



## Drobné pevné částice a chemické zvětrávání melechovského granitu

Small solid particles and chemical weathering of the Melechov granite

Václav Procházka<sup>(1)</sup> • Ivan Kašparec<sup>(2)</sup> • Ilja Knésl<sup>(3)</sup> • Dobroslav Matějka<sup>(4)</sup>

**Abstract:** Distribution of elements, mainly of the radioactive ones, in minerals of different grain size and possibly density was compared by washing the slightly crushed rock (Melechov type granite of the Moldanubian Batholith). The silt (fraction, which has sedimented within one day) is enriched relatively to the whole rock in the most of measured elements, most intensely (on average up to nearly 3 times) in elements concentrated in heavy minerals, mainly Zr. Thus, the small particle size of accessories was more important than their higher density. The silt is always enriched in radium. This enrichment is stronger in silts obtained from weathered rocks, where also U content is elevated, which are proofs of formation of secondary uranium minerals at weathering (presence of an arsenate is probable due to elevated As content). Nevertheless the silts, concentrating particles from 1  $\mu\text{m}$  to XX  $\mu\text{m}$  in diameter, have mostly (with possible exception of strongly weathered rocks) radioactive disequilibrium with deficit of U relatively to eU (Ra). Thus the weak radioactive disequilibrium in the whole rock (at least in the weathered granite), where is on the contrary deficit of Ra, can be explained by removal of these fine particles with Ra (perhaps Mn hydroxides). The extraneous uranium in the rock is bound to larger grains (oxidized biotite or iron oxide/hydroxide coatings on other minerals; an important role of uraninite is not very likely).

**Key words:** granite weathering, particle size, transport, radioactive disequilibrium.

**Abstrakt:** Distribuce prvků, zejména radioaktivních, v minerálech s různou velikostí částic a případně hustotou byla porovnána pomocí plavení drčené horniny (granit melechovského typu, moldanubický pluton). Výplavy (kal, který sedimentoval za jeden den) jsou oproti původní hornině obohaceny o většinu měřených prvků, nejvíce (v průměru až téměř 3 $\times$ ) o prvky soustředěné v těžkých minerálech, zvláště Zr. Malá velikost částic akcesorií se tedy projevila více než jejich vyšší hustota. Výplavy jsou vždy obohaceny o Ra, více ve zvětralých horninách, kde mají též vyšší obsah U, což svědčí o vzniku sekundárních minerálů uranu při zvětrávání (zvýšený obsah As nasvědčuje přítomnosti arseničnanu). S možnou výjimkou silně zvětralých hornin je ve výplavech, soustřeďujících částice o průměru 1  $\mu\text{m}$  až desítek  $\mu\text{m}$ , radioaktivní nerovnováha s deficitem U oproti eU (Ra). Slabá radioaktivní nerovnováha ve složení celkové horniny (přinejmenším zvětralého granitu), kde je naopak deficit Ra, tak může být vysvětlena odnosem částic této velikosti s Ra (snad hydroxidů Mn). Přebytečný uran v hornině je vázán

1) Česká geologie, Pštrossova 16, CZ – 110 00 Praha 1, vprochaska@seznam.cz

2) Georadis, Novomoravanská 321/41, CZ – 619 00 Brno

3) ČGS Praha – pobočka Barrandov, Geologická 6, CZ – 152 00 Praha 5

4) Ústav geochemie, mineralogie a nerozpuštěných zdrojů PŘF UK, Albertov 6, CZ – 128 43 Praha 2

na větší zrna (oxidovaný biotit nebo oxidy/hydroxidy Fe na povrchu jiných hlavních minerálů; méně pravděpodobná je úloha uraninitu).

**Klíčová slova:** zvětrávání granitu, velikost částic, transport, radioaktivní nerovnováha.

## Úvod

Supergenní migrace látek přítomných v hornině, jak při zvětrávání, tak i hluboko pod vrstvou viditelně zvětralé horniny, může probíhat nejen v roztoku, ale také ve formě pevných částic. Na význam tohoto jevu bylo upozorněno i v případě granitů melechovského masívu (nejsevernější část moldanubického batolitu). Chemické zvětrávání bylo hodnoceno pro tři hlavní typy granitů (Procházka et al. 2009) a dále podrobněji v granitu melechovského typu ve vnitřní části tělesa (Procházka et al. 2011b). Jde o poměrně hrubozrnný, frakcionovaný peraluminický alkalickoživcový granit s převahou muskovitu nad biotitem. Mezi chemické pozoruhodnosti melechovského granitu patří vysoký obsah uranu v nezvětralé hornině (průměr přes 13 ppm podle dat v práci Breiter 2006).

V rámci projektu PADAMOT bylo ve vrtu PDM-1 poblíž Rejčkova zkoumáno složení nízkoteplotních výplní puklin (Milodowski et al. 2005, Chvátal et al. 2005; jde o granit méně kyselý než melechovský typ, se složením přechodným mezi lipnickým a koutským typem). Sekundární minerály v těchto výplních jsou hlavně smektit, kaolinit (illit je nejistý), goethit, oxidy a hydroxidy Mn. Kromě prvků obsažených přímo v sekundárních minerálech (Mn, Co, Fe, Ni, méně V, Mg) a prvků zřejmě sorbovaných (U, Cu, Be, Pb) jsou výplně oproti okolnímu granitu výrazně obohaceny také o prvky vzácných zemin (REE), Zr, Y, Th a Hf, tedy o prvky soustředěné v hornině v primárních akcesorických minerálech (zirkon, monazit, méně apatit). Důležitá je více nebo méně těsná korelace všech těchto prvků. To lze těžko vysvětlit jinak, než napadáním drobných zrn akcesorií (Chvátal et al. 2005). Gravitační pohyb pevných částic i pod zemí se může zdát problematický, o jeho významu však svědčí také nedávno objevený tzv. západkový mechanismus (Croll 2008, Kalenda et al. 2011).

Procházka et al. (2009) srovnáním chemického složení čerstvých a zvětralých žul melechovského masívu zjistili, že zvětralý granit byl pasivním nakoncentrováním obohacen o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ale ne o zmíněné prvky obsažené v akcesoriích, které jsou podle četných údajů v literatuře velmi málo mobilní, zvláště v mírném klimatu (Middelburg et al. 1988; Nesbitt & Markovics 1997). To bylo vysvětleno mechanickým transportem velmi drobných zrn akcesorií.

Jiná je situace v případě uranu, o nějž je zvětralý melechovský granit výrazně ochuzen (Procházka et al. 2009; Breiter 2006, Žáček & Páša 2006). Většina obsahu uranu v nezvětralé hornině není v primárních akcesoriích (apatit, monazit, zirkon, xenotim), uraninit je pravděpodobně příliš vzácný, významná je zřejmě koncentrace U na hranicích zrn (Procházka 2010; viz též Guthrie & Kleeman 1986).

## Vzorky a metodika

Za účelem hodnocení migrace prvků (zejména uranu a radia<sup>(1)</sup>) v pevné fázi bylo zjišťováno složení frakcí tvořených převážně velmi malými částicemi, které byly získány plavením drcené horniny,

1) Důležitým ukazatelem chování uranu je radioaktivní rovnováha mezi  $^{238}\text{U}$  a jedním z meziproduktů jeho rozpadové řady,  $^{226}\text{Ra}$ . Rovnováha se ustanovuje do 0,9 miliónu let, 97% rovnováha však již za 0,5 mil. let. Nerovnováha je tedy důkazem ovlivnění izotopového systému v kvartéru.

a jejich význam pro složení horniny jako celku (srovnáním s celkovou a odkalenou horninou). Způsob drcení vylučuje výraznou kontaminaci jemných frakcí úlomky původně mnohem větších zrn. Experiment byl prováděn na 9 vzorcích granitu melechovského typu z vrtů Mel-1 a Mel-2, odebraných ve skladu vrtného jádra ČGS v Lužné. Všechny výsledky jsou shrnuty ve zprávě Procházka et al. (2012) a zde jsou použity se svolením SÚRAO.

Vzorky byly lehce (při maximální vzdálenosti čelistí) drceny v čelistovém drtiči Retsch, tak, že materiál prošel drtičem dvakrát, aby nezůstaly příliš hrubé úlomky. Drcené vzorky byly kvartací rozděleny na dvě části o přibližně stejné hmotnosti od 0,5 do 0,7 kg. Jedna část byla použita na analýzy celkové horniny, druhá část byla rozdělena na dvě frakce plavením.

Dělený vzorek byl odkalován v čisté vodě z vodovodu (pouze jeden vzorek pro srovnání také v destilované vodě) v porcelánové misce, přičemž kalná voda byla z každého vzorku slita 3–4 krát. Obyčejná voda byla upřednostněna kromě ekonomických důvodů také proto, že se v ní provádí též odkalování běžných vzorků na laboratorní separace minerálů. Kal se nechal usadit ve větších odpařovacích miskách a po uplynutí 20–26 hodin byla voda opatrně slita. Po usušení byl zvážen kal i odkalený podíl; ztráty činily nejvýše 5 gramů a zahrnují téměř výhradně jemný podíl.

Obsahy eTh, U, eU (Ra) a K byly stanoveny scintilační spektrometrií gama (spektrometr RT-50 (4 × 4), GEORADIS s. r. o.), kdy je naměřené spektrum vzorku (hermeticky uzavřeného v měřicí nádobě) srovnáváno metodou nejmenších čtverců se spektry certifikovaných referenčních materiálů – RG set IAEA Vídeň a IIZ Praha. Analýzy provedl I. Kašparec.

Měření přenosným rentgenfluorescenčním analyzátozem Alpha (výrobce Innov-X Systems Ltd.) provedl I. Knésl (více o metodě viz např. Knésl et al. 2009).

Další analýzy zahrnují jen část vzorků a mají tak význam spíše pro kontrolu a srovnávání s jinými soubory. Silikátové analýzy na mokré cestě a stacionární rentgenfluorescenční analýzy (vlnově disperzní spektrometr 9400 Advant XP, výrobce ARL) byly provedeny v akreditovaných laboratořích České geologické služby v Praze (stejně jako v práci Breitera, 2006). Kontrolní stanovení stopových prvků v celkem 9 vzorcích (3× celková hornina, 2× odkalené, 4× výplav) bylo provedeno kvadrupolovým hmotovým spektrometrem s ionizací indukčně vázanou plazmou (ICP-MS) v Laboratořích geologických ústavů na PřF UK (přístroj X Series II Thermo Scientific, analyzoval L. Strnad). Vzorky byly po tavení se směsí boritanů Li převedeny do roztoku kyselinou fluorovodíkovou a chloristou. Při této příležitosti bylo změřeno také cca 20 dalších stopových prvků; tyto výsledky jsou zde však pojednány jen okrajově.

## Výsledky a diskuse

Výplavy tvoří v průměru 9 % hmotnosti dělených vzorků. Z tabulky 1 vyplývá, že ve zvětralých a alterovaných granitech není jemnozrný podíl oproti ostatním nijak zvýšen, a jemné částice byly tedy již částečně odstraněny přírodními procesy. Při plavení v destilované vodě (vzorek 1/2) zůstávala voda výrazně zakalenější a jisté množství kalu vůbec neklesalo, podíl výplavu je tedy menší (6,1 %), jeho složení je však srovnatelné (viz Procházka et al. 2012).

### *Gamaspektrometrie*

Obsah K v horninách je vyrovnaný a velmi málo se liší od hodnot v obou vrtech ze silikátových analýz (Breiter 2006). Vyrovnané jsou i obsahy Th (systematicky vyšší ve vrtu Mel-1 než Mel-2, podobně jako vyplývá z dat v pracích Breiter 2006 a Hanák et al. 2006). Proměnlivější je

**Tab. 1** – Přehled odebraných vzorků, hmotnostní podíly výplavu a ztrát při plavení.

**Tab. 1** – List of samples studied (sampling depths in boreholes), and portions of the silt and of material lost during the washing (% of the original sample weight).

Číslo vz.	vrt Mel-	od (m)	do (m)	zvětrání a jiné alterace	% výplavu	% ztrát
1/2	1	1,55	1,9	zvětralý	9,1	0,0
1/14	1	13,7	14	navětralý; *běžná intenzita alterace Btt, Plg	9,6	0,6
1/42	1	42	42,3	makroskopicky čerstvý, místy rezavé skvrny	8,0	0,3
1/123	1	122,7	123	makroskopicky zcela čerstvý	11,6	0,2
1/163	1	163	163,25	zdánlivě čerstvý; *chloritizace a karbonatizace	9,4	0,7
2/1	2	0,6	1	poměrně málo zvětralý	7,9	0,0
2/6	2	6,16	6,47	navětralý, oxidace Fe postupující od pukliny	7,3	0,8
2/19	2	18,7	19	makroskopicky čerstvý, u pukliny oxidace Fe	8,4	0,5
2/84	2	83,5	83,8	makroskopicky čerstvý; *velmi silná sericitizace	9,9	0,6

\* výbrus

Vzorek 1/163 je v dolní části několik m mocné zóny intenzivní karbonatizace popsané též v práci Breiter (2006), v níž pórovitost podle geofyzikálních měření (Hanák et al. 2006) dosahuje až 7 %.

Note: In the borehole Mel-1 the intensity of weathering decreases with depth (however sample 1/163 is affected by carbonatization and intense chloritization), in Mel-2 the granites were more affected by subsolidus alterations prior to weathering and the depth is not so important.

obsah U, který může být snížen nejen zvětráním (Procházka et al. 2009), ale ve vzorku 1/163 pravděpodobně také v důsledku alterace, jak naznačují i výsledky v pracích Breiter (2006) a Hanák et al. (2006). Nejméně ve dvou vzorcích je významná (na hladině významnosti 95 %) radioaktivní nerovnováha mezi U a Ra ve prospěch uranu – jde o navětralé vzorky 1/2 a 1/14. Rovněž zvětralý vzorek 2/1 má poměrně velkou převahu U nad eU, ale vzhledem k nižším obsahům je měření zatíženo větší chybou a rozdíl již nemusí být významný.

Odkalené granity jsou oproti původním většinou mírně ochuzeny o Th, obsah U je většinou nepatrně snížen, ve třech případech je významně nižší (jde opět o zvětralé vzorky). Podobně jako v nedělených horninách je mírná převaha U nad eU (Ra), ale výraznější rozdíl je pouze v navětralém vzorku 1/14.

Jemné podíly (výplavy) mají mírně, ale systematicky zvýšený obsah K. Obsah Th je podle gamaspektrometrie srovnatelný s původní horninou nebo podstatně nižší, měření je však kvůli menšímu objemu vzorku zatíženo velkou chybou. Rovněž velkou chybou jsou zatíženy také obsahy U, většinou nižší než v hornině, avšak výrazně vyšší ve vzorcích z menších hloubek vrtu Mel-1 (1/2, 1/14 a 1/42). Hodnoty eU (Ra) vždy převyšují, a to až více než trojnásobně, hodnoty U. Tento nepoměr je poněkud slabší u zmíněných vzorků 1/2, 1/14 a 1/42 se zvýšeným obsahem U (tab. 2c, d, obr. 1 v barevné příloze č. 2).

### Rentgenfluorescenční spektrální analýza

Největší variabilitu ze snadno měřitelných prvků vykazuje Ti, soustředěný hlavně v nealterovaném biotitu; je možné, že velikost vzorků byla pro Ti málo reprezentativní.

V odkalené hornině je všech prvků kromě Ba méně než v celkové; nejmenší rozdíl je v případě Ca, Mn, největší u Zr.

**Tab. 2** – Obsahy radioaktivních prvků (Th, U, eU (Ra) v mg/kg, K v hmot. %; chyba stanovení  $\pm 2\sigma$ ) a poměry U/eU podle gamaspektrometrie.

**Tab. 2** – Radioactive elements concentrations (Th, U, eU (Ra) in mg/kg, K in wt. %; (error  $\pm 2\sigma$ ), and the U/eU ratio, determined by gamma-ray spectrometry.

a) Původní horniny.

a) Original rocks.

Číslo vz.	Th	U	eU	K	U/eU
1/2	3,7 $\pm$ 0,6	8,2 $\pm$ 1,0	6,3 $\pm$ 0,2	3,96 $\pm$ 0,14	1,30
1/14	3,3 $\pm$ 0,6	10,0 $\pm$ 1,0	8,6 $\pm$ 0,2	3,62 $\pm$ 0,14	1,16
1/42	3,5 $\pm$ 0,6	6,3 $\pm$ 1,0	6,2 $\pm$ 0,2	3,50 $\pm$ 0,14	1,02
1/123	3,4 $\pm$ 0,6	11,3 $\pm$ 1,2	10,6 $\pm$ 0,4	3,64 $\pm$ 0,14	1,07
1/163	3,3 $\pm$ 0,6	7,8 $\pm$ 1,0	7,3 $\pm$ 0,2	3,53 $\pm$ 0,14	1,07
2/1	3,0 $\pm$ 0,6	3,8 $\pm$ 0,8	3,1 $\pm$ 0,2	3,76 $\pm$ 0,14	1,23
2/6	2,7 $\pm$ 0,6	5,1 $\pm$ 1,0	5,0 $\pm$ 0,2	3,73 $\pm$ 0,14	1,02
2/19	2,7 $\pm$ 0,6	9,9 $\pm$ 1,0	9,1 $\pm$ 0,2	3,96 $\pm$ 0,14	1,09
2/84	2,9 $\pm$ 0,6	11,7 $\pm$ 1,2	11,0 $\pm$ 0,4	3,80 $\pm$ 0,14	1,06
průměr	3,2 $\pm$ 0,6	8,2 $\pm$ 1,0	7,5 $\pm$ 0,2	3,72 $\pm$ 0,14	

b) Odkalené horniny.

b) Desiltered rocks (after crushing).

Vrt Mel-	Th	U	eU	K	U/eU
1/2	2,4 $\pm$ 0,6	4,8 $\pm$ 1,0	4,7 $\pm$ 0,2	3,67 $\pm$ 0,16	1,02
1/14	2,6 $\pm$ 0,6	8,3 $\pm$ 1,2	6,5 $\pm$ 0,4	3,65 $\pm$ 0,18	1,28
1/42	3,2 $\pm$ 0,6	5,6 $\pm$ 1,0	5,4 $\pm$ 0,2	3,56 $\pm$ 0,16	1,04
1/123	3,3 $\pm$ 0,6	10,4 $\pm$ 1,2	9,0 $\pm$ 0,4	3,21 $\pm$ 0,16	1,16
1/163	2,1 $\pm$ 0,6	7,8 $\pm$ 1,2	7,2 $\pm$ 0,4	3,78 $\pm$ 0,16	1,08
2/1	2,5 $\pm$ 0,6	3,5 $\pm$ 1,0	3,0 $\pm$ 0,2	3,68 $\pm$ 0,16	1,17
2/6	2,1 $\pm$ 0,6	4,2 $\pm$ 1,0	4,7 $\pm$ 0,2	3,72 $\pm$ 0,16	0,89
2/19	3,1 $\pm$ 0,8	9,4 $\pm$ 1,2	9,7 $\pm$ 0,4	3,98 $\pm$ 0,18	0,97
2/84	2,1 $\pm$ 0,8	11,1 $\pm$ 1,4	10,1 $\pm$ 0,4	3,61 $\pm$ 0,18	1,10
průměr	2,6 $\pm$ 0,6	7,2 $\pm$ 1,1	6,7 $\pm$ 0,3	3,65 $\pm$ 0,17	

c) Výplavy.

c) Silts (from crushed rocks).

Vzorek	Th	U	eU	K	U/eU
1/2	4,8 $\pm$ 6,8	14,4 $\pm$ 10,4	16,8 $\pm$ 3,0	4,05 $\pm$ 1,04	0,86
1/14	2,9 $\pm$ 5,6	24,2 $\pm$ 9,0	33,1 $\pm$ 2,6	4,37 $\pm$ 0,90	0,73
1/42	0,8 $\pm$ 3,8	13,4 $\pm$ 6,0	18,6 $\pm$ 1,6	4,84 $\pm$ 0,68	0,72
1/123	2,4 $\pm$ 3,0	7,8 $\pm$ 4,8	14,9 $\pm$ 1,4	4,69 $\pm$ 0,58	0,52
1/163	3,4 $\pm$ 3,8	4,4 $\pm$ 5,8	13,6 $\pm$ 1,6	4,44 $\pm$ 0,66	0,32
2/1	1,7 $\pm$ 3,6	3,5 $\pm$ 5,6	8,5 $\pm$ 1,6	5,56 $\pm$ 0,70	0,41
2/6	0,8 $\pm$ 4,4	6,2 $\pm$ 7,0	17,0 $\pm$ 2,0	5,70 $\pm$ 0,82	0,36
2/19	3,4 $\pm$ 3,4	7,4 $\pm$ 5,2	14,2 $\pm$ 1,4	4,91 $\pm$ 0,60	0,52
2/84	0,0 $\pm$ 4,2	5,4 $\pm$ 6,6	18,3 $\pm$ 2,0	5,41 $\pm$ 0,78	0,30
průměr	2,2 $\pm$ 3,9	9,6 $\pm$ 6,0	17,2 $\pm$ 1,7	4,90 $\pm$ 0,71	

d) Výplavy – opakované měření.

d) Silts – repeated measurement.

Vzorek	eTh	U	eU	K	U/eU
1/2	5,5 ± 5,8	16,5 ± 12,2	17,6 ± 2,6	4,98 ± 0,96	0,94
1/14	1,0 ± 4,6	27,6 ± 10	28,8 ± 2,2	5,09 ± 0,82	0,96
1/42	4,0 ± 3,2	9,4 ± 6,6	15,8 ± 1,6	3,87 ± 0,56	0,59
1/123	1,4 ± 2,6	12,1 ± 5,2	12,7 ± 1,2	3,73 ± 0,46	0,95
1/163	4,0 ± 3,2	6,5 ± 6,6	9,6 ± 1,6	3,85 ± 0,56	0,68
2/1	2,6 ± 3,2	5,3 ± 6,4	7,9 ± 1,4	4,03 ± 0,56	0,67
2/6	3,8 ± 4	9,6 ± 8,2	15,1 ± 1,8	5,08 ± 0,72	0,64
2/19	2,3 ± 2,8	6,5 ± 6	12,9 ± 1,4	4,07 ± 0,52	0,50
2/83	0,1 ± 3,4	9,7 ± 7,4	15,1 ± 1,6	4,86 ± 0,64	0,64
průměr	2,7 ± 3,3	11,5 ± 6,8	15,1 ± 1,6	4,4 ± 0,59	

**Tab. 3** – Stanovení vybraných prvků v původních a odkalených granitech a ve výplavech přenosným XRF analyzátozem (obsahy v mg/kg, Fe v %; „d.l.“ – detekční limit,  $\sigma$  – směrodatná odchylka).

**Tab. 3** – Concentrations of selected elements in original granites and in fractions, determined by portable X-ray fluorescence analyser (mg/kg, Fe in wt. %; “d.l.” – detection limit,  $\sigma$  – standard deviation).

a) Celkové horniny.

a) Whole rocks.

Číslo vz.	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	As	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb
1/2	2 144	1 587	193	0,55	41	6	237	84	30	61	21
1/14	2 242	408	165	0,46	28	<d.l.	259	90	37	91	27
1/42	2 298	406	179	0,30	30	<d.l.	258	102	47	89	24
1/123	2 618	471	231	0,56	38	<d.l.	243	94	44	84	24
1/163	2 651	411	275	0,56	29	<d.l.	246	86	38	125	19
2/1	2 227	565	206	0,63	42	<d.l.	280	74	40	106	29
2/6	2 284	572	206	0,61	44	<d.l.	288	68	39	80	24
2/19	2 246	459	226	0,60	42	<d.l.	285	64	39	108	27
2/84	2 966	3 834	246	0,56	35	<d.l.	267	86	39	<d.l.	20
průměr	2 408	968	214	0,54	37		263	83	39		24
2 $\sigma$	516	2 146	65	0,19	12		35	23	9		6

## b) Odkalené horniny.

## b) Desiltered rocks.

Vrt	hl.	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	As	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb
1/2	1,7	1 923	405	190	0,52	35	6	214	73	20	106	17
1/14	13,9	2 196	394	164	0,43	24	5	193	62	15	89	13
1/42	42,2	2 172	368	181	0,31	28	<d.l.	229	87	33	112	19
1/123	122,9	2 331	374	204	0,52	34	<d.l.	230	86	36	135	20
1/163	163,1	2 482	355	239	0,49	23	<d.l.	161	51	13	125	12
2/1	0,8	2 179	3 230	189	0,64	40	<d.l.	247	59	32	80	22
2/6	6,3	2 285	792	184	0,54	37	<d.l.	215	51	21	101	17
2/19	18,9	2 226	610	218	0,59	36	<d.l.	271	59	32	90	22
2/84	83,7	2 918	534	268	0,59	30	<d.l.	220	67	25	57	16
průměr		2 301	785	204	0,51	32		220	66	25	99	18
2 $\sigma$		519	1 751	61	0,19	11		59	25	16	45	7

## c) Výplavy.

## c) Silts.

Vzorek	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	As	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb
1/2	4 160	959	538	1,26	108	16	356	144	114	126	36
1/14	4 230	1 415	413	1,17	75	12	326	121	114	124	31
1/42	3 440	1 581	586	1,10	114	<d.l.	314	147	125	166	28
1/123	3 372	2 053	543	1,17	86	<d.l.	310	127	94	145	31
1/163	4 001	2 916	632	1,12	82	<d.l.	309	100	84	173	25
2/1	5 976	610	452	0,71	54	<d.l.	312	139	129	99	42
2/6	4 980	965	445	1,17	92	<d.l.	352	97	113	117	38
2/19	3 494	892	426	0,90	70	<d.l.	329	89	100	129	35
2/84	5 910	1 291	783	1,40	99	<d.l.	344	109	121	181	37
průměr	4 396	1 409	535	1,11	87		328	119	110	140	34
2 $\sigma$	1 903	1 339	226	0,38	36		35	41	28	53	10

Tab. 4 – Stopové prvky v některých výplavech podle XRF stacionárním přístrojem (mg/kg).

Tab. 4 – Trace elements in some silts determined by stationary XRF instrument (mg/kg).

Vzorek	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Sn	Pb
1/2	169	21	340	172	21	171	29	42
1/14	116	16	338	120	20	142	32	30
1/42	141	< 1	342	135	16	137	31	27
1/163	100	< 1	313	98	13	98	34	23
2/84	107	< 1	341	106	17	133	30	25

Pozn.: pod mezí detekce: Mo, Cu.

Ve výplavech je koncentrace všech prvků stanovitelných XRF vyšší než v celkové hornině. Nejvíce je nabohaceno Zr, málo Rb.

Ve zvětralých vzorcích 1/2 a 1/14 je ve výplavu vysoký obsah As, který byl detekován i v odkaleném podílu a ve vzorku 1/2 i v celkové hornině. Výplav z karbonatizovaného vzorku (1/163) má nejvyšší obsah Ti a naopak nejnižší Pb, Zr a Rb, rozdíly však nejsou výrazné.

#### *Ostatní metody, kontrola správnosti a poznámky k analytickým problémům*

Kontrolní měření výplavů přesnějším stacionárním přístrojem (tab. 4) ukazují srovnatelné hodnoty Rb, Sr, Zr a s výhradou i Zn a Pb jako přenosný analyzátor, i když jsou možné systematické rozdíly (zvláště v případě Zn). Dále tyto výsledky ukázaly obohacení výplavů také o Y a Sn oproti celkové hornině (viz Breiter 2006).

Silikátová analýza obou frakcí ze zvětralého vzorku 1/2 ukázala, že ve výplavu jsou nabohaceny všechny měřené složky kromě SiO<sub>2</sub>.

Výsledky analýz ICP-MS (tab. 6, 7) potvrzují vysoké koncentrace prvků, soustředěných v primárních akcesoriích (kromě zmíněných Zr, Y, Sn také vzácné zeminy, Nb), ve výplavech.

**Tab. 5** – Silikátové analýzy frakcí z drceného granitu – vzorek 1/2. O – odkalený podíl, V – výplav; C – celková hornina, výpočet (průměr z obou frakcí vážený jejich hmotnostmi). Analyzované složky jsou seřazeny sestupně podle nabohacení ve výplavu.

**Tab. 5** – *Wet silicate analyses of fractions of crushed granite (sample 1/2). O – desiltered, V – silt; C – whole rock, calculated as mass-weighted average of both fractions. Components are lined in decreasing order by their enrichment in the silt (Z.žh. = loss on ignition).*

%	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Z.žh.	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O(-)	CaO	MgO	Li <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	suma
O	0,029	1,09	0,350	1,08	0,11	0,21	0,57	0,21	0,018	14,54	3,68	4,37	73,28	99,52
V	0,100	2,75	0,786	2,22	0,22	0,41	1,07	0,34	0,026	19,33	4,54	5,00	63,18	99,97
C	0,04	1,24	0,39	1,18	0,12	0,22	0,62	0,22	0,019	14,98	3,76	4,43	72,35	

**Tab. 6** – Vybrané prvky stanovené ICP-MS (viz též tab. 7) a suma vzácných zemin (mg/kg).

**Tab. 6** – *Selected elements and REE sum determined by ICP-MS (see also Tab. 7).*

Vzorek	Nb	Sn	Y	Ce	Sm	Eu	Yb	Σ La-Lu
1/2 hornina	13,5	19,7	7,39	14,27	1,66	0,34	0,44	35,8
1/2 odkalené	13,7	19,9	7,79	15,4	1,82	0,34	0,47	38,6
1/2 výplav	24,5	26,9	22,16	41,71	4,71	0,65	1,39	104,5
1/123 hornina	12,3	16,8	9,14	17,13	1,92	0,33	0,52	42,9
1/123 odkalené	12,7	17,4	8,68	16,17	1,88	0,33	0,54	40,7
1/123 výplav	33,9	25,9	13,92	29,2	3,06	0,39	0,9	71,8
2/1 hornina	15,1	19,5	8,23	15,58	1,87	0,3	0,48	39,6
2/6 výplav	27,4	30,1	21,59	33,33	4,32	0,69	1,27	86,7
2/19 výplav	26,2	21,1	13,91	25,34	2,89	0,43	0,86	63,3



První kontrolu kvality analýz poskytuje již srovnání odkalené a původní horniny: protože odkalený podíl představuje asi 90 % hmotnosti děleného vzorku, neměl by být obsah žádného prvku v něm více než asi o 1/10 vyšší než v celkové hornině (za předpokladu stejného složení obou kvartů). Toto skutečně většina vzorků splňuje: výjimkou je jen někdy Ti a ve čtyřech případech je v odkaleném podílu podstatně vyšší obsah Ba; vzhledem k možné interferenci rentgenových spektrálních čar Ti a Ba může jít o instrumentální problém. Ze srovnání s analýzami ICP-MS (obr. 2 v barevné příloze č. 3) vyplývá, že nevěrohodné jsou hlavně hodnoty Ba, zatímco Ti je pouze ve dvou případech ovlivněn spíše nehomogenitou vzorku – náhodně se vyskytujícími (vzácnými) většími zrny biotitu, případně ilmenitu či rutilu.

Přesná kontrola bilance prvků měřených gamaspektrometrií a přenosným XRF analyzátozem je ve zprávě (Procházka et al. 2012). Výsledky by mohly naznačovat ztrátu části obsahu některých prvků (která by při plavení přešla do roztoku nebo by byla ve velmi malých částicích, které ani za jeden den nestačily sedimentovat); jde zvláště o Th. To však zpochybňuje analýzy vody použité při plavení (Procházka et al. 2012) i kontrolní analýzy ICP-MS (tento článek). Pravděpodobnějším vysvětlením je systematické podcenění Th (částečně i U) ve výplavech při měření gamaspektrometrií vzhledem k malému množství vzorku. Naopak u bezproblémově měřených prvků, zvláště K, Ca, Zn a Ra, je shoda velmi dobrá.

Z tabulky 7 i obr. 4 v barevné příloze č. 3 je vidět, že shoda mezi metodami ICP-MS a (přenosnou) XRF je dobrá u většiny prvků. Často i při určitém systematickém rozdílu vycházejí téměř stejné poměry daného prvku mezi různými frakcemi (jako příklad uveden poměr výplav/celková hornina) téhož vzorku (tab. 7).

#### *Orientační mineralogická interpretace výsledků*

Pokud jde o určení původních nositelů hlavních i stopových prvků v melechovském granitu, hlavní minerály i těžké akcesorie byly dokumentovány již celkem podrobně (Breiter 2006, Procházka 2010). Akcesorie soustřeďují většinu obsahu těchto prvků: Zr, Hf, vzácné zeminy (kromě Eu), Y, Th, P, pravděpodobně i Sn, Nb, Ta; v apatitu navíc může být až polovina Ca v hornině. Naproti tomu převážná část Ti, Fe, Zn a Mn, i když jsou podstatnou součástí některých akcesorií, je ve slídách, případně chloritu (viz též Procházka et al. 2010). Velkou neznámou zůstávají některé sekundární fáze, které jsou významné již v nezvětralé hornině - zejména minerály skupiny kaolinitu (viz též Procházka 2010), hydroxidy Fe a pravděpodobně i Mn. Např. obsah  $H_2O^+$  většinou aspoň 1 % i v čerstvém granitu z vrtů (Breiter 2006<sup>(2)</sup>) nelze vysvětlit slídami a chloritem, v nichž je asi jen polovina tohoto množství (při reálném objemu podle mikroskopie; další omezení vyplývají z obsahu Mg aj.). Tato čísla naznačují modální podíl jílových minerálů a případně hydroxidů přes 1 %. Určitá, možná převážná část z tohoto množství jsou inkluze v živcích, pro hodnocení výsledků plavení je však podstatné spíše množství těchto fází na hranicích zrn. Tato hmota se jistě hůře zachovává ve výbrusech.

Vyplavitelné fáze přítomné už v nezvětralé hornině koncentrují především: Zr, Mn, Fe, Zn, Ti. Tyto minerály mohou zahrnovat slídy, akcesorie a různé sekundární minerály vznikající již při alteraci v hloubce. V menší míře jsou ve výplavech koncentrovány téměř všechny ostatní spolehlivě stanovené prvky: Ca, Pb, Ra, Sr, Rb, K. Některé vyplavitelné fáze však chybí ve zvětralých vzorcích, což platí hlavně pro koncentrátoři Ti, částečně i Fe, Zn; naopak soustředění

2) V citované práci i ve většině dalších jde jen o stanovení ztráty žíháním, která je však ve zkoumaných granitech velmi blízká hodnotě  $H_2O^+$  (vzhledem k převážně nepatrným obsahům C,  $CO_2$ , S i Cl).

**Tab. 7** – Kontrolní analýzy ICP-MS, obsahy prvků v mg/kg; srovnání s přenosným XRF analyzátořem, resp. gamaspektrometrií; poměry obsahu prvků ve výplavu a celkové hornině (V/C) podle různých metod v příslušném vzorku.

**Tab. 7** – control ICP-MS analyses, element contents in mg/kg; comparison with portable XRF or with gamma-ray spectrometry, respectively; ratios (V/C) of element's content in whole rock and in the silt from each sample according to various methods.

Vzorek	Ti	Ti RF	Mn	Mn RF	Zn	Zn RF	Sr	Sr RF	Ba	Ba RF	Pb	Pb RF	Zr	Zr RF	Th	Th gamma	U	U gamma
1/2 hornina	524	1 587	202	193	54	41	97	84	295	61	16,1	21	47,1	30	7,6	3,7	4,57	8,2
1/2 odkalené	543	405	208,9	190	42	35	96	73	308	106	20,4	17	46,3	20	5,7	2,4	4,83	4,8
1/2 výplav	1164	959	667,9	538	140	108	173	144	380	126	29,3	36	176,3	114	25,7	5,15	20,4	15,45
1/2 poměr V/C	2,2	0,6	3,3	2,8	2,6	2,6	1,8	1,7	1,3	2,1	1,8	1,7	3,7	3,8	3,4	1,4	4,5	1,9
1/123 hornina	522	471	277,4	231	43	38	94	94	181	84	18,5	24	52,0	44	2,7	3,4	8,2	11,3
1/123 odkalené	498	374	257,8	204	39	34	95	86	182	135	15,5	20	55,5	36	3,3	3,3	10,1	10,4
1/123 výplav	1655	2053	616,4	543	99	86	131	127	201	145	19,6	31	117,6	94	6,7	1,9	12,9	9,95
1/123 poměr V/C	3,2	4,4	2,2	2,4	2,3	2,3	1,4	1,4	1,1	1,7	1,1	1,3	2,3	2,1	2,5	0,6	1,6	0,9
2/1 hornina	665	565	278,2	206	45	42	67	74	178	106	27,4	29	50,5	40	4,8	3,0	2,7	3,8
2/6 výplav	1248	965	506,3	445	108	92	101	97	602	117	30,2	38	140,7	113	9,3	2,3	12,9	7,9
2/19 výplav	1224	892	482,1	426	79	70	94	89	221	129	30,3	35	129,8	100	6,5	2,85	13,9	6,95

Ca, Ra, snad i Zr, Y, Sr, je ve výplavech ze zvětralé horniny výraznější a navíc je ve výplavech ze zvětralých vzorků vrtu Mel-1 výrazně koncentrován U. Kromě vzniku sekundárních fází může vysvětlit zvýšený obsah některých těchto prvků ve výplavech ze zvětralých granitů také postupující zvětrávání např. plagioklasu (Ca, Sr) a apatitu (Ca, Y, As?), které se rozpadají na čím dál menší zrnka a navíc se z apatitu uvolňují drobné uzavřeniny akcesorií (koncentrující Zr, Y, Th a další stopové prvky).

Podle silikátové analýzy vyplavitelné fáze nejvíce koncentrují Mn, Fe, P, Ti a Ca. Mineralogicky to znamená oxidy Fe-Ti a apatit (v apatitu i ilmenitu je významná příměs Mn, poměr Mn/Fe je vyšší než ve slídkách; viz Procházka 2010). Ze slabšího obohacení výplavu o Mg, Li, Al, Na a K lze soudit na omezené koncentrování slíd a plagioklasu. Obsah K-živce, soustřeďujícího 75 % K v hornině, musí být ve výplavu vzhledem k prokazatelnému nabohacení o slídy trochu snížený, za slabě zvýšený obsah K a zvýšené obsahy Rb a Pb ve výplavech jsou odpovědné spíše slídy (včetně sericitu). Silikátová analýza byla sice provedena jen v jednom zvětralém vzorku, ale velmi podobné poměry panují (aspoň u K, Ca, Ti, Mn a Fe) i v ostatních vzorcích.

Teoretické minerální složení odkaleného podílu a výplavu podle silikátové analýzy je v tabulce 8. Toto složení modeluje všechny hlavní oxidy s nepřesností menší než +3 / -8 % (relativně); pouze ztráta žíháním (tedy především  $H_2O+$ ) v odkaleném podílu je ve skutečnosti asi o 20 % vyšší než podle teoretického složení, což je zčásti důsledek plavení a ostatních manipulací se vzorkem.

**Tab. 8** – Teoretické minerální složení (hmot. %) odkaleného podílu a výplavu ze zvětralého granitu (Mel-1, hloubka 1,7 m, podle chemického složení v tab. 5; modelové chemické složení minerálů většinou podle mikroanalýz – Procházka 2010).

**Tab. 8** – *Theoretical mineralogical composition (wt. %) of the desiltered fraction and of silt from a weathered granite (Mel-1, depth 1.7 m; from chemical composition in Tab. 5, model chemical composition of minerals mostly after microprobe analyses – Procházka 2010).*

	odkalené	výplav
křemen	34	18
K-živec	21	16
plagioklas	30	35
muskovit	8,3	16,5
biotit	0,8	1,4
chlorit	1,5	2,0
jílové minerály	1,9	7,7
oxohydroxidy Fe(+Mn)	0,18	1,4
„primární“ akcesorie*	0,87	2,0

\* apatit, ilmenit, rutil, zirkon, monazit, sillimanit

Srovnání hlavních prvků v odkaleném podílu a výplavu tedy ukazuje, že je výplav obohacen téměř o všechny minerály kromě křemene (který má jako jediný přítomný minerál více  $SiO_2$  než celková hornina) a draselného živce. To lze vysvětlit velikostí původních křemenných zrn (rozdíl by měl být zvýrazněn při zvětrávání díky pomalé dezintegraci a chemické odolnosti). Frakcionaci křemene od všech ostatních minerálů předpokládají Procházka et al. (2011), podle nichž má jedna ze dvou výrazných skupin silně zvětralých hornin (vzorkovaných půdním vrtákem) podstatně snížený obsah křemene oproti čerstvé hornině. Možným vysvětlením je oboha-

cení těchto vzorků o drobné částice sekundárních minerálů, zvětralých živců a slíd i akcesorií, které pravděpodobně byly ve většině půdního profilu mnohem pohyblivější než křemen. Celkově mohlo dojít k většímu zastoupení těchto vzorků v souboru zvětralých žul analyzovaném v práci Žáček & Páša (2006), protože se v takových partiích lépe vrtalo. Je však zřejmé, že pokusné drcení a plavení nemohlo věrně napodobit složitý proces zvětrávání. Lze například očekávat, že v silněji zvětralé hornině došlo i k dezintegraci draselného živce, který by se pak při plavení také dostal spíše do výplavu.

#### *Distribuce U a Ra a příčiny radioaktivní nerovnováhy*

Uran na rozdíl od většiny analyzovaných prvků není významně koncentrován ve výplavech, kromě výplavů ze zvětralých granitů. Naopak Ra je výrazně nabohaceno ve výplavech, nejvíce opět ze zvětralých vzorků. Pravděpodobný výskyt nerovnováhy ve prospěch U v odkalených granitech (např. vzorek 1/123) naznačuje, že na frakcionaci U a Ra se podílejí i velké částice (např. sorbce U na povrchu oxidovaného biotitu?). Na rozdíl od Ra nemá U ve výplavech výrazný vztah k žádnému dalšímu měřenému prvku (kromě právě Ra – obr. 1 v barevné příloze č. 2), pouze naznačena je korelace např. s Fe.

Jak bylo konstatováno již dříve (Procházka 2010), asi jen třetina obsahu U je v primárních akcesoriích (monazit, zirkon, méně apatit, xenotim). V těchto minerálech, které se dostaly převážně do výplavů, je radioaktivní nerovnováha nepravděpodobná.

Další významná část U a Ra je vázána na větší minerální zrna. Protože izomorfní příměs uranu v hlavních minerálech je zanedbatelná, v úvahu přichází nejspíše sorpce na povrchu zrn, kde lze očekávat povlaky oxidů Fe a dalších povrchově aktivních látek, vzniklé již před zvětráním. Významný nositel U by tak mohl být alterovaný biotit. Tyto částice, kde je zřejmě nerovnováha ve prospěch U, převážně zůstávají v odkalených podílech. Také uraninit nebo jiné „primární“ uranové minerály tvoří velmi vzácná, a proto – pokud k obsahu U významně přispívají – poměrně velká zrna, která lze očekávat rovněž v odkalených podílech.

Část Ra je vázána na částice, které jsou koncentrovány opět ve výplavu, tedy o velikosti zřejmě několika  $\mu\text{m}$  až prvních desítek  $\mu\text{m}$ ; jde o hlavní příčinu nerovnováhy ve prospěch Ra ve výplavech. Mohlo by jít o oxidy-hydroxidy Mn, nasvědčuje tomu korelace Ba, chemicky blízkého radiu, s Mn v puklinových mineralizacích z vrtu PDM-1 (obr. 4 v barevné příloze č. 3) dle Chvátal et al. (2005).

Ve zvětralém granitu se připojují určité sekundární minerály U, nejspíše fosfáty / arseničnany. Jediné dva výplavy, v nichž byl detekován arsen (1/2 a 1/14), mají také nejvyšší obsah U. O významu arsenátu uranulu svědčí i korelace U a As v eluviích melechovského granitu (podle dat v práci Žáček & Páša 2006), která neexistuje v čerstvé hornině z vrtů (tato korelace je významná aspoň ve skupině hornin bohatších Al, tedy obsahujících více jemného podílu – obr. 3 v barevné příloze č. 3). Sekundární minerály byly koncentrovány ve výplavu.

Kromě velikosti jednotlivých pevných částic je třeba vzít v úvahu také možnost koagulace, hlavně jílových minerálů. Koagulace je jeden z možných mechanismů brzdících transport sekundárních minerálů uranu (příp. i jílových minerálů s různými sorbovanými prvky) v terénu.

Vznik radioaktivní nerovnováhy ještě před viditelným zvětráním horniny tedy nastává i v hloubkách přes 100 m. Z výsledků práce Chvátal et al. (2005) vyplývá, že také v blízkém vrtu Padamot se projevoval až do největších hloubek (přes 80 m) jak gravitační transport drobných zrn, tak i adsorpce uranu z roztoku na hydroxidy Fe, jak naznačují vysoké koncentrace U ve výplních puklin bohatých Fe (obr. 4 v barevné příloze č. 3).

## Závěr

Lze shrnout, že supergenní procesy ovlivnily chemické složení melechovského granitu i v hloubce přes 150 m, tedy hluboko pod vrstvou viditelného zvětrání. Radioaktivní nerovnováha dokazuje, že nejde o alterace starší než stovky tisíc let (i když zřejmě byly využity starší struktury). Vysoká koncentrace mnoha prvků soustředěných v horninotvorných akcesoriích ve výplavech podporuje hypotézu (Procházka et al. 2009), že tyto prvky jsou odstraňovány ze zvětrávacího profilu mechanickým transportem drobných minerálních zrněk.

Ve vrtu Mel-2 není tak dobře patrný vztah chemického složení granitů (resp. frakcí) k hloubce jako ve vrtu Mel-1. Souvisí to zřejmě s tím, že ve vrtu Mel-2 byly horniny více postiženy chloritizací a dalšími postmagmatickými přeměnami (viz též Breiter 2006), které (kromě karbonatizace) mohou mít podobný účinek jako zvětrání. Pro lepší odlišení supergenních alterací od vysokoteplotních by bylo vhodné, i přes zřejmé obtíže, blíže prozkoumat jemnozrnné a málo pevné sekundární minerály, které jsou podle všeho významné i v „nezvětralé“ hornině.

Velmi pravděpodobná přítomnost poměrně hojného sekundárního minerálu (nejspíše arsenátu) uranu částečně vysvětluje, proč je odtok uranu podle analýz povrchové vody poměrně malý. I když by se po okyselení vzorků vody drobné částice arseničnanu měly rozpouštět, dá se očekávat, že jejich významnější transport probíhá spíše epizodicky, zvláště pokud dochází k jejich koagulaci spolu s jílovými minerály. Odtok uranu (i mnoha dalších prvků) by tak mohl být významnější spíše při mimořádně silném proudění, kdy však nebývá vhodná doba pro odběr vzorků. Nicméně intenzivní odstraňování U ze systému spadalo spíše do období vzniku půdního profilu (Procházka et al. 2011).

## Poděkování

Práce byla finančně podpořena Správou úložišť radioaktivních odpadů (objednávka OV 2011-220). Za spolupráci při plavení děkujeme Dr. Františkovi Veselovskému, ČGS.

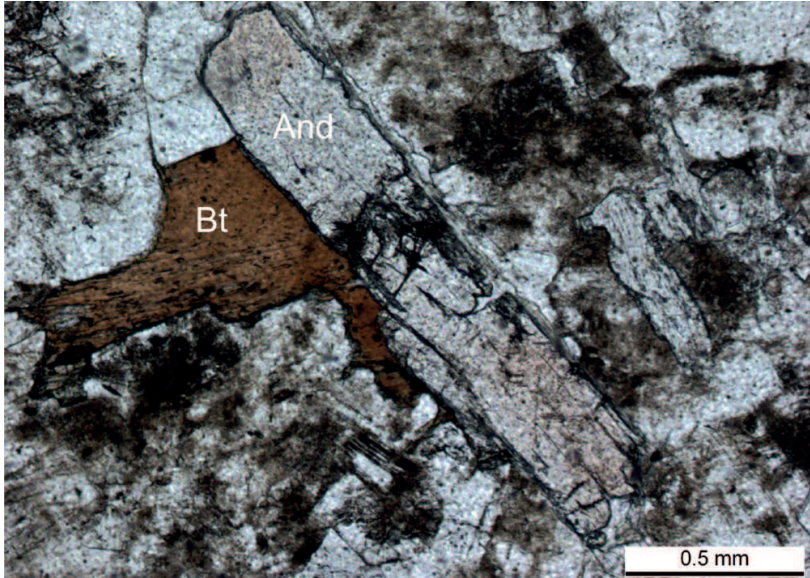
## Literatura

- Breiter K. (2006): Geologická dokumentace a vyhodnocení vrtných prací. Dílčí zpráva úkolu SÚRAO Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. – Ms. [Depon. in: Česká geologická služba.]
- Croll J. G. A. (2008): A new hypothesis for the development of blisters in asphalt pavements. – *Int. Jour. Pavement Engineering* 9/1: 59–67.
- Guthrie V. A. & Kleeman J. D. (1986): Changing uranium distributions during weathering of granite. – *Chemical Geology* 54/1–2: 113–126.
- Hanák J., Chlupáčová M., Daněk P. & Keršner Z. (2006): Fyzikální a geomechanické vlastnosti vzorků vrtných jader z druhé etapy výběru polygonů. Etapová zpráva projektu SÚRAO „Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa“. – Ms. [Depon. in: Česká geologická služba.]
- Chvátal M., Strnad L., Šebek O. & Zachariáš J. (2005): Contribution to the WP2 report “Melechov Massif, Czech Republic”, Geochemical part. – Ms. [Dílčí zpráva projektu PADAMOT., Depon. in: PřF UK, Praha.]
- Kalenda P. & Neumann L. (eds) (2011): Náklony, globální tektonika a predikce zemětřesení. – Česká geologie, Praha, 245 p.

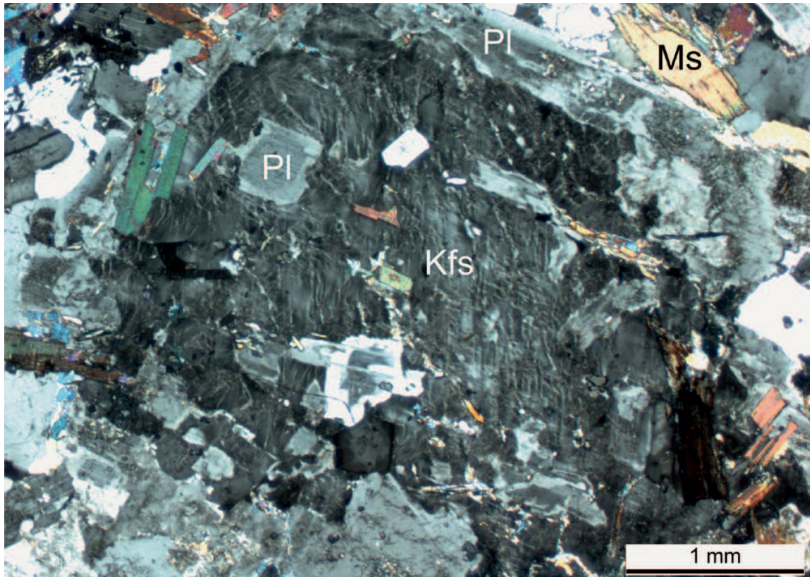
- Knésl I., Lukeš P., Dempírová L. & Kříbek B. (2009): Rychlé stanovení stopových prvků přenosnou rentgen-fluorescenční spektrometrií v geologickém výzkumu, při prospekci a v některých environmentálních aplikacích. – Zpr. Geol. Výzk. v roce 2008: 161–166.
- Middelburg J. J., van der Weijden C. H. & Woittiez J. R. W. (1988): Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. – Chem. Geol. 68: 253–273.
- Milodowski A. E. (ed.) (2005): Application of mineralogical, petrological and geochemical tools for evaluating the palaeohydrogeological evolution of the PADAMOT Study Sites. – PADAMOT Project technical report WP2, 228 p.
- Nesbitt H. W. & Markovics G. (1997): Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. – Geochim. Cosmochim. Acta 61: 1653–1670.
- Procházka V., Žáček M., Vlček V. & Langrová A. (2009): Chování některých prvků při zvětrávání granitoidů melechovského masívu. – Zpr. Geol. Výzk. v roce 2008: 189–195.
- Procházka V. (2010): Fosfáty a akcesorické oxidy ve vybraných granitoidech a pararulách moldanubické oblasti v jihovýchodních a jižních Čechách. – Ms., 87 p. [Disert. pr., depon. in: ÚGMNZ PŘF UK, Praha.]
- Procházka V., Uher P. & Matějka D. (2010): Zn-rich ilmenite and pseudorutile: subsolidous products in peraluminous granites of the Melechov Massif, Moldanubian Batholith, Czech Republic. – N. Jb. Miner. Abh. 2010/3: 249–263.
- Procházka V., Žáček M., Fottová D., Matějka D. & Štěpánová M. (2011): Některé vztahy mezi chemickým zvětráváním melechovského granitu a látkovou bilancí malého povodí Loukov. – Sbor. Jihočes. Muz. v Č. Budějovicích, Přír. Vědy 51: 5–20.
- Procházka V., Kašparec I. & Knésl I. (2012): Výzkum obsahů některých prvků a radionuklidů v různých frakcích z melechovského granitu za účelem hodnocení jejich mineralogie, chování při zvětrávání a následné migraci. – Ms., 22 p. [Závěrečná zpráva projektu pro SÚRAO. Depon. in: Georadis, Brno.]
- Žáček M. & Páša J. (2006): Detailní geochemický výzkum. Dílčí zpráva projektu SÚRAO „Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa.“ – Ms. [Depon. in: GEOMIN, Jihlava.]

*Došlo: 28. 2. 2013*

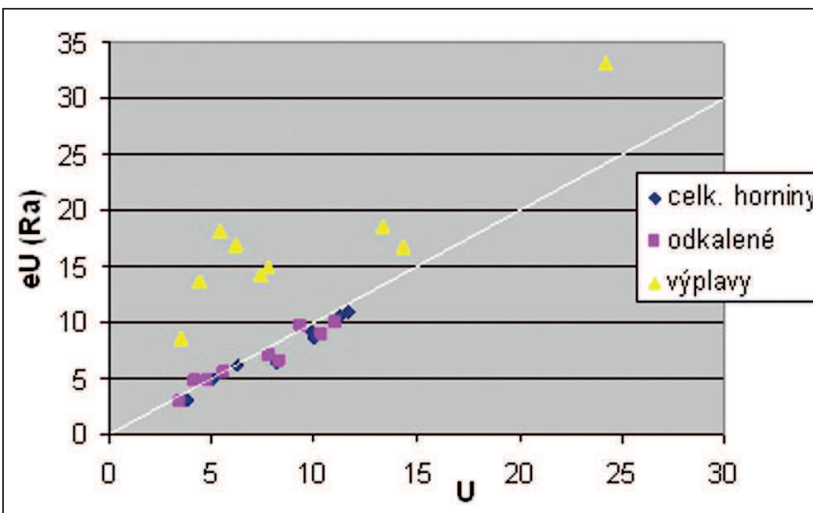
*Přijato: 15. 7. 2013*



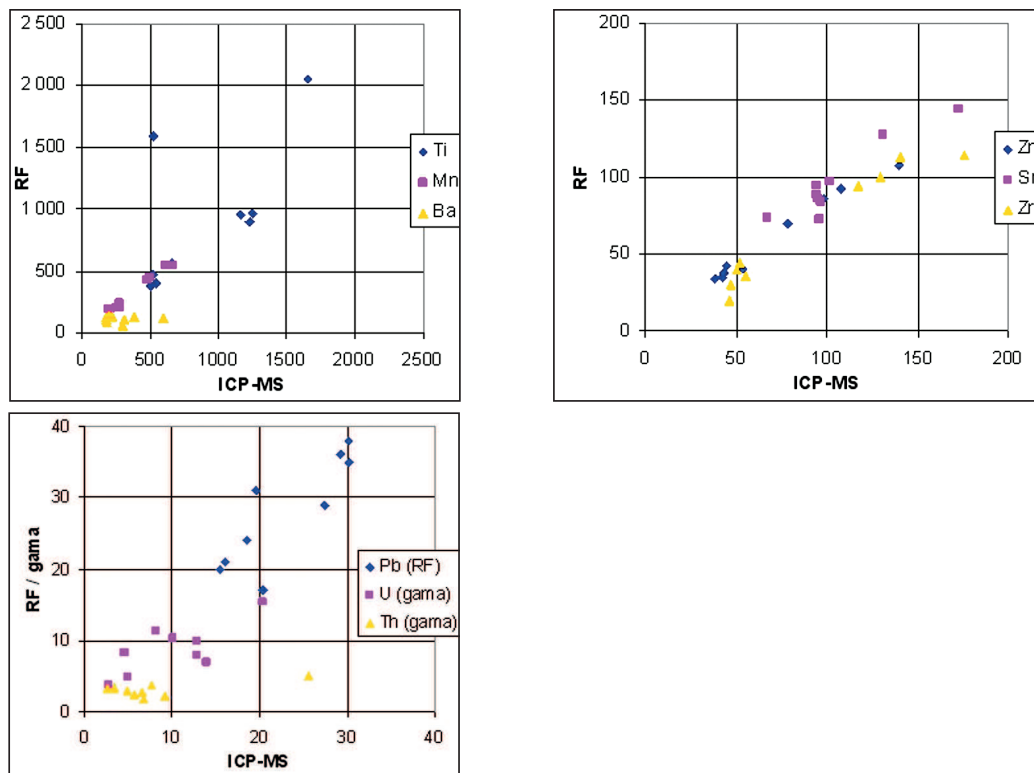
Obr. 4 – Magmatický andalusit (And) v dvojslídém leukogranitu (foto M. René 2013).  
 Fig. 4 – Magmatic andalusite (And) in two-mica leucogranite (photo by M. René 2013).



Obr. 5 – Vyrůstlice K-živce (Kfs) v dvojslídém porfyrickém granitu (PI – plagioklas, Ms – muskovit) (foto M. René 2013)  
 Fig. 5 – K-feldspar phenocryst (Kfs) in two-mica porphyritic granite (PI – plagioclase, Ms – muscovite) (photo by M. René 2013).

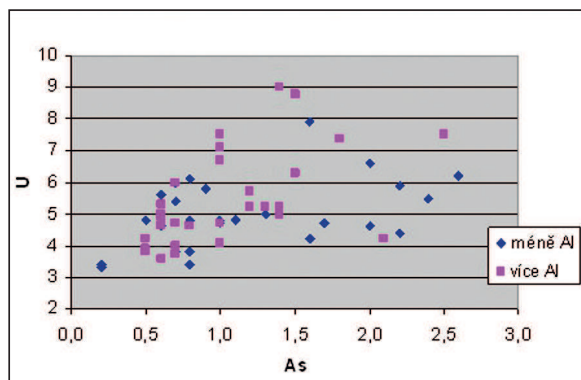


Obr. 1 – Vztah U a eU (Ra) (mg/kg; bílá linie vyznačuje radioaktivní rovnováhu).  
 Fig. 1 – Plot of U and eU (Ra) (ppm; the white line marks radioactive equilibrium).



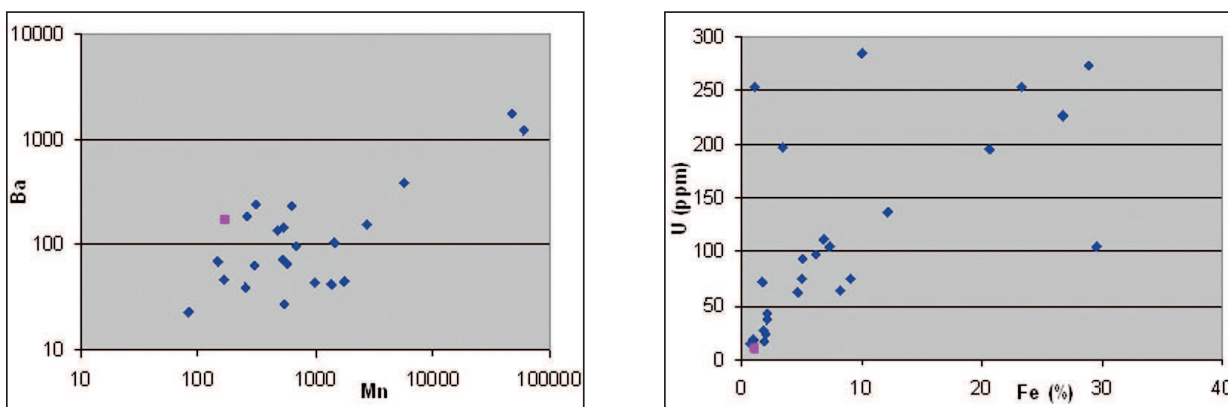
**Obr. 2** – Srovnání obsahů prvků (mg/kg) podle ICP-MS a rentgenfluorescence (přenosný analyzátor) nebo gamaspektrometrie.

**Fig. 2** – Comparison of element concentrations (mg/kg) determined by ICP-MS and by XRF (portable instrument) or by gamma-ray spectrometry.



**Obr. 3** – Vztah As a U ve zvětralém melechovském granitu (podle dat: Žáček et Páša 2006, rozděleno na skupinu zvětralin méně a více obohacenou o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; obsahy v mg/kg).

**Fig. 3** – Plot of As and U in weathered Melechov granite (whole rock; from data of Žáček et Páša 2006, divided into groups less and more enriched in Al; contents in ppm).



**Obr. 4** – Korelace Mn-Ba a Fe-U v puklinových výplních vrtu PDM-1 v granitu podobném melechovskému typu (data: Chvátal et al. 2005; fialově průměrný obsah v okolním granitu).

**Fig. 4** – Correlations Mn-Ba and Fe-U in fracture fillings of the borehole PDM-1 in a granite similar to the Melechov type (data of Chvátal et al. 2005; in violet mean content in the surrounding rock).