

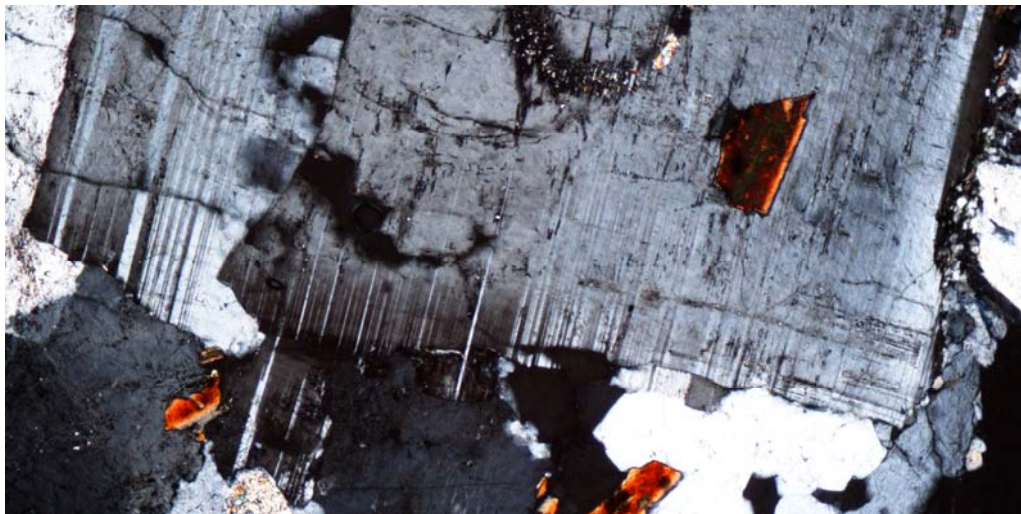
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY

ÚSTAV GEOLOGIE A PALEONTOLOGIE



**Mechanismy diferenciace a umístění peraluminického
granitového magmatu: říčanský pluton, Český masiv**

**Mechanisms of differentiation and emplacement of
peraluminic granite magma: Říčany pluton, Bohemian
Massif**



Jakub Trubač

Rigorózní práce

Školitel: RNDr. Jiří Žák, Ph.D.

Praha 2010

Prohlašuji, že jsem na této rigorózní práci pracoval samostatně za pomoci školitele, konzultanta a spoluautorů přiložené publikace. Veškeré použité prameny jsou řádně citovány.

V Praze dne

.....

Jakub Trubač

Český abstrakt

Cílem rigorózní práce je řešení problematiky mechanismu a umístění granitového magmatu do podmínek svrchní kůry. Studovaným tělesem je říčanský pluton, který je neobvyklý, asymetrický a představuje vhodnou intruzi pro interpretaci různých modelů, které se vztahují k dynamice granitového magmatu. V současné době je nejrozšířenějším modelem pro výstup magmatu tzv. umístění žilnými kanály (inkrementální “diking”). Říčanský pluton nacházející se v sv. části středočeského plutonického komplexu reprezentuje post-tektonickou mělkou intruzi eliptického tvaru v horizontálním řezu, umístěnou do hornin barrandienského neoproterozoika a spodního paleozoika před ~337 milióny lety. Okraj plutonu je tvořen více frakcionovaným výrazně porfyrickým granitem, jeho vnitřní část však zaujímá nevýrazně porfyrický granit. Mezoskopické foliace v granitu jsou paralelní s okrajem plutonu a korespondují dobře s magnetickými (AMS) foliacemi. Magnetické lineace na okraji plutonu jsou subhorizontální (sklon 0–20°) a jsou paralelní s okrajem. Naopak v centru jsou magnetické lineace strmé (sklon 60–70°) s variabilními směry. Tyto stavby v plutonu jsou interpretovány jako výsledek tzv. helikálního (spirálovitého) toku, podle něhož rychlejší subvertikální tok magmatu s nižší viskozitou a obsahem vyrostlic K-živců ve středu plutonu generoval subhorizontální tok magmatu s vyšší viskozitou a obsahem vyrostlic K-živců ve vnější části plutonu. Uvedený model helikálního toku může přispět k objasnění transportu granitoidních magmat v mělce uložených úrovních svrchní kůry.

English abstract

This thesis is focused on emplacement mechanisms of granitic magma into upper continental crust. The studied area is the Říčany pluton due to its unusual and asymmetric shape. Therefore, it represents a suitable intrusion for interpretation different models referring to emplacement of granitic magma. Common model for ascent of magma is incremental diking in present. The Říčany pluton of the Central Bohemian Plutonic Complex is a post-tectonic elliptical shallow-level intrusion emplaced into low-grade Neoproterozoic and Lower Carboniferous times (~337 Ma). It comprises of outer, more fractionated, strongly porphyritic granite and inner, less evolved, weakly porphyritic granite. Mesoscopic foliation represents an onion-skin pattern and corresponds well to the magnetic (AMS) foliations. Magnetic lineation has a gentle dip (0–20°) and closely parallels with the pluton contact in its outer part whereas the lineation dips steeply (60–70°) with a variable trend in the pluton interior. Author interprets these fabrics as a result of a helical flow, which is a faster subvertical flow in the low-viscosity pluton centre being accompanied by a subhorizontal flow in the outer, higher-viscosity (phenocryst-rich) margin. The proposed scenario of the helical magma flow can provide a viable mechanism for the transport of granitic magmas into upper levels of the Earth's crust.

Poděkování

Touto cestou chci poděkovat svému školiteli RNDr. Jiřímu Žákovi, Ph.D., konzultantovi Mgr. Vojtěchu Janouškovi, Ph.D., doc. RNDr. Václavu Kachlíkovi, CSc. a Mgr. Davidovi Dolejšovi, Ph.D. za jejich odborné vedení, velmi cenné připomínky k rigorózní práci a vstřícný přístup při jejím dokončování. Také děkuji spoluautorům článku o říčanském plutonu, kteří přispěli k tomu, že výsledky této práce mohly být publikovány v renomovaném časopise.

Výsledky prezentované v rigorózní práci byly financovány grantem Grantové agentury Univerzity Karlovy (GAUK) "Strukturní, texturní a termální vývoj granitoidních diapiřů" číslo 131607 a dále grantem Akademie věd České republiky číslo KJB30012702 (Z. Kratinová), grantem Grantové agentury České republiky číslo 205/07/0992 (Vojtěch Janoušek) a výzkumným záměrem geologické sekce UK číslo MSM0021620855.

Podíl spoluautorů na publikaci

Tato rigorózní práce obsahuje publikaci kolektivu Trubač J., Žák J., Chlupáčová M., Janoušek V. uveřejněnou v časopise *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vydaný v roce 2009. Uchazeč je odpovědný autor publikace, provedl terénní práce – strukturní mapování v měřítku 1 : 25 000, odběr vzorků pro laboratorní mikrostrukturní, magnetické a geochemické studium, dále zpracoval terénní a analytická data v geografickém prostředí GIS, podílel se na vědecké interpretaci a přípravě rukopisu.

Jiří Žák je vedoucí projektu, účastnil se úvodních odběrů vzorků v terénu a poskytl odborné vedení při interpretaci a přípravě rukopisu. Marta Chlupáčová provedla termomagnetická měření v laboratoři. Vojtěch Janoušek se zúčastnil odběrů geochemických vzorků a působil jako konzultant při přípravě rukopisu.

OBSAH

Český abstrakt	i
English abstract	ii
Poděkování	iii
Podíl spoluautorů na publikaci	iii
1. Úvod	- 1 -
2. Dynamika granitového magmatu	- 3 -
3. Model diferenciacce a umístění říčanského plutonu	- 6 -
4. Přínos k vědeckému poznání	- 8 -
4.1. Další výzkumy v oblasti říčanského plutonu	- 8 -
4.1.1. Geochemická syntéza	- 8 -
4.1.2. Okrajová facie říčanské intruze	- 9 -
5. Literatura	- 10 -
Příloha	- 13 -

1. Úvod

Předkládaná rigorózní práce shrnuje a interpretuje výsledky autorova výzkumu v období 2006 – 2010. Základní strukturální výzkum studované oblasti, která je následně představena v rigorózní práci, byl proveden na Ústavu geologie a paleontologie PřF UK, a v současné době pokračuje geochemickým studiem společně s termálním a krystalizačním modelováním.

Granitový magmatismus je předmětem intenzivního zájmu geologů již přes dvě stě let, neboť představuje jeden z klíčových mechanismů vzniku a růstu kontinentální kůry a významně přispívá k přenosu energie a redistribuci hmoty v rámci kontinentální litosféry. Tato práce vnáší nový pohled do problému mechanismů výstupu granitoidních magmat v podmínkách svrchní kůry a jako vhodný objekt výzkumu se jeví říčanský pluton (ŘP), nacházející se v severní části středočeského plutonického komplexu (Český masív). Představuje ideálním modelové těleso pro studium transportu magmatu ve svrchní kůře. Má v erozním řezu eliptický tvar cca 8×10 km a je tvořen dvěma hlavními, koncentricky uspořádanými typy granitoidů: vnějším porfyrickým a vnitřním slabě porfyrickým až ekvigranulárním biotitickým granitem. V jv. části pak vystupují světlejší jemnozrné leukogranity tzv. jevanského typu, a páskované jemnozrné aplity s turmalínem. Z hlediska jeho chemického složení patří mezi vysocedraselné a vysocehořecnaté plutonity (KMgG skupina; Holub et al., 1997). Stáří plutonu bylo odhadnuto metodou K–Ar na $336 \pm 3,5$ Ma (H. Maluski pers. comm., 1995 in Janoušek et al.). Pluton intruduje do hornin barrandienského neoproterozoika a spodního paleozoika, kde vytváří výraznou kontaktní aureolu. Východní okraj plutonu je překryt permokarbonskými sedimenty. Janoušek et al. (1997) na základě studie izotopů Rb a Sr odhalili kryptickou inverzní zonalitu plutonu (frakcionovanější členy na okraji, méně frakcionované v centru) a navrhl petrogenetický model jejího vzniku jako výsledek intruze méně frakcionovaných magmat ze zvrstveného magmatického krbu do centra plutonu. Říčanský granit tak spadá do kategorie

plutonů, jejichž mechanické charakteristiky by mohly odpovídat diapirickému modelu vmístění do svrchních partií kůry.

Výborná odkrytost tohoto plutonu prostřednictvím velkého množství lomů, snadná dostupnost a existující petrologická data (Janoušek et al., 1997) umožňují nejen testovat různá terénní kritéria pro jednotlivé mechanismy vmístění magmatu ve svrchní kůře, ale zejména nově aplikovat a kombinovat celou řadu různých kvantitativních metod (AMS, texturní analýza, matematicko-fyzikální modelování), kterými lze lépe pochopit problematiku výstupu a vmístění magmatu a významně přispět k objasnění transportu granitových magmat v mělce uložených úrovních svrchní kůry.

Hlavními cíli rigorózní práce bylo objasnit vnitřní stavbu ŘP a interpretovat mechanismus magmatického toku pomocí terénní strukturní analýzy, mikrostrukturní analýzy a anizotropie magnetické susceptibility (AMS) za účelem zjištění interní stavby plutonu a objasnění mechanismu vmístění granitu do svrchní kůry. Terénní sběr dat se hlavně zaměřil na studium mezoskopických struktur na výchozech, tj. primární magmatická stavba definovaná přednostní orientací draselných živců a biotitu, systém puklin, orientace aplitických žil, výskyt mikrogranulárních mafických či felzických enkláv).

Souběžně se strukturní analýzou ŘP probíhaly práce zaměřené na studium geochemické variability tělesa, ve snaze pokusit se odlišit na základě chemismu hornin jednotlivé variety říčanského typu a charakterizovat geochemickou zonálnost od okraje do středu plutonu.

Studiem říčanského plutonu se snaží autor přispět do současné diskuse ve vědecké komunitě novým modelem vmístění granitoidních magmat a v navazujících výzkumech objasnit dílčí problémy tj. variabilita živcových vyrostlic od okraje do středu tělesa či geneze aplitických hornin v jeho jv. části.

2. Dynamika granitového magmatu

Vznik rozsáhlých granitových těles (plutonů a batolitů) je významný geodynamický proces, který zahrnuje jednak vznik magmat parciálním tavením hlubších partií kůry či svrchního pláště a jednak výstup a finální umístění magmatu. Během výstupu a umístění magmat musí dojít k uvolnění prostoru pro intrudující magma a přemístění ekvivalentního objemu okolních hornin. Prostředí magma-okolní horniny tak představuje velmi dynamický, konjugovaný systém, kde rychlosti a doba trvání obou procesů, tj. intruze magmatu a přemístění okolních hornin, musí být kompatibilní. Tento důležitý aspekt magmatických procesů je stále zdrojem mnoha kontroverzí a vědeckých diskusí.

Snaha objasnit geometrii plutonických těles a pravděpodobné fyzikální příčiny magmatického toku v těchto tělesech, je jedním z hlavních aspektů pochopení magmatických procesů. V mnoha případech bývají důkazy pro magmatický tok kompletně smazány z horninového záznamu, neboť mezoskopické nebo magnetické (AMS) stavby, ze kterých lze průběh toku odvozovat, získává magma v poslední fázi historie vývoje magmatického krbu podél migrující krystalizační fronty. Primární stavby mohou být často přetištěny regionální tektonickou deformací (např. Benn, 1994; Fowler a Paterson, 1997; Paterson et al., 1998; Benn et al., 2001).

Nejvhodnější podmínky pro zachování tokových staveb jsou v malých post-tektonických plutonech, které (1) nejsou ovlivněny regionální tektonickou deformací a (2) jejichž solifikace je rychlá a znemožňuje reorientaci magmatických staveb v důsledku termálního, mechanického a gravitačního napětí, která se přenáší napříč magmatickými krby. Základní geometrické typy magmatického toku v plutonech jsou např. strmý tok v diapirech (např. Paterson et al., 1998), tok rozšiřujících se do stran ze strmého centrálního přívodního

kanálu (např. Tobisch and Cruden, 1995) nebo pohyb magmatu v systému tzv. tokových laloků (např. Stevenson et al., 2007).

Z několika hlavních mechanismů výstupu a finálního umístění granitoidních magmat v kontinentální kůře jsou v současné době nejvíce diskutovány dva základní koncepty (můžeme je chápat jako koncové členy celého spektra procesů). Tzv. diapirismus (Berner et al. 1972, Marsh, 1982, Bateman 1984, Eeckhout et al. 1986, Courrioux 1987, Schmeling et al. 1988, Dietl & Stein 2001, England 1990, 1992, Weinberg & Podladchikov 1994, Paterson & Vernon 1995, Miller & Paterson 1999, Dietl & Koyi 2002, Galadí-Enriquez et al. 2003) je mechanismus, kdy teplo uvolněné magmatem prohřívá okolní horniny a snižuje jejich viskozitu, a umístění jednoho či více magmatických pulsů (typicky mají eliptický tvar v povrchovém řezu) je pak akomodováno převážně duktilním tokem okolních hornin (tzv. horké Stokesovy diapiry; Marsh, 1982). Podle mnohých autorů je tak tento mechanismus omezen pouze na duktilní spodní kůru s dostatečně nízkou viskozitou okolních hornin.

Tento termálně-mechanický problém vedl celou řadu autorů k vyloučení diapirismu jako možného mechanismu intruze v elastických horninách svrchní kůry a k předpokladu, že granitové plutony ve svrchní kůře jsou konstruovány jinými mechanismy (Clemens 1998, Clemens & Mawer 1992, Glazner et al. 2004, Petford 1996, Petford et al. 2000). Právě říčanský pluton představuje objekt, který může přinést do teorie diapirismu nový pohled. V současné době velmi populárním modelem umístění granitoidních plutonů je tzv. umístění žilnými kanály (inkrementální "diking"), kdy granitové magma intruduje v mnoha malých pulsech podél elastických fraktur a plutony jsou tak tvořeny vlastně jako vertikální žilné komplexy nebo horizontální deskovitá tělesa (lakolity nebo lopolity) skládající se z mnoha ložních žil (Cruden a McCaffrey, 2001; Coleman et al. 2005, Coleman et al. 2004). Tento mechanismus však nutně vyžaduje nízké viskozity intrudujících magmat a velké rychlosti toku magmatu (tedy i velkou rychlost elastické deformace a přemístění okolních hornin), aby

nedošlo k okamžité solidifikaci těchto těles. Termální aureoly takovýchto těles by měly být velmi úzké a jich vnitřní části by měly obsahovat velké množství interních kontaktů jako výsledek jednotlivých žilných dávek magmatu.

Celá řada plutonických těles ve svrchní kůře (včetně i velmi mělce uložených těles) však postrádá jakýkoliv náznak mechanismu postupného žilného naplňování či podobnost s lakolitovými intruzemi. Naopak, mají celou řadu charakteristik podobných diapirickým tělesům: kruhovitý tvar v mapovém řezu, koncentrické vertikální vnitřní stavby paralelní s okrajem intruze, duktilní a termální aureolu, a koncentrickou normální (mafické magma na okrajích a kyselejší frakcionované magma ve středu tělesa) či inverzní (kyselejší frakcionované magma na okrajích, mafické magma v centru intruze) kompoziční zonálnost. Tento velmi běžný typ plutonů tak představuje zajímavý vědecký problém: jejich vznik není možné uspokojivě vysvětlit ani jedním z výše uvedených mechanismů.

3. Model diferenciace a vmístění říčanského plutonu

Kapitola 3 je volný komentář k hlavní publikaci, která je součástí přílohy rigorózní práce a obsahuje výsledky strukturní analýzy říčanského plutonu.

Říčanský pluton představuje post-tektonickou intruzi vmístěnou po regionální transpresi podél sz. okraje středočeského plutonického komplexu, složenou z jednotlivých horninových typů, které jsou jak petrograficky tak i petrochemicky dobře odlišitelné.

Magmatické i magnetické koncentrické foliace se subhorizontálními magnetickými lineacemi paralelní s okrajem a strměji upadající magnetické lineace v centru říčanského plutonu jsou interpretovány tedy jako záznam helikálního výstupu magmatu vertikální výstupovou dráhou. Helikální tok byl způsoben rozdílným chováním ve viskozitě mezi vnější výrazně porfyrickou částí a vnitřní nevýrazně porfyrickou částí říčanského plutonu. Výstup magmatu probíhal ve viskozitně oddělených doménách.

Centrální nízce viskózní a nevýrazně porfyrická doména proudila vertikálně, ale naproti tomu vysoce viskózní výrazně porfyrická doména na okraji se pohybovala po šroubovité válcové dráze. Tato interpretace byla podpořena jednoduchým kvantitativním modelem dvouvrstevného helikálního toku vertikální trubici, kde vnější vrstva (výrazně porfyrický granit) má o několik řádů vyšší viskozitu než centrální část (nevýrazně porfyrický granit). V modelu definujeme lineární pokles množství vyrostlíc K-živců od okraje plutonu směrem do centra. Pokles je zapříčiněn exponenciálním vzrůstem efektivní viskozity granitového magmatu a pravděpodobným únikem fluid z centrální části plutonu. S využitím Poiseulleho rovnice, takováto distribuce efektivní viskozity produkuje uvnitř trubice zónu s vysokou rychlostí výstupu magmatu. Pomocí magnetických staveb zaznamenaných v říčanském plutonu, které nejsou kompatibilní s existujícími modely pro vmístění eliptických plutonů, lze usuzovat, že viskozitou řízený helikální výstup magmatu uvnitř strmého kanálu,

představuje v současném erozním řezu plutonem pravděpodobně přívodní dráhu spojující magmatický krb v hloubce s nadložním, dnes již odstraněným hypotetickým vulkánem. Tento model by měl být dále testován, jelikož je možné, že viskozitně oddělený helikální magmatický tok, představuje proces, který by mohl fungovat za určitých podmínek v mělce uložených magmatických systémech, než je v současné době předpokládáno.

Citace

Trubač J, Žák J, Chlupáčová M, Janoušek V (2009): Magnetic fabric of the Říčany granite, Bohemian Massif: a record of helical magma flow? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **181**: 25–34.

4. Přínos k vědeckému poznání

Rigorózní práce shrnuje dosavadní výsledky moderní strukturní analýzy říčanského plutonu pomocí metody AMS. Zavádí nový model vmístění magmatu do svrchní kůry. Hlavní výsledky této rigorózní práce jsou shrnuty v následujících statích.

4.1. Další výzkumy v oblasti říčanského plutonu

Říčanský pluton odkrývá variabilitu živcových vyrostlic směrem od okraje do středu tělesa. Jedním z cílů, na který se soustředí budoucí výzkum je vysvětlení této variability a objasnění mechanismu vzniku vyrostlic v magmatickém krbu, jejich případnou akumulaci ve výstupních kanálech, či krystalizaci a redistribuci v tokových doménách.

4.1.1. Geochemická syntéza

Na základě geochemického zpracování říčanského plutonu je možno navrhnout, že výrazně a nevýrazně porfyrický granit reprezentují jeden puls magmatu, avšak různě geochemicky diferenciovaný. Hlavní a stopové prvky ukazují geochemické rozdíly v jednotlivých varietách granitu vlivem frakcionace K-živce, v menší míře též biotitu a akcesorií (jako je rutil, monazit, apatit), což také dokládá pokles Ba, Sr, K, Eu. V plutonu existuje inverzní geochemická zonálnost. Okraj plutonu je více peraluminický a frakciovanější než centrum plutonu. Inverzní zonálnost mohla vzniknout výstupem a vmístěním jednoho pulsu magmatu z hlouběji uloženého magmatického krbu, v podobě dvou viskózně oddělených magmat.

Jevanský granit představuje další poměrně málo diferenciovanou dávku magmatu vmístěnou s časovým odstupem. Svým chemismem se liší od porfyrických variet říčanského typu a je samostatnou intruzí říčanského plutonu.

Na celkovém geochemickém zhodnocení tělesa se pracuje a se souhrnnou geochemickou syntézou říčanského plutonu je plánováno provést také datování U–Pb na zirkonech či stanovení izotopů Sr a Nd.

4.1.2. Okrajová facie říčanské intruze

V jižní části říčanské intruze se vyskytuje několik stovek metrů široký pás turmalinitických aplitů tzv. okrajový typ, s nepravidelnými solidifikačními texturami, pegmatitových kapes a žil. Aplity společně s aplitickými žilami nesou znaky již značně vyvinutého diferenciovaného magmatu s variabilním množstvím volatilních komponent a nízkým poměrem K/Rb. Na základě těchto charakteristik a terénních pozorování se potvrzuje, že tvoří také samostatnou pozici v rámci říčanského plutonu.

Geneze okrajového aplitu je v současné době intenzivně studována pomocí geochemických analýz hlavních a stopových prvků. Také je kladen důraz na detailní texturní analýzu. Oblast poskytuje unikátní příležitost ke studiu různých texturních vztahů, které mohou pomoci k odhalení principu segregace, pohybu a krystalizaci vysoce vyvinutých tavenin. Horniny poskytují záznam o jejich solidifikačních mechanismech, který je klíčem k pochopením historie chladnutí a rychlosti nukleace.

5. Literatura

- Bateman, R. (1984). On the role of diapirism in the segregation, ascent and final emplacement of granitoid magmas. *Tectonophysics* 110, 211-231.
- Benn, K. (1994). Overprinting of magnetic fabrics in granites by small strains - numerical modeling. *Tectonophysics*, 233, 153–162.
- Benn, K., Paterson, S. R., Lund, S. P., Pignotta, G. S., Kruse, S. (2001). Magmatic fabrics in batholiths as markers of regional strains and plate kinematics: example of the Cretaceous Mt. Stuart batholith. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26, 343–354.
- Berner, H., Ramberg, H. & Stephansson, O. (1972). Diapirism in theory and experiment. *Tectonophysics* 15, 197-218.
- Clemens, J. D. (1998). Observations on the origins and ascent mechanisms of granitic magmas. *Journal of the Geological Society, London* 155, 843-851.
- Clemens, J. D. & Mawer, C. K. (1992). Granitic magma transport by fracture propagation. *Tectonophysics* 204, 339-360.
- Coleman, D. S., Bartley, J. M., Glazner, A. F. & Law, R. D. (2005). Incremental assembly and emplacement of Mesozoic plutons in the Sierra Nevada and White and Inyo Ranges, California: Geological Society of America Field Forum Field Trip Guide (Rethinking the Assembly and Evolution of Plutons: Field Tests and Perspectives) 7–14 October 2005, 1-59.
- Coleman, D. S., Gray, W. & Glazner, A. F. (2004). Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geology* 32, 433-436.
- Courrioux, G. (1987). Oblique diapirism: the Criffel granodiorite/granite zoned pluton (southwest Scotland). *Journal of Structural Geology* 9, 313-330.
- Cruden, A. R. & McCaffrey, K. J. W. (2001). Growth of plutons by floor subsidence: implications for rates of emplacement, intrusion spacing and melt-extraction mechanisms. *Physics and Chemistry of the Earth* 26, 303-315.
- Dietl, C. & Koyi, H. A. (2002). Emplacement of nested diapirs: results of centrifuge modelling. *Journal of the Virtual Explorer* 6, 81-88.
- Dietl, C. & Stein, E. (2001). The diapiric emplacement and related magmatic fabrics of the porphyric Ludwigshöhe granite, Central Odenwald (Germany). *Mineralogy and Petrology* 72, 145-164.
- Eeckhout, B. V. d., Grocott, J. & Vissers, R. (1986). On the role of diapirism in the segregation, ascent and final emplacement of granitoid magmas - discussion. *Tectonophysics* 127, 161-169.

- England, R. W. (1990). The identification of granitic diapirs. *Journal of the Geological Society, London* 147, 931-933.
- England, R. W. (1992). The genesis, ascent, and emplacement of the Northern Arran Granite, Scotland: implications for granitic diapirism. *Geological Society of America Bulletin* 104, 606-614.
- Fowler, T.K., Paterson, S.R. (1997). Timing and nature of magmatic fabrics from structural relations around stoped blocks. *Journal of Structural Geology*, 19, 209–224.
- Galadí-Enriquez, E., Galindo-Zaldivar, J., Simancas, F. & Exposito, I. (2003). Diapiric emplacement in the upper crust of a granitic body: the La Bazana granite (SW Spain). *Tectonophysics* 361, 83-96.
- Glazner, A. F., Bartley, J. M., Coleman, D. S., Gray, W. & Taylor, R. Z. (2004). Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today* 14, 4-11.
- Holub, F.V., Machart, J., Manová, M. (1997a). The Central Bohemian Plutonic Complex: geology, chemical composition and genetic interpretation. *Journal of Geological Sciences, Economic Geology, Mineralogy*, 31, 27–50.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D.R., Vaňková, V. (1997). Cryptic trace-element variation as an indicator of reverse zoning in a granitic pluton: the Ríčany granite, Czech Republic. *Journal of the Geological Society, London*, 154, 807–815.
- Marsh, B.D., (1982). On the mechanics of igneous diapirism, stoping, and zone melting. *American Journal of Science* 282, 808–855.
- Miller, R. B. & Paterson, S. R. (1999). In defense of magmatic diapirs. *Journal of Structural Geology* 21, 1161-1173.
- Paterson, S. R. & Vernon, R. H. (1995). Bursting the bubble of ballooning plutons: a return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Geological Society of America Bulletin* 107, 1356-1380.
- Paterson, S.R., Fowler, T.K., Schmidt, K.L., Yoshinobu, A.S., Yuan, E.S., Miller, R. B. (1998). Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos* 44, 53–82.
- Petford, N. (1996). Dykes or diapirs? *Transactions of the Royal Society of Edinburgh : Earth Sciences* 87, 105-114.
- Petford, N., Cruden, A. R., McCaffrey, K. J. W. & Vigneresse, J.-L. (2000). Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature* 408, 669-673.
- Schmeling, H., Cruden, A. R. & Marquart, G. (1988). Finite deformation in and around a fluid sphere moving through a viscous medium: implications for diapiric ascent. *Tectonophysics* 149, 17-34.

Stevenson, C.T.E., Owens, W.H., Hutton, D.H.W. (2007). Flow lobes in granite: the determination of magma flow direction in the Trawenagh Bay Granite, northwestern Ireland, using anisotropy of magnetic susceptibility. *Geol. Soc. Am. Bull.* 119, 1368–1386.

Tobisch, O.T., Cruden, A.R. (1995). Fracture-controlled magma conduits in an obliquely convergent continental magmatic arc. *Geology*, 23, 941–944.

Weinberg, R. F. & Podladchikov, Y. (1994). Diapiric ascent of magmas through power law crust and mantle. *Journal of Geophysical Research* 99, 9543-9559.

Další citace jsou uvedeny v článku, který je součástí rigorózní práce.

Příloha

Trubač J, Žák J, Chlupáčová M, Janoušek V (2009).

Magnetic fabric of the Říčany granite, Bohemian Massif: a record of helical magma flow?
Journal of Volcanology and Geothermal Research **181**: 25–34.



Magnetic fabric of the Říčany granite, Bohemian Massif: A record of helical magma flow?

Jakub Trubač^{a,b,c,*}, Jiří Žák^{a,b}, Marta Chlupáčová^d, Vojtěch Janoušek^{b,e}

^a Institute of Geology and Paleontology, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, Prague, 12843, Czech Republic

^b Czech Geological Survey, Klárov 3, Prague, 11821, Czech Republic

^c Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, Prague, 12843, Czech Republic

^d Boháčova 866, Prague, 14900, Czech Republic

^e Institute of Petrology and Structural Geology, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, Prague, 12843, Czech Republic

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 July 2008

Accepted 12 December 2008

Available online 31 December 2008

Keywords:

anisotropy of magnetic susceptibility (AMS)

Bohemian Massif

granite

magma flow

pluton

ABSTRACT

A highly unusual fabric pattern and inferred flow mechanism was discovered in the shallow-level Říčany granite pluton, Bohemian Massif, using an integrated structural and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) study. The pluton consists of an outer strongly porphyritic and an inner weakly porphyritic biotite granite separated by a wide gradational contact. Both varieties share a steep margin-parallel magmatic foliation (defined by K-feldspar phenocrysts and biotite) and magnetic (AMS) foliation carried by biotite. The steep foliation bears a shallowly-plunging magnetic lineation arranged parallel to the circumference of the pluton margin and a steep magnetic lineation in the weakly porphyritic pluton center. We propose a new mechanism of magma flow, in which the bulk ascent along a steep-sided, cylindrical conduit was partitioned into a high-viscosity, phenocryst-rich outer margin flowing helically and a low-viscosity, phenocryst-poor center flowing vertically. This interpretation is supported quantitatively by a simple model of magma flow within a cylindrical pipe, in which the linear decrease in phenocryst content from the pluton margin inwards causes a power-law decrease in the effective viscosity of the magma. According to the Poiseuille equation, such a power-law viscosity distribution across the conduit produces a central zone of high magma ascent velocity. The magnetic (AMS) fabric pattern in the Říčany pluton may thus preserve a record of helical magma ascent driven by viscosity partitioning in a steep-sided conduit, which presumably linked an underlying magma chamber with a volcanic feeder at the surface. Except for one deep-seated granite–migmatite complex, no such helical fabric pattern has been documented in a granite pluton as of yet. We propose that the viscosity-partitioned helical flow may be a more common magma ascent mechanism in shallow-level volcano–plutonic systems than previously envisaged.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Unraveling the geometric patterns and likely physical causes of magma flow in plutons is one of the key problems in understanding magmatic processes. In many (or most?) cases, however, direct field evidence for large-scale flow has been completely erased from the rock record. The preserved mesoscopic or magnetic (AMS) fabrics from which the flow patterns may be inferred are acquired late in the magma chamber history along migrating crystallization fronts and are easily reset by regional tectonic deformation (e.g., Benn, 1994; Fowler and Paterson, 1997; Paterson et al., 1998; Benn et al., 2001). The poor strain memory of magmatic fabrics (e.g., Paterson et al., 1998) makes inferences on the large-scale flow patterns within a pluton difficult or at least problematic.

The most suitable settings to study preserved flow-related fabrics in plutons are thus post-tectonic bodies that (1) are not affected by tectonic deformation and (2) solidified so quickly that the magmatic fabric was not reoriented in response to the late thermal, mechanical, and gravitational stresses potentially transmitted across magma chambers after their construction. The most common magma flow types in such plutons inferred from fabrics are “onion-skin” concentric patterns (e.g., Paterson et al., 1998), magma flow spreading sideways from steep central feeders (e.g., Tobisch and Cruden, 1995), or more complex flows in multiple variously-shaped lobes (e.g., Stevenson et al., 2007).

This paper examines the post-tectonic Říčany granite pluton, Bohemian Massif (Fig. 1), in which the internal magmatic fabrics are interpreted to record a specific magma ascent mechanism not previously described from upper-crustal plutonic bodies. Below we first describe integrated structural, microstructural, and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data from the pluton, and then interpret the observed fabrics and AMS in terms of helical magma flow

* Corresponding author. Institute of Geology and Paleontology, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, Prague, 12843, Czech Republic. Fax: +420 221951452.

E-mail address: jakub.trubac@gmail.com (J. Trubač).

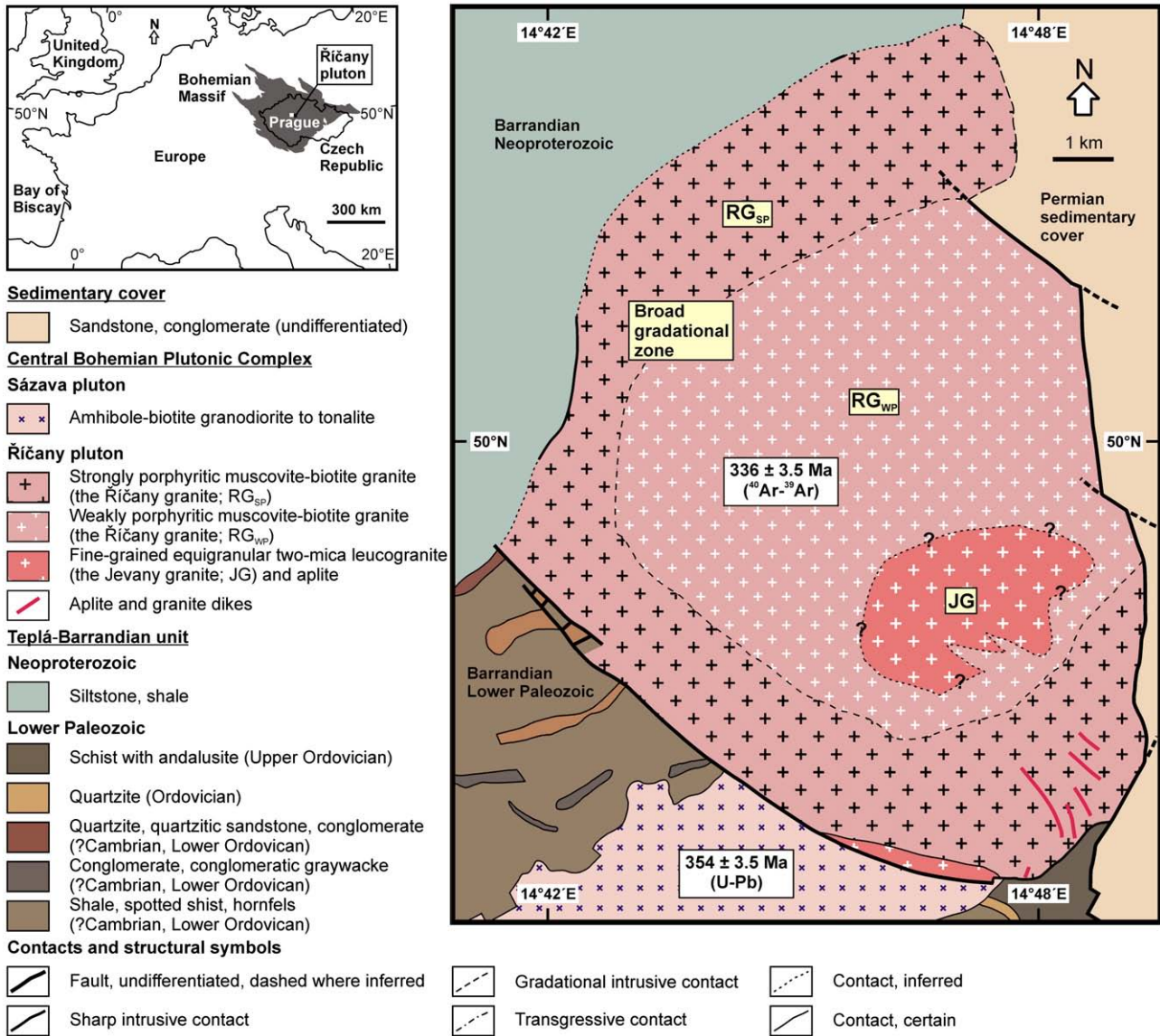


Fig. 1. Simplified geologic map of the Říčany pluton (based on Czech Geological Survey 1:50,000 maps, sheets 13–31 Říčany and 13–13 Brandýs nad Labem). The pluton is compositionally and texturally zoned with the outer, strongly porphyritic granite (RG_{sp}) passing gradually into the inner, weakly porphyritic granite (RG_{wp}), which encloses a small body of poorly exposed equigranular leucogranite (JG). Index map shows the position of the pluton in the Bohemian Massif.

(in the sense of Fowler, 1996; see also Table 1 in Fowler, 1996 for definitions of terms) within a steep-sided cylindrical conduit. We then present a simple quantitative model to explain the formation of the observed pluton fabric as a result of viscosity-controlled variations in magma ascent velocity within the conduit. Finally, we explore the possibility of whether this type of magma flow may be a more common process in volcano-plutonic systems than previously believed.

2. Geological setting

2.1. Field relationships

The Říčany pluton is a post-tectonic, shallow-level intrusion (peak pressure estimated at ~0.2 GPa from contact metamorphic mineral assemblages; Kachlík, 1992) in the northern part of the Central Bohemian Plutonic Complex, Bohemian Massif (Janoušek et al., 1995; Holub et al., 1997a,b; Janoušek et al., 2000). The cooling age of the pluton was estimated at 336 ± 3.5 Ma (unpublished ^{40}Ar – ^{39}Ar biotite

data of H. Maluski, cited in Janoušek et al., 1997); the pluton is thus one of the youngest units of the plutonic complex.

In map view, the pluton has a roughly elliptical outline with dimensions of 13×9 km (Fig. 1). The contact relationships of the pluton against the surrounding units are intrusive, faulted, or transgressive (Fig. 1): (1) to the northwest, the pluton has a steep intrusive contact against the low-grade Neoproterozoic (Ediacaran) siltstones and shales of the Teplá–Barrandian unit (see Dallmeyer et al., 1995, p. 378–414; Vrána and Štědrá, 1997, p. 80–104; and McCann, 2008 for reviews); (2) the southwestern margin where the pluton is in contact with a Lower Paleozoic roof pendant and ~354 Ma Sázava tonalite (Janoušek et al., 2004) has been modified by late, post-emplacement brittle faults and cataclastic zones; and (3) the eastern margin of the pluton is concealed beneath Permian clastic sequences and has also been reactivated by younger brittle faults. No field evidence indicates that significant tilting of the pluton occurred after its emplacement (e.g., vertical cleavage cross-cut by the pluton continues across geologic units tens of kilometers to the southwest from the pluton with no change in orientation).

The pluton consists of three distinct granite varieties (Fig. 1) that define a sub-concentric compositional and textural zoning: (1) the outer, strongly porphyritic, muscovite–biotite Říčany granite with abundant K-feldspar phenocrysts (approximately 4–7 cm in size), (2) the inner, weakly porphyritic, muscovite–biotite Říčany granite characterized by decreasing content and size of K-feldspar phenocrysts (3–4 cm), and (3) a small, poorly exposed body of the fine-grained, equigranular, two-mica Jevany leucogranite in the south-central part of the pluton. The contact between the two porphyritic granites is gradational over several hundreds of meters, and the nature of the outer contact of the Jevany leucogranite is unclear due to a poor exposure.

2.2. Geochemical characteristics of the Říčany granite: a brief overview

All the granite varieties are fairly fractionated, peraluminous ($A/CNK=1.01–1.13$), S-type granites. In general, the major-element compositions do not vary greatly between the two varieties of Říčany granite. However, there are some conspicuous differences in the trace-element signatures. For instance, the inner, weakly porphyritic granite shows markedly lower Rb, Cs, Ta and HREE contents at elevated Ba, U, Sr, Zr and Hf compared with the outer, strongly porphyritic granite (J. Trubač and V. Janoušek, unpublished data). The magnitudes of the Eu anomalies increase outwards, reaching their maximum in the strongly porphyritic granite (J. Trubač and V. Janoušek, unpublished data). The degree of fractionation decreases from pluton margin inward: the outer, strongly porphyritic granite is more evolved than the central, weakly

porphyritic granite. Thus, the pluton shows reverse zoning, which is “cryptic” as it is reflected nearly exclusively in the trace element compositions (Janoušek et al., 1997). The genetic relation of the Jevany leucogranite to both Říčany granite varieties remains poorly constrained (Němec, 1978).

3. Magmatic fabric and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS)

3.1. Mesoscopic fabric

The magmatic foliation in the porphyritic granites is defined by the planar shape-preferred orientation of the K-feldspar phenocrysts and biotite; lineation is macroscopically not discernible (Fig. 2a, b). At the micro-scale, the textures are exclusively magmatic, biotite and feldspar grains in the granite have euhedral to subhedral shapes, and interstitial quartz is not recrystallized. No evidence for sub-solidus deformation (using the criteria outlined in Paterson et al., 1989 and Vernon, 2000) was found throughout the pluton (Fig. 2c and d).

In both varieties of the porphyritic granite, the mesoscopic magmatic foliation dips steeply ($70–80^\circ$) and is subparallel to both the pluton margin and the broad gradational contact between the two varieties (Fig. 3). Poles to the foliation thus concentrate around the periphery of the stereonet in Fig. 3. The foliation intensity decreases from the margin inwards. In the map, the foliation defines an “onion-skin” pattern (Fig. 3) and is discordant to the regional host rock markers (Fig. 1).

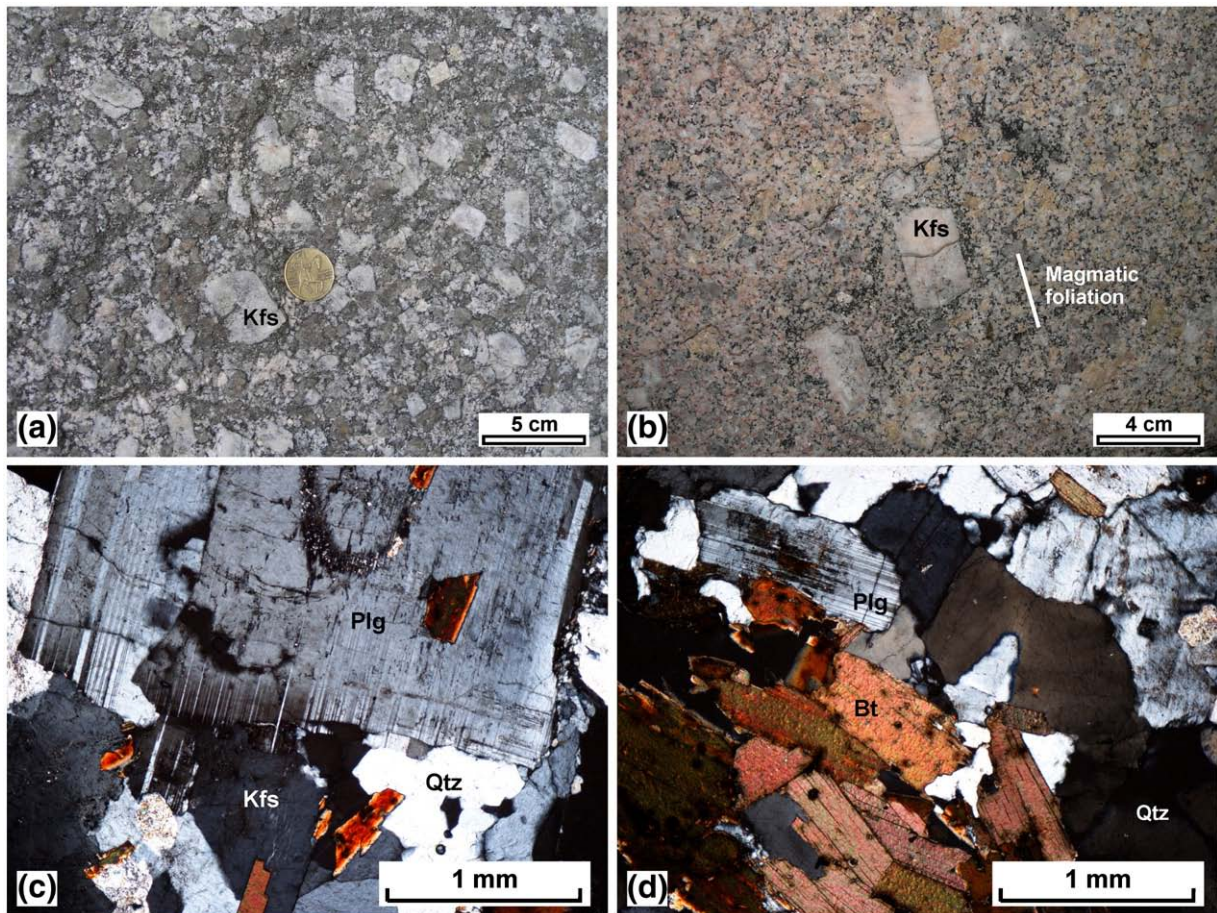


Fig. 2. (a) K-feldspar phenocrysts (up to 4 cm in size) in the strongly porphyritic Říčany granite. (b) Magmatic foliation defined by K-feldspar phenocrysts in the weakly porphyritic Říčany granite. (c) Photomicrograph of a magmatic texture in the strongly porphyritic muscovite–biotite Říčany granite. (d) Photomicrograph of magmatic texture in the weakly porphyritic muscovite–biotite Říčany granite. Crystals of the main rock-forming minerals exhibit no solid-state deformation. The magmatic textures are typical of all granite varieties in the Říčany pluton.

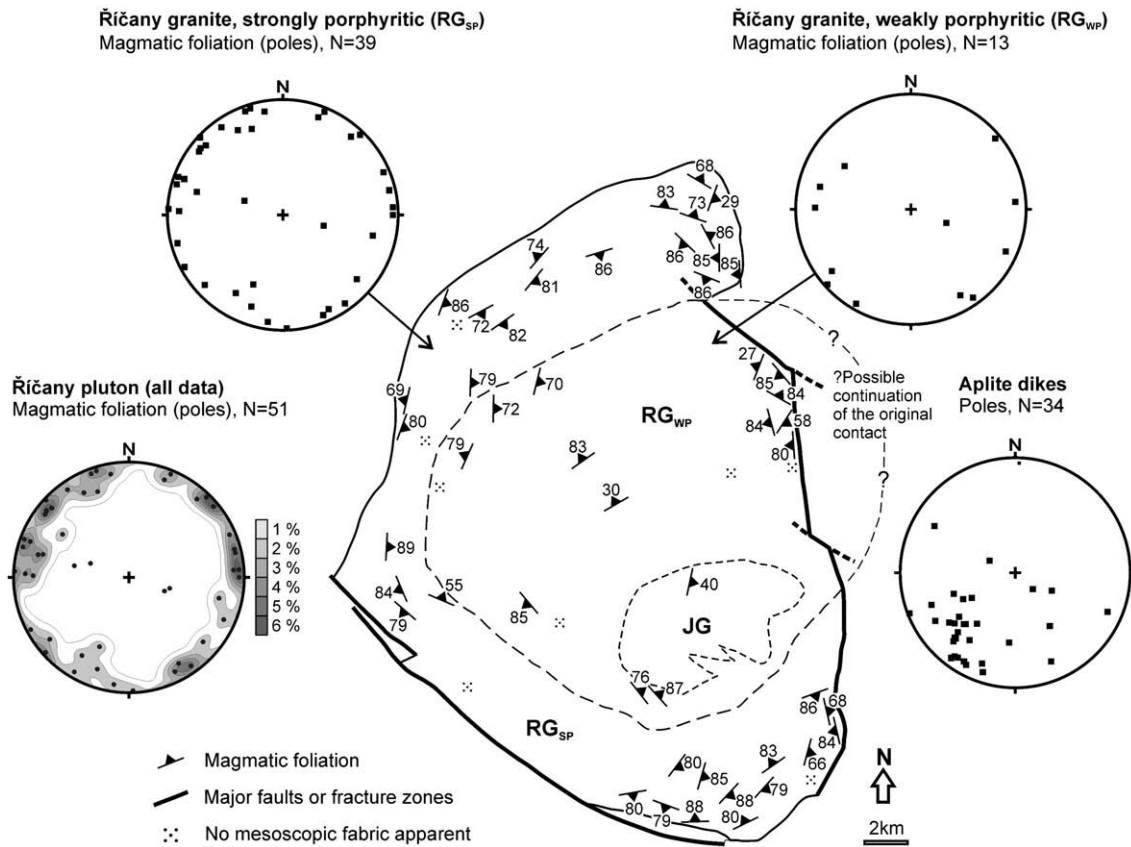


Fig. 3. Structural map shows magmatic (mesoscopic) foliation pattern. Magmatic foliation is parallel to both the outer pluton margin and the internal gradational contact between the two granite varieties. Stereonets (lower hemisphere, equal area projection) show the orientation of the magmatic foliation in each granite variety.

3.2. Anisotropy of magnetic susceptibility

3.2.1. Methodology

The anisotropy of magnetic susceptibility (AMS; see Hrouda, 1982; Jackson and Tauxe, 1991; Tarling and Hrouda, 1993; Bouchez, 1997;

Borradaile and Jackson, 2004 for reviews) was used to investigate the magnetic fabric of the Říčany pluton, to complement the field structural data, and to quantify the fabric in the pluton (Figs. 4–7). Seventy-one oriented samples were collected using a portable drill at 31 sampling sites (see Electronic Supplementary Material for sample

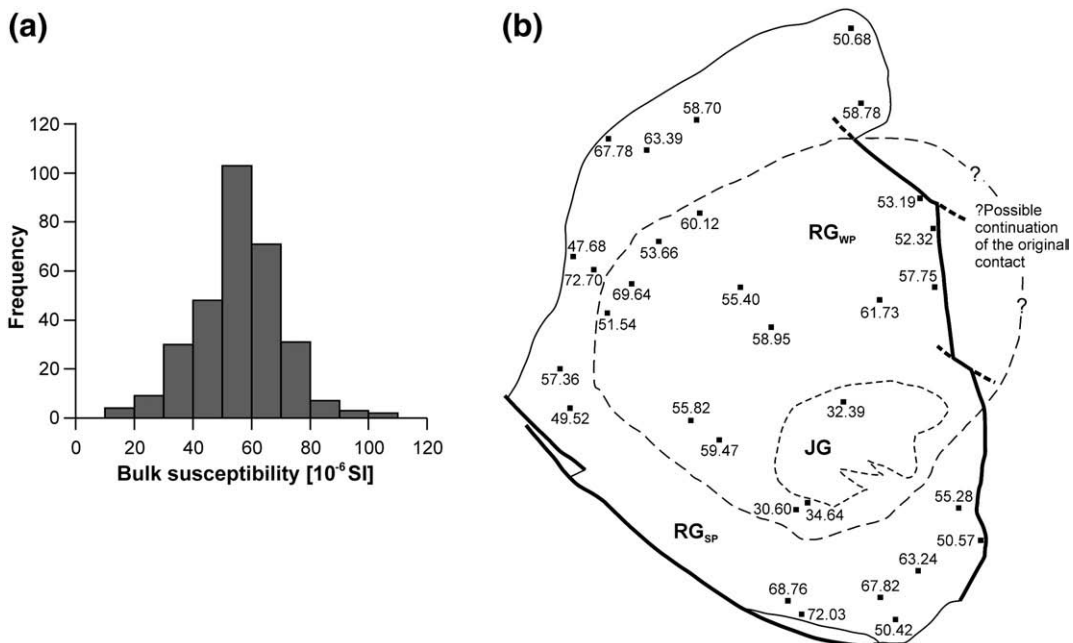


Fig. 4. (a) Bulk susceptibility histogram for all measured specimens. The bulk susceptibility is in the order of 10^{-5} . (b) Map of average values of bulk susceptibility at each sampling site in the Říčany pluton (in 10^{-6} [SI]).

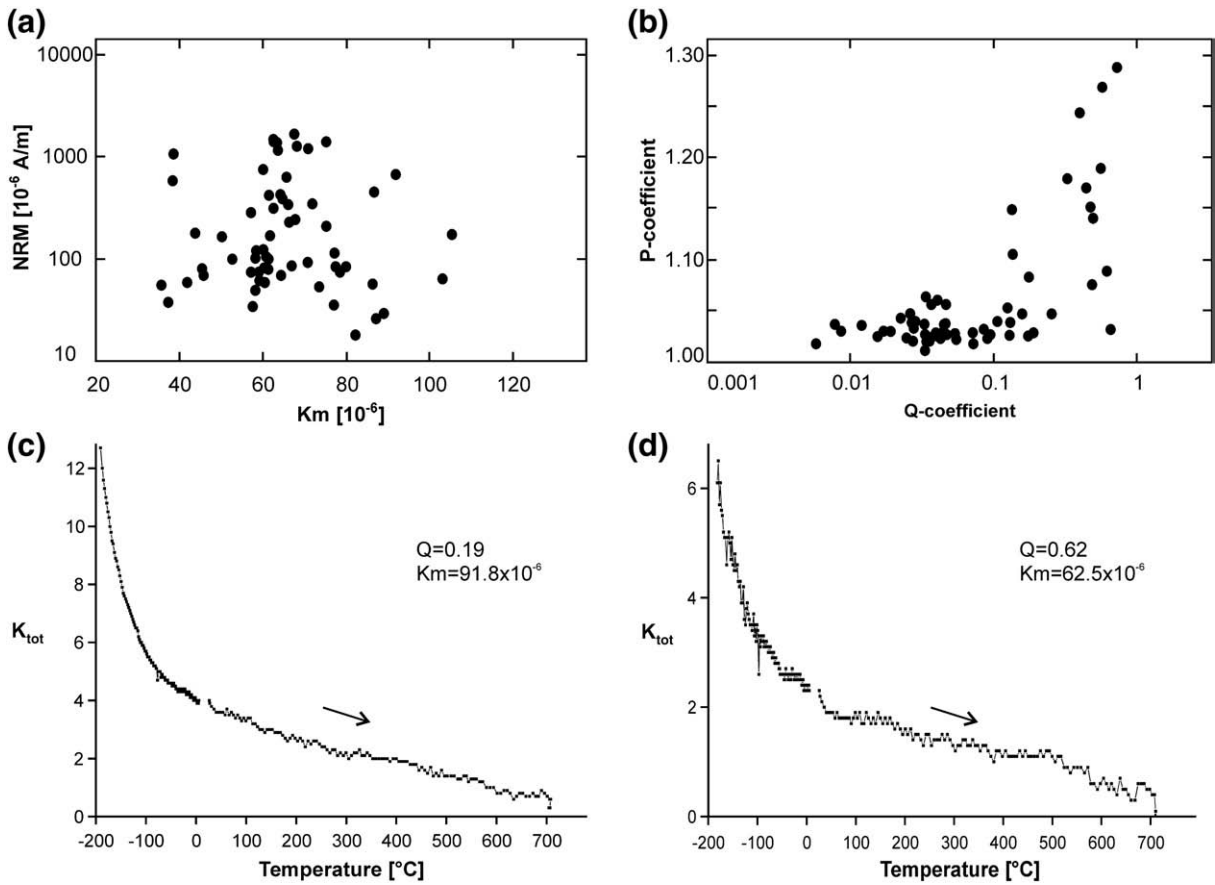


Fig. 5. (a) Plot of mean magnetic susceptibility (Km) vs. natural remanent magnetization (NRM). Natural remanent magnetization was measured using a Spinner Magnetometer JR-6. (b) Plot of Q-coefficient (Königsberger ratio) vs. P-coefficient (degree of anisotropy). The diagram proves the influence of a ferromagnetic component on P for specimens with Q>0.1 (c–d) Temperature variation of magnetic susceptibility of specimens JT29/2/7, JT41/1/1, and JT60/1/1, respectively. Thermomagnetic measurements were made using the Kappabridge MFK-1 connected with a non-magnetic Cryostat Apparatus and non-magnetic Furnace Apparatus.

locations and list of measured AMS parameters). The AMS was measured with the KLY-4S Kappabridge apparatus at the Geophysical Institute of the Academy of Sciences, Czech Republic. Statistical

treatment and analysis of the AMS data were performed using the software ANISOFT 4.2 (written by M. Chadima and V. Jelínek; www.agico.com).

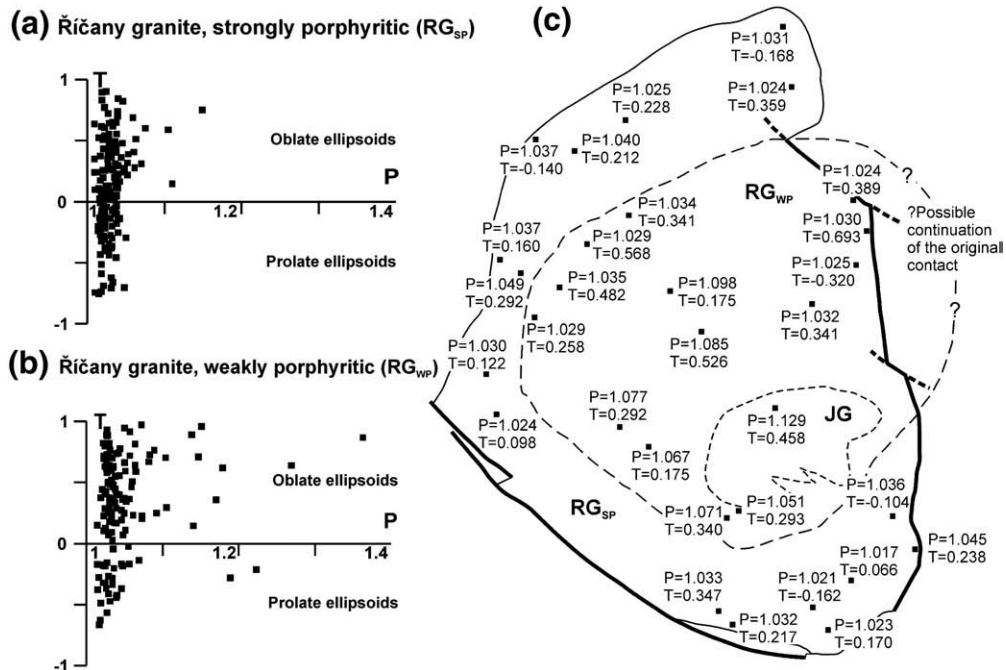


Fig. 6. (a–b) Magnetic susceptibility P–T plots for each granite variety. (c) Map of average values of P and T parameters at each sampling site in the Řičany pluton.

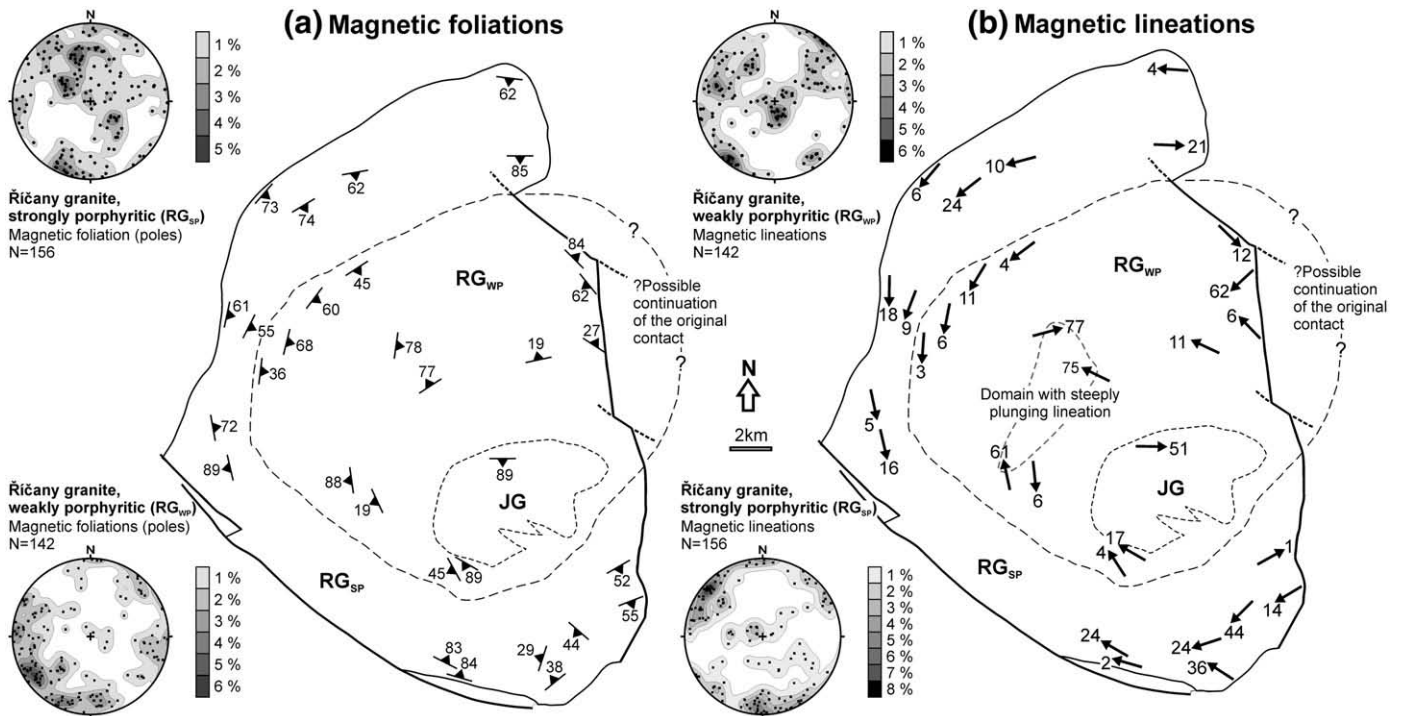


Fig. 7. Map of magnetic foliations (a) and lineations (b) in the Řičany pluton (AMS). Magnetic foliations delineate the pluton margin and correspond well with the mesoscopic magmatic foliation. The circumferential shallowly-plunging lineations occur in the outer part of the pluton, whereas in a central domain the lineations plunge steeply. Stereonets (lower hemisphere, equal area projection) show the orientation of the poles to magnetic foliation (k_3) and magnetic lineation (k_1) in each granite variety.

The AMS data are represented by the mean magnetic susceptibility (k_m), degree of anisotropy (P), and shape parameter (T) defined as follows (Jelínek, 1981; Hrouda, 1982): $k_m = (k_1 + k_2 + k_3)/3$; $P = k_1/k_3$; $T = 2\ln(k_2/k_3)/\ln(k_1/k_3) - 1$, where $k_1 > k_2 > k_3$ are the principal susceptibilities. The k_m parameter reflects the qualitative and quantitative contents of magnetic minerals in the rock. The P parameter reflects the eccentricity of the AMS ellipsoid and thus indicates the intensity of the preferred orientation of the magnetic minerals in the rock. The higher the P parameter, the stronger is the preferred orientation. The T parameter indicates the symmetry of the AMS ellipsoid. It varies from -1 (perfectly linear magnetic fabric) through 0 (transition between linear and planar magnetic fabrics) to $+1$ (perfectly planar magnetic fabric). The orientations of the magnetic foliation poles and magnetic lineations are presented either in stereonet in the geographic (in situ) coordinate system or as mean values for individual localities on the maps.

3.2.2. Magnetic mineralogy

The mean magnetic susceptibility of the analyzed samples is low, ranging from 13.13×10^{-6} to 105.3×10^{-6} [SI] (Fig. 4a). Such a low susceptibility (in the order of 10^{-5}) is considered to be characteristic of paramagnetic granites (Bouchez, 1997). No significant spatial variations of mean susceptibility were revealed in the pluton, that is, the mean susceptibility is comparable in both varieties of porphyritic granite and only slightly lower in the Jevany granite (Fig. 4b).

Magnetic mineralogy was investigated to distinguish whether the modal composition of the Řičany granite is solely paramagnetic, and if not, to what extent the susceptibility is influenced by a minor ferromagnetic component. Therefore, the natural remanent magnetization (NRM), which is carried only by ferromagnetic minerals, was measured on a set of representative specimens. The NRM varies from 18 to 1677×10^{-6} A/m. Even though such an NRM can be assessed as relatively low, it provides clear evidence that at least one ferromagnetic accessory mineral is present. NRM values vary widely and do not correlate with mean susceptibility values (Fig. 5a). NRM vectors are distributed randomly with the mean direction parallel to the ambient

magnetic field, and NRM is therefore likely to be of magmatic origin. NRM never exceeds induced magnetization; Q -coefficients (Königsberger ratio) are smaller than 1 (Fig. 5b). Three specimens with different Q -coefficients were examined by thermomagnetic analysis. The variation of magnetic susceptibility with temperature was measured in the range of -190 °C to 700 °C (Fig. 5c–d), and the relations of para- and ferromagnetic components were deduced from the measured curves using the software CUREVAL v. 6 (written by F. Hrouda, AGICO Inc., www.agico.com). The curves proved the dominant role of a paramagnetic component carried mainly by biotite. The ferromagnetic component, represented by very small amounts of a magnetite-like mineral, has no significant influence on the AMS, with the exception of a few specimens with both enhanced Q - and P -values (JT5/1/6, JT14/1/1, JT22/2/10, JT27/1/5, JT27/2/8, JT60/1/1, JT60/2/5, JT67/1/1, JT67/1/5, JT68/1/2, JT68/2/9).

3.2.3. Magnetic fabric parameters and orientation data

The magnetic anisotropy P - T plots for the porphyritic granites show that specimens with low degree of anisotropy ($P < 1.1$) have both oblate and prolate shapes of the AMS ellipsoid. Specimens with P greater than ~ 1.1 are always oblate (Fig. 6a and b). No significant spatial variations in the degree of anisotropy or shape of the AMS ellipsoid were revealed in the porphyritic granites (Fig. 6b).

Below we focus only on describing of the magnetic fabric in the porphyritic granites, excluding the poorly exposed Jevany granite. The magnetic fabric of the porphyritic granites is characterized by a moderately- to steeply-plunging magnetic foliation (Fig. 7a). The steep foliation dips predominantly inwards; only at two stations in the inner, weakly porphyritic granite does the foliation dip gently (less than $\sim 20^\circ$). The foliation strikes parallel to both the outer pluton margin and the internal gradational contact between the two porphyritic varieties (Fig. 7a); foliation poles tend to concentrate along the periphery of the stereonet (Fig. 7a). Along the eastern margin, the foliation seems to continue in the same manner beneath the Permian sedimentary cover. The magnetic foliation thus correlates well with the orientation of mesoscopic K-feldspar and biotite foliation.

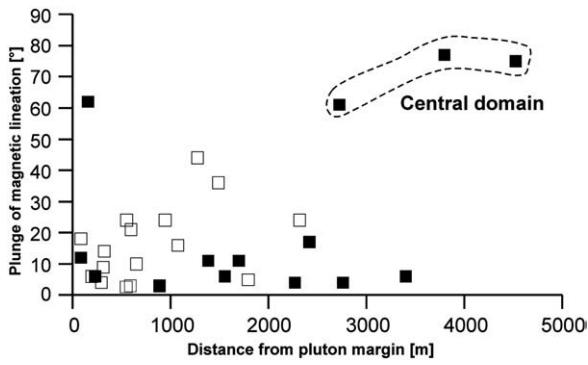


Fig. 8. Plot of mean magnetic lineation (k_1) plunge at each sampling site vs. distance from the pluton margin. Open symbols—strongly porphyritic Říčany granite, closed symbols—weakly porphyritic Říčany granite.

Magnetic lineation in the pluton exhibits two distinct orientations. (1) In a domain that comprises the strongly porphyritic and the weakly porphyritic granite along their gradational contact, the lineation is sub-parallel to both the pluton margin and the gradational contact (Fig. 7b). The lineation plunges shallowly (0–25°) and exhibits mostly consistent counter-clockwise and clockwise circumferential patterns in the northwestern and southern part of the pluton, respectively (Fig. 7b). The shallowly-plunging lineation corresponds to girdles with multiple point maxima near the periphery of the stereonet (Fig. 7b). (2) In contrast, the magnetic lineation plunges steeply (60–80°) at variable trends in the central domain (Fig. 7b); the corresponding maxima form a cluster near the stereonet center (Fig. 7b). The exact size and shape (in map-view) of the domain with steeply-plunging lineations is unknown due to poor exposure; the dashed line which delineates this domain in map (Fig. 7b) shows only its minimum extent.

The spatial relationship between lineation plunge with respect to the distance from the pluton margin was also analyzed using ESRI ArcGIS 9.2 software. In Fig. 8, the plunge of the magnetic lineation (mean value at each locality) is plotted against the shortest distance of the station from the pluton margin. This diagram also illustrates that the magnetic lineation in the central domain is in general significantly steeper than lineations near the pluton margin. The exceptions (outliers in the data) are two

stations at ~1200–1500 m from the contact, where the lineation plunges moderately (35–45°; Fig. 8) within otherwise shallowly-plunging lineations.

4. Interpretation of magnetic fabric in the Říčany granite

The internal magmatic fabric pattern in the Říčany pluton is characterized by concentric mesoscopic and magnetic foliations and two distinct orientations of magnetic lineations. The circumferential, shallowly-plunging lineations occur in the outer part of the pluton, whereas in the central domain the lineations plunge steeply (Fig. 7b). Such an unusual lineation pattern is not compatible with existing models proposed to explain the ascent and emplacement of elliptical plutons (e.g., single-blob or nested diapirism, ballooning, laccolith-like emplacement; e.g., Paterson and Vernon, 1995; Miller and Paterson, 1999; Paterson and Miller, 1998). Instead, it is suggestive of right-handed helical flow, as yet described only for the Bação migmatite–granite complex, Brazil (Hippertt, 1994).

We interpret the mechanism of fabric formation in the Říčany granite as follows. Large-scale compositional and textural homogeneity of the Říčany granite over broad scales, and the absence of internal contacts (except for the wide gradational zone between the two granite varieties), suggest that the two varieties of Říčany granite may represent two closely-related magma batches ascending from an underlying, stratified magma chamber to produce a “cryptic” (trace-element) reverse zoning (Janoušek et al., 1997; see also Section 2.2.). The broad gradational contact between the two granites indicates that their emplacement was approximately coeval. The presence of a much larger granitoid body beneath the pluton (ancient magma chamber) is also supported by gravimetric data (Tomek, 1974).

We thus consider that the Říčany granite magma ascended within a steep-sided, approximately cylindrical conduit (Fig. 9). The conduit shape is inferred from the elliptical outline of the pluton in plan-view, with steep outer contacts and steep internal mesoscopic and magnetic foliations. In our model, we hypothesize that the difference in volume fractions of K-feldspar phenocrysts in the two granite batches could have caused a significant difference in their viscosities: the outer, strongly porphyritic granite had presumably an orders of magnitude higher viscosity than the central, weakly porphyritic one (Fig. 9). This assumption agrees with observed negligible difference in major-element compositions between the two granites (Janoušek et al., 1997) and with a power-law increase in viscosity with volume fraction

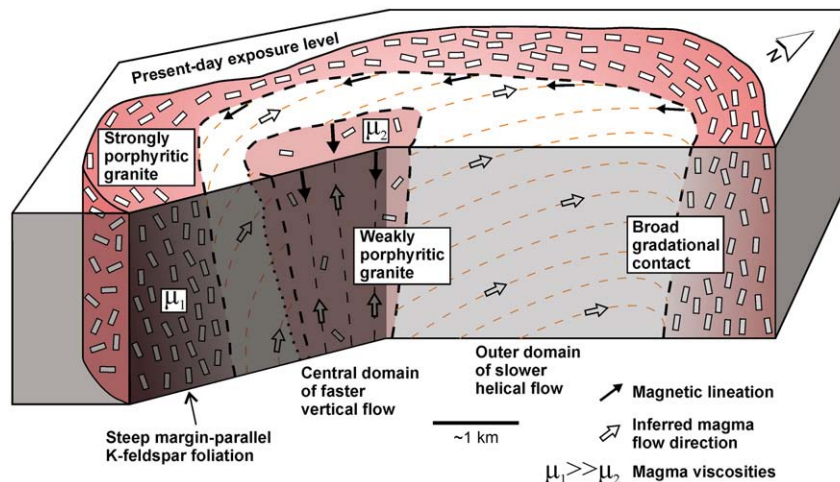


Fig. 9. Interpretive block-diagram to illustrate the viscosity-partitioned flow in the Říčany pluton. The central, phenocryst-poor domain flows faster and vertically, whereas the outer, phenocryst-rich domain flows helically at slower rates.

of crystals as predicted by the Einstein–Roscoe equation for solid–liquid mixtures (e.g., Roscoe, 1952; McBirney and Murase, 1984).

Contrasting viscosities of both magmas would then have caused their different velocities during ascent (Fig. 9). Consequently, faster subvertical flow may have been generated in the low-viscosity (phenocryst-poor) magma in the pluton center in contrast to helical (subhorizontal) flow in the outer, high-viscosity and phenocryst-rich layer (Fig. 9). This two-layer model would explain the finite fabric pattern characterized by concentric, steep foliations and magnetic lineation being circumferential (sub-horizontal) along the pluton margin and sub-vertical in the center. The question arises: why is the measured magnetic fabric intensity (expressed as the P parameter) so low throughout the pluton and why is the P parameter only slightly elevated in the central part with steeply plunging lineations, where the magma flow should be fast and associated with large strains? We explain this discrepancy as a consequence of the generally poor strain memory of magma (see Paterson et al., 1998 for a detailed discussion). The measured magnetic fabric, carried predominantly by biotite, as shown by the thermomagnetic analysis, should thus be viewed as recording final strain increments and the biotite grain reorientation just before the magma flow ceased.

5. Modeling viscosity-dependent magma flow through a cylindrical conduit

To simulate quantitatively the effect of crystallinity and thus viscosity contrast on magma flow and fabric formation, we develop below a simple conceptual model for the flow of variably viscous magma through a vertical cylindrical conduit. The calculations were carried out in two steps.

The first step was to estimate the viscosity of the Říčný granite magma. In general, magma viscosity is rather difficult to constrain quantitatively due to its dependence on numerous parameters, such as composition, volatile content, temperature, crystallinity, grain-size, geometric array of particles in suspension, and strain rate (e.g., Wickham, 1987; Miller et al., 1988; Scaillet et al., 1997, 1998; Dingwell, 1999; Petford, 2003); the following estimations must therefore be taken only as first-order approximations.

The viscosity of the Říčný granite magma was estimated as follows. Major-element compositions are nearly the same in both varieties of the porphyritic granites (Section 2.2.), so an average representative composition was calculated as the arithmetic mean of each major oxide from 24 analyses of the Říčný granite (Electronic Supplementary Material; J. Trubač and V. Janoušek, unpublished data). A mean zircon saturation temperature of 796 ± 16 (2σ) °C was taken as the temperature of the magma during intrusion, averaged from the geochemical analyses using equations described in Watson and Harrison (1983). The inferred average Říčný granite composition

with no volatiles and likely temperature were then used as input parameters for the computer program Magma (Wohletz, 1999; <http://www-geo.lanl.gov/Wohletz/KWare.htm>), which uses Bottinga and Weill's (1972) approach for calculating the viscosities of multi-component silicate liquids. The obtained viscosity for a crystal-free Říčný granite magma at a temperature ~ 800 °C and pressure of 0.2 GPa (Kachlík, 1992) is 9×10^6 Pa s.

Taking into account the subtle differences in major-element composition of the two granite varieties, we assume that the K-feldspar phenocryst content was a major control on viscosity during magma ascent. The effect of varying the phenocryst content across the pluton may thus be calculated using the empirical Einstein–Roscoe equation (e.g., Roscoe, 1952; McBirney and Murase, 1984) in the form:

$$\eta_m = \eta_l \cdot (1 - R \cdot \Phi)^{-2.5} \quad (1)$$

where η_m is the effective viscosity of the magma (a liquid containing a volume fraction Φ of suspended solids), η_l is the viscosity of the liquid alone (melt), and R is a parameter based on the volumetric ratio of solids at maximum packing (1.35 for spheres of uniform size; McBirney and Murase, 1984). In the Říčný pluton, the content of K-feldspar phenocrysts decreases significantly from the margin inwards; in our model we assume a linear decrease from $\Phi=0.55$ at the margin (55 vol.% phenocrysts in the strongly porphyritic granite) to $\Phi=0.10$ in the pluton center (10 vol.% phenocrysts in the weakly porphyritic granite; Fig. 10a). These two Φ limits comply with the field observations; however, a detailed textural and crystal size distribution (CSD) study to better constrain the phenocryst variations within the pluton is the focus of our ongoing research. The above Φ values were inserted into Eq. (1) to calculate the effective viscosity variations with respect to distance from the pluton margin. The obtained results show a power-law decrease in effective viscosity, from $\sim 2.7 \times 10^8$ Pa s at the pluton margin down to $\sim 12.9 \times 10^6$ Pa s in the pluton center (Fig. 10b).

Second, assuming that the Říčný pluton represents a steep-sided cylindrical conduit, the magma flow velocity profile across the pluton can be calculated using the Poiseuille flow of a viscous fluid through a circular pipe (for derivation see Turcotte and Schubert, 2002, p. 231–232):

$$v_m = -\frac{1}{4\eta_m} \cdot \frac{\Delta P}{l} (R^2 - r^2) \quad (2)$$

where v_m is the magma flow velocity, η_m is the magma viscosity, ΔP is the pressure difference driving the flow, l is the pipe length, R is the radius of the pipe, and r is the distance from the pipe center.

In our model, the pipe radius is 4500 m (half-width of the pluton) and the viscosity is assumed to vary across the pluton according to Eq. (1) (Fig. 10b). The unknown variable is the pressure gradient $P' = \frac{\Delta P}{l}$. Assuming that the pressure gradient driving the magma flow

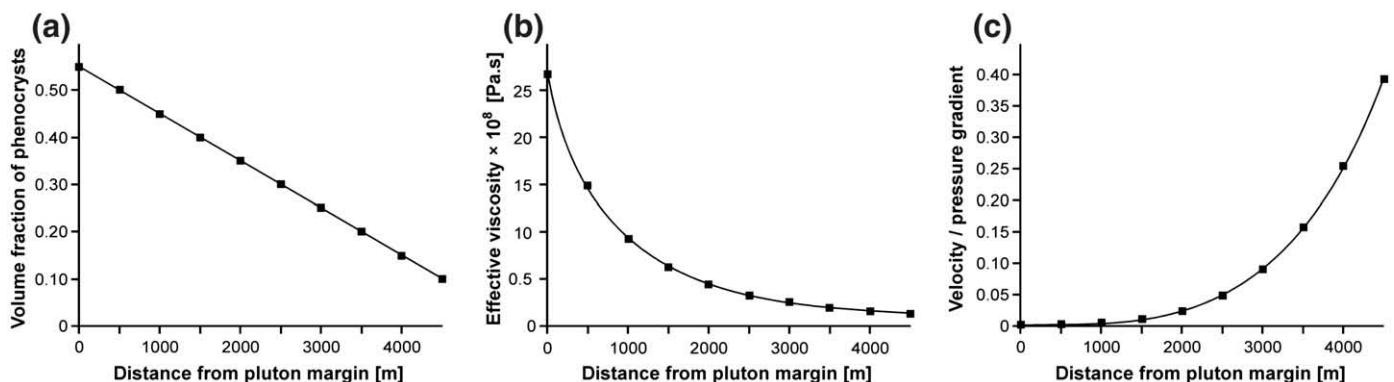


Fig. 10. (a) Plot of assumed volume fraction of phenocrysts decreasing linearly with distance from the Říčný pluton margin. (b) Plot of calculated effective viscosity of the Říčný granite against distance from the pluton margin. (c) Plot of velocity to pressure gradient ratio vs. the distance from the pluton margin.

is constant throughout the pipe, we modify Eq. (2) and express the ratio of magma flow velocity to the pressure gradient as:

$$\frac{v_m}{P'} = -\frac{1}{4\eta_m} \cdot (R^2 - r^2). \quad (3)$$

Regardless of the magnitude of the pressure gradient (P'), the obtained results show a significant increase in magma flow velocity in the pluton center relative to its margin (Fig. 10c).

We are aware that the above approach has the following important limitations. (1) Unlike real magma which is a heterogeneous, multi-component mixture consisting of solid crystals, melt and volatiles, the Poiseuille flow equation is valid for ideal Newtonian liquids. (2) The flow in the pipe is laminar and uniform (flow lines are straight and parallel) and occurs in a coherent liquid volume (as a single magma pulse). (3) The effect of temperature exchange between the magma and wall rock (cooling from the pluton margin) is ignored, that is, the magma is assumed to flow faster than it cools via conduction of heat into the wall rocks (Péclet number $Pe = \frac{v_m \cdot l}{\kappa} \gg 1$; where v_m is the rate of advection, l is the characteristic length-scale, and κ is the thermal diffusivity).

Despite the above limitations, we believe that, in principle, this physical model may explain the flow pattern inferred from the magnetic (AMS) fabric (Fig. 9), where the bulk magma ascent was partitioned into a low-viscosity central part flowing relatively faster and vertically (i.e., dip flow of Hippertt, 1994), whereas the high-viscosity outer margin flowed helically (i.e., strike flow of Hippertt, 1994) at slower rates. Cooling from the wall-rock (increasing magma viscosity) and/or nested emplacement of hotter magma into the pluton center (not considered in the simple model) would even enhance this type of viscosity-driven flow partitioning within the pluton.

To date, a few studies have inferred helicoidal or helical flow in metamorphic complexes and granite plutons that underwent non-coaxial deformation (e.g., Brun and Pons, 1981; Hippertt, 1994; see Fowler, 1996 for review); but only one structural study has documented helicoidal flow in a deep-seated granite–migmatite diapir (Hippertt, 1994). Taking into account the shallow emplacement level of the Říčany pluton (~0.2 GPa corresponding to ~7 km paleodepth; Kachlík, 1992), the magnetic fabric pattern described in this paper may be viewed as recording helical magma ascent in a steep conduit linking a deeper magma chamber with a narrower volcanic feeder at the surface. As viscosity variations (controlled, for instance, by composition, content of crystals, volatiles, or bubbles) are common in magma ascent conduits, future research should concentrate on whether a viscosity-partitioned helicoidal or helical magma flow such as that described here could be a more widespread process in other shallow-level volcano-plutonic systems.

6. Conclusions

The concentric, steep foliations bearing circumferential lineation along the margin and steep lineation in the center of the Říčany pluton are interpreted to record right-handed helical magma ascent in a steep-sided conduit. The helical flow was caused by significant viscosity differences in the outer, strongly porphyritic and inner, weakly porphyritic granite magmas. The bulk ascent was partitioned into a low-viscosity center flowing vertically and high-viscosity outer margin flowing helically. This interpretation is supported quantitatively by a simple model of magma flow within a cylindrical pipe, in which the linear decrease in phenocryst content from the pluton margin inward causes a power-law increase in the effective viscosity of the granite magma. According to the Poiseuille equation, such a power-law viscosity distribution across the conduit produces a central zone of high magma ascent velocity. The magnetic (AMS) fabric pattern in the Říčany pluton thus provides a unique record of viscosity-driven helical

magma ascent in a steep conduit, presumably linking a deeper magma chamber with a volcanic feeder near the surface. Further studies should investigate whether such a viscosity-partitioned helicoidal or helical magma flow could be a more common process in shallow-level magmatic systems than previously envisaged.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge Robert B. Miller and an anonymous reviewer for their constructive reviews, which assisted in improving the original manuscript. Zuzana Kratinová and Petr Pruner are thanked for their assistance in measuring AMS, and Václav Kachlík for numerous discussions on the regional geology of the study area. Prokop Závada provided thoughtful comments on the proposed mechanism of magma ascent. We also thank František Hrouda for assistance in measuring and interpreting of magnetic mineralogy at the Laboratory of Rock Magnetism, AGICO Inc., Brno, Czech Republic. This research was supported by Grant No. 131607 from the Grant Agency of Charles University in Prague (GAUK) (to J. Trubač), Grant No. KJB30012702 (to Z. Kratinová) from the Czech Academy of Sciences, Grant No. 205/07/0992 (to Vojtěch Janoušek) from the Grant Agency of the Czech Republic, and the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic Research Plan No. MSM0021620855.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.12.005.

References

- Benn, K., 1994. Overprinting of magnetic fabrics in granites by small strains—numerical modeling. *Tectonophysics* 233, 153–162.
- Benn, K., Paterson, S.R., Lund, S.P., Pignotta, G.S., Kruse, S., 2001. Magmatic fabrics in batholiths as markers of regional strains and plate kinematics: example of the Cretaceous Mt. Stuart batholith. *Phys. Chem. Earth* 26, 343–354.
- Borradaile, G.J., Jackson, M., 2004. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): magnetic petrofabrics of deformed rocks. In: Martín-Hernández, F., Lüneburg, C.M., Auborg, C., Jackson, M. (Eds.), *Magnetic Fabric: Methods and Application*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 238, pp. 299–360.
- Bottinga, Y., Weill, D.F., 1972. The viscosity of magmatic silicate liquids: a model for calculation. *Am. J. Sci.* 272, 438–475.
- Bouchez, J.L., 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In: Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W., Stephens, W.E. (Eds.), *Granite: from Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, pp. 95–112.
- Brun, J.P., Pons, J., 1981. Strain patterns of pluton emplacement in a crust undergoing non-coaxial deformation, Sierra Morena, Southern Spain. *J. Struct. Geol.* 3, 219–229.
- Dallmeyer, D., Franke, W., Weber, K. (Eds.), 1995. *Pre-Permian Geology of the Central and Western Europe*. Springer, Berlin, 604 pp.
- Dingwell, D.B., 1999. Granitic melt viscosities. In: Castro, A., Fernández, C., Vigneresse, J.L. (Eds.), *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 168, pp. 27–38.
- Fowler, T.J., 1996. The properties and geological environments of helicoids: axially symmetric surfaces in torsional and non-torsional deformations. *J. Struct. Geol.* 18, 505–517.
- Fowler, T.K., Paterson, S.R., 1997. Timing and nature of magmatic fabrics from structural relations around stope blocks. *J. Struct. Geol.* 19, 209–224.
- Hippertt, J.F., 1994. Structures indicative of helicoidal flow in a migmatitic diapir (Bação Complex, southeastern Brazil). *Tectonophysics* 234, 169–196.
- Holub, F.V., Cocherie, A., Rossi, P., 1997a. Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex: constraints on the chronology of thermal and tectonic events along the Barrandian–Moldanubian boundary. *C.R. Acad. Sci. Paris/Earth. Planet. Sci.* 325, 19–26.
- Holub, F.V., Machart, J., Manová, M., 1997b. The Central Bohemian Plutonic Complex: geology, chemical composition and genetic interpretation. *J. Geol. Sci., Econ. Geol. Mineral.* 31, 27–50.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.* 5, 37–82.
- Jackson, M., Tauxe, L., 1991. Anisotropy of magnetic susceptibility and remanence: developments in the characterization of tectonic, sedimentary, and igneous fabric. *Rev. Geophys.* 29, 371–376.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D.R., 1995. Sr–Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Geol. Rundsch.* 84, 520–534.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D.R., Vaňková, V., 1997. Cryptic trace-element variation as an indicator of reverse zoning in a granitic pluton: the Říčany granite. *J. Geol. Soc. London* 154, 807–815.

- Janoušek, V., Bowes, D.R., Rogers, G., Farrow, C.M., Jelínek, E., 2000. Modelling diverse processes in the petrogenesis of a composite batholith: the Central Bohemian Pluton, Central European Hercynides. *J. Petrol.* 41, 511–543.
- Janoušek, V., Braithwaite, C.J.R., Bowes, D.R., Gerdes, A., 2004. Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: an integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Lithos* 78, 67–99.
- Jelínek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79, T63–T67.
- Kachlík, V., 1992. Lithostratigraphy, paleogeography and metamorphism of roof pendants in the NE part of the Central Bohemian Pluton. PhD Thesis, Charles University, pp 1–240.
- McBirney, A.R., Murase, T., 1984. Rheological properties of magmas. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 12, 337–357.
- McCann, T., 2008. The Geology of Central Europe. Precambrian and Palaeozoic. *Geol. Soc. London*, 1, 748 pp.
- Miller, R.B., Paterson, S.R., 1999. In defense of magmatic diapirs. *J. Struct. Geol.* 21, 1161–1173.
- Miller, C.F., Watson, E.B., Harrison, T.M., 1988. Perspectives on the source, segregation and transport of granitoid magmas. *Tr. Roy. Soc. Edinburgh: Earth Sci.* 79, 135–156.
- Němec, D., 1978. Genesis of aplite in the Řičany massif, central Bohemia. *Neu. Jb. Mineral., Abh.* 132, 322–339.
- Paterson, S.R., Miller, R.B., 1998. Mid-crustal magmatic sheets in the Cascades Mountains, Washington: implications for magma ascent. *J. Struct. Geol.* 20, 1345–1363.
- Paterson, S.R., Vernon, R.H., 1995. Bursting the bubble of ballooning plutons: a return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 107, 1356–1380.
- Paterson, S.R., Fowler, T.K., Schmidt, K.L., Yoshinobu, A.S., Yuan, E.S., Miller, R.B., 1998. Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos* 44, 53–82.
- Paterson, S.R., Vernon, R.H., Tobisch, O.T., 1989. A review of criteria for identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *J. Struct. Geol.* 11, 349–363.
- Petford, N., 2003. Rheology of granitic magmas during ascent and emplacement. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 399–427.
- Roscoe, R., 1952. The viscosity of suspensions of rigid spheres. *Br. J. Appl. Phys.* 3, 267–269.
- Scaillet, B., Holtz, F., Pichavant, M., 1997. Rheological properties of granitic magmas in their crystallisation range. In: Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W., Stephens, W.E. (Eds.), *Granite: from Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, pp. 11–29.
- Scaillet, B., Holtz, F., Whittington, A., Pichavant, M., 1998. Phase equilibrium constraints on the viscosity of silicic magmas: 1. Volcanic-plutonic comparison. *J. Geophys. Res.* 103, 27257–27266.
- Stevenson, C.T.E., Owens, W.H., Hutton, D.H.W., 2007. Flow lobes in granite: the determination of magma flow direction in the Trawenagh Bay Granite, north-western Ireland, using anisotropy of magnetic susceptibility. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 119, 1368–1386.
- Tarling, D.H., Hrouda, F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, London, 217 pp.
- Tobisch, O.T., Cruden, A.R., 1995. Fracture-controlled magma conduits in an obliquely convergent continental magmatic arc. *Geology* 23, 941–944.
- Tomek, Č., 1974. The inverse gravimetric task and its application on morphology of the Central Bohemian Pluton. *J. Mineral. Geol.* 19, 217.
- Turcotte, Schubert, 2002. *Geodynamics*, Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 456 pp.
- Vernon, R.H., 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. *Electronic. Geosci.* 5, 1–23.
- Vrána, S., Štědrá, V., 1997. Geological model of western Bohemia related to the KTB borehole in Germany. *J. Geol. Sci., Geol.* 47, 5–240.
- Watson, E.B., Harrison, M., 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth Planet. Sci. Lett.* 64, 295–304.
- Wickham, S.M., 1987. The segregation and emplacement of granitic magmas. *J. Geol. Soc. London* 144, 281–297.
- Wohletz, K.H., 1999. *MAGMA: calculates IUGS volcanic rock classification, densities, and viscosities*. Los Alamos National Laboratory computer code LA-CC 99-28, Los Alamos, New Mexico.