

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav petrologie a strukturní geologie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Petrology and Structural Geology**

Doktorský studijní program / Ph.D. study program: geologie/geology

Autoreferát disertační práce / Summary of the Ph.D. Thesis



Strukturní a petrofyzikální charakterizace granitu vhodného pro ukládání radioaktivního odpadu

Structural and Petrophysical Characterisation of Granite Intended for Radioactive Waste Stocking

Martin Staněk

Školitelé / Supervisors: Yves Géraud, Ondrej Lexa

Praha, 2013

Abstract:

Structural and petrophysical analysis have been conducted within the Melechov massif with focus on structures controlling the porosity, permeability and thermal conductivity of the rock. The structure of the massif has been constrained based on extensive dataset including AMS and field structural measurements of ductile and brittle structures. Maps and stereograms have been constructed to display the magnetic fabrics and the fracture system of the studied massif. The fracture system of the massif has been described by two principal and two supplementary sets of joints and by faults formed mainly by joint reactivation or less frequently formed as shear fractures. The measured petrophysical data have been used to characterize the effect of fracturing and alteration on pore space geometry and in turn on permeability, thermal conductivity and elastic properties of the studied granite. Distinct petrophysical properties have been identified for pristine granite, for fractured fresh granite as well as for fractured granite altered by Fe-oxide, chlorite and clay minerals. Relations between the measured petrophysical properties have been explained in terms of evolution of the rock pore space. A detailed microstructural study combined with multidirectional P-wave velocity measurements at high confining pressure and with AMS analysis has been conducted on a schlieren bearing sample of Lipnice granite. The study has shown that the granite V_p anisotropy at low confining pressure was controlled by intergranular cracks interconnecting schlieren-subparallel cleavage cracks in micas and feldspars and by exfoliation fracture-subparallel intra- or trans-granular cracks in cleavage-free quartz. Major closing of the crack porosity linked to the schlieren granite below depth of 500 m has been interpreted in terms of crack compliance reflected by rapid increase in V_p with confining pressure.

Abstrakt:

Byla provedena studie stavby a fyzikálních vlastností žulového masívu se zaměřením na stavby ovládající přenosové vlastnosti horniny. Stavba masívu byla upřesněna na základě rozsáhlého souboru údajů zahrnujících AMS a terénní měření duktilních a křehkých staveb. Za účelem zobrazení magnetických staveb a systému trhlin byly sestaveny mapy a stereogramy. Systém fraktur byl popsán dvěma hlavními a dvěma vedlejšími sety puklin a zlomy tvořícími se reaktivací puklin nebo méně často střížnými trhlinami. Naměřené petrofyzikální údaje byly použity k charakterizaci vlivu frakturace a alterace na geometrii pórového prostoru stejně tak jako na propustnost, tepelnou vodivost a elastické vlastnosti studované žuly. Odlišné petrofyzikální vlastnosti byly rozpoznány pro zdravou žulu, pro frakturovanou čerstvou žulu a také pro frakturovanou žulu alterovanou oxidy železa, chloritem a jílovými minerály. Vztahy mezi měřenými petrofyzikálními vlastnostmi byly vysvětleny ve smyslu vývoje pórového prostoru. Podrobná mikrostrukturní studie kombinovaná s měřením rychlosti P-vln v mnoha směrech za vysokého omezujícího tlaku a s analýzou AMS byla provedena na vzorku Lipnické žuly se šlíry. Tato studie ukázala, že za nízkých omezujících tlaků je anisotropie V_p ovládána intergranulárními mikrotrhlinami propojujících štěpnosti slíd a živců subparalelních se šlíry, a v křemeni, který nemá štěpnost, mikrotrhlinami subparalelními s exfoliační trhlinou. Značné uzavírání mikrotrhlin pro žulu se šlíry a hloubku méně než 500 metrů bylo interpretováno ve smyslu stlačení mikrotrhlin odrážejícího se rychlým nárůstem V_p s omezujícím tlakem.

1. Introduction

The present study demonstrates the use of data acquired by structural and petrophysical analysis of a granitic massif for the purpose of search and characterization of suitable sites for deep geologic repositories of radioactive waste.

Stocking of high-activity and long-lived radioactive waste in deep underground facilities is nowadays favored by countries with massive nuclear power and waste production and its feasibility is supported by data from subterranean laboratories run by the research-field leading countries. Several European countries including Czech Republic have chosen granite as the repository host rock owing to its abundance and commonly low inhomogeneity and porosity. For safe and sustainable stocking the host rock must be highly impermeable, be able to retain contaminants and be able to extract the radioactive heat of the waste to prevent thermal cracking of engineer and geologic barriers.

In this scope, the main geologic challenge related to waste repositories is the description of structures controlling the rock transfer properties. In granites, i.e. rocks highly impermeable in the majority of the volume, ubiquitous macrofractures represent localized conductive structures delimiting rather impermeable

blocks and the fracture walls represent the principal rock-fluid interaction interface. In domains with low fracture density or where fractures are healed or sealed, the rock transfer properties are controlled by the rock matrix microstructures such as grain boundaries, mineral cleavages and microcracks. In this scope, macro- and micro-structural analyses coupled with direct experimental measurements represent a convenient multi-method approach when evaluating site suitability for radioactive waste repository.

2. Aims of the study

To demonstrate such an approach in a realm analogous to the actually intended granitic host rocks, we present an extensive set of structural and petrophysical data relative to the testing site of the Czech Radioactive Waste Repository Authority (RAWRA), the Melechov Massif (MM), Czech Republic (Fig. 1).

The elementary goals of the structural analysis were to describe the magmatic fabric and the fracture system of the massif and to explain their origin and interplay during the massif deformation history.

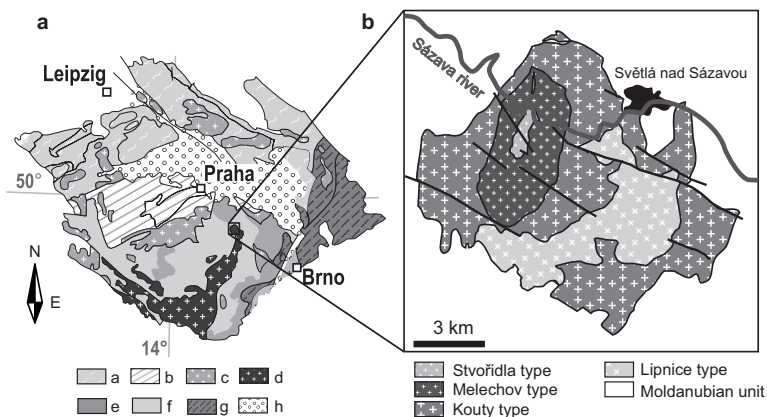


Figure 1. (a) Simplified geological map of the Bohemian Massif showing the location of the studied Melechov massif, (a – Saxothuringian and Lugian, b – Teplá-Barrandian, c – Variscan granitoids, d – Central Moldanubian Pluton, e – Gföhl unit, Varied and Monotonous unit, g – Brunovistulian, h – Cretaceous sedimentary cover), (b) Geological map of the Melechov massif showing the extent of the four granite types (modified after Machek 2011).

The elementary goals of the petrophysical measurements were to characterize various fracturing and alteration facies of the granite in terms of porosity, permeability, thermal conductivity, density and elastic properties and to explain relations between these quantities with focus on the rock pore space geometry.

3. Material and methods

The MM is a late-Variscan two-mica peraluminous S-type granitic massif representing ca. 110 km² x 15 km of the northernmost part of the Central Moldanubian Pluton (CMP)

dominantly surrounded by paragneisses of the Varied group from the west and paragneisses to anatectites of the Monotonous group from the other sides.

The first step for the structural analysis consisted of gathering, organisation, formatting and georeferencing of available structural data. The field work was based on preliminary evaluation of the map extent of the compiled structural data and was focused on blank spots in the otherwise extensive record within the massif and on some proximate or remote country rock domains where structural data was not available or spatially discontinuous. Maps and stereograms have been constructed to display the magnetic fabrics and the fracture system of the studied massif.

Various granite facies differing in alteration and fracturing character were sampled and examined by the petrophysical methods. The collection comprises samples of two kinds: samples taken from exposures in active or abandoned quarries and samples of 4.5 cm core of a 140 m deep borehole MEL-5. The used techniques and the resulting petrophysical characteristics are briefly described in Tab. 1.

Table 1. Brief description of applied petrophysical techniques

Experimental technique	Physical quantity	Quantity type	Sample	Experimental conditions
Optical scanning	Thermal conductivity	vector	Borehole core D = 4.5 cm, L ≥ 6 cm Sawed block min. 4 x 2 x 6 cm	ambient
Pulse transmission	P-wave velocity	vector	Plug D = L = 1.7 cm Sphere D = 5 cm	ambient $p_{conf} \leq 400$ MPa
Nitrogen permeametry	Intrinsic permeability	vector	Plug D = L = 1.7 cm	$p_{conf} = 1$ MPa
Mercury porosimetry	Porosity Pore size Trapped / Free p. Skeletal density	scalar	polyhedron V ≈ 3 cm ³	

4. Results and discussion

Three different structural domains in the massif host rock have been defined based on the lithology, metamorphic grade and overall structural pattern. The distribution of orientation of the foliations within the study area is documented on map in Fig. 4 by means of discrete structural markers showing strike and dip directions accompanied by spatially interpolated values of dip. The foliations and fold structures in the MG show anticlinal orientations with respect to the massif and dip steepening towards it suggesting a dome-like structural pattern.

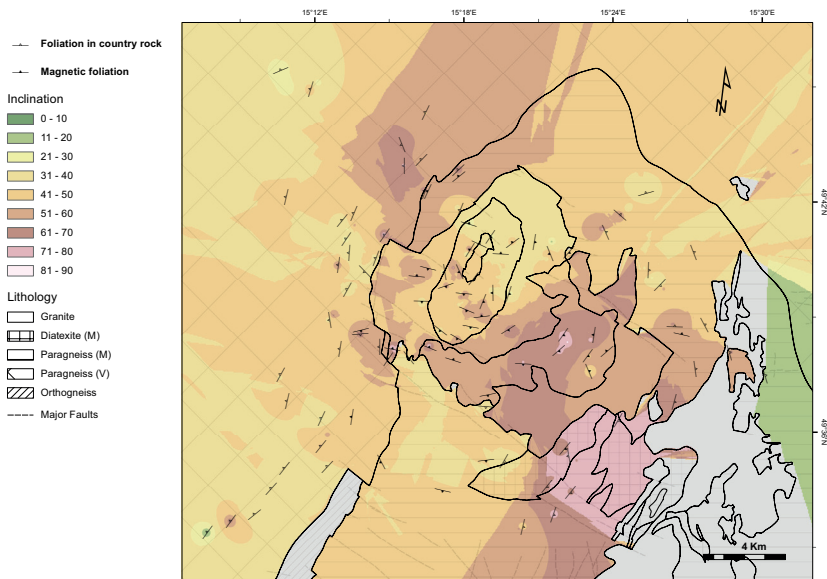


Figure 4. Map showing orientation of macroscopic foliation in the metasediments (empty symbols) and of magnetic foliation in the granitic massif as well as in the metasediments (full symbols). The raster background shows interpolated dip values with common scale for both the structures. Gray colour represents no dip data.

The stress field leading to and coeval with the early stages of the doming is probably related to the primary structural pattern recorded within the study area in the SE structural domain.

The granitic massif is fractured by two principal and two subordinate sets of joints, taking into account their size and spatial extent. The maps of trajectories of the distinct joint sets in the massif have revealed a sigmoidal pattern of the set 1 and 2 (Fig. 11).

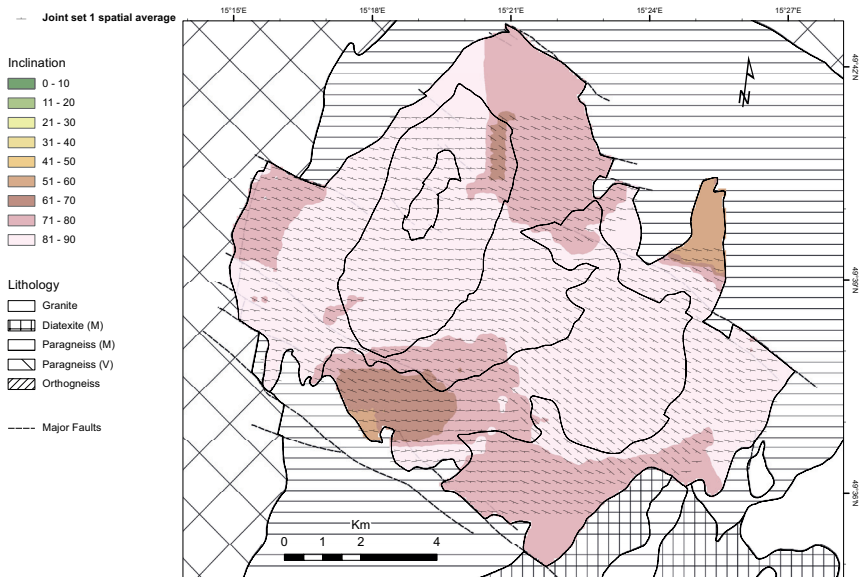


Figure 11. Map of set 1 joints trajectories. The structural symbols represent spatially averaged orientation values based on field measurements. The raster background shows interpolated dip values.

For the two first sets, the central parts of the Lipnice and Melechov granite represent two domains with stable orientation of the joints within the frame of the sigmoidal pattern. On the other hand, the external parts as well as the part of the Kouty granite between the Lipnice and Melechov granites represent the kinks of the pattern. We suggest that the sigmoidal pattern may have resulted from conjugated relative horizontal displacements of large domains of the massif. The considered kinematics corresponds to dextral and sinistral movement along WNW-ESE and NNE-SSW striking discontinuities, respectively. Taking into account the noted domains with stable

and with kinked trajectories orientation, the central part of the granites acted more rigid whereas the strain was accommodated in the external and in the central transitional parts of the massif.

Based on pore space characteristics evaluated by a detailed series of porosimetric measurements fracturing and alteration facies have been defined (Fig. 13).

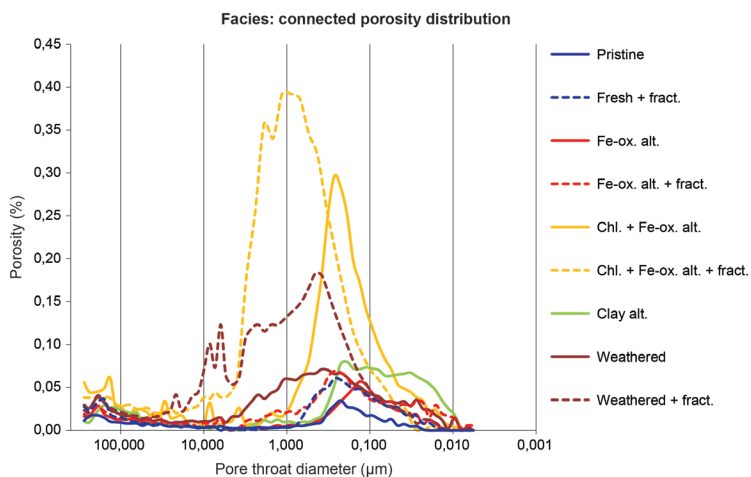


Figure 13. Connected (top) and free (bottom) porosity pore size distribution characteristic for facies sampled in the MEL-5 borehole core. Fract. - fractured, ox. - oxide, alt. - alteration, chl. - chlorite. *) Porosity values of “Chl. + Fe-ox. alt. + fract.” are represented by the sample 6 not to scale with the other data.

The fracturing and alteration facies defined on the Lipnice borehole samples and their characteristic petrophysical properties are displayed in Tab 7. The presented porosimetric and density values are based on the microporosity range calculations thus allowing comparison of rather homogeneous

and facies-representative volumes controlled by the rock matrix fabric and the microcrack network. To estimate the relations between the measured petrophysical properties a set of XY charts has been plotted in Fig. 16.

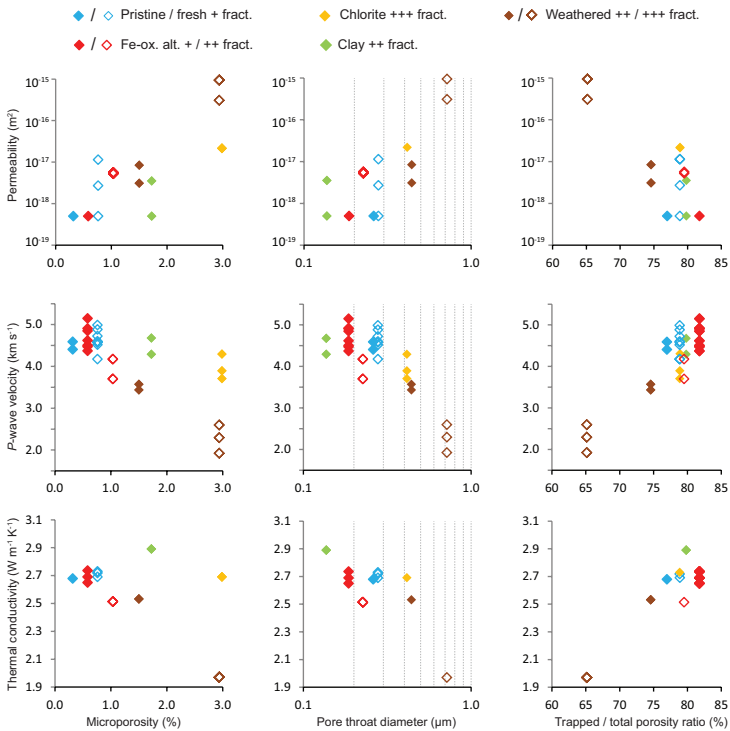


Figure 16. Relations between measured petrophysical properties. X-Y charts showing relation between permeability, P-wave velocity, and thermal conductivity on vertical axes (from top to bottom, also on the next page) and microporosity (5 nm - 6 µm), median pore throat diameter (volumetric), trapped-to-total porosity ratio, bulk density and skeletal density on horizontal axes (from left to right continued to the next page). Symbols represent different fracturing and alteration facies of the granite (see legend above the charts; full / empty symbols for less / more fractured variety within alteration facies; “+” symbols correspond to macroscopic degree of fracturing (fract.); ox. - oxide.

Table 7. Petrophysical properties of studied granite alteration and fracturing facies. Φ - total connected porosity, MPTD - median pore throat diameter (volume), TTR - trapped to total porosity ratio, SD - skeletal density, k - intrinsic permeability, V_p - P-wave velocity, TC - thermal conductivity, TC IF - TC inhomogeneity factor, ox. - oxide, chl. - chlorite, weat. - weathered, + - macroscopic fracturing intensity of the alteration facies.

Facies	Φ (%)	MPTD (μm)	TTR (%)	SD (g cm^{-3})	k (m^2)	V_p (km s^{-1})	TC ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	TC IF ()	Fracturing	Fe-ox	Chlorite	Clay
Pristine	0.32	0.26	77	2.653	$< 10^{-18}$	4.4 - 4.6	2.68	0.11	0	0	0	0
Fractured	0.53 - 1.00	0.17 - 0.39	69 - 89	2.635 - 2.644	$< 1 \times 10^{-17}$	4.0 - 4.8	2.66	0.24	1	0	0	0
Fe-ox. +	0.49 - 0.66	0.17 - 0.31	78 - 89	2.648 - 2.656	$< 10^{-18}$	4.4 - 5.1	2.72	0.12	1	1	0	0
Fe-ox. ++	0.99 - 1.08	0.18 - 0.27	79 - 81	2.615 - 2.627	5×10^{-18}	3.7 - 4.2	2.51	0.38	2	2	0	0
Chl. +++	2.52 - 3.80	0.30 - 0.62	76 - 87	2.600 - 2.629	2×10^{-17}	3.7 - 4.3	2.69	0.18	3	2	3	0
Clay ++	1.32 - 2.02	0.11 - 0.18	79 - 80	2.609 - 2.661	$< 7 \times 10^{-18}$	4.3 - 4.7	2.89	0.08	2	1	0	3
Weat. ++	1.40 - 1.64	0.36 - 0.52	72 - 78	2.623 - 2.632	$10^{-18} - 10^{-17}$	3.4 - 3.7	2.53	0.14	2	2	2	0
Weat. +++	2.94	0.72	65	2.601	6×10^{-16}	1.9 - 2.6	1.97	0.45	3	3	3	0

5. Conclusions

A granitic massif has been studied by field structural and laboratory petrophysical methods with the goal to estimate the distribution and the effect of structures controlling transfer properties of the granite. A complex structural image of the study area has been provided based on an extensive dataset including field structural measurements of ductile and brittle structures as well as AMS data. Uneven distribution of mean magnetic susceptibility within the massif showing high values for the easterly Lipnice granite and low values for the westerly younger intrusions has been interpreted to reflect a progressive differentiation from high-susceptibility migmatite protolith to low susceptibility granite with less biotite. The estimated spatial distributions of AMS parameters have revealed rather oblate anisotropy shapes in the older granites and triaxial or rarely prolate shapes in the younger intrusions and along the SW granite-host rock contact. The similar folding pattern of schlieren in the core of the Lipnice granite and of the high-grade migmatites to the SE has been interpreted to represent the S-granitic origin of the massif characteristic by diffuse transition between source rock, granite and host rock. A change in magmatic evolution coupled with change in stress

field has been suggested to explain the different structural pattern within the western part of the massif marked by later discordant granite intrusion and discordant granite-host rock contacts. Rotation of the initial migmatite NNE-SSW fabrics to late-magmatic WNW-ESE striking fabrics has been argued to be associated with distributed deformation related to relative horizontal displacements along conjugated sets of shear zones. These shear zones have been interpreted to be subparallel to the regional WNW-ESE and NNE-SSW striking discontinuities and associated with dextral and sinistral kinematics, respectively. The concentric distribution of foliations and fold axes in the host rock and particularly NE and SW of the massif has been related to migmatite-paragneiss dome structure around the studied massif. The massif-outward vergence of asymmetric folds in the host rock has been suggested to reflect the unroofing of the dome. The fracture system of the massif has been described by two principal and two supplementary sets of joints and by faults formed mainly by joint reactivation or less frequently as shear fractures. The recognized fracture sets have been related to the regional stress field in context of the fracture system evolution. The largest fractures in the massif have been identified as the incipient cooling-related set of joints formed perpendicular to the NNE-SSW direction of minimum regional stress and

of the granitic body elongation. Structural predisposition and thermal contraction aspects have been discussed to explain the perpendicularity of orientation of the second cooling-related set of joints formed at shallower conditions during further cooling. The reactivation of the two cooling-related sets of joints accompanied or followed by formation of discordant shear fractures has been proposed to accommodate horizontal strike-slip movements and dip-slip movements in a coherent regime of N-S oriented maximum principal stress.

Samples related to different fracture setting and alteration character have been collected and prepared for analyses by a set of laboratory petrophysical experiments. The measured petrophysical data have been used to characterize the effect of fracturing and alteration on pore space geometry and in turn on permeability, thermal conductivity and elastic properties of the studied samples. Distinct petrophysical properties have been identified for pristine granite, for fractured fresh granite as well as for fractured granite altered by Fe-oxide, chlorite and clay minerals. The lowest porosity and one of the lowest permeabilities have been measured on the pristine granite and its fracturing has been shown to increase the porosity several times and to be associated with variable permeability including

values relatively higher by up to two orders of magnitude. Measurements of porosity and permeability of specimens containing localized macroscopic fissures have been used to estimate increase of permeability by one to two orders of magnitude for ~ 0.2 % of fissure-related pore volume. These observations have been attributed to increasing interconnectivity of pore space by cracking at relatively low total porosities below ~ 1 %. Measured decrease in permeability of at least one order of magnitude has been attributed to the sealing effect of pervasive Fe-oxide alteration associated with weak fracturing. Based on decrease of pore volume and pore throat size of free porosity measured on specimens of the corresponding samples, the sealing effect has been suggested to be due to filling of cracks by the Fe-oxide material. The sealing effect of the Fe-oxide alteration has been shown to be counteracted by intensive fracturing which has been associated with increased free porosity volumes, larger pore throat diameters and higher permeabilities in a similar manner as observed for the fracturing effect on the pristine granite. Elevated values of thermal conductivity have been measured both on weakly fractured Fe-oxide-altered granite and on densely fractured clay-altered granite and the effect has been attributed to reduction of pore throat size and to higher thermal conductivity of associated alteration

phases in good agreement with measured low permeabilities. The multidirectional V_p measurements on specimens of little fractured walls of steep fractures have shown that the orientation of V_p anisotropy may be generally unrelated to the orientation of the fractures thus suggesting dominant role of the magmatic structure anisotropy. At low confining pressures the mean V_p has been shown to increase with confining pressure at different rates for different samples which may however show mutually proximate mean V_p values at high confining pressures.

A detailed microstructural study combined with multidirectional P-wave velocity measurements at high confining pressure and with analysis of anisotropy of magnetic susceptibility has been conducted on a specimen of the schlieren-bearing Lipnice granite prepared from a block limited by subparallel exfoliation fractures. The study has shown that the granite V_p anisotropy at low confining pressure was controlled by intergranular cracks interconnecting schlieren-subparallel cleavages and cleavage cracks in micas and feldspars and by discordant exfoliation fracture-subparallel intra- or trans-granular cracks in cleavage-free quartz. Low confinement permeability measurements of the schlieren granite have revealed remarkable anisotropy with the lowest

values measured along directions perpendicular to the schlieren and to the fractures and with the highest values measured along the direction of intersection of the two structures. Major closing of both the sets of cracks below depth of 500 m has been interpreted in terms of crack compliance reflected by rapid anisotropic increase in V_p with confining pressure featuring high V_p increase directions perpendicular to each of the set of cracks. The role of the magmatic structure as a pre-discontinuity for crack formation as well as its control of the anisotropy at higher confining pressures has thus been demonstrated.

The suitability of the applied techniques for measurement of transfer properties of granite has been demonstrated with each of them showing different sensitivity on the studied phenomena. The highest resolution at the scale of the sample collection has been attained by the mercury porosimetry and routines for acquisition of high precision porosimetric data on very low porosity granites have been developed and used. The effect of experimental setup setting as well as of specimen shape and dimensions on the measured petrophysical properties has been examined. The acquired information and experience imply further research challenges related both to the revealed effects of structures on petrophysical properties as well as to

the limitations imposed by the available experimental setups. Use of different permeametry setup should be envisaged for reliable measurements of the lowest permeabilities in pristine granite as well as in the alteration-sealed granite facies. Further development of the mercury porosimetry techniques should be attempted to attain better resolution for distribution between the free and the trapped porosity for different pore throat size ranges possibly including also the macropores as such information is not available for actually standard setups and at the same time is particularly important for the crack-related porosity. Including the mentioned technological tests, limitations and suggestions, the present study has demonstrated the application of complementary structural and petrophysical techniques in the field of transport properties of granitic rocks. The insight this study brings may thus be appreciated within geoengineering projects based on the knowledge of transport properties of granite thus including the underground waste stocking and geothermal and hydrocarbon exploitation of basement rocks.

1. Úvod

Tato studie ukazuje využití dat získaných strukturální a petrofyzikální analýzou žulového masívu pro účel vyhledání a charakterizování lokalit vhodných pro hluboké geologické úložiště radioaktivního odpadu. Skladování vysoce aktivního a dlouho žijícího radioaktivního odpadu v hlubokých geologických zařízeních je dnes upřednostňováno zeměmi s vysokou produkcí nukleární energie a odpadu a jeho proveditelnost je podpořena údaji z podzemních laboratoří zemí na špičce oboru. Několik zemí včetně České republiky vybralo žulu jako hostitelskou horninu pro úložiště díky její hojnosti a obecně nízké pórovitosti a nehomogenitě. Pro udržitelné skladování musí být hornina vysoce nepropustná, být schopna zadržet kontaminanty a být schopna odvádět radioaktivní teplo odpadu aby se předešlo tepelnému praskání inženýrských a geologických bariér. V tomto rámci hlavní geologická výzva spjatá s úložištěm odpadu spočívá v popisu struktur ovládajících vlastnosti přenosu horniny. V žulách, tj. horninách vysoce nepropustných ve většině svého objemu, trhliny představují lokalizované vodivé struktury ohraničující spíše nepropustné bloky a stěny trhlin představují hlavní rozhraní pro výměnu mezi tekutinou a horninou. V doménách s nízkou hustotou

trhlin nebo s uzdravenými či zacelenými trhlinami je přenos v hornině ovládán mikrostrukturami matrix horniny, jako jsou hranice zrn, minerální štěpnosti a mikrotrhliny. V tomto rámci představují makro- a mikro-strukturní analýza spojené s přímým experimentálním měřením vhodný přístup pro vyhodnocení vhodnosti lokality pro úložiště radioaktivního odpadu.

2. Cíle studie

Pro demonstraci takového přístupu v prostředí podobném aktuálně uvažovaným žulovým hostitelským horninám uvádíme rozsáhlou sadu strukturních a petrofyzikálních údajů vztahujících se k testovací lokalitě české Správy úložiště radioaktivního odpadu, Melechovskému masívu (MM) v České republice (Fig. 1). Základní cíle strukturní analýzy byly popsat magmatickou stavbu a systém trhlin masívu a vysvětlit jejich původ a vzájemný vliv v průběhu deformační historie masívu. Základní cíle petrofyzikálních měření byly charakterizovat různé facie frakturace a alterace žuly ve smyslu pórovitosti, propustnosti, tepelné vodivosti, hustoty a elastických vlastností a vysvětlit vztahy mezi těmito veličinami se změřením na geometrii pórového prostoru.

3. Materiál a metody

MM je pozdně variský masív dvojslídne peraluminické S-žuly představující cca 110 km² x 15 km nejsevernější část Centrálního Moldanubického plutonu (CMP) obklopenou hlavně pararulami Pestré skupiny od západu a pararulami až anatektity Monotónní skupiny z ostatních stran.

První krok strukturní analýzy spočíval ve shromažďování, organizaci, formátování a georeferencování dostupných strukturních dat. Terénní práce byla založena na předběžném vyhodnocení mapového rozsahu shromážděných dat a byla zaměřena na prázdná místa na jinak rozsáhlém souboru dat a na některé domény pláště masívu kde data byla nedostupná nebo nespojitá. Mapy a stereogramy byly zkonstruovány pro zobrazení magnetické stavby a systému trhlin studovaného masívu.

Petrofyzikálními metodami byly zkoumány různé navzorkované facie frakturace a alterace. Sbírkou vzorků obsahuje vzorky dvou druhů: vzorky z výchozů v činných či nečinných lomech a vzorky 4.5 cm jádra 140 m hlubokého vrtu MEL-5. Použité metody a výsledné petrofyzikální charakteristiky jsou stručně popsány v Tab. 1.

4. Výsledky a diskuse

V plášti masívu byly určeny tři domény na základě litologie, metamorfního stupně a celkového strukturního vzoru. Rozdělení orientací foliací ve studovaném území je doloženo na mapě ve Fig. 4 pomocí diskrétních strukturních značek doprovazených interpolovanými hodnotami sklonu. Foliace a vrásové struktury v Monotónní skupině ukazují antiklinální orientace vzhledem k masívu a sklon zestrnující se k němu což ukazuje na dómový strukturní vzor. Napěťové pole vedoucí k a současné s ranými fázemi dómování je pravděpodobně spjaté s primárním strukturním vzorem ve studovaném území v JV strukturní doméně.

Žulový masív je frakturován dvěma hlavními a dvěma podřadnými sadami puklin berouc v potaz jejich velikost a prostorový rozsah. Mapy trajektorií jednotlivých sad puklin ukázaly sigma vzor sad 1 a 2 (Fig. 11). Pro tyto dvě první sady puklin představují centrální části žul Lipnice a Melechov domény se stabilní orientací puklin v rámci sigma vzoru. Na druhou stranu, okrajové části stejně tak jako části žuly Kouty mezi žulami Lipnice a Melechov představují záhyby v tomto vzoru. Domníváme se, že tento sigma vzor může být výsledkem konjugovaných horizontálních posunů velkých domén masívu.

Uvažovaná kinematika odpovídá dextrálnímu a sinistrálnímu pohybu podél poruch ZSZ-VJV respektive SSV-JJZ směru. Vzhledem ke zmíněným doménám se stabilní a uhýbavou orientací trajektorií puklin se centrální část žul chovala jako pevnější zatímco deformace byla akomodována v okrajových a centrální části masívu.

Na základě charakteristik pórového prostoru vyhodnocených podrobnou sadou porozimetrických měření byly určeny facie frakturace a alterace (Fig. 13). Tyto facie určeny na vzorcích z vrtu v Lipnické žule a jejich charakteristické petrofyzikální vlastnosti jsou zobrazeny v Tab. 7. Uvedené porozimetrické a hustotní hodnoty jsou založeny na mikroporozitě což dovoluje porovnání spíše homogenních a reprezentativních objemů ovládaných stavbou matrix a sítí mikrotrhlin. Pro vyhodnocení vztahů mezi měřenými petrofyzikálními vlastnostmi byla zhotovena sad XY grafů (Fig. 16).

5. Závěry

Žulový masív byl studován terénními strukturálními a laboratorními petrofyzikálními metodami pro vyhodnocení rozdělení a účinku struktur ovládajících přenosové vlastnosti žuly. Komplexní strukturální obraz studovaného území byl

pořízen na základě rozsáhlého souboru dat zahrnujícího terénní strukturní měření duktilních a křehkých struktur stejně tak jako dat AMS. Nerovnoměrné rozdělení střední magnetické susceptibility v masívu ukazující vysoké hodnoty pro východní Lipnickou žulu a nízké hodnoty pro západní mladší intruze bylo interpretováno jako odraz progresivní diferenciacce od vysoce susceptibilního migmatitického protolitu k nízcce susceptibilní žule s méně biotitem. Vyhodnocené prostorové rozdělení AMS parametrů ukázalo oblátní tvary ve starších žulách a trojosé nebo vzácně prolátní tvary v mladších intruzích a podél JZ kontaktu žuly a pláště. Podobný vzor vrásnění šlírů v jádru Lipnické žuly a v migmatitech na JV byl interpretován ve smyslu S-typ původu žuly charakteristického rozptýleným přechodem mezi zdrojovou horninou, žulou a pláštěm. Změna v magmatickém vývoji spojená se změnou v napěťovém režimu byla užita k vysvětlení odlišného strukturního vzoru v Z části masívu poznamenaném pozdější diskordantní intruzí a diskordantními kontakty mezi žulou a pláštěm. Rotace původní migmatitické SSV-JJZ stavby do pozdně magmatické ZSZ-VJV stavby byla dána do souvislosti s dextrální repsektive sinistrální kinematikou. Koncentrické rozdělení foliací a vrásových os v plášti a zvláště SV a JZ od masívu byla spojena s dómovou strukturou v pararulách-migmatitech obklopujících masív.

Vergence asymetrických vrás v plášti směrem od masívu byla interpretována jako odraz odstřešení dómu.

Systém trhlin byl popsán dvěma hlavními a dvěma podřadnými sadami trhlin a zlomy tvořícími se reaktivací puklin nebo méně často jako nové střížné trhliny. Rozpoznané sady puklin byly vztaženy k napět'ovému poli v kontextu vývoje systému trhlin masívu. Největší trhliny v masívu byly určeny jako prvotní sada termálních puklin tvořících se kolmo na SSV-JJZ orientovanou osu minimálního regionálního napětí a prodloužení žulového tělesa. Strukturní předpoklad a tepelné smršťování byly diskutovány k vysvětlení kolmosti druhé zchlazovací sady puklin během dalšího ochlazování. Reaktivace obou zchlazovacích sad doprovázena nebo následována diskordantními střížnými trhlinami akomodovala horizontální posuny a poklesové pohyby v koherentním napět'ovém režimu se S-J orientovanou osou maximálního napětí.

Vzorky spjaté s různými faciemi frakturace a alterace byl odebrány a připraveny pro sadu laboratorních experimentálních analýz. Naměřená petrofyzikální data byla použita k charakterizaci účinku frakturace a alterace na geometrii pórového prostoru a tak na propustnost, tepelnou vodivost a elastické vlastnosti studovaných vzorků. Odlišné petrofyzikální

vlastnosti byly určeny pro zdravou žulu, frakturovanou čerstvou žulu stejně tak jako pro frakturovanou žulu alterovanou Fe-oxidy, chlority a jílovými minerály. Nejnižší porozita a jedna z nejnižších propustností byly naměřeny pro zdravou žulu a její frakturace byla spjata s několikanásobným zvýšením porozity a proměnnou propustností včetně hodnot vyšších až o dva řády. Měření porozity a propustnosti na vzorcích obsahujících lokalizované makroskopické štěrbinu byla použita k ukázaní zvýšení propustnosti o jeden až dva řády na cca 0.2 % objemu porozity spjatém se štěrbinami. Tato pozorování byla přiřazena zvýšení propojenosti pórového prostoru praskáním za relativně nízkých celkových porozit cca 1 %. Měřené snížení propustnosti o jeden řád bylo přiřazeno zacelovacímu účinku alterace Fe-oxidy spjaté se slabou frakturací. Na základě snížení objemu porozity a velikosti hrdla pórů volné porozity měřeného v odpovídajících vzorcích byl zacelovací účinek alterace Fe-oxidy přiřazen zaplňování mikrotrhlin materiálem s Fe-oxidy. Tento zacelovací účinek alterace Fe-oxidy byl ukázán jako protichůdný k intenzivní frakturaci, která byla spjata se zvýšeným objemem volné porozity, s většími hrdly pórů a vyšší propustností podobně jako pozorováno pro účinek frakturace na zdravou horninu. Zvýšené hodnoty tepelné vodivosti (TV) byly měřeny jak na slabě frakturované žule slabě alterované Fe-oxidy

tak na silně frakturované žule alterované jílovými minerály a tento účinek byl přiřazen snížení velikosti hrdel pórů a vyšší TV fází spjatých s alterací v dobré shodě s nízkými měřeními propustnostmi. Mnohsměrná měření rychlosti P-vln (V_p) na slabě frakturovaných vzorcích od svislých fraktur ukázal, že orientace anisotropie V_p může být bez vztahu k orientaci fraktur, což ukazuje na hlavní roli anisotropie magmatické struktury. Bylo ukázáno, že za nízkých omezujících napětí průměrné V_p rostou různými rychlostmi v různých vzorcích a že za vysokých omezujících napětí se tyto hodnoty mohou mezi vzorky podobat.

Podrobná mikrostrukturní studie kombinovaná s mnohsměrným V_p měřením za vysokých omezujících tlaků a s analýzou AMS byla provedena na vzorku šlírové Lipnické žuly připraveném z bloku omezeného subparalelními exfoliačními frakturami. Tato studie ukázala, že za nízkých omezujících tlaků je anisotropie V_p ovládána intergranulárními mikrotrhlinami propojujících štěpnosti slíd a živců subparalelních se šlíry, a v křemeni, který nemá štěpnost, mikrotrhlinami subparalelními s exfoliační trhlinou. Měření propustnosti na šlírové žule za nízkých omezujících tlaků ukázala značnou anisotropii s nejnižšími hodnotami podlé směrů kolmých ke šlířům a

frakturám a s nejvyššími hodnotami podél směru průsečíku obou struktur. Značné uzavírání mikrotrhlin pro žulu se šířky a hloubku méně než 500 metrů bylo interpretováno ve smyslu stlačení mikrotrhlin odrážejícího se rychlým nárustem V_p s omezujícím. Byla ukázána role magmatické struktury jako prediskontinuity pro tvorbu mikrotrhlin a pro ovládnání anisotropie za vyšších omezujících tlaků.

Vhodnost použitých metod pro měření přenosových vlastností žuly byla ukázána s odlišnou citlivostí každé metody na studované jevy. Nejvyšší rozlišení na měřítku sbírky vzorků bylo dosaženo rtuťovou porozimetrií a postup pro získání vysoce přesných porozimetrických dat na nízce porézních žulách byl ukázán. Vliv použitého náčiní stejně tak jako velikostí a tvaru vzorku na měřené petrofyzikální vlastnosti byl zkoumán. Získané informace a zkušenosti poukazují na výzvy spjaté jak s ukázanými účinky struktur na petrofyzikální vlastnosti tak s omezeními kvůli dostupným experimentálním přístrojům. Pro spolehlivá měření těch nejnižších propustností ve zdravé žule stejně tak jako v žule zacelené alterací by mělo být zváženo použití jiného přístroje. Další vývoj metody rtuťové porozimetrie by měl být vyzkoušen pro dosažení vyššího rozlišení mezi volnou a zachycenou porozitou včetně makropórů

jelikož tato informace není dostupná s aktuálně standardními přístroji a zároveň je zvláště zajímavá z hlediska porozity v mikrotrhlinách. Včetně zmíněných technologických zkoušek, omezení a návrhů, tato studie ukázala použití petrofyzikálních metod v oboru přenosových vlastností žulových hornin. Vhled, který tato studie přinesla tak může být oceněn v geoinženýrských projektech založených na znalosti přenosových vlastností žuly včetně podzemního skladování odpadu a těžby zemského tepla a uhlovodíků z hornin podkladu.

Curriculum Vitae

Personal data:

Name and surname: **Martin Staněk**
Date and place of birth: 6. 9. 1983, Prague
Citizenship: Czech Republic
Permanent address: Na stráži 8, Praha 8, 180 00, Czech Republic

Contact:

Phone: +420775058555
Email: m4rtin.stanek@gmail.com

Education:

2003: Graduation (Gym. U Libeňského zámku, Prague)
2003 – 2006: Bc. in Geology, „Petrology of Peridotite Bodies of the North Pyrenean Zone and Models of Their Exhumation“, Charles Univ. in Prague
2006 – 2007: 1st year of MSc.: „Contact of Peridotite Body and Country Rock at Etang de Lers, Eastern Pyrenees“, Univ. Montpellier II
2007 – 2008: MSc. in Structural Geology: „Typology and Genesis of Breccias and Mylonites in the Vicinity of the Lers Peridotite Massif in the North Pyrenean Zone“, Charles Univ. in Prague
2007: „Image Analysis and Orientation Imaging in Geosciences“, Univ. Basel
2008: „High-Pressure Experimental Techniques and Applications to the Earth's Interior“, Univ. Bayreuth
2008 - 2013: PhD, Charles Univ. in Prague
2009 - 2013: cotutelle PhD, Univ. Strasbourg

Foreign languages: English, French, (German)

Selected publications

Staněk, M., Géraud, Y., Lexa O., Špaček, P., Ulrich, S. and Marc Diraison, 2013. Elastic anisotropy and pore space geometry of schlieren granite: direct 3-D measurements at high confining pressure combined with microfabric analysis. *Geophys. J. Int.*, 194(1): 383-394. doi: 10.1093/gji/ggt053

Oral presentations:

Staněk, M., Géraud, Y., Ulrich, S., Diraison, M., Lexa, O., 2011. Fracturing and alteration effects on petrophysical properties of granite. 9th Central European Tectonic Group meeting, Lísk, Czech Republic.

Staněk, M., Géraud, Y., Ulrich, S., Diraison, M., Lexa, O., 2011. Pore space of granite evaluated by petrophysical laboratory experiments. IAMG annual conference, Salzburg, Austria.

Staněk, M., Machek, M., Géraud, Y., 2012. P-wave velocity anisotropy of rock as a function of confining pressure and its relation to the rock microstructure: Case study in the Melechov Massif, Czech Republic. Invited talk at the workshop “Elastic anisotropy, fracturing mechanism and transport properties of loaded rocks”. Geological Institute, Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic.

Poster presentations:

Staněk, M., Ulrich, S., Géraud, Y., 2010. Petrophysical properties of granite from the Melechov Massif, Czech Republic. EGU general assembly, Vienna, Austria.

Staněk, M., Géraud, Y., Ulrich, S., Diraison, M., Lexa, O., 2011. Pore space of granite evaluated by petrophysical laboratory experiments. IAMG annual conference, Salzburg, Austria.

Staněk, M., Géraud, Y., Ulrich, S., Lexa, O., 2011. Fracturing and alteration effects on petrophysical properties of granite. Flows and mechanics in natural porous media from pore to field scale. Pore2Field, IFP Energies nouvelles scientific meeting, Rueil-Malmaison, France.

Staněk, M., Géraud, Y., Ulrich, S., Diraison, M., Lexa, O., 2011. Petrophysical properties of granite intended for radioactive waste stocking. 9th Euroconference on Rock Physics and Geomechanics Trondheim, Norway.

