

Metodika pro využívání referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický průzkum

Schválená metodika

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze
Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

Autoři:

RNDr. Ondřej Šálek, PhD.
Ing. Václav Štěpán, PhD.
doc. Ing. Jaroslav Klusoň, CSc.
RNDr. Lenka Thinová, Ph.D.

Výsledek projektu:

Referenční plochy pro letecký bezpilotní radiometrický průzkum (SS06010467)
financovaného se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního
prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život

Účinnost: duben 2026

Interval, ve kterém bude řešitel ověřovat svou schopnost danou metodiku
používat: 2 roky

Interval, ve kterém bude řešitel ověřovat platnost metodiky: 5 let

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl metodiky	2
3 Metodika využití referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický průzkum	3
3.1 Požadavky na referenční plochy	3
3.1.1 Geologická charakteristika referenčních ploch	3
3.1.2 Geometrie plochy a vegetační pokryv	3
3.1.3 Legislativní podmínky provozu BLP a vlastnické vztahy k pozemkům	3
3.2 Charakteristika referenčních ploch	4
3.2.1 Draslíková referenční plocha–Zbytiny	4
3.2.2 Uranová referenční plocha–Kunžak	4
3.2.3 Thoriová referenční plocha–Slavoňov	5
3.2.4 Cesiová referenční plocha–Černé Údolí	5
3.2.5 Stanovení pozadí na vodní ploše	6
3.3 Metodika využití referenčních ploch	6
3.3.1 Pozemní monitoring	6
3.3.2 Letecký monitoring	8
3.3.3 Zpracování a předání dat	9
3.3.4 Poznámka k použitým veličinám	9
3.3.5 Vyhodnocení porovnávacího měření	9
3.3.6 Organizace porovnávacích měření na referenčních plochách	11
3.4 Novost metodiky a její srovnání s příbuznými metodikami	11
4 Uplatnění schválené metodiky	13

1. Úvod

Metody terénního radiometrického průzkumu se rozvíjely v minulých desetiletích pro potřeby geologických, environmentálních i bezpečnostních aplikací. Byly vyvinuty metody radiometrického průzkumu ve vrtech, na povrchu země pomocí přenosných přístrojů nebo automobilových systémů a ve vzduchu s pilotovanými letouny nebo vrtulníky (International Atomic Energy Agency (IAEA), 1991) (Erdi-Krausz et al., 2003). V posledním desetiletí se rozšířilo využití bezpilotních leteckých systémů (BLS) pro radiometrický průzkum, které vyplňuje mezeru mezi pozemními průzkumy a leteckými průzkumy s pilotovanými letadly.

Metodika měření, kalibrace a zpracování dat byla detailně rozvinuta pro klasické metody pilotovaného leteckého gama spektrometrického průzkumu a je dobře zdokumentována v literatuře (Erdi-Krausz et al., 2003). Tyto metody jsou ale jen omezeně aplikovatelné pro radiometrické bezpilotní měření, neboť způsob provádění bezpilotního průzkumu a přístrojové vybavení jsou odlišné. Rozdíly jsou zejména ve velikosti a citlivosti detektoru, rychlosti a výšce letu nad terénem.

Metodické postupy pro měření a zpracování dat bezpilotních radiometrických měření a pro kalibraci použitých přístrojů se v současnosti prudce rozvíjejí a nemají ustálenou podobu. Zatím nejobsáhlejší publikace na toto téma je (van der Veeke, 2023). V ČR se radiometrii s využitím BLS především zabývají schválené metodiky (Černý et al., 2016; Vošahlík et al., 2021), soustředí se ale na měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v odlišném kontextu.

Významnou hodnotou radiometrických dat je jejich porovnatelnost mezi různými oblastmi, autory, detekčními systémy a časovými obdobími, která může být zajištěná pouze přesnou kalibrací. Správnost zpracování dat a kalibrace je proto potřebné pravidelně ověřovat pomocí fyzického standardu.

2. Cíl metodiky

Schválená metodika se zabývá standardizací využití měřících bezpilotních systémů pro účely detekce, mapování a hodnocení výskytu přírodních i umělých radionuklidů v životním prostředí. Cílem schválené metodiky je pomocí přírodních fyzických standardů (referenčních ploch) definovat postup ověření správné funkce a kalibrace leteckých bezpilotních radiometrických systémů a korektního zpracování měřených dat.

K naplnění tohoto cíle byly založeny čtyři referenční plochy s vhodným zastoupením přírodních radionuklidů K, U a Th a umělého radionuklidu ^{137}Cs , které se tímto stávají součástí systému standardizace radiometrických dat v ČR. Součástí metodiky je také způsob stanovení pozadí detekční techniky na vodní ploše. Referenční plochy umožňují porovnání výsledků stanovení radiometrických veličin, včetně celého řetězce zpracování dat a zohlednění vlivu prostředí.

Schválená metodika přispívá ke zvýšení úrovně standardizace dat a zvýšení spolehlivosti a přesnosti získávaných radiometrických údajů.

3. Metodika využití referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický průzkum

3.1 Požadavky na referenční plochy

3.1.1 Geologická charakteristika referenčních ploch

Referenční plochy byly založeny na geologických jednotkách se zvýšeným zastoupením jednoho ze čtyř zájmových radionuklidů K, U, Th a ^{137}Cs a jeho zvýšeném poměru k ostatním radionuklidům. V případě uranu a thoria jde o mateřské izotopy přeměnových řad, jejichž koncentrace měříme nepřímo pomocí gama záření členů přeměnové řady, přičemž předpokládáme existující radioaktivní rovnováhu v přeměnových řadách. Radioaktivní rovnováha v přeměnových řadách byla ověřena pomocí laboratorních gama spektrometrických analýz odebraných vzorků. Výpočet koncentrací radionuklidů ze spekter gama záření je závislý na kvalitě spektra a míře interference signálů od jednotlivých izotopů. Smyslem požadavku čtyř ploch pro čtyři radionuklidy K, U, Th a ^{137}Cs je maximalizace přesnosti stanovení každého zájmového prvku. Požadovanou charakteristikou referenčních ploch je také homogenní rozložení zájmového prvku na ploše, tedy nízký rozptyl koncentrací radionuklidů v rámci plochy.

3.1.2 Geometrie plochy a vegetační pokryv

Kalibrace přenosných gama spektrometrů pro výpočet koncentrací radionuklidů se provádí za předpokladu rovinné geometrie, avšak přírodní referenční plochy nemohou být dokonale rovné. Ideální je co nejvíce vyrovnaný povrch; mírný a jednotný sklon je přijatelný.

Šířkový dosah gama záření do detektoru závisí na výšce detektoru nad zemí. V případě bezpilotních prostředků uvažujeme výšky letu v prvních desítkách metrů. Literatura uvádí, že pro detektor umístěný ve výšce 40 m pochází 95% gama záření s energií 2.62 MeV z kruhu o průměru 200 m (Van Der Veeke et al., 2021). Z této skutečnosti vyplývá požadavek na rozměr ploch v řádu prvních stovek metrů.

Z hlediska vegetačního pokryvu je nejvhodnější sekaný nebo spásaný travní porost, ojedinelé dřeviny nemusí být překážkou využití pozemku, avšak nesmí ohrožovat bezpečnost letu bezpilotních prostředků.

Pro Cesiovou plochu je nezbytná dlouhodobá stabilita od r. 1986 (neobdělávaný či jinak neměněný pozemek). Dalším důležitým požadavkem je vlhkostní homogenita, nivní či podmáčené plochy nejsou vhodné.

3.1.3 Legislativní podmínky provozu BLP a vlastnické vztahy k pozemkům

Pro měření pomocí bezpilotních prostředků je optimální možnost provozu v EASA kategorii „Open“ dle platné evropské i národní legislativy. Referenční plochy je proto vhodné situovat mimo ochranná pásma chráněných území, liniových staveb, vodních zdrojů a mimo urbanistické, průmyslové a obchodní zóny tak, aby byla minimalizována administrativní náročnost provozu BLS a zajištěna využitelnost ploch pro co nejširší škálu bezpilotních systémů.

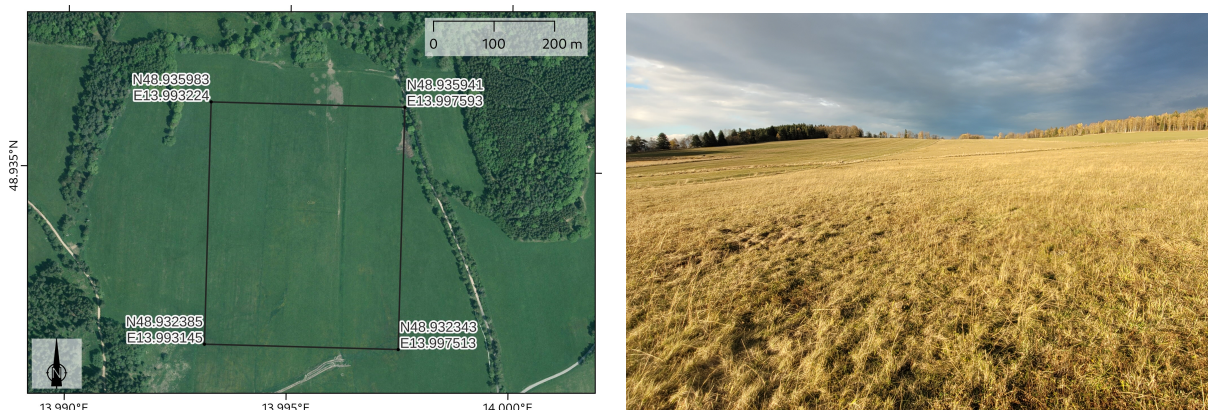
Referenční plochy musí splňovat požadavky na: přístup osobními automobily na plochu, možnost vstupu na pozemky, pohyb osob, pozemní měření, vzlet a přistání BLS.

Vstup na referenční plochy je zajištěn pomocí smluv o vstupu na pozemky s majiteli a uživateli pozemků, na kterých se referenční plochy nacházejí.

3.2 Charakteristika referenčních ploch

3.2.1 Draslíková referenční plocha–Zbytiny

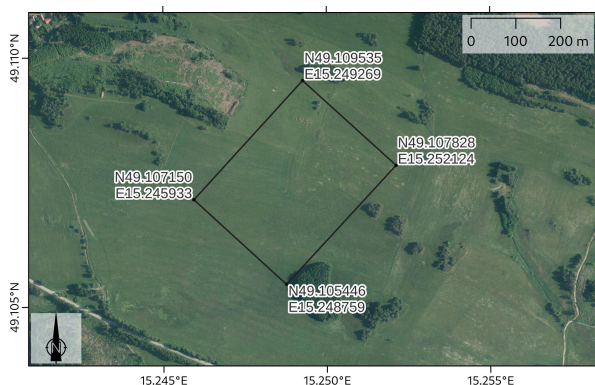
Referenční plocha se nachází na území šumavských granolitů, které se vyznačují zvýšeným poměrem draslíku k ostatním přírodním radionuklidům. Průměrný obsah draslíku na referenční ploše je 2,5 %, zatímco obsahy uranu a thoria jsou velmi nízké – 1,5 ppm U a 3,9 ppm Th. Plocha se nachází na rozsáhlé louce s mírným sklonem, obhospodařované pouze sečením. Na ploše není vzrostlá vegetace ani jiné překážky v letu. Ortofoto s polohou plochy je zobrazeno na Obr. 1. Rastrová mapa koncentrace draslíku na ploše je součástí souboru map s odborným obsahem (Šálek et al., 2026). Zobrazené koncentrace draslíku jsou průměrnou hodnotou z opakovaných měření pozemní gama spektrometrie za různých vlhkostních podmínek půdy během roku. Další podrobnosti ke konstrukci mapy lze nalézt ve vysvětlivkách map (Šálek et al., 2026).



Obrázek 1: Poloha a foto draslíkové referenční plochy Zbytiny.

3.2.2 Uranová referenční plocha–Kunžak

Referenční plocha se nachází na území se zvýšeným poměrem U/Th, způsobeným relativně nižším obsahem thoria, který je typický pro granit typu Zvůle (Scharbert et al., 2000). Průměrný obsah uranu na referenční ploše je 4,7 ppm eU, obsahy thoria a draslíku jsou 10,0 ppm eTh a 2,9 % K. Energie gama záření uranové přeměnové řady jsou obecně ve spektru přírodního gama záření relativně méně zastoupené než energie gama záření draslíku a thoriové řady. Gama záření uranové řady interferuje s rozptýlenými vyššími energiemi thoriové řady a přesnost stanovení koncentrace uranu proto s nižším poměrem U/Th klesá. Plocha se nachází na rozsáhlé louce, částečně využívané jako pastvina, částečně sečené, s mírným sklonem. Mocnost pokryvu je nízká, v horní části louky se nacházejí výchozy skalního podloží. Na ploše není vzrostlá vegetace ani jiné překážky v letu. Ortofoto s polohou plochy je zobrazeno na Obr. 2. Rastrová mapa koncentrace uranu na ploše je součástí souboru map s odborným obsahem (Šálek et al., 2026).



Obrázek 2: Poloha a foto uranové referenční plochy Kunžak s gama spektrometrem GT-40.

3.2.3 Thoriová referenční plocha–Slavoňov

Referenční plocha se nachází mezi Kovářovem a Kostelcem nad Vltavou a geologicky náleží ke střeodočeskému plutonu. Litologicky jde o melasyenit typu Čertovo břemeno, který je charakteristický výrazným nabožením o inkompatibilní prvky, mezi něž patří i přírodní radionuklidy, a patří tak k nejvíce radioaktivním horninám v českém masivu (Holub et al., 1997). Průměrný obsah thoria na referenční ploše je 24,9 ppm eTh, obsahy uranu a draslíku jsou 6,5 ppm eU a 3,0 % K. Plocha se nachází na rozlehlé rovinné louce z většiny obhospodařované sečením. Na ploše není vzrostlá vegetace ani jiné překážky v letu. Ortofoto s polohou plochy je zobrazeno na Obr. 3. Rastrová mapa koncentrace thoria na ploše je součástí souboru map s odborným obsahem (Šálek et al., 2026).



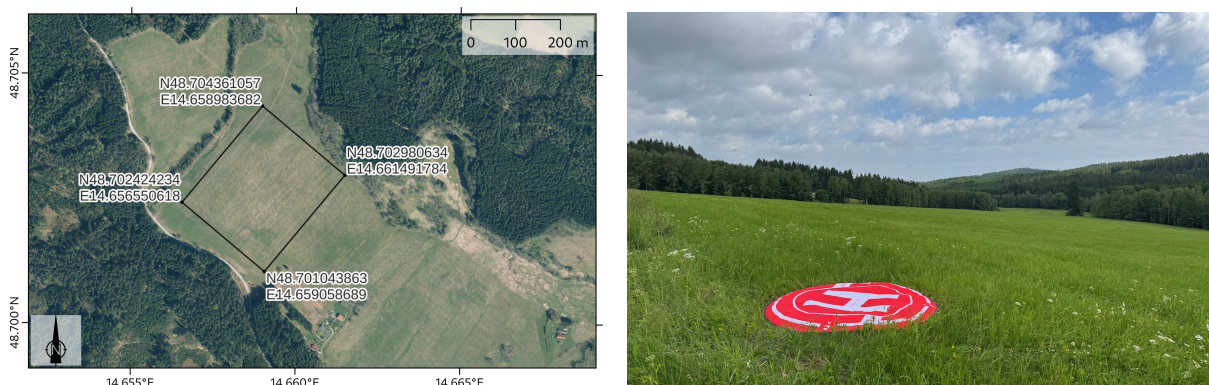
Obrázek 3: Poloha a foto thoriové referenční plochy Slavoňov.

3.2.4 Cesiová referenční plocha–Černé Údolí

Referenční plocha Černé Údolí se nachází na území s relativně vysokou zbývající plošnou aktivitou ^{137}Cs . Průměrná plošná aktivita ^{137}Cs byla stanovena pomocí terénní gamaspektrometrie na 9,3 kBq/m². Geologické pozadí v případě cesiové plochy není určující, jde o metamorfované pararuly až migmatity a kvartérní deluviální a fluviální sedimenty s nízkou až střední radioaktivitou. Výhodou je, že radioaktivita hornin příliš nezastírá pík cesia ve spektru gama záření a ten je dobře rozpoznatelný. Průměrné koncentrace přírodních radionuklidů jsou 1,13 % K, 3,1 ppm eU a 9,5 ppm eTh. Zvýšená koncentrace ^{137}Cs , současně s nízkými koncentracemi přírodních radionuklidů představuje ztížené podmínky pro

algoritmy energetické stabilizace spektrometrů využívajících přírodního pozadí. Cesiová referenční plocha umožňuje ověřovat funkčnost algoritmů stabilizace spektra ve specifických podmínkách.

Referenční plocha Černé Údolí je louka s mírným konstantním sklonem. Na ploše není vzrostlá vegetace ani jiné překážky v letu. Analýzy cesia v hloubkových profilech ukazují, že plocha splňuje požadavek dlouhodobé stability od r. 1986 a není dlouhodobě obdělávaná či jinak narušená. Ortofoto s polohou plochy je zobrazeno na Obr. 4. Rastrová mapa koncentrace ^{137}Cs na ploše je k dispozici v rámci souboru map s odborným obsahem (Šálek et al., 2026).



Obrázek 4: Poloha a foto cesivé referenční plochy Černé Údolí.

3.2.5 Stanovení pozadí na vodní ploše

Pozadí při leteckém měření je tvořeno kosmickým zářením, vzdušným radonem a jeho dceřinými produkty a vlastní radioaktivitou přístroje. Pozadí radiometru pro BLS se určí na vodní ploše, obdobně jako pro přenosné přístroje, v souladu s doporučením IAEA (Erdi-Krausz et al., 2003).

Pro stanovení pozadí na vodní ploše je z vodních ploch v blízkosti referenčních ploch doporučena vodní nádrž Lipno. Měření pozadí je vhodné provést alespoň 300 m od břehu. Vhodným přístupovým bodem je Dolní Vltavice. Měření pozadí na vodní ploše se realizuje na plavidle s minimálním pozadím, např. na nafukovacím člunu. V optimálním případě jsou použita dvě plavidla, tažné s posádkou a vlečené s přístroji, které je kotveno po dobu měření. Tento postup vyloučí příspěvek přirozeného obsahu ^{40}K v lidském těle. Vzhledem k nízkým signálům pozadí je nutné volit dostatečně dlouhé doby měření. Tento způsob stanovení pozadí je doporučený, ale samotná úroveň pozadí není předmětem vyhodnocení výsledků dle této metodiky. Předmětem vyhodnocení jsou výsledné radiometrické veličiny popsané v 3.3.3.

3.3 Metodika využití referenčních ploch

3.3.1 Pozemní monitoring

Referenční plochy představují přírodní standard pole gama záření, podléhající časovým variacím, a proto je využití referenčních ploch ke standardizaci radiometrických dat bezpilotních systémů koncipováno jako porovnávací měření ve skupině účastníků. Součástí

metodiky je zjištění aktuálního stavu referenční plochy pomocí pozemního gama spektrometrického průzkumu, měření vlhkosti půdy a monitorování vzdušného radonu. Tyto úkoly provádí správce referenčních ploch v den porovnávacího měření.

Pozemní gama spektrometrické měření

Pozemní gama spektrometrické měření je prováděno přenosným gama spektrometrem, GT-40 s detektorem 3×3 NaI(Tl) nebo obdobným přístrojem s dobou měření 2 minuty na jednom bodě. Měření je prováděno v definované pozemní síti měřících bodů 20×20 m až 40×40 m. Poloha bodů pro je pro každou z ploch zobrazena v příslušné mapě v souboru map (Šálek et al., 2026).

Výsledkem pozemního gama spektrometrického průzkumu jsou údaje o zdánlivé koncentraci (hmotnostní aktivitě) přírodních radionuklidů a ^{137}Cs v den porovnávacího měření. Zdánlivá koncentrace radionuklidů je koncentrace radionuklidu, jakou se prostředí projevuje při gama spektrometrickém terénním měření a kromě skutečné koncentrace radionuklidu je výsledkem zejména okamžitého vlhkostního stavu zeminy a meteorologických podmínek. Pro hodnocení výsledků zjištěných radiometrickým BLS je rozhodující aktuální zdánlivá koncentrace radionuklidů na referenční ploše.

Bodové údaje pozemního gama spektrometrického průzkumu jsou základním způsobem statisticky zpracovány (aritmetický průměr, směrodatná odchylka), interpolovány a výsledný grid je prezentován v podobě rastrové mapy. Výsledky jsou zařazeny do databáze výsledků.

Určení vlhkosti půdy

Vlhkost půdy je určena pomocí terénního in situ měření a laboratorně z odebraných vzorků. Pro terénní měření je používána metoda TDR (Time Domain Reflectometry). Měření pomocí TDR jsou rychlá (1 s), nicméně nevýhodou je malý objem měřeného vzorku (< 1 kg) a z něho plynoucí větší rozptyl hodnot. Stanovení vlhkosti lze provádět současně s pozemním gama spektrometrickým průzkumem. Stanovení vlhkosti pomocí metody TDR může být doplněno odběrem menšího počtu vzorků a laboratorním gravimetrickým stanovením jejich vlhkosti. Gravimetrické stanovení vlhkosti půdy vychází z rozdílu mezi hmotností vzorku bezprostředně po odběru a hmotností vysušeného vzorku při umělému teple mírně přes $100\text{ }^\circ\text{C}$. Vlhkoměry TDR obvykle udávají objemovou vlhkost v %. Gravimetricky určenou hmotnostní vlhkost lze převést na objemovou vlhkost θ_v i bez známého objemu vzorku, pomocí známé hustoty suché půdy, podle vztahu:

$$\theta_v = \frac{M_w \cdot \rho_b}{M_d}$$

kde M_w je hmotnost vody zjištěná váhovým rozdílem vlhkého a vysušeného vzorku, M_d je hmotnost vysušeného vzorku a ρ_b je hustota suché půdy, tedy půdy včetně pórů, ale s nulovou vlhkostí. (Evelt, 2008). Hustota půd na referenčních plochách byla zjištěna pomocí odběru neporušených vzorků s výslednou průměrnou hodnotou $1,25\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Zjištěné vlhkosti jsou základním způsobem statisticky zpracovány a zařazeny do databáze výsledků.

Monitorování vzdušného radonu

Radon se uvolňuje z horninového prostředí do atmosféry. Dceřiné produkty přeměny radonu se váží na prachové částičky v atmosféře a stávají se dodatečným zdrojem gama

záření. Radon je tak, vedle kosmického záření a vlastní radioaktivity přístroje, hlavní složkou pozadí při terénním gama spektrometrickém měření. Množství radonu v atmosféře závisí na mnoha faktorech, jako je koncentrace uranu v horninách, emanační koeficient, plynopropustnost zemin a dále na meteorologických podmínkách, změnách tlaku v atmosféře, teplotě vzduchu, rychlosti větru atd., a je tedy v čase proměnné a obtížně predikovatelné. Obvyklé objemové aktivity radonu (OAR) v atmosféře jsou nízké, typicky menší než $10 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ a příspěvek vzdušného radonu do spektra gama záření hornin lze zanedbat. Za specifických meteorologických podmínek, při teplotní inverzi nebo v rámci denního cyklu během nočních a brzkých ranních hodin, může nastat hromadění radonu v nízkých vrstvách atmosféry a příspěvek vzdušného radonu do spektra gama záření hornin se stane významným (Erdi-Krausz et al., 2003; Porstendorfer et al., 1994).

V současné době neexistuje vhodná metodika pro stanovení opravy na vzdušný radon pro BLS radiometrický průzkum. Porovnávací měření je plánováno na období a čas, kdy jsou zvýšené OAR v ovzduší nepravděpodobné, tedy přednostně v letních měsících zhruba mezi 9 a 17 hodinou. Během porovnávacího měření na referenčních plochách bude OAR ve vzduchu monitorována přístrojem pro kontinuální záznam, např. AlphaGUARD. Zjištěné hodnoty OAR budou zařazeny do databáze výsledků.

3.3.2 Letecký monitoring

Letecké měření provádí samostatně účastníci porovnávacího měření, včetně správců, na všech čtyřech nebo na vybraných referenčních plochách. Cílem leteckého měření je správně stanovit koncentrace zájmových radionuklidů v půdě příkon kermy ve vzduchu ve všech testovaných výškách letu BLS nad terénem.

Letové trasy

Letecké měření je prováděno v definovaných obdélníkových polygonech nad referenčními plochami, které se nacházejí ve středové části těchto referenčních ploch a jsou zobrazeny v mapách s odborným obsahem (Šálek et al., 2026). V definovaném polygonu je letová mise vytvořena uživatelem bezpilotního systému s ohledem na technická specifika, zejména typ a citlivost detektoru. Hustota letových profilů a rychlost letu jsou volbou účastníka porovnávacího měření a jsou voleny s ohledem na časový program porovnávacího měření.

Letecké měření je prováděno ve výškách 15 m, 25 m, 35 m, případně 45 m nad terénem. Výška nad terénem při letové misi je udržována konstantní, trasa kopíruje terén. Pro přípravu letových misí je možné využít digitální model reliéfu referenčních ploch vytvořený správcem pomocí přesného laserového a fotogrametrického skenování terénu.

Meteorologické podmínky

Porovnávací měření je možné zrealizovat jen za příznivých meteorologických podmínek k provozu BLS. Silný vítr nebo poryvy větru jsou překážkou měření z bezpečnostních důvodů provozu BLS. Dešťové srážky jsou překážkou gama spektrometrického měření. Pole gama záření je nepříznivě zkresleno ještě 3 hodiny po dešti z důvodu depozice dceřiných produktů přeměny radonu z atmosféry na povrch země.

Provoz dronů na referenčních plochách z hlediska legislativy

Provoz bezpilotních prostředků na referenčních plochách podléhá aktuálně platné evropské a národní legislativě (EU 2019/949; LKR310) a navazujících předpisů, jakož i předpisů

pro ochranu přírody.

Referenční plochy jsou umístěny tak, aby dovolovaly provoz bezpilotních prostředků v EASA kategorie OPEN A3 (se vzletovou hmotností do 25 kg), s následujícími specifiky:

Referenční plocha Kunžak leží pod dočasně vyhrazeným prostorem LKTSA22 (91–305 m AGL), viz (AIP 5.2). Při provozu na plochách Černé údolí a Zbytiny je třeba respektovat ochranná pásma silnic III. třídy (LKR317) a v případě plochy Slavoňov hustě osídlený prostor (LKR316) na východ od plochy.

Dodržení aktuálně platné legislativy pro provoz bezpilotního prostředku je plně na zodpovědnosti účastníka porovnávacího měření.

3.3.3 Zpracování a předání dat

Účastníci porovnávacího měření předávají zpracovaná a vyhodnocená data správci referenčních ploch k posouzení v běžně užívaných jednotkách. Pro přírodní radionuklidy je výsledek možné udávat jako hmotnostní koncentrace v % K, ppm eU, ppm eTh nebo jako hmotnostní aktivity v Bq/kg. Pro ^{137}Cs se udává plošná aktivita kBq/m^2 . Příkon kermu ve vzduchu se udává v jednotkách nGy/h.

Převodní koeficienty mezi hmotnostní koncentrací a hmotnostní aktivitou jsou uvedeny v literatuře (Erdi-Krausz et al., 2003).

Zatímco u přírodních radionuklidů se předpokládá prostorově homogenní rozložení v zemi, ^{137}Cs se deponuje na povrchu a postupně s časem migruje do větších hloubek. Z laboratorních měření hloubkových profilů půdních vzorků lze pro cesiovou plochu zjednodušeně předpokládat rozložení cesia ve vrstvě mocnosti 10 cm, v rámci které je cesium rozptýleno homogenně.

Způsob zpracování dat účastníkem porovnávacího měření, zavedené opravy a metodika přepočtu na radiometrické veličiny jsou účastníkem porovnávacího měření stručně popsány, nejsou ale předmětem vyhodnocení výsledků.

Výsledná data ve fyzikálních jednotkách účastníci porovnávacího měření předávají ve formě tabulátorem odděleného CSV souboru. Soubor obsahuje datum měření, název organizace, kontaktní osobu, e-mail, název referenční plochy, výšku letu nad terénem v metrech. Další sloupce udávají aritmetický průměr a směrodatnou odchylku měřených radiometrických veličin z celé referenční plochy. V případě vysoce přesných dat je možné navíc reportovat a vyhodnotit radiometrické veličiny ve formě georeferencovaného gridu ve formátu GeoTIFF se souřadnicemi v CRS EPSG:32633 (WGS84 UTM33N). Vzorové soubory formátu dat budou účastníkům porovnávacího měření poskytnuty.

3.3.4 Poznámka k použitým veličinám

V geofyzikálních aplikacích je pole fotonového záření zvykově popisováno pomocí příkonu absorbované dávky ve vzduchu. Spektrometry využívané v rámci této metodiky, měří (dle volby uživatele) kermu ve vzduchu, nebo prostorový dávkový ekvivalent. Pro fotony s energiemi do 3 MeV můžeme hodnoty dávkového příkonu ve vzduchu a kermového příkonu považovat za (v rámci ostatních nejistot) číselně ekvivalentní.

3.3.5 Vyhodnocení porovnávacího měření

Vzhledem k přírodní povaze referenčních ploch, časovým variacím i nedokonalé homogenitě a geometrii nelze referenční plochy použít ve smyslu etalonového zdroje radioaktivity. Vyhodnocení dat porovnávacího měření je nutné vztáhnout vzhledem k aktuálnímu stavu

referenčních ploch i k dlouhodobé databázi výsledků. Data radiometrických veličin jsou hodnocena třemi způsoby:

Srovnání v rámci skupiny účastníků porovnávacího měření

Zhodnocení výsledků je provedeno v rámci skupiny účastníků porovnávacího měření, porovnávány jsou výsledky získané za stejných podmínek ve stejný den vůči sobě navzájem. Výsledky jednotlivých radiometrických veličin jednotlivých účastníků jsou porovnány s mediánem radiometrické veličiny celé skupiny.

Srovnání vzhledem k údajům pozemního gama spektrometrického monitoringu

Zhodnocení výsledků jednotlivých účastníků porovnávacího měření je provedeno vůči údajům pozemního průzkumu ze dne měření. Pozemní gama spektrometrické měření je ovlivněno vlhkostním stavem půdy a dalšími vlivy stejným způsobem, jako letecké měření. Přesnost pozemního měření je vzhledem k absenci útlumu ve vzduchu, většímu objemu detektoru a delší době měření 2 min na jednom bodě zpravidla významně lepší, než u leteckých dat.

Jisté omezení představuje fakt, že hodnoty měřené terénním gama spektrometrem jsou dány způsobem jeho kalibrace, která odráží použitý standard. Fyzikální vlastnosti standardu se obvykle do jisté míry liší od přírodních půd zejména v hustotě a vlhkosti, proto i výsledné radiometrické veličiny měřené terénním gama spektrometrem mohou obsahovat z tohoto rozdílu vyplývající nepřesnosti. Kalibrace terénních spektrometrů je obvykle prováděna pro suchý betonový standard (Grasty et al., 1991).

Výsledky radiometrických veličin jednotlivých účastníků jsou porovnány s hodnotami radiometrických veličin získaných pozemním monitoringem. V případě veličin hmotnostních aktivit či koncentrací přírodních radionuklidů a v případě plošné aktivity ^{137}Cs se určují hodnoty v zemi a tyto hodnoty nezávisí na výšce měření. Započtení útlumu gama záření ve vzduchu je součástí kalibrace radiometrického BLS. Příkon kermy ve vzduchu lze udávat pro dané výšky měření anebo přepočtený na výšku 1 m nad zemí. Porovnání příkonu kermy ve vzduchu v různých letových výškách s údaji pozemního monitoringu je možné s použitím integrálně exponenciální funkce E_2 , která popisuje útlum gama záření ve vzduchu nad rovinným homogenním poloprostorem (Erdi-Krausz et al., 2003).

Srovnání s dlouhodobou databází výsledků

Zhodnocení výsledků jednotlivých účastníků porovnávacího měření je provedeno vzhledem k údajům dlouhodobé databáze výsledků za celou dobu provozu referenční plochy.

Dlouhodobá databáze výsledků, získaných na referenční ploše, bude obsahovat ke každému dni měření na dané lokalitě výsledky radiometrických veličin od jednotlivých účastníků, jak je popsáno v kapitole 3.3.3. Kromě těchto údajů budou v databázi obsaženy také výsledky pozemního monitorování, které jsou popsány v kapitole 3.3.1.

Časové variace radiometrických veličin jsou důsledkem zejména změn ve vlhkosti půdy. Obsah vody v půdě mění její hustotu a tím také intenzitu interakcí gama záření s atomy hmoty. S rostoucím obsahem vody v půdě obecně intenzita vyzařovaného gama záření klesá.

Obsahy radionuklidů v půdě se v časovém horizontu používání referenčních ploch mění naopak velmi málo. Koncentrace přírodních radionuklidů v půdách odrážejí geologickou

situaci, složení zdrojové horniny a vývoj půd v daných klimatických podmínkách. Významnějšímu poklesu plošné aktivity bude podléhat ^{137}Cs , které ubývá s časem podle zákona radioaktivní přeměny a současně s postupnou migrací do hloubky. Tento pokles bude nutné brát v úvahu ve střednědobém časovém horizontu.

Časové variace gama spektrometricky stanovených veličin lze do jisté míry potlačit pomocí korekce na vlhkost. Tuto korekci lze zpřesňovat dlouhodobým sledováním ploch, tedy postupným rozšiřováním databáze výsledků porovnávacích měření.

Určení aktuální vlhkosti půdy, popsané v kapitole [3.3.1](#), je tedy dalším parametrem upřesňujícím porovnání leteckých a pozemních radiometrických veličin. Při znalosti závislosti radiometrických veličin na vlhkosti půdy lze výsledky obsažené v databázi přepočítat na jednotnou vlhkost půdy 25 % VWC. Výsledky jednotlivých radiometrických veličin jednotlivých účastníků jsou přepočteny na jednotnou vlhkost a porovnány s mediánem celé databáze radiometrické veličiny z pozemního gama spektrometrického monitoringu, taktéž přepočtené na jednotnou vlhkost.

Zpráva o porovnávacím měření radiometrických BLS

Zpráva o porovnávacím měření na referenčních plochách pro bezpilotní radiometrický průzkum obsahuje výsledky pozemního monitoringu, výsledky leteckého měření jednotlivých účastníků a vyhodnocení porovnávacího měření. Získaná data jsou zálohována a umístěna do digitálního repozitáře Zenodo.

3.3.6 Organizace porovnávacích měření na referenčních plochách

Přihlašování k porovnávacímu měření probíhá celoročně pomocí kontaktního e-mailu správce referenčních ploch (ondrej.salek@natur.cuni.cz, vaclav.stepan@fjfi.cvut.cz). Termín porovnávacího měření bude vyhlášen správcem referenčních ploch po konzultaci s SÚJB, při naplnění minimálního počtu účastníků. Stanoven bude také náhradní termín pro případ nepříznivých meteorologických podmínek. Vstup na pozemky je zajištěn smlouvami uzavřenými s FJFI ČVUT v Praze a PřF UK, kteří v roli správce referenčních ploch zprostředkují vstup na pozemky dalším subjektům v rámci porovnávacího měření. Porovnávací měření na jedné ploše probíhá jeden den, počet a výběr referenčních ploch může být omezen na část referenčních ploch, podle určení a technické specifikace BLS.

3.4 Novost metodiky a její srovnání s příbuznými metodikami

Popsaná metodika využití referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický průzkum je zcela novou metodikou, avšak lze najít příbuznou schválenou metodiku SÚJB a jiné metody standardizace a kalibrace radiometrických dat, ke kterým se lze odkázat.

Srovnání se schválenou metodikou SÚJB „Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud“

Schválená metodika SÚJB „Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud“, autorem je Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i., popisuje postupy pro měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu s využitím bezpilotního leteckého prostředku, tvorbu map, lokalizaci anomálních míst a spektrometrické

měření za účelem identifikace zdroje záření. Metodika je primárně určena pro postsanační monitoring ploch po skončení hornické činnosti spojené s dobýváním a úpravou radioaktivních nerostů (Černý et al., 2016). Popisované postupy jsou zaměřeny na lokalizaci a identifikaci bodových zdrojů ionizujícího záření a plošných anomálií porovnáním měřených hodnot s aktuálními pozadovými hodnotami. Tato metodika tedy netvoří průnik s Metodikou využití referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický průzkum. Obě metodiky řeší rozdílné kapitoly využití BLS v radiometrickém průzkumu.

Srovnání se schválenou metodikou SÚJB „Stanovení úrovně radioaktivní kontaminace pomocí moderní měřicí techniky pro potřeby kontrolní činnosti SÚJB“

Metodika popisuje použití spektrometrů GT-40, D230A v podvěsu bezpilotního prostředku a RT-58 pro rychlé stanovení rozsahu a úrovně velkoplošné kontaminace radionuklidy emitujícími záření gama v případě radiační mimořádné události v městské zástavbě. Analogicky předchozí diskutované metodice netvoří průnik s Metodikou využití referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický výzkum.

Srovnání s porovnávacím měřením radonu na radonových referenčních plochách

Jistým ekvivalentem metodiky využití referenčních ploch pro bezpilotní radiometrický průzkum je porovnávací měření radonu na radonových referenčních plochách organizovaných Přírodovědeckou fakultou Univerzity Karlovy. Jde o obdobný přístup ke standardizaci radiometrických veličin získávaných terénním průzkumem. Radonové referenční plochy jsou také přírodní plochy, které podléhají časovým variacím, tyto plochy jsou využívány již více než 30 let a naplňují svůj účel jako součást systému standardizace radiometrických dat v ČR.

Srovnání s kalibračními leteckými profily pro gama spektrometrický pilotovaný letecký průzkum

Přírodní kalibrační letecké profily pro gama spektrometrický průzkum byly využívány historicky v Československu od 70. let minulého století do roku 2015, kdy bylo letecké gama spektrometrické mapování ČR přerušeno. Tyto profily se nacházely na geologicky vhodném území a každá ze tří lokalit obsahovala nadprůměrné koncentrace jednoho ze tří přírodních radionuklidů K, U a Th. Profil se zvýšeným obsahem draslíku se nacházel na granulitech borského granulitového masivu (strážecké moldanubikum), mezi osadami Vídeň a Cyrilov. Letecký profil se zvýšeným obsahem uranu se nacházel na granitech typu Zvůle, mezi osadami Mosty a Valtínov u Kunžaku. Na tomto geologickém tělese je umístěna také současná referenční plocha pro bezpilotní radiometrický průzkum. Letecký profil se zvýšeným obsahem thoria se nacházel u Velkého Meziříčí na granitech Třebíčského plutonu mezi osadami Dolní Heřmanice a Petráveč.

Tyto profily sloužily pro přímou kalibraci leteckých gama spektrometrů v pilotovaných letadlech podle metodiky popsané v literatuře, např. (Erdi-Krausz et al., 2003).

Současná metodika výpočtu koncentrací radionuklidů ze spektrálních dat je v mnohém odlišná a referenční plochy pro bezpilotní radiometrický průzkum proto neslouží k přímé kalibraci leteckých přístrojů, ale k ověření správnosti kalibrace získané různými experimentálními i výpočetními přístupy, které se v čase dynamicky vyvíjejí.

4. Uplatnění schválené metodiky

Využití referenčních ploch slouží ke standardizaci výsledků bezpilotních měření gama záření. Schválená metodika umožní kvantitativní porovnání získávaných výsledků mezi jednotlivými subjekty z výzkumných institucí, státní správy i soukromých subjektů v rámci České Republiky i v rámci mezinárodní spolupráce.

Standardizace výsledků je potřebná pro získávání přesných, spolehlivých a navzájem porovnatelných podkladů pro nejrůznější aplikace v oblastech vědy i výzkumu i potřeby státní správy. Referenční plochy se uplatní v aplikacích jako je radiační monitoring v životním prostředí, havarijní monitoring, mapování přírodních či antropogenních anomálií radioaktivity, mapování přírodních radionuklidů pro potřeby průzkumu nerostných surovin atd.

Na referenčních plochách lze organizovat porovnávací měření podle par. 13 vyhlášky č. 360/2016 Sb.

Seznam literatury

- ČERNÝ, R.; NĚMEČEK, L.; OTÁHAL, P.; VOŠAHLÍK, J.; BURIAN, I., 2016. *Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud* [online]. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [cit. 2025-09-01]. Dostupné z: <https://sujb.gov.cz/dokumenty-a-publikace/schvalene-metodiky/mereni-radiacnich-velicin-s-uzitim-nizkoletici-multikoptery-dronu-v-oblastech-zasazenych-hornickou-cinnosti-spojenou-s-dobyvanim-a-upravou-uranovych-rud>. Certifikovaná metodika (cit. na s. [1](#), [12](#)).
- ERDI-KRAUSZ, G.; MATOLIN, M.; MINTY, B.; NICOLET, J.-P.; REFORD, W. S.; SCHETSELAAR, E., 2003. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2024-10-30]. IAEA-TECDOC-1363. ISBN 92-0-108303-3. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf (cit. na s. [1](#), [6](#), [8-10](#), [12](#)).
- Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních systémů (Text s významem pro EHP)*, 2019 [online]. [cit. 2025-11-12]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:02019R0947-20250501> (cit. na str. [8](#)).
- EVETT, S., 2008. *Field Estimation of Soil Water Content*. International Atomic Energy Agency. Dostupné také z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-30_web.pdf (cit. na str. [7](#)).
- GRASTY, R. L.; HOLMAN, P. B.; BLANCHARD, Y. B., 1991. *Transportable Calibration Pads for Ground and Airborne Gamma-Ray Spectrometers*. Geological Survey of Canada. ISBN 978-0-660-13985-2 (cit. on p. [10](#)).
- HOLUB, F.V.; COCHERIE, A.; ROSSI, P., 1997. Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex (Czech Republic): constraints on the chronology of thermal and tectonic events along the Moldanubian-Barrandian boundary. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Roč. 325, č. 1, s. 19–26. ISSN 1251-8050 (cit. na str. [5](#)).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 1991. *Airborne gamma ray spectrometer surveying*. Vienna, Austria: IAEA. Technical Reports Series, č. 323. ISBN 92-0-125291-9. Dostupné také z: <https://inis.iaea.org/records/k4v13-p7q16> (cit. na str. [1](#)).
- Letecká informační příručka (AIP), kap. 5.2, 2025* [online]. [cit. 2025-11-12]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/e5-2.pdf (cit. na str. [9](#)).
- Opatření obecné povahy vymezující omezený prostor LKR310-UAS*, 2025 [online]. [cit. 2025-11-12]. Dostupné z: https://www.caa.gov.cz/wp-content/uploads/2025/08/88_13313_25-701_00P-LKR310.pdf (cit. na str. [8](#)).
- Opatření obecné povahy vymezující omezený prostor pro lety bezpilotních letadel (LKR316 - HOP)*, 2025 [online]. [cit. 2025-11-12]. Dostupné z: https://www.caa.gov.cz/wp-content/uploads/2025/08/17_13372-25-701_00P-LKR316.pdf (cit. na str. [9](#)).

- Opatření obecné povahy vymezující omezený prostor pro lety bezpilotních letadel (LKR317A, LKR317B, LKR317C, LKR317D, LKR317E a LKR317F)*, 2025 [online]. [cit. 2025-11-12]. Dostupné z: https://www.caa.gov.cz/wp-content/uploads/2025/08/23_13380-25-701_00P-LKR317.pdf (cit. na str. 9).
- PORSTENDORFER, J.; BUTTERWECK, G.; REINEKING, A., 1994. Daily Variation of the Radon Concentration Indoors and Outdoors and the Influence of Meteorological Parameters. *Health Physics*. Roč. 67, č. 3, s. 283–287. ISSN 0017-9078 (cit. na str. 8).
- SCHARBERT, S.; BREITER, K., 2000. Geochronology and Geology of the Zvůle Granite. *Geoscience Research Reports*. Roč. 33, s. 160–162. Dostupné také z: <https://app.geology.cz/img/zpravyvyzkum/fulltext/1999-65.pdf> (cit. na str. 4).
- ŠÁLEK, O.; ŠTĚPÁN, V.; THINOVÁ, L.; KLUSOŇ, J.; VALENTA, J., 2026. Mapy referenčních ploch pro letecký bezpilotní radiometrický průzkum. Dostupné z DOI: [10.5281/zenodo.15968868](https://doi.org/10.5281/zenodo.15968868) (cit. na s. 4–8).
- VAN DER VEEKE, S., 2023. *UAV-borne Radioelement Mapping* [online]. Medusa Radiometrics BV [cit. 2024-10-29]. Dostupné z: [https://the.medusa.institute/_attachments/351142721/20230428%20-%20Guidelines%20for%20UAV-borne%20radioelement%20mappinng%20\(IAEA\).pdf?inst-v=2ce8e60c-cbe2-42b4-a057-c24c98ca916e](https://the.medusa.institute/_attachments/351142721/20230428%20-%20Guidelines%20for%20UAV-borne%20radioelement%20mappinng%20(IAEA).pdf?inst-v=2ce8e60c-cbe2-42b4-a057-c24c98ca916e) (cit. na str. 1).
- VAN DER VEEKE, S.; LIMBURG, J.; KOOMANS, R.L.; SÖDERSTRÖM, M.; DE WAAL, S.N.; VAN DER GRAAF, E.R., 2021. Footprint and Height Corrections for UAV-borne Gamma-Ray Spectrometry Studies. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. Roč. 231, s. 106545 [cit. 2024-10-29]. ISSN 0265931X. Dostupné z DOI: [10.1016/j.jenvrad.2021.106545](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106545) (cit. na str. 3).
- VOŠAHLÍK, Josef; OTÁHAL, Petr, 2021. *Stanovení úrovně radioaktivní kontaminace pomocí moderní měřicí techniky pro potřeby kontrolní činnosti SÚJB* [online]. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [cit. 2025-09-01]. Dostupné z: <https://sujb.gov.cz/dokumenty-a-publikace/schvalene-metodiky/stanoveni-pomeru-mezi-volnou-a-vazanou-frakci-kratkodobych-produktu-premeny-radonu-1-2>. Certifikovaná metodika (cit. na str. 1).