

POVRCHOVÁ GAMASPEKTROMETRICKÁ MĚŘENÍ PRŮZKUMNÝCH ÚZEMÍ LOKALIT KRAVÍ HORA A HORKA NAVRHOVANÝCH K VÝSTAVBĚ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU

SURFACE GAMMA SPECTROMETRIC MEASUREMENTS OF EXPLORATION AREAS
IN LOCALITIES KRAVÍ HORA AND HORKA PROPOSED FOR CONSTRUCTION
OF A DEEP GEOLOGICAL REPOSITORY OF RADIOACTIVE WASTE

RADIM CHARVÁT & JINDŘICH ŠTELCL

Abstract

Charvát, R., Štelcl, J. (2016): Povrchová gamaspektrometrická měření průzkumných území lokalit Kraví Hora a Horka navrhovaných k výstavbě hlubinného úložiště radioaktivního odpadu. – Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 101, 1-2, 65-74 (with English summary).

Surface gamma spectrometric measurements of exploration areas in localities Kraví Hora and Horka proposed for construction of a deep geological repository of radioactive waste

This paper focuses on the problem of finding a suitable location for a deep geological repository of radioactive waste. Several territories are considered for this purpose throughout Czech Republic. This research paper mostly focuses on surface monitoring of the concentration of radioactive elements at Kraví Hora and Horka areas, located in Moravia region. The values of elements K, U, Th and dose rate were measured by a portable gamma-ray spectrometer PGIS-128. The main goal of this research is to create a set of data which characterize the surface radioactivity of these localities before possible construction of a deep geological repository of radioactive waste.

Key words: Strážek Moldanubicum, Třebíč Pluton, Kraví Hora, Horka, deep geological repository of radioactive waste, gamma-spectrometry, dose rate, concentration of radionuclides

Radim Charvát, Bory 38, 594 61 Bory, Czech Republic, e-mail: charvat.radim@gmail.com

Jindřich Štelcl, Institute of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic; Department of Biology, Faculty of Education, Masaryk University, Poříčí 7, 603 00 Brno, Czech Republic, e-mail: stelcl@sci.muni.cz

1. ÚVOD

V současnosti nejvhodnějším řešením bezpečného ukládání vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivního odpadu je forma hlubinných úložišť umístěných ve vhodném geologickém prostředí. Plánováním, výběrem lokalit, výstavbou a provozem vlastních úložišť na území České republiky se aktuálně zabývá Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO).

Při volbě vhodné lokality je kladen mimořádný důraz na vlastnosti horninového prostředí. Úložiště by mělo být optimálně situováno v hloubce okolo 500 m pod povrchem, přičemž uvažovaným hostitelským prostředím jsou zpravidla horniny granitoidní povahy se střední teplotou 10 °C a předpokládaným tlakem na ukládací obalový soubor 20 MPa. Na základě uvedených podmínek bylo již dříve v rámci České republiky zvoleno celkem 7 vhod-

ných průzkumných území (SÚRAO, 2016). Dvěma z nich, prioritně uvažovaným lokalitám Kraví Hora (okr. Žďár nad Sázavou) a Horka (okr. Třebíč), je věnován tento článek.

V rámci obou území byla povrchově měřena přirozená radioaktivita přítomných hornin, která primárně souvisí s přítomností primordiálních radionuklidů. Přímým měřením byl zjišťován obsah K a dávkový příkon, nepřímo pak koncentrace U a Th, vyjadřované z tohoto důvodu v dalším textu jako eU a eTh.

Přestože nelze předpokládat, že případná výstavba hlubinného úložiště ovlivní povrchovou radiační situaci, výzkum vznikl jako bezprostřední reakce na obavy části občanů zúčastněných obcí z možných negativních dopadů úložiště na životní prostředí a nárůstu intenzity ionizujícího záření v příslušné oblasti.

2. GEOLOGICKÁ SITUACE PRŮZKUMNÝCH ÚZEMÍ

KRAVÍ HORA

Lokalita Kraví Hora se nachází v kraji Vysočina v okrese Žďár nad Sázavou, z části pak v Jihomoravském kraji v okrese Brno-venkov. Průzkumné území má tvar nepravidelného dvanáctiúhelníku (výměra 17,109 km²), který je na okrajích vymezen obcemi Habří, Bukov, Věžná a Olší, uvnitř se dále nachází obce Jabloňov, Střítež, Nivy, Moravecké Pavlovice a Drahonín.

Podle současného regionálně - geologického členění (MISAŘ *et al.*, 1983, CHLUPÁČ a ŠTORCH 1992) je studované území situováno ve východní části strážeckého moldanubika. Strážecké moldanubikum, tvořené pestrou skupinou moldanubika, je reprezentováno převážně katazonálně metamorfovaným sedimentárně-vulkanogenním horninovým komplexem, přepracovaným předpaleozoickou a variskou metamorfózou. Přítomné metamorfity (migmatity, ruly, granulity, amfibolity, serpentinity) odpovídají amfibolitové, mistry až granulitové facii.

Severní okraj jednotky je částečně překryt sedimenty křídý Dlouhé meze, hranicí s kutnohorsko-svrateckou oblastí je železnohorský zlom. Na V a SV tvoří hranici strážeckého moldanubika a svrateckého krystalinika tzv. muskovitová izograda, jižní hranici představuje trebičský pluton, jihovýchodní pak bitešský zlom. Za západní hranici je považována přibyslavská mylonitová zóna (MISAŘ *et al.*, 1983).

Horninové podloží lokality Kraví Hora je tvořeno především migmatity, biotitovými, cordierit-biotitovými a amfibol-biotitovými pararulami s proměnlivým stupněm migmatitizace. V těchto horninách se vyskytují polohy amfibolitů, mramorů, eklogitů a metamorfovaných vápenato-silikátových hornin. Při východním okraji jednotky (v oblasti styku se svrateckým krystalinikem) pak vystupuje rozsáhlejší těleso světlých granulitů s polohami serpentinizovaných peridotitů a ortorulových hornin. Tyto horninové komplexy byly post-tektonicky intrudovány amfibol-biotitovými melagranity až melasyenity (durbachity) drahonínského plutonu (stáří 339 Ma; VERNER *et al.*, 2009).

Studované území je v centrální části tvořeno granulitem, který je jen málo tektonicky porušen, a proto by se měla převážná část hlubinného úložiště nacházet právě v této oblasti. Při západní a východní straně granulitového tělesa se vyskytují zlomové struktury ssz. a s. směru. Podél nich vystupují tělesa pararul (nesoucí uranové zrudnění), migmatitů, amfibolitů a v menší míře i aplopegmatitů. Ve východní části průzkumného území, v údolí řeky Nedvědičky, se nachází těleso serpentinizovaného peridotitu u Věžné.

HORKA

Lokalita Horka se nachází v kraji Vysočina na území okresů Třebíč a Žďár nad Sázavou. Průzkumné území má tvar nepravidelného pětiúhelníku o výměře 28,26 km² a je vymezeno obcemi Oslavice, Osově, Budišov, Nárameč, Rudíkov a Vlčatín. Uvnitř průzkumného území se dále nachází obce Oslavička, Rohy, Vlčatín, Hodov a okrajově také Budišov.

Podle aktuálního regionálně-geologického členění Českého masivu (MISAŘ *et al.* 1983, CHLUPÁČ a ŠTORCH 1992) se zájmové území nachází v oblasti styku strážeckého a moravského moldanubika, větší část podloží popisované lokality je pak budována horninami trebičského plutonu. Jeho obecně nejrozšířenějším horninovým typem jsou amfibol-biotitové melasyenity (durbachity), křemenné melasyenity a melagranity (typ Čertovo břemeno).

Díky poměrně vysokému obsahu uranu a thoria v durbachitech vykazuje těleso trebičského plutonu v rámci celého Českého masivu nejvyšší hodnoty přirozené radioaktivity (MATOLÍN, 1970). Podle MATOLÍNA a CHLUPÁČOVÉ (1997) se dávkový příkon D_a plutonu pohybuje v rozmezí 150–200 nGy.h⁻¹, koncentrace draslíku v jeho horninách dosahují hodnot 3,5–5,5 %, uranu 6–12 ppm a thoria 25–50 ppm.

3. VZORKY A METODY

Stěžejní část výzkumu byla zaměřena na povrchové terénní zhodnocení přirozené radioaktivity studovaných lokalit, jejichž podloží je budováno látkově i stavebně variabilními horninovými typy. K vlastnímu měření byl použit přenosný gamaspektrometr PGIS – 128 (NUVIA a.s.) s měřitelným rozsahem energetického spektra (50 keV až 3 MeV). Jde o přístroj, jehož detektor o objemu 2,1 litrů je tvořen scintilačním krystalem NaI(Tl). Spektrometr byl standardně kalibrován pro přímé měření účinné koncentrace K (na základě koncentrace ⁴⁰K) a dávkového příkonu (nGy.h⁻¹), nepřímo byl na základě koncentrací dceřiných produktů stanoven obsah U a Th. Vzhledem k tomu, že prováděná terénní měření měla na obou lokalitách výhradně povrchový charakter, mohou být získané hodnoty v některých případech ovlivněny jak větší mocností a typem půdního pokryvu, tak i působením kosmického záření.

Z výsledků gamaspektrometrických měření byla stanovena hmotnostní aktivita ekvivalentního množství ²²⁶Ra, vypočtená na základě vztahu:

$$a_m = 12,35U + (1,43 \times 4,06Th) + (0,077 \times 313K),$$

do něhož jsou obsahy draslíku dosazovány v %, obsahy uranu a thoria v ppm (viz např. LOVBORG 1984, IAEA 2003).

Terénní měření probíhalo kontinuálně (režim walking) v liniích vymezených v rámci obou průzkumných území již v přípravné etapě výzkumu. Při volbě tras byl vždy kladen důraz na maximální plošné pokrytí zájmové oblasti a na určení potenciálních změn radioaktivity na rozhraní variabilních horninových typů nebo případných zlomových struktur. Uvedeným postupem byla v oblasti Kraví Hory mapována linie o délce přibližně 30 km, na lokalitě Horka linie dosahující délky 40 km.

Souběžně s měřením byly z průzkumného území Kraví Hora (KH001-KH018) i Horka (H001-H010) odebrány vzorky reprezentující základní horninové typy jejich podloží. V místě odběru vzorků bylo pro zpřesnění výsledků využito stacionárního měření (režim station). Odebrané vzorky byly makroskopicky popsány a v brusírně ÚGV PřF MU z nich byly za účelem podrobnější petrografické charakteristiky zhotoveny kryté výbrusy. Výbrusy byly studovány v procházejícím světle na polarizačním mikroskopu Olympus CX 41.

Celkem 17 petrograficky zhodnocených vzorků z obou lokalit (Kraví Hora 11, Horka 6) bylo podrceno na čelistovém drtiči BB 100 Mangan Retsch (ÚGV PřF MU). U takto upravených vzorků byly navíc kontrolně stanoveny obsahy radioaktivních prvků (K, eU a eTh) i v laboratoři na gamaspektrometru SG-1000 LAB (PřF UP Olomouc, analyzoval J. ZIMÁK).

4. VÝSLEDKY A DISKUSE

KRAVÍ HORA

V oblasti Kraví Hory je podloží tvořeno poměrně pestrou škálou horninových typů (obr. 1). Plošně nejčastěji se vyskytují metamorfované horniny granitoidního složení se střední hodnotou dávkového příkonu. V relativně menší míře se v průzkumném území vyskytují bazické a ultrabazické horniny, nad nimiž byla zaznamenána nízká až velmi nízká úroveň přirozené radioaktivity. Výsledky povrchového terénního měření jsou uvedeny v následujícím textu a sumarizovány v tab. 1., laboratorní data pocházející z jednotlivých odebraných vzorků reprezentujících podloží průzkumného území Kraví Hora shrnuje tab. 2. Údaje o přirozené radioaktivitě povrchu, jehož podloží je tvořeno níže uvedenými horninovými typy, jsou zřejmé z následujících odstavců. Relativně vysoká maxima draslíku zaznamenaná v nadloží některých horninových typů souvisí prokazatelně s mocností a charakterem měřeného půdního pokryvu.

amfibolit: Předpokládané nižší koncentrace sledovaných radionuklidů byly potvrzeny jak terénními, tak i laboratorními metodami. Od kontaktu s okolními horninami je zřejmý klesající trend koncentrací radionuklidů ve směru do centra amfibolitového tělesa. Naměřená rozpětí sledovaných veličin a vypočtený medián: K 0,2–2,9 hm. %, medián = 0,9 hm. %; eU 0,1–5,3 ppm, medián = 1,6 ppm; eTh 0,2–23,7 ppm, medián = 4,1 ppm; dávkový příkon 13,2–114,3 nGy.h⁻¹, medián = 38,3 nGy.h⁻¹; hmotnostní aktivita 6,2–178,0 Bq.kg⁻¹, medián = 47,0 Bq.kg⁻¹.

serpentinít (serpentinizovaný peridotit): Vyskytuje se pouze v sv. až vsv. části mapovaného území. Vlastní měření bylo uskutečněno v již nečinném serpentinitovém lomu Věžná. Naměřená rozpětí sledovaných veličin a vypočtený medián: K 0,1–2,7 hm. %, medián = 1,1 hm. %; eU 0,5–6,3 ppm, medián = 1,8 ppm; eTh 0,0–12,5 ppm, medián = 4,0 ppm; dávkový příkon 11,9–87,3 nGy.h⁻¹, medián = 44,1 nGy.h⁻¹; hmotnostní aktivita 11,0–118,3 Bq.kg⁻¹, medián = 47,1 Bq.kg⁻¹.

granulit: Granulit je reprezentován jedním tělesem v centrální části průzkumného území. Distribuce eU a eTh narůstá k severu, zatímco koncentrace K je v celém průběhu tělesa přibližně stejnoměrná, pouze směrem k jihu a podél hranice s migmatitem lze pozorovat její nárůst. Koncentrace draslíku se pohybují v rozmezí 0,3–4,7 hm. %, medián je 2,4 hm. %. Obsahy uranu ve studované oblasti dosahují hodnot od 0,1 do 27,4 ppm, medián činí 1,9 ppm. Vyšší koncentrace byly zaznamenány především v sv. části území poblíž kontaktu s migmatitem. Thorium se vyskytuje v rozmezí 0,4–17,8 ppm, medián je 4,8 ppm. Dávkový příkon charakterizují hodnoty v rozmezí 23,9–203,0 nGy.h⁻¹, s mediánem reprezentovaným hodnotou 69,0 nGy.h⁻¹. Hraniční hodnoty hmotnostní aktivity jsou 17,8–380,7 Bq.kg⁻¹, její medián dosahuje 55,4 Bq.kg⁻¹.

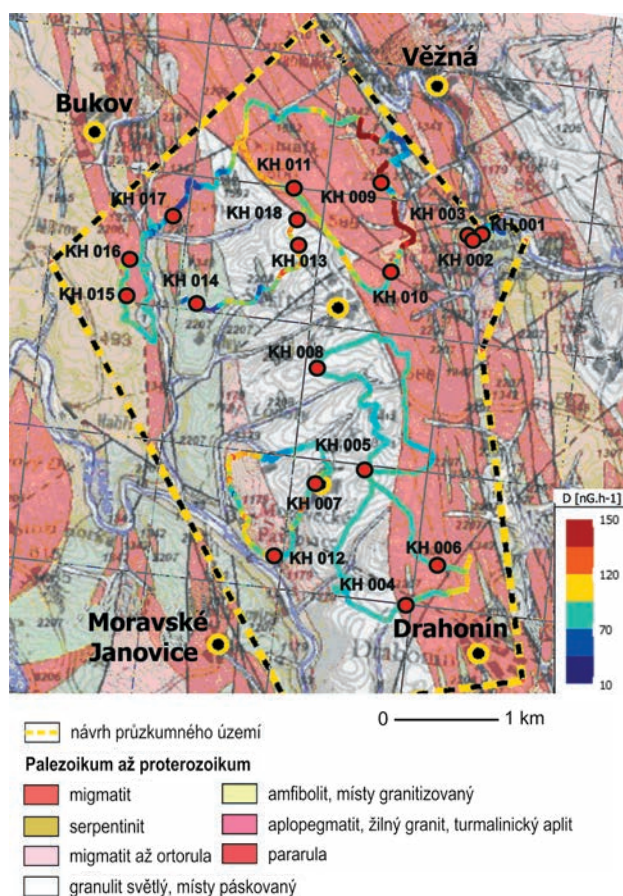
migmatit: Je reprezentován dvěma tělesy hraničícími na východě i na západě s granulitem. Zatímco v severní části průzkumného území lze sledovat nárůst koncentrací K, eU, eTh, jižním směrem je naopak možné zaznamenat jejich pokles. Naměřená rozpětí sledovaných veličin a vypočtený medián: K 0,7–3,6 hm. %, medián = 2,3 hm. %; eU 0,2–7,0 ppm, medián = 2,5 ppm; eTh 0,7–18,3 ppm, medián = 6,8 ppm; dávkový příkon 43,3–124,1 nGy.h⁻¹, medián = 74,3 nGy.h⁻¹; hmotnostní aktivita 17,2–174,2 Bq.kg⁻¹, medián = 75,3 Bq.kg⁻¹.

pararula: Vyskytuje se především ve východní části průzkumného území jako těleso protažené ve směru SSZ-JJV podél hranice s migmatitem. Naměřená rozpětí sledovaných veličin a vypočtený medián: K 0,3–3,7 hm. %, medián = 1,3 hm. %; eU 0,2–34,8 ppm, medián = 2,9 ppm; eTh 0,9–17,8 ppm, medián = 8,5 ppm; dávkový příkon 24,8–254,1 nGy.h⁻¹, medián = 71,3 nGy.h⁻¹; hmotnostní aktivita 19,8–470,8 Bq.kg⁻¹, medián = 91,0 Bq.kg⁻¹.

ortorula až migmatit: Ortorula byla měřena na styku se západním okrajem granulitového tělesa, kde byl zaznamenán značný nárůst koncentrací všech sledovaných radionuklidů. Naměřená rozpětí sledovaných veličin a vypočtený medián: K 0,5–4,2 hm. %, medián = 2,8 hm. %; eU 0,1–17,2 ppm, medián = 2,7 ppm; eTh 0,9–14,6 ppm, medián = 7,7 ppm; dávkový

vý příkon 31,3–158,2 nGy.h⁻¹, medián = 85,4 nGy.h⁻¹; hmotnostní aktivita 23,4–239,9 Bq.kg⁻¹, medián = 91,5 Bq.kg⁻¹.

aplopegmatit: Vyskytuje se v severovýchodní části mapovaného území, kde byl ve srovnání s okolními horninami pozorován strmý nárůst jak koncentrací sledovaných radionuklidů, tak i celkového dávkového příkonu. Přes prvotní předpoklad, že tento nárůst může souviset s využitím hlušinového materiálu pocházejícího z uranových dolů Olší nebo Rožná při úpravě lesních cest, byly vyšší koncentrace měřených prvků zaznamenány v jednotlivých horninových vzorcích i pomocí provedené laboratorní gamaspektrometrie. Naměřená rozptětí sledovaných veličin a vypočtený medián: K 0,8–2,6 hm. %, medián = 1,6 hm. %; eU 0,6–33,7 ppm, medián = 19,2 ppm; eTh 1,7–12,9 ppm, medián = 6,7 ppm; dávkový příkon 43,3–242,8 nGy.h⁻¹, medián = 158,5 nGy.h⁻¹; hmotnostní aktivita 36,5–459,9 Bq.kg⁻¹, medián = 279,5 Bq.kg⁻¹.



Obr. 1. Místa odběru vzorků na lokalitě Kraví Hora, průběh měřených tras je v mapě vyjádřen prostřednictvím hodnot dávkového příkonu. Sestaveno s využitím geologické mapy 1 : 50 000, list 24-13 Bystřice nad Pernštejnem (STÁRKOVÁ 1994).

Fig. 1. Sampling points on the Kraví Hora area, the measured route is displayed by using the dose rate. Compiled by using of geological map 1 : 50 000, sheet 24-13 Bystřice nad Pernštejnem (STÁRKOVÁ 1994).

Tabulka 1. Výsledky povrchových terénních gamaspektrometrických měření průzkumného území Kraví Hora (terénní data představují medián vypočtený ze všech hodnot, které byly povrchově naměřeny nad konkrétním typem horniny).

Table 1. Results of surface field gamma-spectrometric measurements of exploration area Kraví Hora (field data represent the median calculated from all the values measured over a specific rock type).

		K	eU	eTh	dávkový příkon D	a _m
		[hm. %]	[ppm]	[ppm]	[nGy·h ⁻¹]	[Bq·kg ⁻¹]
amfibolit	medián	0,9	1,6	4,1	38,3	47,0
	minimum	0,2	0,1	0,2	13,2	6,2
	maximum	2,9	5,3	23,7	114,3	178,0
serpentinit	medián	1,1	1,8	4,0	44,1	47,1
	minimum	0,1	0,5	0,0	11,9	11,0
	maximum	2,7	6,3	12,5	87,3	118,3
granulit	medián	2,4	1,9	4,8	69,0	55,4
	minimum	0,3	0,1	0,4	23,9	17,8
	maximum	4,7	27,4	17,8	203,0	380,7
migmatit	medián	2,3	2,5	6,8	74,3	75,3
	minimum	0,7	0,2	0,7	43,3	17,2
	maximum	3,6	7,0	18,3	124,1	174,2
pararula	medián	1,3	2,9	8,5	71,3	91,0
	minimum	0,3	0,2	0,9	24,8	19,8
	maximum	3,7	34,8	17,8	254,1	470,8
ortorula/migmatit	medián	2,8	2,7	7,7	85,4	91,5
	minimum	0,5	0,1	0,9	31,3	23,4
	maximum	4,2	17,2	14,6	158,2	239,9
aplopegmatit	medián	1,6	19,2	6,7	158,5	279,5
	minimum	0,8	0,6	1,7	43,3	36,5
	maximum	2,6	33,7	12,9	242,8	459,9

Tabulka 2. Výsledky terénní a laboratorní gamaspektrometrie horninových vzorků odebraných na lokalitě Kraví Hora (terénní hodnoty odpovídají mediánu ze 400 jednotlivých měření v okolí odběru vzorku).

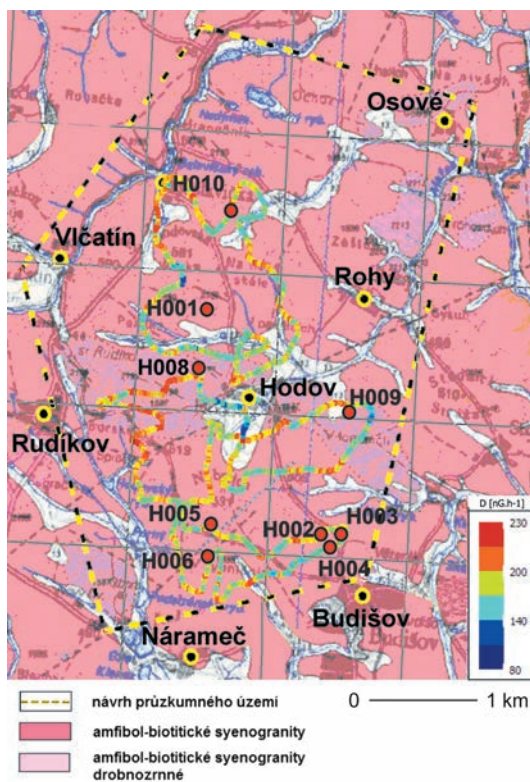
Table 2. Results of field and laboratory gamma-spectrometric measurements of rock samples taken from the area Kraví Hora (field values correspond to a median of 400 individual measurements in the vicinity of sampling area).

		K [%]		eU [ppm]		eTh [ppm]		D[nGy·h ⁻¹]
		terén	labor.	terén	labor.	terén	labor.	terén
KH001	serpentinit	0,4	0,0	2,0	0,9	2,4	0,1	30,9
KH004	migmatit	2,7	3,4	1,7	8,2	6,5	2,1	70,8
KH005	granulit	3,0	4,9	1,6	1,3	4,0	0,3	71,4
KH008	granulit	2,0	2,9	1,3	1,5	3,4	0,7	57,4
KH009	aplopegmatit	1,5	4,3	2,9	14,4	8,1	5,4	74,7
KH010	pararula	2,6	0,4	7,4	1,1	7,1	0,1	102,4
KH011	migmatit	2,2	5,0	4,0	2,9	8,8	0,8	91,6
KH012	rula	2,9	0,3	2,1	0,7	7,0	0,0	74,8
KH014	amfibolit	1,3	0,7	2,1	2,6	6,8	0,5	45,9
KH016	migmatit	1,48	4,6	2,7	3,2	9,4	0,4	78,0
KH017	pararula	1,3	4,1	1,5	13,5	6,9	9,3	52,3

HORKA

V celém průzkumném území dominují jemnozrné a středně až hrubě zrnité amfibol-biotitové syenogranity třebíčského plutonu (obr. 2). V kontrastu s Kraví Horou vykazuje povrch průzkumného území Horka vyšší obsahy sledovaných radionuklidů. Výsledky povrchového terénního měření jsou uvedeny v následujícím textu a sumarizovány v tab. 3, laboratorní data pocházející z jednotlivých odebraných vzorků reprezentujících podloží průzkumného území Horka shrnuje tab. 4. Údaje o přirozené radioaktivitě povrchu, jehož podloží tvoří níže uvedené horninové typy, jsou zřejmě z následujících odstavců.

amfibol-biotitový syenogranit (středně až hrubě zrnitý): Tento typ dominuje v převážné části průzkumného území. Předpokládané vyšší až velmi vysoké koncentrace přirozených radioaktivních prvků byly v jeho případě zaznamenány v celém průběhu terénního i laboratorního měření. Příčinou je pravděpodobně jak mimořádně vysoké zastoupení draselných živeců v hornině, tak i přítomné akcesorické minerály. Draslík byl u popisovaného horninového typu zaznamenán v množství 1,0–5,8 hm. %, medián 3,4 hm. %. Obsahy uranu kolísají v rozmezí 1,6–20,6 ppm, medián 6,1 ppm. Koncentrace thoria dosahují hodnot 7,5–59,0 ppm, medián 27,4 ppm. Dávkový příkon leží v rozmezí 85,8–308,1 nGy.h⁻¹, medián 175,5 nGy.h⁻¹. Vypočtená hmotnostní aktivita se nachází v intervalu od 91,2 do 531,7 Bq.kg⁻¹, medián 239,6 Bq.kg⁻¹.



Obr. 2. Místa odběru vzorků na lokalitě Horka, průběh měřených tras je v mapě vyjádřen prostřednictvím hodnot dávkového příkonu. Sestaveno s využitím geologické mapy 1 : 50 000, list 23-42 Třebíč (VESELÁ *et al.* 1987) a 24-31 Velké Meziříčí (MISAŘ 1997).

Fig. 2. Sampling points within the Horka area, the measured route is displayed by using the dose rate. Compiled by using of geological map 1 : 50 000, sheet 23-42 Třebíč (VESELÁ *et al.* 1987) and 24-31 Velké Meziříčí (MISAŘ 1997).

amfibol-biotitový syenogranit (drobnozrný): Nachází se ve střední části průzkumného území ve formě protáhlého tělesa západního směru. Jeho minerální složení vykazuje podobnost s okolním durbachitem, již makroskopicky lze pozorovat vyšší přítomnost amfibolu. Měřená radioaktivita tohoto horninového typu dosahuje vyšších hodnot zejména v západní části průzkumného území, v níž byly potvrzeny celkově vyšší obsahy přirozených radioaktivních prvků než v části východní, a to i v porovnání s durbachity hrubozrného charakteru. Obsahy draslíku se v hornině pohybují v rozsahu 0,7–5,2 hm. %, medián 3,2 hm. %. Naměřené hodnoty uranu se nacházejí v rozmezí 1,7–13,7 ppm, medián 5,9 ppm. Koncentrace thoria jsou 6,9–45,3 ppm, medián 27,1 ppm. Dávkový příkon leží mezi 80,8–250,5 nGy.h⁻¹, medián je 173,7 nGy.h⁻¹. Vypočtené hmotnostní aktivity se nachází v intervalu od 90,6 do 389,6 Bq.kg⁻¹, medián 237,2 Bq.kg⁻¹.

Tabulka 3. Výsledky povrchových terénních gamaspektrometrických měření nad strukturálně odlišnými varietami durbachitů z průzkumného území Horka (terénní data představují medián vypočtený ze všech hodnot, naměřených nad konkrétním typem horniny).

Table 3. Results of surface field gamma-spectrometric measurements structurally different varieties durbachites of the exploration area Horka (field data represent the median calculated from all the values measured over a specific rock type).

		K	eU	eTh	dávkový příkon D	a _m
		[hm. %]	[ppm]	[ppm]	[nGy·h ⁻¹]	[Bq·kg ⁻¹]
středně zrnitý durbachit	medián	3,4	6,1	27,4	175,5	239,6
	minimum	1,0	1,6	7,5	85,8	91,2
	maximum	5,8	20,6	59,0	308,1	531,7
drobnozrný durbachit	medián	3,2	5,9	27,1	173,7	237,2
	minimum	0,7	1,7	6,9	80,8	90,6
	maximum	5,2	13,7	45,3	250,5	389,6

Tabulka 4. Výsledky terénní a laboratorní gamaspektrometrie horninových vzorků odebraných na lokalitě Horka (terénní hodnoty odpovídají mediánu ze 400 jednotlivých měření v okolí odběru vzorku).

Table 4. Results of field and laboratory gamma-spectrometric measurements of rock samples taken from the area Horka (field values correspond to a median of 400 individual measurements in the vicinity of sampling).

		K [%]		eU [ppm]		eTh [ppm]		D [nGy·h ⁻¹]
		terén	laboratoř	terén	laboratoř	terén	laboratoř	terén
H001	durbachit	3,5	6,2 ± 0,2	6,0	15,1 ± 0,3	29,1	49,9 ± 0,8	188,0
H004	durbachit	2,9	6,1 ± 0,2	5,5	6,2 ± 0,3	32,0	42,8 ± 0,8	141,0
H006	durbachit	3,3	6,0 ± 0,1	3,1	5,6 ± 0,3	21,8	40,7 ± 0,7	147,9
H008	durbachit	3,5	6,2 ± 0,2	3,1	15,6 ± 0,3	31,2	45,1 ± 0,9	183,4
H009	durbachit	3,8	6,4 ± 0,1	6,8	14,3 ± 0,3	31,2	50,6 ± 0,8	187,5
H010	aplit	3,2	4,7 ± 0,1	3,7	4,5 ± 0,2	18,6	16,2 ± 0,5	187,5

5. ZÁVĚR

Hodnocení přirozené radioaktivity horninového prostředí na průzkumných lokalitách Kraví Hora a Horka vychází z 66 231 terénních gamaspektrometrických měření (29221 - Kraví Hora, 37010 - Horka) provedených pomocí gamaspektrometru PGIS - 128 (výrobce PICO ENVIROTEC INC.).

Podloží průzkumného území Kraví Hora je budováno horninami vykazujícími v rámci Českého masivu nízkou až střední úroveň přirozené radioaktivity. Zjištěné hodnoty odpovídají údajům publikovaným MATOLÍNEM (1970), MANOVOU, MATOLÍNEM (1995) a MATOLÍNEM, CHLUPÁČOVOU (1997). Úseky, jejichž podloží budují bazické horniny zastoupené amfibolitem a serpentinitem vykazují nízkou přirozenou radioaktivitu, která od středu těles vzrůstá k jejich okrajům, což poukazuje na interakce s okolními horninami. V místech, kde je podloží tvořeno granulity, migmatity a rulami, lze tyto z hlediska mediánu dávkového příkonu ($70\text{--}80\text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) řadit do kategorie hornin se střední úrovní přirozené radioaktivity. V nadloží granulitového tělesa se dávkový příkon a koncentrace uranu i thoria zvyšují k severu, naopak k východu a k jihovýchodu stoupá v hornině obsah draslíku. Nad komplexem pararu a východní části průzkumného území narůstá na měřeném povrchu koncentrace radionuklidů směrem k východu. Podél zlomové struktury směru SSZ-JJV lze ve srovnání s okolím konstatovat výrazně vyšší obsah uranu, což může pravděpodobně souviset s uranovým zrudněním na ložisku Rožná-Olší. Radioaktivita povrchu v oblasti, jejíž podloží tvoří migmatity, vzrůstá ve studovaném průzkumném území směrem k severu až severozápadu.

Syenogranity trebičského plutonu (lokalita Horka) jsou v rámci horninového prostředí Českého masivu nositelem extrémně vysoké přirozené radioaktivity. Příčinou je pravděpodobně jak vysoký podíl draselných živců, tak i některých akcesorických minerálů jako jsou zirkon, monazit nebo thorit (MATOLÍN 1970; MATOLÍN a CHLUPÁČOVÁ 1997). Hodnoty dávkového příkonu a koncentrace K, eU a eTh jsou vyšší v oblasti, jejíž podloží je budováno drobnozrnnými syenogranity a dále rovněž v jihozápadní a severozápadní části průzkumného území.

Rozdílné obsahy laboratorně analyzovaných přirozených radionuklidů ve srovnání s výsledky terénní gamaspektrometrie (tab. 2, tab. 4) lze interpretovat odlišnou velikostí hodnocených datových souborů získaných vždy pro konkrétní horninové vzorky/typy (laboratorní gamaspektrometrie 1 měření, terénní gamaspektrometrie 400 měření). Autoři jsou si vědomi, že obsahy K, eU a eTh naměřené v jednotlivých částech studovaných průzkumných území nemusí vždy reprezentovat množství příslušných radionuklidů v jednotlivých, v předchozí části článku uváděných, horninových typech, budujících podloží. Zásadní roli zde bezpochyby hrají i zvětrávací procesy a koncentrace těchto prvků v půdách, které mohou být dosti odlišné od obsahů v samotných matečných horninách, jak uvádí např. J. ZIMÁK (2015). Podle uvedeného autora nemusí vždy půdy a zvětralinový plášť nutně obsahovat nižší zastoupení přirozených radioaktivních prvků ve srovnání se zvětrávacími procesy neovlivněnou podložní horninou. Zásadní význam má v této souvislosti poznatek, kdy půdy vyvinuté na horninovém podloží s nízkým obsahem přirozených radioaktivních prvků (např. serpentinitů), mohou vykazovat i relativně vysokou (často i řádově) přirozenou radioaktivitu. V případě terénních měření jsou výsledky ovlivněny i působícím kosmickým zářením.

V období skutečného výzkumu (2013–2014) bylo průzkumné území Kraví Hora zrušeno a další možnosti jeho následného geologického průzkumu se tak staly nejisté. Změna nastala koncem roku 2015, kdy byly vyplaceny finanční příspěvky všem zúčastněným obcím, do jejichž katastru spadá průzkumné území pro zvláštní zásah do zemské kůry k ukládání radioaktivních odpadů v podzemních prostorech, kterou vláda ČR schválila s činností od 20. 12. 2015. Tyto příspěvky obce obdržely za první etapu geologického průzkumu, který by měl být zahájen na jaře 2016. Jeho první etapa zahrnuje povrchové geochemické a geofyzikální průzkumy bez hlubokých vrtů (SÚRAO, 2015). Výsledkem by měl být výběr míst pro realizaci několika vrtů plánovaných do hloubky cca 500 m a pro jeden vrt realizovaný do hloubky 1000 m, na jejichž základě bude následně vymezen podpovrchový prostor (rozloha 3–5 km²) sloužící perspektivně pro výstavbu vlastního hlubinného úložiště (SÚRAO, 2016).

Poděkování

Předložená práce vznikla za finanční podpory Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky v rámci projektu „Výzkumný tým pro ukládání jaderných odpadů a jadernou bezpečnost“ (CZ.1.07/2.3.00/20.0052).

LITERATURA

- CHLUPÁČ I., ŠTORCH P. (eds.) (1992): Regionálně geologické dělení Českého masivu na území České republiky. - *Čas. Min. Geol.* 37, 4, 257-275.
- IAEA, International Atomic Energy Agency, (2003): Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. - Vienna, 173 pp.
- LOVBORG, L., (1984): The calibration of portable and airborne gamma-ray spectrometers - theory, problems, and facilities. - Risø National Lab. Rep., M-2456, Risø, Denmark.
- MANOVÁ, M., MATOLÍN, M., (1995): Radiometrická mapa České republiky 1 : 500 000. - ČGÚ, Praha.
- MATOLÍN, M., (1970): Radioaktivita hornin Českého masivu. - Academia, Praha.
- MATOLÍN, M., CHLUPÁČOVÁ, M., (1997): Radioaktivní vlastnosti hornin. - In: Kobr M. a kol.: Petrofyzika, Vydavatelství Karolinum. 109-126. Praha.
- MÍŠAŘ, Z., (1997): Geologická mapa ČR 1: 50 000, list 24-31 Velké Meziříčí - ČGÚ, Praha.
- MÍŠAŘ, Z., DUDEK, A., HAVLENA, V., WEISS, J., (1983): Geologie ČSSR I. Český masiv. - SPN. Praha.
- STÁRKOVÁ, I., (1994): Geologická mapa ČR 1: 50 000, list 24-13 Bystřice nad Pernštejnem - ČGÚ, Praha.
- SÚRAO, Správa úložišť radioaktivních odpadů (2015): Výběr lokality. - On-line: <http://www.surao.cz/cze/O-SURAO/Aktuality/Prispevky-za-pruzkum-dostane-40-obci-jeste-do-konce-roku-2015>, dne 29. 12. 2015.
- SÚRAO, Správa úložišť radioaktivních odpadů (2016): Výběr lokality. - On-line: <http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Vyber-lokality>, dne 2. 1. 2016.
- VERNER, K., BURIÁNEK, D., VRÁNA, S., VONDROVIC, L., PERTOLDOVÁ, J., HANŽL, P., NAHODILOVÁ, R., (2009): Tectonometamorphic features of geological units along the northern periphery of the Moldanubian Zone (Bohemian Massif). - *Journal of Geosciences* 54, 2, 87-100.
- VESELÁ, M. et al. (1987): Geologická mapa ČSSR 1 : 50 000, list 23-42 Třebíč. - Ústř. Úst. Geol., Praha.
- ZIMÁK, J., (2015): Vztah mezi přirozenou radioaktivitou hornin a púd na nich vytvořených - základní problém interpretace dat získaných leteckou a terénní gamaspektrometrií. - *Geol. výzk. Mor. Slez.*, 22, 1-2, 80-83.