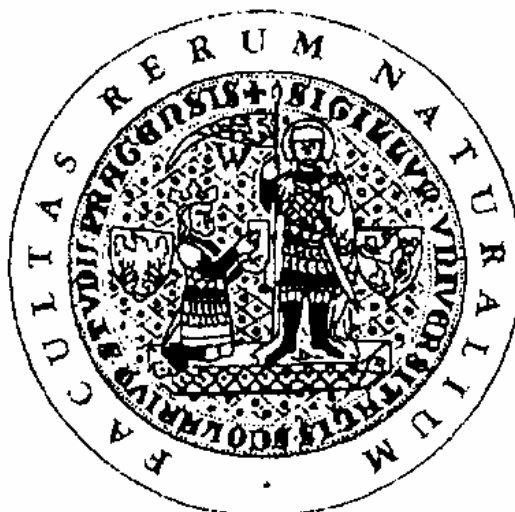


**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Užitá geofyzika

Studijní obor: Aplikovaná geologie



**DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Mgr. Petr Schnabl**

**Paleomagnetismus a magnetomineralogie hornin Českého masivu  
a tethydní oblasti**

**Paleomagnetism and magnetomineralogy of rocks from the  
Bohemian Massif and Tethyan Realm**

Vedoucí disertační práce:

**Ing. Petr Pruner, DrSc.**

Praha, 2012

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu. Obsah disertační práce je již publikován, případně předložen do tisku v sedmi vědeckých publikacích, u jedné jsem prvním autorem a zbylých šesti spoluautorem. Tyto články jsou v originální podobě vytištěny v příloze.

V Praze, 21. 5. 2012

## Prohlášení o spoluautorství

Doktorand Petr Schnabl přispěl k níže uvedeným publikacím paleomagnetickou a magnetomineralogickou částí, což činí 40 % práce na první, 30 % na druhé a 25 % práce na třetí publikaci.

Schnabl P., Novák J.K., Cajz V., Lang M., Balogh K., Pécskay Z., Chadima M., Šlechta S., Kohout T., Pruner P. a Ulrych J., 2010. Magnetic properties of high-Ti basaltic rocks from the Krušné hory/Erzgebirge MTS. (Bohemia/Saxony), and their relation to mineral chemistry, *Stud. Geoph. et Geodet.*, 54, 1, 77 – 94.

Cajz V., Schnabl P., Pécskay Z., Skácelová Z., Venhodová D., Šlechta S. and Šifnerová K. Chronological implications of paleomagnetic record of the Late Cenozoic volcanic activity in Moravo-Silesian border – NE Bohemian Massif, *Geologica Carpathica*, – Přijato do tisku

Cajz V., Rapprich V., Schnabl P. a Pécskay Z., 2009. Návrh litostratigrafie neovulkanitů východočeské oblasti (A proposal on lithostratigraphy of Cenozoic volcanic rocks in Eastern Bohemia). – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2008*, 9 – 15.

V Praze, 21. 5. 2012

Vladimír Cajz

## Prohlášení o spoluautorství

Doktorand Petr Schnabl přispěl k uvedené publikaci magnetostratigrafickou a magnetomineralogickou částí což je 20 % práce na publikaci.

Pruner P., Houša V., Olóriz F., Košťák M., Krs M., Man O., Schnabl P., Venhodová D., Tavera J.M. a Mazuch M., 2010, High-resolution magnetostratigraphy and biostratigraphic zonation of the Jurassic/Cretaceous boundary strata in the Puerto Escaño section (southern Spain), *Cretaceous Research*, 31, 2, 192 – 206.

V Praze, 21. 5. 2012,

Petr Pruner

## Declaration

Petr Schnabl contributed to below stated article with 50% of magnetostratigraphic and magnetomineralogical measurements and interpretation, which is 10% of the work on the publication.

Lukeneder A., Halasova E., Kroh A., Mayrhofer S., Pruner P., Rehakova D., Schnabl P., Sprovieri M., Wagneich M., High resolution stratigraphy of the Jurassic-Cretaceous boundary interval in the Gresten Klippenbelt (Austria), *GEOLOGICA CARPATHICA* Volume: 61 Issue: 5 Pages: 365-381 DOI: 10.2478/v10096-010-0022-3: OCT 2010

Vienna, April 5th 2012,



Alexander Lukeneder

**NATURHISTORISCHES MUSEUM**  
Geologie-Paläontologie  
A-1010 Wien, Burgring 7

## Prohlášení o spoluautorství

Petr Schnabl přispěl k níže uvedené vědecké publikaci magnetomineralogickými měřeními a interpretací, což činí 20% práce na publikaci.

Vacek F., Hladil J., Schnabl P., Stratigraphic correlation potential of magnetic susceptibility and gamma-ray spectrometric variations in calciturbiditic facies (Silurian-Devonian boundary, Prague Synclinorium, Czech Republic) *GEOLOGICA CARPATHICA* Volume: 61 Issue: 4 Pages: 257-272 DOI: 10.2478/v10096-010-0015-2: AUG 2010

Birmingham, 12.4.2012



František Vacek

Prohlášení o spoluautorství

Doktorand Petr Schnabl přispěl k níže uvedené publikaci 15 %.

Kletetschka G., Pruner P., Schnabl P., Šifnerová K., Tasáryová Z. a Manda Š.  
Magnetic scanning and interpretation of paleomagnetic data from Prague Synform's  
volcanics, *Stud. Geoph. et Geodet.* – V recenzním řízení

V Praze, 21. 5. 2012,

Günther Kletetschka

## **Poděkování**

*Tato práce byla vypracována v Geologickém ústavu AV ČR, v. v. i. V první řadě bych chtěl poděkovat mému školiteli Petru Prunerovi za obětavé vedení doktorské práce a za výraznou pomoc v mých paleomagnetických začátcích. Dále děkuji mým kolegům J. Hladilovi, R. Melicharovi, P. Kraftovi, L. Koptíkové a Z. Tasáriové, kteří mě uvedli do problematiky paleozoických hornin. Vřelé díky patří mým spolupracovníkům zabývajícím se hraničním intervalem Jura/Křída, a to především M. Košťákovi, W. Wimbledonovi, J. Michalíkovi a A. Lukenedrovi. V mé práci při studiu kenozoických bazických vulkanitů mi v mnohém poradili V. Cajz, J. K. Novák, P. Rojík, M. Radoň, V. Rapprich. Dále mi radili J. Kadlec, P. Bosák, M. Chadima, S. Šlechta, G. Kletetschka, J. Grabowski a K. Sobien. Dále děkuji všem oponentům mých publikací, z jejichž rad se člověk nejlépe učí, mým učitelům E. Petrovskému a F. Hroudovi za předané zkušenosti i mým fakultním garantům M. Kobrovi a V. Blechovi za projevenou přízeň. Jsem vděčný technikům J. Drahotové, K. Šifnerové a J. Petráčkovi, kteří mi pomáhali řezat a měřit vzorky. Upřímný dík patří D. Venhodové za zásobení publikacemi. Děkuji také J. Adamovičovi za kontrolu anglického pravopisu v autoreferátu.*

*Tuto práci bych nebyl schopen udělat bez finanční podpory grantových agentur GA ČR a GAAVČR, výzkumného záměru a prezidia AVČR, které nám poskytlo kryogenní magnetometr.*

*Nakonec děkuji mé ženě a rodině za to, že to se mnou vydržely celá dlouhá studia.*

## Obsah

Přehled zkratk	9
Abstrakt	10
1.    Úvod	12
1.1.  Postup prací na disertaci	12
1.2.  Geologie kenozoických vulkanitů Českého masivu	14
1.3.  Geologie hraničního intervalu jura/křída v tethydní oblasti	14
1.4.  Geologické poměry pražského synklinoria	15
1.5.  Přehled dosavadních paleomagnetických výzkumů ve studovaných oblastech	16
1.6.  Přehled magnetomineralogie	17
2.    Cíle	18
3.    Použité metody	19
3.1.  Paleomagnetismus a magnetostratigrafie	19
3.2.  Rockmagnetismus a magnetomineralogie	22
3.3.  Doplňkové fyzikální a geochemické metody	24
4.    Magnetomineralogie a paleomagnetismus bazických vulkanitů ČM	27
4.1.  Magnetomineralogie titanem bohatých vulkanitů v Krušných horách	27
4.2.  Paleomagnetismus vulkanitů na Bruntálsku	32
4.3.  Paleomagnetismus vulkanitů na Jičínsku	35

4.4.	Magnetostratigrafie v Doupovských horách .....	38
4.5.	Paleomagnetická interpretace vulkanické činnosti v Českém středohoří ...	41
5.	Rockmagnetismus a magnetostratigrafie na hranici jura/křída .....	45
5.1.	Magnetostratigrafie s vysokým rozlišením hraničního intervalu jura/křída na lokalitě Puerto Dacan .....	45
5.2.	Rockmagnetismus a magnetostratigrafie hraničního intervalu jura/křída na lokalitě Nutzhof .....	48
5.3.	Magnetostratigrafie hraničního intervalu J/K na lokalitě Le Chořet .....	51
6.	Rockmagnetismus a magnetická susceptibilita paleozoických hornin .....	53
6.1.	Magnetosusceptibilitní korelace na hranici silur/devon v pražském synklinoriu .....	53
6.2.	Paleomagnetismus devonských hornin pražského synklinoria .....	56
6.3.	Statistické zhodnocení MS u paleozoických mesozoických a kenozoických vápenců .....	58
6.4.	Magnetické skenování a interpretace paleomagnetických dat z vulkanitů pražského synklinoria .....	60
7.	Diskuze .....	63
8.	Závěr – shrnutí .....	66
	Literatura .....	67
	Vlastní vědecké publikace .....	74



## Přehled zkratek

AF	demagnetizace střídavým polem
AMS	anizotropie magnetické susceptibility
ARM	anhysterezní remanentní magnetizace
ČM	Český masiv
DRM	detritická remanentní magnetizace
ICS	Mezinárodní stratigrafická komise
IRM	izotermální remanentní magnetizace
$J_{\text{NRM}}$	intenzita přirozené remanentní magnetizace
JVP	jičínské vulkanické pole
J/K	Stratigrafická hranice jura/křída
GPTS	geomagnetická polaritní časová škála
GRS	gamaspektrometrie
ChRM	chemická remanentní magnetizace
ka	tisíc let
Ma	milióny let
MORB	Bazalty středoocéánských hřbetů
MS	magnetická susceptibilita
$MS_{\text{FD}}$	magnetická susceptibilita závislá na poli
NRM	přirozená remanentní magnetizace
NIRM	přirozená izotermální remanentní magnetizace
RM	remanentní magnetizace
SIRM	saturační izotermální remanentní magnetizace
S/D	Stratigrafická hranice silur/devon
$T_{\text{C}}$	Curieova teplota
TD	tepelná demagnetizace
Ti	titan
TRM	termoremanentní magnetizace
UV	Uhlířský vrch
VR	Velký Roudný
VS	Venušina sopka
WDS	vlnově disperzní spektroskopie

## **Abstrakt**

*Disertační práce pojednává o paleomagnetických a horninově magnetických vlastnostech vápenců, bazaltů a alterovaných diabázů různého fanerozoického stáří. Hlavním smyslem práce je za podpory horninově magnetických metod dešifrovat historii magnetického pole Země od siluru po současnost.*

*V jičínském vulkanickém poli jsou na základě kombinace paleomagnetismu a K/Ar datování definována dvě souvrství, konkrétně trosecké a kozákovské. Trosecké souvrství (24,6?/18,3 – 15,7 Ma) je tvořeno solitérními strombolskými vulkanity. Souvrství kozákovské (5,2 – 4,6 Ma) jsou efuzivní produkty jediného vulkánu a jeho přírodní dráha. Na bruntálsku byly stejnou metodikou dokázány dvě pleistocénní fáze vulkanické aktivity (2,6 – 2,1 Ma a 1,8 – 1,1 Ma) a jedna fáze pliocenní (4,3 – 3,3 Ma).*

*Magnetostratigrafická korelace se ukázala jako velice zásadní pro přesnou definici hranice J/K, kterou by případně odsouhlasila mezinárodní stratigrafická komise. Důvodem je zejména vymírání planktonických Crassicolarií v rámci magnetozóny M19, které jsou nahrazovány modernějšími kalpionelami. Mimo to je zde také hranice mezi amonitovými zónami Jacobi a Durangites.*

*Silurské a devonské paleomagnetické směry remanentní magnetizace v rámci struktur Českého masivu jde velice obtížně jednoznačně interpretovat a proto jejich výzkum patří již po mnoho let k předním výzvám v oboru. V takto starých nemetamorfovaných horninách jsou zaznamenány dvě komponenty, první je přibližně  $200^{\circ}/-30^{\circ}$  a druhá  $200^{\circ}/+30^{\circ}$ . První směr je obvykle považován za primární komponentu (Tait et al. 1995, Krs et al. 2001, Aifa et al. 2007), a druhý směr je považován sice za sekundární, ale stále spodně paleozoický. Tato interpretace předpokládá rotaci celé barrandienské oblasti v jejím užším slova smyslu o  $160^{\circ}$  až  $200^{\circ}$  během variské orogeneze. Podle druhé, zatím nepublikované, teorie je primární směr  $200^{\circ}/+30^{\circ}$ . Směr  $200^{\circ}/-30^{\circ}$  by mohl být způsoben druhohorním tropickým zvětráváním. Zatím sice není shromážděn definitivní dostatek důkazů ani pro jednu z těchto teorií, nicméně v této práci byla obohacena metodika paleomagnetického studia o další moderní horninově magnetické metody, které zde mohou přinést určitý zlom v nazírání na celou situaci. S přihlédnutím k dosaženým novým vlastním výsledkům se spíše přikláním k první, již vícekrát publikované teorii, která počítá s rotací Barrandienu o  $200^{\circ}$  ve směru či o  $160^{\circ}$  proti směru hodinových ručiček.*

## **Abstract**

*The thesis deals with paleomagnetic and rock magnetic properties of Silurian/Devonian and Jurassic/Cretaceous limestones, Paleogene/Neogene basaltic rocks and altered Silurian basalts. The main goal is to determine the history of the Earth's magnetic field from the Silurian to the present.*

*Two lithostratigraphic formations are defined in the Jičín volcanic field on the basis of volcanology, paleomagnetism and radiometric dating. The Trosky Formation (24.6±18.3 – 15.7 Ma) is composed of several Strombolian-type volcanoes, while the Kozákov Formation (5.2 – 4.6 Ma) is represented by effusive products with a crater vent of a single giant volcano. One Pliocene (4.3–3.3 Ma) and two Pleistocene phases (2.6–2.1 Ma and 1.8 – 1.1 Ma) of volcanic activity were found in the Bruntál volcanic field by the same methods.*

*Magnetostratigraphy is a very important tool for the definition of the J/K boundary. The boundary between the Crassicolaria and Calpionella zones is present within geopolarity zone M19n. The boundary between the ammonite zones Jacobi and Durangites also lies close to this point.*

*Paleomagnetic directions of Silurian and Devonian rocks in the Bohemian Massif are very difficult to interpret and have been studied as a challenging problem for many years. In the Barrandian area, two potential components have been identified: approximately 200°/-30° and 200°/+30°. The first direction has been reported as the primary one by several authors, while the second one is possibly of secondary origin but also Lower Paleozoic in age. This interpretation implies an approximately 200° clockwise (160° counter-clockwise) rotation during the Variscan orogeny. According to the second theory, which has not been published yet, the direction 200°/+30° is the primary one and the direction 200°/-30° is a secondary one, caused by supergene processes related to tropical weathering in the Mesozoic. None of these two theories is supported by clear evidence. This thesis, however, presents several specialized rock magnetic methods which can help to solve this task. Newly obtained data rather suggest the validity of the first theory. This means that the Barrandian area was rotated 200° clockwise or 160° counter-clockwise until the end of Variscan orogenic processes.*

# 1. Úvod

## 1.1. Postup prací na disertaci

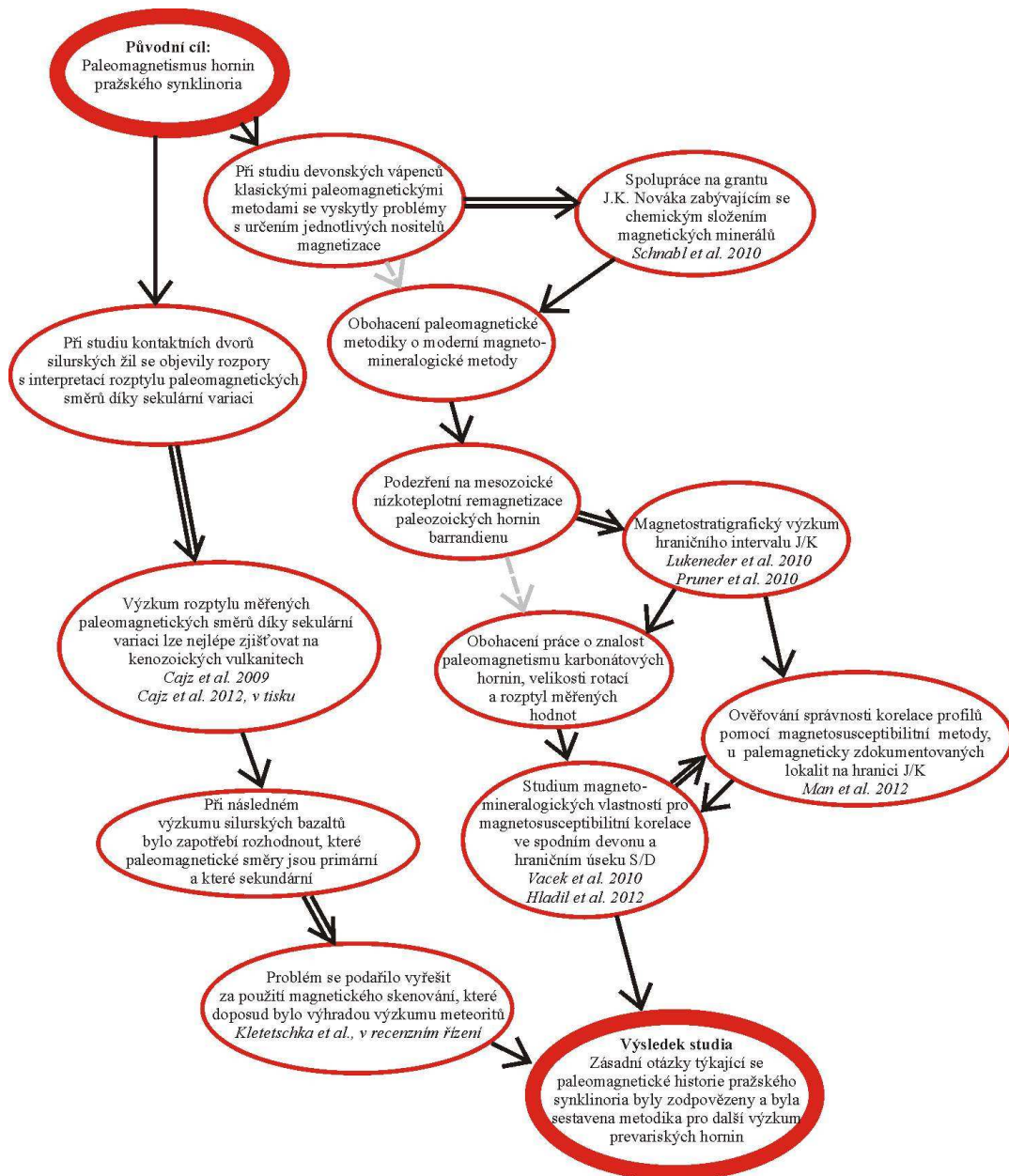
Původním cílem bylo objasnit paleomagnetickou a paleogeografickou historii pražského synklinoria. Nejspolehlivější paleomagnetický signál je zde zachován v devonských vápencích a silurských diabazových žilách, povrchových výlevech a jejich kontaktních dvorech. Proto bylo zapotřebí vydat se dvěma rozdílnými směry výzkumu (viz obr. 1). První směr, zabývající se zpočátku studiem kontaktních dvorů silurských žil ukázal, že tyto horniny mají větší odchylky paleomagnetických směrů mezi jednotlivými lokalitami než ostatní podobně staré horniny, např.: karbonáty. Jedna z pracovních hypotéz byla, že se jedná o nevystředěnou sekulární variaci a proto bylo nutné současně s tímto výzkumem ověřit tuto hypotézu u bazaltických hornin kenozoického stáří. Při řešení tohoto dílčího problému vznikly 2 publikace (*Cajz et al. 2009 a Cajz et al. 2012, v tisku*).

Při následném výzkumu samotných silurských bazaltů se při interpretaci objevily dvě paleomagnetické komponenty. Jedna z nich byla již dříve několikrát publikovaná na základě měření různých typů takto starých hornin; a druhá zatím publikovaná nebyla. Druhá složka (nebo ji blízká) se sice objevuje i u vápenců, ale ne v takové míře a proto se jí nikdy nevěnovala pozornost. Bylo tedy nutno rozhodnout, který z těchto paleomagnetických směrů je primární a který sekundární. K tomuto účelu se nejlépe hodí magnetické skenování (původně používané při studiu meteoritů) v kombinaci s optickým mikroskopem, tato nová metodika je popsána v publikaci *Kletetschka et al. (v recenzním řízení)*.

Druhý směr výzkumu se ubíral studiem vápenců. Z důvodu velmi nízkých hodnot remanentní magnetizace (RM) bylo nutné zpřesnit určování jednotlivých nositelů RM. Při řešení této problematiky bylo využito příležitosti spolupracovat s J.K. Novákem, odborníkem na petrologii a geochemii, který v tuto dobu studoval chemické složení magnetických minerálů. Na základě této spolupráce vznikla publikace *Schnabl et al. (2010)*.

Při dalším studiu vápenců pražského synklinoria vyvstala otázka, zda tyto horniny nebyly v mesozoiku remagnetovány za přičinění tropického zvětrávání. Z tohoto hlediska bylo přínosné začlenit se do mezioborové skupiny zabývající se tímto obdobím. V této fázi výzkumu vznikly další dvě publikace zabývající

se magnetostratigrafií karbonátových hornin z hraničního intervalu J/K, které při následném alpském vrásnění byly rotovány podobně jako horniny barrandienu (Lukeneder et al. 2010, Pruner et al. 2010).



Obr. 1. Schéma postupu studia paleomagnetické problematiky hornin pražského synklinoria, ze kterého je patrné, že samotná cesta poznání přinesla velké množství dalších výsledků. Jednoduchými šipkami je značena nejpřímější cesta, dvojitými šipkami je označena vynucená změna směru bádání a šedou čárkovanou šipkou je znázorněna nejpřímější cesta k cíli kterou bylo nutno modifikovat.

Při porovnávání jednotlivých profilů stejného stáří se ukázala velice vhodná magnetosusceptibilitní korelace. Samozřejmě ani zde se nelze obejít bez podrobné magnetomineralogie (Vacek *et al.* 2010, Hladil *et al.* 2012, Man *et. al.* 2012). Tato metoda má každým rokem více zastánců, kteří se sdružují pod záštitou projektu IGCP 580.

Výsledkem celého studia je objasnění nejdůležitějších paleomagnetických otázek v paleozoiku a zavedení dalších moderních magnetomineralogických metod do praxe paleomagnetické laboratoře v Průhonicích.

## **1.2. Geologie kenozoických vulkanitů Českého masivu**

Koncem druhohor a začátkem třetihor vznikl riftový systém vedoucí ze Severního moře údolím Rýna přes Centrální francouzský masív až po Pyreneje. V této komplikované tektonické struktuře (např. Dezes 2004) docházelo k výstupu magmatických hmot a tvorbě vulkanických komplexů i samostatných vulkánů. Součástí tohoto systému je i podkrušnohorský prolom, Kopeckým (1974) definovaný jako oherský rift. Uvnitř této dílčí struktury vystoupilo magma v Doupovských horách a v Českém středohoří až k povrchu a vytvořilo dva významné komplexy. Krušné hory a oblast české křídové pánve pak představují ramena riftu s dalšími výskyty sopečných hornin. I jiné významné tektonické struktury ČM, např. lužická porucha či okrajový sudetský zlom, mají vulkanický doprovod.

Největší objemy kenozoických vulkanitů vznikaly od eocénu přes oligocén až po starší miocén, mezi nejmladší sopečné oblasti ČM pak patří oblast Ašska a Chebska, s. Moravy a Jičínska.

## **1.3. Geologie hraničního intervalu jura/křída v tethydní oblasti**

Oceán Tethys se během jury a křídý rozkládal na východní polokouli od Španělska a severní Afriky po dnešní jihovýchodní Asii. Sedimenty severozápadní Tethydy tvoří vápencová pohoří a bradlová pásma od Španělska přes Francii, Itálii a Slovensko až po Bulharsko a Ukrajinu. Jednotlivé Evropské lokality se zachovalou J/K hranicí se nalézaly na 20 – 36° severní šířky. Významné výskyty této hranice

se nachází i mimo Evropu například v Turecku, Iránu a Tunisku. Na severu tethydní oblasti zasahovalo moře do prostoru Českého masivu. Na všech lokalitách převládá karbonátová sedimentace. Obecně lze tvrdit že sedimenty v podloží J/K hranice často obsahují slínovce či červené vápence typu ammonitico rosso. Nadložní křída je téměř vždy tvořena čistými vápenci typu maiolica. Jsou zde zastoupeny rytmicky ukládané vápencové lavice o mocnostech od 10 do 60 cm. Místy se nachází až 2 m mocné lavice vnitropánevní brekcie.

Z biostratigrafického hlediska je zde velice důležitá hranice mezi amonitovými zónami Jacobi a Durangites která je obecně přijímána jako J/K hranice. Oba amoniti se ale jen málokdy nachází na jedné lokalitě. Dále jsou velice důležité planktonické rody kalpionel (příbuzní nálevníkům) *Crassicolaria* a *Calpionella*. Na J/K hranici vymřely 3 druhy crassicolarií a nově se objevil druh *Calpionella eliptica*. Během hraničního intervalu J/K se několikrát změnila magnetická polarita. Jednotlivé magnetozóny a subzóny mají velice odlišnou dobu trvání a proto je magnetostratigrafie velice důležitou metodou, používanou pro přesné určení této hranice. První korelaci s vysokým rozlišením mezi Tethydní a Boreální oblastí provedl *Houša et al. (2007)*.

#### **1.4. Geologické poměry pražského synklinoria**

Horniny pražského synklinoria, které jsou ordovického až devonského stáří, tvoří protáhlou mísovitou strukturu ležící mezi Prahou a Rokycany. Ordovik je na většině území klastického charakteru (břidlice, pískovce a slepence), avšak v okolí Zdic a Hořovic se nachází komárovský vulkanický komplex s diabasovými výlevy typu MORB a vulkanoklastiky. Tato vulkanická činnost je spjata s rozpadem kontinentu Gondvany a vznikem Rheického oceánu a Prototethys (*Melichar 2003, Hladil 1996*). Spodnosilurské horniny jsou tvořeny především graptolitovými břidlicemi s diabasy, místy jsou zastoupeny i karbonáty. Ve svrchním siluru dominuje karbonátová sedimentace, která plynule přechází do devonu. Ta končí ve svrchním devonu flyšovou sedimentací, což je předzvěst variského vrásnění. Pražské synklinorium je místy výrazně zvrásněné a často se zde nachází duplexy což jsou tektonicky zdvojené vrstvy. Většina vrás je asymetrického charakteru s vergencí k J,

avšak v j. předpolí antiklinál Škrábku a Ameriky se nachází i vrásy severovergentní (*Melichar 2003*). Jejich nejznámější výskyty jsou na Barrandově skále v Praze a Budňanské skále u Karlštejna.

Mimo tuto drobnou tektoniku se zde nachází 3 výrazné zlomy s několikakilometrovými posuny. Jedná se o očkovský a kodský zlom a tachlovickou dislokaci. Tyto zlomy mají převážně vrstevní charakter s tektonickým odlepením ve vrstvě tvořené břidlicemi. Na základě podobnosti strukturně-tektonické stavby pražského synklinoria se stavbou v pohoří Jura bylo odvozeno, že tato oblast ležela během svrchního devonu v předpolí hlavního variského orogenu (*Melichar 2003*). Do této oblasti tedy nedolehly hlavní metamorfní pochody, proudila zde pouze podél puklin mineralizovaná fluida nepřesahující 60 – 70°C v centrální oblasti a 140°C na JV (*Suchý et al. 2002, Slobodník et al. 2012*).

## **1.5. Přehled dosavadních paleomagnetických výzkumů ve studovaných oblastech**

Studiem paleomagnetismu u kenozoických hornin se zabývali především *Bucha et al. (1987)* a *Krs et al. (1990, 1991)*. Tyto Krsovy práce jsou jedny z prvních, zabývajících se genezí a magnetickými vlastnostmi greigitu. *Krs (1968, 1969)* a *Marek (1969, 1973, 1974)* studovali paleomagnetické vlastnosti vulkanitů ČM. V mé práci jsem mimo jiné ověřil, že výsledky získané na astatickém magnetometru při měření vulkanitů jsou naprosto srovnatelné s hodnotami změřenými moderním rotačním i kryogenním magnetometrem.

Po většinu druhohor byla velká část ČM souší a v sedimentárních pánvích se usazovali hrubé klastické sedimenty, nevhodné k paleomagnetickému výzkumu. Vhodnou alternativní oblastí k výzkumu druhohorního vulkanismu se ukázalo pieninské (*Houša et al. 1993, 1996, 1999*) a grestenské (*Pruner et al. 2009*) bradlové pásmo, avšak nejlepší paleomagnetický záznam je zachován na španělské lokalitě Puerto Escaño (*Pruner et al. 2010*). Mladopaleozoické horniny ČM jsou velice dobře prozkoumány a popsány *Krsem a Prunerem (1993)* a *Krsem et al. (2001)* a jsou tak důkladně zpracovány že jen stěží by bylo možno objevit něco nového. Ve starším



prevariském paleozoiku byly na základě magnetické deklinace identifikovány rotace jednotlivých teránů (*Tait et al. 1995, Krs et al. 2001, Aifa et al. 2007, Grabowski et al. 2009*). Avšak poměrně jiný názor zastávají *Melichar (2003) a Černý et al. (2009)*, kteří zde studovali tektonickou stavbu a identifikovali příkrovovou stavbu, při které nevznikaly výrazné rotace. Problematiku rotací jednotlivých teránů na Dražanské vrchovině řešila ve své disertační práci *Štěpánková (2002)*.

## 1.6. Přehled magnetomineralogie

Nejjednodušší magnetomineralogický parametr je Koenigsbergovo Q-ratio, *Nagatha (1953)* publikuje velké množství referenčních dat. Současná magnetomineralogická metodika je popsána v základní vysokoškolské učebnici *Rock Magnetism-Fundamentals and frontiers* od *Dunlop a Özdemir (1997)* a o teorii MS a AMS se pojednává v učebnici *Tarling a Hrouda (1993)*. Studium magnetických vlastností titanomagnetitů se zabýval především *Vahle and Kontny (2005)* a *Chadima et al. (2008)*, tyto autoři studují převážně hodnotu Curieovy teploty a MS závislou na poli a jejich závislost na obsahu Ti ve strukturní mřížce titanomagnetitu. Jedna z nejstarších a přitom jedna z nejpřesnějších metod používaných k určení hlavních nositelů NRM se nazývá Lowriho metoda, při které se vzorek postupně magnetuje ve třech směrech a poté tepelně demagnetuje. K identifikaci jednotlivých minerálních fází pomocí akvizitní křivky IRM nejlépe poslouží komponentová analýza akvizitních křivek IRM (*Kruiver 2001*), nejrozsáhlejší katalog základních dat ke kalibraci této metody je uveden v publikaci *Grygar et al. (2003)*. Jednou z nejpřesnějších metod k určení nositelů jednotlivých složek remanentní magnetizace je magnetické skenování Hallovou sondou (*Kletetschka 2009*). Titanomagnetity z kenozoických čedičů ČM byly zkoumány *Kropáčkem (1985)*, a z diabasů je podrobně popisuje *Blecha (1976 a 1979)*, závislost MS na poli u různých typů kenozoických žil diskutuje *Chadima et al. (2008)*.

## 2. Cíle

### Hlavní cíl

- Hlavní cíl této disertační práce je doložit možnosti rockmagnetických a magnetomineralogických metod při studiu kenozoických čedičů a paleozoických diabasů, které jsou jedny z nejmagnetičtějších hornin a na druhé straně při studiu čistých vápenců, které jsou často diamagnetické. A zda je možné tyto typy hornin zkoumat stejnými metodami, s tím že obsahují podobné magnetické minerály. Hlavním nositelem magnetizace u studovaných typů hornin je magnetit či titanomagnetit, případně i maghemit, hematit či goethit.

### Metodické cíle

- Najít moderní magnetomineralogické metody, které budou vhodné k objasnění původu jednotlivých složek remanentní magnetizace.
- Porovnat paleomagnetickou a magnetostratigrafickou metodiku, doplněnou o nezávislá datování, při zpřesňování stáří vhodných horninových typů.
- Ověřit vhodnost korelace profilů stejného stáří pomocí moderní magnetosusceptibilitní metody (*sensu Crick et al. 1997, 2001*), případně doplnit o magnetomineralogickou metodiku nezbytnou k určení hlavních nositelů MS.

### Geologické cíle

- Rekonstrukce kenozoického vulkanismu na základě paleomagnetického a magnetomineralogického studia vulkanitů na modelových územích.
- Magnetostratigrafická korelace nejvýznamnějších profilů hraničního intervalu jura/křída, což je jediná hranice mezi stratigrafickými epochami, která zatím nebyla jednoznačně určena a schválena mezinárodní stratigrafickou komisí ICS.
- Ověřit primární magnetickou složku staropaleozoických hornin a objasnit podmínky vzniku sekundárních fází.

### 3. Použité metody

#### 3.1. Paleomagnetismus a magnetostratigrafie

Paleomagnetismus zkoumá historii hornin a pohyb kontinentů na základě sledování informace o magnetickém poli Země v době vzniku horniny a během pozdějších geologických pochodů.

##### Magnetické pole Země (geomagnetické pole)

Hlavní složkou magnetického pole Země je magnetický dipól, jenž se nalézá v zemském jádru. Siločáry zemského dipólu vystupují až k povrchu Země. Místa, kde siločáry svírají s povrchem Země pravý úhel, se nazývají magnetické póly a místa, kde jsou siločáry s povrchem Země rovnoběžné, tvoří magnetický rovník. Zvláštností magnetického pole Země je sekulární variace, což znamená, že magnetické póly se stále pomalu posouvají, po přibližně kruhových drahách, kolem geografických pólů. Geomagnetické pole  $\mathbf{H}$  popisujeme jako vektorovou veličinu, která má svůj směr a velikost. Úhel mezi vektorem  $\mathbf{H}$  a vodorovnou rovinou se nazývá magnetická inklinace  $I$ .  $I$  je v rozmezí hodnot  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ ;  $-90^\circ$  je dnes v Antarktidě,  $0^\circ$  na magnetickém rovníku a  $90^\circ$  v Arktidě, velikost inklinace v Česku je kolem  $65^\circ$ . Magnetická deklinace  $D$  je úhel mezi zeměpisným a magnetickým severem (měřeno ve směru hodinových ručiček).  $D$  je sice v rozmezí hodnot  $0^\circ - 360^\circ$ , ale současné době je na všech trvale osídlených kontinentech mezi  $330^\circ - 360^\circ$  a  $0^\circ - 30^\circ$ . Ostatních hodnot dosahuje pouze v polárních oblastech.

Geomagnetické pole  $\mathbf{H}$  můžeme také rozložit do 3 na sebe kolmých složek:

$$\text{Vertikální: } H_V = H \sin I$$

$$\text{Horizontální k severu: } H_N = H \cos I \cos D$$

$$\text{Horizontální k východu: } H_E = H \cos I \sin D$$

Další vlastnost magnetického pole Země jsou změny polarity, jednou je severní magnetický pól poblíž zeměpisného severního pólu a jindy poblíž pólu jižního. V magnetostratigrafii se měří RM pro vzorky nad sebou v profilu a hledají se polohy s normální a reverzní polaritou, které se porovnávají s geomagnetickou polaritní škálou (GPTS), podle které je možné určit stáří hornin.

## **Přirozená remanentní magnetizace (NRM)**

NRM je remanentní magnetizace vzorku před jakýmkoliv laboratorními procesy a skládá se z primární, sekundární a viskózní složky. Primární složka NRM se dělí na termoremanentní (TRM), chemoremanentní (ChRM) a detritickou remanentní magnetizaci (DRM). V případě vulkanických hornin se zkoumá TRM která vznikla při chladnutí lávy pod Curieovu teplotu, při které se mění titanomagnetity z paramagnetických na ferromagnetické a tudíž mohou nést remanentní magnetizaci. Vápence na druhou stranu obsahují DRM která vzniká při usazování magnetických minerálů a při lithifikaci sedimentu v hloubce do 20 cm. Magnetotaktické bakterie v horní vrstvě sedimentu vytváří magnetit. U některých S/D vápenců se nachází i ChRM, která vznikla vysrážením hematitu v době variského vrásnění, přestože tyto horniny byly vystaveny teplotám nižším než 200°C.

## **Demagnetizace střídavým polem**

Jak v paleomagnetismu tak v magnetostratigrafii se pro správnou interpretaci stáří hornin snažíme získat primární složky magnetizace. Toho docílíme střídavou demagnetizací. Vzorek vložíme do cívek, které jsou uzavřené v permealloyovém krytu, jenž zamezuje pronikání vnějšího magnetického pole dovnitř, zde v nulovém magnetickém poli jsou uloženy cívky elektromagnetu, do kterých pouštíme střídavý elektrický proud s postupně se snižující amplitudou. Takto vzniklé, postupně se snižující, střídavé magnetické pole způsobí odbourání viskózní a někdy i sekundární složky magnetizace. Každý vzorek postupně demagnetujeme a po každém demagnetizačním kroku změříme zbývající remanentní magnetizaci. Tato metoda je vhodná skoro pro všechny typy hornin, je to jediný způsob použitelný při měření nezpevněných sedimentů, na druhou stranu je to metoda vysloveně nevhodná pro měření vzorků obsahujících goethit. Většina vzorků byla změřena na plně automatickém kryogenním magnetometru 755-4K 2G Enterprises se zabudovaným AF demagnetizérem v rozmezí polí 0 – 80 mT (0 – 100 mT). Magneticky silné vulkanity musely být změřeny kombinací přístrojů AF demagnetizátoru LDA-3a a rotačního magnetometru JR5a.

## **Tepelná demagnetizace (TD)**

Při TD se vzorek vkládá do nemagnetické pece, která je odstíněna proti zemskému magnetickému poli. Během zahřívání se odbourává veškerá viskózní magnetizace. Každý vzorek se měří přibližně v 13 demagnetizačních teplotách a po každém kroku se měří remanentní magnetizace pro určení paleomagnetického pole a magnetická susceptibilita, která detekuje fázové změny při zahřátí. TD je absolutně nejdůležitější paleomagnetickou metodou, která je díky sledování blokujících teplot schopná eliminovat viskózní složku na 100 %. Demagnetizace se prováděla v přístroji MAVACS s krokem 40° C v rozmezí teplot 80 a 580° C u vzorků s magnetitem a v rozmezí 80 až 680° C u vzorků s hematitem. K následnému měření bylo u magneticky silnějších vzorků použito rotačního magnetometru JR6 a u slabých vápenců kryogenního magnetometru 755-4K 2G Enterprises. Kontrola susceptibility proběhla na přístroji KLF-4.

## **Složková analýza**

Jednotlivá měření se pro první přiblížení zobrazují na stereografické projekci, ale jednotlivé složky se snáze interpretují v ortogonální projekci v takzvaném Zijderveldově diagramu. Při interpretaci se hledají úseky, kde jsou jednotlivé body seřazeny v řadě za sebou a směřují do středu soustavy a prokládají ze úsečkou pomocí metody nejmenších čtverců (*Kirschvink 1980*).

## **Skupinová statistika**

Hodnoty získané složkovou analýzou se zobrazí ve stereogramu, a z toho se pomocí maticového počtu spočítá střední hodnota (*Fisher et al. 1987*), kterou můžeme (za předpokladu že měříme více stratigrafických úrovní a tudíž je vystředěná sekulární variace) přepočítat na paleopól a porovnat s křivkou zdánlivého putování pólů pro daný kontinent.

## 3.2. Rockmagnetismus a magnetomineralogie

### Magnetické vlastnosti minerálů

Minerály dělíme na diamagnetické, paramagnetické a ferromagnetické. Diamagnetické minerály, jako například křemen a kalcit, se v magnetickém poli magnetují opačně proti magnetickému poli  $\mathbf{H}$ . Kalcit je hlavní složkou mezozoických i paleozoických vápenců a přesto, že velikost magnetické susceptibility (MS) je jen kolem  $-10 \cdot 10^{-6}$  SI v extrémně čistých vápencích dominuje i po magnetické stránce.

Paramagnetické minerály se v magnetickém poli magnetují, avšak po vyjmutí z magnetického pole tuto magnetizaci ztrácí. Nejdůležitějšími paramagnetickými minerály jsou jíly, slídy, pyroxeny, amfiboly, pyrit, siderit a některé spinelidy.

Samotný paleomagnetismus je však založen na studiu ferromagnetických minerálů, které silně reagují na magnetické pole a magnetizaci si zachovávají i po vymizení vnějšího pole. Nejdůležitější nositelé remanentní magnetizace jsou magnetit a hematit.

### Magnetická susceptibilita (MS)

MS je schopnost látky se namagnetovat ve slabém magnetickém poli, která je dána vztahem:  $\chi = J_i/H_e$  kde  $J_i$  je indukovaná magnetizace a  $H_e$  magnetické pole. Objemová MS je bezrozměrné číslo většinou měřené v jednotkách  $10^{-6}$  SI, nebo v hmotnostních jednotkách  $10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ . Tato veličina byla v laboratoři měřena na kappa můstku KLY-4 od firmy Agico Brno.

### Anisotropie magnetické susceptibility (AMS)

Většina minerálů má v různých krystalografických směrech odlišnou schopnost se magnetovat, což se nazývá AMS. Materiálově izotropní magnetit má velkou tvarovou anizotropii, díky níž se nejlépe magnetuje rovnoběžně s nejdelší osou.

Tato metoda je velice vhodná k identifikaci tlakového postižení hornin při orogenezi. U bazaltů se však AMS používá především pro určení směru proudění lávy, která je zachovaná jen v reliktech. Vzorky na AMS se vkládají do multifunkčního kappamůstku KLY-4S, s rotačním držákem, a zde se postupně měří ve třech rovinách kolmých na sebe.

## MS závislá na poli indukční cívky ( $MS_{FD}$ )

Absolutní většina minerálů vykazuje stálou MS při změně magnetického pole v indukční cívce. Jediné výjimky tvoří některé spinelidy (např.: titanomagnetit) a pyrotin, u kterých se velikost MS zvětšuje s rostoucím magnetickým polem, a proto se tato veličina hodí k jejich studiu. Závislost na poli se vyjadřuje vztahem:  $k_{HD} [\%] = 100(k_{300} - k_{30}) / k_{300}$ , kde  $k_X$  je MS měřená v poli s amplitudou 30 respektive 300 A/m. (*sensu Vahle et al., 2007*) S obsahem Titanu roste  $k_{HD}$  až o několik desítek procent. MS závislá na poli byla měřena na multifunkčním kappamůstku KLY-4S, případně susceptibilitymetrem KLF-4.

## Teplotní závislost MS

Měření MS v rozpětí teplot  $-180 - 0^\circ \text{C}$  a dále v rozmezí  $20 - 700^\circ \text{C}$  se používá k identifikaci jednotlivých minerálů a fázových změn při zahřívání. U vulkanických hornin kde převládá příspěvek titanomagnetitů lze touto metodou určit Curievu teplotu a z toho soudit i jejich na chemické složení. Naproti tomu u sedimentárních hornin lze pozorovat fázové změny při zahřívání, například vznik nového magnetitu při teplotách kolem  $450^\circ \text{C}$ . Měření proběhlo na kappamůstku KLY-4S s nemagnetickou pecí CS-3 a kryostatem CS-L.

## Königsbergův parametr Q

Nezákladnější rockmagnetický ukazatel je klasický Königsbergův parametr Q,

$$Q = J_{nrm} / (K_m \times H),$$

kde,  $H [mA/m]$  je velikost magnetického pole země v místě odběru,  $K_m [SI]$  je objemová magnetická susceptibilita,  $J_{nrm} [mA/m]$  znamená velikost přirozené remanentní magnetizace

Tento parametr se obvykle pohybuje pod 1 u sedimentů a pod 10 u vulkanitů. Nicméně za určitého chemického složení magnetitů může dosahovat 40. V laboratoři se používá k orientační identifikaci vzorků, které byly za bouřky zmagnetovány blesky. Přístrojové vybavení použité k tomuto měření je kappamůstek KLF-4 a rotační magnetometr JR5a.

### **Izotermální remanentní magnetizace (IRM)**

Při pulzu magnetického pole vzniká ve vzorku IRM. Vzorky magnetujeme postupně a po každém kroku měříme jejich remanentní magnetizaci. Důležitým parametrem je magnetická tvrdost reprezentovaná parametrem  $B/2$  který se vypočte při analýze takto získané akviziční křivky IRM. Je to hodnota pole, při kterém se všechny minerály stejného složení nasatí přesně na polovinu svého saturovaného stavu.  $B/2$  u titanomagnetitů je v rozmezí 20 a 70 mT, u hematitu mírně nad 70 mT a u goethitu mezi 1 a 2 T (*Grygar et al. 2003*). Vzorky byly magnetovány pulzním magnetometrem MMPM 10 a měřeny rotačním magnetometrem JR5a.

### **Magnetické skenování**

Na výbrusech se vyhledávají magnetické anomálie pomocí magnetického skeneru, tyto anomálie se poté interpretují v optickém mikroskopu a případně i nafotí. Magnetický skener je sestavený firmou Youngwood Science and Engineering z Hallovy sondy a automatického posuvného držáku vzorků s rozlišením 0,2 mm a rozsahem 17x17 mm. Výbrus se musí nejdříve saturovat izotermální remanentní magnetizací (SIRM), v našem případě jsme použili pole 2,5 T. Hallova sonda měří magnetické pole 0,1 mm nad povrchem výbrusu. Jedná se o složku magnetického pole kolmou k rovině výbrusu, která se poté automaticky zaznamená, včetně souřadnice bodu na výbruse. Nakonec se vše uloží do rastrového snímku.

### **3.3. Doplnkové fyzikální a geochemické metody**

Pro účely studia magnetických vlastností hornin a obzvláště pak pro účely vyhodnocení získaných poznatků a jejich interpretaci lze, a mnohdy je i nezbytné, používat i metody jiných oborů. Nejvýznamnější z nich jsou radiometrie určující stáří zkoumaných hornin, geochemické analýzy zjišťující chemické složení nositelů magnetizace a gamaspektrometrie, která pomáhá objasnit vliv terigenní složky na magnetickou susceptibilitu.



## Radiometrické datování

Radiometrické datování je v případě interpretace paleomagnetických vlastností natolik důležitá metoda že je třeba ji na tomto místě přiblížit, aniž by byla předmětem vlastního studia. Její výsledky jsou však využívány v publikacích pro účely magnetostratigrafické.

Vulkanické horniny vyžadují specifický přístup, lávové proudy i přírodní dráhy malých rozměrů a žilné proniky chladnou velice rychle a pokud nemáme velké množství proudů nad sebou, nemůžeme vystředit sekulární variaci. Mezi jednotlivými výlevy jsou hiáty neznámé délky, a tudíž nám může chybět i několik celých magnetozón. Pro správnou interpretaci doby vzniku je tedy nutné znát ještě radiometrické stáří. Při řešení výzkumného úkolu podporovaného GA AV vznikla souborná databáze veškerých doposud publikovaných radiometrických výsledků z vulkanismu ČM (např. *Shrbený a Vokurka 1985, Šibrava a Havlíček 1980, Kopecký 1987, Lustrino a Wilson 2007,*). A několik desítek nových měření provedli Z. Pecskey a K. Balogh v Institutu nukleárního výzkumu Maďarské akademie věd v Debrecenu (ATOMKI), a to přímo ze stejných lokalit, které byly odebrány na paleomagnetismus. Shrnutím takových výsledků však na straně druhé vyvstaly problémy, a to např. existencí několika rozdílných údajů pro jedinou lokalitu. I takovou zdánlivě chaotickou situací se však alespoň částečně podařilo proniknout, mimo jiné, i za použití paleomagnetických metod a rozdílná radiometrická data do jisté míry ověřit z hlediska pravděpodobnosti (*Cajz et al. 2012, v tisku*).

## Geochemické analýzy nosičů magnetických minerálů

K pozorování struktur magnetických minerálů byly použity snímky z elektronového mikroskopu. Chemická data byla změřena J. Novákem a Z. Korbelovou na elektronové mikrosondě CAMECA SX-100, která funguje na principu vlnové dispersní spektroskopie (WDS), s korekcí podle *Merlet (1994)*. Byly použity krystaly 2x TAP, 1x LPET a 1x LLIF. Urychlovací napětí při měření bylo 15 keV a absorbovaný proud (proud svazku elektronů) 10 nA při průměru svazku 1 $\mu$ m. Ke standardizaci byl použit soubor standardů firmy SPI Supplies dále pak minerály i syntetické materiály ze standardového vybavení laboratoře.

## Gamaspektrometrie

Gamaspektrometrie je podpůrná metoda důležitá při interpretaci magnetosusceptibilitních křivek. Na hraničním intervalu S/D byla měřena F. Vackem, na hraniční J/K lokalitě Le Chouet jsem ji již měřil osobně a tudíž se zde o ni musím zmínit.

Množství uranu, thoria a draslíku bylo měřeno pomocí polního spektrometru Geofyzika-SatisGeo GS-512 s krokem 0,5 u J/K profilů a 0,25 m u S/D profilů a to po dobu 120 respektive 240 sekund. Radioaktivní emise byly automaticky přepočítány na koncentrace draslíku [%], uranu [mg/kg] a thoria [ppm], celková radioaktivita byla převedena na ekvivalent uranu [eU, mg/kg]. Změřená radioaktivita má jen orientační charakter (*Geršl a Hladil 2004*). Detekované prvky K, U a Th jsou ve většině případů obsaženy v živcích, slídách a jílových minerálech, ale uran může být také navázán na organickou hmotu a je mobilní při diagenézi. Zvýšené koncentrace draslíku a thoria ve vápencích jsou skoro vždy způsobeny detritickou terigenní příměsí.

## 4. Magnetomineralogie a paleomagnetismus bazických vulkanitů ČM

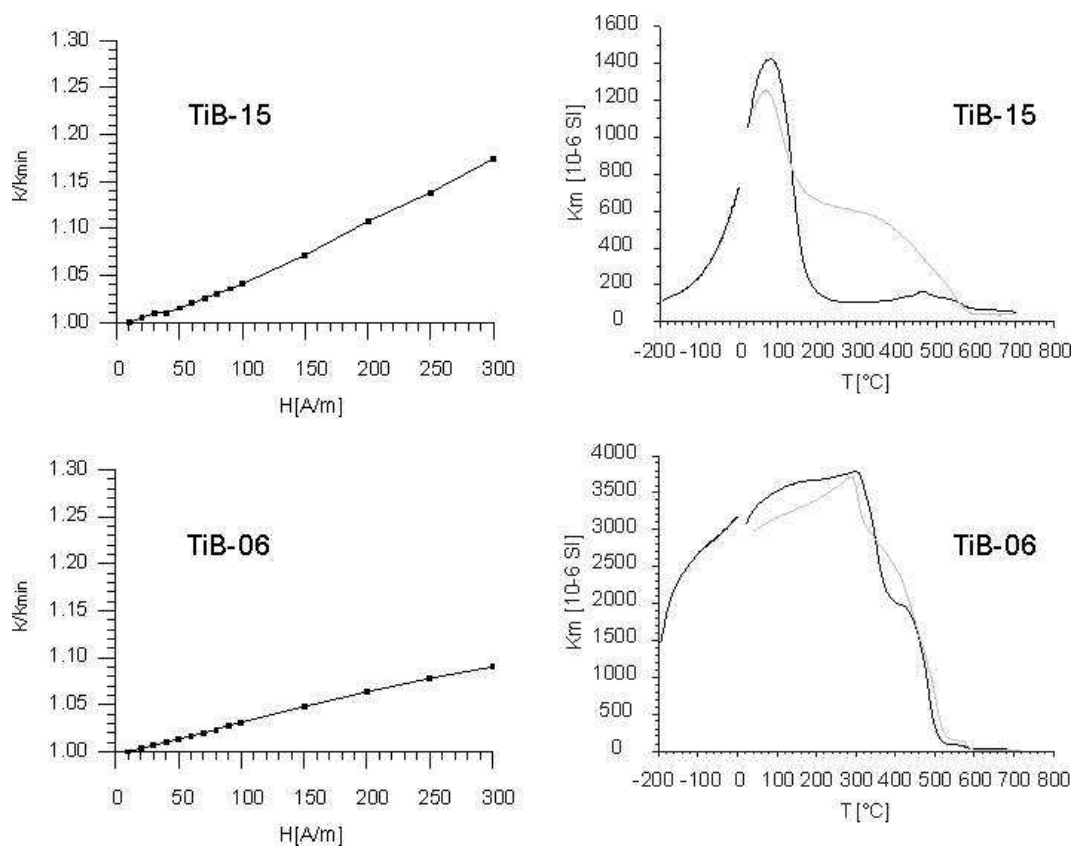
### 4.1. Magnetomineralogie titanem bohatých vulkanitů v Krušných horách

Výzkum v Krušných horách (KH) se zabývá studiem Curiovy teploty ( $T_c$ ) a závislosti MS na poli u titanem bohatých bazaltoidů z loučenského vulkanického centra, který od nás zasahuje až do německého Oberwiesenthalu (*Ulrych et al. 2005*). Naměřené hodnoty porovnávám s vulkanologickými výzkumy V. Cajze a chemickými analýzami vyhotovenými J. Novákem, M. Langem a Z. Korbelovou. Převládají zde titanem bohaté (3.5 – 5.2 wt%  $TiO_2$ ) nefelinity a melanefelinity a výjimečně se nachází i titanem středně bohaté (2.5 – 3.5 wt%  $TiO_2$ ) olivinické nefelinity, nefelinické bazanity a fonotefrity.

minralogická komponenta	strukturní vzorec	průměrný obsah [%]
ulvöspinel	$TiFe_2O_4$	48,40
hercynit	$FeAl_2O_4$	5,92
jacobsit	$MnFe_2O_4$	3,20
magnesioferrit	$MgFe_2O_4$	15,10
magnesiochromit	$MgCr_2O_4$	0,65
chromit	$FeCr_2O_4$	0,38
magnetit	$Fe_3O_4$	26,35

Tab. 1. Průměrné složení ferromagnetických spinelidů loučenského vulkanického centra (vypočteno z podkladů J. Nováka a M. Langa)

MS titanem bohatého titanomagnetitu s velikostí pole v indukční cívice roste až o 20 % (mezi poli 5 a 300 A/m), zatímco čistý magnetit je na poli nezávislý. Obsah titanu v krystalické mřížce magnetitu se také odráží v hodnotě  $T_c$ , která je v rozmezí 200 až 580° C. Vyšší množství Ti ve strukturní mřížce magnetitu snižuje Curieovu teplotu. Vzorky s vysokým obsahem Ti mají Curieovu teplotu v intervalu 200 – 250° C. U Ti-chudých magnetitů je nárůst susceptibilitly s polem nepatrný a Curieova teplota v rozmezí 500 – 580° C. Obrázek 2 zobrazuje magnetické chování dvou základních typů spinelidů, titanem bohatých a chudých. Významné zjištění je, že ve studované oblasti obsah titanu v krystalové struktuře spinelidů, detekované jak pomocí magnetomineralogických metod tak na elektronové mikrosondě, skoro nezávisí na celkovém množství titanu v hornině. Průměrné složení spinelidů je uvedeno v tabulce 1. Hornina je patrně obohacena titanem během výstupu magmatu přes mafický masív v podloží vulkanického centra a tudíž se titanem nabohacují později krystalizující minerály, například amfiboly a slídy.



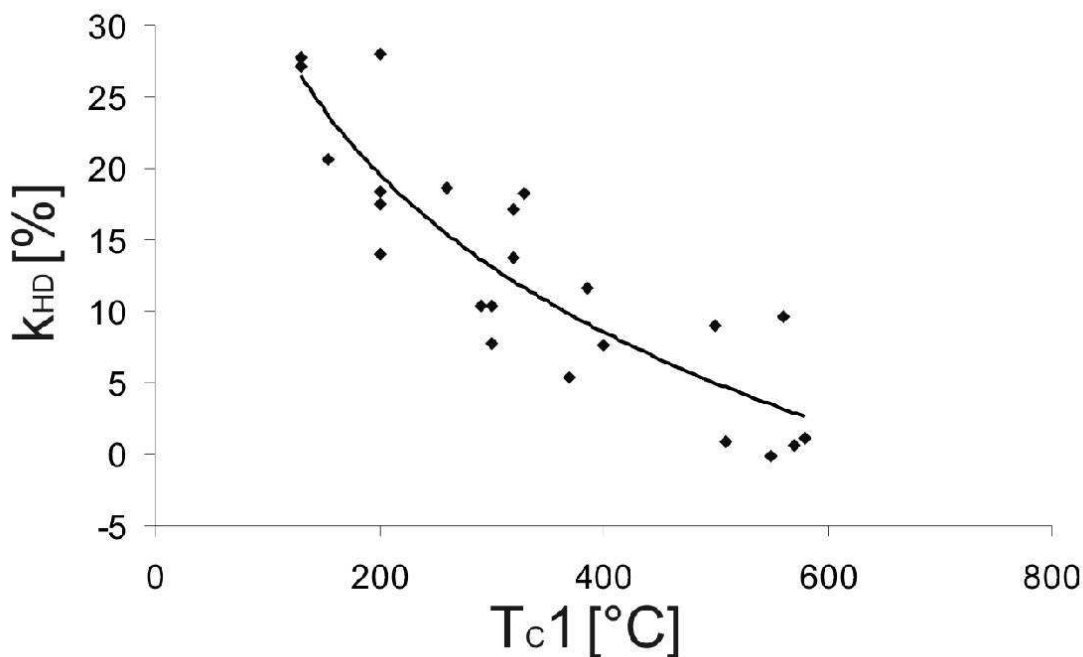
Obr. 2. Křivky závislosti magnetické susceptibilitly na poli (vlevo) a na teplotě (vpravo). Černou je značena ohřívací křivka a šedou ochlazovací. TiB-15 je příklad horniny s vyšším obsahem titanu ve spinelidech a v TiB-06 převládá železitá složka.

vzorek	ulvöspinel	hercynit	jacobsit	magnesio- ferrit	magnesio- chromit	chromit	magnetit	T <sub>Cl</sub> [°C]	k <sub>HD</sub>
TiB-03	44,94	4,95	2,95	18,14	0,09	0,03	28,90	200	18,42
TiB-04	48,00	10,89	2,45	25,40	0,06	0,02	13,17	320	17,15
TiB-06	37,21	3,82	5,25	6,31	0,01	0,00	47,38	400	7,67
TiB-07	36,00	6,02	3,88	10,57	0,02	0,01	43,51	300	10,37
TiB-08	54,80	7,02	2,70	16,74	0,13	0,04	18,57	300	7,69
TiB-12	55,78	8,46	2,12	22,77	2,07	2,07	6,71	260	18,67
TiB-13	55,73	8,32	2,25	15,98	3,47	1,16	13,09	320	13,74
TiB-15	53,03	5,96	2,45	10,82	0,97	0,65	26,13	200	13,97
TiB-18	46,23	2,34	3,72	8,70	0,08	0,03	38,91	370	5,34
TiB-19	42,04	3,29	4,63	7,57	0,02	0,01	42,44	510	0,86
TiB-23	58,64	4,07	2,81	23,10	0,18	0,18	11,02	330	18,25

korelační parametry

	ulvöspinel	hercynit	jacobsit	magnesio- ferrit	magnesio- chromit	chromit	magnetit	T <sub>Cl</sub> [°C]	k <sub>HD</sub>
khd	0,50	0,55	-0,73	0,81	0,33	0,44	-0,73	-0,75	
Tc1	-0,37	-0,41	0,70	-0,44	-0,24	-0,33	0,45		-0,75

Tab. 2. Procentuální zastoupení koncových členů spinelidů rozpočítaných z chemického složení získaného pomocí WDS analýzy a korelace s Curie teplotou a susceptibilitou závislou na poli.



Obr. 3. Z grafu frekvenčně závislé susceptibility versus curieova teplota je vidět logaritmická závislost, která je v souladu se studií Vahle a Kontny 2005.

### Výsledky studie:

Pozitivní korelace byla nalezena mezi ulvöspinelovou, hercynitovou a magnesioferritovou komponentou a MS závislou na poli (viz tab. 2.). O trochu menší korelace mezi ulvöspinelovou složkou a MS<sub>FD</sub> je způsobena malou variabilitou této spinelidové složky.

MS<sub>FD</sub> nejvíce koreluje se složkou magnesioferritovou. Malá až střední negativní korelace je mezi ulvöspinelovou, magnesioferritovou i/nebo hercynitovou komponentou a Curieovou teplotou (T<sub>C</sub>). Vysoká korelace mezi jakobsitovou složkou a T<sub>C1</sub> a MS<sub>FD</sub> se pro malé množství manganu ve spinelidech nedá spolehlivě vysvětlit, ale je to vhodné téma pro další výzkumu.

Teoretická T<sub>C</sub> se počítá z molární ulvöspinelové složky pomocí vzorce:

$$T_C [^{\circ}\text{C}] = 578 - 580x - 150x^2 \quad (\text{Clark } 1997)$$

V tomto případě je T<sub>C1</sub> vyšší než T<sub>C</sub> teoretická, přestože obsah hliníku a hořčíku teplotu ještě snižuje. Velkou roli zde zřejmě hraje i nepatrný obsah manganu. Graf T<sub>C1</sub>

ku  $k_{HD}$  má logaritmický průběh (obr. 3). Rozptyl hodnot  $T_C$  a  $k_{HD}$  u petrograficky různorodých žilných hornin Českého Středohoří je dvakrát větší než u monotónních bazaltů KH.

Magnetická susceptibilita byla na porovnání měřena i u silurských diabázů a vulkanoklastik, parametr  $k_{HD}$  byl naměřen v rozmezí 0,9 a 1,7 což ukazuje na titanem, hliníkem a hořčíkem chudší titanomagnetity. Hodnota  $k_{HD}$  je tak malá že  $MS_{FD}$  nelze používat k identifikaci přeplavené vulkanické příměsi v paleozoických karbonátech v okolí vulkanických center.

---

Studie je publikována v článku: Schnabl P., Novák J.K., Cajz V., Lang M., Balogh K., Pecskey Z., Chadima M., Šlechta S., Kohout T., Pruner P., Ulrych J., 2010. Magnetic properties of high-Ti basaltic rocks from the Krušné hory/Erzgebirge MTS. (Bohemia/Saxony), and their relation to mineral chemistry, *Stud. Geoph. et Geodet.*, 54, 1, 77 – 94.

## 4.2. Paleomagnetismus vulkanitů na Bruntálsku

Tato práce pojednává o paleomagnetických výzkumech plio-pleistocenních bazaltů v sv. části ČM. Paleomagnetická data byla doplněna o 27 nově získaných radiometrických stáří hornin, získaných K/Ar metodou. Na všech vulkánech byly odebrány kompaktní lávy a v některých případech i vulkanoklastika. U reverzně polarizovaných pleistocenních bazaltů se magnetická deklinace a inklinace pohybuje v rozmezí 130 až 174° a -85 až -68°; a u pliocenních hornin s normální polaritou je deklinace mezi 345 a 350° a inklinace okolo 62°. Vulkanologické zhodnocení dříve získaných geofyzikálních dat poskytlo důležité informace vztahující se ke genezi Velkého (VR) a Malého Roudného (MR).

Pleistocenní vulkanická aktivita proběhla ve dvou fázích (2,6 – 2,1 Ma a 1,8 – 1,1 Ma), při nichž vznikaly monogenetické vulkány. Výjimku tvoří VR, který vznikl ve starší pleistocenní fázi a v mladší fázi byl remobilizován. Během nejstarší (pliocenní) (4,3 – 3,3 Ma) fáze vznikla na Bruntálsku sopka Břidličná a ve stejné době a na stejném zlomovém systému byla výrazná sopečná aktivita v polské Lutyni (obr. 4).

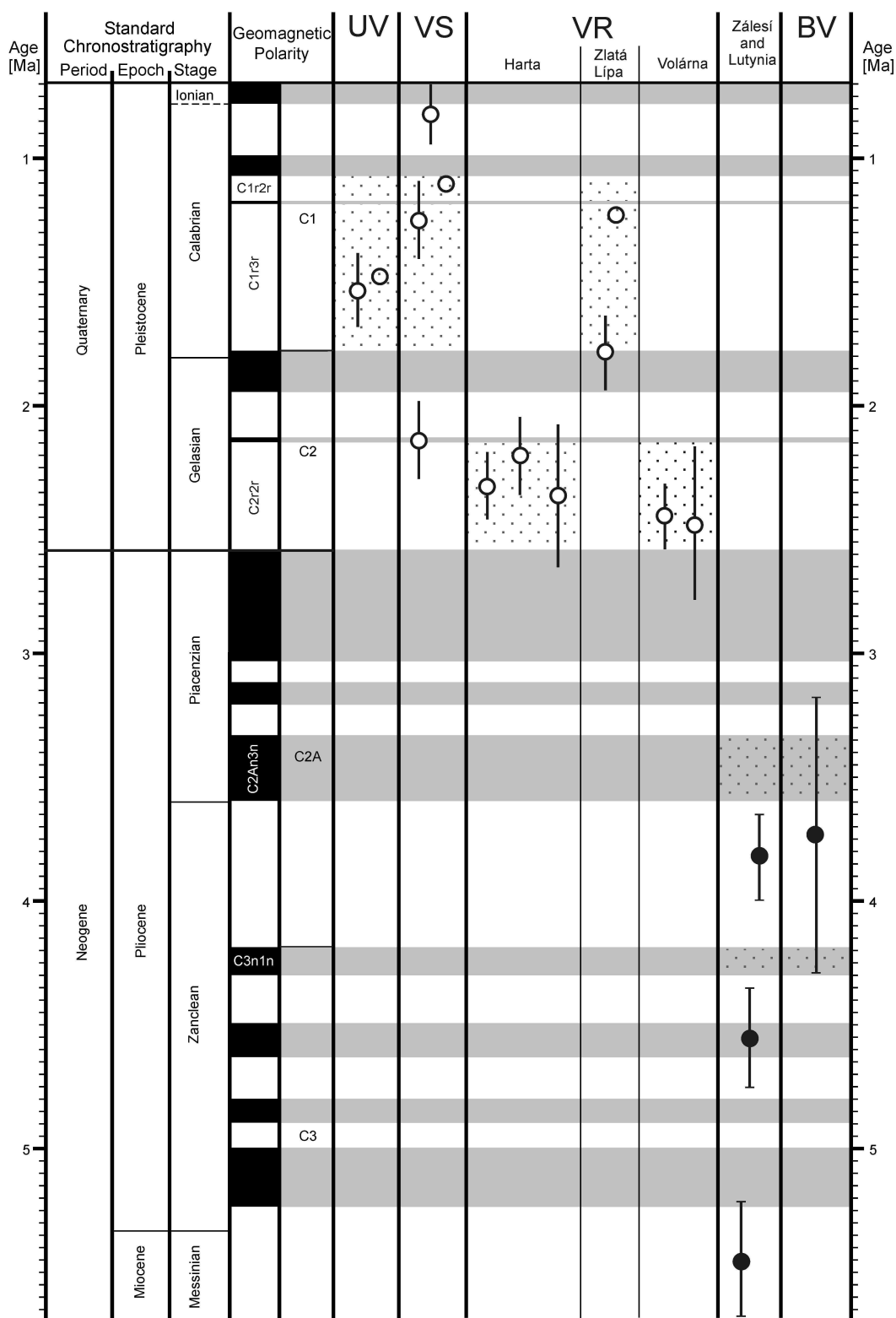
### Paleomagnetické výsledky

Na struskových kuželech Uhlířský vrch (UV) a Venušina sopka (VS) byly kromě láv odebrány i plastické typy vulkanických bomb - vřetenovité a lívancovité (*spindle and cow dunk type*). Shodná magnetická deklinace a inklinace mezi vulkanickými bombami a lávami dokazuje že tyto bomby byly transportovány a uloženy za teplot vyšších než Curieova teplota (titano)magnetitu (pro 560° C VS a 400 – 560° C pro UV). Krátké trvání vulkanické aktivity monogenetických vulkánů znemožňuje vystředění sekulární variace. Úhel mezi středním vektorem na UV a VS je však pouze 1,3°, z toho vyplývá skoro identická doba vzniku obou vulkánů. Tento předpoklad je v souladu s K/Ar datováním, kdy jsou si hodnoty stáří také velmi blízké.

Paleomagnetická data z VR pochází z orientovaných vzorků odebraných z jeho nejdelšího lávového proudu, tyto vzorky pocházejí z kompaktních partií. Data z lomu Bílčice (SU-03) jsou v porovnání s ostatními odběrovými místy na stejném lávovém proudu systematicky rotovány o 13° k S. Horský et al. (1972) při podrobném geologickém průzkumu před stavbou přehrady objevil náklony velkých bloků, které



vznikají při rozpadu lávového tělesa, což je v naprostém souladu s našimi výsledky získanými absolutně jinými metodami.



Obr. 4. Plná (normální polarita) a prázdná (reverzní p.) kolečka představují jednotlivá místa odběru která jsou paleomagneticky změřena a radiometricky datována, tečkování zobrazuje 3 interpretované fáze vulkanizmu (4,3 – 3,3 Ma, 2,6 – 2,1 Ma a 1,8 – 1,1 Ma)

Na jedné lokalitě jsme z čistě vulkanologického zájmu odebrali několik vzorků z vrchní brekciované části (a-a typ) s cílem zjistit teplotu plujících utuhlých bloků lávy. Bylo zjištěno, že tyto úlomky měli teplotu mírně pod Curiovou teplotou magnetitu ( $580^{\circ}\text{C}$ ) a paleomagnetické směry ukazují rotaci čerstvě utuhlých úlomků a-a lávy ve směru pohybu lávového proudu. Tyto anomální směry mohou být také interpretovány jako vliv okrajových partií lávového proudu (*Krs 1969*), a proto by bylo zajímavé tento fenomén ověřit i na jiných lokalitách.

Porovnáme-li střední směry magnetické deklinace a inklinace z VR se směry získanými na UV a VS, získáme odchylky  $4,5$  a  $5,0^{\circ}$ . Tyto úhly sice nejsou dostatečně velké pro jednoznačné důkazy, zdá se však, že můžeme rozdělit reverzně polarizované vulkanity do dvou fází. Tato interpretace také nachází podporu u radiometrického datování. Větší rozdíl ( $6,4$  a  $8,0^{\circ}$ ) je mezi VR a izolovanými relikty u Zlaté Lípy a Volárny. Zlatá Lípa je s největší pravděpodobností produktem VR jako pozdější samostatný lávový proud.

Pliocenní ( $4,3 - 3,3$  Ma) fáze Slezského vulkanismu má některé společné rysy s Kozákovským souvrstvím ( $5,2 - 4,6$  Ma) na Jičínsku. Například sopečná činnost v obou oblastech je úzce spjata s tlakovými podmínkami na sudetské-lužické poruše, která je jedním z nejdůležitějších zlomových systémů ČM. Nicméně jak radiometrická tak paleomagnetická data jsou v rozporu s ideou, že se jedná o synchronní aktivitu.

---

Tato kapitola je shrnutí článku přijatého do tisku. Cajz V., Schnabl P., Pécskay Z., Skácelová Z., Venhodová D., Šlechta S. and Šifnerová K. Chronological implications of paleomagnetic record of the Late Cenozoic volcanic activity in Moravo-Silesian border - NE Bohemian Massif, *Geologica Carpathica*.

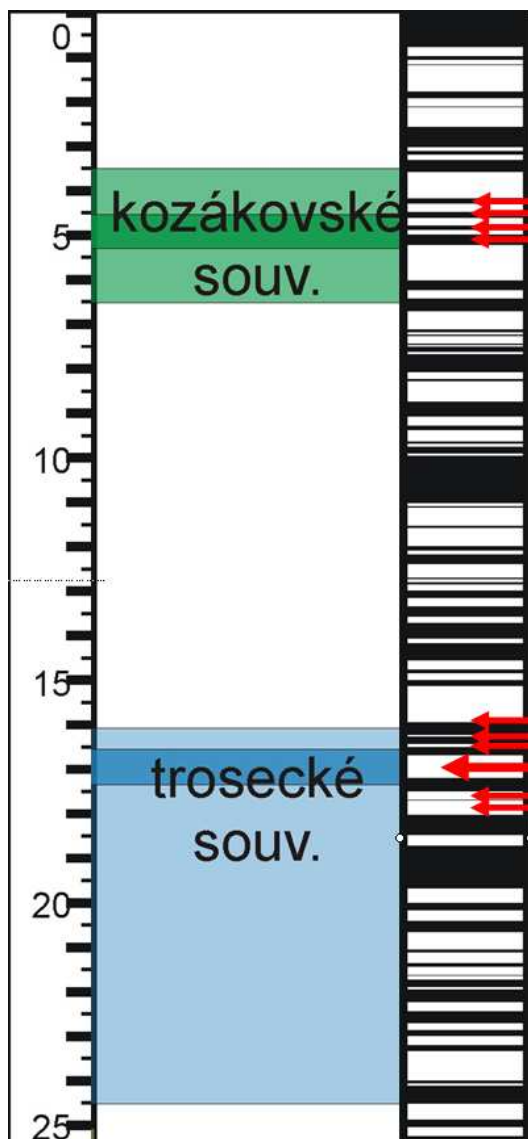
### 4.3. Paleomagnetismus vulkanitů na Jičínsku

Přestože je třetihorní vulkanismus ČM převážně soustředěn do oherské struktury, jičínské vulkanické pole (JVP), jehož solitérní vulkány tvoří dominanty Českého ráje je vulkanickou oblastí velice důležitou. JVP leží mezi Železným Brodem, Mnichovým Hradištěm, Jičínem a Novou Pakou, ještě nedávno byla tato oblast po vulkanologické stránce relativně málo probádaná a nebyly zde ještě známy vulkanické strusky dokazující blízkost povrchu, a tudíž se předpokládalo, že se kromě Kozákova jedná o výskyty hluboce erodovaných přírodních drah a pravých žil. V práci *Rappricha et al. (2007)* je však popsáno mnoho povrchových forem, například na Troskách a Prackově.

V tomto článku jsou navržena dvě vulkanická souvrství (obr. 5.), a to na základě litologie, paleomagnetismu, K/Ar datování a petrografie těchto hornin: kozákovského (spodní pliocén) a troseckého (svrchní miocén).

#### **Kozákovské souvrství**

Z paleomagnetických měření, které nemají vystředěnou sekulární variaci, apřesto mají střední směry mezi jednotlivými relikty lávových proudů malý rozptyl (obr. 6.), vyplývá, že všechna tělesa kozákovských láv jsou původně jedním jediným lávovým tělesem s přírodní drahou na struskovém kuželi Prackov, na kterém jsou zachovány zbytky lávového jezera v kráteru. Ke stejným výsledkům se pomocí vulkanologické interpretace dopracovali i kolegogové V. Cajz a V. Rapprich. Tyto výsledky mimo jiné dokládají 300 metrové vertikální pohyby během posledních 5 Ma, které probíhají na Lužické poruše. To odpovídá průměrné rychlosti vertikálních pohybů 0,06 mm/rok. Vulkanická činnost kozákovského souvrství vznikla v obdobných tektonických podmínkách jako první vulkanická fáze v Jeseníkách a na Bruntálsku, i když v jiné době.



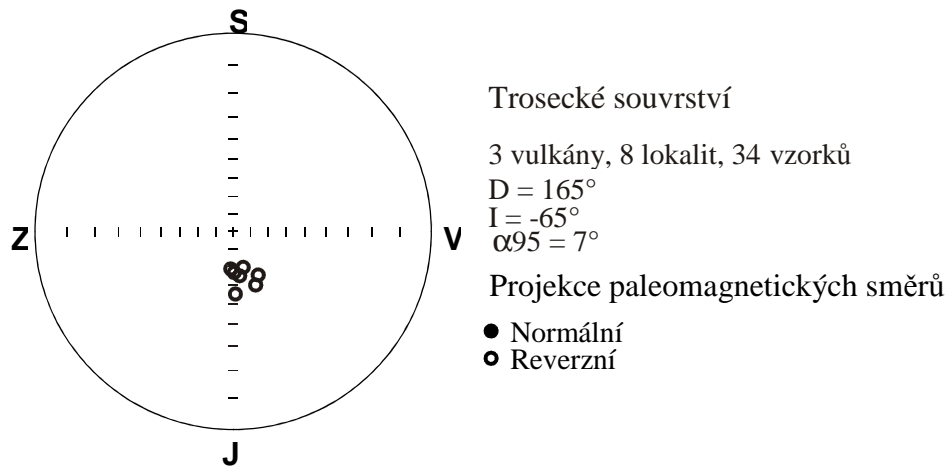
Obr. 5.: Zpřesnění radiometricky získaného stáří pomocí paleomagnetizmu troseckého (18,3 – 15,7 Ma) a kozákovského souvrství (5,2 – 4,6 Ma)



Obr. 6. Stereoprojekce středních paleomagnetických směrů spočtených na jednotlivých lokalitách Kozákovského souvrství.

## Trosecké souvrství

Všechny vulkanity troseckého souvrství se vyznačují reverzní magnetickou polaritou s relativě malými odchylkami magnetické deklinace a inklinace což v kombinaci s radiometrickým datováním Z. Pécskaye dokazuje že všechna vulkanická tělesa tohoto souvrství utuhla během magnetozóny C5Cr (17,2 – 16,7 Ma) tj. během pouhých 500 ka.



Obr. 7. Stereoprojekce středních paleomagnetických směrů spočtených na jednotlivých lokalitách Troseckého souvrství..

Porovnáním časové zařazení JVP s naší největší oblastí - českým středohořím získáme posloupnost jednotlivých souvrství kenozoického vulkanismu: **ústecké – děčínské – dobrnské – trosecké – štrbické – kozákovské**

---

Tyto výsledky byly publikovány v článku: Cajz V., Rapprich V., Schnabl P. a Pécskay Z. (2009): Návrh litostratigrafie neovulkanitů východočeské oblasti (A proposal on lithostratigraphy of Cenozoic volcanic rocks in Eastern Bohemia), *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2008*: Strana 9 – 15.

#### 4.4. Magnetostratigrafie v Doupovských horách

Detailní magnetostratigrafický výzkum proběhl na vulkanických komplexech Úhošť a Pustý Zámek v Doupovských horách. Tato oblast patří k středoevropské alkalické provincii a její vznik souvisí se vznikem oherského příkopu. V Doupovských horách se nachází dvě litostratigrafické jednotky:

- svrchní efuzivní
- spodní explozivní

Oba studované vulkanické komplexy patří ke svrchní efuzivní jednotce a jsou tvořeny sukcesí lávových proudů bazického složení.

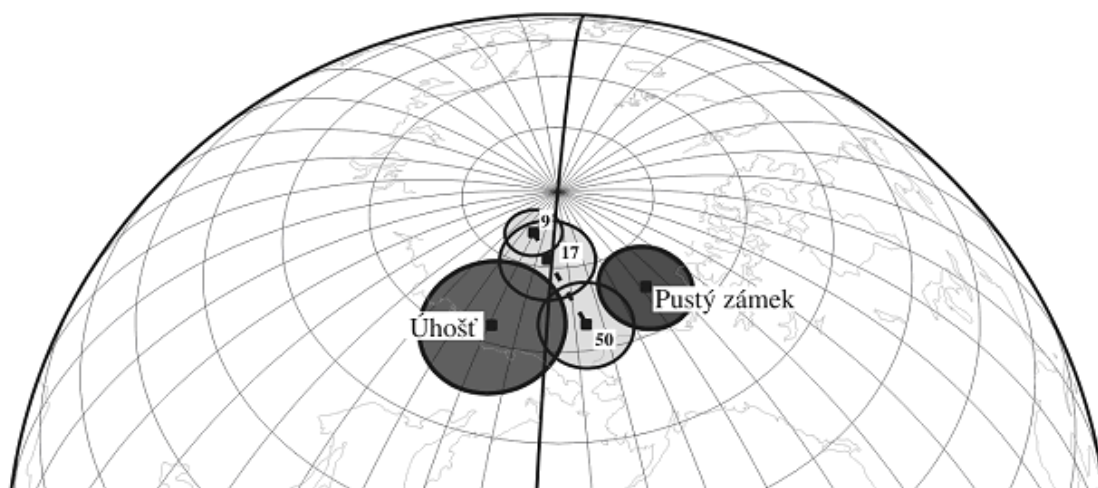
##### Úhošť

Na v. okraji Úhoště byl odebrán sled 7 lávových proudů. Na z. okraji bylo odebráno 6 lávových proudů, kde 2 proudy jsou shodné s nejvyššími výlevy v. úbočí a zbylé jsou v jejich nadloží, nejvyšší lávový proud je odebrán na třech místech, aby se omezil vliv zasažení bleskem. Jsou zde zastoupeny čtyři horninové typy: bazalty, picrobazalty, tefrity a nefelinity. Stáří celé vulkanické sekvence je v rozmezí od  $22,09 \pm 0,73$  do  $28,66 \pm 1,06$  Ma.

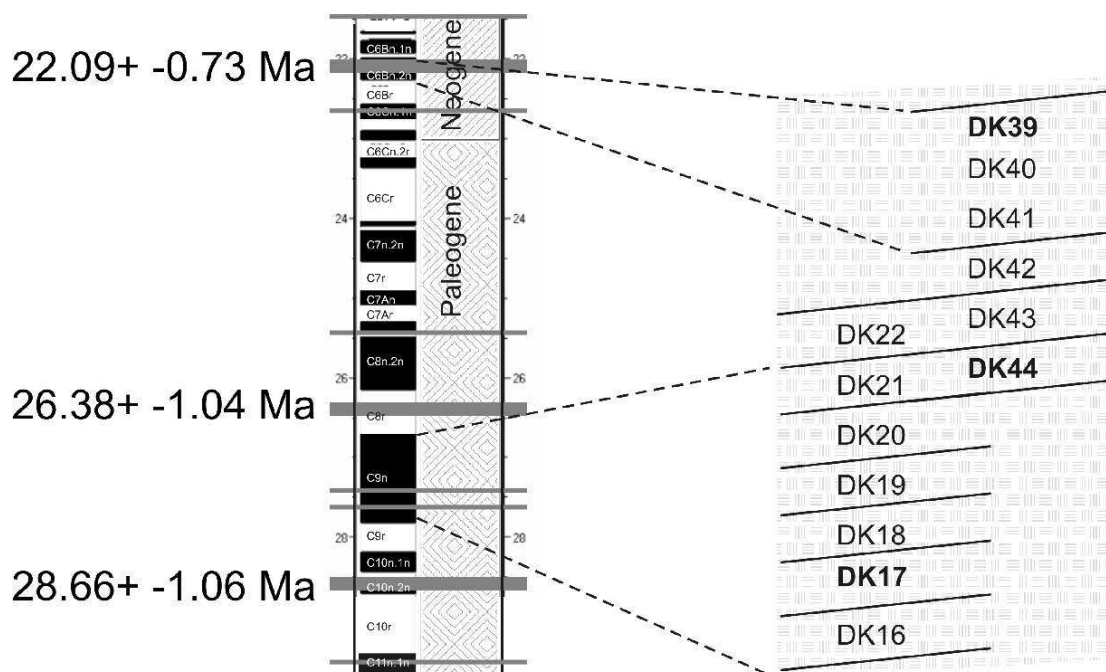
Většina vzorků má viskózní složku, kterou lze snadno demagnetovat střídavým magnetickým polem 5m T, nebo tepelnou demagnetizací při teplotě 100° C. Primární komponenta směřuje do středu soustavy a je interpretována v rozsahu 10 až 100 mT, případně 100 až 560° C. Úhel MAD (ukazatel spolehlivosti) je menší než 7°. Přestože jsme se snažili vyhnout nejexponovanějším místům, 24 % vzorků má primární komponentu nahrazenou komponentou sekundární, která vznikla při bouřce elektrickým výbojem. Tyto vzorky lze snadno odlišit poměrem REM případně méně spolehlivým parametrem Q a vyřadit z dalšího zpracování.

Střední hodnota vypočtená pomocí Fisherovy statistiky ze středních směrů jednotlivých lávových proudů má deklinaci  $D=11,5^\circ$ , inklinaci  $I=53,9^\circ$  a její úhel spolehlivosti  $\alpha_{95}$  je  $7,7^\circ$ . Do statistiky je započteno 200 vzorků z 13 lokalit. To znamená že všech 9 lávových proudů nad sebou má normální polaritu. Paleopól spočtený ze středních směrů jednotlivých lávových proudů leží na křivce zdánlivého putování pólů pro toto období (obr. 8). Hlavní otázka je proč v rozmezí 6 Ma,

kde je 12 normálně a 11 reverzně polarizovaných zón, se všechny výlevy láv odehrály v období s normální polaritou. Jedno z mnoha možných vysvětlení je že spodní polovina profilu utuhla během 1 miliónu let v chroně C9n a svrchní proud v subchroně C6Bn.2n (obr. 9).



Obr. 8. Paleomagnetické póly pro lokality Úhošť a Pustý Zámek leží v blízkosti křivky putování pólů pro období 50 – 9 Ma před současností



Obr. 9. Jedna z několika interpretací stáří sekvence lávových proudů. Na levé straně vidíme část magnetostratigrafické křivky pro toto období s vyznačením radiometrického stáří (tlustá čára - stáří, tenká - rozptyl) a na straně pravé odpovídající lávové proudy (datované lávové proudy jsou označeny tučným písmem).

## **Pustý Zámek**

Byl zde odebrán sled 26 lávových proudů, kde jsou zastoupeny různé bazaltoidní horninové typy: bazalty, tefrity a bazanity. Radiometrické datování udává hodnoty mezi 9,76 a 27,53 Ma.

Většina vzorků má viskózní složku, která lze snadno demagnetovat střídavým magnetickým polem 5 mT, nebo tepelnou demagnetizací při teplotě 100°C. Primární komponenta směřuje do počátku a je interpretována v rozsahu 5 (10) až 100 mT. Úhel MAD (ukazatel spolehlivosti) je menší než 7°. Vzhledem ke geomorfologické situaci jsme se často nemohli vyhnout nejexponovanějším místům a některé vzorky mají primární komponentu nahrazenou komponentou sekundární, která vznikla při bouřce elektrickým výbojem. Tyto vzorky lze snadno odlišit hodnotou REM či parametrem Q a vyřadit z dalšího zpracování.

Střední směr spočtený ze středních směrů jednotlivých lávových proudů má hodnoty  $D=351^\circ$  a  $I=56^\circ$ , úhel spolehlivosti  $\alpha_{95}$  je  $5,2^\circ$ . Do statistiky je započteno 180 vzorků z 25 lávových proudů s normální polaritou. Jeden lávový (druhý zhora) má polaritu reverzní jeho střední směr má anomální hodnoty  $D=250^\circ$ ,  $I=-64^\circ$  a  $\alpha_{95}=37^\circ$  je příliš velké. Paleomagnetický pól spočtený ze středních směrů jednotlivých lávových proudů leží poblíž křivky zdánlivého putování pólů pro toto období (obr. 8), a zároveň leží poblíž současného magnetického pólu. Že se jedná o primární komponentu je zřejmé z výsledků magnetického čištění a následné složkové analýzy. První otázka je shodná s lokalitou Úhošť, proč až na jeden případ všechny výlevy láv proběhly v období s normální polaritou. Druhá otázka je proč získaná radiometrická data vykazují inverzní charakter oproti geologické stavbě.



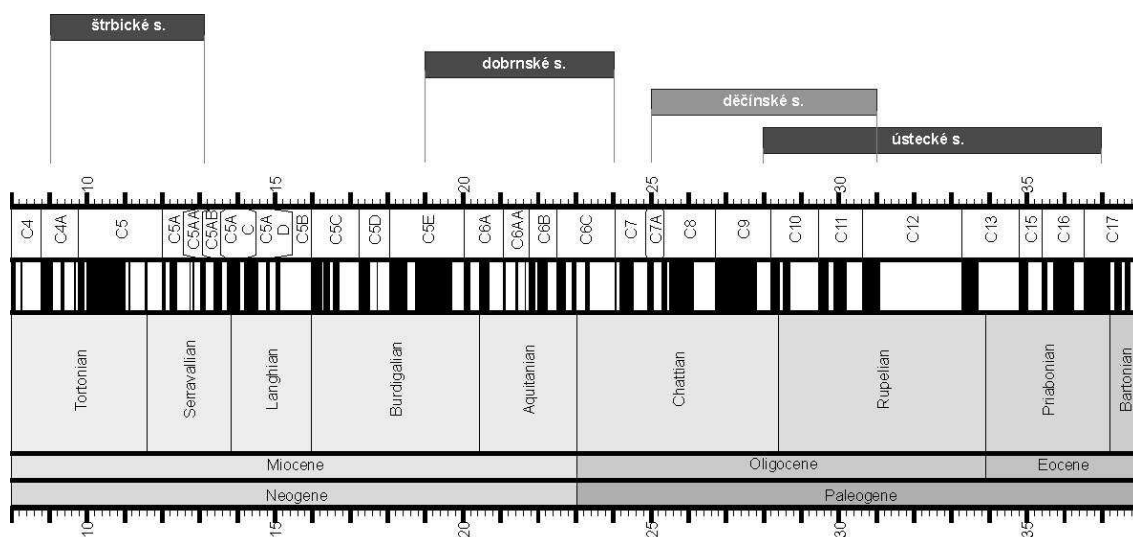
## 4.5. Paleomagnetická interpretace vulkanické činnosti v Českém středohoří

České středohoří je hlavní vulkanické centrum ČM. Z litostratigrafického hlediska se zde nachází 4 jednotlivá souvrství (Cajz 2000 a Cajz et al. 2009).

- **štrbické s.** (svrchní a střední miocén; 13 – 9 Ma)
- **dobrnské s.** (spodní miocén - svrchní oligocén; 24 – 19 Ma)
- **děčínské s.** (svrchní a střední oligocén; 31 – 25 Ma)
- **ústecké s.** (střední a spodní oligocén - nejvyšší eocén; 37 – 28 Ma)

Stále přetrvává problém časového překryvu dvou nejstarších souvrství, děčínského a ústeckého, které vytvářejí plošně rozsáhlé komplexy na obdobném areálu, ale mají zásadně odlišné geochemické vlastnosti, vykazují odlišný typ vulkanické aktivity, mají jasnou superpozici a mezi jejich tvorbou se dokonce dá předpokládat hiát. Radiometrická datování pro tato souvrství se překrývají o 3 Ma, jde o časový úsek 31 – 28 Ma (Obr. 10.).

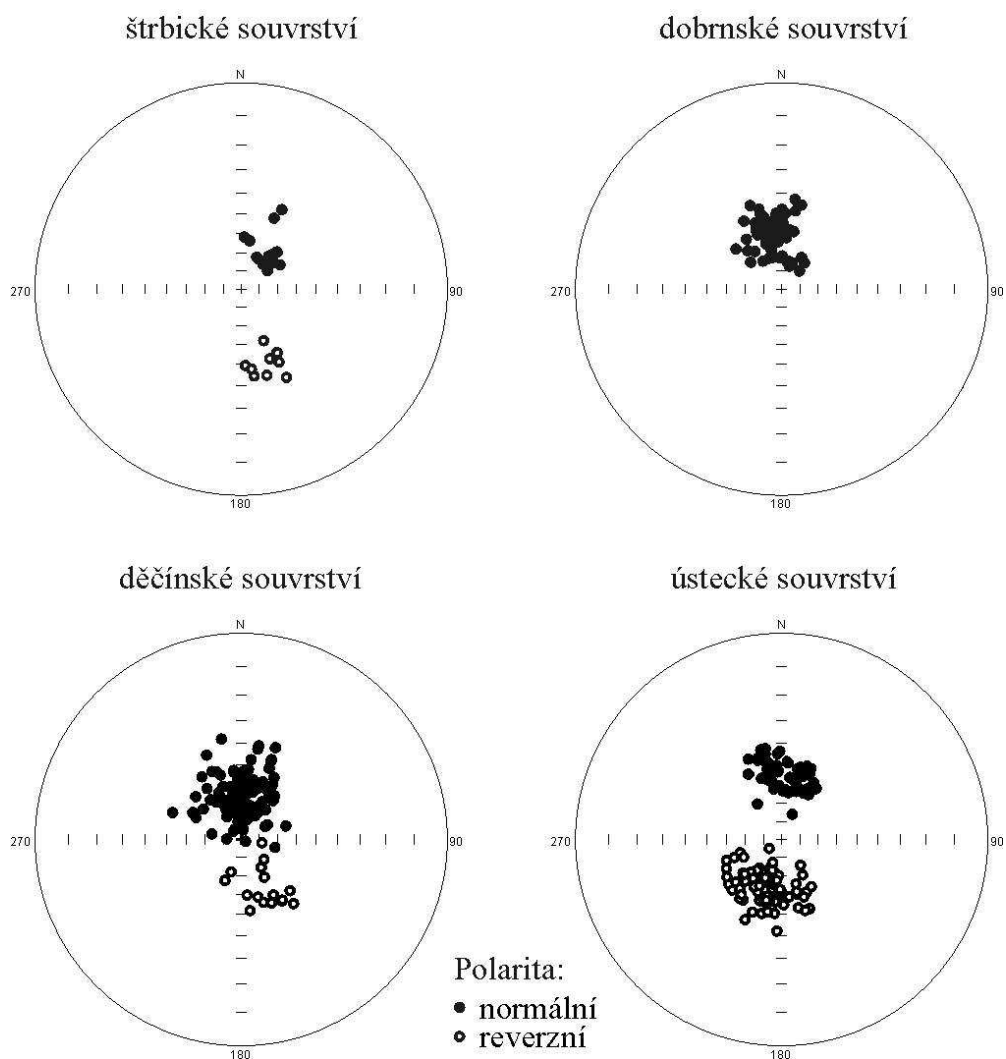
Obě mladší souvrství štrbické a dobrnské zaujímají kratší časové intervaly a představují produkty prostorově rozptýleného solitérního vulkanismu. Také čtyř až pětimilionový interval pro tvorbu těchto souvrství je z pohledu typu vulkanické aktivity relativně dlouhý.



Obr. 10. Časové zařazení litostratigrafických jednotek a porovnání s geopolaritní časovou škálou.

## Štrbické souvrství

Štrbické souvrství má jednu reverzně polarizovanou lokalitu (obr. 11), (láva u Úžína,  $11,36 \pm 0,42$  Ma dle K/Ar), která spadá do geopolaritní chrony C5r.2r. Pro nejmladší lokality Hradištko a Ostrý ( $9,59 \pm 0,36$ ; resp.  $9,61 \pm 0,51$  Ma) připadají v úvahu tři normální chrony C4Ar.1n, C4Ar.2n a C5n.1n; chron C4An a C5n.2n se radiometrické stáří pouze dotýká v okrajích svého intervalu. Délky časových intervalů výše specifikovaných chron také lépe odpovídají vulkanologické představě o vývoji strombolského typu vulkánu. Vulkanický aparát Pohradické hory s normální polaritou ( $13,0 \pm 1,1$  Ma) díky velkému rozptylu K/Ar datování neumožňuje bližší specifikaci, protože se mohl vytvořit během kterékoliv sedmi normálních chron.



Obr. 11. Stereografické projekce paleomagnetických směrů z vulkanitů v jednotlivých souvrstvích Českého středohoří.

## **Dobrnské souvrství**

Dobrnské souvrství je jako celek paleomagneticky pouze normální. Asi pět milionů let dlouhý interval vyplývající ze součtu jedenácti radiometrických údajů odpovídá třinácti normálním chronám o délce asi do 200 ka, s výjimkou nejmladší z nich, opět lépe korespondují s vulkanologickými představami. Výsledky složkové analýzy a skupinové statistiky dvou extrémních lokalit Stříbrník a Hradištko (rozdíl úhlu vektorů  $18,8^\circ$ ) s velkou pravděpodobností dokládají možnost vzniku jednotlivých vulkánů tohoto souvrství během kterékoliv z normálních polarit celého časového intervalu plynoucího z radiometrických dat.

## **Děčínské souvrství**

Děčínské souvrství má jedinou reverzně polarizovanou lokalitu povrchových produktů na Dobrance, kde stejnou charakteristiku vykazují oba odkryté lávové proudy. Zároveň je to dle K/Ar dat jedna z nejstarších lokalit tohoto souvrství ( $31,2 \pm 1,2$  Ma). Velmi podobné stáří a též primární reverzní polarizaci má i intruzivní hornina od Roztok (monzodiorit 30,8 a 32,7 Ma; resp. 32,7 – 29,4 Ma) z vulkanického centra Českého středohoří. V obou případech se jako nepravděpodobnější možnosti tvorby těchto hornin jeví jedna z reverzně polarizovaných chron C11r nebo C12r za předpokladu spolehlivosti takto vysokého stáří. Ostatní lokality děčínského souvrství jsou normálně polarizované a spadají do širokého intervalu 32,5 – 23,6 Ma (díky značnému rozptylu způsobenému analytickými chybami měření). V tomto období se vyskytuje 11 normálních chron, z nichž C9n je vzhledem k nejvyšší koincidenci se středy intervalů K/Ar dat nejpravděpodobnější. Výsledky složkové analýzy v případě reverzně polarizovaných hornin vypovídají o úzkém časovém sepětí, zatímco horniny s normální polaritou se pravděpodobně tvořily ve více časových úsecích.

## **Ústecké souvrství**

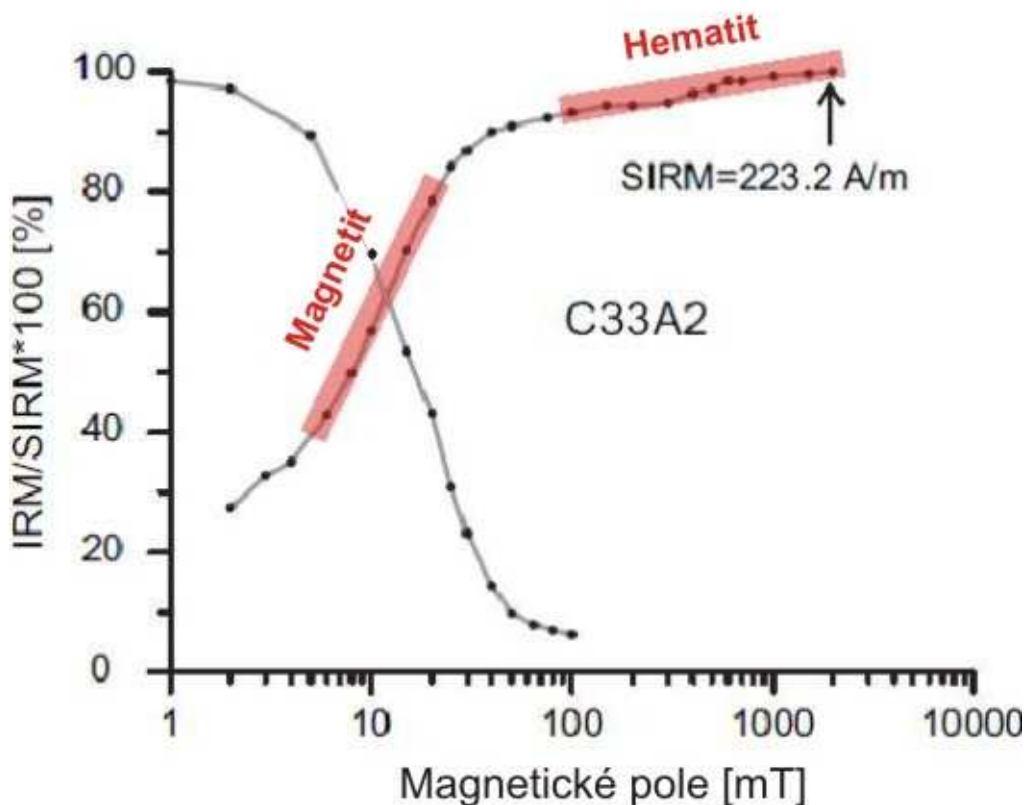
Ústecké souvrství má jako jediné převahu reverzně magnetovaných lokalit, zároveň je nejbohatší na radiometrické údaje. Výsledky paleomagnetických studií jsou

v případě tohoto souvrství nejzajímavější. Horniny reverzně magnetované se jeví jako mladší v intervalu 29,5 – 25,6 Ma, kde se vyskytují tři větší reverzně polarizované chrony C8r (26,7 – 26,2 Ma), C9r (28,2 – 27,8 Ma) a C10r (29,5 – 28,7 Ma). Horniny normálně magnetované pak vykazují vyšší stáří v intervalu 37,7 – 29,5 Ma, kde lze nalézt 10 normálně magnetovaných chron. Středová hodnota tohoto intervalu (33,6 Ma) odpovídá středu chrony C13n, avšak nejvyšší počet K/Ar dat se kumuluje poblíž mladší chrony C12n (31,1 – 30,6 Ma). Tato fakta pak nabývají na důležitosti v souvislosti s výsledky složkové analýzy a skupinové statistiky, kde je malý rozptyl naměřených dat, z čehož vyplývá velmi úzká časová souvislost pro skupinu hornin normálních, respektive pro horniny reverzně polarizované. Ústecké souvrství by tedy mohlo sestávat ze dvou dílčích jednotek - nelze vyloučit, že se jedná o dvě samostatné a relativně krátké vulkanické epizody, podobně jako na Bruntálsku či Jičínsku, ale v mnohem větším rozsahu. Pokud by tomu tak skutečně bylo, naskýtala by se možnost nejstarší vulkanismus ještě dále dělit.

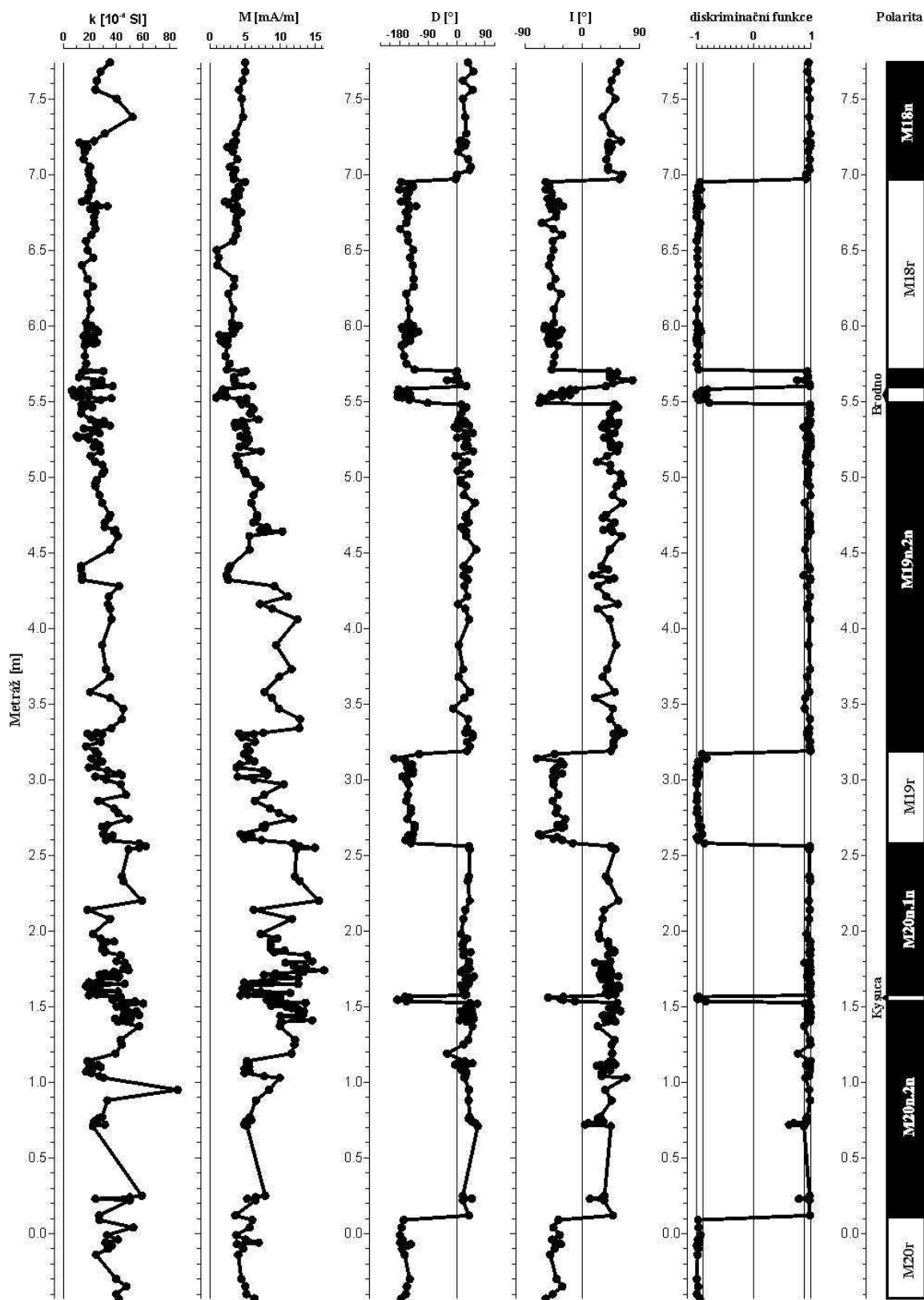
## 5. Rockmagnetismus a magnetostratigrafie na hranici jura/křída

### 5.1. Magnetostratigrafie s vysokým rozlišením hraničního intervalu jura/křída na lokalitě Puerto Escaño

Práce shrnuje magnetostratigrafický a biostratigrafický výzkum hraničního intervalu titon/berrias (J/K) na lokalitě Puerto Escaño v j. Španělsku. Jedná se o dílčí výsledek vedoucí k hlavnímu cíli, což je srovnání biostratigrafických zón mezi tethydní a boreální oblastí, zatím jako jediná vhodná korelační metoda globálního charakteru se jeví magnetostratigrafie s vysokým rozlišením. Na studovaném profilu byl magneto-stratigraficky měřen 8.1 m mocný sled karbonátů nejvyššího titonu a nejspodnějšího berriasu s krokem 3 cm. Analýzou akviziční křivky izotermální remanentní magnetizace (IRM) byl identifikován magnetit a hematit jako hlavní nositel remanentní magnetizace (obr. 12).



Obr. 12. Akviziční a demagnetizační křivky IRM dokládají přítomnost magnetitu a hematitu. Přítomnost těchto minerálů je také potvrzena blokujícími teplotami v rozmezí 300° až 540° C a kolem 680° C, které jsou zjištěny při tepelné demagnetizaci.



Obr. 13. Hlavní paleomagnetické parametry: MS ( $k$ ), NRM ( $M$ ), magnetická deklinace, inklinace a z nich vypočtená diskriminační funkce. Polarita normální - černá, reverzní - bílá.

Při tepelné demagnetizaci byly identifikovány 3 hlavní složky remanentní magnetizace. Nejstabilnější složka má blokující teplotu 300 – 540° C. Na této složce byl proveden tzv. reversal test, úhel  $\gamma_c$  je 1,9 takže získává ohodnocení A (*McFadden a McElhinny 1990*). Zjištěné polaritní zóny jsou jednoznačně přiřaditelné k GPTS (*Gradstein et al. 2004*). Tento fakt společně s výsledky z reversal testu potvrzuje, že se jedná o primární složku. Na měřeném profilu byly identifikovány magnetozóny M20r až M18n, včetně subzón M20n.1r a M19n.1r (obr. 13.) Sedimentační rychlost vypočtená na základě doby trvání identifikovaných magnetozón je v rozmezí 1 až 5 mm za tisíc let. Podrobná biostratigrafie založená převážně na kalpionelách byla porovnána s geomagnetickou škálou. Báze standartní kalpionelové zóny, dříve (ještě v době vydání publikace) přijímaná jako hranice J/K byla nalezena v magnetozóně M19n v 35 % její mocnosti.

Magnetit, jako hlavní nositel remanentní magnetizace v karbonátech, má oproti titanomagnetitům ve vulkanických horninách vyšší Curieovu teplotu a jeho MS je nezávislá na poli v indukční cívce. Pomocí postupného sycení isothermální remanentní magnetizace (IRM) v polích až do 2 T byl také identifikován hematit, jehož existence byla potvrzena i pomocí blokující teploty kolem 680° C. Relativní množství těchto minerálů bylo kvantifikováno komponentovou analýzou akvizitních křivek IRM (*Kruiver et al. 2001*). Jednotlivé minerály jsou charakterizovány hodnotou B1/2, což je pole kdy je tento minerál namagnetován přesně na polovinu. Magnetit v těchto horninách má hodnotu B1/2 mezi 8 a 12.5 mT a je zastoupen 70 až 93 % celkové magnetizace. Naproti tomu hematit má B1/2 v rozmezí 63 a 630 mT a je zastoupen 7 až 30 %. Ačkoli magnetit je hlavní nositel remanentní magnetizace, fyzicky je v hornině více hematitu. Je to dáno tím, že saturační magnetizace magnetitu je skoro 1 000x vyšší než hematitu.

---

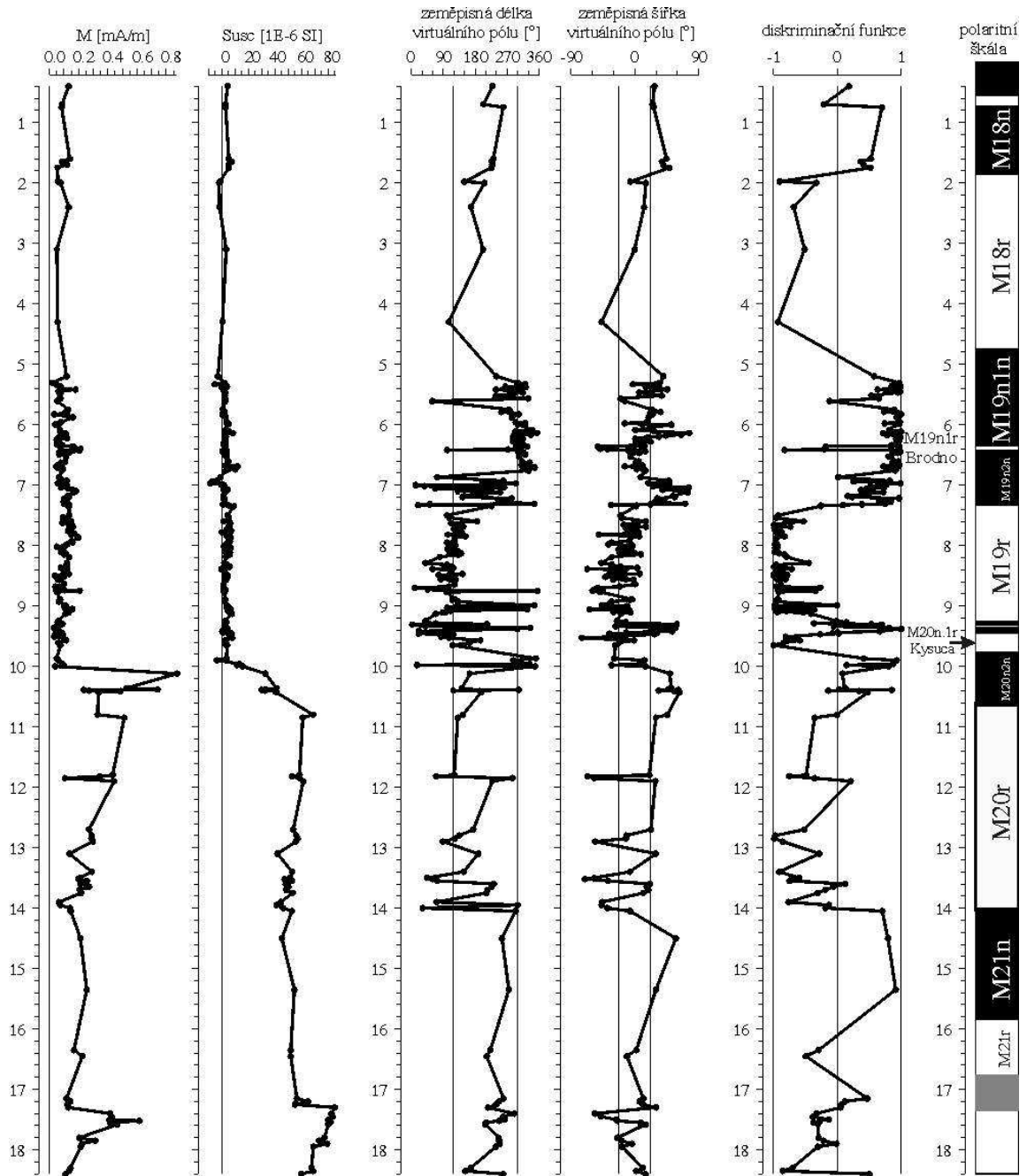
Na této publikaci jsem se podílel jako člen rozsáhlého paleomagnetického týmu, ve kterém jsem byl zodpovědný o veškerá magnetomineralogická měření a zpracování. Pruner P., Houša V., Olóriz F., Košťák M., Krs M., Man O., Schnabl P., Venhodová D., Tavera J.M., Mazuch M., 2010. High-resolution magnetostratigraphy and biostratigraphic zonation of the Jurassic/Cretaceous boundary strata in the Puerto Escaño section (southern Spain), *Cretaceous Research*, 31, 2, 192-206

## 5.2. Rockmagnetismus a magnetostratigrafie hraničního intervalu jura/křída na lokalitě Nutzhof

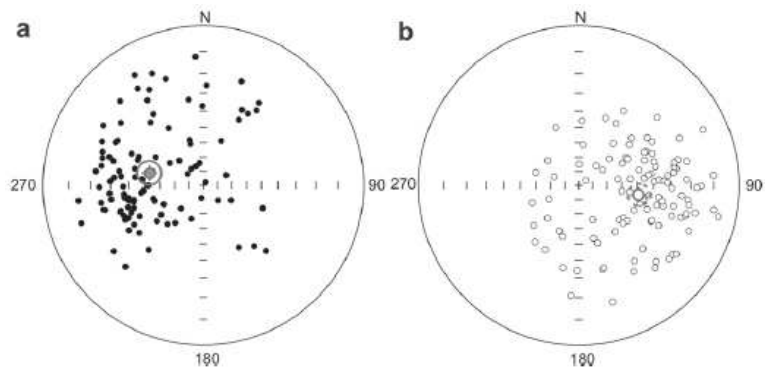
Hlavním cílem publikace je výzkum hemipelagických sedimentů z hranice J/K v grestenském bradlovém pásmu (Dolní Rakousko). Jeden z nejlepších výchozů J/K hranice je bradlo tektonicky zapracované do flyšových sedimentů, které se nachází u obce Nutzhof. Detailní biostratigrafie byla korelována na základě amonitů, belemnitů, krinoidů a kalpionel s GRS, izotopickým a paleomagnetickým záznamem. Ačkoli vzorky pro magnetostratigrafický výzkum nebyly odebírány kontinuálně v celém profilu, podařilo se identifikovat dvě reverzně polarizované magnetické subzóny Brodno a Kysuca. Stratigrafický rozsah je M17r–M21r, což odpovídá stáří 150 – 143 Ma (obr. 14) (*Gradstein et al. 2004*). Střední paleomagnetické směry pro vzorky s normální a reverzní polaritou vyhoví tzv. reversal testu, což dokládá že, přestože studovaný horninový sled je překocný, a rotovaný kolem vertikální osy (obr. 15), hornina nebyla přemagnetována a je v ní stále obsažen primární záznam.

Studium hlavních rock magnetických parametrů IRM akvizice a blokující teploty prokázalo, že hlavními nositeli magnetizace je magnetit a goethit (obr. 16). Tím se ukázalo, že v tomto případě byla vhodnější tepelná demagnetizace než demagnetizace střídavým polem. Magnetická susceptibilita i NRM je nižší v mladších vrstvách než ve starších. Při porovnání MS a NRM s litologií bylo jednoznačně doloženo že jak MS, tak NRM souvisí s terigenním přínosem a mikroturbidity, což se liší od hranice silur/devon v Pražském synklinoriu.



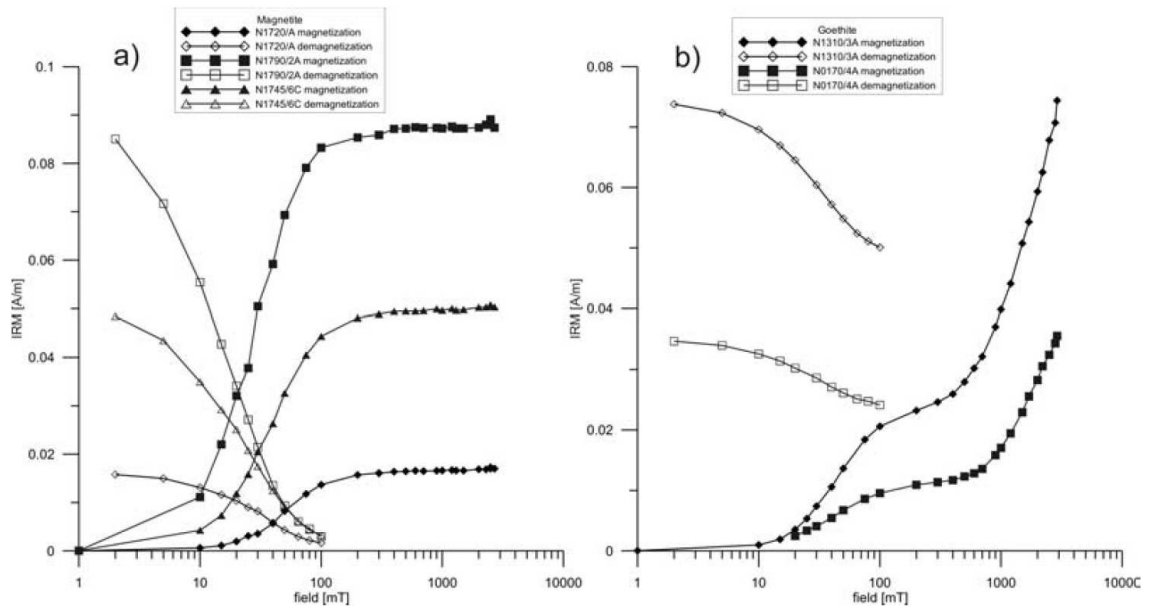


Obr.14. Hlavní paleomagnetické parametry:  $MS(k)$ ,  $NRM(M)$ , zeměpisná šířka a délka virtuálního magnetického paleopólu a diskriminační funkce. Polarita normální - černá, reverzní - bílá, nejistá - šedá.



Obr. 15. Paleomagnetické směry dokládají rotaci 79° proti směru hodinových ručiček.

a) s normální b) s reverzní polaritou



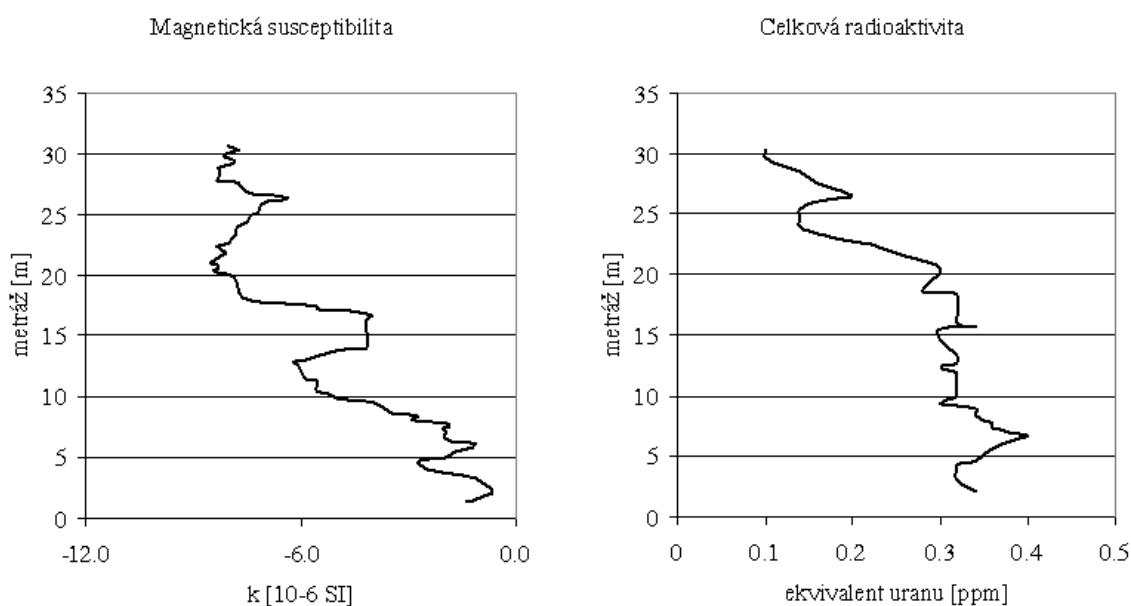
Obr. 16. Křivky akvizice IRM a následné demagnetizace pro a) vzorky obsahující magnetit, b) vzorky obsahující goethit a nepatrné množství magnetitu.

Práce byla publikována v článku: Lukeneder A., Halasova E., Kroh A., Mayrhofer S., Pruner P., Rehakova D., Schnabl P., Sprovieri M., Wagneich M., 2010. High resolution stratigraphy of the Jurassic-Cretaceous boundary interval in the Gresten Klippenbelt (Austria), *Geologica Carpathica* 61, 5, 365 – 381

### 5.3. Magnetostratigrafie hraničního intervalu J/K na lokalitě Le Chouet

Na francouzské lokalitě Le Chouet se nachází vrstevné vápence s lavicemi o mocnostech od 10 cm do 1,5 m. Převládají zde pelagické a hemipelagické mikritické vápence, které jsou na několika úrovních proloženy vrstvou intrapánevní brekcie s klasty pocházejícími z karbonátových plošin cca 40 km severně. Celá oblast je bohatá na amonity a calpionelly takže je velice dobře zpracovaná biostratigraficky. Z 30 m mocného profilu byly odebrány orientované vzorky přibližně po 30 cm.

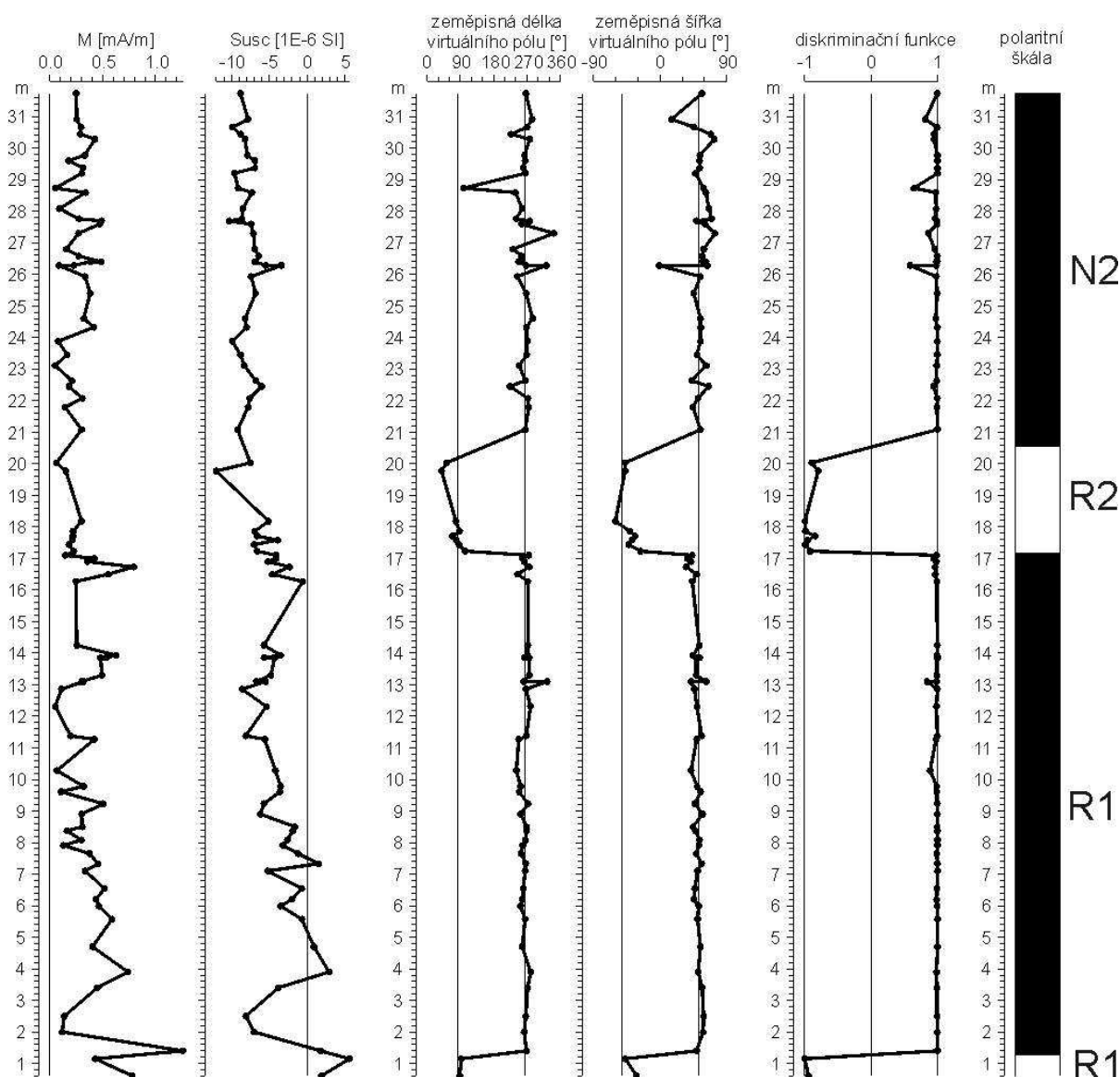
Průměrná hodnota magnetické susceptibility je  $-5,5 \times 10^{-6} \text{SI}$  a přirozená remanentní magnetizace 0,274 mA/m je tak slabá že je možné vzorky měřit jen v kryogenním magnetometru. Na očištěném výchozu byla měřena radioaktivita gamaspektrometrem Geofyzika-SatisGeo GS-512. Velikost MS, remanentní magnetizace i celkové radioaktivity je závislá na přínosu terigenního materiálu a stejně jako u většiny dalších profilů s hranicí jura/křída klesá do nadloží (obr. 17).



Obr. 17. Generelní trend magnetické susceptibility a celkové radioaktivity byl získán zprůměrováním naměřených hodnot pomocí klouzavého okna s 9 (MS) respektive 5 (GRS) měřeními.

Většina vzorků byla demagnetována tepelně v tepelném demagnetizátoru MAVACS, ostatní střídavě přístrojem LDA-3. Z magnetomineralogického hlediska převládá magnetit, ale nachází se zde i poměrně velké množství sekundárního goethitu a hematitu, který má vysokou koercivitu a jehož Curiova teplota je 120° C, respektive

680° C, takže je vhodnější použít demagnetizaci tepelnou než střídavou. Byly identifikovány 3 paleomagnetické složky kde nejstabilnější z nich je primární, ta se získala v rozmezí teplot 400 – 520° C respektive 20 – 60 mT. Byly zde identifikovány dvě normálně a dvě reverzně polarizované zóny (obr. 18). Střední směry ze vzorků s normální magnetizací  $D=318^\circ$   $I=48^\circ$   $\alpha_{95}=2,5^\circ$  a s reverzní polaritou  $D=153^\circ$   $I=-42^\circ$   $\alpha_{95}=11^\circ$  svírají úhel  $168^\circ$ , což se v rámci statistické chyby sice blíží  $180^\circ$ , avšak reversal test je negativní protože není dostatečné množství reverzně polarizovaných vzorků.



Obr. 18. Hlavní paleomagnetické parametry: MS (k), NRM (M), zeměpisná šířka a délka virtuálního magnetického paleopólu a diskriminační funkce. Polarita normální- černá, reverzní-bílá.

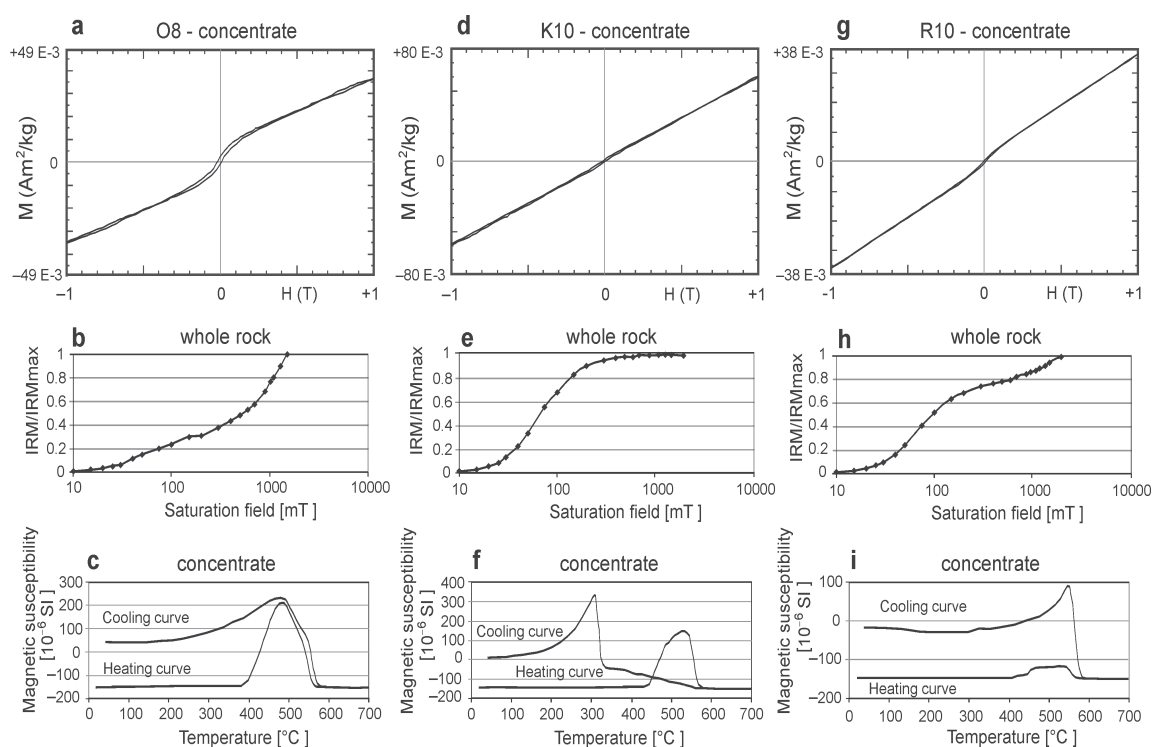
## **6. Rockmagnetismus a magnetická susceptibilita paleozoických hornin**

### **6.1. Magnetosusceptibilitní korelace na hranici silur/devon v pražském synklinoriu**

Magnetická susceptibilita je v poslední době používána jako významné korelační proxy. *Crick et al. (2001)* porovnává S/D hranici na Klonku s profily v Marockém Antiatlasu a v současné době probíhá projekt IGCP 580, který se zabývá magnetosusceptibilitními korelacemi v paleozoiku. Cílem tohoto článku je zjistit, jak se chová magnetická susceptibilita a gamaspektrometrie (GRS) v jediné sedimentační pánvi. Porovnávali jsme 8 profilů na hranici S/D v hlubokomořském a mělkomořském sedimentačním prostředí. Mělkovodní prostředí obsahuje hluboký subtidál až svrchní část kontinentálního svahu, zatímco hlubokomořské profily pochází z hranice kontinentálního svahu a pánevního dna i distálních částí pánve. Stratigrafické porovnání těchto dvou prostředí je velice obtížné díky tomu že sedimentační sekvence obsahují velké množství jemnozrnných kalciturbiditů a hiátů. MS a GRS spolu s detailní sedimentologií byla použita pro zjištění sedimentačního prostředí. K prokázání, že MS nezávisí na množství magnetitu, ale především na obsahu paramagnetických minerálů bylo zapotřebí zjistit magnetomineralogické složení hornin. Vrstvy blízko nad hranicí S/D ukazují nárůst MS, ale slabou radioaktivitu, což je velice nezvyklý jev. Pomocí sedimentárních struktur to lze vysvětlit jako přínos terigenního magnetického materiálu během krátkodobého změlčení. V hlubokomořském prostředí jsou v nejsvrchnějším siluru zvýšeny hodnoty MS i GRS. Je to způsobeno přínosem recyklovaného sedimentu během pozdně přídolské regrese. Bazální devonské sedimenty přes několik krátkodobých epizod poklesu hladiny vykazují postupné prohlubování. Změny hladiny jsou pravděpodobně způsobeny vertikálními pohyby podél synsedimentárních zlomů spíše než eustatickými změnami mořské hladiny.

Při sycení IRM byla zjištěna přítomnost magnetitu či hematitu a goethitu (obr. 19). Při srovnání výsledků z komponentové analýzy akvizčních křivek izotermální remanentní magnetizace s MS byla prokázána slabá negativní korelace mezi množstvím magnetitu a velikostí MS. To znamená, že zvýšené hodnoty MS jsou způsobeny především paramagnetickými minerály a pravděpodobně i hematitem.

Při zjišťování závislosti MS na teplotě byla na některých vzorcích zjištěna přítomnost síry, která se vyznačuje vznikem pyrrhotinu při teplotách nad 580° C.



Obr. 19. Termomagnetické a hysterezní chování 3 minerálních koncentrátů získaných rozpouštěním v kyselině octové a křivky akvizice IRM na celé hornině.

**Vzorek O8 Opatřilka** Hysterezní křivka **a)** vykazuje paramagnetické a ferromagnetické chování, což je v souladu s akviziční křivkou IRM **b)** kdy  $B_{1/2} = 1071$  mT je typická hodnota pro goethit s vysokou koercivitou. Průběh MS za teploty **c)** indikuje vznik magnetitu mezi 400 a 500° C. Curiova teplota tohoto novotvořeného magnetitu je 560° C.

**Vzorek K10 z Karlštejna:** Hysterezní křivka **d)** vykazuje jenom paramagnetické chování, přesto akviziční křivka IRM **e)** dokládá malé množství minerálu s nízkou až střední koercivitou pravděpodobně magnetit či hematit ( $B_{1/2} = 72$  mT). Teplotní variace MS **f)** ukazuje vznik magnetitu mezi 450 a 570° C jehož  $T_C = 570^\circ$  C. Během dalšího zvyšování teploty se tvoří pyrrhotin s  $T_C = 320^\circ$  C

**Vzorek R10 z Radotína:** Hysterezní křivka **g)** ukazuje paramagnetické chování s nepatrným náznakem ferromagnetického materiálu. Naproti tomu akviziční křivka IRM **h)** dokládá dva odlišné magnetické minerály magnetit či hematit ( $B_{1/2} = 70$  mT) a goethit ( $B_{1/2} = 2041$  mT). Růst MS během pečení nad 40° C **i)** je způsoben novotvořeným magnetitem o  $T_C = 560^\circ$  C. Během dalšího zahřívání se tvoří čistý magnetit s  $T_C = 580^\circ$  C.

U sedimentů hraničního intervalu S/D je mnohem menší vztah mezi MS alitologií, než u hornin na hranici J/K. Vzhledem k tomu, že v žádném studovaném vzorku nebyla prokázána závislost MS na poli v indukční cívce, přestože v relativní blízkosti probíhala vulkanická činnost, začal jsem studovat i karbonáty s příměsí vulkanického materiálu a silurské tufy. Závislost MS na poli totiž dokládá množství titanu v krystalické mřížce titanomagnetitu (*Vahle C. a Kontry A. 2005, Schnabl et al. 2010*). Absolutně všechny vzorky (včetně tufů) měly MS nezávislou na poli, tím bylo prokázáno, že při zvětrávání, transportu či ukládání vulkanického materiálu se veškerý původní magnetit degraduje a vyloučí se z něj veškerá titanová příměs.

---

Vacek F., Hladil J., Schnabl P., 2010. Stratigraphic correlation potential of magnetic susceptibility and gamma-ray spectrometric variations in calciturbiditic facies (Silurian-Devonian boundary, Prague Synclinorium, Czech Republic) *Geologica Carpathica*: 61, 4, 257 – 272.

## 6.2. Paleomagnetismus devonských hornin pražského synklinoria

Tyto paleogeografické rekonstrukce jsou podepřeny především paleomagnetickým výzkumem pelagických i útesových vápenců stupně prag. Celá oblast je slabě varisky deformovaná. Přestože si studované horniny zachovávají primární magnetickou remanentní magnetizaci z dob sedimentace, tak mohou být slabě namagnetovány během variského vrásnění, případně i později díky mezozoickému tropickému zvětrávání, které působilo několik desítek miliónů let (*Caraccioloa et al. 2011, Danišík et al. 2012*). Většina vzorků byla demagnetována ve velice přesném tepelném demagnetizátoru Mavacs aby se vyloučil vliv goethitu.

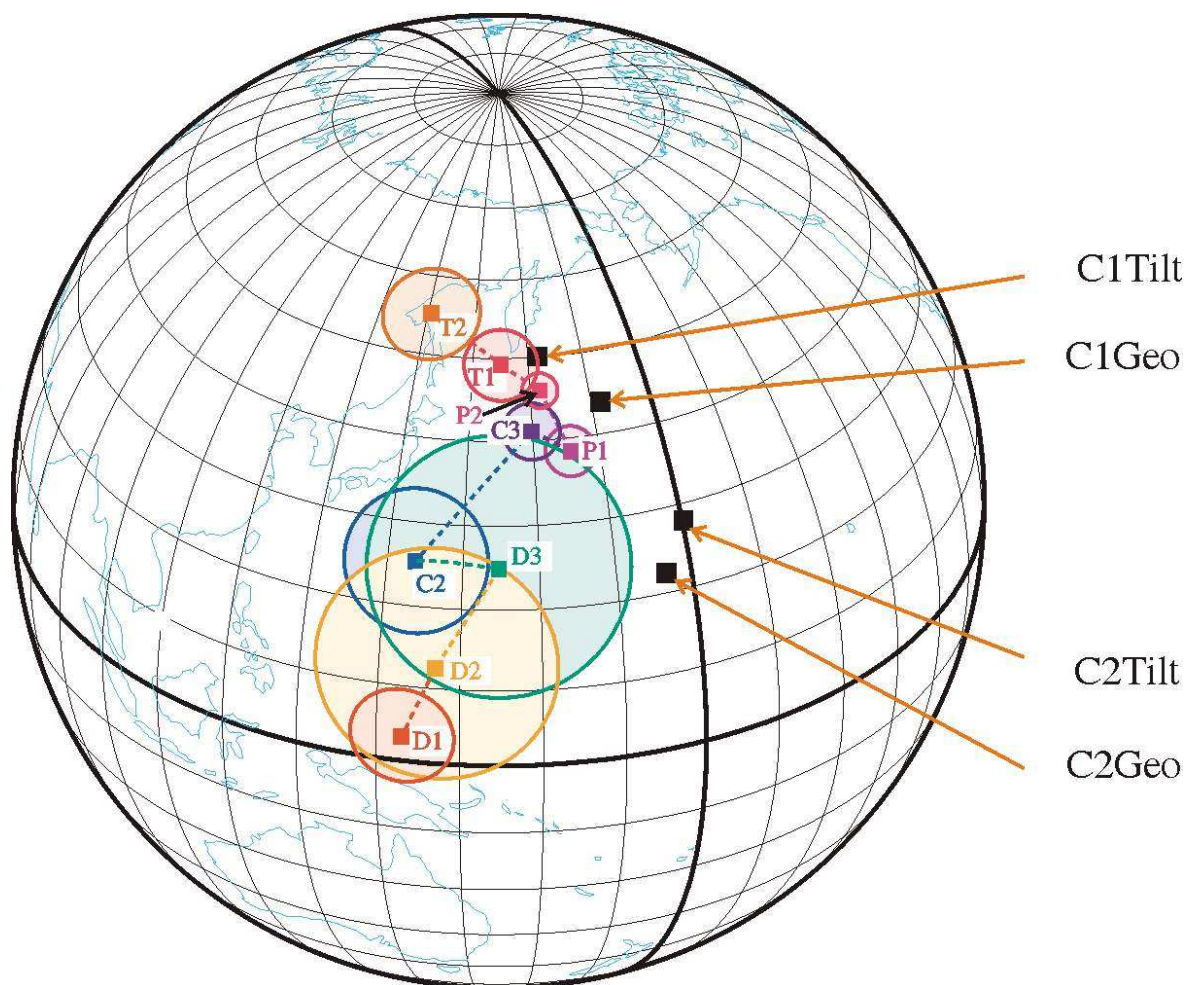
Na lokalitě Kuchařík byl proveden fold test, který dopadl negativně, protože vzorky byly magneticky velice slabé a navíc studované horniny původně obsahovaly pyrit, z čehož vyplývá, že mohly být částečně remagnetované. Při teplotě 350 – 400° C remanentní magnetizace již nebyla měřitelná ani v kryogenním magnetometru. Z testu se dá soudit, že tato magnetická složka ( $D_{\text{geo}}=182^\circ$ ,  $I_{\text{geo}}=19^\circ$   $\alpha_{95}=10^\circ$ ) s blokující teplotou 350 – 400° C je sice pozdně variská či dokonce povariská, ale stále pochází z doby, kdy byl Český masiv ještě na jižní polokouli. Významným problémem je absence normální polarit, díky čemuž není možné ověřit spolehlivost měření pomocí tzv. reversal testu, tak jako u vápenců z hraničního intervalu jura/křída.

Na většině lokalit je možno identifikovat velice stabilní magnetickou složku ( $D_{\text{tilt}}=192^\circ$ ,  $I_{\text{tilt}}=-19^\circ$ ) s blokující teplotou až 680° C, v literatuře je interpretována jako primární (*Mauritsch a Pruner 1990, Krs a Pruner 1995, Tait et al. 1995, Krs et al. 2001*). Tato složka je na obrázku 20. označena C1 a shodou okolností odpovídá permským až triasovým směrům stabilní Evropy, nicméně ve většině světové literatury je tento směr vysvětlován rotací celého Barrandienu o 180°. Hlavním nositelem této složky je hematit.

Druhá složka ( $D_{\text{tilt}}=200^\circ$ ,  $I_{\text{tilt}}=29^\circ$ ) byla identifikována pouze na třetině lokalit, nejlépe se zachovala v narůžovělé mikritické výplni stromataktů v čistých útesových koněpruských vápencích. Tato složka je nesena magnetitem a pochází z doby, kdy studovaná oblast byla na jižní polokouli, avšak (pokud je C1 primární komponentou) nutně až po dříve zmiňované rotaci. Na obrázku 20 je značena C2.



Z polohy virtuálního paleopólu vůči křivce zdánlivého putování pólů je zřejmé, že existuje ještě alternativní vysvětlení. Žádnými dostupnými paleomagnetickými, ani rockmagnetickými metodami však prozatím nelze na studovaném materiálu jednoznačně dokázat, zda je složka C1 skutečně primární. Tento problém je možné řešit při studiu paleozoických diabasů.

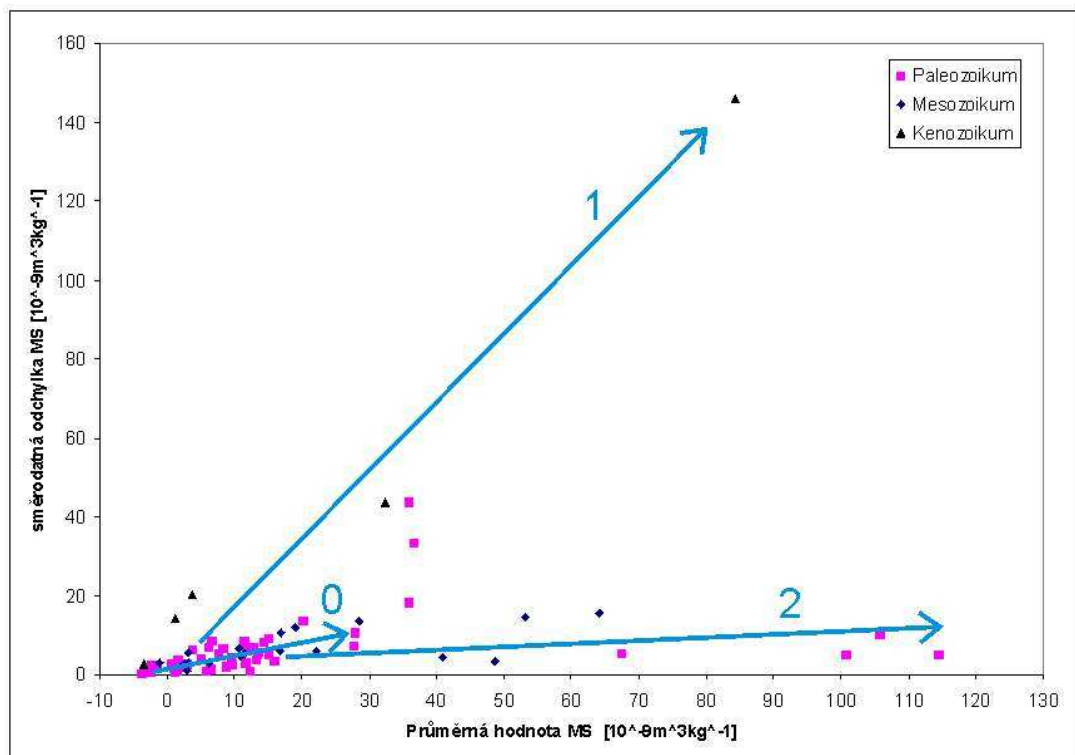


Obr. 20. Projekce virtuálních paleopólů pro spodnodevonské vápence Pražského synklinoria vykreslená společně s křivkou zdánlivého putování pólů vypočtenou pro stabilní Evropu. Virtuální paleopóly jsou spočteny ze složek C1 a C2.

### 6.3. Statistické zhodnocení MS u paleozoických, mesozoických a kenozoických vápenců

V průhonické laboratoři byly změřeny stovky lokalit na paleomagnetický, magnetostratigrafický a magnetosusceptibilitní výzkum karbonátových sledů z celého světa. V celkové databázi je přes 5000 hodnot jednotlivých měření MS. Zhruba  $\frac{3}{4}$  databáze pochází z lokalit paleozoického,  $\frac{1}{4}$  mesozoického a  $\frac{1}{20}$  kenozoického stáří (Šlechta *et al.* 2010). Většina paleozoických hornin patří k rheicko-rýnské zóně, mesozoické horniny patří do tethydní oblasti a kenozoické sedimenty pochází z Baham. Otázka zní, zda v tomto rozsáhlém souboru dat lze vypořádat trendy či závislosti.

Jednotlivé lokality s desítkami až stovkami měření MS jsou zakresleny do grafu (obr. 21), kde na vodorovné ose je znázorněna průměrná hodnota MS a na vertikální její rozptyl. Na první pohled chaotický shluk bodů lze, při znalosti magnetomineralogického a sedimentologického popisu jednotlivých lokalit, snadno interpretovat. K interpretaci přispěl svými znalostmi J. Hladil a na základě této kompilační práce jsme prosadily založení světové MS databáze při IGCP 580.



Obr. 21. Graf zobrazuje závislost rozptyl MS na její průměrné hodnotě. Jednotlivé trendy jsou popsány a interpretovány v textu.

### ***Interpretace hlavních trendů v obrázku 21***

*0 Většina karbonátů vykazuje velice nízké hodnoty průměrné MS i jejího rozptylu. Jedná se především o kalciturbidity ovlivněné především paramagnetickou nekarbonátovou příměsí.*

*1 Mělkovodní útesové facie a svahové sedimenty mají nízkou MS a veliký rozptyl, který je dán patrně tvorbou diagenetického hematitu. Tomuto trendu odpovídají koněpruské vápence v, josefovské vápence na Moravě a karbonátové sedimenty z Baham.*

*2 Má velkou průměrnou MS, ale malý rozptyl. Zde převládají pelagické karbonáty, z lokalit sem spadají řeporyjské a jedovnické vápence i sedimenty a část mesozoických hornin. Tyto horniny obsahují diagenetické pyrrhotiny, hematity, magnetity a goethity.*

## **6.4. Magnetické skenování a interpretace paleomagnetických dat z vulkanitů pražského synklinoria**

Paleomagnetická data získaná z 28 silurských lávových proudů a žil bazaltového složení ukázala že se v pražském synklinoriu vyskytují lokality stejného stáří jak se zápornou tak s kladnou magnetickou inklinací. Podle dostupné literatury *Krs et al. (2001)*, *Aifa et al. (2007)* má primární složka inklinaci zápornou. Podle *Blechy (1976, 1979)* došlo na mnoha žilách ke značným rekrystalizacím titanomagnetitů. Proto cílem této práce bylo na základě magnetomineralogie s mikroskopickou rozlišovací schopností určit hlavní nositele magnetizace a jejich rozmístění.

Při srovnání snímků získaných magnetickým skenováním horninových výbrusů s fotografiemi z optického mikroskopu byly zjištěny tři typy magnetických textur.

1. textura: Většina magnetického signálu je lokalizovaná v amygdalách, které vznikly vyplněním vesikul během zanoření spolu s celým vulkanosedimentárním sledem.

2. textura: Některé horniny obsahují velká magnetická zrna, která obsahují viskózní magnetizaci.

3. textura: Poslední skupina hornin si zachovala primární magnetické vlastnosti výlevných hornin a zde se také pravděpodobně zachovaly primární paleomagnetické směry.

### **Si7 - Lokalita Lištice v zářezu cyklostezky vedoucí podél Berounky - výlev, Ludlow**

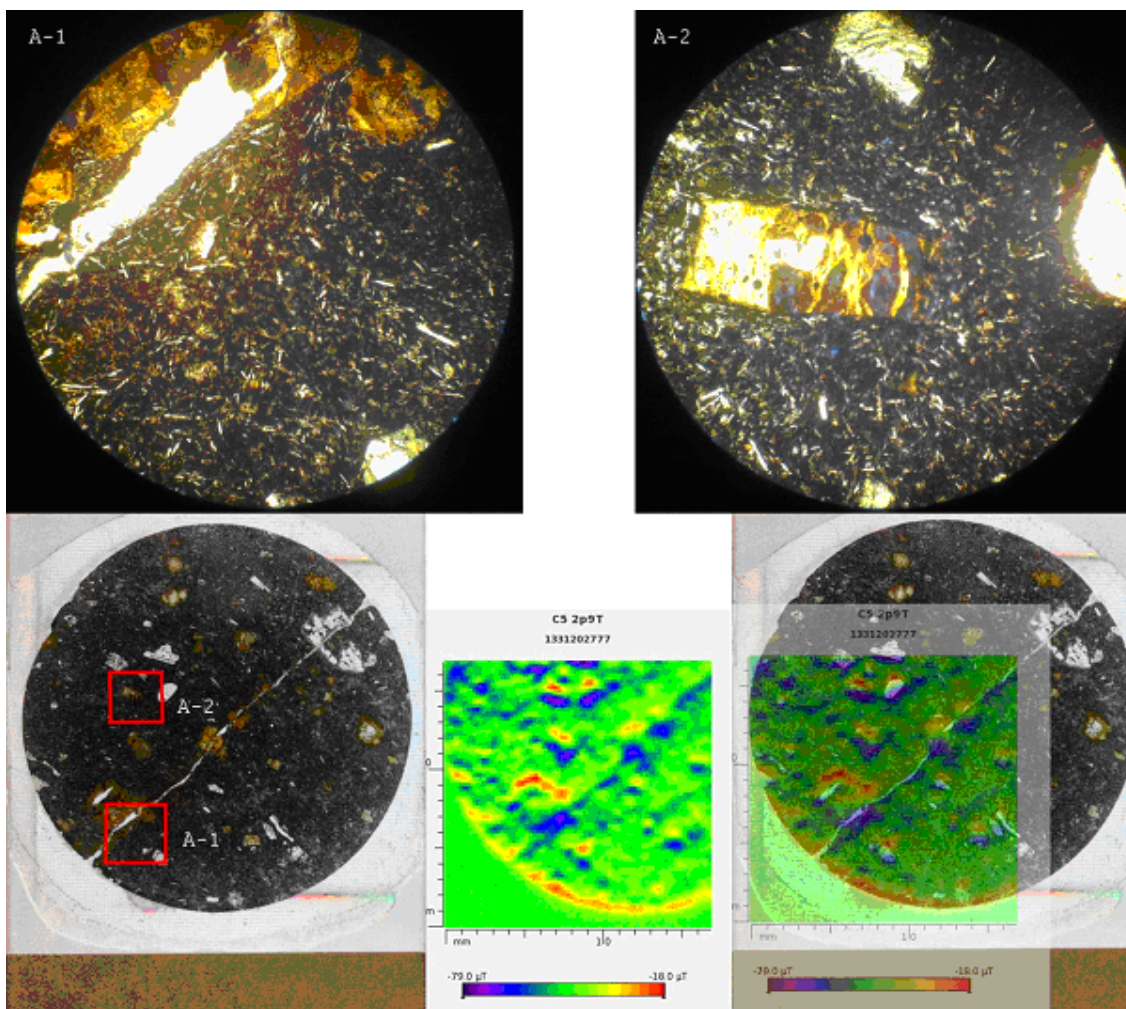
Magnetické snímky obsahují anomálie eliptického tvaru, které 0,1 mm nad povrchem výbrusu dosahují intenzity magnetického pole 22  $\mu\text{T}$ . Pomocí polarizačního mikroskopu byly identifikovány četné amygdaly což jsou původní magmatické vesikuly se stěnami druhotně potaženými oxidy železa. Zbytek horniny neobsahuje významný magnetický signál.

### C5 - Černidla - výlev, Wenlock

Vzorek z černidel (C5) vyniká výraznou anizotropní stavbou s protaženými anomáliemi seskupenými podél puklin a anomáliemi na krystalech pyroxenu o velikosti 61  $\mu\text{T}$  ve vzdálenosti 0.1 mm nad povrchem výbrusu.

### Si8 - Lištice - lom se skladem stavebního kameniva - intruze do Llandovery

Tato lokalita má nízkou hodnotu NRM:  $J_m=159$  mA/m. Magnetické skeny ukazují osamocené anomálie, které dosahují 1 160  $\mu\text{T}$  ve vzdálenosti 0.1 mm, jsou to tedy nejvíce magnetická zrna ze všech zkoumaných lokalit. Anomálie jsou vázány na oxidy železa o velikosti až 1 mm.



Obr. 22. Snímek horninového výbrusu z lokality Černidla (vlevo dole), magnetického skenu (dole veprostřed) a jejich kombinaci (vpravo dole). Minerální zrna na která jsou vázány dvě výrazné magnetické anomálie (na výbruse označené červenými čtverci) jsou zvětšeny optickým mikroskopem (nahore).

Vzorek	MS (SI-3)	NRM (A/m)	SIRM (A/m)	Magnetická anomálie ( $\mu\text{T}$ )	Střední demagnetizační pole (mT)	Střední magnetizační pole (mT)
SI7_02A	29,8	0,815	580	22	15	70
C5A	46,8	15,470	980	61	9	30
SI8_03A	9,9	0,159	320	1160	15	50

*Tab. 3. Základní magnetomineralogické vlastnosti měřených vzorků*

Z hlediska stability magnetického signálu i umístění jednotlivých nositelů přirozené remanentní magnetizace (obr. 22) se zdá nejpravděpodobnější že primární komponenta je zachována u vzorku C5A s paleomagnetickými směry  $D_{\text{tilt}}=227^\circ$  a  $I_{\text{tilt}}=-26^\circ$ .

---

Na základě studia silurských bazaltů vznikla metodická studie, která je v recenzním řízení: G. Kletetschka, P. Pruner, P. Schnabl, K. Šifnerová, Z. Tasáryová, Š.Manda Magnetic scanning and interpretation of paleomagnetic data from Prague Synform's volcanics, *Stud. Geoph. et Geodet.*

## 7. Diskuze

### Metodika

Předložená práce ukazuje, že u všech studovaných horninových typů můžeme použít stejné paleomagnetické metody, a to jak demagnetizaci střídavým polem tak teplotou. U bazaltů i diabázů jsou obě metody rovnocenné, ale u karbonátů, které někdy obsahují příměs goethitu, je vhodnější demagnetizace tepelná. Při měření vulkanických hornin nikdy nelze dosáhnout vystředění sekulární variace, a tak nelze použít reversal test.

Z magnetomineralocických měření můžeme u všech studovaných typů hornin použít S-ratio, komponentovou analýzu křivek akvizice IRM, nebo teplotní závislost MS. Komponentová analýza křivek akvizice IRM je zcela univerzální metoda vhodná k určení mineralogického složení nositelů remanentní magnetizace. Magnetické skenování Hallovo sondou dokáže na výbruse identifikovat jednotlivé ferromagnetické krystaly, které následně můžeme identifikovat mikroskopem v odraženém světle či na elektronové mikrosondě. Tato metoda je však vhodná jen pro magneticky silné horniny. MS závislá na poli v indukční cívce je zase vhodná pro horniny kde můžeme očekávat různý obsah Ti v krystalické mřížce titanomagnetitů, takže je s výhodou můžeme použít jen pro studium čedičů či diabasů. Naopak Lowrieova metoda je vhodná k určení nositelů magnetizace u vápenců, které obsahují jak magnetit, tak hematit či goethit. Ke studiu bazaltů se ale nehodí, protože zde převládá pouze titanomagnetit.

Pomocí magnetostratigrafie s vysokou rozlišovací schopností doplněnou o biostratigrafii na hranici J/K lze přesně určit všechny magnetozóny, takže jednotlivé profily jdou přesně korelovat. Jediný nedostatek vidím v poměrně malé přesnosti určení absolutního stáří jednotlivých magnetozón, které je pro toto období určeno s přesností samotné GPTS a to je  $\pm 4$  My (*Ogg et al. 2008*). Na druhou stranu převážná většina kenozoických vulkanitů není biostratigraficky zařazena. Avšak absolutní stáří těchto hornin lze určit K/Ar či Ar/Ar metodou. Při porovnání GPTS (*Gradstein et al. 2004*) (která má v tomto období přesnost  $\pm 0,1$  Ma) s paleomagnetickými a radiometrickými údaji, můžeme stáří těchto hornin více

zpřesnit. Vzhledem k tomu že vulkanity obvykle nemají vystředěnou sekulární variaci, můžeme snadno určit reliktu jednoho lávového tělesa (např. Kozákov a Bruntálsko) či jednotlivé přívody zcela stejného stáří (trosecké souvrství).

Magnetosusceptibilitní korelace jsou vhodné pouze v případě, že není zachována primární paleomagnetická složka. Při použití této metody je nutné dokázat, že hlavními nositeli MS jsou paramagnetické minerály. Dále je vhodné doplnit tuto metodu o gamaspektrometrická data (GRS). V případě že změny MS souvisí se změnou přínosu terigenního materiálu, pak by stejným způsobem mělo být ovlivněno i množství radioaktivního draslíku.

U titanem bohatých vulkanických hornin v oblasti KH bylo zjištěno, že Ti změřený geochemickou analýzou celkové horniny nezávisí na obsahu titanu detekovaném elektronovou mikrosondou analýzou jednotlivých zrn titanomagnetitů či pomocí magnetomineralogických metod. Množství Ti v těchto horninách není závislé na stáří horniny, ale je lokalizováno v ohraničené oblasti. Tyto horniny mají i zvýšené množství titanem bohatých xenolitů, z těchto důvodů lze soudit na asimilaci materiálu z ultrabazického masívu v podloží.

### **Geologické interpretace**

Paleomagnetický výzkum na Jičínsku prokázal dvě vulkanické epizody velmi krátké doby trvání, které jsou časově značně vzdáleny. Dále byly prokázány 300 metrové vertikální pohyby na lužické poruše za posledních 5 Ma. Na Bruntálsku, podobně jako na Jičínsku, probíhala vulkanická aktivita v několika velice krátkých epizodách, avšak zde jsou tyto epizody časově velmi sblíženy.

V mé práci jsem se podílel jako člen Berriassian working group při ICS na odběrech vzorků a zpracování magnetostratigrafických dat u chybějících částí profilu na hranici J/K v Puertu Escañu a zcela nového profilu v Nutzhofu (*Pruner et al. 2010, Lukeneder et al. 2010*). Tyto lokality byly ve spolupráci s mikropalaeontology magnetostratigraficky korelovalovány s dalšími stejně starými profily, jako například Bosso Valey, Brodno, Lokut, Posredne a Nordvik, což je nutností pro definování



hlavních kritérií k určení hranice J/K a následné odsouhlasení mezinárodní stratigrafickou komisí.

V silurských horninách Barrandienu se nachází dva převládající směry remanentní magnetizace. První cca  $200^{\circ}/-30^{\circ}$  a druhý cca  $200^{\circ}/30^{\circ}$ , zatím není 100% jisté, která z těchto složek je opravdu primární. Pomocí magnetického skenování Hallovoú sondou, která byla sestrojena podle návrhu G. Kletetschky, je možné shromažďovat potřebná data k rozlišení primárních a sekundárních složek. Pravděpodobnější se zdá, stejně jak uvádí *Mauritsch a Pruner (1990)*, *Krs a Pruner (1995)*, *Tait et al. (1995)*, *Krs et al. (2001)* že primární směr je  $200^{\circ}/-30^{\circ}$ , což znamená, že oblast Barrandienu byla od staršího paleozoika po současnost rotována o  $160^{\circ}$  ve směru hodinových ručiček či  $200^{\circ}$  proti směru. Hlavní rotace proběhla během variského vrásnění.

## 8. Závěr - shrnutí

Předložená práce má tři významné výsledky

- U kenozoického vulkanismu jsem dokázal, že jednotlivé epizody sopečné činnosti jsou mnohem kratší, než se obecně předpokládalo
- Pomocí magnetostratigrafických korelací jsem přispěl ke znalostem o tomto hraničním intervalu. Hranice J/K je poslední hranicí mezi dvěmi stratigrafickými periodami, která zatím není jednoznačně definována mezinárodní stratigrafickou komisí.
- Za použití zcela nezávislé metody (*Kletetschka et al., v recenzním řízení*) a předchozích měření (*Mauritsch a Pruner 1990, Krs a Pruner 1995, Tait et al. 1995, či Krs et al. 2001*) vyplynula velká pravděpodobnost hypotézy o rotaci Barrandienu během variského vrásnění o cca. 200° ve směru (případně 160° proti směru) hodinových ručiček.
- Dvě známé, avšak doposud v průhonické laboratoři nepoužívané metody, jsou nyní zaváděny do praxe, neboť se jeví jako velmi vhodné při studiu hlavních nositelů remanentní magnetizace: Lowrieho metodu a komponentovou analýzu akviziční křivky IRM. Tyto dvě metody doplněné o magnetické skenování Hallovo sondou jsou ideálním magnetomineralogickým doplňkem k paleomagnetickému výzkumu paleozoických hornin.

## Literatura

- Aifa, T., Chadima, M., Pruner, P. a Štorch, P., 2007. Structural evolution of the Prague synform (Czech Republic) during Silurian times: An AMS, rock magnetism, and palomagnetic study of the Svatý Jan pod Skalou dikes. Consequences for the nappes emplacement, *en: Evolution of the Rheic Ocean: from Avalonian-Cadomian active margin to Alleghenian-Variscan collision*, *Geol. Soc. Amer. Special Paper 423*, 249 – 265.
- Blecha V., 1976. Magnetické vlastnosti některých paleozoických diabasů. *Acta Universitatis Carolinae-Geologica*, 4, 323 –335.
- Blecha V., 1979. Magnetické vlastnosti Barrandienských ordovicko-silurských vulkanitů. *Acta Universitatis Carolinae-Geologica*, 1 – 2, 39 – 58.
- Bucha, V., Elznic, A., Horáček, J., Malkovský, M. a Pazderková, A. 1987. Paleomagnetic timing of the Tertiary of the North Bohemian Brown-Coal Basin. *Věstník Ústředního ústavu geologického*, 62(2), 83 – 95.
- Cajz V., 2000. Proposal of lithostratigraphy for the České středohoří Mts. volcanics. *Bull. Czech Geol. Surv.*, 75, 1, 7 – 16.
- Cajz V., Rapprich V., Erban V., Pécskay Z. a Radoň M., 2009. Late Miocene volcanic activity in the České středohoří Mountains, Ohře (Eger) Graben, northern Bohemia. *Geologica Carpathica*, 60, 6, 519 – 533.
- Cajz V., Rapprich V., Schnabl P. a Pécskay Z., 2009. Návrh litostratigrafie neovulkanitů východočeské oblasti (A proposal on lithostratigraphy of Cenozoic volcanic rocks in Eastern Bohemia). – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2008*, 9 – 15.
- Cajz V., Schnabl P., Pécskay Z., Skácelová Z., Venhodová D., Šlechta S. a Šifnerová K., 2012. Chronological implications of paleomagnetic record of the Late Cenozoic volcanic activity in Moravo-Silesian border – NE Bohemian Massif , *Geologica Carpathica* – Přijato do tisku
- Caraccioloa L., Le Peraa E., Mutoa F. & Perrib F., 2011. Sandstone petrology and mudstone geochemistry of the Peruc–Korycany Formation (Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic). *International Geology Review*, 53, 9, 1003 – 1031.

- Clark D. A., 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO J. Austr. Geol. Geophys.*, 17(2), 83 – 103.
- Crick R.E., Ellwood B.B., El Hassani A., Feist R. a Hladil J., 1997. Magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy (MSEC) of the Eifelian-Givetian GSSP and associated boundary sequences in north Africa and Europe. *Episodes*, 20, 3, 167 – 175.
- Crick R.E., Ellwood B.B., Hladil J., El Hassani A., Hroudá F. a Chlupáč I., 2001. Magnetostratigraphy susceptibility of the Přídolian - Lochkovian (Silurian - Devonian) GSSP (Klonk, Czech Republic) and a coeval sequence in Anti-Atlas Morocco. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 167, 73 – 100.
- Černý J., Melichar R., Knížek a Janečka J., 2009. Touching the detachment (Ockov Fault, Barrandian, Czech Republic) *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 29, 164 – 167
- Danišík, M., P. Štěpančíková, & N. J. Evans (2012), Constraining long-term denudation and faulting history in intraplate regions by multisystem thermochronology: An example of the Sudetic Marginal Fault (Bohemian Massif, central Europe), *Tectonics*, 31, TC2003.
- Dezes P., Schmid S.M. a Ziegler P.A., 2004. Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics* 389: 1–33.
- Dunlop D.J. a Ozdemir O., 1997. Rock magnetism – Fundamentals and frontiers. *Cambridge University Press*, 573 s., Cambridge.
- Fisher N.I., Lewis T. a Embleton B.J.J., 1987. Statistical analysis of spherical data. *Cambridge University Press*, 329 s. Cambridge Cambridgeshire a New York.
- Geršl M. a Hladil J., 2004. Gamma-ray and magnetic susceptibility correlation across a Frasnian carbonate platform and the search for “punctata” equivalents in stromatoporoid-coral limestone facies of Moravia. *Geol. Quart.*, 48, 3, 283 – 292.
- Grabowski J. Babek O., Hladil J., Pruner P., Schnabl P., Werner T. a Gersl M., 2009. Late Variscan remagnetization of Devonian carbonates in the Moravo-Silesian

- zone (Czech Republic): implications for dating tectonic deformation, *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 29 : 315 – 320
- Gradstein F., Ogg J. a Smith A., 2004. A Geologic Time Scale 2004. *Cambridge University Press*, 589 s., Cambridge
- Grygar T., Dědeček J., Kruiver P.P., Dekkers M.J., Bezdička P. a Schneeweiss O., 2003. Iron oxide mineralogy in late Miocene red beds from La Gloria, Spain: rock-magnetic, voltammetric and Vis spectroscopy analyses. *Catena*, 53, 115 – 132.
- Hladil J., Slavík L., Vondra M., Koptíková L., Čejchan P., Schnabl P., Adamovič J., Vacek F., Vich R., Lisá L., a Lisý P., 2012. Pragian–Emsian successions in Uzbekistan and Bohemia: magnetic susceptibility logs and their dynamic time warping alignment, *Stratigraphy*, 8, 4.
- Hladil J., 1996. State of art in reconstruction of early Variscan block-and-basin conObrurations (Emsian-Eifelian, Devonian) *Věstník Českého geol. ústavu* 71, 1.
- Houša, V., Krs, M., Krsová , M., Man, O., Pruner, P. a Venhodová , D., 1999. High-resolution magnetostratigraphy and micropaleontology across the J/K boundary strata at Brodno near Žilina, western Slovakia: summary results. *Cretaceous Research* 20, 699 – 717.
- Houša V., Krs M., Krsová M. a Pruner P., 1993. Korelace magnetostratigrafického profilu jursko-křídových vápenců na lokalitě Štramberk s profily v tethydní oblasti. Příspěvek na sympoziu „Fyzikálne vlastnosti hornín a ich využitie v geológii, ekológii a geofyzike“. V. *Zborník, Geofyz. ústav SAV*, 81 – 86, Bratislava
- Houša V., Krs M., Krsová M. a Pruner P., 1996. Magnetostratigraphic and micropalaeontological investigations along the Jurassic/Cretaceous boundary strata, Brodno near Žilina (Western Slovakia). *Geologica Carpathica*, 47, 3, 135 – 151.
- Houša V., Pruner P., Zakharov V. A., Kostak M., Chadima M., Rogov M. A., Šlechta S. and Mazuch M., 2007. Boreal-tethyan correlation of the Jurassic-Cretaceous boundary interval by magneto- and biostratigraphy. *Stratigraphy and geological correlation*, 15, 3, 297 – 309.
- Chadima M., Cajz V. a Týcová P., 2008. On the interpretation of normal and inverse magnetic fabric in dikes: Examples from the Eger Graben, NW Bohemian Massif. *Tectonophysics*, 466, 79 – 88.

- Kirschvink J. L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 62, 3, 699 – 718.
- Kletetschka, G., Lunsford, A., Petrochilos, L., a Fuller, M., 2009. Hall Probe scanner for analysis of magnetization of polished sections, *International Association of Geomagnetism and Aeronomy: Sopron, Hungary, IAGA*, 115-WED-O1115-0592.
- Kletetschka G., Pruner P., Schnabl P., Šifnerová K., Tasáryová Z., Manda Š. Magnetic scanning and interpretation of paleomagnetic data from Prague Synform's volcanics, *Stud. Geoph. et Geodet.* – V recenzním řízení
- Kopecký L., 1974. Detection of faults and determination of their order in the region of platform volcanism. *Sbor geol Věd, Geol* 26: 197–226.
- Kopecký, L. (1987 - 88): Mladý vulkanismus Českého masivu. - *Geologie a hydrometalurgie uranu*, 11., 30 – 67; 11, 3 – 44; 12, 3 – 40; 12, 3 – 56; 12, 3 – 40. – *Výzk. a vývoj. zákl. uran. prům., Stráž pod Ralskem.*
- Kropáček V., 1985. Magnetické vlastnosti mladých alkalických vulkanických hornin střední evropy. *Doktorská disertační práce, Geofyzikální ústav AV ČSSR.*
- Krs M., 1968. The scope rock magnetism in geology. *Sbor. geol. Věd, Geol.*, 7, 43 – 75.
- Krs M., 1969. Paleomagnetismus. *Knihovna ÚÚG, Academia*, 208 s.
- Krs M., Krsová M., Pruner P., Zeman A., Novák F. a Jansa J., 1990. A petromagnetic study of Miocene rocks bearing micro-organic substance and the magnetic mineral greigite (Sokolov and Cheb Basins, Czechoslovakia). *Phys. Earth Planet. Inter.* 63, 98 – 112.
- Krs M., Krsová M., Pruner P. a Kouklíková L. 1991. On the detailed magnetostratigraphy of greigite-(smythite) mineralization, Sokolov Brown-coal Basin, Bohemia. *Studia geoph. et geodet.*, 35, 267 284.
- Krs M., Pruner P. a Man O., 2001. Tectonic and paleogeographic interpretation of the paleomagnetism of Variscan and pre-Variscan formations of the Bohemian Massif, with special reference to the Barrandian terrane. *Tectonophysics*, 332, 93 – 114.
- Krs M. a Pruner P. 1993. Paleomagnetismus a paleogeografie permo-karbonských hornin Českého masívu (příspěvek k projevu PANGEA). *Sbor. „Fyzikálne*

*vlastnosti hornín a ich využitie v geológii, ekológii a geofyzike“*, GfÚ SAV, 74 – 81, Bratislava

- Kruiver P.P., Dekkers M.J. and Heslop D., 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 189, 269 – 276.
- Lukeneder A., Halasova E., Kroh A., Mayrhofer S., Pruner P., Rehakova D., Schnabl P., Sprovieri M. a Wagreich M., 2010. High resolution stratigraphy of the Jurassic-Cretaceous boundary interval in the Gresten Klippenbelt (Austria), *Geologica Carpathica.*, 61, 5, 365 – 381.
- Lustrino M. and Wilson M., 2007. The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province. *Earth Science Reviews*, 81, 1 – 65.
- Man P., Pruner P. a Schnabl P., 2012. The detection of common cycles in magnetic susceptibility observed in distant magnetostratigraphic sections, *Stud. Geophys. Geod.*, 56, 1.
- Marek F., 1969. Magnetism of the basalt formation of the Lesser Jeseník Mts. *Travaux de l'Institute Géophysique de l'Académie Tschécoslovaque des Sciences*, 307, 129 – 164.
- Marek F., 1973. Paleomagnetism of the inner Sudeten series of volcanoes of the basalt formation of the Nížký Jeseník Mts. *Sbor. geol. Věd, UG*, 11, 31 – 66, Praha.
- Marek F., 1974. Palaeomagnetism of the outer Sudeten series of volcanoes of the Nížký Jeseník basalt formation and its surroundings. *Sbor. geol. Věd, UG*, 12, str. 131 – 153.
- Mauritsch H.J. a Pruner P., 1990. Paleomagnetic investigations in the central part of the Bohemian Massif. *en:* (Minaříková, D. a Lobitzer, D. eds) Thirty Years of Geological Co-operation between Austria and Czechoslovakia. *Publishing House of the Geological Survey*, 56–64, Praha.
- McFadden P.L. a McElhinny M.W., 1990. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal International* 103, 725 – 729.
- Melichar. R., 2003. Otázky příkrovové tektoniky pražského synklinoria (barrandien, bohemikum, *Ústav geologických věd Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity*, Brno.

- Merlet, C., 1994. An accurate computer correction program for quantitative electron-probe microanalysis. *Mikrochim. Acta*, 114, 363 – 376.
- Nagatha T., 1953. Rock-Magnetism. *Maruzen Co., Ltd.*, 234 s., Tokyo.
- Ogg, J. G., Ogg, G., a Gradstein, F. M., 2008. The concise geologic time scale: *Cambridge University Press*, 177 s., Cambridge.
- Pruner P., Houša V., Olóriz F., Košťák M., Krs M., Man O., Schnabl P., Venhodová D., Tavera J.M. a Mazuch M., 2010. High-resolution magnetostratigraphy and biostratigraphic zonation of the Jurassic/Cretaceous boundary strata in the Puerto Escaño section (southern Spain), *Cretaceous Research*, 31, 2, 192 – 206.
- Pruner P., Schnabl P. a Lukeneder A., 2009. Preliminary results of magnetostratigraphic investigations across the Jurassic/Cretaceous boundary strata in the Nutzhof, Austria. *Ann. Naturhist. Mus. Wien, Ser. A* 110, 331 – 344.
- Rapprich V., Cajz V., Košťák M., Pecskey Z., Řídkošil T. a Radoň M., 2007. Reconstruction of eroded monogenic Strombolian cones of Miocene age: A case study on character of volcanic activity of the Jičín volcanic field (NE Bohemia) and estimation of subsequent erosional rates, *J. Geosci.*, 52, 3-4, 169 – 180.
- Shrbený O. a Vokurka K., 1985. Současný stav geochronologického a izotopického výzkumu neovulkanitů Českého masivu a jejich uzavřenin. – MS Čes. Geol. Služba.
- Schnabl P., Novák J.K., Cajz V., Lang M., Balogh K., Pecskey Z., Chadima M., Šlechta S., Kohout T., Pruner P. a Ulrych J., 2010. Magnetic properties of high-Ti basaltic rocks from the Krušné hory/Erzgebirge MTS. (Bohemia/Saxony), and their relation to mineral chemistry, *Studia geoph. et geodet.*, 54. 1. 77 – 94.
- Šlechta S., Schnabl P., Pruner P., Hladil J., Koptiková L., Vacek F., Grabowski J. a Sobien K., 2010. Comparison of numerous magnetic susceptibility data sets from Palaeozoic and Mesozoic limestones: Are there trends and shifts in statistical properties? - *2010 IGCP 580 Meeting, Guilin*
- Slobodník M., Melichar R., Hurai V. a Bakker R.J. 2012, Litho-stratigraphic effect on Variscan fluid flow within the Prague synform, Barrandian: Evidence based on C, O, Sr isotopes and fluid inclusions, *Marine and Petroleum Geology*, v tisku



- Suchý V., Dobeš P., Filip J., Stejskal M. a Zeman A., 2002. Conditions for veining in the Barrandian Basin (Lower Palaeozoic), Czech Republic: evidence from fluid inclusion and apatite fission track analysis, *Tectonophysics*, 348, 1–3, 15, 25 – 50,
- Štěpánková J., 2002. Paleomagnetismus a paleogeografie devonských a spodno-karbonských hornin Drahanské vrchoviny. *Disertační práce, PříF UK*, 95 s., Praha
- Šibrava V. a Havlíček P., 1980. Radiometric age of Plio-Pleistocene volcanic rocks in the Bohemian Massif. *Věst. Ústř. Úst. Geol.*, 55, 129 – 150.
- Tait, J., V. Bachtadse, a H.C. Soffel, 1995. Upper Ordovician Paleogeography of the Bohemian Massif - Implications for Armorica, *Geophysical Journal International*, 122(1), 211– 218.
- Tarling D.H. a Hrouda F., 1993. The Magnetic anisotropy of rocks. *Capman a Hall*, 217 s., Londýn
- Ulrych J., Lloyd F.E., Balogh K., Hegner E., Langrová A., Lang M., Novák J.K. a Řanda Z., 2005. Petrogenesis of alkali pyroxenite and ijolite xenoliths from the Tertiary Loučná - Oberwiesenthal Volcanic Centre, Bohemian Massif in the light of new mineralogical, geochemical, and isotopic data. *J. Miner. Abh.*, 182/1, 57 – 79.
- Vacek F., Hladil J. a Schnabl P., 2010. Stratigraphic correlation potential of magnetic susceptibility and gamma-ray spectrometric variations in calciturbiditic facies (Silurian-Devonian boundary, Prague Synclinorium, Czech Republic) *Geologica Carpathica.*, 61, 4, 257 – 272.
- Vahle C. a Kontny A., 2005. The use of field dependence of AC susceptibility for the interpretation of magnetic mineralogy and magnetic fabrics in the HSDP-2 basalts, Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 238, 110 – 129
- Vahle C., Kontny A., Gunnlaugsson H.P. a Kristjansson L., 2007. The Stardalur magnetic anomaly revisited - new insight into a complex cooling and alteration history. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 164, 119 – 141

## Vlastní vědecké publikace

### Publikace z Web of Science s IF

1. **Schnabl P.**, Novák J.K., Cajz V., Lang M., Balogh K., Pécskay Z., Chadima M., Šlechta S., Kohout T., Pruner P. a Ulrych J., 2010. Magnetic properties of high-Ti basaltic rocks from the Krušné hory/Erzgebirge MTS. (Bohemia/Saxony), and their relation to mineral chemistry, *Stud. Geoph. et Geodet.*, 54, 1, 77 – 94.
2. Boulvain F., Da Silva A.C., Mabilie C., Hladil J., Geršl M., Koptíková L. a **Schnabl P.**, 2010. Magnetic susceptibility correlation of km-thick Eifelian-Frasnian sections (Ardenes and Moravia) *Geologica Belgica.*, 13, 4, 309 – 318.
3. Grygar T., Bláhová A., Hradil D., Bezdička P., Kadlec J., **Schnabl P.**, Swann G. a Oberhansli H., 2007. Lake Baikal climatic record between 310 and 50 ky BP: Interplay between diatoms, watershed weathering and orbital forcing, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology.*, 250, 1 – 4, 50 – 67.
4. Hajna N.Z., Pruner p., Mihevc A., **Schnabl P.** a Bosák P., 2008. Cave sediments from the Postojnska-Planinska Cave system (Slovenia): Evidence of multi-phase evolution in epiphreatic zone, *Acta Carsologica.*, 37, 1, 63 – 86.
5. Hladil J., Koptíková L., Galle A., Sedláček V., Pruner P., **Schnabl P.**, Langrová A., Bábek O., Fráňa J., Hladíková J., Otava J. a Geršl M., 2009. Early Middle Frasnian platform reef strata in the Moravian Karst interpreted as recording the atmospheric dust changes: the key to understanding perturbations in the punctata conodont zone, *Bulletin of Geosciences.*, 84, 1, 75 – 106.
6. Hladil J., Slavík L., Vondra M., Koptíkova L., Čejchan P., **Schnabl P.**, Adamovič J., Vacek F., Vich R., Lisá L., a Lisý P., 2012. Pragian–Emsian successions in Uzbekistan and Bohemia: magnetic susceptibility logs and their dynamic time warping alignment, *Stratigraphy*, 8, 4.

7. Kohout T., Kletetschka G.; Elbra T., Adachi T., Mikula V., Pesonen, L.J., **Schnabl P.** a Šlechta S.; 2008. Physical properties of meteorites- Applications in space missions to asteroids, *Meteoritics a Planetary science.*, 43, 6, 1009 – 1020.
8. Lukeneder A., Halasova E., Kroh A., Mayrhofer S., Pruner P.,Rehaková D., **Schnabl P.**, Sprovieri M. a Wagreich M., 2010. High resolution stratigraphy of the Jurassic-Cretaceous boundary interval in the Gresten Klippenbelt (Austria), *Geologica Carpathica.*, 61, 5, 365 – 381.
9. Man P., Pruner P. a **Schnabl P.**, 2012. The detection of common cycles in magnetic susceptibility observed in distant magnetostratigraphic sections, *Stud. Geophys. Geod.*, 56, 1.
10. Pruner P., Hajna N.Z., Mihevc A., Bosák P., Man ., **Schnabl P.** a Venhodová D., 2010. Magnetostratigraphy and fold tests from Raciska pecina and Pecina v Borstu caves (Classical Karst, Slovenia) *Stud. Geoph. et Geodet.*, 54, 1, 27 – 48.
11. Pruner P., Houša V., Olóriz F., Košťák M., Krs M., Man O., **Schnabl P.**, Venhodová D., Tavera J.M. a Mazuch M., 2010, High-resolution magnetostratigraphy and biostratigraphic zonation of the Jurassic/Cretaceous boundary strata in the Puerto Escaño section (southern Spain), *Cretaceous Research*, 31, 2, 192 – 206.
12. Szaniawski R., Konon A., Grabowski J. a **Schnabl P.**, 2011. Palaeomagnetic age constraints on folding and faulting events in Devonian carbonates of the Kielce Fold Zone (southern Holy Cross Mountains, Central Poland) *Geological Quarterly.*, 55, 3, 223 – 234.
13. Vacek F., Hladil J. a **Schnabl P.**, 2010. Stratigraphic correlation potential of magnetic susceptibility and gamma-ray spectrometric variations in calciturbiditic facies (Silurian-Devonian boundary, Prague Synclinorium, Czech Republic) *Geologica Carpathica.*, 61, 4, 257 – 272.

### **Recenzované v češtině**

14. Cajz V., Rapprich V., **Schnabl P.** a Pécskay Z., 2009. Návrh litostratigrafie neovulkanitů východočeské oblasti (A proposal on lithostratigraphy of Cenozoic volcanic rocks in Eastern Bohemia). – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2008*, 9 – 15.

### **Publikace s IF v tisku či v recenzním řízení**

15. Cajz V., **Schnabl P.**, Pécskay Z., Skácelová Z., Venhodová D., Šlechta S. a Šifnerová K. Chronological implications of paleomagnetic record of the Late Cenozoic volcanic activity in Moravo-Silesian border – NE Bohemian Massif, *Geologica Carpathica* – Přijato do tisku.
16. Kletetschka G., **Pruner P.**, Schnabl P., Šifnerová K., Tasáryová Z., Manda Š. Magnetic scanning and interpretation of paleomagnetic data from Prague Synform's volcanics, *Stud. Geoph. et Geodet.* – V recenzním řízení.