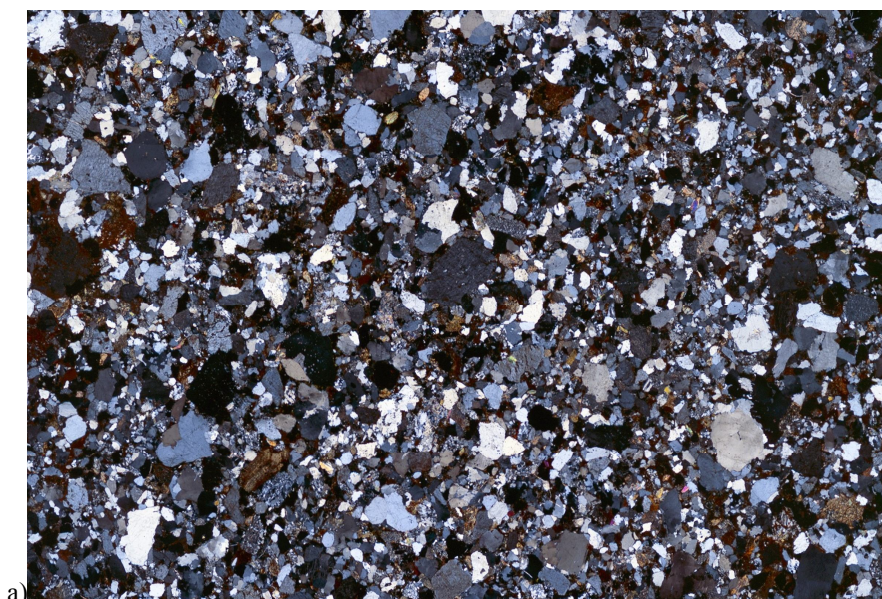
### 3.3.1 Popis výbrusů

Studované horniny leží na rozhraní živcového arenitu (subarkózy) až sublitharenitu s částečným přesahem do pole arkóz, lithických arkóz až živcového arenitu (dle Folka 1980). Při použití Pettijohnovy klasifikace (1972) opět většina materiálu odpovídá subarkózám až sublitharenitu s okrajovým přesahem do pole arkóz až lithických arkóz.



Obr. 11. Výsledky analýz hlavních součástí hornin v mikroskopických preparátech s vyznačeným průměrným složením (▲). Podle Folka (1980) je hornina klasifikována jako lithická arkóza (a), podle Pettijohna (1972) jako subarkóza (b).





Obr. 12. Ukázka snímku s relativně vyšším zastoupením křemene a živeců (a) a snímku s vyšším podílem úlomků hornin a hrubší zrnitostí (b). Kratší strana snímků 1,95 cm. Zkřížené nikoly.

## 4. METODY STUDIA VZORKŮ

### 4.1. Mineralogicko-petrografický rozbor a petrografická analýza obrazu

Základní kvalitativní informace o mikrostrukturních jevech v hornině byly autorem této práce získány prostřednictvím studia mikroskopických preparátů v optickém mikroskopu Leica v laboratořích PřF.

Po určení přítomných minerálních fází a texturních znaků byly následně, za pomoci scanneru, zhotoveny digitální snímky pozorovaných výbrusů, jež byly následně podrobeny analýze obrazu.

Analýza obrazu je metodou založenou na zpracovávání a vyhodnocování digitálních snímků pomocí specializovaného softwaru. Tato analýza tak představuje doplněk základních petrografických analýz a její přínos spočívá v kvantifikaci zájmových jevů ve studovaném výbrusu.

Pro účely této práce bylo za pomoci softwaru SigmaScan Pro 5 zjištěno zastoupení hlavních stavebních součástí: křemene, živců, litoklastů a pórů. Pomocí uvedeného programu bylo rovněž vypočteno velikostní rozdělení pórů.

### 4.2. Geochemie a přepočty modálního složení

Šest studovaných vzorků z povrchových bloků bylo podrobeno standardní silikátové analýze („bulk analyses“). Výsledkem každé z těchto analýz bylo procentuální složení vzorku vyjádřené v oxidické formě přítomných prvků. Analyzovali: RNDr. Ondřej Šebek, Ing. Věra Vonásková, Lenka Jílková, Laboratoře geologických ústavů PřF.

Výsledné seznamy oxidů z chemických analýz byly výchozími daty pro výpočet modelového kvalitativního a semikvantitativního modálního složení hornin. Pro tyto účely byly využity přepočítávací algoritmy MINLITH (Rosen a kol. 2004) a MODES (Ford 1995).

#### 4.2.1. Minlith

Program MINLITH slouží jako nástroj pro rychlý odhad pravděpodobného složení sedimentů. Je konstruován jako empirický model, jehož podkladem byly chemické analýzy 600 vzorků siliciklastických referenčních sedimentů (především „zralých“), umožňující stanovení obecných pravidel pro distribuci oxidů mezi minerály.

Vstupní data (oxidy získané silikátovou analýzou) jsou za pomoci předem stanoveného (tj. uživatelem neovlivnitelného) seznamu definovaných výpočtů a normativních minerálů roztříděny tak, aby vytvářely jednotlivé minerální formy. Seznam pracovních minerálů programu MINLITH je uveden v tabulce 4.

Tab. 4. Normativní minerály používané programem MINLITH. Ve sloupcích jsou uvedeny zkratky, názvy, chemická složení a molekulové hmotnosti minerálů (Rosen a kol. 2004).

AB	Albite	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	524.482
AN	Anorthite	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	278.22
ANK	Ankerite	$\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot 2\text{CO}_2$	215.952
AP	Apatite	$3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 1/3(\text{CaF}_2)$	336.21
CC	Calcite	$\text{CaO} \cdot \text{CO}_2$	100.091
CHL	Chlorite	$k_1\text{MgO} \cdot k_2\text{FeO} \cdot k_3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot k_4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	555.81–743.54
C <sub>org</sub>	Carbon	C	12.011
DL	Dolomite	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{CO}_2$	184.422
FL	Fluorite	$\text{CaF}_2$	78.08
GB	Gibbsite	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	156.08
GT	Goethite	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	177.716
GY	Gypsum	$\text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172.178
HL	Halite	$\text{Na}_2 \cdot 2\text{Cl}$	116.896
ILL	Illite	$2\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot \text{FeO} \cdot 6.5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2014.75
KN	Kaolinite	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	258.172
MM	Montmorillonite	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 24\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2202.60
MST	Magnesite	$\text{MgO} \cdot \text{CO}_2$	84.331
OR	Orthoclase	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	556.70
PR	Pyrite	$\text{FeS}_2$	119.982
PRL	Pyrolusite	$\text{MnO}_2$	86.94
Q	Quartz	$\text{SiO}_2$	60.09
RCH	Rhodochrosite	$\text{MnO} \cdot \text{CO}_2$	114.951
RT	Rutile	$\text{TiO}_2$	79.90
SD	Siderite	$\text{FeO} \cdot \text{CO}_2$	115.861
SRP	Serpentine	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	277.172

#### 4.2.2. Modes

Druhým nástrojem použitým k přepočtu silikátových analýz byl program MODES. Stejně jako v případě MINLITH, výsledkem výpočtu je modelové modální složení analyzovaného vzorku.

Rozdíl oproti prvnímu algoritmu spočívá u programu MODES v možnosti výběru minerálů (a jejich složení), mezi které budou oxidy rozdělovány. To umožňuje předepsat algoritmu takovou minerální asociaci, která přesně odpovídá fázím předem identifikovaným například při pozorování v optickém mikroskopu. Pro účely této práce byly použity tyto normativní minerály: křemen, muskovit, K-živec, albit, kaolinit, goethit, illit, rutil. Pro své nízké zastoupení byly při výpočtu zanedbány oxidy manganatý a fosforečný, stejně jako analyzovaný obsah síry.

### 4.3. Fyzikální vlastnosti

#### 4.3.1. Indexové vlastnosti

Za účelem zjištění indexových vlastností byly provedeny zkoušky nasákavosti, stanovení pórovitosti metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie a měrné hmotnosti metodou heliové pyknometrie.

Nasákavost udává maximální hmotnostní podíl vody v hornině dosažitelný danou zkouškou nasákavosti. Její hodnota je na zvolené metodě závislá. Dva hlavní způsoby měření nasákavosti jsou metoda úplného ponoření po dobu 24h (Mod' d a kol. 1996) a metoda nasákavosti kapilárním vztlínáním (Jefferson 1993). U obou metod je vzorek předem zbaven fyzikálně vázané vody sušením (do 105°C). Pro účely této práce byla použita metoda úplného ponoření.

Vysokotlaká rtuťová porozimetrie je instrumentální metodou stanovení pórovitosti pevných látek. Principem metody je měření úbytku objemu rtuti, který je závislý na aplikovaném tlaku, jímž je rtuť vtlačována do analyzovaného materiálu.

Aplikovaný tlak, jakožto funkce měřené změny objemu rtuti v zařízení, je následně pomocí Washburnovy, resp. Laplace - Youngovy rovnice (5) přepočítán na velikost pórů, které jsou při tomto tlaku rtutí vyplněny:

$$P = \frac{-2\gamma \cos \theta}{r} \quad (5)$$

kde  $P$  je celkový tlak, pod nímž rtuť vniká do póru,  $r$  je poloměr póru kruhového průřezu,  $\gamma$  je povrchové napětí rtuti v póru a  $\theta$  je úhel smáčení stěn pórů rtutí. Pomocí metody MIP byla získána velikostní distribuce pórů v hornině.

Pro stanovení měrné hmotnosti a celkové pórovitosti byla využita metody heliové pyknometrie. Měření objemu pevné fáze touto metodou vychází z platnosti Boyle-Mariottova zákona. Z naměřeného tlaku použitého plynu v měřicí komoře, obsahující vzorek, je vypočten objem, který je zaujímán pevnou fází. Poměrem hodnot hmotnosti suchého vzorku a obdrženého objemu je dopočítána měrná hmotnost.

#### 4.3.2. Mechanické vlastnosti

Postupy stanovení mechanických vlastností zahrnovaly statické zkoušky pevnosti v prostém tlaku a příčném tahu (též nepřímém tahu či „Brazilské“ zkoušky). Hodnoty přetvárností pak byly vedle statické metody zjištěny i tzv. „dynamickou metodou“, při kterých byly hodnoty Youngova modulu, střížného modulu a Poissonova čísla vypočteny z doby průchodu uměle vybuzených primárních a sekundárních seismických vln.

Zkušební válcovitá tělesa byla kontinuálně zatěžována v suchém nebo nasyceném stavu, přičemž výpočet (maximální) pevnosti vzorku v prostém tlaku byl proveden dle rovnice (6).

$$R = \frac{F}{A} \quad (6)$$

kde  $R$  je pevnost v tlaku,  $F$  nejvyšší dosažená síla při porušení vzorku,  $A$  plocha průřezu zkušebního tělesa před zkouškou. Vrstevnatost vzorků byla u tlakových zkoušek orientována kolmo vůči směru působící síly.

Při zkouškách pevnosti v příčném tahu se směr působící síly zatěžování nacházel v rovině vrstevnatosti kamene.

Přetvárné vlastnosti válcovitých zkušebních těles byly zjištěny a popsány ve smyslu Youngova modulu, střížného modulu a Poissonova čísla. Experimentálně byly získány též hodnoty indexu hydraulické roztažnosti.

Výpočet Youngova modulu z dob průchodu uměle vyvolaných primárních seismických vln byl proveden podle rovnice (7).

$$E_{dyn} = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (7)$$

kde  $E_{dyn}$  je Youngův modul,  $\rho$  je objemová hmotnost,  $V_p$  čas průchodu primárních vln a  $\nu$  Poissonovo číslo.

Poissonovo číslo bylo vyjádřeno vztahem zahrnujícím i sekundární seismické vlny (8).

$$\nu = \frac{1 (V_p / V_s)^2 - 2}{2 (V_p / V_s) - 1} \quad (8)$$

kde  $V_s$  je rychlost šíření sekundárních seismických vln.

Výpočet střížného modulu ze znalosti Youngova modulu a Poissonova čísla byl následně proveden dle rovnice (9).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (9)$$

kde  $G$  značí střížný modul,  $E$  Youngův modul a  $\nu$  Poissonovo číslo.

#### 4.4. Hydraulická roztažnost

Pokud je vysušený přírodní kámen navlhčen (neúplné nasycení pórového prostoru vzdušnou vlhkostí nebo vodou) či úplně ponořen do vody (stav úplného nasycení pórového prostoru vodou), dochází k jeho objemovým změnám, které lze charakterizovat jako rozpínání.

V laboratorní praxi se tyto změny stanovují pouze v jednom směru a označují se jako hydraulická roztažnost. V případě zjevně anizotropní vnitřní stavby, které mají např. sedimentární horniny (přítomnost sedimentární vrstevnatosti), by se hydraulická roztažnost měla stanovovat jak ve směru kolmém k sedimentární vrstevnatosti, tak ve směru probíhající vrstevnatosti. Hydraulická roztažnost se numericky vyjadřuje jako změna rozměru zkušební tělesa po navlhčení nebo nasycení vodou pomocí tzv. koeficientu hydraulické roztažnosti (10).

$$\varepsilon_h (\%) = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (10)$$

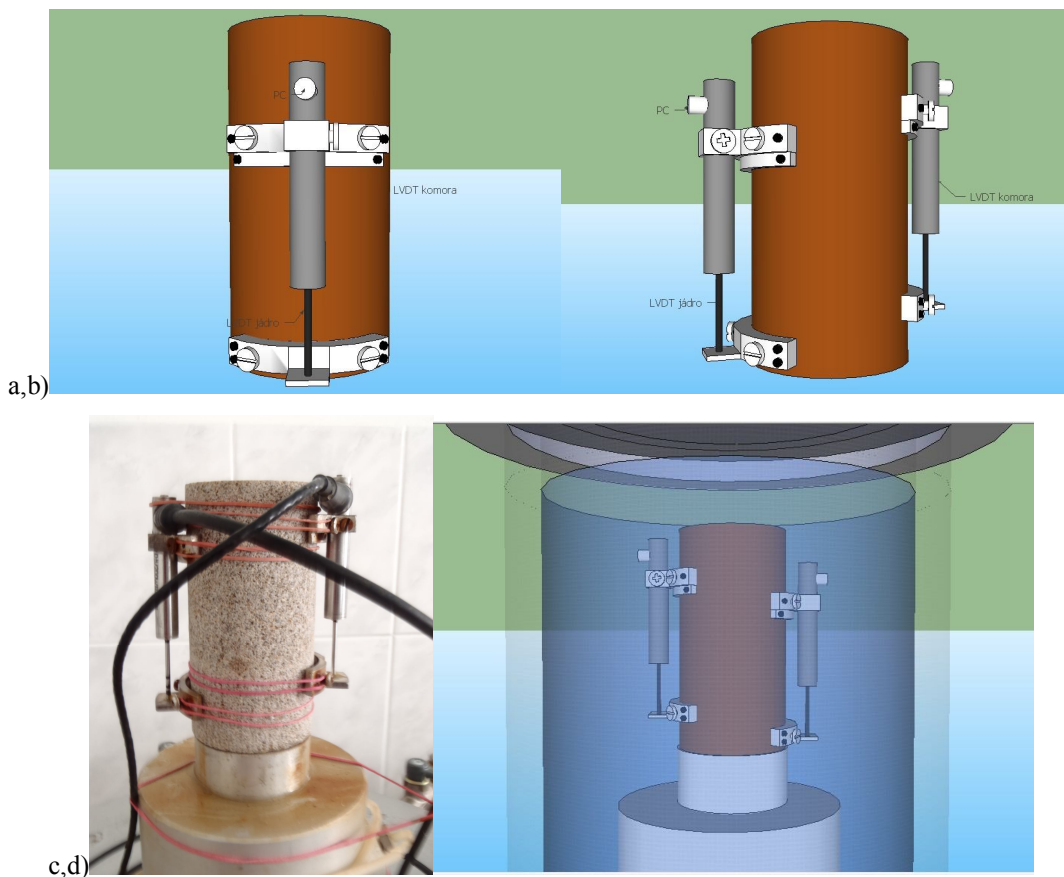
kde  $\varepsilon_h$  značí poměrné přetvoření,  $l_1$  rozměr zkušební tělesa po navlhčení nebo nasycení a  $l_0$  rozměr zkušební tělesa ve vysušeném stavu.

Hodnota koeficientu hydraulické roztažnosti se uvádí buď jako změna rozměru zkušební tělesa po uplynutí určitého časového úseku ( $\varepsilon_{h,t}$ ) (viz např. Félix 1995) nebo jako maximální změna rozměru zkušební tělesa po dosažení ustáleného stavu ( $\varepsilon_{h,max}$ ) (viz např. Weiss a kol. 2004). V této práci byla zvolena druhá varianta, přičemž bylo experimentálně ověřeno, že ustáleného stavu je u studovaných klastických sedimentárních hornin dosaženo po 72 až 144 hodinách; celková doba měření potom byla volena 168 hodin.

Měření hydraulické roztažnosti prováděl autor této diplomové práce v Laboratoři mechaniky zemin (ÚHIGUG PřF UK), na tzv. „nepravém“ triaxiálním přístroji TriSCAN, jenž byl pro účely této práce laskavě zapůjčen Ing. J. Boháčem, CSc., vedoucím zmiňované laboratoře. Triaxiální přístroj TriSCAN

sloužil jako sytící komora, v níž bylo umístěno válcovité zkušební těleso, osazené elektromagnetickými snímači (LVDT) v speciálních hliníkových úchytech (Obr. 13a, b), vyrobených na zakázku pro účely této práce.

Použité elektromagnetické snímače jsou schopné zaznamenat délkové změny s citlivostí  $0,3 \mu\text{m}$ . Při přetváření zkušební tělesa dochází ke změně napětí na sekundární cívkce, které bylo původně indukováno napájenou primární cívkou. Výstupní (detekovaný) signál tedy odráží rozdíl napětí na sekundární cívkce. Po předchozí kalibraci přístroje je možné z rozdílu napětí vypočítat směrnici i absolutní hodnotu přetvoření zkušební tělesa na délkovém úseku, definovaném osazením primární a sekundární cívkou na jeho stěnách. Měření probíhala pomocí dvou snímačů, osazených na protilehlých stranách válcového zkušební tělesa v jeho osním směru. Výsledná hodnota potom byla vyjádřena jako průměr z obou čtení.



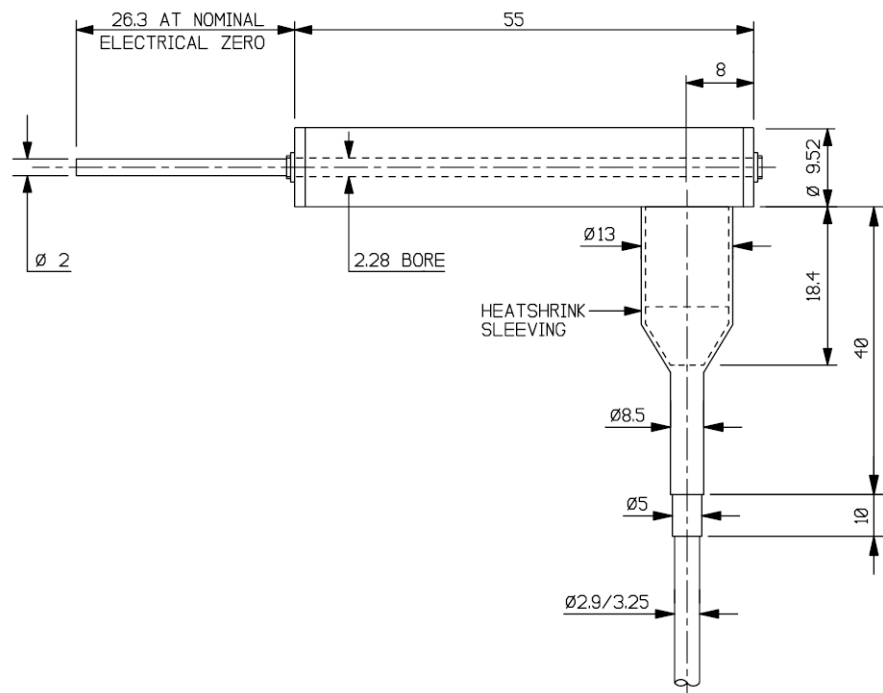
Obr. 13. Schéma osazení zkušební tělesa válcového tvaru elektromagnetickými snímači (a, b) a reálný vzhled zkušební tělesa se snímači (c). Umístění celé měřicí soustavy v napouštěcí komoře nepravého triaxiálního přístroje TriSCAN (d). Výstupní kabely nejsou zobrazeny.

Po osazení zkušební tělesa držáky snímačů a po upevnění snímačů do držáků (Obr. 13c) bylo zkušební těleso vloženo do komory triaxiálního přístroje. Po jeho uzavření byla komora napouštěna (Obr. 13d) po dobu 2 minut a 25 sekund běžnou vodou z vodovodního řadu, teplota vody byla  $20^{\circ}\text{C}$ .

Sběr dat probíhal automaticky do připojeného osobního počítače s krokem měření 3 minuty během prvních 72 hodin a 10 minut po zbývajícím čas. Sestavení experimentu, kalibraci snímačů i vyhodnocení dat provedl autor této práce.

Postup měření hydraulické roztažnosti na válcovitých zkušebních tělesech lze shrnout v následujících bodech:

- 1 Sušení zkušebního tělesa v laboratorní sušárně za teploty 62°C po dobu 72 hodin.
- 2 Temperace tělesa v exsikátoru po dobu 24 hodin.
- 3 Očištění jader a komor LVDT kyselinou octovou (1:2).
- 4 Osazení vzorku snímači LVDT v co největším možném rozsahu měření.
- 5 Uchycení spodního konce jádra LVDT kontaktním lepidlem.
- 6 Kontrola provozuschopnosti zaznamenávacího softwaru ACQ v PC.
- 7 Jednorázové napuštění komory kohoutkovou vodou vytemperovanou ve standardním laboratorním prostředí (doba napuštění 2 minuty 25 sekund).
- 8 Měření přetvoření v intervalu 3 minuty po dobu prvních 3 dnů.
- 9 Měření přetvoření v intervalu 10 minut po dobu následujících 4 dnů.
- 10 Zaznamenání konečné hodnoty a dokumentace experimentu.



Obr. 14. Schéma elektromagnetického snímače LVDT D5/200WRA/1055 s komorou a jádrem v horní části a výstupním kabelem ve spodní části (rozměry v mm, převzato z technického nákresu výrobku č.D17684 2007).

## 5. VÝSLEDKY

### 5.1. Mineralogicko-petrografický rozbor

#### 5.1.1. Mikrostrukturní jevy

Pozorované výbrusy vykazují převažující hrubě psamitickou (frakce 0,5 až 2 mm), ojediněle psefitickou zrnitost. Zastoupení šterkové frakce (nad 2 mm) je kolísavé a v několika případech silně ovlivněno přítomností jediného klastu výrazných rozměrů; nejdelší pozorovaný rozměr byl 1,8 cm. Většina zrn vykazuje nízkou míru zaoblení i zakulacení, případně výraznější opracování je pozorováno u litoklastů a živců. Převažuje nízký až střední stupeň vytřídění horniny.

Pozorovaná vnitřní stavba je slabě paralelní, podmíněná sedimentární vrstevnatostí, která je místy neznatelná. Míra pozorovaného usměrnění zrn mohla být ovlivněna orientací výbrusů - kolmo vůči rovině vrstevnatosti.

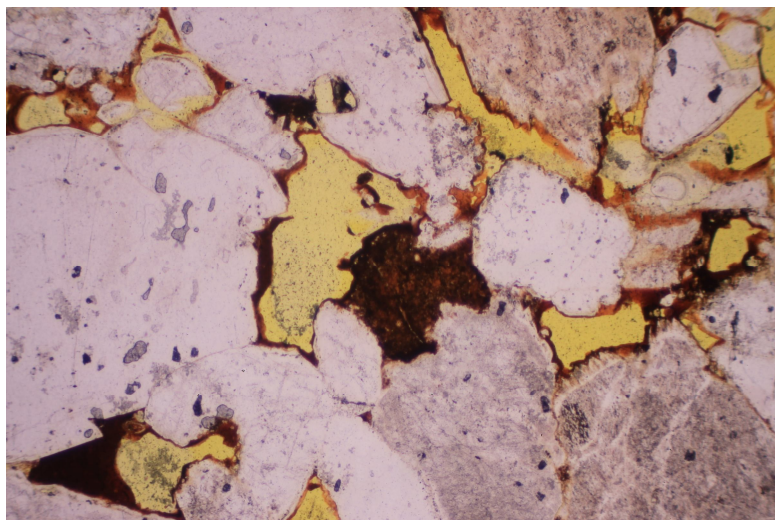
Hlavní stavební součástí horniny zahrnují křemen (monokrystalický a polykrystalický), živce (alkalické, výjimečně sodno-vápenaté), úlomky hornin (litoklasty) a pórový prostor. Zastoupení matrix (prachu a jílu) je velmi nízké a dosahuje prvních jednotek procent. Ojediněle jsou přítomny klustické bílé slídy.

Litoklasty jsou v hornině nejvíce zastoupeny fylity a silicity (často s vázanou organickou hmotou). Přítomny jsou dále recyklované sedimenty (ortokvarcit) a též úlomky přeměněných proterozoických vulkanitů - spilitů. Pozorováno je proměnlivé zastoupení slíd v rámci fylitů i různá míra soudržnosti těchto litoklastů.

Ve výbrusech lze pozorovat planární a konvexní kontakty zrn. Místy přecházejí konvexní kontakty až v suturovité (Obr. 16).

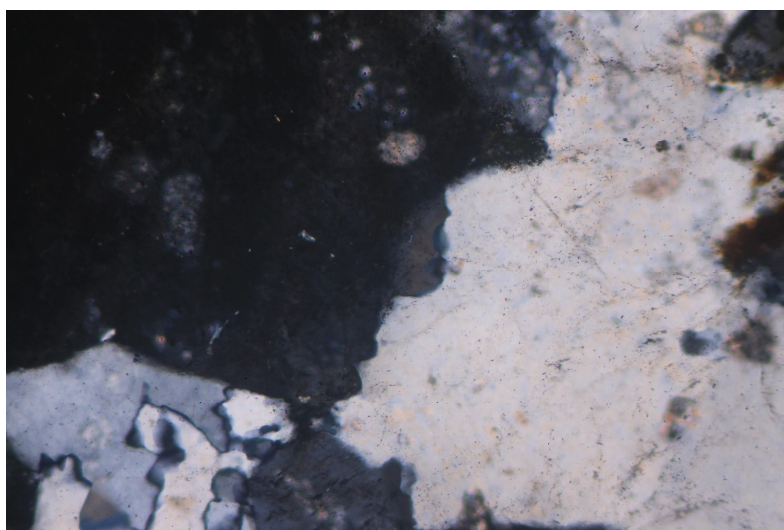
Ve výbrusech je pozorován dvougenerační tmel. Starší tmel, tvořený mikrokrystalickým křemenem, se nevyskytuje ve všech výbrusech a je-li přítomen, je vázán především na SiO<sub>2</sub> bohaté litoklasty (silicity). Druhý železitý tmel je pak hojnější a je přítomen ve formě dotyků (menisků), povlaků a pórových výplní (Obr. 15).

Pórovitost v pozorovaných výbrusech silně kolísá. Odhadovaný rozsah podílu pórového prostoru je v rozsahu 8 až 20%. Velikost pórů je rovněž proměnlivá a je odrazem heterogenní zrnitosti.



Obr. 15. Snímek železitého tmelu ve formě povlaků a menisků (červenohnědé odstíny) a pórového prostoru (žlutě). Kratší strana snímku 0,73 mm. Jeden nikol.

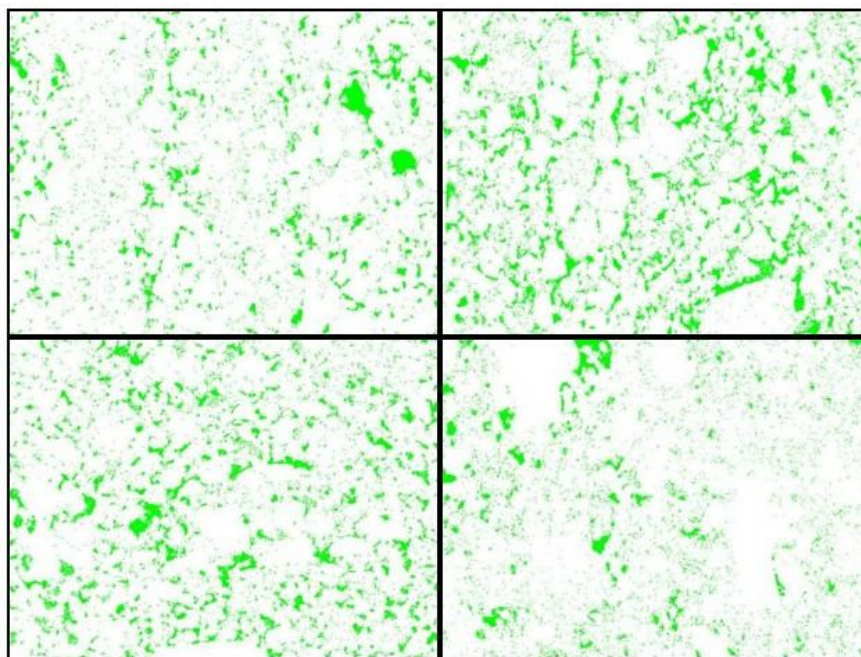




Obr. 16. Příklad suturovitého kontaktu. Kratší strana snímku 0,28 mm. Zkřížené nikoly.

#### 5.1.2. Analýza obrazu

Digitální snímky studovaných výbrusů byly zhotoveny za účelem výpočtu pórovitosti a velikostní distribuce pórů. Vyznačený pórový prostor u vybraných snímků je na obrázku 17.



Obr. 17. Obrázek, složený ze čtyř výbrusů, zobrazuje kolísavé zastoupení pórového prostoru (zeleně) v hornině.  
Hodnoty pórovitosti v pořadí kvadrantů: JB 202/3 - 18,4 %; JB 202/1 - 10,8 %;  
JB 202/4 - 16 %; JB 202/9 - 9,8 %.

Výsledky automatických výpočtů procentuální pórovitosti programem SigmaScan Pro 5 jsou vypsány v tabulce 5.

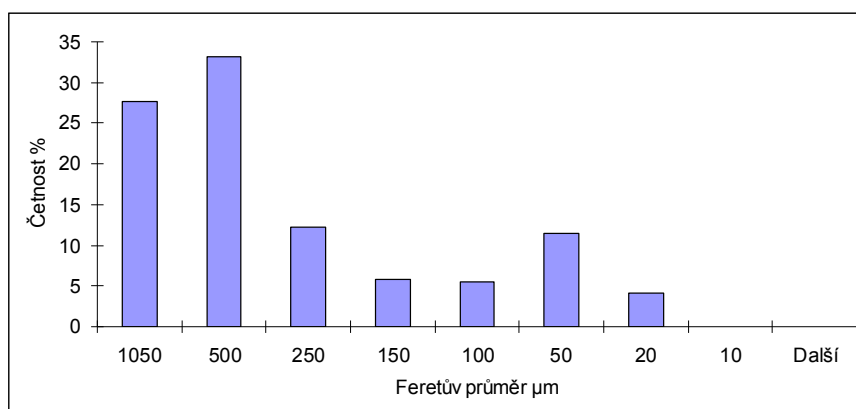
Tab.5. Hodnoty pórovitosti vypočítané metodou analýzy obrazu.

Výbrus	Pórovitost %	Průměrná pórovitost %
JB 202/1	10,8	17
JB 202/2	22	
JB 202/3	18,4	<b>Sigma</b>
JB 202/4	16,0	6,3 (37%)
JB 202/5	14,1	
JB 202/6	9,3	<b>Medián</b>
JB 202/7	25,0	16
JB 202/8	27,6	
JB 202/9	9,8	

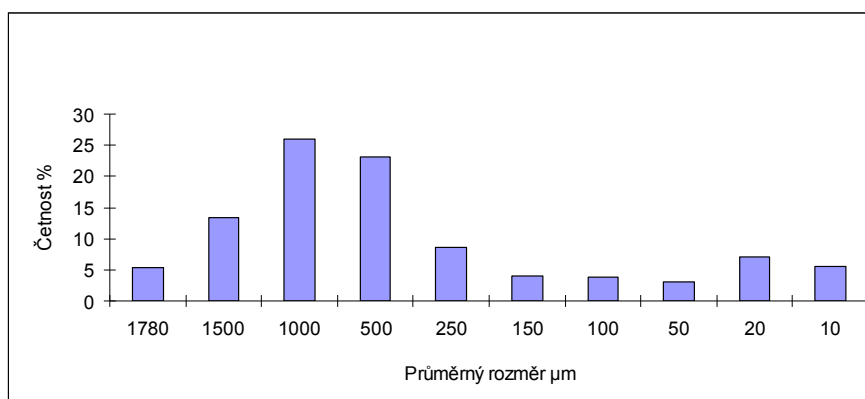
Vedle hodnot pórovitosti byla programem vypočtena a zobrazena procentuální zastoupení pórovitosti v jednotlivých velikostních kategoriích pórů (histogramy velikostní distribuce), a to na základě dvou typů pórových rozměrů: Feretova průměru (Obr. 18) a průměrného rozměru (Obr. 19).

Feretův průměr je roven vzdálenosti bodů, v nichž se dvě paralelní tečny dotýkají obvodu póru s tím, že směry vedených tečen jsou shodné u všech měřených pórů.

Průměrný rozměr póru je pak vypočten jako aritmetický průměr největšího a nejmenšího rozměru póru.



Obr. 18. Histogram velikostního rozdělení pórů podle Feretova průměru.



Obr. 19. Histogram velikostního rozdělení pórů podle průměrného rozměru. Výpočet byl proveden pro stejný výbrus jako v případě obrázku 18.

## 5.2. Geochemie a přepočty modálního složení

Předmětem chemického rozboru, provedeného formou silikátových analýz, byly vzorky povrchových bloků. Výsledná procentuální složení byla použita jakožto vstupní data pro výpočet měrné hmotnosti a v dalším kroku i celkové pórovitosti vzorků programy MINLITH a MODES (Tab. 6). Předepsaná složení minerálů se řídila tabulkou 4.

Tab. 6. Výsledky silikátových analýz a následné výsledky přepočtu těchto hodnot na měrnou hmotnost a celkovou pórovitost analyzovaných vzorků.

<b>Silikátová analýza</b>						
vzorek	<b>85/II</b>	<b>85/III</b>	<b>85/IVa</b>	<b>85/IVb</b>	<b>85/V</b>	<b>85/VI</b>
(%)	55/11	56/11	57/11	58/11	59/11	60/11
<b>SiO<sub>2</sub></b>	87,26	88,30	88,27	87,32	86,10	86,92
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,13	0,10	0,12	0,12	0,11	0,09
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6,27	5,50	5,20	5,91	6,99	6,67
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,98	0,83	1,17	1,01	0,88	0,47
<b>FeO</b>	0,13	0,19	0,21	0,18	0,13	0,19
<b>MnO</b>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
<b>MgO</b>	0,09	0,04	0,13	0,09	0,10	0,09
<b>CaO</b>	0,02	0,03	0,02	0,01	0,07	0,03
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,17	0,16	0,14	0,13	0,14	0,15
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3,79	3,62	3,27	3,85	4,26	4,24
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04
<b>H<sub>2</sub>O-</b>	0,03	0,07	0,05	0,04	0,06	0,01
<b>H<sub>2</sub>O+</b>	0,56	0,50	0,62	0,61	0,63	0,74
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,14	0,12	0,21	0,18	0,15	0,11
<b>Součet</b>	99,62	99,51	99,48	99,51	99,68	99,77
↓						
<b>Měrná hmotnost g/cm<sup>3</sup></b>						
	<b>85/II</b>	<b>85/III</b>	<b>85/IVa</b>	<b>85/IVb</b>	<b>85/V</b>	<b>85/VI</b>
MINLITH	2,66	2,66	2,67	2,66	2,66	2,65
MODES	2,74	2,73	2,74	2,74	2,76	2,75
↓						
<b>Celková pórovitost %</b>						
	<b>85/II</b>	<b>85/III</b>	<b>85/IVa</b>	<b>85/IVb</b>	<b>85/V</b>	<b>85/VI</b>
MINLITH	17,4	18,8	15,8	15,6	16,5	18,1
MODES	19,9	21	18,1	18,0	19,6	21,1

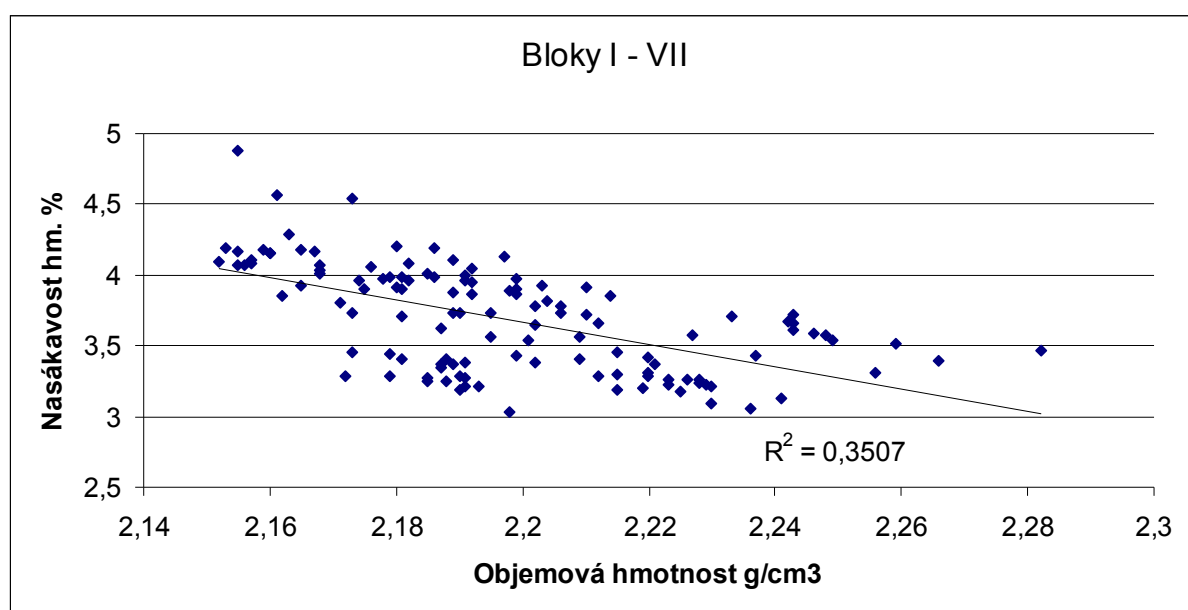
### 5.3. Fyzikální vlastnosti

#### 5.3.1. Indexové vlastnosti

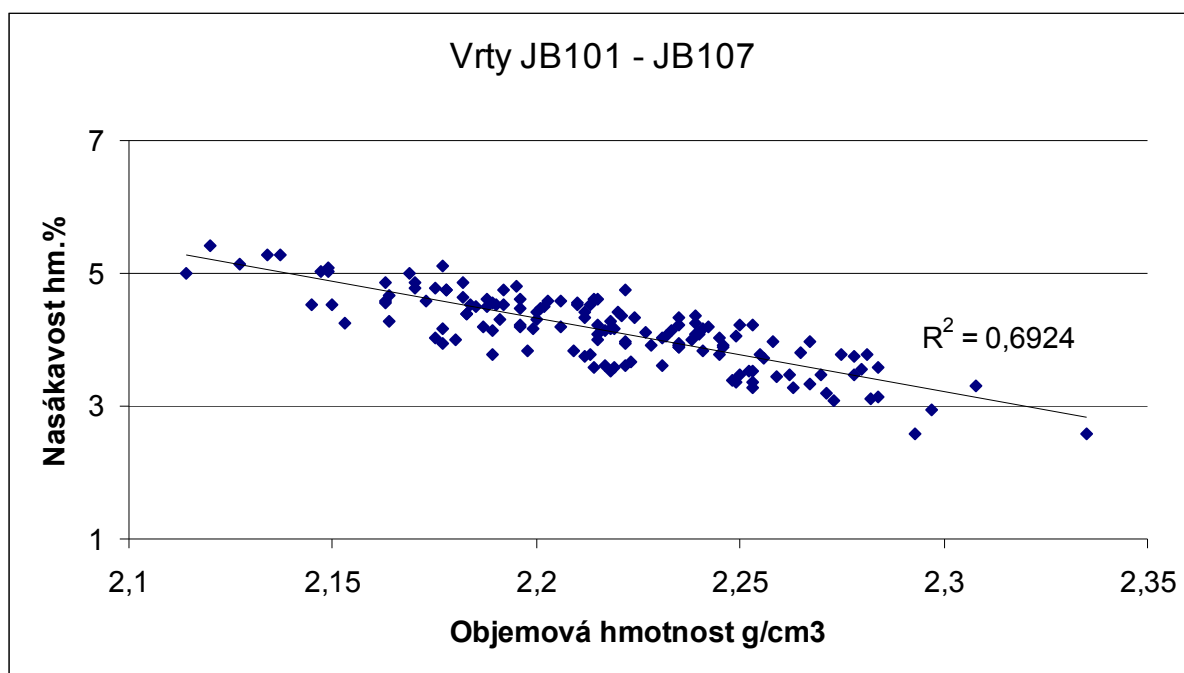
Na obrázku 20 je zobrazena závislost nasákavosti na objemové hmotnosti vzorků povrchových bloků, s vyznačenou hodnotou spolehlivosti lineární interpolace. Na obrázku 21 je pak stejný typ závislosti v případě zkušebních těles zhotovených z vrtných jader.

Výsledky měření pórovitosti povrchových bloků metodami vysokotlaké rtuťové porozimetrie a heliové pyknometrie jsou spolu s předešlými výsledky programu MINLITH uvedeny v tabulce 7. V tabulce 8 jsou pak uvedeny související měrné hmotnosti získané těmito metodami.

Kapilární pórovitost uvedená v tabulce 7 odpovídá podílu pórů o průměru 0,1  $\mu\text{m}$  až 2500  $\mu\text{m}$ . Zdrojovými daty pro tento výpočet byla velikostní distribuce pórů získaná vysokotlakou rtuťovou porozimetrií.



Obr. 20. Závislost nasákavosti na objemové hmotnosti povrchových bloků; počet těles: 123; průměrná nasákavost 3,69 %; průměrná objemová hmotnost 2,20  $\text{g}/\text{cm}^3$ .



Obr. 21. Závislost nasákavosti na objemové hmotnosti vrťů; počet těles: 147; průměrná nasákavost 4,13 %; průměrná objemová hmotnost 2,22 g/cm<sup>3</sup>.

Tab. 7. Hodnoty pórovitosti v závislosti na použité metodě. MIP - vysokotlaká rtuťová porozimetrie; He-pykno - heliová pyknometrie; MINLITH - výpočetní algoritmus

Označení vzorku	Pórovitost %			Zastoupení pórů o průměru 0,1 μm až 2500 μm**			Podíl zdánlivé pórovitosti a pórovitosti zjištěné rtuťovou porozimetrií
	MIP	He-pykno	MINLITH	MIP	He-pykno	MINLITH	
85/II	a) 12,12*	16,47	17,4	88,56	66,82	61,74	0,71
	b) 12,1			89,01	67,05	61,95	
85/III	a) 11,84	17,94	18,8	86,92	58,86	54,71	0,74
	b) 12,34			86,81	61,24	56,92	
85/IV	a) 10,84	14,24	15,8	79,12	59,33	54,19	0,77
	b) 11,06			77,69	60,27	55,02	
85/V	a) 13,54	15,28	16,5	92,42	83,29	75,77	0,54
	b) 13,78			92,2	84,55	76,92	
85/VI	a) 11,99	17,16	18,1	90,33	64,31	59,75	0,76
	b) 12,42			90,78	66,93	62,18	

\*dílní měření rtuťovou porozimetrií

\*\* rozsah 0,1μm až 2500μm je též uváděn jako „kapilární pórovitost“ (Ordóñez a kol. 1997, Buj a Gisbert 2010)

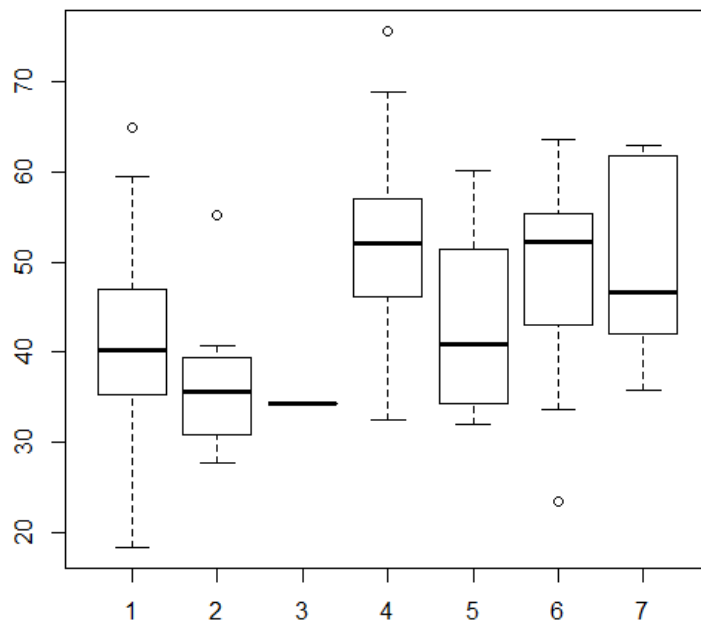
Tab. 8. Hodnoty indexových parametrů. Vysvětlivky viz Tab. 7.

Měrná hmotnost g/cm <sup>3</sup>				Otevřená pórovitost %			Objemová hmotnost			Pórovitost % (He-pykno)		
				min.	průměr	max.	min.	průměr	max.	min.	průměr	max.
Označení vzorku	MIP	He-pykno	MINLITH									
85/II	a) 2,59*	2,617	2,66	7,59	8,56	9,16	2,034	2,186	2,355	10,01	16,47	22,28
	b) 2,61											
85/III	a) 2,62	2,615	2,66	8,32	8,82	9,03	2,12	2,146	2,182	16,56	17,94	18,93
	b) 2,62											
85/IV	a) 2,64	2,619	2,67	7,71	8,32	8,85	2,214	2,246	2,282	12,87	14,24	15,46
	b) 2,62											
85/V	a) 2,63	2,612	2,66	6,82	7,26	8,16	2,147	2,213	2,246	14,01	15,28	17,8
	b) 2,6											
85/VI	a) 2,62	2,611	2,65	7,14	8,93	10,52	2,122	2,163	2,191	16,09	17,16	18,73
	b) 2,61											

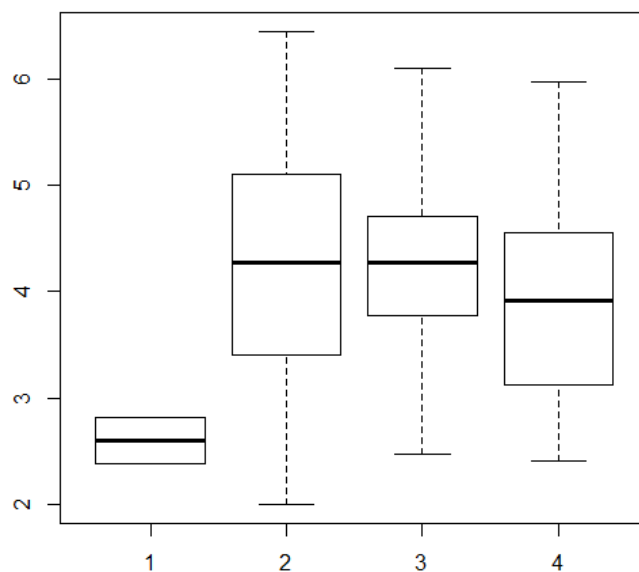
\*dílní měření rtuťovou porozimetrií

### 5.3.2. Pevnostní vlastnosti

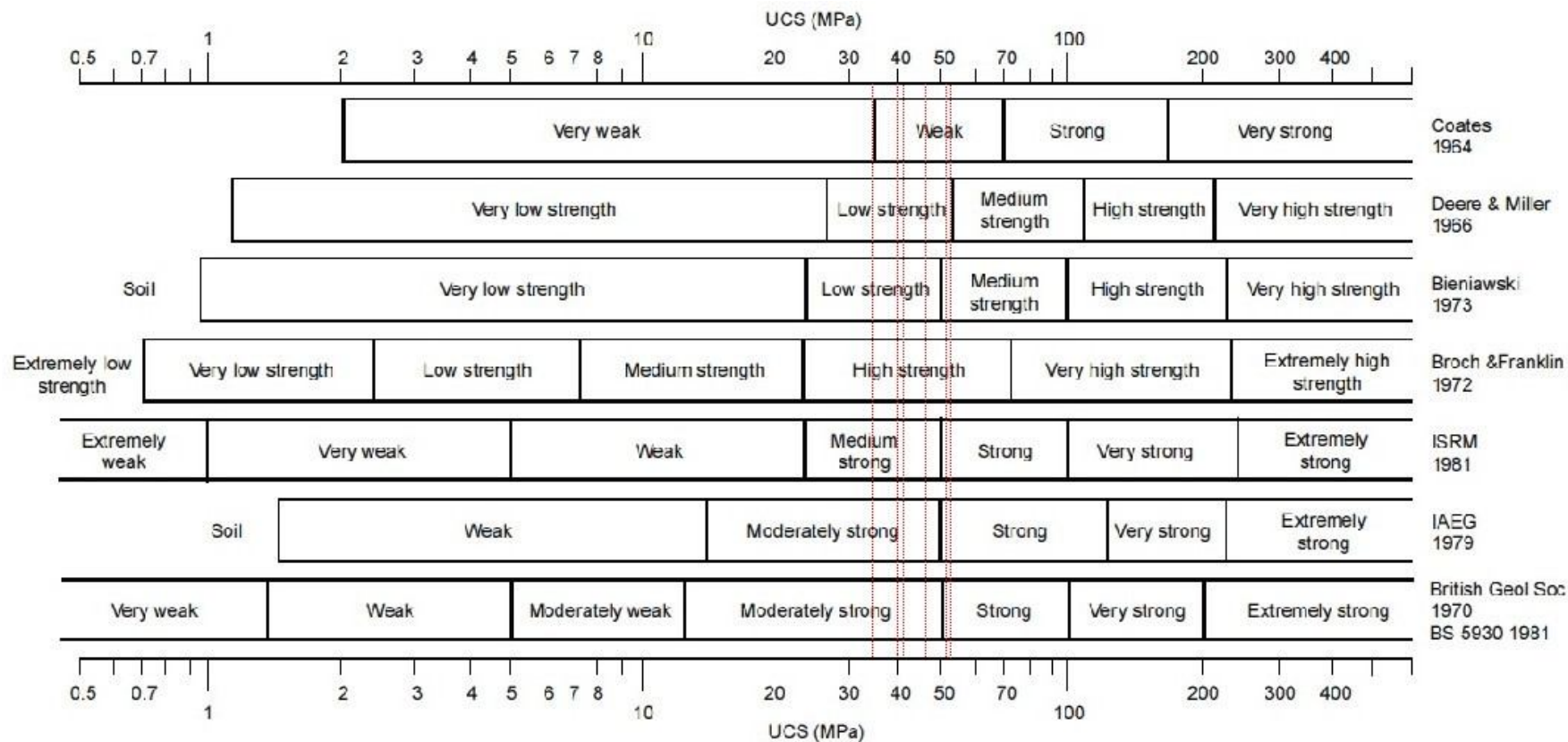
Výsledky pevnostních zkoušek těles z vrtných jader jsou uvedeny na obrázku 22 v případě pevnosti v prostém tlaku, resp. na obrázku 23 v případě pevnosti v příčném tahu. Zjištěné mediány pevnosti v prostém tlaku jednotlivých vrtů „JB“ jsou dále uvedeny v klasifikačním schématu (Obr. 24).



Obr. 22. Krabicové grafy znázorňující pevnosti v prostém tlaku suchých těles vrtů. Osa x: pořadí vrtu; osa y: pevnost v MPa; počty vzorků: 1 - JB101 (24 vzorků); 2 - JB 102 (10 vzorků); 3 - JB 103 (1 vzorek); 4 - JB 104 (20 vzorků); 5 - JB 105 (18 vzorků); 6 - JB 106 (16 vzorků); 7 - JB 107 (9 vzorků).



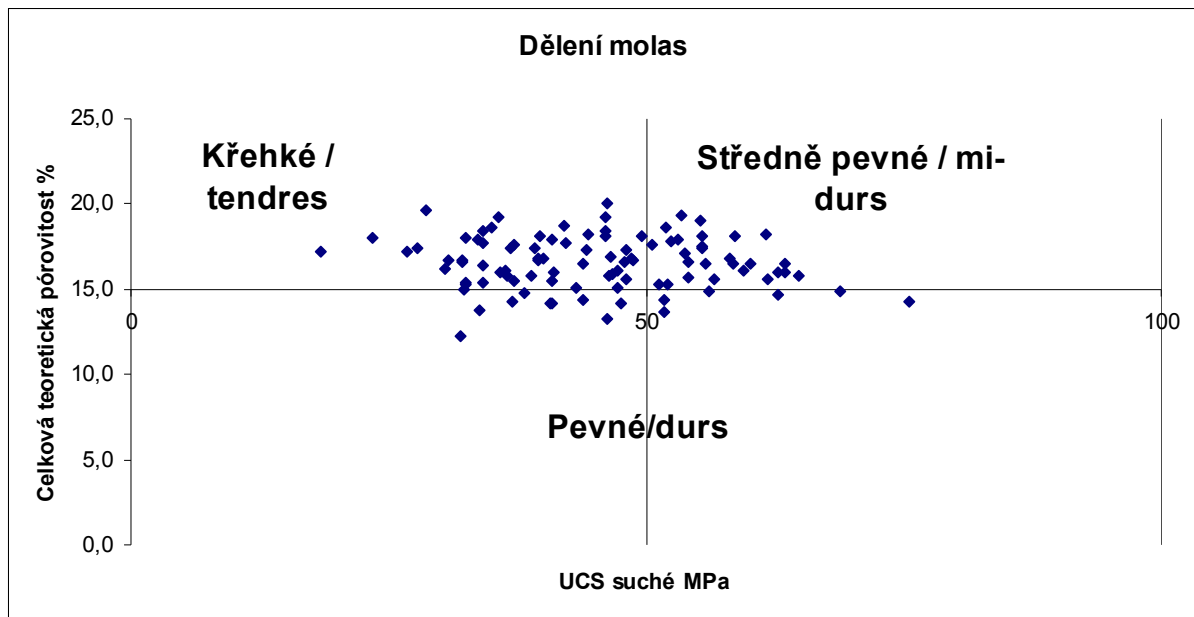
Obr. 23. Krabicové grafy znázorňující pevnost v příčném tahu suchých těles vrtů. Osa x: pořadí vrtu; osa y: pevnost v MPa. Počty vzorků: 1 - JB103 (2 vzorky); 2 - JB104 (25 vzorků); 3 - JB105 (28 vzorků); 4 - JB106 (21 vzorků).



Obr. 24. Porovnání klasifikačních tříd dle pevnosti hornin v prostém tlaku (UCS). Svislice znázorňují mediány jednotlivých vrtů „JB“. Rozsah mediánů 35 až 52 MPa (upraveno podle Hawkinse 1998).



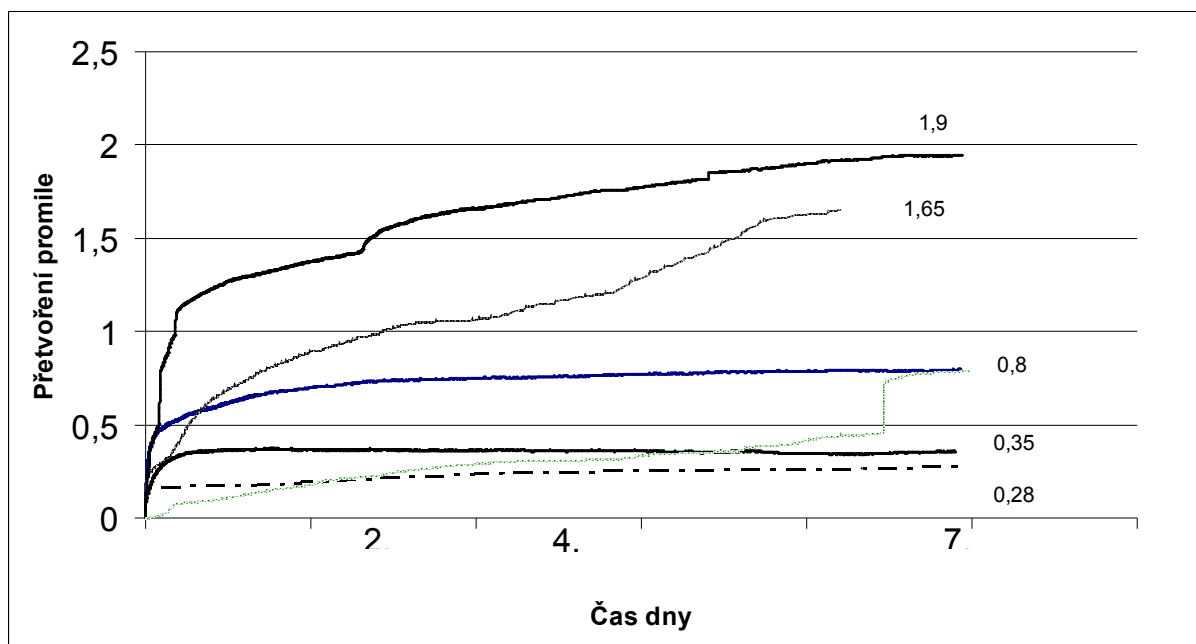
Klasifikace molasových sedimentů dle Félix (1995) s vyznačenými vzorky vrtných jader je na obrázku 25. Dosazenými hodnotami byly výsledky zkoušek tlakových pevností suchých těles z vrtných jader a hodnoty celkové pórovitosti vypočítané programem MINLITH odpovídajících vzorků.



Obr. 25. Dělení molasových sedimentů dle Félix (1995) s vyznačenými výsledky zkoušek vrtů.

### 5.3.3. Hydraulická roztažnost

Na obrázku 26 jsou zobrazeny průběhy zkoušek hydraulické roztažnosti šesti zkoumaných těles z povrchových bloků s vyznačenými konečnými hodnotami.



Obr. 26. Průběhy zkoušek hydraulické roztažnosti šesti těles s uvedenými konečnými hodnotami přetvoření (‰).

#### 5.4. Míry lineárních závislostí veličin

Metodou lineární interpolace se autor této práce pokusil poukázat na možné závislosti veličin, jejichž naměřené či vypočtené hodnoty byly v případě zkušebních těles uvedeny v této kapitole výše. Jednalo se především o možné závislosti veličin, jež se týkaly indexových a mechanických vlastností suchých, potažmo nasycených těles.

V tabulce 9 jsou uvedeny míry lineárních závislostí pevnostních a indexových veličin spolu s hodnotami spolehlivosti lineární interpolace, indexem korelace a uvedeným trendem regresní přímky (přímá/nepřímá závislost). Uveden je též počet vzorků.

V tabulce 10 jsou uvedeny míry lineárních závislostí přetvárných a indexových veličin spolu s hodnotami spolehlivosti lineární interpolace, indexem korelace a uvedeným trendem regresní přímky. Uveden je rovněž počet vzorků.

Uvedená „zdánlivá pórovitost“ značí podíl pórů vypočítaný na základě zkoušky nasákavosti zkušebních válcovitých těles.

Změna pevnosti kamene jakožto důsledek saturace vodou je v literatuře označována jako „měknutí kamene“ (Hirschwald 1908). Index měknutí, v anglické literatuře označovaný též jako „strength reduction ratio“, je procentuálně vyjádřen jako podíl pevnosti v tlaku (resp. tahu) v nasyceném a suchém stavu zkušebního tělesa.

Tab. 9. Míry lineárních závislostí zkoumaných veličin – pevnostní a indexové vlastnosti.

Suché vzorky vrtů							
Veličina - osa x	Jednotky	Veličina - osa y	Jednotky	r <sup>2</sup>	r	Trend*	Počet vzorků
Pevnost v tlaku	MPa	Nasákavost	hm. %	0,01	0,11	↓	97
Pevnost v tlaku	MPa	Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	0,01	0,09	↑	
Pevnost v tlaku	MPa	Index měknutí <sup>1)</sup>	%	0,14	0,37	↓	
Pevnost v tlaku (suché vzorky)	MPa	Pevnost v tlaku (nasycené vzorky)	MPa	0,23	0,48	↑	49
Pevnost v tlaku	MPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,01	0,09	↓	97
Pevnost v tahu	MPa	Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	0,04	0,20	↑	73
Pevnost v tahu	MPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,01	0,12	↓	
Nasycené vzorky vrtů							
Pevnost v tlaku	MPa	Nasákavost	hm. %	0,01	0,11	↓	49
Pevnost v tlaku	MPa	Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	0,02	0,13	↑	
Pevnost v tlaku	MPa	Index měknutí	%	0,37	0,61	↑	
Pevnost v tahu	MPa	Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	0,00	0,03	↑	28
Pevnost v tahu	MPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,04	0,21	↓	
Pevnost v tahu	MPa	Index měknutí <sup>2)</sup>	%	0,38	0,62	↑	

\* ↓ nepřímá závislost; ↑ přímá závislost

<sup>1)</sup> průměrná hodnota indexu měknutí v tlaku je 78%

<sup>2)</sup> průměrná hodnota indexu měknutí v tahu je 84%

Tab. 10. Míry lineárních závislostí zkoumaných veličin – přetvárné, pevnostní a indexové vlastnosti. Vysvětlivky viz tabulka 9.

<b>Suché vzorky povrchových bloků</b>							
<b>Veličina - osa x</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Veličina - osa y</b>	<b>Jednotky</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>r</b>	<b>Trend</b>	<b>Počet vzorků</b>
Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	Edyn	GPa	0,15	0,38	↑	123
Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	Střížný modul	GPa	0,15	0,39	↑	
Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	Zdánlivá pórovitost	%	0,18	0,42	↓	
Edyn	GPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,00	0,02	↑	
Střížný modul	GPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,04	0,19	↓	
<b>Suché vzorky vrtů</b>							
Edyn	GPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,41	0,64	↓	146
Střížný modul	GPa	Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	0,25	0,50	↑	
Edyn	GPa	Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	0,28	0,53	↑	
Střížný modul	GPa	Zdánlivá pórovitost	%	0,43	0,65	↓	
Objemová hmotnost	g/cm <sup>3</sup>	Zdánlivá pórovitost	%	0,52	0,72	↓	
Edyn	GPa	Pevnost v tlaku	MPa	0,01	0,07	↑	97
Poissonovo číslo	-	Pevnost v tlaku	MPa	0,27	0,52	↓	
Střížný modul	GPa	Pevnost v tlaku	MPa	0,06	0,24	↑	
Pevnost v tlaku	MPa	Poissonovo číslo	-	0,03	0,17	↓	
<b>Nasycené vzorky vrtů</b>							
Edyn	GPa	Pevnost v tlaku	MPa	0,00	0,02	↑	49

## 6. DISKUZE

### 6.1. Indexové vlastnosti

#### 6.1.1. Nasákavost a objemová hmotnost

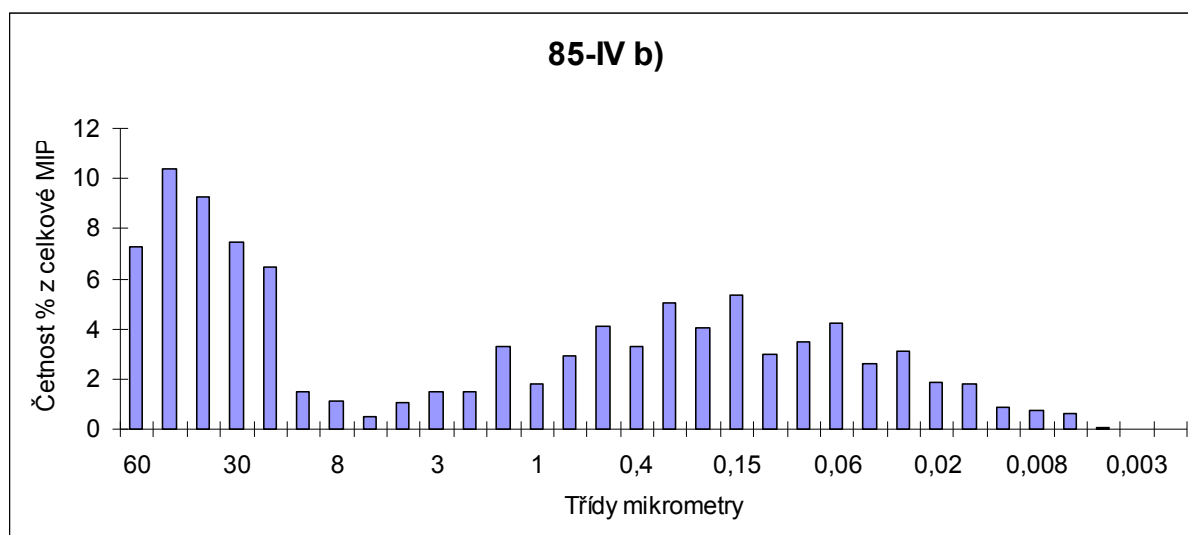
V rámci výzkumu indexových vlastností byla statisticky určena míra závislosti nasákavosti zkoumaných těles na jejich objemové hmotnosti. Vzorky vrtných jader vykazují zvolenou metodikou lineární interpolace těsnější vztah mezi těmito veličinami ( $r^2 = 0,69$ ) v porovnání se vzorky povrchových bloků ( $r^2 = 0,35$ ). Zároveň mají hodnoty obou veličin v případě vrtů větší rozsah a vyšší hodnoty aritmetických průměrů.

Na základě tohoto lze usuzovat, že výsledky zkoušek nasákavosti a měření objemové hmotnosti vzorků vrtných jader mohou být odrazem větší nehomogenity ve složení a pórovitosti „čerstvé“ horniny oproti povrchovým blokům. Ty se pak naopak vyznačují nižší variabilitou hodnot zkoumaných veličin a nižší průměrnou nasákavostí. Tyto jevy mohou být způsobeny velikostí vzorkovaného horninového tělesa (povrchová vrstva horniny oproti „celému“ horninovému masívu) a případně i částečným zvětráním a následnou modifikací pórového prostoru hornin povrchových bloků.

#### 6.1.2. Metodiky měření pórovitosti a hodnocení jejích výsledků

Výsledky měření pórovitosti se v závislosti na zvolené metodě různí. Nejnížší výsledky pórovitosti byly získány metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie, a to v rozmezí 10,84 % až 13,78 %. Fakt, že nejnižší výsledky byly získány právě touto metodou, lze vysvětlit možnou nedostatečnou schopností metody obsáhnout a započítat objem malých pórů a rovněž pórů izolovaných.

Velikostní distribuce pórů, získané touto metodou, vykazují ve všech případech bimodální rozdělení. Výsledný způsob rozdělení může být odrazem geologické historie kamene, především jeho zrnitosti a postsedimentárních procesů. První (výraznější) lokální maximum se pohybuje v rozmezí 20 až 30  $\mu\text{m}$ , v jednom případě pak 40 až 50  $\mu\text{m}$ . Druhé (nižší) lokální maximum nabývalo hodnot v rozmezí 2 až 0,1  $\mu\text{m}$ .



Obr. 27. Vysoké hodnoty druhého lokálního maxima velikostního rozdělení pórů mohou být způsobeny systematickým nadhodnocením podílu malých pórů.

Kapilární pórovitost dosahuje v případě metody vysokotlaké rtuťové porozimetrie průměrné hodnoty 87,4 % (z celkové hodnoty zjištěné touto metodou), resp. 67,3 % (z celkové hodnoty naměřené heliovou pyknometrií).

Rozsahy kapilárních pórovitostí, tj. suma objemů pórů o průměrech v rozmezí 0,1  $\mu\text{m}$  až 2500  $\mu\text{m}$ , neodpovídaly výsledkům nasákavosti. „Teoretická“ nasákavost by podle zastoupení kapilárních pórů měla být u všech zkušebních těles vyšší. Tento nesoulad je pravděpodobně způsoben vlivem zakřivení pórů a možného uzavírání pórů v průběhu sycení horniny vodou. Obojí může způsobovat omezenou přístupnost menších kapilár za atmosférického tlaku. U metody vysokotlaké rtuťové porozimetrie je důležité zmínit, že velikostní rozdělení pórů, získaná touto metodou, jsou ovlivněna umělým nadhodnocováním podílu malých pórů (Obr. 27) při překonávání pórových hrdel (Ordóñez a kol. 1997).

Vyšší hodnoty pórovitosti byly získány heliovou pyknometrií, a to v rozmezí 14,25 % až 17,49 %.

Třetím způsobem stanovení pórovitosti bylo použití algoritmů MINLITH a MODES.

Hodnoty vypočítané programem MINLITH byly blízké hodnotám heliové pyknometrie; maximální odchylka činila 1,48 a minimální 1,25 procentního bodu (Tab. 11). Hodnoty pórovitosti, vypočítané algoritmem MINLITH, vyšly v rozmezí 15,6 % a 18,8 %. Omezení tohoto algoritmu spočívá v tom, že program MINLITH využívá relativně odolné minerály, jejichž chemické složení je lépe definované. Využívány jsou tak hlavně minerály zralých sedimentárních hornin. Naopak scházejí ty součásti, jejichž složení v přírodě kolísá a jejichž výskyt je vázán na méně zralé sedimenty. Příkladem mohou být různorodé úlomky hornin.

Tab. 11. Hodnoty pórovitosti v závislosti na zvolené metodě v případě stejného vzorku.

Vzorek	Metoda	Pórovitost %
85/lva	Zdánlivá pórovitost	8,3
	Vysokotlaká rtuťová porozimetrie	10,8
	Heliová pyknometrie	14,5
	MINLITH	15,8
	MODES	18,1

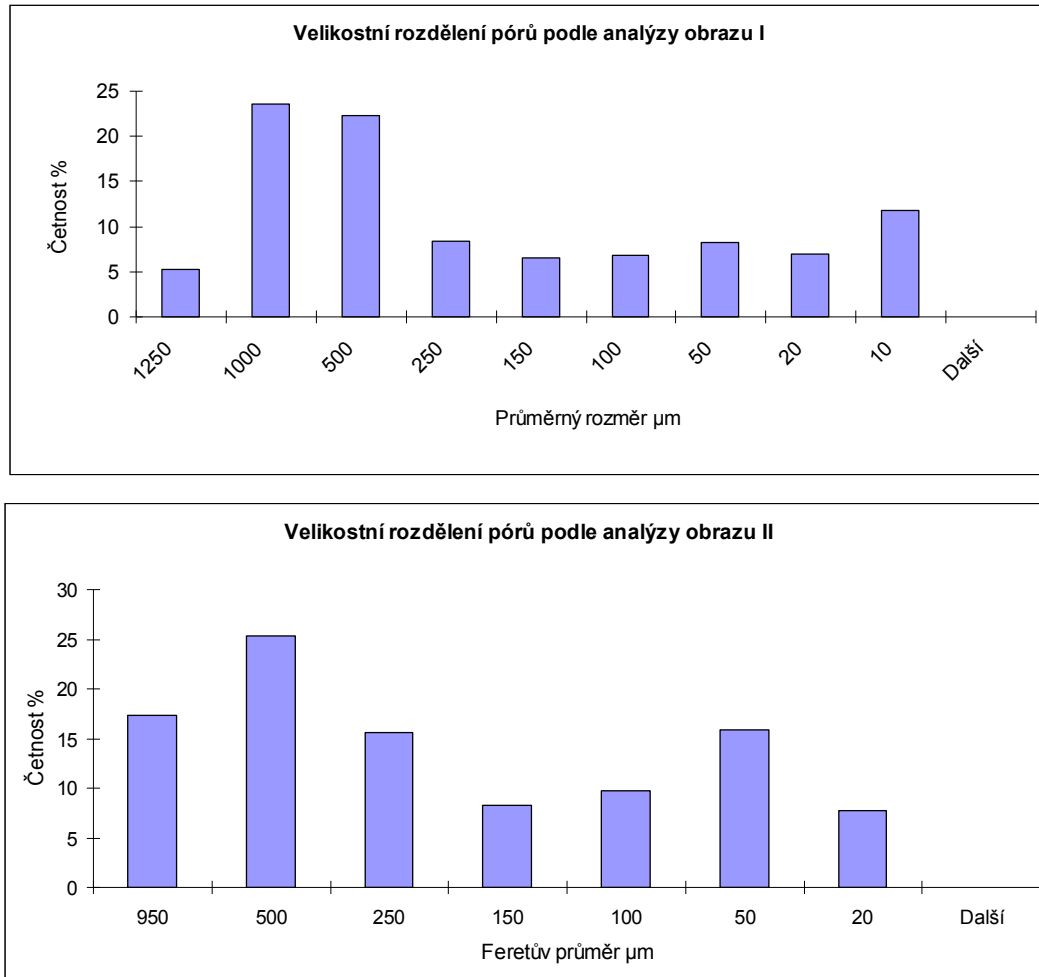
Program MODES poskytl neúměrně vysoké hodnoty pórovitosti (v rozmezí 18,0 % až 21,1 %), z toho důvodu nebyly tyto hodnoty uvedeny ve srovnávacích tabulkách (Tab. 7 a 8). MODES nemá postupné alokační fáze, jak je tomu v případě MINLITH, ale přiděluje hlavní kationty vždy jen na jednu fázi (např. sodík tvoří pouze živec), po jejímž vytvoření se příslušné množství kationtu odečte. Vzhledem k vysokým výsledným hodnotám pórovitosti je pravděpodobné, že programem MODES je v rámci vypočteného modálního složení systematicky podhodnocováno zastoupení křemene.

Metodou analýzy obrazu byly zjištěny největší rozdíly v hodnotách pórovitosti, a to v rozmezí 4,3 % až 14,9 %, s průměrem 8,3 %. Tento typ analýzy může ve velké míře odrážet nehomogenitu vlastností zkoumaného materiálu. Vliv na výslednou hodnotu má navíc uživatelem nastavitelná hodnota barevného prahu, kterou je nezbytné zadat před automatickým sčítáním ploch zaujímaných póry. Tato manuální úprava může v závislosti na měrném povrchu horniny ovlivnit výsledek o desetiný až jednotky procentních bodů výsledné pórovitosti.

Velikostní rozdělení pórů podle analýzy obrazu má charakter převážně bimodální, v několika případech unimodální. Jednotlivé třídy jsou v případě této metody přepočítány z velikosti pórových shluků na velikosti v mikrometrech; Feretův průměr či průměrný rozměr. U bimodálního rozdělení se vyšší lokální maxima pohybovala nejčastěji v rozmezí 500 až 250  $\mu\text{m}$  (v jednom výbrusu 20 až 10

$\mu\text{m}$ ) a nižší lokální maxima v rozsahu 100 až 20  $\mu\text{m}$  (v jednom případě pod 5  $\mu\text{m}$ ). Pokud bylo rozložení unimodální, většina pórů spadala do třídy pod 20  $\mu\text{m}$  (v jednom případě pod 50  $\mu\text{m}$ ).

Vedle Feretova průměru bylo pro výpočet velikostní distribuce použito i průměrného rozměru pórů. Průběhy těchto histogramů většinou kopírovaly trendy z histogramů s Feretovým průměrem. Rozdíl oproti nim však spočíval ve větším získaném počtu tříd, což odpovídalo většímu rozpětí pórových rozměrů (Obr. 28).



Obr. 28. Histogramy velikostního rozdělení pórů. Použitými rozměry byl průměrný rozměr (výše) a Feretův průměr (níže).

Oproti výsledkům vysokotlaké rtuťové porozimetrie byly naměřené hodnoty pórových rozměrů celkově vyšší. Příčinou je pravděpodobně vliv hodnot barevného prahu, popsany výše, spolu s omezeným rozlišením snímacího aparátu, který zanedbává velikosti pórů řádu prvních mikronů (a menší), čímž nadhodnocuje podíl větších pórů ve výsledné distribuci.

## 6.2. Mechanické vlastnosti

### 6.2.1. Pevnostní a přetvárné vlastnosti

Mediány pevností v prostém tlaku suchých vzorků vrtů jsou v závislosti na zvolené klasifikaci řazeny do nízké až vysoké pevnostní kategorie. Nejčastěji spadají mediány do kategorie středně pevné.

Podle klasifikace molasových sedimentů (Félix 1995) spadají vzorky hornin, na základě své celkové pórovitosti a tlakové pevnosti, do oblastí křehkých, středně pevných a pevných molas s převažujícím zařazením mezi křehké. Použitými hodnotami byly výsledky pórovitostí vypočítané algoritmem MINLITH. Pokud by místo nich byly dosazeny hodnoty například z vysokotlaké rtuťové porozimetrie, spadaly by vzorky z větší části do oblasti pevných molas.

Vedle teplotní roztažnosti představuje index hydraulické roztažnosti důležitý ukazatel objemových změn v kameni, které mohou při běžných klimatických podmínkách a výkyvech relativní vlhkosti nastat (Félix 1995). Hodnoty indexů hydraulické roztažnosti dosahují podprůměrných hodnot. V rešeršní části byly zjištěny běžně dosahované hodnoty přetvoření pískovců 0,5 ‰ až 5 ‰, u studovaných vzorků v této práci dosahují 0,28 ‰ až 1,90 ‰ s tím, že u každého vzorku byla většina z konečné hodnoty přetvoření dosažena již během prvních dvou dní po zahájení experimentu. Popsaná metodika s využitím snímačů LVDT se ukázala jako použitelná vzhledem ke své citlivosti a vzhledem k průběhům a konečným hodnotám přetvoření zkoumaných těles.

### 6.2.2. Index měknutí

Průměrný index měknutí v tlaku dosáhl u zkoušených těles hodnoty 78 %. Poukazuje tak v průměru na 22 % pokles pevnosti v prostém tlaku po nasycení vůči pevnosti suchých vzorků.

Průměrný index měknutí v tahu měl hodnotu 84 %. Proces měknutí kamene je komplexní a jeho vývoj je závislý na stupni saturace horninové struktury, vlhkosti prostředí a na charakteru horninového typu (Ruedrich a kol. 2010).

## 6.3. Vybrané závislosti

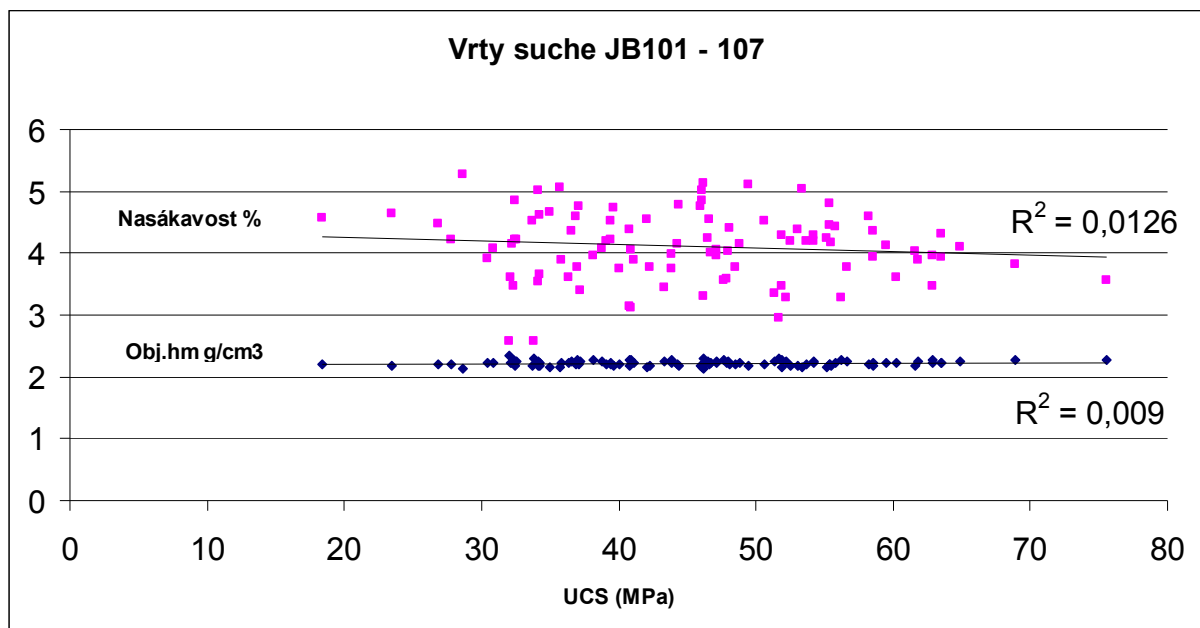
### 6.3.1 Pevnost

Jediným kritériem použitým při posuzování míry závislosti zjištěných veličin byla navzdory svým nedostatkům hodnota spolehlivosti lineární interpolace  $r^2$ , resp. index korelace  $r$ . Tyto parametry byly využity jako ukazatele relativní míry závislosti v rámci zkoumaných datových souborů.

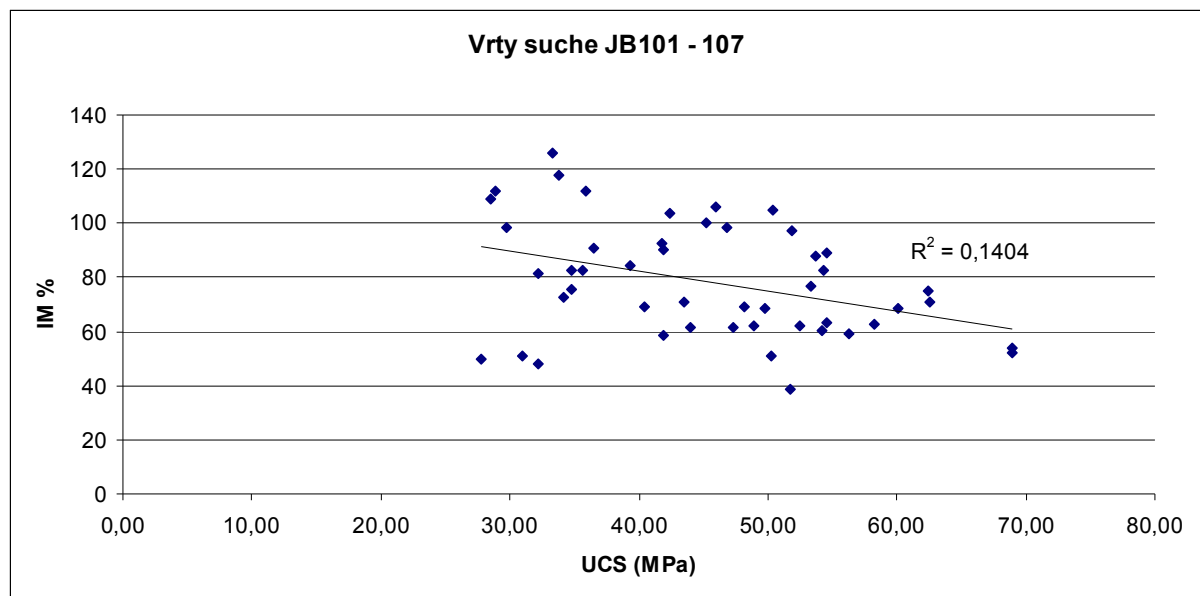
Výsledné závislosti veličin, souvisejících s pevnostmi suchých vzorků vrtů lze na základě parametru  $r^2$  rozdělit na dvě skupiny:

V první se nacházejí veličiny, mezi nimiž byl zjištěn relativně nízký stupeň lineární závislosti. Blízký nule ( $r^2 = 0,01$ ) je v případě vlivu nasákavosti, objemové hmotnosti či zdánlivé pórovitosti na pevnost v prostém tlaku (Obr. 29). Tyto hodnoty naznačují, že na pevnost v tlaku mohou mít vedle těchto indexových veličin vliv i jiné faktory. Určující vzhledem k pevnosti mohou být např. neporušenost a typ klastů, převažující druh kontaktů mezi zrny či složení a procentuální zastoupení přítomného tmelu.





Obr. 29. Míra lineární závislosti pevnosti v prostém tlaku (UCS) na vybraných indexových vlastnostech, s vyznačenými hodnotami spolehlivosti lineární interpolace.



Obr. 30. Míra lineární závislosti indexu měknutí (IM) na pevnosti v prostém tlaku (UCS).

Ve druhé skupině se nacházejí závislosti o relativně vyšší míře lineární korelace: přímá závislost pevnosti v tlaku suchých a nasycených vorků ( $r^2 = 0,23$ ) a nepřímá závislost pevnosti v tlaku a indexu měknutí ( $r^2 = 0,14$ ; Obr. 30).

Závislosti ve druhé skupině je možné interpretovat tak, že mikrostrukturní jevy, ovlivňující pevnost v prostém tlaku za sucha, mohou předurčovat i pevnost tělesa po nasycení. Některé jevy, uplatňující svůj vliv na pevnost za sucha, však mohou být po nasycení kamene oslabovány, a to tím (relativně) více, čím vyšší je původní pevnost.

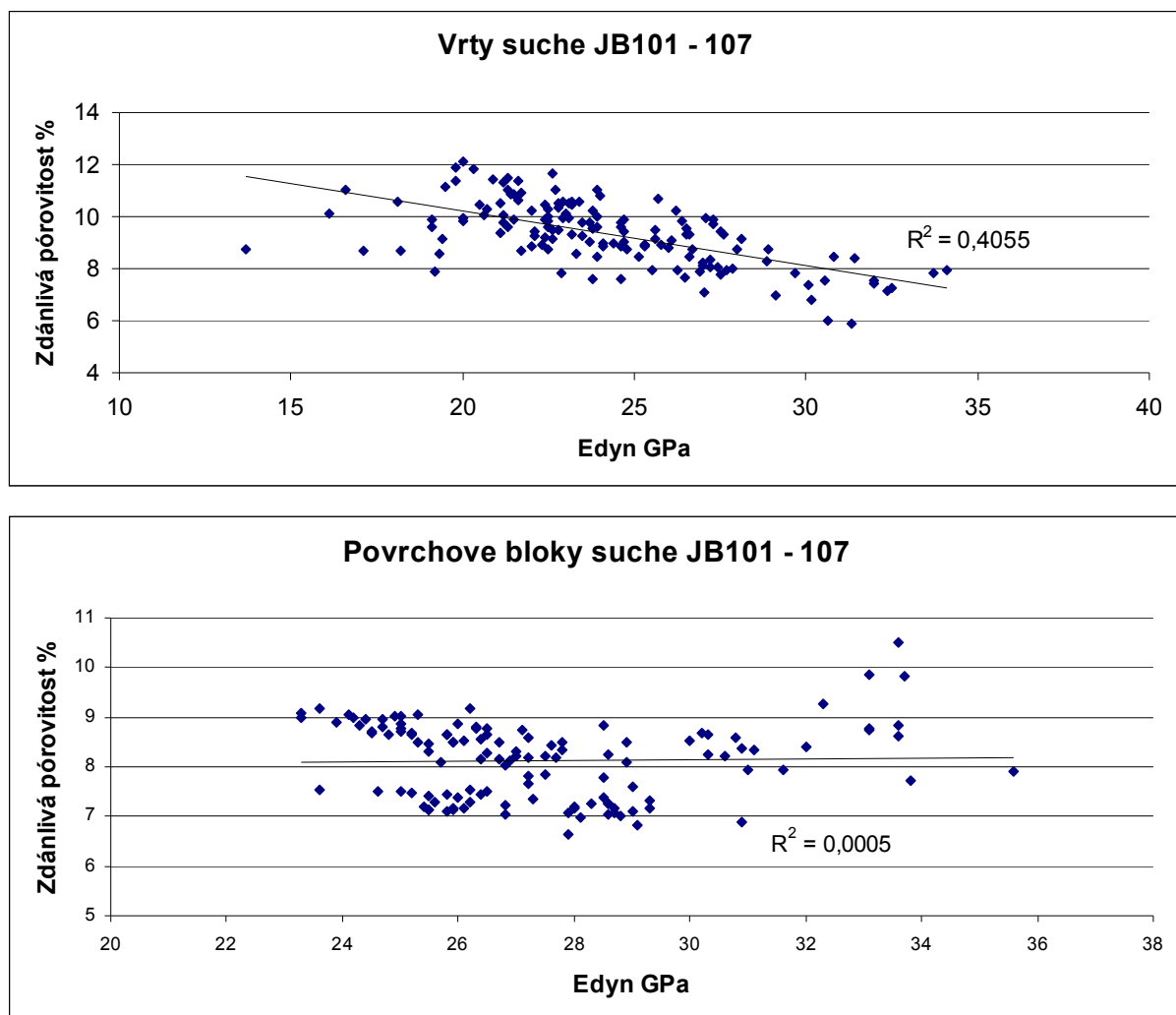
Trendy v případě výsledků u nasycených vzorků vrtných jader jsou podobné. Poměrně nejvyšší hodnoty závislosti byly zjištěny mezi indexem měknutí a pevnostmi ( $r^2 = 0,37$  v tlaku, resp.  $0,38$  v tahu). Ostatní korelace jsou jako v případě suchých vzorků nižšího stupně. Za zmínku stojí téměř nulová hodnota  $r^2$  v případě závislosti pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti ( $r = 0,02$ ).

### 6.3.2. Přetvárnost

V případě přetvárných vlastností byly zkoušeny vzorky povrchových bloků a dále suchých a nasycených vzorků vrtů.

Relativně vysoký stupeň korelace byl zjištěn u závislosti mezi zdánlivou pórovitostí a následujícími veličinami: objemovou hmotností ( $r^2 = 0,52$ ), střížným modulem ( $r^2 = 0,43$ ) a Youngovým modulem ( $r^2 = 0,41$ ) suchých vrtů.

Tyto a výše popsané výsledky poukazují na možný větší vliv zdánlivé pórovitosti na přetvárné vlastnosti zkoušených těles, než na jejich konečnou pevnost. Na možnou nezávislost pevnosti a přetvárnosti poukazují nízké stupně korelace těchto veličin:  $r^2 = 0,01$  v případě pevnosti v tlaku a Youngova modulu;  $r^2 = 0,06$  v případě pevnosti v tlaku a střížného modulu.



Obr. 31. Výrazná změna hodnot spolehlivosti lineární interpolace v případě závislosti Youngova modulu ( $E_{dyn}$ ) na zdánlivé pórovitosti těles z vrtných jader (výše) a povrchových bloků (níže).

Přetvárné vlastnosti též ovlivňuje i odvozená objemová hmotnost, jež je se zdánlivou pórovitostí v poměrně vysokém stupni korelace ( $r^2 = 0,52$ ).

Zásadní změny v pozorovaných závislostech však nastaly v případě výsledků zkoušení povrchových bloků. Veškeré korelace zaznamenaly výrazné změny směrem k nižším hodnotám korelačních koeficientů: v případě závislosti zdánlivé pórovitosti a Youngova modulu (vrty  $r^2 = 0,41$ ) došlo ke změně na  $r^2 = 0,00$  (Obr. 31). U závislosti zdánlivé pórovitosti a střižného modulu pak z  $r^2 = 0,43$  (vrty) na  $r^2 = 0,04$  (povrchové bloky). K posunu směrem do nižší míry došlo v případě závislosti přetvárných vlastností a objemové hmotnosti.

Možnou příčinu výše zjištěných změn v mírách lineárních korelací lze předpokládat v přestavbě struktury pórového prostoru, způsobené v průběhu zvětrávacích procesů. Jedná se především o možnou změnu velikostního rozdělení pórů a pórových hrdel. Výsledné závislosti jsou pravděpodobně též ovlivněny změnou pevnosti kontaktů a rovněž změnou povahy a zastoupení tmelu. Tyto jevy mohou mít příčinu jednak ve změně napět'ového režimu v hornině v průběhu zvětrávání a dále v chemických reakcích s atmosférickými činiteli.

## 7. ZÁVĚR

### 7.1. Závěr rešeršní části

Rešeršní část práce pojednala o vybraných metodách studia hornin s ohledem na jejich vnitřní stavbu a z ní vyplývající fyzikální vlastnosti. Vzhledem k zaměření této práce se převážná část literatury týkala petrografie stavebního kamene. Z dostupných literárních zdrojů vyplývá snaha části vědecké obce o zapojení širokého spektra zkoušek, včetně zkoušek "citlivosti na vodní prostředí", při zjišťování kvality či trvanlivosti kamene. Někteří autoři se naopak zasazují o snahu nalézt a popsat „fundamentální parametry“, od kterých by bylo možno odvozovat celkovou budoucí trvanlivost.

Jednoznačný souhlas panuje v nutnosti analyzovat co nejpřesněji pórový prostor horniny, z toho důvodu, že se jedná o významný prekurzor dalších vlastností horniny. Hodnota pórovitosti a její velikostní distribuce ovlivňují nasákavost a též koeficient nasákavosti. Neshoda však panuje ohledně přímého vlivu na prostou pevnost.

Autoři se shodují v tom, že využívané petrofyzikální modely počítají s příliš zjednodušeným tvarem pórů. Detailní studium geometrie pórů za využití kombinace analytických metod tak bude patrně nedílnou součástí budoucího výzkumu.

Výsledky předešlých prací potvrzují vliv objemové hmotnosti na elastické vlastnosti horniny. Přesné či přibližné matematické vztahy mezi těmito veličinami jsou však relevantní vždy jen v rámci zvoleného litotypu.

V případě zkoušek nasákavosti jsou srovnatelné pouze výsledky dosažené stejnou metodou. Rozsah pórovitosti řídicí přenos kapaliny kapilárním mechanismem, 0,1  $\mu\text{m}$  až 2500  $\mu\text{m}$ , je „všeobecně“ přijímán.

Pevnostní charakteristiky úzce souvisejí se zbylými petrofyzikálními vlastnostmi. Dosud se však nepodařilo obecně a matematicky přesně popsat jejich vztah. I z tohoto důvodu vystupují ve všech matematických modelech zatím samostatně, tj. nezávisle. Nově zaváděné indexy (např. GAR, GC) jsou s prostou tlakovou pevností pískovců ve vysokém stupni korelace. Neshody panují ohledně vlivu jílu na prostou pevnost v případě nízce jílovitých hornin.

Výsledky předchozích prací poukazují na vysoký stupeň korelace hodnot Youngova modulu a prosté pevnosti v tlaku. Rozdíl mezi statickým a dynamickým Youngovým modulem roste s pórovitostí kamene.

Index měknutí kamene je podle některých autorů odvislý především od obsahu křemene, což není v souladu s jinými pracemi. Též vliv prosté pevnosti na index měknutí není jednoznačně popsán. Jako hlavní příčiny hydraulického měknutí kamene jsou uváděny: obsah bobtnavých jílu, jílovitost, tlaková koroze a pórový tlak.

Jako hlavní příčiny hydraulické roztažnosti hornin jsou uváděny: intrakrystalické bobtnání jílových minerálů, osmotické bobtnání jílových agregátů, pórovitost, forma matrix. Běžné hodnoty hydraulické roztažnosti pískovců se pohybují v rozmezí 0,5 ‰ až 5 ‰.

### 7.2. Závěr experimentální části

V rámci této práce byly popsány relevantní metody a autorem okomentované výsledky studia karbonských arkóz z ložiska Březín. Zkoumaný materiál představoval potenciální surovinu na výrobu blokového stavebního kamene. Vybraná petrofyzikální metodika vycházela z dnes běžné vědecké praxe a zahrnovala základní používané postupy: optickou mikroskopii, laboratorní zkoušky pevnostních a přetvárných vlastností, rtuťovou porozimetrii, dále heliovou pyknometrii, využití výpočetních algoritmů MINLITH a MODES a zkoušku hydraulické roztažnosti.

Nejdůležitější poznatky o zájmové hornině lze na základě získaných výsledků této práce a předešlých publikací shrnout následovně.

Zkoumané arkózy se vyznačují vysokým podílem křemene, přes 70 %, a nízkým podílem jílu (první jednotky procent). Litoklasty jsou bohaté  $\text{SiO}_2$ , v ojedinělých případech jsou navětralé, což je občasný případ fylitů. V hornině je spoře přítomen křemitý tmel. Hojněji se vyskytuje též železitý tmel, tvořící menisky a povlaky okolo klastů.

Výsledné hodnoty pórovitosti zkoumaných těles byly závislé na zvolené metodě a v případě vysokotlaké rtuťové porozimetrie dosahovaly hodnoty 10,8 % až 13,8 %.

Mediány hodnot pevnosti v prostém tlaku vrtných jader odpovídaly převážně středně pevným horninám. Průměrný index měknutí pak v případě vrtů vyšel 78 %.

Konečné výsledky zkoušek hydraulické roztažnosti (po sedmi dnech ponoření ve vodě) dosahovaly ve srovnání s ostatními pracemi podprůměrných hodnot, a to v rozmezí 0,28 ‰ až 1,90 ‰.

Porovnání trendů zjištěných závislostí v předložené práci a dostupné literatury je následující.

Shodné trendy byly zjištěny v případě přímého vlivu objemové hmotnosti na přetvárné vlastnosti. Stejný vliv na tyto vlastnosti má i nasákavost a zdánlivá pórovitost. Výsledkům odborné literatury odpovídá i přímá závislost pevnosti suchých a nasycených vzorků.

Nesoulad s rešeršní částí byl naopak zjištěn v případě vlivu pevnosti na přetvárné vlastnosti. Nebyla zjištěna závislost tlakové pevnosti na Youngovu modulu, střížném modulu ani vyšším indexu měknutí. V oboru indexových vlastností pak byl zjištěn nesoulad v případě kapilární pórovitosti, jejíž hodnota neodpovídala výsledkům nasákavosti.

Petrofyzikální výzkum, předložený v této práci, může představovat výchozí rámec pro navazující hodnocení trvanlivosti zkoumaného litotypu. Aktuální je rovněž studium „etapovitého“ zvětrávání a fenomén nelineárního vývoje fyzikálně-mechanických vlastností v průběhu zvětrávání. V případě stavebního kamene je téma budoucího výzkumu spjata s hodnocením kompatibility stavebních prvků v rámci stavby a změn úrovní jejich fyzikálních vlastností za kolísavých teplot a relativní vlhkosti.

## 8. SEZNAM LITERATURY

Alfes Ch., 1991. *Relationship between the microstructure and fracture mechanics parameters of sandstones*. In: Van Mier J.G.M., Rots J.G., Bakker A. (ed.), *Fracture process in concrete, rocks and ceramics*. RILEM (76-82)

Angeli M., Bigas J-P., Benavente D., Menendez B., Hubert R., David Ch., 2007. *Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage*. *Environmental Geology* 52 (187-195)

Benavente D., Lock P., García del Cura M.A., Ordóñez S., 2002. *Predicting the capillary imbibition of porous rocks from microstructure*. *Transport in Porous Media* 49 (59– 76)

Benavente D., Cueto N., Martínez-Martínez J., García del Cura M.A., Cañaveras J.C., 2006. *The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks*. *Environmental Geology* 52 (197-206)

Bienawski Z.T., 1967. *Stability concept of brittle fracture propagation in rock*. *Engineering geology* 2 (149-62)

Bourgés A.V., 2006. *Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment*. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München

Brown E.T., Richards L.R., Barr M.V., 1977. *Shear strength characteristics of the Delabole Slates*. In: *Proceedings of the Conference on Rock Engineering*, Newcastle upon Tyne (35 – 51)

Buj O., Gisbert J., 2010. *Influence of pore morphology on the durability of sedimentary building stones from Aragon (Spain) subjected to standard salt decay tests*. *Environmental Earth Sciences* 61 (7)

Castagna, J. P., Batzle M.L., Eastwood R.L., 1985. *Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks*. *Geophysics* 50 (571–581)

Coates D.F., 1964. *Classification of rock for rock mechanics*. *International Journal of Rock Mechanics Mine Sciences* 1 (421–429)

Colas E., Mertz J.D., Thomachot-Schneider C., Barbin V., Rassineux F., 2011. *Influence of the clay coating properties on the dilation behavior of sandstones*. *Applied Clay Science* 52 (245–252)

Cueto N., Benavente D., Martínez-Martínez J., García del Cura M.A., 2009. *Rock fabric, pore geometry and mineralogy effects on water transport in fractured dolostones*. *Engineering Geology* 107 (1-15)

Česká geologická služba, on-line mapový portál 1:50 000, URL: <http://www.geology.cz/extranet>; navštíveno 2.4.2014

Český úřad zeměměřický a katastrální, 1996. *Vyšší geomorfologické jednotky České republiky (mapová příloha)*, ČÚZK, 1. vyd.

Deere D.U., Miller R.P., 1966. *Engineering classification and index properties of intact rock*. *Air Force Laboratory AFNLTR* (65–116)

Delesse A., 1848. *Procède mécanique pour déterminer la composition des roches*. *Ann Mines* 379 (13)

- Delgado Rodrigues J., Charola A.E., 1996. *General report on water repellents*. Science and technology for cultural heritage 5 (93-103)
- Delgado Rodrigues J., 2001. *Swelling behaviour of stones and its interest in conservation. An appraisal*. Materiales de construcción 5 (263-264)
- Dreesen R., Duser M., 2004. *Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment*. Materials characterization 53 (273-287)
- Dullien F.A.L., 1992. *Porous media fluid transport and pore structure*. Academic Press, 2. vyd.
- Dyke C.G., Dobereiner L., 1991. *Evaluating the strength and deformability of sandstones*. Quarterly Journal of Engineering Geology 24 (123-134)
- Eissa E.A., Kazi A., 1988. *Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 25 (479-482)
- Ersoy A., Waller M.D., 1995. *Textural characterisation of rock*. Engineering geology 39 (123-136)
- Ezekwe N., 2010. *Petroleum reservoir engineering practice*. Prentice Hall, 1. vyd.
- Félix C., 1995. *Conservation et restauration des biens culturels*. Actes du Congrès LCP.
- Fitzner B., Snethlage R., 1982. *Zum Einfluß der Porenradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine*. Bautenschulung 3 (97-102)
- Feistmantel K., 1882. *Neue Fundorte von Steinkohlenpflanzen in Böhmen*, In: Kořistka K. (ed.), *Zprávy o zasedání Královské České společnosti nauk v Praze, KČSN* (237-254)
- Folk R.L., *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill, Texas 184 str.
- Ford C.E. 1995. URL: <http://www.geos.ed.ac.uk/homes/ceford/glgsoft/modes/index.html>; navštíveno 3.2.2013
- Gercek H., 2006. *Poisson's ratio values for rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44 (1-13)
- Graue B., Siegesmund S., Middendorf B., 2011. *Duality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements*. Environmental Earth Sciences 63 (1799-1822)
- Hirschwald J., 1912. *Handbuk der bautechnischen Gesteinsprüfung*. Berlin: Verlag Gebr. Borntraeger
- Hawkins A.B., McConnell B.J., 1992. *Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content*. Quarterly Journal of Engineering Geology 25 (115-130)
- Hawkins A.B., 1998. *Aspects of rock strength*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 57 (17-30)
- Holm A., 2001. *Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzepts*. Dissertation der Universität Stuttgart
- Chen H., Hu Z.Y., 2003. *Some factors affecting the uniaxial strength of weak sandstones*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 62 (323-332)

Ide J.M., 1936. *Comparison of statically and dynamically determined Young's modulus of rocks*. Proceedings of the National Academy of Sciences 22 (81-92), URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1076711/>; navštíveno 16.9.2013

Jefferson D.P., 1993. *Building stone: the geological dimension*. Quarterly Journal of Engineering Geology 26 (305–319)

Jeng F.S., Weng M.C., Lin M.L., Huang T.H., 2003. *Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of tertiary sandstones from Taiwan*. Engineering Geology 73 (71–91)

Kahn J.S., 1956. *The analysis and distribution of the properties of packing in sand-size sediments: 1. On the measurement of packing in sandstone*. The Journal of Geology 64 (385–395)

Kaplan M.F., 1959. *Ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, poisson's ratio and the strength of concrete made with thirteen different coarse aggregates*. RILEM Bulletin 1 (2-15).

Kim M.K., Lade P.V., 1984. *Modelling of rock strength in three dimensions*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 21 (21–33).

King M.S., 1970. *Static and dynamic elastic moduli of rocks under pressure*. Proceedings of 11<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rocks Mechanics, Berkeley (329-351)

Koch A., Siegesmund S., (2001). *Gesteinstechnische Eigenschaften ausgewählter Bausandsteine*. Z.d.Ges.Geowissenschaft 152 (681–700)

Krus M., 1995. *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*. Dissertation der Universität Stuttgart

Lay Lian T., Radhakrishnan P., Daya Sagar B.S., 2004. *Morphological decomposition of sandstone pore-space fractal power-laws*. Chaos, Solitons and Fractals 19 (339-346)

Meng B., 1993. *Characterisation of pore structure for the interpretation of moisture transport*, In: Thiel M.J. (ed.), *Conservation of Stone and other materials*, Unesco Paris (155-162)

Mod' d B.K., Howarth R.J., Bland C.H., 1996. *Rapid prediction of building research establishment limestone durability class from porosity and saturation*. Quarterly Journal of Engineering Geology 29 (285–297)

Mosquera M.J., Rivas T., Prieto B., Silva B., 2000. *Capillary rise in granitic rocks: interpretation of kinetics on the basis of pore structure*. Colloid Interface Science 222 (41–45)

Ordóñez S., Fort R., García del Cura M.A., 1997. *Pore size distribution and the durability of a porous limestone*. Quarterly Journal of Engineering Geology 30 (221-230)

Pechoušek J., 2010. *Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu*. Učební texty Univerzity Palackého v Olomouci, URL: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/rcptm/bet.pdf>; 30.8.2013

Peschel A., 1977. *Natursteine*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

Pešek J., 1996. *Geologie pánvi středočeské svrchnopaleozoické oblasti*. Český geologický ústav Praha

Pettijohn F.J., Potter P.E., Ever R., 1972. *Sand and sandstone*. Springer-Verlag 618 str.



- Přikryl R., 2001. *Some microstructural aspects of strength variation in rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts 38 (671-682)
- Prammer M.G., Drack E.D., Bouton J.C., Gardner J.S., Coates G.R., Chandler R.N., Miller M.N., 1996. *Measurements of clay-bound water and total porosity by magnetic resonance jogging*. Society of Petroleum Engineers, Conference paper 36522
- Rodriguez-Navarro C., Hansen E., Sebastian E., Ginell W.S., 1997. *The role of clays in the decay of ancient egyptian limestone sculptures*. Journal of the American Institute for Conservation 36 (2)
- Rosen O.M., Abbyasov A.A., Tipper J.C., 2004. *MINLITH - an experience-based algorithm for estimating the likely mineralogical compositions of sedimentary rocks from bulk chemical analyses*. Computers and Geosciences 30 (647-661)
- Ruedrich J., Bartelsen T., Dohrmann R., Siegesmund S., 2010. *Moisture expansion as a deteriorating factor for sandstone used in buildings*. Environmental Earth Sciences 63 (1545-1564)
- Sebastian E., Cultrone G., Benavente D., Fernandez L.L., Elert K., Rodriguez-Navarro C., 2008. *Swelling damage in clay-rich sandstones used in the church of San Mateo in Tarifa (Spain)*. Journal of Cultural Heritage 9 (66-76)
- Scheidegger A.E., 1960. *The physics of flow through porous media*. The Macmillan company, 1.vyd.
- Schön J.H., 2011. *Physical properties of rocks a workbook*. In: Cubitt J. (ed.), *Handbook of petroleum exploration and production* (8)
- Siegesmund S., Dürrast H., 2011. *Physical and Mechanical Properties of Rocks*. In: Siegesmund S., Snethlage R. (ed.), *Stone in architecture*, Springer-Verlag, 4. vyd.
- Sklenář J., 2005. *Historie a současnost podnikání na Kralovicku a Manětínsku*. Městské knihy, 1. vyd.
- Smith M.R., 1999. *Stone: building stone, rock fill and armourstone in construction*. Geological Society Engineering Geology Special Publication 16
- Tásler R., Skoček V., 1963. *Geologie a litologie manětínské pánve*. Sborník geologických věd, řada G (6)
- Tosaya C.A., 1982. *Acoustical properties of clay-bearing rocks*. PhD. Thesis, Stanford University
- Tomášek M., 2000. *Půdy České republiky*. ČGÚ, Praha, 67 str.
- Wagner R.H., 1977. *Comments on the Upper Westphalian and Stephanian flora of Czechoslovakia, with particular reference to their stratigraphic age*, Symposium on Carboniferous stratigraphy, Ústřední ústav geologický, 457 str.
- Walsh J.B., Brace W., 1966. *Cracks and pores in rocks*. Proceedings of the first Congress of the International Society of Rocks Mechanics (643-646)
- Weiss T., Siegesmund S., Kirchner D., Sippel J., 2004. *Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation*. Environmental Geology 46 (402-4013)
- Winkler E.M., 1994. *Stone in architecture. Properties and durability*. Springer Berlin
- Zimmerman R.W., Bodvarsson G., 1991. *A simple approximate solution for horizontal infiltration in a Brooks-Corey medium*. Transport of Porous Media 6 (195-205)