

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

Porozita a propustnost granitů

Diplomová práce

Petra Šafrová



Vedoucí diplomové práce: RNDr. Irena HANUSOVÁ, PhD.

Praha 2009

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že veškerá použitá literatura je řádně ocitována a zapsána v kapitole „přehled použité literatury“.

OBSAH:

SEZNAM OBRÁZKŮ	iv
SEZNAM TABULEK.....	v
SEZNAM ZKRATEK A MATEMATICKÝCH SYMBOLŮ.....	vi
PODĚKOVÁNÍ	x
ABSTRAKT.....	xi
SUMMARY.....	xii
1. ÚVOD.....	- 1 -
2. CÍLE PRÁCE.....	- 2 -
3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY VČETNĚ REŠERŠE PŘEDCHOZÍCH PRACÍ.....	- 3 -
3.1 Pórovitost versus porozita	- 3 -
3.2 Geologické aspekty porozity	- 5 -
3.3 Permeabilita.....	- 6 -
3.4 Definice užívané k charakterizaci hornin.....	- 7 -
3.5 Rovnice vzájemných závislostí.....	- 8 -
3.6 Metody měření porozity	- 8 -
3.6.1 Metoda impregnace vodou	- 8 -
3.6.2 Rtuťová porozimetrie	- 9 -
3.6.3 Fluorescenční impregnace	- 9 -
3.6.4 Elektronový mikroskop	- 10 -
3.6.5 Metoda ¹⁴ C-polymethylmetakrylát (PMMA).....	- 10 -
3.6.6 Laserová konfokální mikroskopie.....	- 11 -
3.6.7 Rentgenová tomografie.....	- 11 -
4. METODIKA VLASTNÍ PRÁCE.....	- 12 -
4.1 Elektronová skenovací mikroskopie (EDAX)	- 12 -
4.1.1 Příprava vzorků	- 12 -
4.1.2 Podmínky měření.....	- 13 -

4.2 UV mikroskopie	- 13 -
4.3 Rtuťová porozimetrie	- 14 -
4.3.1 Příprava vzorků	- 14 -
4.3.2 Princip rtuťové porozimetrie	- 14 -
4.3.3 Přístroje a měření	- 14 -
4.4 Plynopropustnost	- 15 -
4.4.1 Příprava vzorků	- 15 -
4.4.2 Princip plynopropustnosti	- 15 -
4.5 Měření pórovitosti dle ČSN 72 1143	- 17 -
4.5.1 Definice	- 17 -
4.5.2 Značky a jednotky	- 17 -
4.5.3 Přístroje a pomůcky	- 18 -
4.5.4 Příprava vzorků	- 18 -
4.5.5 Postup zkoušky	- 18 -
4.5.6 Vyjádření výsledků	- 18 -
4.6 Stanovení propustnosti zemin při konstantním spádu dle ČSN 72 1007	- 19 -
4.6.1 Termíny a definice	- 19 -
4.6.2 Postup zkoušky	- 19 -
4.6.3 Vyjádření výsledků	- 21 -
5. GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA TESTOVANÉHO GRANITU	- 22 -
6. VÝSLEDKY	- 23 -
6.1 Elektronová skenovací mikroskopie	- 23 -
6.2 UV mikroskopie	- 25 -
6.3 Rtuťová porozimetrie	- 33 -
6.4 Plynopropustnost	- 46 -
6.5 Měření pórovitosti dle ČSN 72 1143	- 47 -
6.6 Stanovení propustnosti zemin při konstantním spádu dle ČSN 72 1007	- 48 -
7. DISKUSE	- 49 -

8. ZÁVĚR	- 52 -
9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	- 53 -

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Model porozity pro granitoidní horniny (překresleno z Geraud et al., 1992).....	- 4 -
Obr. 2. Obrázek a) tortuozita, b) odpor zúžení (překresleno z Geraud et al., 1992).....	- 8 -
Obr. 3. Nákres sytící aparatury.....	- 13 -
Obr. 4. Sestava porozimetrů Pascal 140 + 240 fy Thermo Electron – Porotec.....	- 16 -
Obr. 5. Schéma laboratorního zařízení pro měření plynopropustnosti	- 17 -
Obr. 6. Celkové uspořádání měření	- 17 -
Obr. 7. Zařízení pro stanovení propustnosti zemin při konstantním spádu (převzato z ČSN 72 1007.....	- 21 -
Obr. 8. Obrázek místa v SEI – okraj (zvětšeno 40x).....	- 24 -
Obr. 9. Obrázek místa v BEI – okraj (zvětšeno 40x).....	- 24 -
Obr. 10. Obrázek téhož místa v rentgenové difrakční mapě uhlíku (zvětšeno 80x).....	- 24 -
Obr. 11. Obrázek místa v SEI (zvětšeno 80x).....	- 25 -
Obr. 12. Obrázek místa v BEI (zvětšeno 80x).....	- 25 -
Obr. 13. Obrázek stejného místa – rentgenová difrakční mapa uhlíku (zvětšeno 160x).....	- 25 -
Obr. 14. Obrázek stejného místa – rentgenová difrakční mapa železa (zvětšeno 160x).....	- 26 -
Obr. 15. Vzorek číslo 1 – je inertní vůči použitému UV záření.....	- 27 -
Obr. 16. Vzorek číslo 2 – je inertní vůči použitému UV záření.....	- 27 -
Obr. 17. Vzorek číslo 3 – je inertní vůči použitému UV záření.....	- 27 -
Obr. 18. Vzorek číslo 4 – je inertní vůči použitému UV záření.....	- 28 -
Obr. 19. Vzorek číslo 5 – je luminiscenční v použitém UV záření.....	- 28 -
Obr. 20. Vzorek číslo 6 – je inertní vůči použitému UV záření.....	- 28 -
Obr. 21. Vzorek číslo 7 – je luminiscenční v použitém UV záření.....	- 29 -
Obr. 22. Vzorek číslo 8 – je inertní vůči použitému UV záření.....	- 29 -
Obr. 23. Vzorek č. 5 – okrajová zóna vzorku (zvětšeno 10x)	- 29 -
Obr. 24. Vzorek č. 5 – okrajová zóna vzorku, (zvětšeno 10x)	- 30 -
Obr. 25. Vzorek č. 5 – téměř střed vzorku, vzdálenost od okraje vzorku je cca 0,8 cm (zvětšeno 5x).....	- 30 -
Obr. 26. Vzorek č. 5 – absolutní střed vzorku (zvětšeno 10x)	- 31 -
Obr. 27. Vzorek číslo 7 – viditelné přívodní cesty (modře fluoreskují) – zvětšeno	- 31 -
Obr. 28. Vzorek číslo 7 – postup impregnační látky směrem do středu – zvětšeno 200x	- 32 -
Obr. 29. Vzorek číslo 7 – postup impregnační látky dále směrem do středu – zvětšeno 200x.....	- 32 -
Obr. 30. Vzorek číslo 7 – zrno, na kterém je patrné, jak je obtékáno UV látkou – zvětšeno 200x	- 32 -
Obr. 31. Vzorek číslo 7 – periferní část vzorku – zvětšeno 200x	- 33 -
Obr. 32. Vzorek číslo 7 – přívodní cesta UV fluorescenční látky trhlinou – zvětšeno 200x.....	- 33 -
Obr. 33. Vzorek číslo 7 – zvětšení 400x.....	- 34 -
Obr. 34. Graf distribucí pórů ve vzorku 1a.....	- 36 -
Obr. 35. Graf distribucí pórů ve vzorku 1b.....	- 38 -
Obr. 36. Graf distribucí pórů ve vzorku 2a.....	- 40 -
Obr. 37. Graf distribucí pórů ve vzorku 2b.....	- 42 -
Obr. 38. Graf distribucí pórů ve vzorku 3a.....	- 44 -
Obr. 39. Graf distribucí pórů ve vzorku 3b.....	- 46 -

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Tabulka směsí impregnovaných do vzorků.....	- 14 -
Tab. 2. Opravný součinitel α pro některé teploty.....	- 22 -
Tab. 3. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 1a.....	- 34 -
Tab. 4. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 1a.....	- 35 -
Tab. 5. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 1b.....	- 36 -
Tab. 6. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 1b.....	- 37 -
Tab. 7. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 2a.....	- 38 -
Tab. 8. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 2a.....	- 39 -
Tab. 9. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 2b.....	- 40 -
Tab. 10. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 2b.....	- 41 -
Tab. 11. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 3a.....	- 42 -
Tab. 12. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 3a.....	- 43 -
Tab. 13. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 3b.....	- 44 -
Tab. 14. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 3b.....	- 45 -
Tab. 15. Tabulka shrnutí naměřených výsledků z Hg-porozimetrie.....	- 46 -
Tab. 16. Naměřené výsledky z plynopropustnosti (1. část).....	- 47 -
Tab. 17. Naměřené výsledky z plynopropustnosti (2. část).....	- 47 -
Tab. 18. Výpočty z hodnot naměřených dle ČSN 72 1143 (1. část).....	- 48 -
Tab. 19. Výpočty z hodnot naměřených dle ČSN 72 1143 (2. část).....	- 48 -
Tab. 20. Podmínky měření.....	- 49 -
Tab. 21. Hodnoty naměřené před zkouškou.....	- 49 -
Tab. 22. Hodnoty naměřené po zkoušce.....	- 49 -
Tab. 23. Porovnání výsledků jednotlivých hodnot pro meso, makro a hrubé póry.....	- 51 -

SEZNAM ZKRATEK A MATEMATICKÝCH SYMBOLŮ

Zkratka	Význam (číslo vzorce)	Jednotky
m	koeficient pórovitosti (1)	-
V_p	objem pórů (1)	m^3
V	celkový objem horniny (1)	m^3
k	Darcyho koeficient permeability (2)	mD
ΔP	tlakový gradient daný rozdílem vstupního a výstupního tlaku (2)	Pa
H	dynamická viskozita plynu (N_2) (2,3)	cP
L	tloušťka vzorku (2,3)	cm
A	plocha vzorku (2,3)	cm^2
Q	průtok (2,3)	cm^3/s
P_0	atmosférický tlak (3)	Pa
ΔP^2	tlakový gradient druhých mocnin vstupního a výstupního tlaku (3)	Pa
M_s	hmotnost pevné komponenty vzorku (4-16)	kg
V_s	objem pevné komponenty vzorku (4-16)	m^3
M_w	hmotnost pórové vody (4-16)	kg
V_w	objem pórové vody (4-16)	m^3
V_a	objem pórového vzduchu (4-16)	m^3
V_v	objem pórů a volných prostor (4-16)	m^3
M	hmotnost vzorku (4-16)	kg
V	objem vzorku (4-16)	m^3
w	vodní kapacita (4-16)	%
ϵ	porozita (4-16)	%
S_r	stupeň saturace (4-16)	%
ρ	přírodní hustota (4-16)	kg/m^3
ρ_d	suchá (zdánlivá) hustota (4-16)	kg/m^3
ρ_{sat}	hustota při saturaci vodou (4-16)	kg/m^3
ρ_s	hustota pevných látek skutečná (4-16)	kg/m^3
ρ_w	hustota vody (4-16)	kg/m^3
ϵ_t	celková porozita (17)	-
ϵ_f	efektivní průtoková porozita (17)	-
ϵ_d	difuzní porozita (17)	-
ϵ_r	zbytková porozita (17)	-
τ	tortuozita (18)	-
σ	konstriktivita (18)	-
D_p	difuzní koeficient v pórové vodě (18)	m^2/s
D_w	difuzní koeficient difuzního druhu ve volné vodě (18)	m^2/s
G	bezrozměrný geometrický faktor (18)	-
g	zrychlení (19,20)	m/s^2

Zkratka	Význam (číslo vzorce)	Jednotky
ρ	hustota rtuti (19,20)	g/cm^3
h	výška sloupce rtuti v póru (19,20)	m
r	poloměr póru kruhového průřezu (19,20)	m
γ	povrchové napětí rtuti v póru (19,20)	N/m
θ	úhel smáčení stěn pórů rtuti (19,20)	°
P	celkový tlak, pod nímž rtuť vniká do pórů (20,21)	N/m^2
σ	povrchové napětí rtuti v póru (21)	N/m
φ	stykový úhel (21)	°
r	poloměr póru kruhového průřezu (21)	m
k	koeficient propustnosti (22)	mD
Q	průtok plynu vzorkem (22)	cm^3/s
η	dynamická viskozita plynu (pro $\text{N}_2 = 0,0166 \text{ cP}$) (22)	cP
p_1	vstupní tlak (22)	kPa
p_2	výstupní tlak ($p_2 \approx p_{\text{atm}}$) (22)	kPa
l	výška vzorku (22)	cm
S	plocha vzorku (22)	cm^2
ρ_b	objemová hmotnost (23-28)	kg/m^3
ρ_r	měrná hmotnost (23-28)	kg/m^3
ρ_{rh}	hustota vody (23-28)	kg/m^3
p_o	otevřená pórovitost (23-28)	%
p	celková pórovitost (23-28)	%
m_d	hmotnost vysušeného zkušební tělesa (23-28)	g
m_h	hmotnost zkušební tělesa ponořeného do vody (23-28)	g
m_s	hmotnost nasyceného zkušební tělesa (23-28)	g
m_e	hmotnost rozetřeného a vysušeného zkušební tělesa (23-28)	g
m_1	hm.pyknometru naplněného vodou a rozetřeným zkušeb. vz. (23-28)	g
m_2	hmotnost pyknometru naplněného vodou (23-28)	g
V_b	zdánlivý objem zkušební tělesa (23-28)	ml
V_o	objem otevřených pórů ve zkušebním tělese (23-28)	ml
V_s	objem tekutiny nahrazené hmotností m_e (23-28)	ml
Q	průtok (31,32)	cm^3/s
v	průtoková rychlost	cm/s
i	hydraulický sklon	-
k	součinitel (koeficient) filtrace (32)	m/s

Zkratka	Význam (číslo vzorce)	Jednotky
α	opravný součinitel získaný z rovnice či z tabulky (29,30)	-
T	teplota vody v průběhu zkoušky (30)	°C
k_r	součinitel filtrace při teplotě zkoušky (29)	m/s
k_{10}	součinitel filtrace přepočtený na 10 °C (29)	m/s
ΔV	množství vody, která protekla ve vybraném časovém úseku (31)	m ³
Δt	odpovídající časový interval (31)	s
l	vzdál.mezi body, ke kterým jsou připojeny dvě piezom. trubice (32)	m
A	průřezová plocha zkušebního vzorku (32)	m ²
h	rozdíl tlakových výšek hladin piezometrů (32)	m
V_c	celkový objem pórů podle Hg porozimetrie (Tab. 15.)	mm ³ /g
S_r	celkový povrch pórů podle Hg porozimetrie (Tab. 15.)	m ² /g
r	střední poloměr pórů (Tab. 15.)	nm
d_{Hg}	zdánlivá rtuťová hustota (Tab. 15.)	g/cm ³
Por	porozita (Tab. 15.)	%
S	plocha vzorku (Tab. 16.)	cm ²
h	výška vzorku (Tab. 16.)	cm
p_1	vstupní tlak (Tab. 16.)	kPa
p_2	vstupní tlak (Tab. 16.)	kPa
p_{in}	průměrný vstupní tlak (Tab. 16.)	atm
p_{out}	výstupní tlak (Tab. 16.)	torr
t	doba měření (Tab. 16.)	min
m^{pr}	hmotnost prázdné nádoby před měřením (Tab. 17.)	g
$m^{plná}$	hmotnost nádoby po měření (Tab. 17.)	g
m_{H_2O}	hmotnost vody vytlačené během měření (Tab. 17.)	g
Q	průtok (Tab. 17.)	cm ³ /s
k	koeficient filtrace (Tab. 17.)	mD
průměr	průměr koeficientů filtrace (Tab. 17.)	μD
AV ČR	Akademie věd ČR	
¹⁴ C- PMMA	polymethylmetakrylátová pryskyřice označená ¹⁴ C	
³ H- PMMA	polymethylmetakrylátová pryskyřice označená ³ H	
ČGÚ	Český geologický ústav	
EDAX	Elektronový skenovací mikroskop	
HRCT	Vysokorozlišovací rentgenová počítačová tomografie	

Zkratka	Význam (číslo vzorce)	Jednotky
ISRM	Mezinárodní asociace pro mechaniku hornin	
IUPAC	Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou chemii	
KBS-3	koncept ukládání vysoce radioakt. odpadu vyvinutá ve Švédsku	
M541	stopovací látka	
M704	stopovací látka	
MMA	methylmetakrylátová pryskyřice	
PMMA	polymethylmetakrylátová pryskyřice	
SEI	mapování v sekundárních elektronech	
BEI	mapování ve zpětně odražených elektronech	
SEM	skenovací elektronový mikroskop	
ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
ÚSMH	Ústav struktury a mechaniky hornin (AV ČR)	

PODĚKOVÁNÍ

Velmi ráda bych poděkovala firmě ISATech s.r.o., která byla sponzorem výzkumné části předkládané práce, své školitelce RNDr. Ireně Hanusové, PhD. a konzultantovi RNDr. Radku Hanusovi za čas, který mi věnovali a společně provedenou práci. Dále pak Mgr. Lucii Doležalové, RNDr. Dobroslavu Matějkovi, CSc. a samozřejmě své rodině, manželovi i dceři, kteří mě morálně podporovali, jak v dobách celého studia, tak v době výzkumu a psaní této práce.

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá problematikou porozity a propustnosti granitu. Seznamuje s tím, co to porozita je, a jakými metodami se dá zjistit její velikost, ale také jak porozita v horninách vypadá. Na vzorcích granitu z Panských Dubének byla provedena měření pomocí Hg-porozimetrie, elektronového skenovacího mikroskopu, UV mikroskopu, plynopropustnosti a měření otevřené a celkové porozity dle ČSN 72 1143 a propustnosti zemin dle ČSN 72 1007. Porovnáním výsledků z jednotlivých metod bylo zjištěno, že pro získání informací o otevřené porozitě a její velikosti jsou vhodné metody Hg-porozimetrie a měření dle ČSN 72 1143. Pro získání informací o tom jak porozita v horninách vypadá, jaký tvar mají mikrotrhliny a póry a kudy dochází k transportu látek v hornině, jsou velmi vhodné metody UV mikroskopie a elektronová skenovací mikroskopie ve spojení s impregnací horniny pryskyřicí.

SUMMARY

This work is engaged in the problem of porosity and permeability of granite. It introduces what porosity actually is, which methods it can be measured by and what porosity looks like in rocks. Measurements were taken on samples of granite from Panské Dubénky by Hg-porosimetry, electron scanning microscope, UV microscope, gas permeability, measuring of open and total porosity according to CSN 72 1143 and permeability of soil according to CSN 72 1007. By comparing results of each method we learned, that to acquire information about open porosity and its size are suitable methods Hg-porosimetry and measuring according to CSN 72 1143. For acquiring information about how porosity in rocks looks like, what shape are the micro-fissures and pores or through where the substances are transported in rocks, are very suitable methods: UV microscopy and electron scanning microscopy in connection with impregnation of rocks by resin.

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou porozity granitu a s tím spojené propustnosti. Vzorky horniny, na kterých byly prováděny všechny experimenty a měření pochází z lomu Panské Dubénky. Jde o dvojslídny eisgarnský granit se shodným poměrem plagioklasu a draselného živce.

O pórovitosti a propustnosti granitu se uvažuje zejména ve spojitosti s problematikou hlubinných úložišť radioaktivního odpadu ve světě. I naše republika neustále řeší problém, kde by bylo nejlepší vystavět úložiště. Všechny dosud vytipované lokality jsou vázány na granitoidní horniny a tak je otázka pórovitosti a propustnosti granitu velmi důležitá. Radioaktivní odpad by měl být v hlubinném úložišti co nejvíce izolován od všech vnějších vlivů. K tomuto účelu slouží bentonitový buffer, který by měl sorbovat všechny nežádoucí látky, které by mohly uniknout z kontejneru, ale také ty, které by mohly přijít zvenčí a přispět ke korozi kontejneru. Tato fluida by se sem mohla dostat právě skrz porézni prostor granitu a mohla by výrazně ovlivnit složení bentonitového bufferu. Tento proces by pak měl negativní vliv na jeho životnost a účinnost.

Projevy křehké deformace (pukliny) v rámci celého úložiště lze následnými technickými pracemi sanovat (injektovat), toho jsme však jen velmi obtížně schopni u pórového prostoru, který by se tak u vysoce porézniho granitu mohl stát velmi nebezpečným z hlediska propustnosti polutantů.

Z tohoto důvodu je tedy dobré porovnat jednotlivé metody, které se používají pro měření pórovitosti a propustnosti hornin či materiálů. U granitu se všeobecně předpokládá velmi nízká propustnost a velmi malý pórový prostor v porovnání například s pískovci.

Pro měření pórovitosti a propustnosti existuje několik metod.

Těmi jsou:

1. Metoda impregnace vodou
2. Rtuťová porozimetrie
3. Měření plynopropustnosti
4. Fluorescenční impregnace
5. Elektronový mikroskop
6. Metoda ^{14}C -polymethylmetakrylát (PMMA)
7. Laserová konfokální mikroskopie
8. Rentgenová tomografie
9. Metoda BET

Všemi těmito metodami se tato práce zabývá, měření však proběhlo pouze u části z nich, neboť poslední tři výše jmenované metody jsou příliš finančně náročné nebo nedostupné. Podle Montoto a Mateos (2006) je nejlepší metodou pro získání informací o geometrii, propojenosti, tortuozitě a eventuelním průtoku fluid laserová konfokální mikroskopie. Ta bohužel z důvodů přílišné nákladnosti nemohla být použita, avšak byla nahrazena UV mikroskopií a EDAXem.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem předkládané práce je otestovat maximum možných použitelných metod pro stanovení pórového prostoru v granitoidních horninách a porovnat jejich výsledky. Dále pak vyhodnotit, která z těchto metod či spojení kterých dvou metod je pro granitoidní horniny nejvhodnější, nejpřesnější a nejlepší.

Nejvyšším cílem je nalézt nové vhodné metody detekce komunikujícího pórového prostoru, které by byly nenákladné, nenáročné, netoxické a neradioaktivní a daly se případně použít i přímo v terénu, čímž by se zamezilo vzniku falešné porozity vzniklé při vrtání či řezání vzorků.

Tato data by mohla být také následně využita nejen při výstavbě hlubinného úložiště radioaktivního odpadu (podle konceptu KBS-3, www.rawra.cz), ale i při dalších náročných podzemních stavbách (tunely, kolektory, podzemní sklady a zásobníky, metro, dráha atd.).

3. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY VČETNĚ REŠERŠE PŘEDCHOZÍCH PRACÍ

3.1 Pórovitost versus porozita

Ve starších českých publikacích se používá výhradně termínu pórovitost. V publikacích novějších jsou používány oba termíny v závislosti na autorovi a především škole jakou reprezentuje. Termín porozita byl přejet z anglického slova „porosity“.

V předkládané práci budu používat oba termíny pórovitost i porozita, neboť dle mého názoru vyjadřují oba termíny totéž.

Pórovitost je definována jako přítomnost jakýchkoliv pórů a dutin v horninách, či jako podíl objemu pórů V_p na celkovém objemu horniny V . Výsledkem podílu těchto dvou veličin je koeficient pórovitosti m (1) tato veličina je bezrozměrná (Petránek, 1993).

$$m = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

m – koeficient pórovitosti

V_p – objem pórů $[\text{m}^3]$

V – celkový objem horniny $[\text{m}^3]$

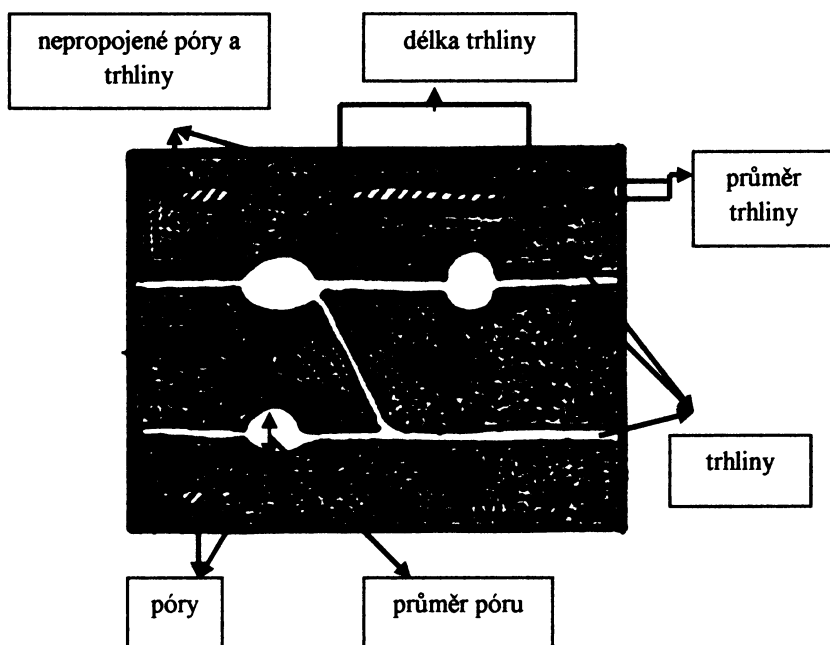
Pórovitost je dělena do několika kategorií dle různých úhlů pohledu. Podle původu na pórovitost primární (ta která vznikla v době krystalizace horniny) a sekundární (neboli druhotná, která vznikla vnějšími činiteli později). Dle funkce na celkovou (všechny póry bez ohledu na jejich velikost, tvar či vzájemné propojení), otevřenou (vzájemně komunikující póry) a uzavřenou (póry, které nekomunikují se svým okolím). Dále jsou také různé kategorie pórovitosti - efektivní (podle tvaru se dělí na průlinovou, puklinovou, krasovou) a různé druhy smíšených pórovitostí (Petránek, 1993; Svoboda et al., 1983).

Další dělení probíhá také dle velikosti jednotlivých pórů na makro, meso a mikropóry, hranice mezi jednotlivými velikostmi jsou stanoveny Mezinárodní unií pro čistou a aplikovanou chemii (IUPAC) na mikro < 2 nm, meso jsou v rozmezí 2 - 50 nm a makro jsou > 50 nm v průměru (Everett, 1972).

Geraud et al. navrhnul roku 1992 model porozity granitoidních hornin. Dle tohoto modelu se porozita skládá ze dvou typů mikrostruktur, kterými jsou póry a štěrbiny. Zatímco termín štěrbiny (cracks) je používán pro dlouhé, úzké dutiny, které mají malý průměr a jejich délka je minimálně 10x větší než jejich šířka (mají malý poměr min/max rozměru), je termín póry používán pro dutiny, které mají geometrické proporce ve všech směrech zhruba stejné (mají velký poměr min/max rozměru) viz Obr. 1.

Porozita hornin může být také dělena na další typy, které nebyly výše zmíněny a těmi jsou:

- 1) Transgranulární póry – póry či mikrotrhliny, které přetínají minerální zrna (Siitari-Kauppi, 2002).
- 2) Intergranulární póry – nacházejí se na hranicích zrn a propojují pórové sítě (Siitari-Kauppi, 2002).
- 3) Intragranulární póry – póry, které se nacházejí uvnitř minerálních zrn – jsou buď propojené s trans a intergranulárními póry nebo jsou izolovány, v tom případě jsou součástí reziduální porozity (Siitari-Kauppi, 2002).



Obr. 1. Model porozity pro granitoidní horniny (překresleno z Geraud et al., 1992).

Norton a Knapp (1977) prezentovali pórový model široce užívaný při studiu transportu v krystalických horninách. Celková porozita ε_t je prezentována takto (17):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_f + \varepsilon_d + \varepsilon_r \quad (17)$$

ε_f – efektivní průtoková porozita, která reprezentuje póry, u kterých je dominantním způsobem transportu vodních roztoků průtok; tj. dominuje advekce s hydrodynamickou disperzí.

ε_d – difuzní porozita, která reprezentuje póry, u kterých dominuje difuze vodních fází.

ε_r – zbytková porozita (též zvaná reziduální), která reprezentuje póry, které nejsou propojeny s póry skupin ε_f a ε_d . Difuzní porozita je frakce celkové porozity. D_p (18) udává tok difuze daného prvku v omezeném prostoru pórů.

Tortuozita τ , a konstiktivita σ , jsou bezrozměrné pórové geometrické faktory, které charakterizují difuzní porozitu ε_d (Obr. 2.). Skutečná délka tortuozní kapiláry vydělená skutečnou délkou trubice ve které měříme, udává faktor tortuozity τ , jeho hodnota bude vždy menší než 1 (Katsube a Kamineni, 1983). Tortuozita charakterizuje zakřivení tvarů pórů a trhlín v kontrastu k přímým liniím difuzních cest. Tortuozita prodlužuje difuzní cesty. Odpor zúžení střídavě charakterizuje velikosti pórů nebo otevřené trhlíny v průběhu difuzního toku, pokud odpor zúžení klesá, jsou difuzní profily sníženy. Neboť fyzikální interakce, které redukují molekulární mobilitu v pórech horniny, jsou všude přítomné, nemohou být tortuozita a odpor zúžení (čistě geometrické parametry) obvykle změřeny úplně přesně. Oba tyto parametry jsou spojeny v jeden empirický parametr zvaný geometrický faktor ($G = \sigma/\tau^2$) za účelem vztázení pórové geometrie k difuzivitě (Brakel van a Heertjes, 1974; Neretnieks, 1980) (18):

$$D_p = \frac{\sigma}{\tau^2} \cdot D_w = GD_w \quad (18) \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

D_w – difuzní koeficient difuzního druhu ve volné vodě [m²/s]

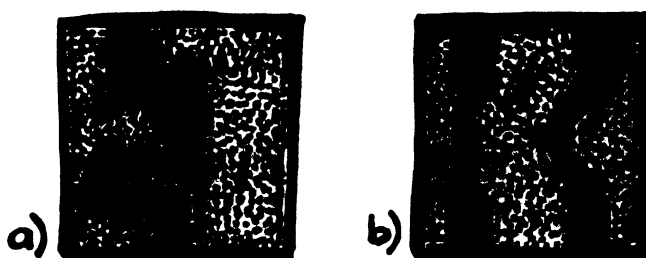
D_p – difuzní koeficient v pórové vodě [m²/s]

G – bezrozměrný geometrický faktor

τ – tortuozita

σ – konstrikivita

Hodnota geometrického faktoru se pohybuje mezi 0,001 a 1. Empirický parametr zahrnuje všechny geometrické a fyzikální faktory, které snižují molekulární mobilitu v pórovém prostoru v porovnání s volnou vodou.



Obr. 2. Obrázek a) tortuozita, b) odpor zúžení (překresleno z Geraud et al., 1992).

3.2 Geologické aspekty porozity

Porozita krystalických hornin může být rozdělena na dva základní typy, a to primární, tedy získanou během magmatické krystalizace, a sekundární, tedy získanou po krystalizaci během alterace hornin.

Horninotvorné minerály se s časem strukturně a chemicky mění a to díky interakci voda hornina, následnému zvětrávání a alteraci. Jestliže hornina podstoupí deformaci následkem násobného stresu, může se deformovat buď křehkým způsobem, tedy lámáním nebo duktilním stříhem, tedy krystalickými plastickými procesy. Nízká teplota a vyšší tlaky mají za následek křehkou deformaci, zatímco vyšší teplota a nižší tlaky mají za následek duktilní deformaci. Porozita čerstvých, tedy nealterovaných granitů a rul se pohybuje mezi 0,2 - 1 %, po alteraci či zvětrávání se pohybuje mezi hodnotami 1 - X % (Norton a Knapp, 1977; Skagius a Neretnieks, 1986). Stává se, že alterace vede i k poklesu porozity (Katsube a Kamineni, 1983). Existuje i názor, že porozita nezvětralých hornin je dána pouze trhlinami a póry se objevují až spolu s alterací a zvětráváním. Křemen je vůči zvětrávání rezistentní, biotit se přeměňuje na chlority a časem také na jílové minerály, draselný živec a plagioklas se mění procesem zvaným sericitizace na jílové minerály, které mají velikost zrn pod 2 μm a tato zvětralina má porozitu mezi < 1 % až desítkami % (Siitari-Kauppi, 2002).

U krystalických hornin má zásadní vliv na charakteristické vlastnosti pórového prostoru kromě výše uvedeného také otevřenost, tvar a délka pórů, dále kombinace a průběh procesů během krystalizační posloupnosti, jako jsou křehká či pružná deformace struktury, koroze, rozpouštění, alterace minerálů a vznik sekundárních minerálů. Otevřenost pórů je závislá na tlaku. V běžných minerálních strukturách krystalických hornin zůstávají póry většinou otevřené (Siitari-Kauppi, 2002).

Přítomnost pórů v horninovém prostředí má za následek pokles její pevnosti a nárůst deformovatelnosti. Dokonce i malé množství pórů může vyvolat patrný mechanický efekt (Jamtveit a Yardley, 1997). Vyvělé horniny jsou typicky málo porézní a málo propustné. Vyšší porozity mohou

dosáhnout například procesem zvětrávání. Opakem jsou pískovce a karbonátové horniny, které mají významně větší porozitu než vyvřelé horniny a mají také jinou mechanickou charakteristiku (Siitari-Kauppi, 2002).

3.3 Permeabilita

Permeabilita neboli propustnost hornin je schopnost fluid (kapalina, plyn) procházet skrz pórový systém materiálu, podle klesajícího koncentračního gradientu nebo tlakového gradientu v případě plynové propustnosti (Medek et al., 2006).

Modelový systém byl konstruován pro laminární proudění, které je složené ze svazku přímých kapilár, které nemusí být paralelní a v ideálním případě mají stejný průměr. Podle definice jsou jejich stěny hladké, dovolující vznik pokračujícího laminárního proudění. Výpočet permeability mechanismem laminárního proudění je založen na Darcyho vztahu (2), který v základní formě vypadá takto (Medek et al., 2006):

$$k = \eta \cdot \frac{L}{A} \cdot \frac{Q}{\Delta P} \quad (2) \quad [\text{mD}]$$

k – Darcyho koeficient permeability [mD]

ΔP – tlakový gradient daný rozdílem vstupního a výstupního tlaku [Pa]

η – dynamická viskozita plynu (N₂) [cP]

L – tloušťka vzorku [cm]

A – plocha vzorku [cm²]

Q – průtok [cm³/s]

Upravená forma Darcyho vztahu vypadá takto (3):

$$k = \eta \cdot \frac{2P_0L}{A} \cdot \frac{Q}{\Delta P^2} \quad (3) \quad [\text{mD}]$$

ΔP^2 – tlakový gradient druhých mocnin vstupního a výstupního tlaku [Pa]

P_0 – atmosférický tlak [Pa]

η – dynamická viskozita plynu (N₂) [cP]

L – tloušťka vzorku [cm]

A – plocha vzorku [cm²]

Q – průtok [cm³/s]

(jednotka propustnosti 1 Darcey je definována jako propuštění 1 cm³ plynu o viskozitě 1 cP při gradientu 1 atmosféra přes porézní materiál o ploše 1 cm² a délce 1 cm)

Systém dutin ve skutečném porézním materiálu může být všesměrný, dutiny pak nejsou tvarově omezeny a mohou mít různé průměry a délky. Z makroskopického hlediska jsou náhodně propojeny a jejich vnitřní povrch se skládá z primárních částic formujících pevnou stavbu porézního tělesa. Reálný porézní materiál má nepřímé dutiny, jejichž vzájemné propojení tvoří prostorově nedefinovatelný porézní systém. To je důvod, proč tok plynu uvnitř porézního systému, nemůže být brán jako laminární a jeho charakter se blíží spíše turbulentnímu typu proudění (Medek et al., 2006).

3.4 Definice užívané k charakterizaci hornin

Mezinárodní asociace pro mechaniku zemin (hornin) roku 1979 doporučila používání těchto parametrů a termínů pro stanovení vodní kapacity, porozity a hustoty (specifické hmotnosti) horninových vzorků (Siitari-Kauppi, 2002).

Zrno je pevná komponenta vzorku o hmotnosti M_s a objemu V_s

Hmotnost pórové vody je M_w a její objem V_w

Pórovému vzduchu byla přidělena nulová hmotnost a objem V_a

Póry a volné prostory mají objem (4) $V_v = V_w + V_a$ (4)

Hmotnost vzorku je (5) $M = M_s + M_w$ (5)

Objem vzorku je (6) $V = V_s + V_v$ (6)

Hustota vody ρ_w

Vodní kapacita (7)

$$w = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 \quad (7) \quad [\%]$$

Porozita (8)

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \cdot 100 \quad (8) \quad [\%]$$

Stupeň saturace (9)

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (9) \quad [\%]$$

Přírodní hustota (10)

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V} \quad (10) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Suchá (zdánlivá) hustota (11)

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_s} \quad (11) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Hustota při saturaci vodou (12)

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_v \cdot w}{V} \quad (12) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Hustota pevných látek skutečná (13)

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (13) \quad [\text{kg/m}^3]$$

3.5 Rovnice vzájemných závislostí

Výše uvedené fyzikální vlastnosti jsou vzájemně provázány, a tak pokud jedna z nich není známa, může být pomocí ostatních známých hodnot dopočítána. Níže sestavené rovnice (14, 15, 16) mohou být použity k výpočtu vodní kapacity, porozity a suché hustoty.

$$S_r = \frac{100 \cdot w \cdot \rho_d}{\varepsilon \cdot \rho_w} \quad (14) \quad [\%]$$

$$\rho = \frac{1 + w}{100} \cdot \rho_d \quad (15) \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho_s = \frac{100 \cdot \rho_d}{100 - \varepsilon} \quad (16) \quad [\text{kg/m}^3]$$

3.6 Metody měření porozity

Porozita se měří několika konvenčními metodami, které jsou běžně uznávané, mají však všechny jednu nevýhodu a to, že se nedají aplikovat v terénu. Buď je metoda toxická (Hg-porozimetrie) nebo radioaktivní (^{14}C -PMMA) – tato metoda je používána in-situ, avšak pouze v podzemní laboratoři Grimsel) nebo existují jiné příčiny, proč ji nelze využít přímo v terénu. Následuje tedy popis jednotlivých metod:

3.6.1 Metoda impregnace vodou

Voda je přírodní substance, která se v krystalických horninách běžně vyskytuje a to v několika formách: juvenilní, vázaná v krystalické mřížce a stagnující v otevřeném pórovém prostoru. Saturace vodou je jedna ze základních metod pro stanovení porozity. Její pomocí lze změřit propojenou porozitu horniny vyjma porozity reziduální.

Velikost jedné molekuly vody je 0,193 nm, viskozita je 0,0085 P při 25 °C (Leonard, 1978). Z důvodu asymetrické distribuce náboje mají molekuly vody dipólový moment, který je 1,68 D. Molekuly mají iontový charakter a jsou na povrch pevných fází v hornině vázány v několika vrstvách. Následkem toho je viskozita a její vnitřní tření v okolí minerálních zrn podstatně větší, než je tomu ve volném prostoru. Na tyto změny má vliv velikost otvorů pórů, větší vliv však mají elektrostatické síly (Siitari-Kauppi, 2002).

Metodika přípravy vzorku dle Mezinárodní asociace pro mechaniku zemin (hornin) je následující (Siitari-Kauppi, 2002):

- vzorek by měl být sušen v peci po dobu nejméně 24 hodin při teplotě 105 °C ± 3 °C
- během chladnutí by měl být vzorek uchovávan v exsikátoru
- jeho rozměry jsou měřeny kalibrovaným posuvným měřítkem
- po vychladnutí se vzorek ponoří do vody a pod vakuem je sycen minimálně 1h
- před zvážení je nutné vyjmout vzorek z vakuové komory a otřít jej mokrou tkaninou, tím získáme hmotnost vzorku se suchým povrchem.
- poté je nutné vzorek opětovně vysušit při teplotě 105 °C a znovu zvážít, tato hodnota pak vyjadřuje hmotnost suchého vzorku.

3.6.2 Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie se využívá ke stanovení fyzikálních vlastností, jako jsou propojená porozita, distribuce otevřených pórů a také velikost specifického povrchu. Tato metoda je obecně považována za nejlepší možnou pro rutinní stanovení velikosti pórů u makropórů a horního průměru mesopórů. Princip metody je založen na úhlu kontaktu rtuti s pevnou látkou, který je $141,3^\circ$. Rtuť vnikne do horniny vlivem vnějšího tlaku. Metoda v podstatě spočívá v měření rozsahu infiltrace rtuti do materiálu jako funkce použitého hydrostatického tlaku. Atomární Hg má velikost okolo 2 nm (průměr). Kompaktní vzorky hornin s vysokou hustotou nemusejí dávat realistické informace o pórovém systému, k tomu přispívá i fakt, že teoretický pórový model užívaný k interpretaci výsledků předpokládá, že póry jsou cylindrické, což nemusí být vždycky pravda (Siitari-Kauppi, 2002).

Vztah mezi poloměrem pórů (r), které jsou intrudovány a intruzivním tlakem (P_{Hg}) je dán Washburnovou rovnicí, který ji sestavil již v roce 1921 takto (19) :

$$g \cdot \rho \cdot h \cdot \pi \cdot r^2 = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \theta \quad (19)$$

g – zrychlení	[m/s ²]
ρ – hustota rtuti	[g/cm ³]
h – výška sloupce rtuti v póru	[m]
r – poloměr póru kruhového průřezu	[m]
γ – povrchové napětí rtuti v póru	[N/m]
θ – úhel smáčení stěn pórů rtutí	[°]

Tato rovnice se dá přepsat do tvaru (20):

$$g \cdot \rho \cdot h = P = -\frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (20)$$

P – celkový tlak, pod nímž rtuť vniká do pórů	[N/m ²]
g – zrychlení	[m/s ²]
ρ – hustota rtuti	[g/cm ³]
h – výška sloupce rtuti v póru	[m]
r – poloměr póru kruhového průřezu	[m]
γ – povrchové napětí rtuti v póru	[N/m]
θ – úhel smáčení stěn pórů rtutí	[°]

(http://www.vscht.cz/kat/download/lab09_porozimetrie.pdf)

Nově byla vyvinuta metoda založená na rentgenové počítačové tomografii, která je použita před i po intruzi rtutí. Kombinace těchto dvou měření může dát 3D obraz distribuce porozity spolu s informacemi o velikosti pórů (Klobes et al., 1997).

3.6.3 Fluorescenční impregnace

K zjištění propojené porozity může být použita impregnace speciální látkou, která emituje po ozáření

specifickým druhem světla charakteristickou luminiscenci. Tyto látky obsahují organické molekuly o molekulární hmotnosti mezi 500 - 700 g/mol. Detekce probíhá pomocí mikroskopu (Siitari-Kauppi, 2002).

3.6.4 Elektronový mikroskop

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) poskytuje možnost přímého pozorování pórového prostoru. Mikroskopický výzkum pórů poskytuje informaci o celkové porozitě, ne tedy pouze o průtokové či difuzní porozitě, ale také o porozitě reziduální. Mikroskopické techniky používané ke zjištění objemové kapacity minerálních zrn neposkytují dostatečně přesné odhady objemové pórové kapacity. Nicméně mikroskop může poskytnout užitečné doplňkové informace o tvaru a velikosti pórů. SEM je obvykle používán ve spojení s dalšími metodami, jako např. Hg-porozimetrie nebo metoda impregnace SEM kontrastními látkami (Geraud et al., 1992; Montoto et al., 1999) a ve spojení s mnoha PMMA aplikacemi.

3.6.5 Metoda ^{14}C -polymethylmetakrylát (PMMA)

Tato metoda umožňuje získat data o propojené porozitě v hornině centimetrových rozměrů a 2D obrázky distribuce porozity. V kombinaci s mineralogicko-petrografickou charakteristikou horniny poskytuje porozitní profil horniny.

- vzorek horniny (úměrný velikosti skeneru) je před impregnací vysušen při teplotě 110 °C
- po vychladnutí je vzorek impregnován ve vakuu impregnační látkou polymethylmetakrylát obohacenou o ^3H nebo ^{14}C
- polymerizace je prováděna ozářením ^{60}Co (maximální dávka 50 kGy) nebo zahřátím
- vzorky jsou v závěru experimentu vyhodnocovány pomocí audioradiografie (expozice na film), takto získaný film je skenován a vyhodnocován pomocí softwaru (Siitari-Kauppi, 2002).

Nosič PMMA, má malou molekulární váhu a malou viskozitu.

U málo porézních hornin poskytuje audioradiografie prostorovou distribuci porozity oproti vodní gravimetrii, která udává jen celkovou hodnotu objemu porozity. Celková porozita je spočítána za použití 2D autoradiografu z povrchu řezu. Tato hodnota může být porovnána s hodnotou získanou fyzikálním měřením porozity. Předpoklady pro použití této metody a spočítání lokální porozity jsou: znalost lokální objemové hustoty, přítomnost pouze dvou fází (pevné minerální a PMMA), všechny póry v měřené oblasti by měly být v limitu rozlišení autoradiografu, který je u hornin impregnovaných ^{14}C -PMMA 20 μm a u hornin impregnovaných ^3H -PMMA 10 μm (Siitari-Kauppi, 2002).

Získaná vizualizace prostorové porozity může být použita při vývoji modelovací aproximace k popisu porozitních heterogenit a matrixové difuze, k analýze textury a anizotropních charakteristik a ověření migračních experimentů v laboratorním měřítku nebo in situ. PMMA metoda je často kombinována s dalšími metodami, které slouží k charakterizaci horninové matrix jako je impregnace vodou a rtuťová porozimetrie (Siitari-Kauppi, 2002).

Tato metoda umožňuje získat data o celkové a lokální porozitě, dále porozitní histogramy a v neposlední řadě též porozitní profily (Siitari-Kauppi, 2002).

Vlastnosti metylmetakrylátové pryskyřice

Polymethylmetakrylát byl vybrán pro tuto metodu na základě několika kritérií: byla požadována látka s malou viskozitou za běžných teplot, s bodem varu, který není příliš nízký a měla být vhodná pro polymerizaci gama radiací. Dále látka (polymer) měla být dostatečně mechanicky odolná, aby vydržela přípravu vzorků řezáním diamantovou pilou. Volba tedy padla na molekulu MMA; $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CO}_2\text{CH}_3$, což je monomer s velmi redukovanou dynamikou viskozity (0,00584 Pas) při 20 °C (Daniels a Alberty,

1967), zatímco viskozita vody je při 25 °C 0,00895 Pas (Leonard, 1978). Molekula MMA je velmi malá organická molekula o molekulové hmotnosti 100,1 g/mol, bod varu 101 °C a jeho hustota je 0,942 g/cm³. Molekula MMA je částečně hydrofobní, ale má také díky karbonylové skupině hydrofilní stránku, která vede k omezené mísitelnosti s vodou: 1,6 % MMA ve vodě a 1,15 % vody v MMA. Srovnání molekuly vody a molekuly MMA: molekulový dipólový moment je 1,7 D pro MMA a 1,9 D pro vodu. Molekula MMA je asymetrická a má ve skutečnosti šířku přibližně 0,4 nm a na délku přibližně 1 nm, zatímco průměr molekuly vody je 0,193 nm. Vysoký permanentní dipólový moment karbonylové skupiny může vést k interakci mezi MMA a negativně nabitým povrchem silikátů. Methylmetakrylátová kapalina může být popsána jako dipolární kapalina bez donorů vodíkových vazeb. Přilnavost je v tomto druhu organické kapaliny slabá díky disperzi, indukovaným silám a nedostatku vodíkových vazeb. Molekula MMA je náchylná ke spontánní polymeraci. K prevenci tohoto procesu jsou komerčně používány inaktivní MMA i ³H či ¹⁴C označený MMA stabilizovaný pomocí 100 ppm hydrochinonu (Siitari-Kauppi, 2002).

3.6.6 Laserová konfokální mikroskopie

Zásadním rozdílem mezi laserovým konfokálním mikroskopem a běžnými světelnými mikroskopy je jejich zdroj světla. Konfokální laserová mikroskopie používá jako světelný zdroj laserový paprsek o vlnové délce okolo 400 nm, kdežto běžné světelné mikroskopy používají světlo s širokým rozpětím vlnových délek. Laserové záření je zde použito jako bodový světelný zdroj, což umožňuje dosáhnout mimořádně ostrého a vysoce kontrastního obrazu (Montoto a Mateos, 2006; Onishi a Shimizu, 2005).

Hlavní a zásadní výhoda konfokální mikroskopie je možnost prostorové rekonstrukce mikroskopických objektů, která se vytvoří z několika desítek až stovek optických řezů jedním objektem postupným snímáním při plynule se měnící hloubce zaostření. Confocal = „mající společné ohnisko“; tímto termínem se označuje optické uspořádání, ve kterém jsou objektiv i kondenzor zaostřeny na stejný bod. Této významné vlastnosti lze využít zejména při sledování povrchových vlastností materiálu, jako jsou morfologie povrchu, povrchové defekty, stopy opotřebení atd. 3D zobrazení získáme skládáním mnohonásobně zobrazených ploch získaných z rastrovacích komponentů jejich výšek po pravidelných submikronových krocích (Montoto a Mateos, 2006; Onishi a Shimizu, 2005).

Použití konfokální laserové mikroskopie umožňuje vizualizaci pórové struktury, pokud je vzorek impregnován fluorescentní pryskyřicí. Použití této technologie umožňuje vizualizaci sítě puklin ve dvou i tří dimensionální podobě. Je také možné odvodit sítě mikrotrhlin a jejich propojení a geometrii. Laserový paprsek umožňuje detekovat fluorescein z pryskyřice skrz zrna a otevřené trhliny až do hloubky 250 μm (Montoto a Mateos, 2006; Onishi a Shimizu, 2005).

3.6.7 Rentgenová tomografie

Vysoce rozlišovací rentgenová počítačová tomografie (HRCT) je moderní technologie ideálně přizpůsobená širokému spektru geologických výzkumů. Tato metoda je rychlá a nedestruktivní. Jejím výsledkem jsou obrázky přesně korespondující sériovému snímání skrze objekt. Postupně sousedící obrázky jsou kompilovány a vytváří třidimensionální podobu, která může být digitálně ovlivněna kefektivnímu provádění širokého spektra měřících a vizualizačních otázek. Optimální získání a interpretace dat vyžadují přesný výběr konfigurace skenování, správný výběr zdroje a detektoru rentgenových paprsků a přesnou kalibraci. Tato metoda je vhodná pro některé geologické aplikace, kterými jsou: vnitřní zkoumání některých druhů fosílií a meteoritů, strukturální analýzy vyvřelých a metamorfovaných hornin, geometrický popis a kvantifikace porozity a permeability v horninách a půdách (Ketchman a Carlson, 2001).

4. METODIKA VLASTNÍ PRÁCE

Reprezentativní vzorek horniny pro měření porozity byl zvolen tak, aby obsahoval několik kusů horniny, každý z nich byl minimálně 15x větší než největší zrno či velikost póru. Důvodem tohoto rozhodnutí bylo to, že trhliny o velikosti podobné horninovému vzorku mohou způsobovat rozdílné výsledky v měření porozity i difuzivity.

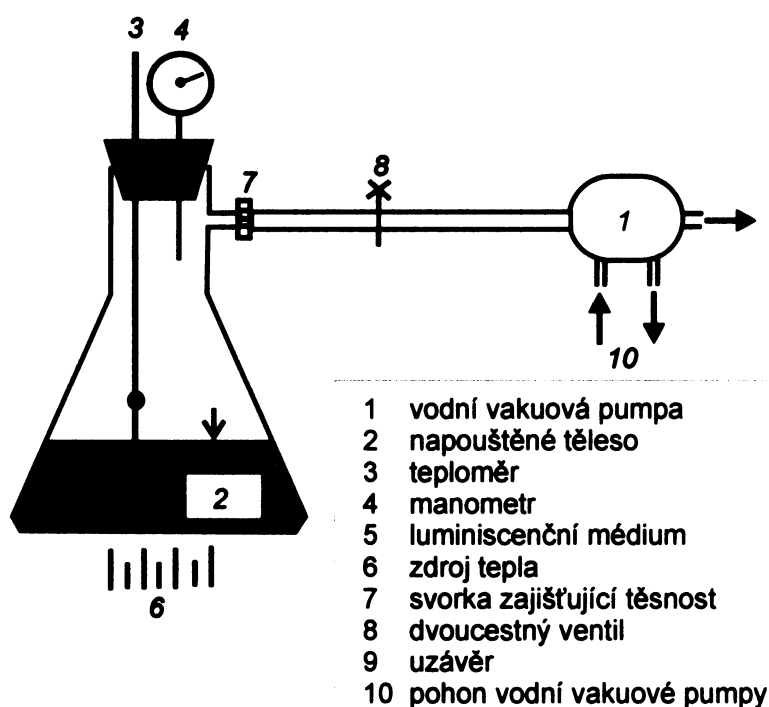
Všechny vzorky byly řezány pomocí nabíjených neselementových diamantových kotoučů. Chlazení místa řezu bylo realizováno pomocí vody, která byla pro tento účel odebrána ze zdroje v Panských Dubénkách. Jestliže bylo třeba vzorky vrtat, bylo tak učiněno pomocí sintrovaných neselementových trubkových vrtáků s řízeným přítlakem a krotivým momentem (pouze rotační technologií bez příklepu). Tento postup měl zamezit vzniku novotvořených mikrotrhlin.

4.1 Elektronová skenovací mikroskopie (EDAX)

4.1.1 Příprava vzorků

Všechny vzorky byly vysušeny v sušičce typu Memmet při teplotě 105 °C po dobu 48 hodin. Poté bylo celkem sedm vzorků jednotlivě napouštěno ve vakuu pryskyřicí, resp. pryskyřicí s přídavkem kobaltu, resp. pryskyřicí s přídavkem mědi, resp. pryskyřicí s přídavkem luminiscenční látky (Tab. 1.). Takto připravené vzorky a směsi byly jednotlivě vloženy do Erlenmayerovy baňky a syceny ve vakuu vytvořeném vodní vývěvou až do odplynění, cca po dobu 20 min (Obr. 3.).

Po napuštění byly vzorky vloženy na dalších 15 min do vroucí vody, aby došlo k polymeraci pryskyřice. Ze vzorků byly poté udělány nábrusy (zalité do pryskyřice). Takto připravené vzorky byly použity nejen pro EDAX, ale i pro UV mikroskopii.



Obr. 3. Návrh sytící aparatury.

Tab. 1. Tabulka směsí impregnovaných do vzorků.

Číslo vzorku	Směs látek
1	66 ml výzkumný vzorek M541
2	66 ml výzkumný vzorek M541 + 9 ml desetiprocentního roztoku oktalátu Cu
3	66 ml výzkumný vzorek M541 + 9 ml desetiprocentního roztoku oktalátu Co
4	66 ml výzkumný vzorek M704
5	66 ml výzkumný vzorek M541 + 1g fluorescenčního aditiva (Rilux)
6	66 ml výzkumný vzorek M704 + 9 ml desetiprocentního roztoku oktalátu Cu
7	66 ml výzkumný vzorek M704 + 1g fluorescenčního aditiva (Rilux)

Veškeré použité látky byly zapůjčeny sponzorem diplomové práce, firmou ISATech s.r.o., jejich složení je tedy jejich průmyslovým tajemstvím. Vzorky M541 a M704 jsou pryskyřice.

Pro vzorky granitu, do nichž byla aplikována směs pryskyřice s přísadkou kobaltu a mědi, byly vyhotoveny rentgenové distribuční mapy, pořízené elektronovým skenovacím mikroskopem typ Cam Scan 3200 s použitím detektoru sekundárních elektronů (SEI). Tato metoda umožňuje odlišit jednotlivé fáze s obsahem určitého přesně definovaného prvku (v našem případě kobalt, resp. měď, resp. uhlík). Prvek musí být relativně těžký (ideální je atomové číslo vyšší než ^{56}Fe) s tím, že např. železo není v tomto případě vhodné použít, protože může docházet ke koincidenci linií vzniklých aplikovanou směsí s přísadkou kontrastního prvku (Fe) s železem, které může být alteračním produktem uvolněným např. z alterovaných fylosilikátů (biotit) nebo např. z akcesorických minerálů (pyrit, hematit apod.). Dalším prvkem, který je možno touto metodou sledovat je například uhlík, který není v granitu za normálních podmínek běžně přítomen, ale je obsažen v pryskyřici, která byla do daného vzorku pod tlakem impregnována. Proto byly pro všechny vzorky pořízeny rentgenové distribuční mapy uhlíku. Tyto mapy by měly ukázat kudy, a jak dochází k transportu impregnované látky, potažmo vody ve vzorku.

Za účelem zjištění mezi kterými minerálními zrny je nejvíce koncentrována stopovací látka (M541 či M704 s aditivem) byla provedena orientační bodová analýza.

4.1.2 Podmínky měření

Pokovování vrstvou uhlíku zhruba 20 nm.

Analytické podmínky: urychlovací napětí 20 kV, proud 12 nA.

Měření byla provedena v Laboratoři elektronové mikroanalýzy, České geologické služby, Barrandov. Operátorem byla Mgr. Patricie Týcová, Mgr. Jakub Haloda a autorka práce.

4.2 UV mikroskopie

Pro UV mikroskopii byly použity vzorky, které byly připraveny stejným způsobem jako pro elektronovou skenovací mikroskopii.

Pro studium preparátů v UV světle byl použit kombinovaný mikroskop Leica DMLP (Germany), který se nachází na pracovišti PrF UK v Praze. Umožňuje pozorování v UV světle, (zdroj Leica typ-307-072.057). Na tomto mikroskopu byly pořízeny fotografie vybraných oblastí vzorků č. 5 a 7. Pro studium vzorků v UV světle bylo třeba vzorky nasytit ve vakuu UV luminiscenční (fluorescenční) látkou.

4.3 Rtuťová porozimetrie

4.3.1 Příprava vzorků

Pro měření byly odebrány 3 vzorky granitu z testovacího kusu horniny. Tyto vzorky byly po předchozí dohodě dodány do laboratoří Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR v podobě části vrtného jádra.

Rtuťová porozimetrie byla měřena na úštěpcích o různých hmotnostech zhruba od 2 do 3,5 g, hornina byla před uštípnutím vysušena. Operátory měření byly a vyhodnocení provedly Ing. Zuzana Weisshauptová, DrCs. a autorka předkládané práce.

4.3.2 Princip rtuťové porozimetrie

Metoda vysokotlaké rtuťové porozimetrie je založena na jevu kapilární deprese rtuti, kdy úhel smáčení je $> 90^\circ$ a rtuť tak vniká do pórů teprve působením tlaku. Objem rtuti vtačené do porézního systému je obecně interpretován jako celkový objem otevřených pórů v měřeném vzorku, přičemž vztah mezi aktuálním tlakem P a poloměrem válcového póru r je dán Washburnovým vztahem (Drake, 1949) (21).

$$P = - \frac{2\sigma \cos \varphi}{r} \quad (21) \quad [\text{N/m}^2]$$

σ – povrchové napětí rtuti $[\text{N/m}]$

φ – stykový úhel $[^\circ]$

r – poloměr póru kruhového průřezu $[\text{m}]$

P – celkový tlak pod nímž rtuť vniká do pórů $[\text{N/m}^2]$

Nejmenší měřený poloměr je dán maximálním použitým tlakem a největší poloměr odpovídá zvolenému počátečnímu tlaku. Závislost vtačeného objemu rtuti na stoupajícím tlaku P představuje porometrickou intruzní křivku. Přepočtem tlaku P na poloměr r podle Washburnovy rovnice se získá kumulativní křivka, jejíž derivací se vypočte distribuce pórů podle poloměrů. Na základě změřeného objemu pórů a válcového modelu lze vypočítat povrch pórů. Výpočet povrchu pórů se někdy zpřesňuje zavedením jiného tvaru pórů např. kónického, štěrbínového nebo lavičkového (Interní metodika ÚSMH AV ČR, v.v.i.).

Vysokotlaká rtuťová porozimetrie poskytuje stanovení celkového objemu pórů V , jejich povrchu S pro zvolený modelový tvar pórů, středního nebo nejčastěji zastoupeného poloměru pórů r , zdánlivé rtuťové hustoty d_{HG} , korigované zdánlivé rtuťové hustoty o objem pórů V , která při absenci mikropórů a pórů nad horní hranici identifikovatelných pórů přibližně představuje skutečnou hustotu a porovitost Por (Interní metodika ÚSMH AV ČR, v.v.i.).

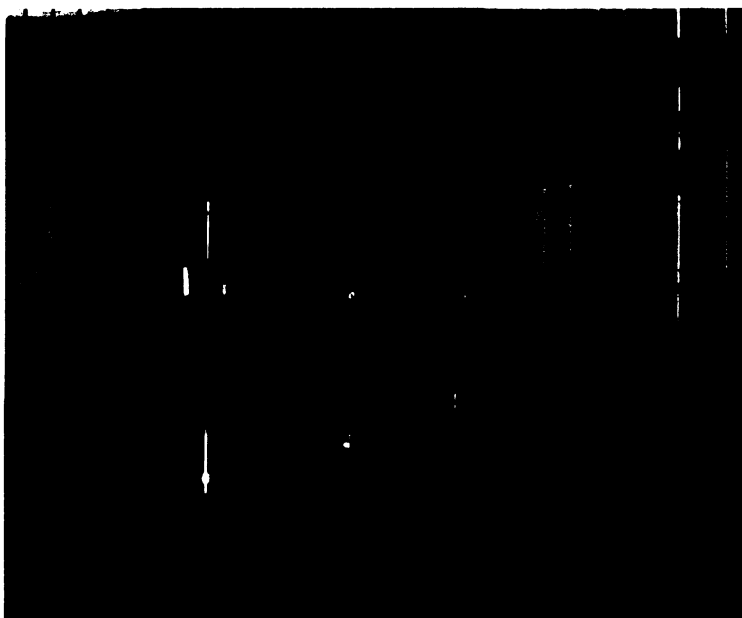
4.3.3 Přístroje a měření

Vzorky byly měřeny na sestavě porozimetrů Pascal 140 + 240 fy Thermo Electron – Porotec (Obr. 4.). Porosimetr Pascal 140 slouží jako plnicí zařízení a provádí se na něm nízkotlaké měření do tlaku 100 kPa. Porosimetr 240 pracuje v rozsahu tlaků od 0,1 až po 200 MPa. Vyhodnocení měření bylo provedeno pomocí programu fy POROTEC, kde stykový úhel $\varphi = 141,3^\circ$, povrchové napětí rtuti $\sigma = 480 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$. Pro výpočet povrchu S byl použit válcový model pórů (Interní metodika ÚSMH AV ČR, v.v.i.).

Při použití tlakového intervalu 0,1 kPa až 200 MPa bylo možné indikovat póry s poloměry od 3,7 nm do 58 μm , což vzhledem ke standardnímu rozdělení pórů podle IUPAC (Everett, 1972) na mikropóry ($r < 1 \text{ nm}$), mezopóry ($r = 1 - 25 \text{ nm}$), makropóry ($r = 25 - 7500 \text{ nm}$) a hrubé póry ($r > 7500 \text{ nm}$) představuje identifikaci mezo, makro a hrubých pórů. Nejmenší měřený poloměr je dán maximálním použitým tlakem a

největší poloměr odpovídá počátečnímu tlaku 0,1 MPa (Interní metodika ÚSMH AV ČR, v.v.i.).

Měření byla provedena na úlomcích vzorků o velikosti přibližně 5 mm, které byly vysušeny při teplotě 105 °C do konstantní váhy a evakuovány v dilatometru před jeho zaplněním rtutí. Korekce na stlačitelnost rtuti a roztažnost skleněného dilatometru byla zajištěna slepým pokusem (Interní metodika ÚSMH AV ČR, v.v.i.).



Obr. 4. Sestava porozimetrů Pascal 140 + 240 fy Thermo Electron – Porotec.

4.4 Plynopropustnost

4.4.1 Příprava vzorků

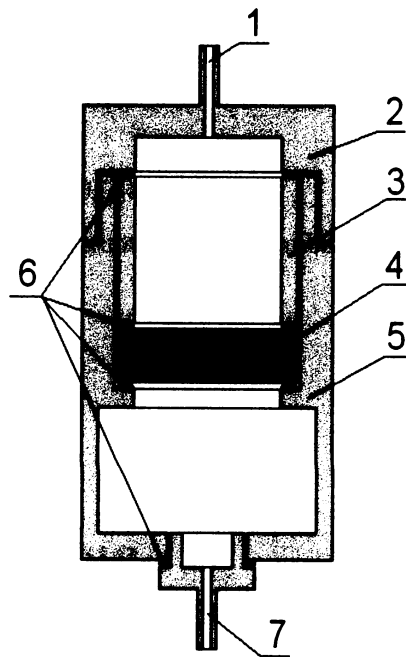
Pro měření byly odebrány 3 vzorky granitu z testovacího kusu horniny. Tyto vzorky byly po předchozí dohodě dodány do laboratoří Ústavu struktury a mechaniky hornin (ÚSMH) AV ČR.

Pro potřeby měření plynopropustnosti byly mechanicky opracovány do tvaru pravidelných válců o průměru 5 cm a výšce $\pm 0,8$ cm. Operátory měření byly a vyhodnocení provedli Ing. Zuzana Weisshauptová, DrCs. a autorka předkládané práce.

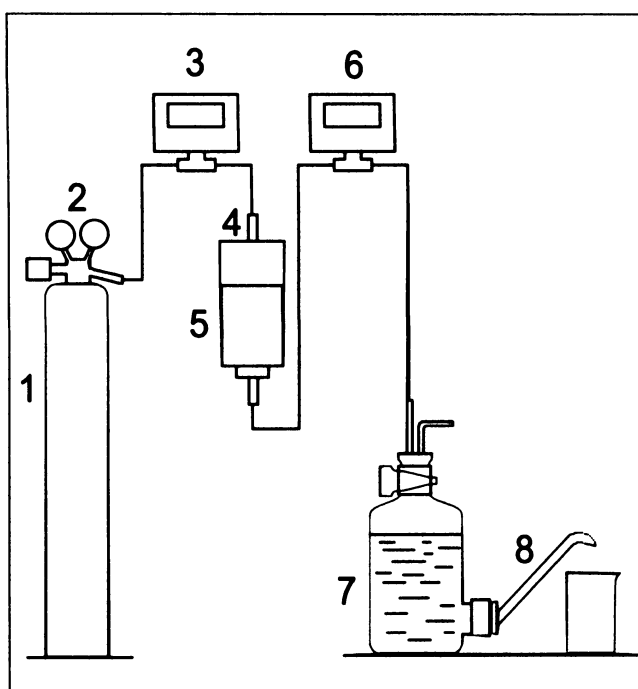
4.4.2 Princip plynopropustnosti

Pro měření byla použita aparatura (Obr.5.), jejímž základem je masivní dvojdielný dutý válec (5) s odnímatelným víkem (2) a se vstupem (1) a výstupem plynu (7). Vzorek (4) je utěsněn soustavou přítlačných prstenců (3) s gumovými kroužky (6) tak, aby plyn mohl volně procházet měřeným vzorkem přesně definovanou plochou. Plášť vzorků byl opatřen nepropustným silikonovým obalem.

Celkové uspořádání měření je uvedeno na Obr. 6. Na horní víko (4) aparatury (5) je připojen přívod plynu ze zásobní láhve (1) přes tlakový regulátor (2) a digitální snímač tlaku (3) s napojením na registraci. Výstup plynu je veden přes kontrolní snímač tlaku (6) do nádržky s vodou (Wulfické láhve (7)), nad níž je polohou výtokové kapiláry (8) nastaven tlak odpovídající vnějšímu barometrickému tlaku. Změnou tlaku plynu nad hladinou vody v nádržce je voda vytlačována až do vyrovnání vnitřního tlaku s vnějším. Z hmotnosti jímání vody se určí objem prošlého plynu (Medek et al., 2006).



Obr. 5. Schéma laboratorního zařízení pro měření plynopropustnosti (1 – vstup plynu, 2 – víko, 3 – přitlačný prstenc, 4 – vzorek, 5 – měrný válec, 6 – těsnění, 7 – výstup plynu) (Medek et al., 2006).



Obr. 6. Celkové uspořádání měření (1 – tlaková láhev, 2 – regulátor tlaku, 3 – digitální snímač tlaku, 4 – víko, 5 – měrný válec, 6 – kontrolní snímač tlaku, 7 – nádržka s vodou, 8 – výtoková kapilára) (Medek et al., 2006).

Výstupem měření je koeficient propustnosti k vypočtený z rovnice Darcyho zákona (22):

$$k = \eta \cdot \frac{2P_0L}{A} \cdot \frac{Q}{\Delta P^2} \quad (22) \quad [\text{mD}]$$

Q – průtok plynu vzorkem [cm³/s]

η – dynamická viskozita plynu (pro N₂ = 0,0166 cP) [cP]

ΔP^2 – tlakový gradient druhých mocnin vstupního a výstupního tlaku [kPa]

P_0 – atmosférický tlak [kPa]

l – výška vzorku [cm]

S – plocha vzorku [cm²]

(Medek et al., 2006)

4.5 Měření pórovitosti dle ČSN 72 1143

Jednou z metod jak zjistit velikost pórovitosti je měření dle této normy. Tato norma je českým ekvivalentem evropské normy EN 1936:1999 a nahrazuje ČSN 72 1154 a článek 24 ČSN 72 1155 z roku 1983. Pórovitost je zde nově vyjádřena dvěma parametry. Těmi jsou *otevřená pórovitost* (dříve označovaná jako objemová nasákavost nebo zdánlivá pórovitost), která odpovídá objemu otevřených pórů v objemové jednotce přírodního kamene a *celková pórovitost* (dříve označovaná jako pórovitost), která odpovídá objemu všech pórů (otevřených i uzavřených) v objemové jednotce přírodního kamene.

4.5.1 Definice

Objemová hmotnost (ρ_b): poměr mezi hmotností suchého zkušební tělesa a jeho zdánlivým objemem [kg/m³].

Zdánlivý objem (V_d): objem vymezený vnějším povrchem zkušební tělesa, zahrnující jakékoliv dutiny [m³].

Objem pevné části: rozdíl mezi zdánlivým objemem zkušební tělesa a objemem dutin [m³].

Měrná hmotnost (ρ_s): poměr mezi hmotností suchého zkušební tělesa a objemem jeho pevné části [kg/m³].

Otevřená pórovitost (p_d): poměr mezi objemem otevřených pórů a zdánlivým objemem zkušební tělesa [%].

Celková pórovitost (p): poměr mezi objemem otevřených a uzavřených pórů a zdánlivým objemem zkušební tělesa [%].

4.5.2 Značky a jednotky

m_d – hmotnost vysušeného zkušební tělesa [g]

m_n – hmotnost zkušební tělesa ponořeného do vody [g]

m_s – hmotnost nasyceného zkušební tělesa [g]

m_e – hmotnost rozetřeného a vysušeného zkušební tělesa [g]

m_1 – hmotnost pyknometru naplněného vodou a rozetřeným zkušebním tělesem [g]

m_2 – hmotnost pyknometru naplněného vodou [g]

V_b – zdánlivý objem zkušební tělesa	[ml]
V_o – objem otevřených pórů ve zkušebním tělese	[ml]
V_s – objem tekutiny nahrazené hmotností m_s	[ml]
ρ_b – objemová hmotnost zkušební tělesa	[kg/m ³]
ρ_r – měrná hmotnost zkušební tělesa	[kg/m ³]
ρ_{rh} – hustota vody	[kg/m ³]
p_o – otevřená pórovitost zkušební tělesa	[%]
p – celková pórovitost zkušební tělesa	[%]

4.5.3 Přístroje a pomůcky

Sušárna s ventilací, vakuová nádoba schopná udržet tlak $2,0 \pm 0,7$ kPa, váhy Sartorius excellence, měřidlo s přesností 0,05 mm.

4.5.4 Příprava vzorků

Diamantovým řezáním byla získána tělesa o tvaru válce. Objem vypočtený z naměřených hodnot byl větší než 25 ml (požaduje norma). Tělesa byla vysušena na ustálenou hmotnost za stálé teploty 70 ± 5 °C po dobu 72 hodin.

4.5.5 Postup zkoušky

Zkušební těleso bylo zváženo (m_d) a vloženo do vakuové nádoby, postupně byl snižován tlak na $2,0 \pm 0,5$ kPa. Tento tlak byl udržován po dobu 24 hodin, aby unikl vzduch obsažený v otevřených pórech.

Do nádoby byla postupně a pomalu vpouštěna demineralizovaná voda o teplotě 20 °C, celý tento proces trval déle než 15 minut. Během celého procesu a následujících 24 hodin byl neustále dodržován tlak $2,0 \pm 0,5$ kPa.

Poté byl tlak v nádobě vyrovnán s tlakem atmosférickým a těleso zůstalo v nádobě po dobu dalších 24 hodin.

Následně bylo těleso:

- zváženo pod vodou a byla zaznamenána jeho hmotnost ve vodě (m_h)
- rychle otřeno navlhčenou tkaninou a stanovena hmotnost tělesa nasyceného vodou (m_s)

4.5.6 Vyjádření výsledků

Objem otevřených pórů (23)

$$V_o = \frac{m_s - m_d}{\rho_{rh}} \cdot 1000 \quad (23) \quad [\text{ml}]$$

Zdánlivý objem (24)

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} \cdot 1000 \quad (24) \quad [\text{ml}]$$

hodnota ρ_{rh} při 20 °C je 998 kg/m³

Objemová hmotnost (25)

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \cdot \rho_m \quad (25) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Otevřená pórovitost (26)

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \cdot 100 \quad (26) \quad [\%]$$

Měrná hmotnost (27)

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \cdot \rho_m \quad (27) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Celková pórovitost (28)

$$p = \frac{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_r}}{\frac{1}{\rho_b}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \cdot 100 \quad (28) \quad [\%]$$

4.6 Stanovení propustnosti zemin při konstantním spádu dle ČSN 72 1007

Tato norma je českou verzí technické specifikace CEN ISO/TS 17892-11:2004, která má status české technické normy. Tato norma nahrazuje ČSN 72 1020 z 1990-05-14.

4.6.1 Termíny a definice

Průtok (Q): množství vody, které proteče zkušebním vzorkem za jednotku času t [cm^3/s].

Průtoková rychlost (v): rychlost proudění vody na jednotku plochy zeminy (včetně částic a pórů) kolmo na směr proudění [cm/s].

Hydraulický sklon (i): poměr rozdílu totálních tlakových výšek vody (ztráty tlakové výšky) h mezi dvěma průřezovými body, ku délce proudnice l , (vzdálenost mezi dvěma průřezovými body měřená ve směru proudění).

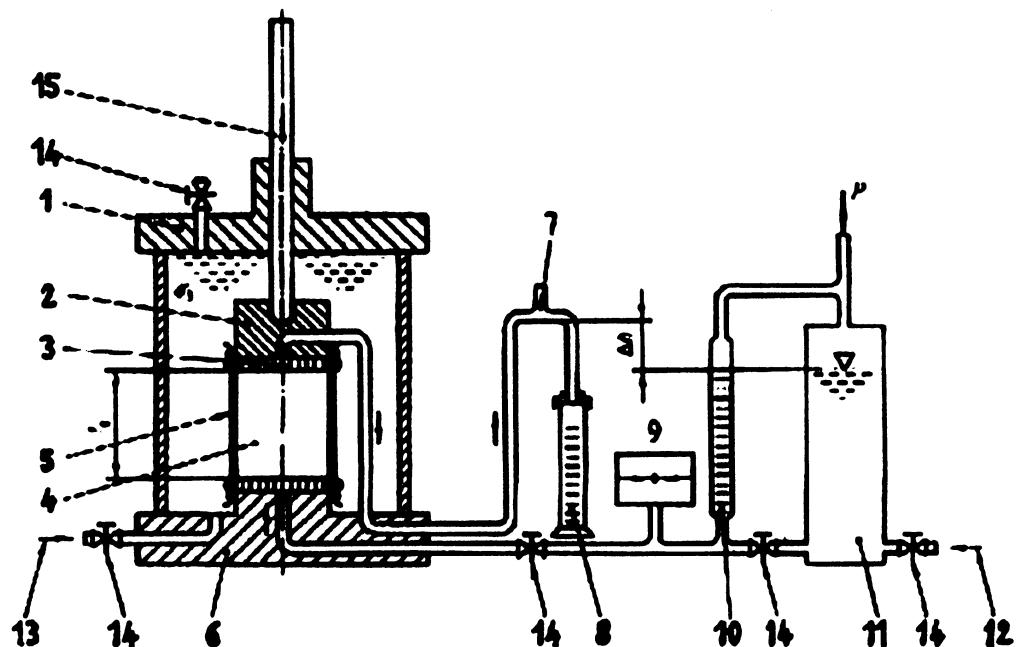
Součinitel filtrace (k): v souladu s Darcyho zákonem pro laminární proudění je součinitel filtrace k u vodou nasycených zemin poměr průtokové rychlosti v ku hydraulickému sklonu i [m/s].

Neporušený zkušební vzorek – obvykle vzorek ve třídě kvality 1 nebo přinejmenším 2 v souladu s pravidly EN 1997-2.

4.6.2 Postup zkoušky

Zmitost a struktura částic se v průběhu měření propustnosti neměnila. Použitá voda nevymývala složky zkušebního vzorku, a co nejvíce se podobala vodě pórové. Zkušební vzorek byl v průběhu měření propustnosti nasycený. Nasycení bylo dosaženo aplikací zpětného tlaku, který byl vytvořen natlakováním

pórové vody zkušebního vzorku hydrostatickým tlakem, jenž byl udržován po celou dobu zkoušky. Tohoto bylo dosaženo pomocí zařízení na Obr. 7. Hydraulický sklon byl stálý. Bylo zabráněno jakkoliv zapříčiněnému obtékání vzorku při měření průtoku, aby výsledná naměřená propustnost byla co nejpřesnější. Vzorek byl tedy obložen latexovou membránou.



Obr. 7. Zařízení pro stanovení propustnosti zemin při konstantním spádu (převzato z ČSN 72 1007). 1 – vrch komory; 2 – hlava se spirálovou drážkou; 3 – filtrační destička se součinitelem filtrace k alespoň 10x větším než součinitel filtrace zkušební vzorku; 4 – zkušební vzorek; 5 – pryžová membrána; 6 – podstava; 7 – skleněná trubička s odvěšovací otvorem průměru menšího než 1 mm; 8 – odměrný válec nebo snímač měření objemových změn; 9 – měřidlo tlaku; 10 – byreta ke stanovení množství přitékající vody; 11 – zásobník obsahující tlakovou odvěšovací vodu; 12 – přívod odvěšovací vody; 13 – vstup pro komorovou vodu a komorový tlak σ_3 ; 14 – ventil nebo kohout; 15 – píst pro aplikaci anizotropního zatížení vzorku; l_0 – výška zkušební vzorku (= délka průsakové dráhy); p – tlak vytvářející hydraulický sklon.

Zkouška byla prováděna za přibližně ustálené teploty $\pm 22,7$ °C, se kterou byla teplota vzorku a vody v rovnováze.

Pro získání reprodukovatelných výsledků byla hodnota k stanovená z provedené zkoušky převedena na referenční teplotu 10 °C pomocí následující Poisseulleovy empirické rovnice (29):

$$k_{10} = \alpha \cdot k_T \quad (29) \quad [\text{m/s}]$$

$$\alpha = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (30)$$

T – teplota vody v průběhu zkoušky [°C]

k_T – součinitel filtrace při okolní teplotě [m/s]

α – opravný součinitel získaný z rovnice nebo odečtený z následující Tab. 2, pro mezilehlé hodnoty je povolena lineární interpolace

Referenční teplota 10 °C se používá proto, že odpovídá průměrné teplotě podzemní vody.

Tab. 2. Opravný součinitel α pro některé teploty.

Teplota T [°C]	5	10	15	20	25
Opravný součinitel α	1,158	1,000	0,874	0,771	0,686

4.6.3 Vyjádření výsledků

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (31)$$

Q – průtok	[m ³ /s]
ΔV – množství vody, která protekla ve vybraném časovém úseku	[m ³]
Δt – odpovídající časový interval	[s]

Součinitel filtrace k se stanoví z následující rovnice (32):

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h} \quad (32)$$

k – součinitel filtrace (koeficient filtrace)	[m/s]
Q – průtok	[m ³ /s]
l – vzdálenost mezi body, ke kterým jsou připojeny dvě piezometrické trubice	[m]
A – průřezová plocha zkušební vzorku	[m ²]
h – rozdíl tlakových výšek hladin piezometrů	[m]

k – tedy koeficient filtrace [m/s] je míra propustnosti horninového prostředí a číselně je roven (objemovému průtoku vody jednotkovým průtočným průřezem) při jednotkovém piezometrickém gradientu (<http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2008/03/hydro-3.pdf>).

5. GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA TESTOVANÉHO GRANITU

Geologickým celkem širšího regionu je centrální Moldanubický masív. Ten vystupuje v ose antiklinoria Českomoravské vrchoviny a dále postupuje směrem SSV-JJZ od Sázavy po rakouský Waldviertel. Směrem od severu k jihu se rozšiřuje, u Havlíčkova Brodu má zhruba 6 km na šířku, kdežto na hranicích s Rakouskem již 25 km. Celý masív diskordantně proráží antiklinálním pásmem, které bylo původně tvořeno cordieriticko-biotitickými pararulami a migmatity, které je možné místy spatřit v podobě reliktů pláště i na hlavním tělese (Dudek in Mísař, 1983).

Puklinový systém masívu je poměrně jednoduchý a pravidelný, neboť posttektonický průběh celého plutonu byl vcelku klidný. Nejvýznamnější regionální pukliny o směru 90-120 ° jsou označovány jako pukliny Q, ty které probíhají ve směru 0-30 ° jsou označovány jako pukliny S. Nachází se zde i diagonální systém puklin, který má směr SV-JZ a SZ-JV. Ve směru 30° lze pozorovat usměrnění živcových vyrostlic a lepší štěpnost hornin. Směrem do hloubky se rozpukání masívu snižuje, čímž se snižuje i puklinová propustnost. Tektonická stavba obsahuje pouze prvky rupturní tektoniky zastoupené drobnou i velkou tektonikou. Drobná tektonika je zastoupena puklinami, které odpovídají Q-L-S plochám, které nabývají tří hlavních směrů (úhel úklonu kolísá mezi 8-35 °) (Dudek in Mísař, 1983) :

1. SV-JZ s úklonem pod velmi strmými úhly – hlavní tektonický směr,
2. V-Z a VJV-ZSZ – s úklonem pod velmi strmými úhly směrem jak k S až SSV, tak i k J až JJZ,
3. SSV-JJZ až SV-JZ s úklonem k ZSZ až SZ – tzv. ložní tektonická porucha.

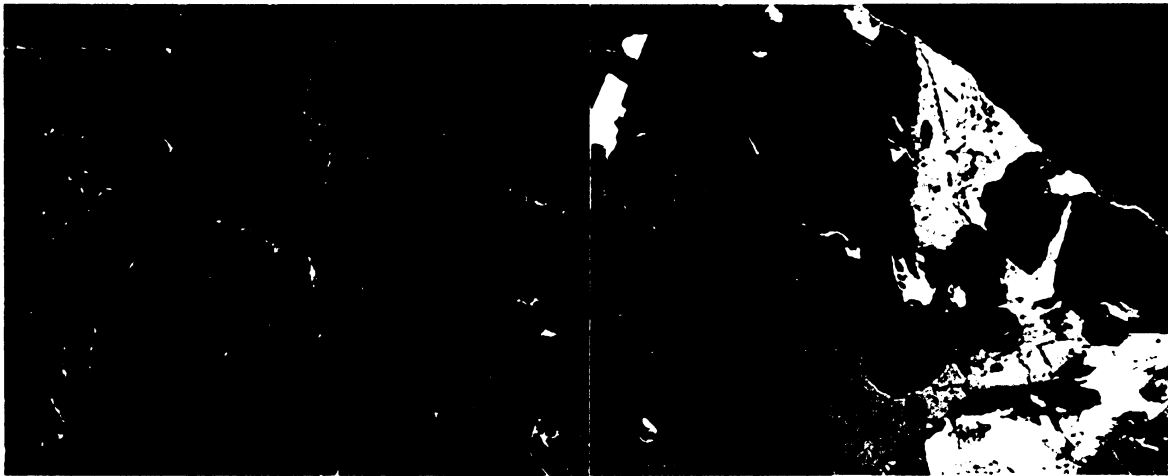
Petrografie celého masívu je jednotvárná. Dle (Dudek in Mísař, 1983) jde o dvojslídne eisgarnské granity se shodným poměrem plagioklasu a draselného živce. Nepříliš hojné jsou odchylky ke granodioritu. Změna poměru je patrná pouze u muskovitu a biotitu, směrem na jih také přibývá akcesorický andalusit.

Hornina zde nabývá dvou barevných variet a to žluté (zvětralá hornina) a šedavé (nezvětralá hornina). Hlavními minerály těchto hornin jsou mikroklín, křemen a plagioklas. Vedlejšími jsou pak biotit, muskovit. Akcesoriemi jsou andalusit, apatit, zirkon a rudní minerály. Velká část muskovitu je v těchto horninách sekundárního původu a vznikla přeměnou andalusitu, který se zde nyní díky tomuto procesu nachází pouze jako akcesorie. Primární muskovit se dokonce v některých vzorcích vůbec nevyskytoval.

Roku 1995 vyšel v ČGÚ nový mapovací list (1:50 000, 23-23 Kamenice nad Lipou) obsahující oblast lokality. Dle tohoto listu se studovaná oblast (lom Panské Dubénky) nachází na střednězrnitém dvojslídne granitu s proměnlivým obsahem vyrostlic živců, tzv. „číměřský typ“.

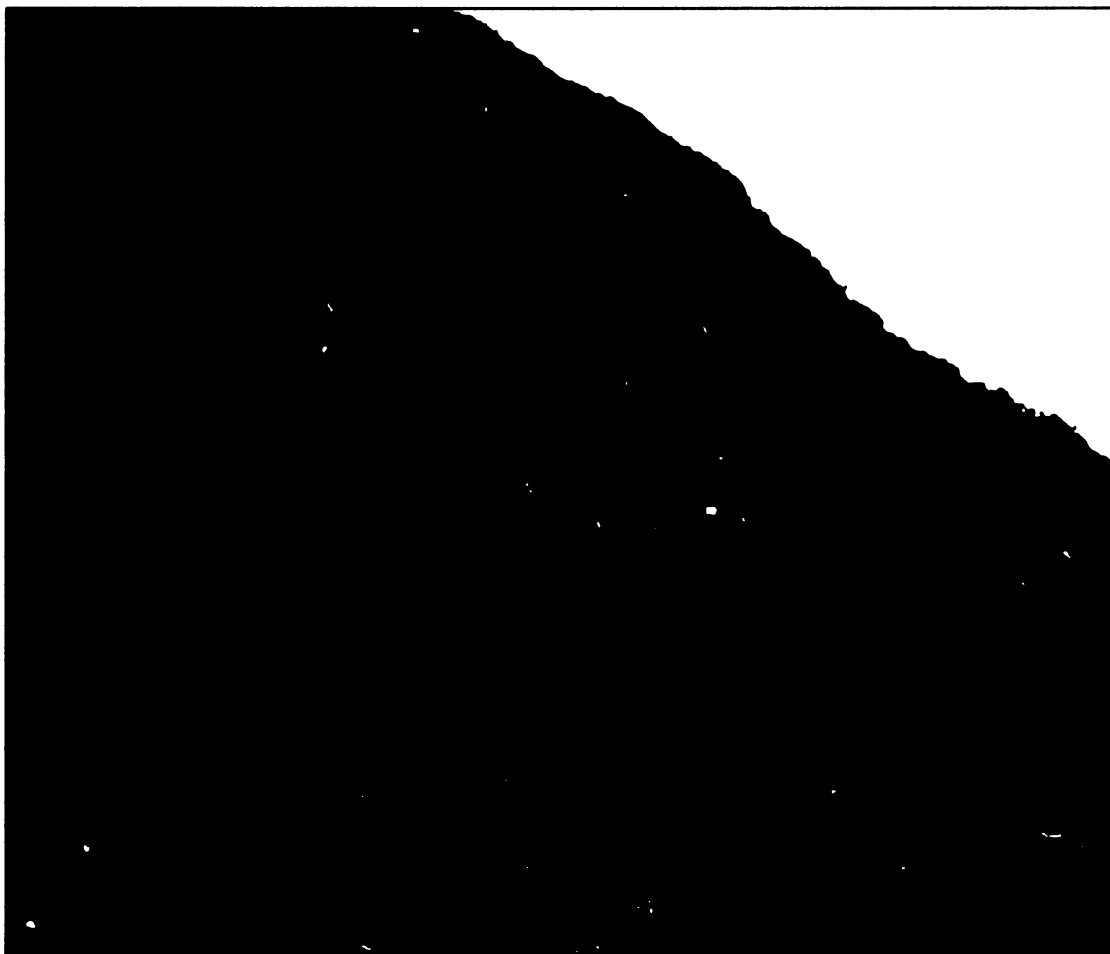
6. VÝSLEDKY

6.1 Elektronová skenovací mikroskopie

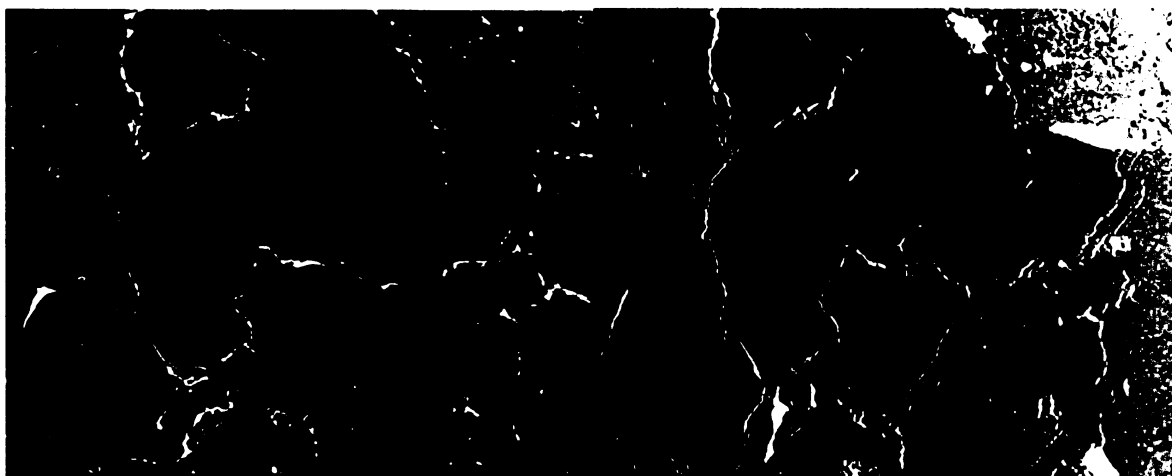


Obr. 8. Obrázek místa v SEI – okraj (zvětšeno 40x).

Obr. 9. Obrázek místa v BEI – okraj (zvětšeno 40x).

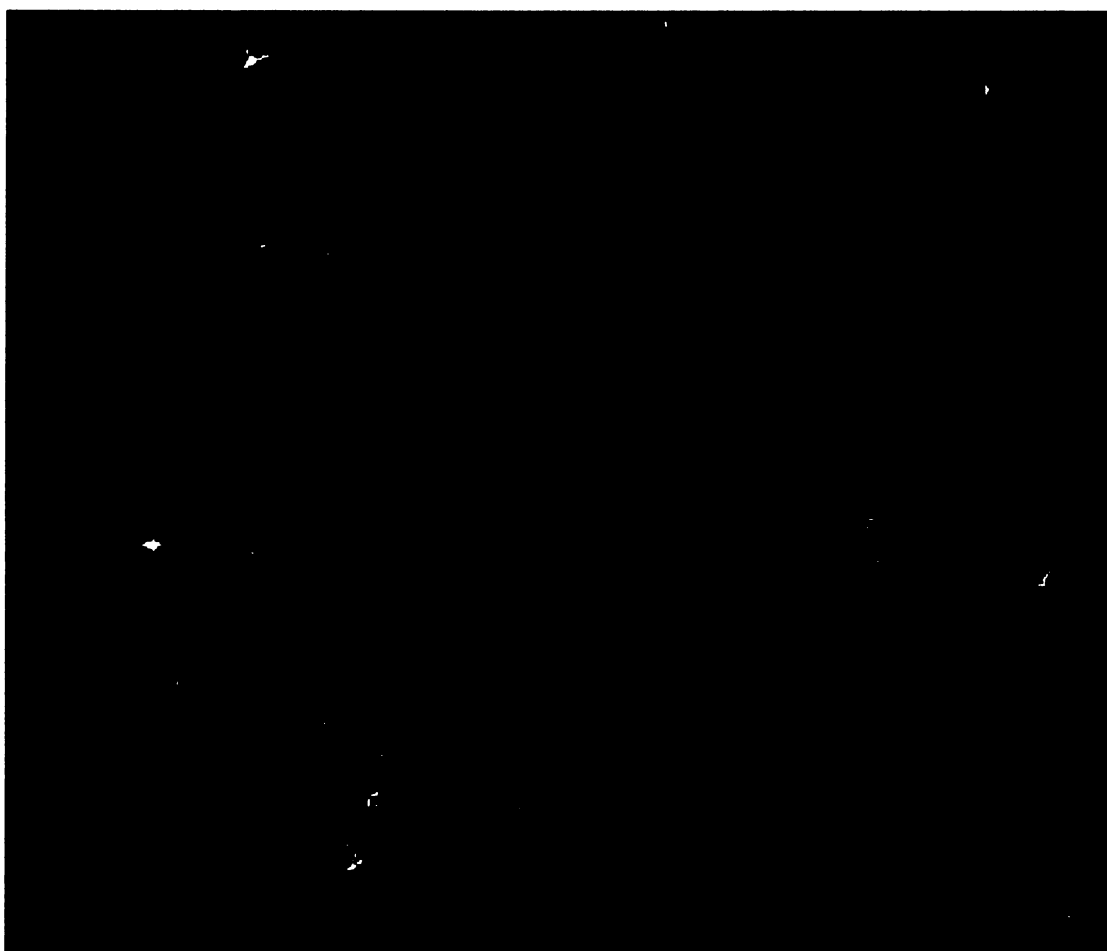


Obr. 10. Obrázek téhož místa v rentgenové difrakční mapě uhlíku (zvětšeno 80x).

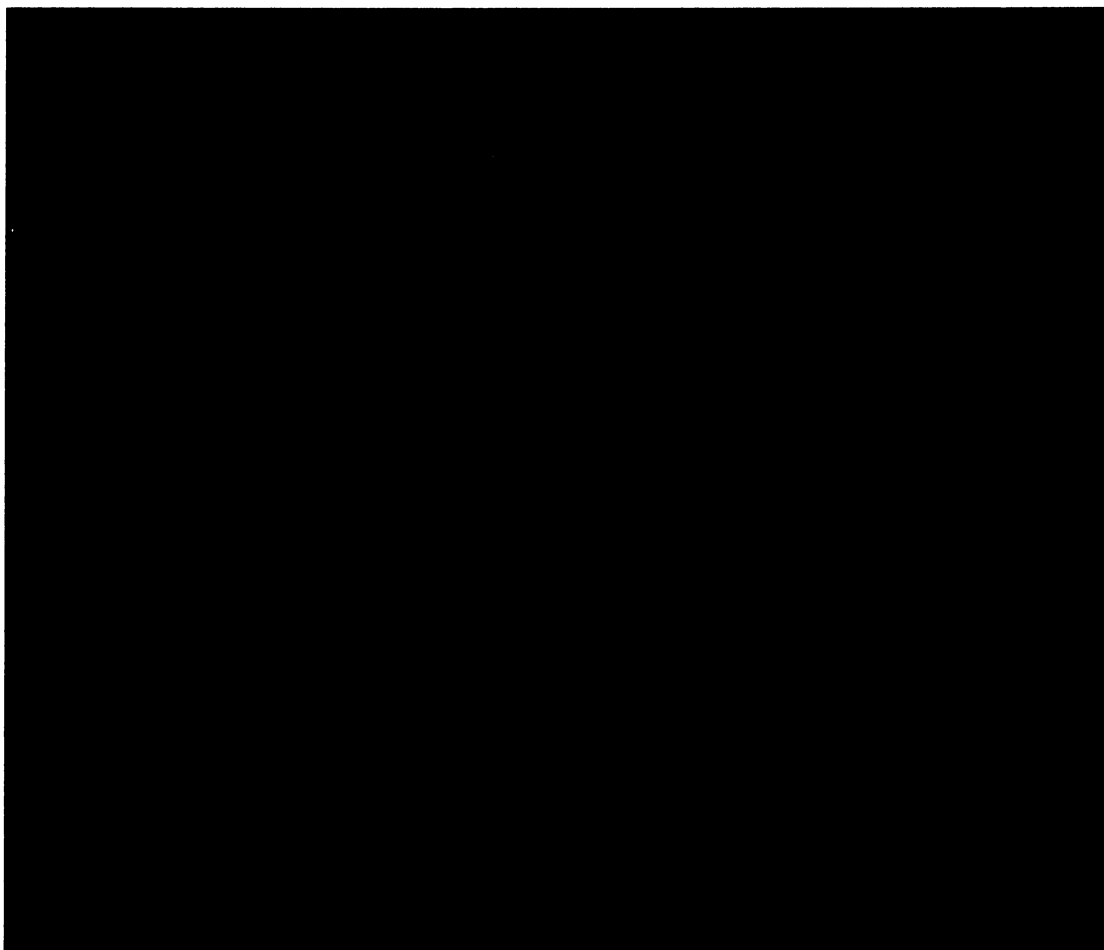


Obr. 11. Obrázek místa v SEI (zvětšeno 80x).

Obr. 12. Obrázek místa v BEI (zvětšeno 80x).



Obr. 13. Obrázek stejného místa – rentgenová difrakční mapa uhlíku (zvětšeno 160x).



Obr. 14. Obrázek stejného místa – rentgenová difrakční mapa železa (zvětšeno 160x).

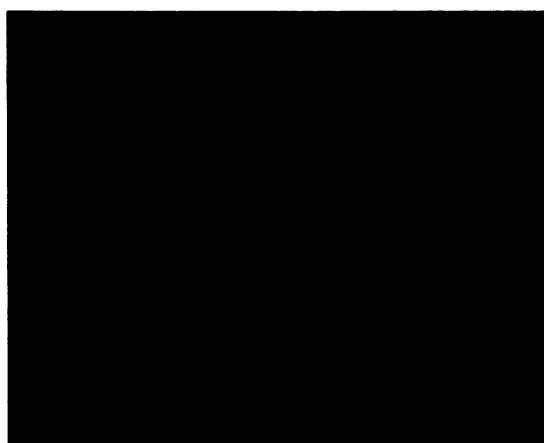
Snímky v SEI a BEI byly pořízeny pro zorientování se ve vzorku. Ze snímků (hlavně rentgenové difrakční mapy uhlíku – při větším zvětšení) je patrné, že se pryskyřice, která byla použita při pokusu, dostala do horniny po hranicích minerálních zrn (intergranulární póry), ale také mikrotrhlinami v minerálních zrnech (transgranulární póry) a to v množství, které je vůči svému okolí dostatečně kontrastní. Ze snímků je patrné, že se pryskyřice impregnovaná do vzorku pohybovala zejména po hranicích minerálních zrn, kde byly její koncentrace největší. Koncentrace v transgranulárních trhlinách a pórech nebyly tak veliké, to však mohlo být způsobeno tím, že doba impregnace byla pouhých 20 minut a to pod tlakem pouze 2 kPa. Na mapě Fe je zřetelné, že zde zřejmě existují některé sekundární fáze Fe, jako je goethit či limonit, které vznikly nejspíše z Fe uvolněného z biotitu. Tyto fáze se také nacházejí hlavně na hranicích minerálních zrn.

6.2 UV mikroskopie

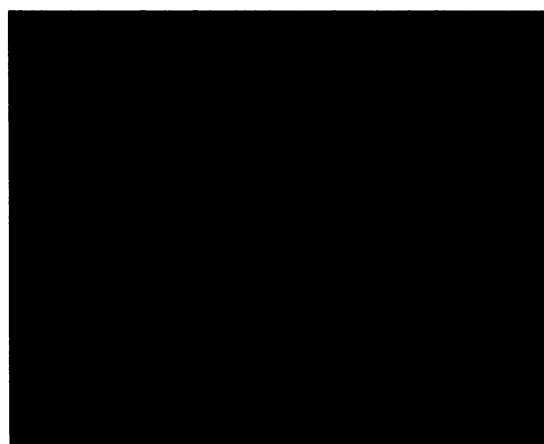
Pro orientační potvrzení správného způsobu sycení byly vzorky ještě před vlastní mikroskopií prohlédnuty pomocí přenosné UV lampy (366 nm). Vzorky byly napuštěny luminiscenční látkou, která pod UV světlem svítí modře.



Obr. 15. Vzorek číslo 1 – v UV záření není luminiscenční.



Obr. 16. Vzorek číslo 2 – v UV záření není luminiscenční.



Obr. 17. Vzorek číslo 3 – v UV záření není luminiscenční.



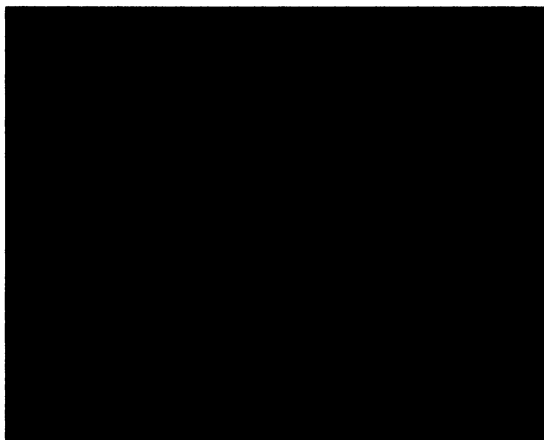
Obr. 18. Vzorek číslo 4 – v UV záření není luminiscenční.



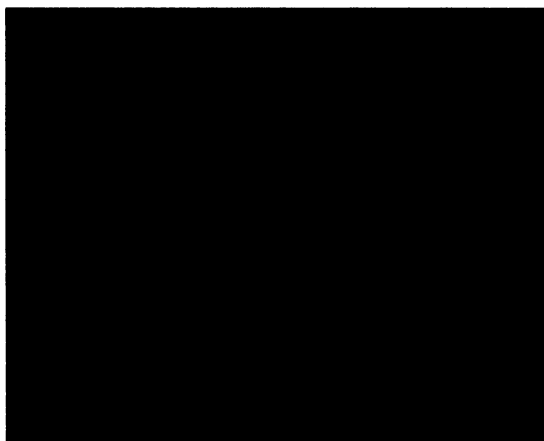
Obr. 19. Vzorek číslo 5 – je v UV záření je luminiscenční.



Obr. 20. Vzorek číslo 6 – v UV záření není luminiscenční.

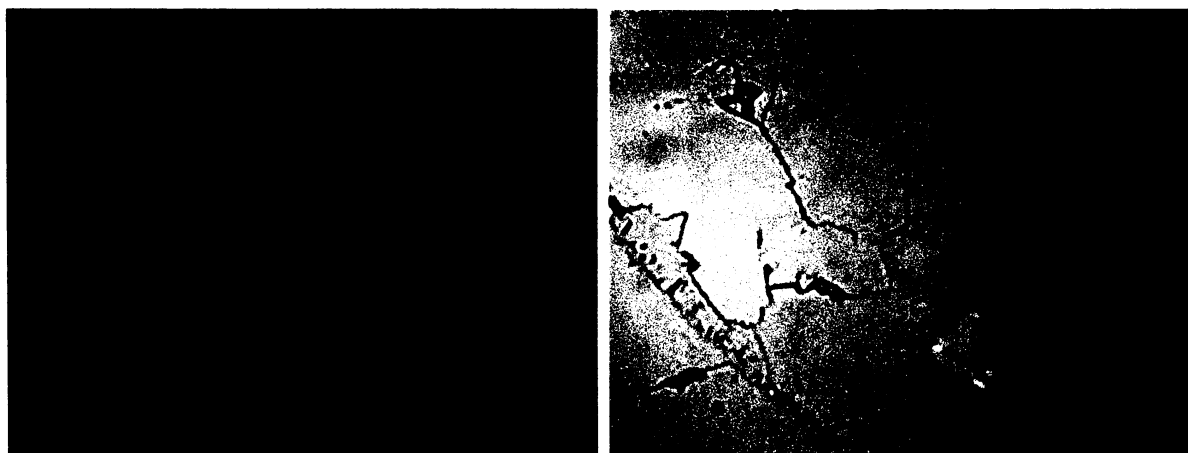


Obr. 21. Vzorek číslo 7 – v UV záření je luminiscenční.

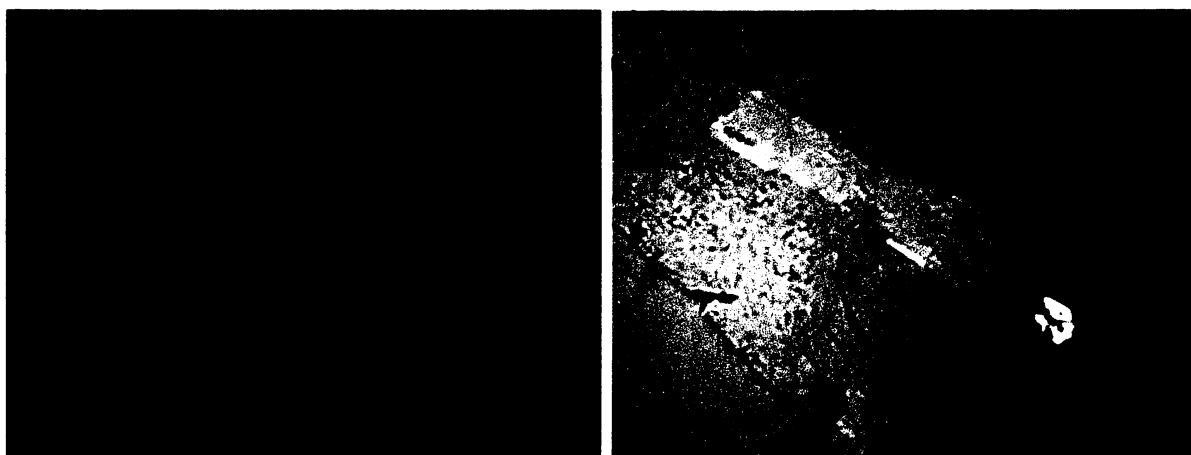


Obr. 22. Vzorek číslo 8 – v UV záření není luminiscenční.

Pomocí UV mikroskopu Leica DMLP byly pořízeny následující fotografie, z nichž jsou patrné přívodní cesty pryskyřice do vzorků, to co je na fotografiích modré je impregnovaná pryskyřice v UV světle.

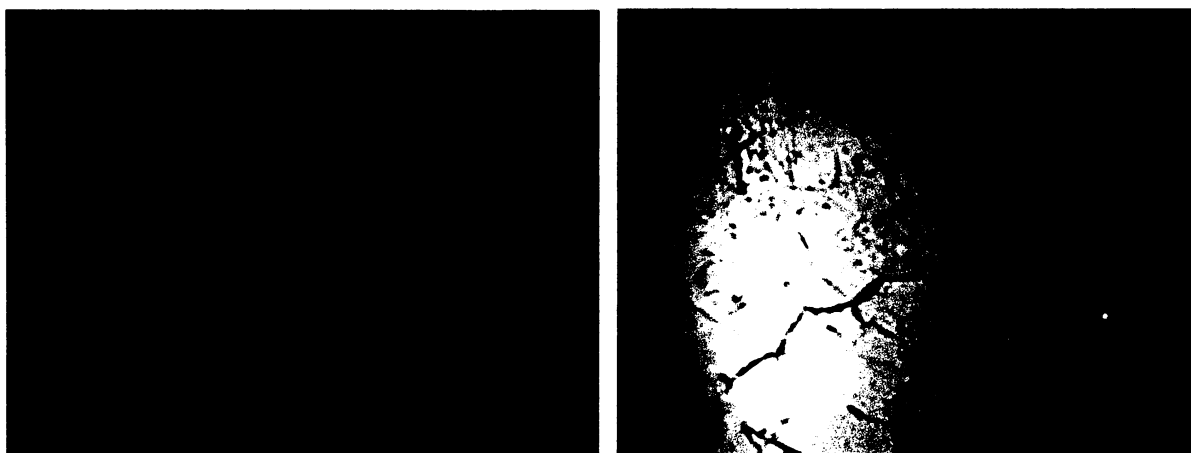


Obr. 23. Vzorek č. 5 – okrajová zóna vzorku (zvětšeno 10x) – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.

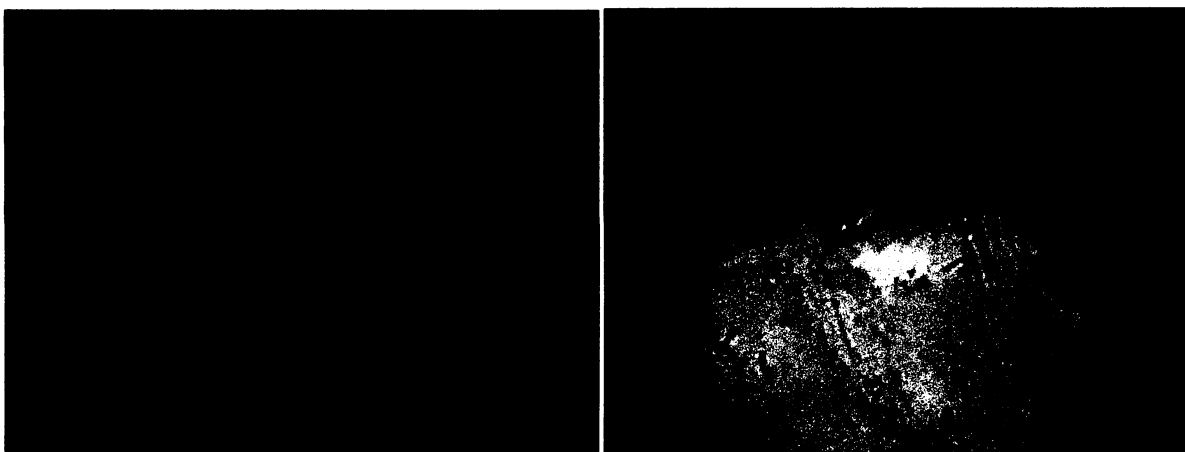


Obr. 24. Vzorek č. 5 – okrajová zóna vzorku, (zvětšeno 10x) – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.

Na horním Obr. 23 je vidět jak se pryskyřice rozlila po puklinách a kolem minerálních zrn, biotit však zůstal pryskyřicí nezasážený. Na Obr. 24 je patrná přírodní cesta média do oblasti Obr. 23, která vede puklinkou či prostorem mezi jednotlivými minerálními zrny a dále se pak rozlévá v trhlinové oblasti, která je zobrazena na Obr. 23.

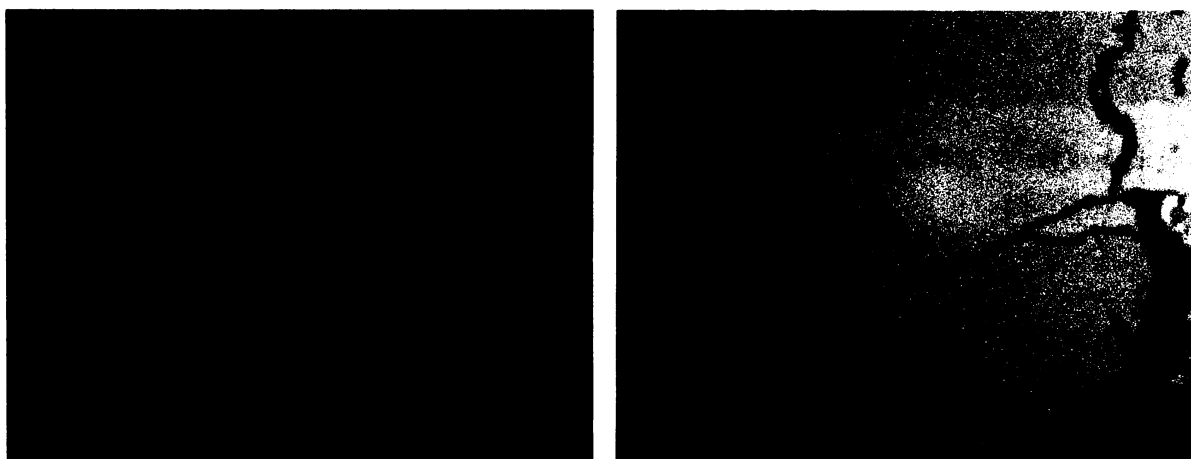


Obr. 25. Vzorek č. 5 – na obrázku je téměř střed vzorku, vzdálenost od okraje vzorku je cca 0,8 cm (zvětšeno 5x) – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.



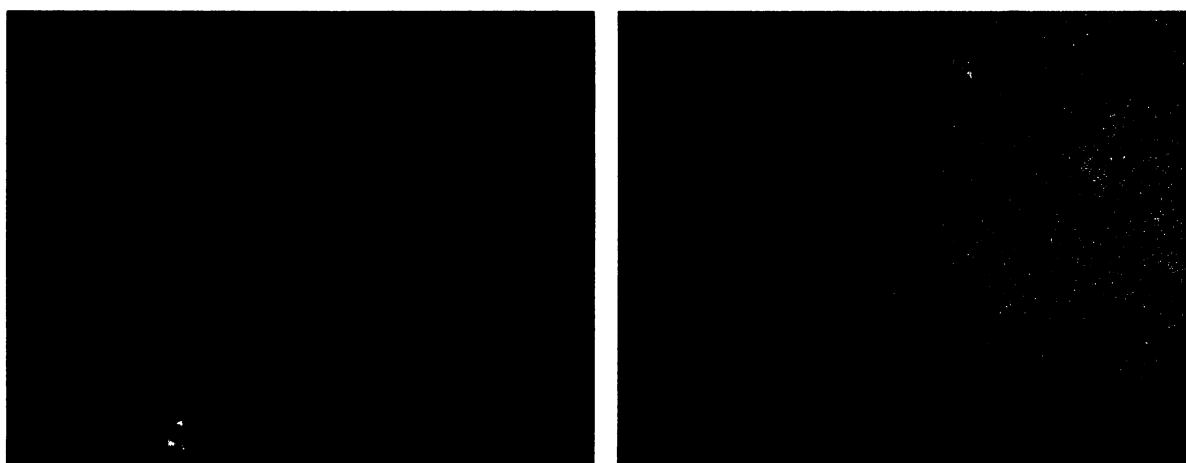
Obr. 26. Vzorek č. 5 – absolutní střed vzorku (zvětšeno 10x) – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.

Obrázky 23 - 26 jsou ze vzorku 5 a postupují směrem od okraje (Obr. 23 a 24) do středu (Obr. 25 a 26). Je z nich patrné, že látka impregnovala horninovou strukturu až do samého středu vzorku (zhruba 1 cm až 1,5 cm od okraje vzorku), a to po hranicích minerálních zrn a po mikrotrhlinách v zrnech. Velmi náchylný na propuštění látky (transgranulární póry) je plagioklas a křemen, kdežto biotit je téměř inertní.

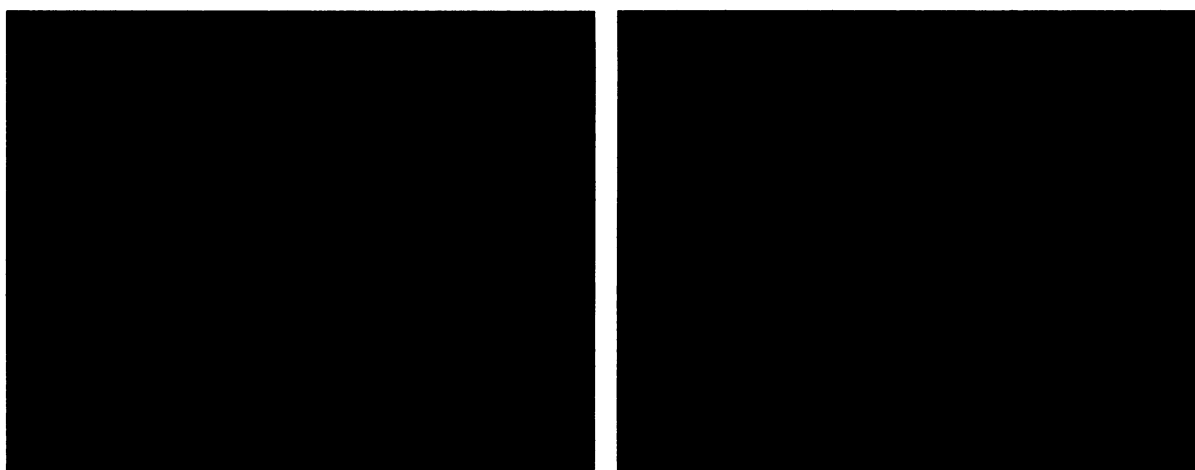


Obr. 27. Vzorek číslo 7 – viditelné přívodní cesty (modře fluoreskují) – zvětšeno 200x – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.

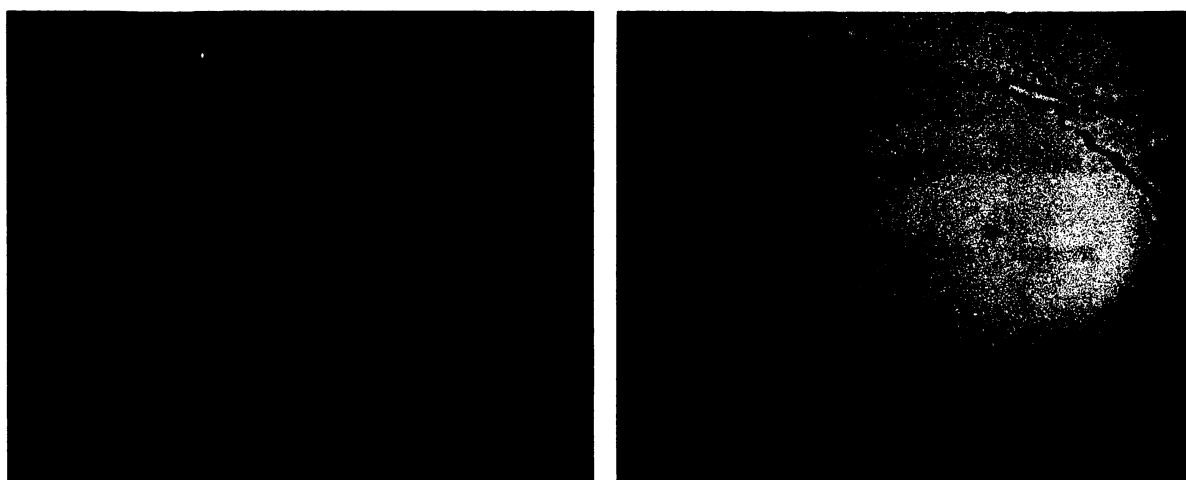
Na Obr. 27 je patrná přívodní cesta pryskyřice do vzorku. Pryskyřice se pohybovala po hranicích minerálních zrn. Z obrázku je patrné, že hranice jednotlivých zrn byly mírně narušeny (pravý okraj obrázku).



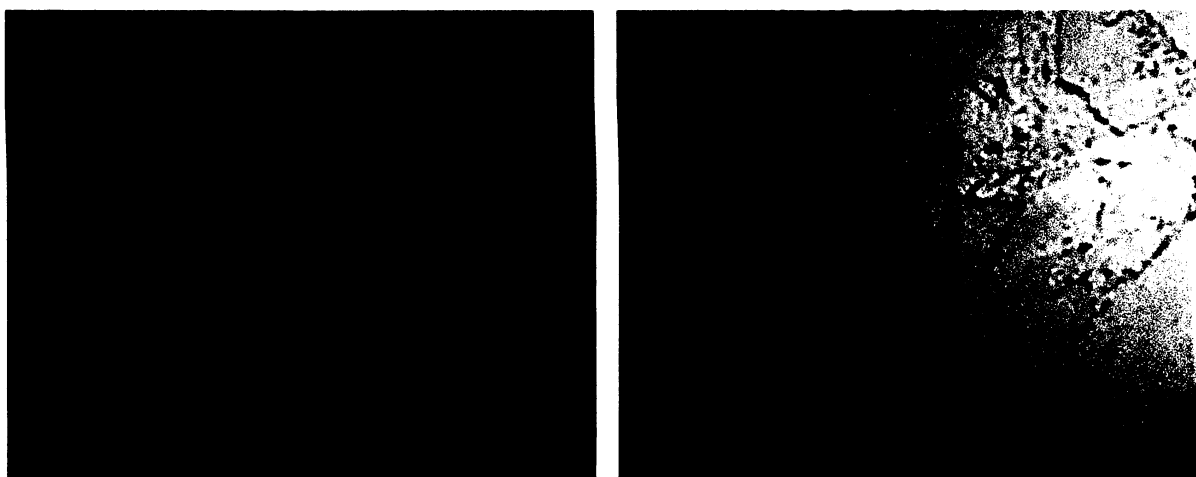
Obr. 28. Vzorek číslo 7 – postup impregnační látky směrem do středu – zvětšeno 200x – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.



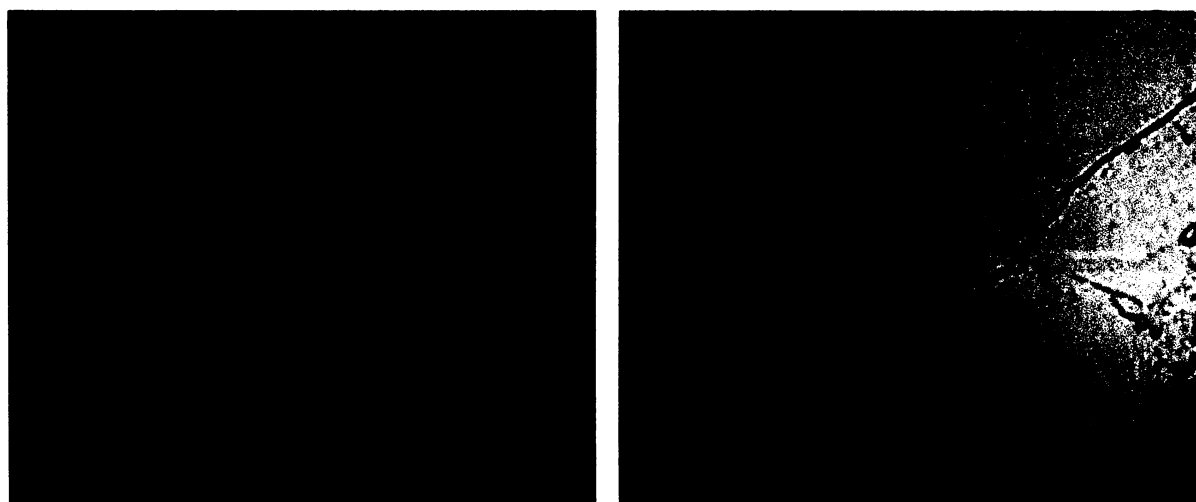
Obr. 29. Vzorek číslo 7 – postup impregnační látky dále směrem do středu – zvětšeno 200x – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.



Obr. 30. Vzorek číslo 7 – zrno, na kterém je patrné, jak je obtékáno UV látkou – zvětšeno 200x – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.



Obr. 31. Vzorek číslo 7 – periferní část vzorku – je patrné, že zrna biotitu nebyla UV fluorescenční látkou nikterak dotčena – zvětšeno 200x – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.

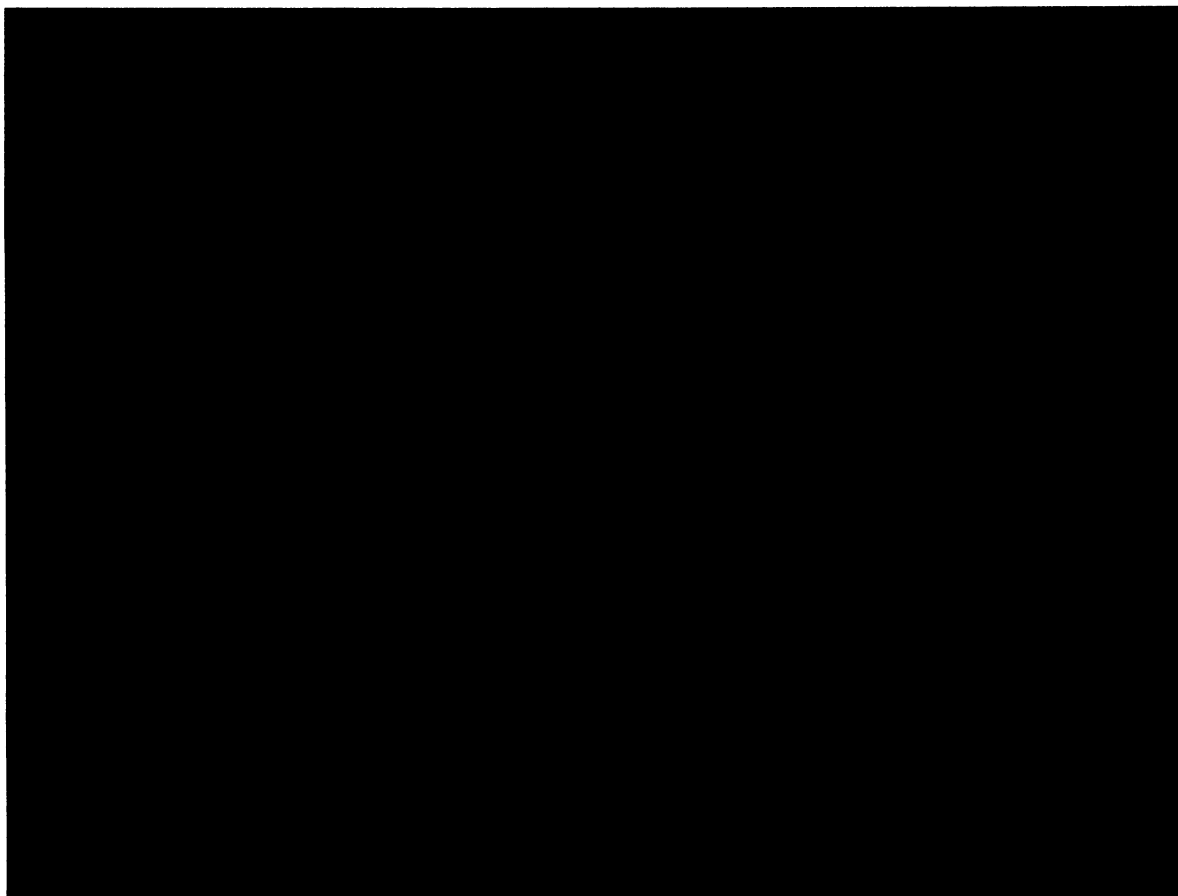


Obr. 32. Vzorek číslo 7 – přívodní cesta UV fluorescenční látky trhlinou – zvětšeno 200x – levý obrázek je v UV světle, obrázek napravo je pouze v polarizovaném světle.

Na Obr. 28 a 29 je patrná přívodní cesta pryskyřice, která je vedena transgranulárními trhlinami. V případě Obr. 28 dochází ještě k jejímu kolmému štěpení a impregnovaná pryskyřice se tak dostává dále do vzorku.

Obr. 31 ukazuje okrajovou část vzorku, která obsahuje velmi rozsáhlý pórový systém, černé zrno uvnitř je biotit.

Obr. 32 ukazuje transgranulární přívodní cestu s navazujícím rozsáhlejším pórovým systémem.



Obr. 33. Vzorek číslo 7 – světle modré partie jsou štěpné trhliny v draselném živci impregnované fluorescenční látkou – zvětšení 400x, pozorováno v UV světle.

Na Obr. 33 je patrné, jak impregnovaná pryskyřice zcela prostoupila trhliny vzniklé v živci, díky jeho štěpnosti. Fotografie pořízené v UV světle vzorku číslo 7 ukazují, že UV fluorescenční látka se dostala do vzorku poměrně hluboko, a to po hranicích minerálních zrn a trhlínkách v nich. Dále je zjevné, že látka je schopna impregnovat i do zrn a postupovat po jejich štěpnosti.

6.3 Rtuťová porozimetrie

Tato měření probíhala na přístroji Pascal 240, který je v majetku ÚSMH AV ČR, v.v.i..

V následujících tabulkách jsou výsledky jednotlivých měření. Byly měřeny 3 vzorky, z nich každý dvakrát.

VZOREK 1a:

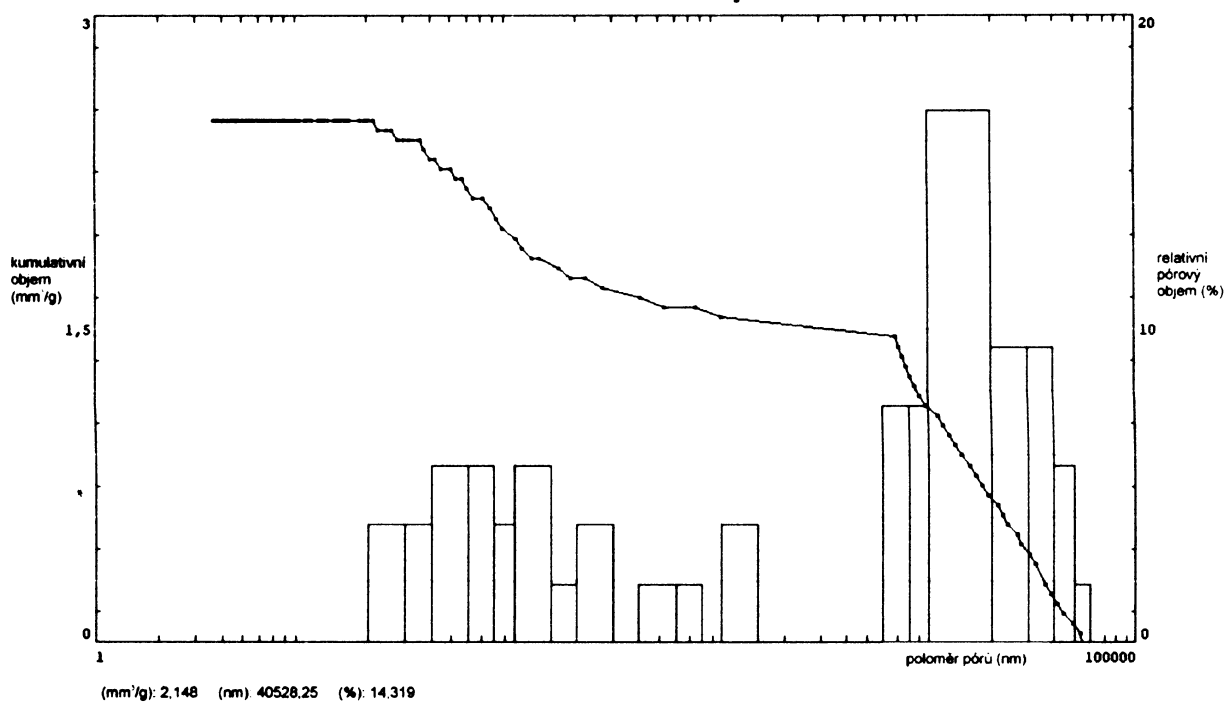
Tab. 3. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 1a.

Celkový kumulativní objem [mm^3/g]	2,50
Celkový specifický povrch [m^2/g]	0,030
Průměrný poloměr pórů [nm]	12016,67
Celková porozita [%]	0,66
Objemová hmotnost [g/cm^3]	2,66
Zdánlivá hustota [g/cm^3]	2,68

Tab. 4. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 1a (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Rozsah pórových poloměrů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Specifický povrch	Relativní povrch
[nm]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	[%]	[m ² /g]	[m ² /g]
60000-50000	0,05	0,05	1,89	0	0
50000-40000	0,19	0,14	5,66	0	0
40000-30000	0,42	0,24	9,43	0	0
30000-20000	0,66	0,24	9,43	0	0
20000-10000	1,08	0,42	16,98	0,0001	0,0001
10000-8000	1,27	0,19	7,55	0,0001	0
8000-6000	1,46	0,19	7,55	0,0002	0,0001
6000-4000	1,46	0	0	0,0002	0
4000-3000	1,46	0	0	0,0002	0
3000-2000	1,46	0	0	0,0002	0
2000-1500	1,46	0	0	0,0002	0
1500-1000	1,56	0,09	3,77	0,0004	0,0002
1000-800	1,56	0	0	0,0004	0
800-600	1,60	0,05	1,89	0,0005	0,0001
600-400	1,65	0,05	1,89	0,0007	0,0002
400-300	1,65	0	0	0,0007	0
300-200	1,75	0,09	3,77	0,0015	0,0008
200-150	1,79	0,05	1,89	0,0021	0,0006
150-100	1,93	0,14	5,66	0,0046	0,0025
100-80	2,03	0,09	3,77	0,0067	0,0022
80-60	2,17	0,14	5,66	0,0108	0,0041
60-40	2,31	0,14	5,66	0,0166	0,0057
40-30	2,41	0,09	3,77	0,0217	0,0051
30-20	2,50	0,09	3,77	0,0296	0,0079
20-15	2,50	0	0	0,0296	0
15-10	2,50	0	0	0,0296	0
10-8	2,50	0	0	0,0296	0
8-6	2,50	0	0	0,0296	0
6-4	2,50	0	0	0,0296	0
4-3	2,50	0	0	0,0296	0
3-2	2,50	0	0	0,0296	0
2-1	2,50	0	0	0,0296	0

Distribuce velikosti pórů



Obr. 34. Graf distribucí pórů ve vzorku 1a.

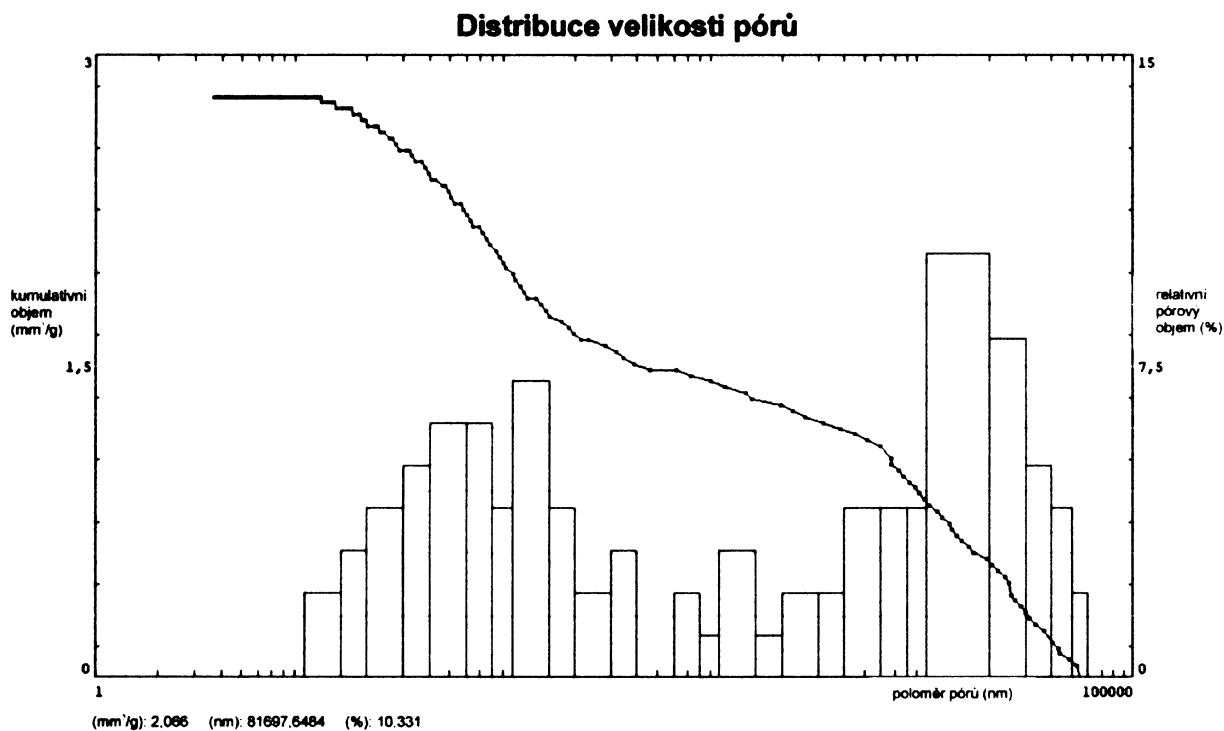
VZOREK 1b:

Tab. 5. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 1b.

Celkový kumulativní objem [mm ³ /g]	2,80
Celkový specifický povrch [m ² /g]	0,056
Průměrný poloměr pórů [nm]	12662,09
Celková porozita [%]	0,74
Objemová hmotnost [g/cm ³]	2,63
Zdánlivá hustota [g/cm ³]	2,65

Tab. 6. Tabulka distribuce velikosti pórů pro vzorek 1b (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Rozsah pórových poloměrů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Specifický povrch	Relativní povrch
[nm]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	[%]	[m ² /g]	[m ² /g]
60000-50000	0,06	0,06	2,04	0	0
50000-40000	0,17	0,11	4,08	0	0
40000-30000	0,31	0,14	5,10	0	0
30000-20000	0,54	0,23	8,16	0	0
20000-10000	0,83	0,29	10,20	0,0001	0
10000-8000	0,94	0,11	4,08	0,0001	0
8000-6000	1,06	0,11	4,08	0,0001	0
6000-4000	1,17	0,11	4,08	0,0002	0
4000-3000	1,23	0,06	2,04	0,0002	0
3000-2000	1,28	0,06	2,04	0,0003	0
2000-1500	1,31	0,03	1,02	0,0003	0
1500-1000	1,40	0,09	3,06	0,0004	0,0001
1000-800	1,43	0,03	1,02	0,0005	0,0001
800-600	1,48	0,06	2,04	0,0007	0,0002
600-400	1,48	0	0	0,0007	0
400-300	1,57	0,09	3,06	0,0012	0,0005
300-200	1,63	0,06	2,04	0,0016	0,0004
200-150	1,74	0,11	4,08	0,0029	0,0013
150-100	1,94	0,20	7,14	0,0063	0,0034
100-80	2,06	0,11	4,08	0,0089	0,0026
80-60	2,23	0,17	6,12	0,0139	0,0050
60-40	2,40	0,17	6,12	0,0207	0,0068
40-30	2,54	0,14	5,10	0,0287	0,0080
30-20	2,66	0,11	4,08	0,0379	0,0091
20-15	2,74	0,09	3,06	0,0473	0,0094
15-10	2,80	0,06	2,04	0,0563	0,0089
10-8	2,80	0	0	0,0563	0
8-6	2,80	0	0	0,0563	0
6-4	2,80	0	0	0,0563	0
4-3	2,80	0	0	0,0563	0
3-2	2,80	0	0	0,0563	0
2-1	2,80	0	0	0,0563	0



Obr. 35. Graf distribucí pórů ve vzorku 1b.

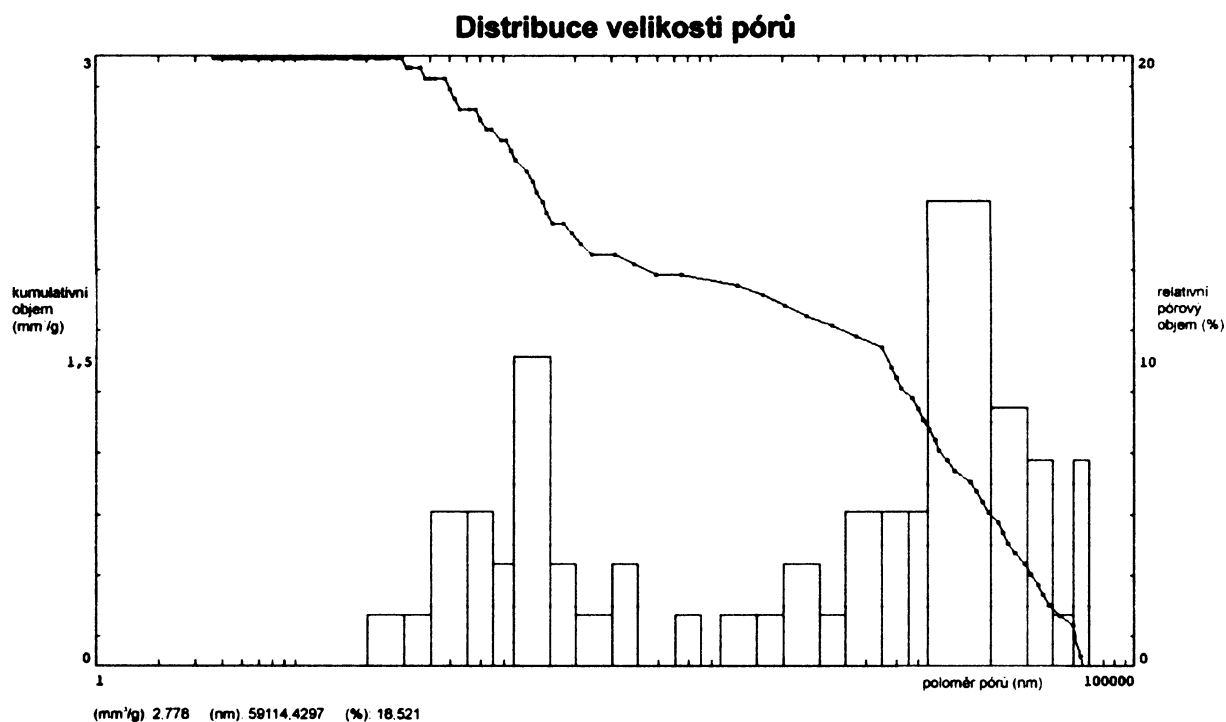
VZOREK 2a:

Tab. 7. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 2a.

Celkový kumulativní objem [mm³/g]	2,99
Celkový specifický povrch [m²/g]	0,026
Průměrný poloměr pórů [nm]	16739,21
Celková porozita [%]	0,78
Objemová hmotnost [g/cm³]	2,61
Zdánlivá hustota [g/cm³]	2,63

Tab. 8. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 2a (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Rozsah pórových poloměrů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Specifický povrch	Relativní povrch
[nm]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	[%]	[m ² /g]	[m ² /g]
60000-50000	0,20	0,20	6,78	0	0
50000-40000	0,25	0,05	1,69	0	0
40000-30000	0,46	0,20	6,78	0	0
30000-20000	0,71	0,25	8,47	0	0
20000-10000	1,17	0,46	15,25	0,0001	0,0001
10000-8000	1,32	0,15	5,08	0,0001	0
8000-6000	1,47	0,15	5,08	0,0002	0
6000-4000	1,62	0,15	5,08	0,0002	0,0001
4000-3000	1,67	0,05	1,69	0,0003	0
3000-2000	1,77	0,10	3,39	0,0004	0,0001
2000-1500	1,82	0,05	1,69	0,0004	0,0001
1500-1000	1,88	0,05	1,69	0,0005	0,0001
1000-800	1,88	0	0	0,0005	0
800-600	1,93	0,05	1,69	0,0007	0,0002
600-400	1,93	0	0	0,0007	0
400-300	2,03	0,10	3,39	0,0013	0,0006
300-200	2,08	0,05	1,69	0,0017	0,0005
200-150	2,18	0,10	3,39	0,0028	0,0011
150-100	2,48	0,30	10,17	0,0077	0,0049
100-80	2,59	0,10	3,39	0,0098	0,0021
80-60	2,74	0,15	5,08	0,0141	0,0043
60-40	2,89	0,15	5,08	0,0202	0,0061
40-30	2,94	0,05	1,69	0,0230	0,0028
30-20	2,99	0,05	1,69	0,0264	0,0034
20-15	2,99	0	0	0,0264	0
15-10	2,99	0	0	0,0264	0
10-8	2,99	0	0	0,0264	0
8-6	2,99	0	0	0,0264	0
6-4	2,99	0	0	0,0264	0
4-3	2,99	0	0	0,0264	0
3-2	2,99	0	0	0,0264	0
2-1	2,99	0	0	0,0264	0



Obr. 36. Graf distribucí pórů ve vzorku 2a.

VZOREK 2b:

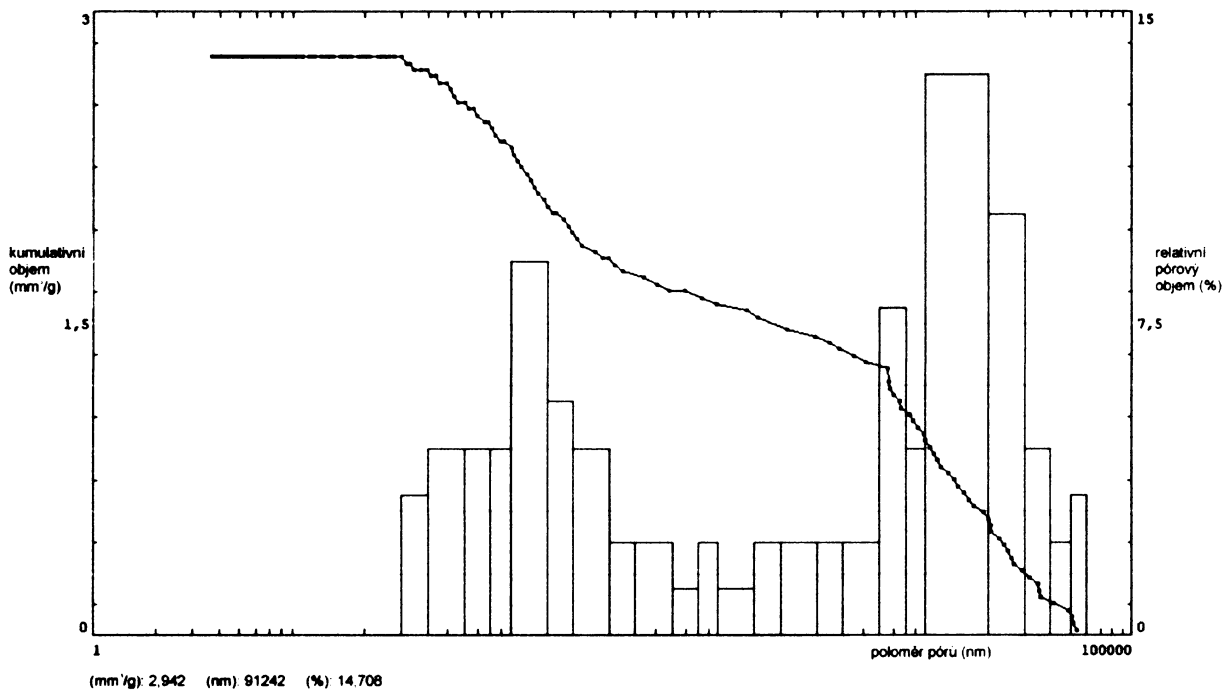
Tab. 9. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 2b.

Celkový kumulativní objem [mm³/g]	2,78
Celkový specifický povrch [m²/g]	0,025
Průměrný poloměr pórů [nm]	16223,75
Celková porozita [%]	0,73
Objemová hmotnost [g/cm³]	2,62
Zdánlivá hustota [g/cm³]	2,64

Tab. 10. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 2b (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Rozsah pórových poloměrů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Specifický povrch	Relativní povrch
[nm]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	[%]	[m ² /g]	[m ² /g]
60000-50000	0,09	0,09	3,37	0	0
50000-40000	0,16	0,06	2,25	0	0
40000-30000	0,28	0,13	4,49	0	0
30000-20000	0,56	0,28	10,11	0	0
20000-10000	0,94	0,38	13,48	0,0001	0,0001
10000-8000	1,06	0,13	4,49	0,0001	0
8000-6000	1,28	0,22	7,87	0,0002	0,0001
6000-4000	1,34	0,06	2,25	0,0002	0
4000-3000	1,41	0,06	2,25	0,0002	0
3000-2000	1,47	0,06	2,25	0,0003	0,0001
2000-1500	1,53	0,06	2,25	0,0004	0,0001
1500-1000	1,56	0,03	1,12	0,0004	0
1000-800	1,63	0,06	2,25	0,0006	0,0001
800-600	1,66	0,03	1,12	0,0007	0,0001
600-400	1,72	0,06	2,25	0,0009	0,0003
400-300	1,78	0,06	2,25	0,0013	0,0004
300-200	1,91	0,13	4,49	0,0023	0,0010
200-150	2,06	0,16	5,62	0,0041	0,0018
150-100	2,31	0,25	8,99	0,0083	0,0041
100-80	2,44	0,13	4,49	0,0111	0,0028
80-60	2,56	0,13	4,49	0,0147	0,0037
60-40	2,69	0,13	4,49	0,0198	0,0051
40-30	2,78	0,09	3,37	0,0254	0,0056
30-20	2,78	0	0	0,0254	0
20-15	2,78	0	0	0,0254	0
15-10	2,78	0	0	0,0254	0
10-8	2,78	0	0	0,0254	0
8-6	2,78	0	0	0,0254	0
6-4	2,78	0	0	0,0254	0
4-3	2,78	0	0	0,0254	0
3-2	2,78	0	0	0,0254	0
2-1	2,78	0	0	0,0254	0

Distribuce velikosti pórů



Obr. 37. Graf distribucí pórů ve vzorku 2b.

VZOREK 3a:

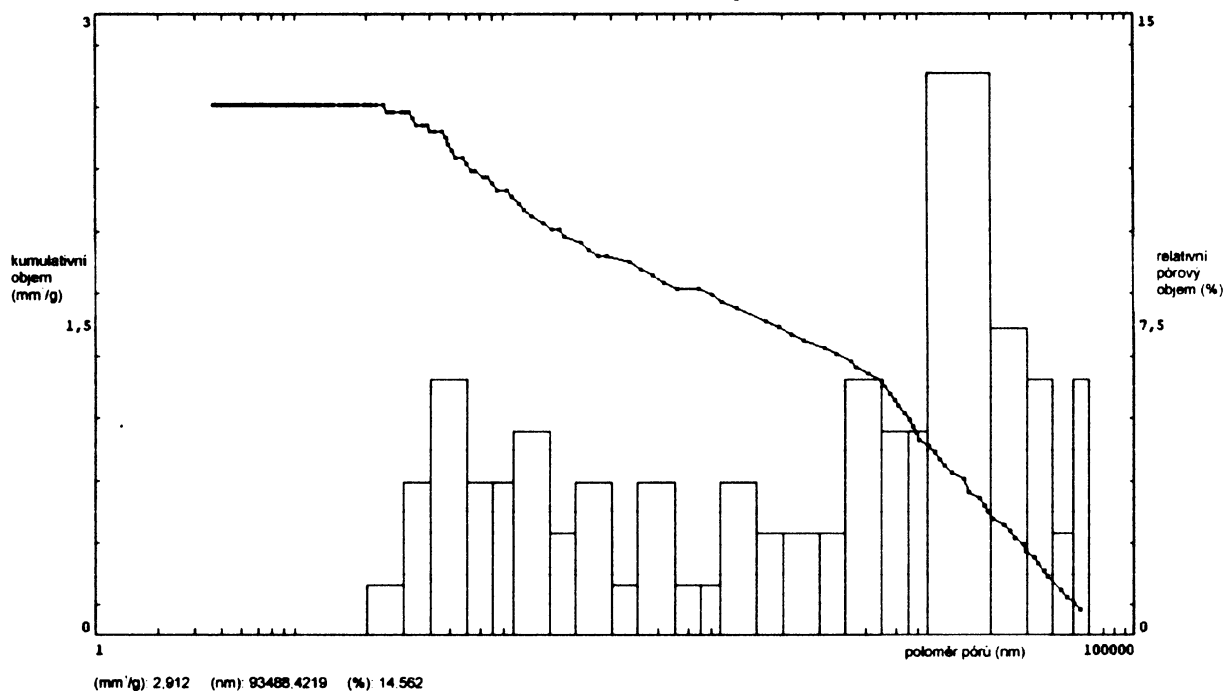
Tab. 11. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 3a

Celkový kumulativní objem [mm ³ /g]	2,56
Celkový specifický povrch [m ² /g]	0,024
Průměrný poloměr pórů [nm]	16499,40
Celková porozita [%]	0,68
Objemová hmotnost [g/cm ³]	2,65
Zdánlivá hustota [g/cm ³]	2,67

Tab. 12. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 3a (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Rozsah pórových poloměrů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Specifický povrch	Relativní povrch
[nm]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	[%]	[m ² /g]	[m ² /g]
60000-50000	0,16	0,16	6,17	0	0
50000-40000	0,22	0,06	2,47	0	0
40000-30000	0,38	0,16	6,17	0	0
30000-20000	0,57	0,19	7,41	0	0
20000-10000	0,92	0,35	13,58	0,0001	0,0001
10000-8000	1,04	0,13	4,94	0,0001	0
8000-6000	1,17	0,13	4,94	0,0001	0
6000-4000	1,33	0,16	6,17	0,0002	0,0001
4000-3000	1,39	0,06	2,47	0,0002	0
3000-2000	1,45	0,06	2,47	0,0003	0,0001
2000-1500	1,52	0,06	2,47	0,0004	0,0001
1500-1000	1,61	0,09	3,70	0,0005	0,0002
1000-800	1,64	0,03	1,23	0,0006	0,0001
800-600	1,68	0,03	1,23	0,0007	0,0001
600-400	1,77	0,09	3,70	0,0011	0,0004
400-300	1,80	0,03	1,23	0,0013	0,0002
300-200	1,90	0,09	3,70	0,0020	0,0008
200-150	1,96	0,06	2,47	0,0028	0,0007
150-100	2,09	0,13	4,94	0,0049	0,0021
100-80	2,18	0,09	3,70	0,0070	0,0021
80-60	2,28	0,09	3,70	0,0098	0,0028
60-40	2,43	0,16	6,17	0,0161	0,0063
40-30	2,53	0,09	3,70	0,0216	0,0055
30-20	2,56	0,03	1,23	0,0242	0,0026
20-15	2,56	0	0	0,0242	0
15-10	2,56	0	0	0,0242	0
10-8	2,56	0	0	0,0242	0
8-6	2,56	0	0	0,0242	0
6-4	2,56	0	0	0,0242	0
4-3	2,56	0	0	0,0242	0
3-2	2,56	0	0	0,0242	0
2-1	2,56	0	0	0,0242	0

Distribuce velikosti pórů



Obr. 38. Graf distribuci pórů ve vzorku 3a.

VZOREK 3b:

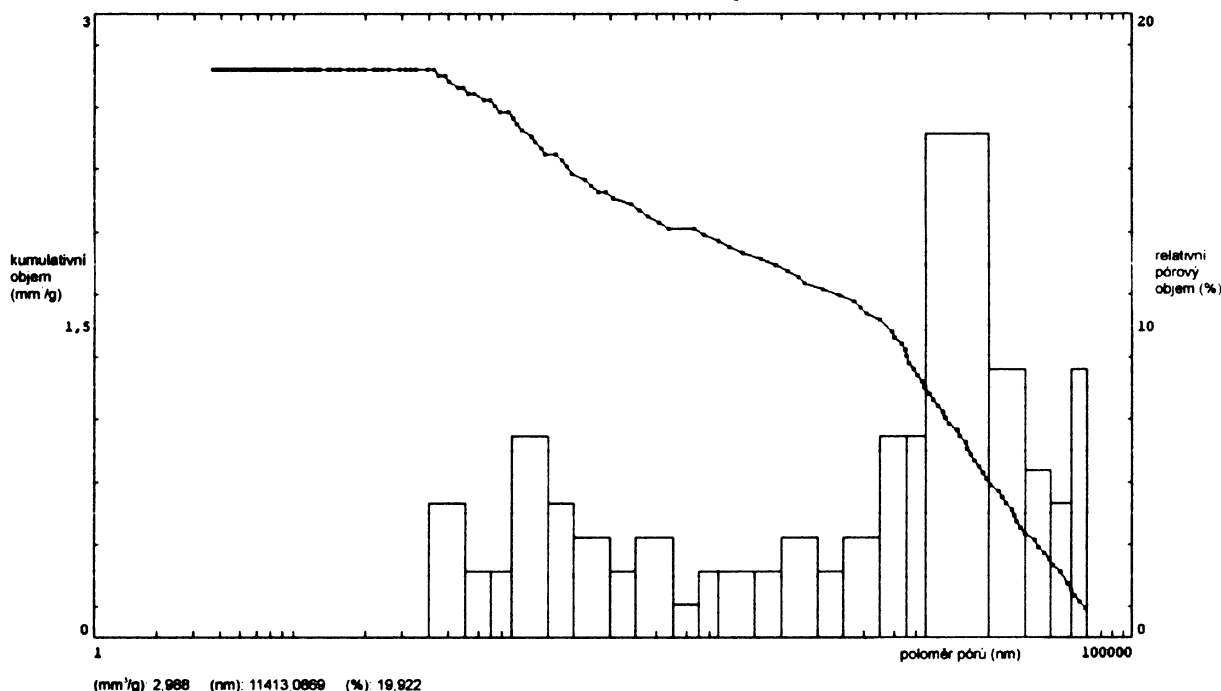
Tab. 13. Výsledky Hg – porozimetrie pro vzorek 3b.

Celkový kumulativní objem [mm³/g]	2,73
Celkový specifický povrch [m²/g]	0,014
Průměrný poloměr pórů [nm]	16598,39
Celková porozita [%]	0,72
Objemová hmotnost [g/cm³]	2,64
Zdánlivá hustota [g/cm³]	2,66

Tab. 14. Tabulka distribucí velikosti pórů pro vzorek 3b (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Rozsah pórových poloměrů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Specifický povrch	Relativní povrch
[nm]	[mm ³ /g]	[mm ³ /g]	[%]	[m ² /g]	[m ² /g]
60000-50000	0,23	0,23	8,60	0	0
50000-40000	0,35	0,12	4,30	0	0
40000-30000	0,50	0,15	5,38	0	0
30000-20000	0,73	0,23	8,60	0	0
20000-10000	1,17	0,44	16,13	0,0001	0,0001
10000-8000	1,35	0,18	6,45	0,0001	0
8000-6000	1,53	0,18	6,45	0,0002	0,0001
6000-4000	1,62	0,09	3,23	0,0002	0
4000-3000	1,67	0,06	2,15	0,0003	0
3000-2000	1,76	0,09	3,23	0,0003	0,0001
2000-1500	1,82	0,06	2,15	0,0004	0,0001
1500-1000	1,88	0,06	2,15	0,0005	0,0001
1000-800	1,94	0,06	2,15	0,0006	0,0001
800-600	1,97	0,03	1,08	0,0007	0,0001
600-400	2,06	0,09	3,23	0,0011	0,0004
400-300	2,11	0,06	2,15	0,0014	0,0003
300-200	2,20	0,09	3,23	0,0021	0,0007
200-150	2,32	0,12	4,30	0,0035	0,0013
150-100	2,50	0,18	6,45	0,0065	0,0030
100-80	2,56	0,06	2,15	0,0078	0,0013
80-60	2,61	0,06	2,15	0,0094	0,0016
60-40	2,73	0,12	4,30	0,0142	0,0048
40-30	2,73	0	0	0,0142	0
30-20	2,73	0	0	0,0142	0
20-15	2,73	0	0	0,0142	0
15-10	2,73	0	0	0,0142	0
10-8	2,73	0	0	0,0142	0
8-6	2,73	0	0	0,0142	0
6-4	2,73	0	0	0,0142	0
4-3	2,73	0	0	0,0142	0
3-2	2,73	0	0	0,0142	0
2-1	2,73	0	0	0,0142	0

Distribuce velikosti pórů



Obr. 39. Graf distribucí pórů ve vzorku 3b.

Tab. 15. Tabulka shrnutí naměřených výsledků z Hg-porozimetrie.

Vzorek		V_c [mm ³ /g]	S_c [m ² /g]	r [nm]	d_{Hg} [g/cm ³]	Por [%]	Propustnost [mD]
č. 1	a	2,50	0,030	12017	2,66	0,66	4.9 +/- 5%
	b	2,80	0,056	12662	2,63	0,74	
č. 2	a	2,99	0,026	16739	2,61	0,78	1.1 +/- 5%
	b	2,78	0,025	16224	2,62	0,73	
č. 3	a	2,56	0,024	16499	2,65	0,68	1.5 +/- 5%
	b	2,73	0,014	16598	2,64	0,72	

V_c – celkový objem pórů podle Hg porozimetrie [mm³/g]

S_c – celkový povrch pórů podle Hg porozimetrie [m²/g]

r – střední poloměr pórů [nm]

d_{Hg} – zdánlivá rtuťová hustota [g/cm³]

Por – porozita [%]

Výsledky ze rtuťové porozimetrie ukázaly, že relativní objem mesopórů je minimální, ve dvou případech ze šesti dokonce dosahoval 0 %. Oproti tomu, nejvýznamnější podíl tvoří makropóry a hrubé póry, tedy prostory (trhliny a póry) s větším poloměrem.

6.4 Plynopropustnost

Tab. 16. Naměřené výsledky z plynopropustnosti (1. část).

Číslo vzorku	S [cm ²]	h [cm]	p ₁ ^{změř} [kpa]	p ₂ ^{změř} [kpa]	P _{in} [atm]	P _{out} [torr]	t [min]
1	12,57	0,84	63	60	1,62	2	45
1	12,57	0,84	60	59	1,60	2	45
1	12,57	0,84	59	59	1,59	1	45
2	12,57	0,80	67	65	1,66	1	45
2	12,57	0,80	65	65	1,65	1	45
2	12,57	0,80	65	65	1,65	1	45
3	12,57	0,90	65	64	1,65	2	55
3	12,57	0,90	67	66	1,67	2	55
3	12,57	0,90	66	66	1,66	2	55

Tab. 17. Naměřené výsledky z plynopropustnosti (2. část).

Číslo vzorku	m ^{pr.} [g]	m ^{plná} [g]	m _{H₂O} [g]	Q [cm ³ /s]	k [mD]	průměr [μD]	odchylka [%]
1	20,220	29,340	9,120	0,00338	0,00468		+/- 5%
1	20,610	29,880	9,270	0,00343	0,00495	4,9	
1	20,380	29,610	9,230	0,00342	0,00497		
2	20,520	22,930	2,410	0,00089	0,00108		+/- 5%
2	20,920	23,210	2,290	0,00085	0,00104	1,1	
2	20,410	22,730	2,320	0,00086	0,00106		
3	20,820	24,370	3,550	0,00108	0,00150		+/- 5%
3	20,910	24,532	3,622	0,00110	0,00148	1,5	
3	20,350	23,910	3,560	0,00108	0,00147		

S – plocha vzorku	[cm ²]
h – výška vzorku	[cm]
p ₁ – vstupní tlak	[kPa]
p ₂ – vstupní tlak	[kPa]
p _{in} – průměrný vstupní tlak	[atm]
p _{out} – výstupní tlak	[torr]
t – doba měření	[min]
m ^{pr} – hmotnost prázdné nádoby před měřením	[g]
m ^{plná} – hmotnost nádoby po měření	[g]
m _{H₂O} – hmotnost vody vytlačené během měření	[g]

Q – průtok	[cm ³ /s]
k – koeficient filtrace	[mD]
<i>průměr</i> – průměr koeficientů filtrace	[μD]

6.5 Měření pórovitosti dle ČSN 72 1143

Tab. 18. Výpočty z hodnot naměřených dle ČSN 72 1143 (1. část).

Číslo vzorku	m_d [g]	m_h [g]	m_s [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	m_e [g]
1	769,40	294,50	771,17	79,57	73,15	10,26
2	768,71	294,27	770,48	81,93	75,29	10,63

Tab. 19. Výpočty z hodnot naměřených dle ČSN 72 1143 (2. část).

Číslo vzorku	V_o [ml]	V_b [ml]	ρ_b [kg/m ³]	p_o [%]	ρ_r [kg/m ³]	p [%]
1	1,774	477,625	2613,337	0,371	2666,531	1,995
2	1,774	477,164	2613,039	0,372	2658,832	1,722

m_d – hmotnost vysušeného zkušební tělesa	[g]
m_h – hmotnost zkušební tělesa ponořeného do vody	[g]
m_s – hmotnost nasyceného zkušební tělesa	[g]
m_e – hmotnost rozetřeného a vysušeného zkušební tělesa	[g]
m_1 – hmotnost pyknometru naplněného vodou a rozetřeným zkušebním tělesem	[g]
m_2 – hmotnost pyknometru naplněného vodou	[g]
V_b – zdánlivý objem zkušební tělesa	[ml]
V_o – objem otevřených pórů ve zkušebním tělese	[ml]
V_s – objem tekutiny nahrazené hmotností m_e	[ml]
ρ_b – objemová hmotnost zkušební tělesa	[kg/m ³]
ρ_r – měrná hmotnost zkušební tělesa	[kg/m ³]
ρ_{rh} – hustota vody	[kg/m ³]
p_o – otevřená pórovitost zkušební tělesa	[%]
p – celková pórovitost zkušební tělesa	[%]

Výše uvedené Tab. 18 a 19 obsahují naměřené a vypočtené hodnoty podle ČSN 71 1143.

Výsledky získané metodou rtuťové porozimetrie a měřením dle ČSN 72 1143 nabývají zhruba stejných hodnot a byly získány ze vzorků, které pocházely z jednoho vrtného jádra.

6.6 Stanovení propustnosti zemin při konstantním spádu dle ČSN 72 1007

Podmínky měření:

Tab. 20. Podmínky měření.

Konsolidační tlak [kPa]	Sytící tlak [kPa]	Hydraulický sklon	Průměrná tepl. při zk. [°C]	Koef. filtrace přep. na teplotu [°C]	Zdánlivá hustota pevných částic horniny [kg/m ³]
300	300	197	22,7	10	2663

Tab. 21. Hodnoty naměřené před zkouškou.

Průměr zkušebního tělesa [mm]	Výška tělesa [mm]	Vlhkost před zkouškou [%]	Objemová hmotnost vlhká před zkouškou [kg/m ³]	Objemová hmotnost suchá před zkouškou [kg/m ³]	Stupeň nasycení před zkouškou
57,905	63,0	0,1	2624	2621	0,17
Nejistoty měření		0,0%	1%	1%	neuvádějí se

Tab. 22. Hodnoty naměřené po zkoušce.

Vlhkost zeminy po zkoušce [%]	Objemová hm. vlhká po zk. [kg/m ³]	Objemová hm. suchá po zk. [kg/m ³]	Stupeň nasycení po zkoušce
0,1	2625	2621	0,23
Nejistoty se neuvádějí			

Výsledný naměřený koeficient filtrace přepočtený na hodnotu k_{f0} byl $9,13 \cdot 10^{-13}$ [m/s].

7. DISKUSE

Elektronová skenovací mikroskopie

Pro elektronovou skenovací mikroskopii byly využity vzorky, které byly naimpregnovány několika typy směsí látek, které jsou uvedeny v Tab. 1. Všechny směsi obsahovaly pryskyřici (M541 nebo M704) a některé ještě obsahovaly přídavek Co nebo Cu. Tyto prvky byly zvoleny vzhledem k jejich atomové hmotnosti, tak aby byly těžší než ^{56}Fe . Ve výsledcích se však ukázalo, že jejich koncentrace byla ve směsi příliš nízká, a tak nebylo možno jejich přítomnosti využít pro detekci cest látky horninou. Zvýšení koncentrace kovu v pryskyřici nebylo možné, protože se výrazně měnily fyzikálně-chemické vlastnosti použité pryskyřice. K tomuto účelu však velmi dobře posloužil uhlík, který je obsažen v pryskyřici, avšak v granitu se běžně nevyskytuje. Bylo tedy využito možnosti mapování uhlíku. Všechny snímky byly pořízeny jak v sekundárních (SEI), tak zpětně odražených elektronech (BEI) a v uhlíkové rentgenové distribuční mapě. Pro prvotní orientaci byly mapy SEI (Obr. 8.) a BEI (Obr. 9.) pořízeny ve čtyřicetinasobném zvětšení a rentgenová distribuční mapa uhlíku (Obr.10.) v osmdesátinasobném zvětšení. Pro přesnější detekci uhlíku v hornině byly ještě pořízeny mapy v SEI (Obr. 11) a BEI (Obr. 12.) s osmdesátinasobným zvětšením, a rentgenová distribuční mapa uhlíku (Obr. 13.) a železa (Obr. 14.) ze stejného místa se stošedesátinasobným zvětšením. Z těchto snímků je patrné, že se impregnovaná látka dostala do horninových mikrotrhlin a postupovala podél hranic jednotlivých zrn a jejich mikrotrhlinami směrem do středu vzorku a to v množství, které je vůči svému okolí dostatečně kontrastní. Rentgenová distribuční mapa železa ukazuje na vznik sekundárních fází (goethit či limonit), které vznikly nejspíše z Fe uvolněného z biotitu. Tyto sekundární fáze se vyskytují ve stejných místech jako sledovaný uhlík, tedy podél hranic minerálních zrn a ve štěrbinách uvnitř minerálních zrn.

UV mikroskopie

Z fotografií získaných na UV mikroskopu, kdy vzorky (5 a 7) byly nasyceny dvěma typy látek s přídavkem UV fluorescenční látky, a poté podrobeny pozorování a fotodokumentaci, je patrné, že obě testované látky byly schopné impregnovat granitový vzorek dostatečně hluboko. Látky byly registrovány i v centru vzorku, tedy zhruba 1 – 1,5 cm od okraje. K postupu horninovou strukturou jim sloužily hranice minerálních zrn a mikrotrhliny v minerálních zrnech. Látka však prostupovala jednotlivými zrny i po jejich štěpnosti, jak je patrné na Obr. 33 kde se látka nachází v mikrotrhlinách štěpnosti plagioklasu. Na prostupnost látkou minerálními zrny byla náchylnější zrna plagioklasů a křemenů. Biotit byl v tomto směru inertní, jak je patrné z Obr. 24, 28 a 32.

Hg-porozimetrie

Rtuťová porozimetrie byla měřena na šesti vzorcích, z nichž vždy dva pocházely z jednoho kusu vzorku horniny (1-2; 3-4; 5-6). V rámci měření byly získány tyto hodnoty \emptyset (průměrná hodnota pro všechna měření):

- celkový kumulativní objem $\emptyset = 2,73 \text{ [mm}^3\text{/g]}$ SMODCH = 0,18
- celkový specifický povrch $\emptyset = 0,029 \text{ [mm}^2\text{/g]}$ SMODCH = 0,014
- průměrný poloměr pórů $\emptyset = 15123 \text{ [nm]}$ SMODCH = 2173
- otevřená porozita $\emptyset = 0,72 \text{ [%]}$ SMODCH = 0,04
- objemová hmotnost $\emptyset = 2,63 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ SMODCH = 0,02
- zdánlivá hustota $\emptyset = 2,65 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ SMODCH = 0,02

Tab. 23 shrnuje jednotlivé výsledky pro meso (1-30 nm), makro (30-8000 nm) a hrubé póry (8000-60000 nm). Hranice mezi jednotlivými velikostními kategoriemi pórů byly oproti IUPAC mírně posunuty, neboť tabulka výsledků z Hg-porozimetrie nerespektovala přesně dané hranice velikosti poloměrů jednotlivých

skupin pórů. Tato metoda také neumožnila sledovat jednotlivé hodnoty pro mikropóry, které nemohly být detekovány, neboť jsou pod hranicí detekce této metody. Z Tab. 23 je patrné, že mesopóry mají na celkovém relativním objemu jen minimální podíl mezi 0 – 9 %. Téměř veškerý relativní objem pórů tedy tvoří makro a hrubé póry. U pěti ze šesti měření mají o 1 – 24 % větší podíl makropóry. Specifický objem hrubých pórů je v rozmezí od 2,85 – 4,33 [mm³/g], makropórů od 27,95 – 36,01 [mm³/g] a mesopórů od 22,5 – 26,91 [mm³/g]. Specifický povrch hrubých pórů byl naměřen u všech šesti vzorků shodný a to 0,0002 [mm²/g], u makropórů byl naměřeny hodnoty v rozmezí od 0,0634 – 0,0909 [mm²/g] a u mesopórů byla naměřena hodnota v rozmezí od 0,1278 – 0,4793 [mm²/g]. Relativní povrch nabýval významnějších hodnot jen u makropórů, kde se pohyboval mezi 0,014 – 0,0284 [mm²/g] u zbylých dvou kategorií pórů byl téměř nulový.

Průměrná otevřená porozita hornin byla dle naměřených hodnot vypočtena na 0,72 %. Její hodnoty se u jednotlivých vzorků pohybovaly mezi 0,66 – 0,78 %. Tyto hodnoty dle (Norton a Knapp, 1977; Skagius a Neretnieks, 1986) odpovídají hodnotám porozity nealterovaných granitů, které se dle nich pohybují v rozmezí 0,2 – 1 %, což odpovídá předpokladům, že testovaná hornina je nealterovaná.

Tab. 23. Porovnání výsledků jednotlivých hodnot pro meso, makro a hrubé póry (hodnoty získané z Hg-porozimetrie se všemi desetinnými místy).

Číslo vzorku	Velikost pórů	Relativní objem [%]	Relativní objem [mm ³ /g]	Specif. objem [mm ³ /g]	Specif. povrch [mm ² /g]	Relativní povrch [mm ² /g]
1	meso	3,77	0,09	22,5	0,2664	0,0079
	makro	45,28	1,12	29,71	0,0677	0,0216
	hrubé p.	50,94	1,28	3,67	0,0002	0,0001
2	meso	9,18	0,26	25	0,4793	0,0274
	makro	57,12	1,6	27,95	0,0876	0,0284
	hrubé p.	33,66	0,94	2,85	0,0002	0
3	meso	1,69	0,05	26,91	0,2376	0,0034
	makro	54,19	1,6	35,9	0,0845	0,023
	hrubé p.	44,05	1,31	4,11	0,0002	0,0001
4	meso	0	0	25,02	0,2286	0
	makro	61,8	1,72	32,13	0,0909	0,0253
	hrubé p.	38,19	1,07	3,09	0,0002	0,0001
5	meso	1,23	0,03	23,04	0,2178	0,0026
	makro	57,99	1,45	30,73	0,0696	0,0216
	hrubé p.	40,74	1,05	3,29	0,0002	0,0001
6	meso	0	0	24,57	0,1278	0
	makro	50,55	1,41	36,01	0,0634	0,014
	hrubé p.	49,46	1,35	4,33	0,0002	0,0001

Plynopropustnost

Plynopropustnost byla měřena na třech vzorcích (stejných, na kterých byla naměřena Hg-porozimetrie), z toho každé měření proběhlo 3x. U vzorku číslo 1 byla průměrná vypočtená hodnota *k* (koeficient

propustnosti) 4,9 μD , u vzorku číslo 2 $k = 1,1 \mu\text{D}$ a u vzorku číslo 3 $k = 1,5 \mu\text{D}$. Malý rozdíl hodnot mezi vzorkem číslo 1 a zbylými dvěma vzorky mohl být způsobený drobným rozdílem minerálního složení vzorků. Dle těchto výsledků se hornina jeví jako téměř nepropustná, horniny typu pískovce, které se pokládají za horniny propustné, mají k v rozmezí od $X - X_0 \text{ mD}$.

ČSN 72 1143

Porozita čerstvých, tedy nealterovaných granitů a rul se pohybuje mezi 0,2 – 1 %, po alteraci či zvětrávání se pohybuje mezi hodnotami 1 – X % (Norton a Knapp, 1977; Skagius a Neretnieks, 1986). Dle naměřených hodnot je otevřená porozita testovaného typu granitu zhruba 0,37 % a celková porozita se pohybuje mezi 1,7 až 2 %. To by odpovídalo hornině alterované, avšak vzhledem k tomu, že náš vzorek pocházel z horniny nealterované, je jeho vyšší celková porozita způsobená jinými příčinami, kterými mohou být podmínky vzniku horniny či rozdílné složení hornin a v neposlední řadě i určitá chyba při měření.

ČSN 72 1007

Naměřená hodnota k_{10} (koeficient filtrace) je $9,13 \cdot 10^{-13} \text{ [m/s]}$. Tato hodnota je velmi nízká a hornina je vůči běžně propustným horninám jako jsou například pískovce řazena mezi horniny téměř nepropustné. Tato hodnota je však také důkazem, že hornina je téměř nepropustná, avšak určité, sice malé, množství vody jí projít může. A to je právě velmi důležité v hlubinném úložišti radioaktivního odpadu, kde by touto horninou mohly unikat radionuklidy uvolněné z radioaktivního odpadu.

8. ZÁVĚR

V předkládané práci bylo použito celkem 6 metod pro zjištění porozity a propustnosti granitu. Elektronový skenovací mikroskop a UV mikroskop se spolu s impregnací horniny pryskyřicí (v případě UV mikroskopu ještě s aditivem UV kontrastní látky) jeví jako velmi vhodné metody pro vizuální zjištění jak vypadají póry, štěrbin a mikrotrhliny v horninách (jaký mají tvar, délku aj.). U těchto dvou metod je také možné pozorovat, kde přesně se látka v hornině nachází, a jaké jsou její přírodní cesty do horniny a kudy se látka v hornině pohybuje: zda transgranulárními póry (přetínají minerální zrna), intergranulárními póry (na hranicích zrn, propojují pórové sítě) nebo intragranulárními póry (nacházejí se uvnitř minerálních zrn). Z fotografií získaných na UV mikroskopu je patrné, že použitá pryskyřice se v hornině objevila ve všech třech typech pórů. Kombinací těchto dvou metod vznikly výsledky, které jsou velmi podobné datům z laserové konfokální mikroskopie prezentované např. v práci Montoto a Mates (2006).

Hg-porozimetrie a stanovení porozity dle ČSN 72 1143 jsou metody vhodné pro zjištění celkové či otevřené porozity. Hg-porozimetrie však nedává informace o mikropórech, které jsou pod hranicí detekce této metody, ale pouze o meso, makro a hrubých pórech horniny. Měření podle ČSN 72 1143 poskytuje informace pouze o otevřené a celkové porozitě horniny, nikoli však o velikosti a jiných údajích o pórech. Podle Hg-porozimetrie má testovaný granit otevřenou porozitu v rozmezí od 0,66 – 0,78 %. Při měření podle ČSN 72 1143 byly vypočteny hodnoty otevřené porozity 0,37 % a celkové porozity od 1,7 – 2 %.

Metody stanovení propustnosti granitu, které byly použity v předkládané práci, byly plynopropustnost a stanovení propustnosti dle ČSN 72 1007. Plynopropustnost nabývala hodnot od 1,1 – 4,9 μD a koeficient filtrace dle ČSN 72 1143 byl roven $9,13 \cdot 10^{-13}$ [m/s]. Obě tyto metody shodně kategorizovaly granit do hornin téměř nepropustných. Jak se však ukázalo u jiných metod, póry, štěrbin a mikrotrhliny v granitech existují a v případě použití granitoidních masívů k výstavbě jaderného úložiště je třeba s nimi počítat pro případný nežádoucí transport látek.

Jako ideální pro získání komplexních informací o celkové a otevřené porozitě granitu se tedy jeví kombinace několika metod. Doporučit lze např. Hg-porozimetrii, kterou získáme číselné hodnoty otevřené porozity. Potřebné údaje o velikosti a tvarových vlastnostech pórů lze pak zjistit pomocí UV mikroskopie v kombinaci s impregnací horniny pryskyřicí s přídavkem UV kontrastní látky.

9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

Brakel, J. van and Heertjes, P. M., 1974. Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor. *Int. J. of Heat Mass Transfer*. Vol. 17, 1093-1103

ČSN 72 1143

ČSN 72 1007

Daniels, F. and Alberty, R. A., 1967. Physical Chemistry, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, p 384 (767).

Drake L.C., 1949. Pore-size distribution in porous materials. *Ind. and Eng. Chem.*, 780-785

Everett D.H. *IUPAC: Pure Appl. Chem.* 31, 579, 1972; *International Union of Pure and Applied Chemistry, Physical Chemistry Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units*, Butterworths, London

Geraud Y., Mazerolle F., Raynaud S., 1992. Comparison between connected and overall porosity of thermally stressed rhanites. *Journal of Struct. Geol.*, 14: 981-990.

Hron J., Tyráček J., Hradecký P., 1995. Základní geologická mapa ČR 1:50000 23-23 Kamenice nad Lipou. ČGÚ Praha

<http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2008/03/hydro-3.pdf> (30.4.2009)

http://www.vscht.cz/kat/download/lab09_porozimetrie.pdf (30.4.2009)

Interní metodika ÚSMH AV ČR, v.v.i.

Jamtveit B., Yardley B., 1997. Fluid Flow and Transport in Rocks, Mechanisms and Effects, Chapman & Hall, London

Katsube T.I., Kamineni D.C., 1983. Effect of alteration on pore structure of crystalline rocks: core samples from Atikokan, Ontario, *Can. Mineral.*, Vol.21, 637-646

Ketchman R.A, Carlson W.D., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & geosciences.*, (27)4: 381-400

Klobes P., Riesemeier H., Meyer K., Goebbels J., 1997. Rock porosity determination by combination of X-ray computerized tomography with mercury porosimetry. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 357: 543-54

Leonard E. C., 1978. Vinyl and diene monomers, Part 1, A Series of Monographs on the Chemistry, Physics, and Technology of High Polymeric Substances, Vol. XXIV, p 157.

Medek J., Kovář L., Weishauptová Z., 2006. Gas permeability of porous substances. *Collect. Czech. Chem. Commun.*, (71)9: 1320-1332

Mísař Z., Dudek A., Havlena V., Weiss J., 1983. Geologie ČSSR I, Český masív. SPN Praha

Montoto M., Mateos F., 2006. Characterization of water pathways in low permeable rocks at the rock matrix scale: Methodological review. *Journal of Iber. Geol.*, 32(2): 197-213.

Montoto M., Rey A. R., Nistal A. M., Sarria I. D., 1999. Fractographic Characterization by Quantitative Microscopy of the Excavation Disturbance Caused by Boring of the Experimental Full-Scale Deposition Holes in the Research Tunnel at Olkiluoto, Posiva Working Report 99-69, Posiva Oy, Helsinki. 76 p.

Neretnieks, I., 1980. Diffusion in the rock matrix: an important factor in radionuclide migration? *J. Geophys.* 85, 4379-4397

Norton D., Knapp R., 1977. Transport phenomena in hydrothermal systems: The nature of porosity. *American J. of Science.*, 277: 913-936

Onishi C.T., Shimizu I., 2005. Microcrack network in granite affected by fault zone: Visualization by confocal laser scanning microscopy. *Journal of Struc. Geol.*, Vol 27, Issue 4: 2268-2280.

Petránek J., 1993. Malá encyklopedie geologie. JIH České Budějovice

Sahimi M., 1995. Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim

Siitari-Kauppi M., 2002. *Development of ¹⁴C-polymethylmethacrylate method for the characterisation of low porosity media.* Academic Dissertation, Faculty of Science of the University of Helsinki, Helsinki, 156 pages

Skagius K., Neretnieks, I., 1986. Porosities and diffusivities of some nonsorbing species in crystalline Rocks. *Water Resour. Res.*, 22(3). 389-398

Svoboda J. editor, Kukul Z., Chlupáč I., Fusán O., Roth Z., Eliáš M., Suk M., Vachtl J., Jaroš J., Štelcl J., Palivcová M., Dudek A., Fediuk F., Malán O., Tuček K., Kříž J., Šibrava V., Odehnal L., Gabriel M., Misař Z., Pašek J., Jetel J., Skopec J., Čadek J., Smolíková L., Pačes T., Moldán B., Malina J., Rubín J., 1983. Encyklopedický slovník geologických věd N-Ž 2. svazek ČSAV, ČGÚ. Academia Praha

