

SÚJCHBO, v.v.i.

Certifikovaná metodika

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i.

Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud

**Ing. Radek Černý, Ladislav Němeček, Mgr. Petr Otáhal, PhD.,  
Ing. Josef Vošahlík, Ing. Ivo Burian, CSc.**

Realizační výstup projektu: TB05SUJB001: Mapování a kontrola radiačních veličin (s využitím multikoptéry – DRON) v rámci kontroly provedené sanace po těžbě a úpravě uranové rudy v o. z. TÚU, s. p. DIAMO Stráž pod Ralskem

Oponent: RNDr. Lenka Thinová, Ph.D.

Oponent: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Praha

Uplatněno: 2016

Schválil: kulaté razítko

.....  
**Mgr. Petr Otáhal, PhD.**  
vedoucí Odboru jaderné ochrany,  
SÚJCHBO, v.v.i.

.....  
**MUDr. Stanislav Brádka, PhD.**  
ředitel SÚJCHBO, v.v.i.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>2</b>
<b>1 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>3</b>
<b>2 CÍL CERTIFIKOVANÉ METODIKY</b> .....	<b>3</b>
<b>3 VLASTNÍ POPIS METODIKY</b> .....	<b>4</b>
3.1 PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ .....	5
3.1.1 <i>Technické požadavky kladené na BLP</i> .....	5
3.1.2 <i>Základní charakteristika měřicí sestavy</i> .....	6
3.1.3 <i>Softwarové vybavení</i> .....	8
3.2 PRACOVNÍ POSTUP .....	9
3.2.1 <i>Postup leteckého měření</i> .....	9
3.2.2 <i>Rychlá vizualizace dat naměřeného <math>\dot{H}^*(10)</math> a lokalizace plošné anomálie</i> .....	14
3.2.3 <i>Provedení spektrometrického měření za účelem identifikace zdroje záření</i> .....	14
3.2.4 <i>Měření ke stanovení korekčního faktoru na výšku</i> .....	14
3.2.5 <i>Provedení požadového měření</i> .....	14
3.3 ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACE NAMĚŘENÝCH DAT, TVORBA MAPOVÉHO VÝSTUPU .....	15
3.3.1 <i>Vizualizace naměřených hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu</i> .....	15
3.3.2 <i>Zpracování naměřených hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu</i> .....	16
3.3.3 <i>Diskuze dílčích nejistot, ovlivňujících celkovou nejistotu stanovení měřených veličin</i> .....	19
<b>4 INOVAČNÍ ASPEKTY, NOVOST POSTUPŮ</b> .....	<b>21</b>
<b>5 POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY</b> .....	<b>21</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY</b> .....	<b>22</b>
<b>7 SEZNAM PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ</b> .....	<b>22</b>
<b>8 PŘÍLOHY</b> .....	<b>23</b>
8.1 PŘÍLOHA 1 – VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRACOVNÍHO POSTUPU .....	23
8.2 PŘÍLOHA 2 – PŘÍKLAD RYCHLÉ VIZUALIZACE NAMĚŘENÝCH DAT .....	24
8.3 PŘÍLOHA 3 – PŘÍKLAD MAPOVÉHO VÝSTUPU.....	25

## **1 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

H<sup>\*</sup>(10) – příkon prostorového dávkového ekvivalentu

GPS – globální polohovací systém (*Global Positioning System*)

BLP – bezpilotní letecký prostředek

## **2 CÍL CERTIFIKOVANÉ METODIKY**

Cílem certifikované metodiky (dále jen metodika) je poskytnout ucelený základní nástroj pro měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v zadané oblasti s využitím bezpilotního leteckého prostředku, vytvoření mapy rozložení příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v dané oblasti, lokalizaci míst se zvýšeným příkonem prostorového dávkového ekvivalentu a identifikaci zdroje.

Metodika je určena pro screeningové měření a rychlý průzkum rozsáhlých ploch v případě existujícího rizika zvýšeného zastoupení radioaktivních prvků důsledkem činnosti spojené s dobýváním a úpravou radioaktivních nerostů. Metodika bude primárně využívána k postsanačnímu monitoringu ploch po skončení hornické činnosti spojené s dobýváním a úpravou radioaktivních nerostů (např.: těžba a úprava uranové rudy).

### 3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

Metodika popisuje v následujících kapitolách postup proměření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v monitorované oblasti a lokalizaci i identifikaci zdroje záření. V první části je popsáno přístrojové vybavení pro úspěšné provedení zadaného měření, další část obsahuje popis postupu prováděných prací a v poslední části je pak diskutováno vyhodnocení výsledků. Pro snazší orientaci v následujícím textu jsou níže vysvětleny vybrané pojmy používané v textu metodiky.

- Zájmová oblast (plocha) – oblast měření vymezená v zadání; vzhledem k zaměření metodiky jde převážně o plochy v rámci postsanačního monitoringu oblastí zasažených dobýváním a zpracováním radioaktivních nerostů;
- Měřicí síť – pravoúhlá síť měřicích bodů v zájmové oblasti, jejichž vzdálenost je volena na základě požadované přesnosti měření;
- Měřená veličina – pokud není stanoveno jinak, rozumí se měřenou veličinou příkon prostorového dávkového ekvivalentu ( $\dot{H}^*(10)$ );
- Hodnotící kritérium – hodnota  $\dot{H}^*(10)$  uvedená v relevantním právním předpise nebo definovaná zadavatelem, jejíž překročení musí být ve výstupu měření vizualizováno;
- Plošná anomálie – oblast, v níž hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  překračují hodnotící kritérium minimálně dvakrát a zároveň její velikost je větší než 25 m<sup>2</sup>.

Měřené hodnoty příkonu prostorového dávkového ekvivalentu jsou v případě postsanačního monitoringu ploch zasažených činností spojenou s dobýváním a úpravou radioaktivních nerostů porovnávány s hodnotícím kritériem. V místě plošných anomálií bude provedena identifikace zdroje záření gama. Výstupem měření je odborná mapa vizualizující rozložení hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v zájmové oblasti ve výškách provedeného leteckého měření, společně s lokalizací a identifikací zdroje. Odborná mapa je doplněna o odhad rozložení hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu ve výšce 1 m nad zemí a o popis podmínek měření.

### 3.1 Přístrojové vybavení

Použité přístrojové vybavení lze technicky rozdělit do dvou samostatných celků, a to na:

- i) bezpilotní létající prostředek – multikoptéru;
- ii) zařízení vhodné pro provedení měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu a spektrometrického měření.

#### 3.1.1 Technické požadavky kladené na BLP

Bezpilotní letecký prostředek (multikoptéra) využitelný v rámci této metodiky musí být volen s ohledem na rozsah a kvalitu prováděných měření. Technické požadavky kladené na bezpilotní letecký prostředek:

- Manuální řízení vysílačkou.
- Let v „automatickém módu“ s využitím GPS podle předem naplánované letové trasy a v naplánované výškové hladině.
- Vhodný datový přenos s dosahem několik set metrů pro komunikaci s BLP.
- Spárování vysílače a přijímače, povinné užití více než šesti satelitních přijímačů (*zvýšení spolehlivosti řídicí soustavy, odolnost proti rušení*).
- Funkce Fail Safe pro schopnost bezpečného ukončení letu (*v případě selhání přenosu řídicího signálu zvolí přednastavený letový režim*).
- Automatická indikace nízkého stavu napětí na akumulátoru.

Ukázka bezpilotního leteckého prostředku je uvedena na obr. 1.



**Obr. 1** Bezpilotní létající prostředek s připojeným měřicím zařízením - ilustrační foto

### **3.1.2 Základní charakteristika měřicí sestavy**

Multifunkční zařízení podvěsu multikoptéry musí umožňovat připojení vhodného detekčního zařízení pro

- i) monitorování příkonu prostorového dávkového ekvivalentu;
- ii) gamaspektrometrické měření pro analýzu/identifikaci radionuklidů.

Data z multifunkčního zařízení musí být on-line přenášena k operátorovi do PC spolu s aktuálními GPS souřadnicemi. Paralelně je vyžadována záloha měřených dat na hardwarové úložiště přímo v podvěsu BLP. Ukázka multifunkčního zařízení podvěsu BLP se scintilačním detektorem NaI(Tl) je uvedena na obr. 2.



**Obr. 2** Podvěs bezpilotního leteckého prostředku s multifunkčním detekčním zařízením - ilustrační foto

### ***3.1.2.1 Parametry detekčního zařízení určeného k měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama***

Detektor pro měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu musí mít následující vlastnosti:

- Umožňuje měření v širokém intervalu energií gama záření – ideálně od 50 keV do 3 MeV
- Rozsah měření  $\dot{H}^*(10)$  v intervalu od desítek nSv.hod<sup>-1</sup> až po desítky  $\mu$ Sv.hod<sup>-1</sup> (aby bylo možné měřit hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  na úrovni přírodního pozadí, a zároveň lokalizovat i hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  výrazně tuto úroveň překračující)
- Musí být energeticky kompenzovaný, aby byla maximálně snížena závislost měřené odezvy na energii záření.
- Musí mít zanedbatelnou směrovou závislost přes celou hemisféru.
- Musí mít dostatečnou citlivost na záření gama (min. 100 imp.s<sup>-1</sup> jako odezvu na 1MBq zdroje <sup>60</sup>Co ve vzdálenosti 1 m od detektoru).
- Musí mít nízkou mrtvou dobu (< 100  $\mu$ s).

- Odolnost proti vlhkosti a musí mít zanedbatelnou teplotní závislost.
- Musí být dostatečně odstíněn od vnějšího elektromagnetického záření.
- Vzorkovací perioda musí být menší nebo rovna 1 sekundě.

### **3.1.2.2 Parametry gamaspektrometrické trasy**

Požadavky kladené na spektrometrickou trasu jsou obdobné jako na detektor na měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu. Mimo výše uvedené vlastnosti je to:

- relativní energetická rozlišovací schopnost detektoru, která musí být lepší než 7 % na 662 keV pro využití při identifikaci přírodních radionuklidů,
- multikanálový analyzátor s minimálním počtem 1024 kanálů.

### **3.1.3 Softwarové vybavení**

#### **3.1.3.1 SW pro nastavení parametru letu a měřené trasy**

SW pro nastavení parametrů letu a měřicí trasy musí splňovat následující:

- kompatibilitu s řídicí jednotkou BLP,
- schopnost komunikovat zabezpečeným datovým přenosem s využitím vhodného komunikačního protokolu,
- on-line přenos sledovaných parametrů letu na PC operátora v reálném čase,
- možnost naprogramování trasy leteckého měření v dané oblasti s využitím vhodného mapového zdroje, a její uložení do řídicí jednotky multikoptéry,
- nastavení dalších parametrů letu, např. rychlost letu,
- využití definované trasy a parametrů letu pro měření v tzv. automatickém módu.

#### **3.1.3.2 SW pro nastavení a zaznamenávání parametrů během měření**

SW pro nastavení parametrů a záznam dat během měření musí splňovat následující vlastnosti:

- kompatibilita s použitým detekčním zařízením,
- on-line komunikace v reálném čase pomocí vhodného komunikačního protokolu,
- on-line přenos měřených dat do PC operátora,
- možnost plně ovládat detekční a měřicí zařízení on-line z PC operátora,
- uložení naměřených dat ve vhodném formátu pro pozdější zpracování (vhodný datový formát souboru a vhodný vektor měřených dat, např.: (GPS zem. délka, GPS zem. šířka,  $\dot{H}^*(10)$ ),
- on-line přenos měřeného spektra při spektrometrickém měření,



- stabilizace spektra.

### **3.1.3.3 SW vhodný pro zpracování a vizualizaci výsledků**

Po vizualizaci a zpracování naměřených hodnot  $\dot{H}^*(10)$  s ohledem na polohu měření je nutné využít vhodný program pro zpracování mapových podkladů. Vhodným, nikoliv však jediným programem využitelným pro tyto účely je software QGIS<sup>1</sup>.

Program QGIS umožňuje zejména prohlížení, tvorbu, editaci rastrových i vektorových geodat a zpracování GPS dat. V neposlední řadě program též umožňuje tvorbu mapových výstupů a jejich export do různých formátů. Funkčnost programu může být dále rozšířena s využitím zásuvných modulů.

Práce s geodaty probíhá v tzv. vrstvách, které je možno samostatně formátovat a různě překládat přes sebe s nastavením různé průhlednosti vrstev. Program také umožňuje načtení mapových dat z několika typů serverů, např.: z WMS (Web Map Service) služby. Toto je nezbytné pro vizualizaci výsledků s ohledem na jejich polohu.

### **3.1.3.4 Software vhodný pro vyhodnocení naměřených gama spekter**

Výsledkem zpracování spekter musí být seznam identifikovaných radionuklidů v oblasti plošné anomálie.

## **3.2 Pracovní postup**

### **3.2.1 Postup leteckého měření**

Popsané práce musí být prováděny v rámci platného povolení k provozování leteckých prací, v souladu s leteckými předpisy Ministerstva dopravy ČR a postupy stanovenými Úřadem pro civilní letectví. Přehled platné legislativy je uveden na webových stránkách úřadu pro civilní letectví ČR ([www.caa.cz](http://www.caa.cz)).

Měření je možné provádět jen za příznivých meteorologických podmínek, umožňujících bezpečný let bezpilotního létajícího prostředku a jeho spolehlivé ovládní operátorem.

Měření musí být prováděno tak, aby kvalita naměřených dat vstupujících do procesu zpracování byla odpovídající požadované nejistotě zpracování výsledku. S ohledem na vliv

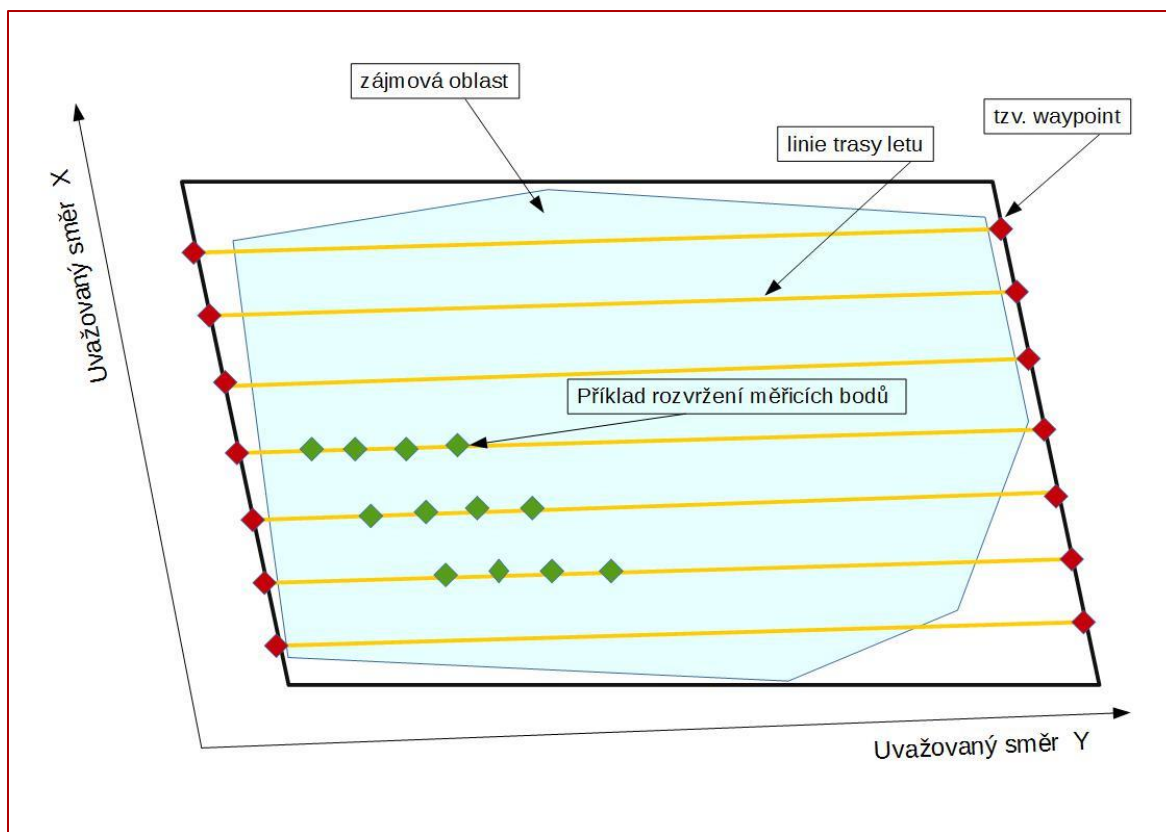
---

<sup>1</sup> QGIS (dříve do verze 2.0 označovaný také jako Quantum GIS) je svobodný multiplatformní geografický informační systém (GIS) šířený pod licencí GPL (GNU General Public License) ([www.qgis.com](http://www.qgis.com)).

meteorologických parametrů na koncentraci radonu v povrchové vrstvě půdy a v atmosféře je nezbytné měření provádět alespoň 3 hodiny po dešťových srážkách.

Měření  $\dot{H}^*(10)$  je prováděno v oblasti dané zadáním měření s ohledem na požadovanou vzdálenost mezi body v pravoúhlé měřicí síti, pokrývající zájmovou plochu. Za tímto účelem je oblast rozdělena na soubor suboblastí, ohraničených pravoúhlými čtyřúhelníky, které jsou postupně proměřeny. Pro každou oblast jsou pro automatické měření nastaveny jednotlivé rozměry pravoúhlé měřicí sítě. První rozměr (ve směru X) je nastaven postupem popsáním dále v kap. 3.2.1.1 nastavením vzdálenosti jednotlivých linií letové trasy a druhý rozměr (ve směru Y) je nastaven postupem diskutovaným dále v kap. 3.2.1.2. kombinací nastavené rychlosti letu a periody vzorkování. Vynesení měřicí sítě na zájmovou oblast je demonstrováno schematicky na obr. 3. Rozměry základního elementu měřicí sítě jsou voleny podle požadavků v zadání, kdy je obvykle požadována měřicí síť se základním elementem 20 m x 20 m, příp. 10 m x 10 m pro rychlé screeningové měření a měřicí síť s elementem 5 m x 5 m pro podrobnější měření. Nastavené parametry letu a měření musí být voleny tak, aby došlo k dostatečnému pokrytí měřicí sítě měřenými body. Nastavení těchto parametrů je diskutováno dále.

Z důvodu zpracování naměřených dat je vyžadováno měření nejméně ve dvou výškách letu. Je-li pro interpretaci výsledků měření ve výšce  $h$  vyžadován přepočet hodnot  $\dot{H}^*(10)$  na hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ve výšce 1 m nad zemí, je korekční faktor experimentálně stanoven z pozemního měření na vybraných místech měřicí sítě. (Podrobněji je diskutováno dále v kap. 3.3.2.) Není-li pozemní měření realizovatelné (např. špatná prostupnost terénem apod.) je za předpokladu plošného zdroje stanoven pouze hrubý odhad rozložení hodnot  $\dot{H}^*(10)$  v 1 m z rozložení hodnot  $\dot{H}^*(10)$  v minimálně dvou výškách letu.



**Obr. 3** Schématické vynesení měřicí sítě na zájmovou oblast

### **3.2.1.1 Nastavení parametrů letové trasy – využití automatického letového módu s využitím tzv. „waypointů“**

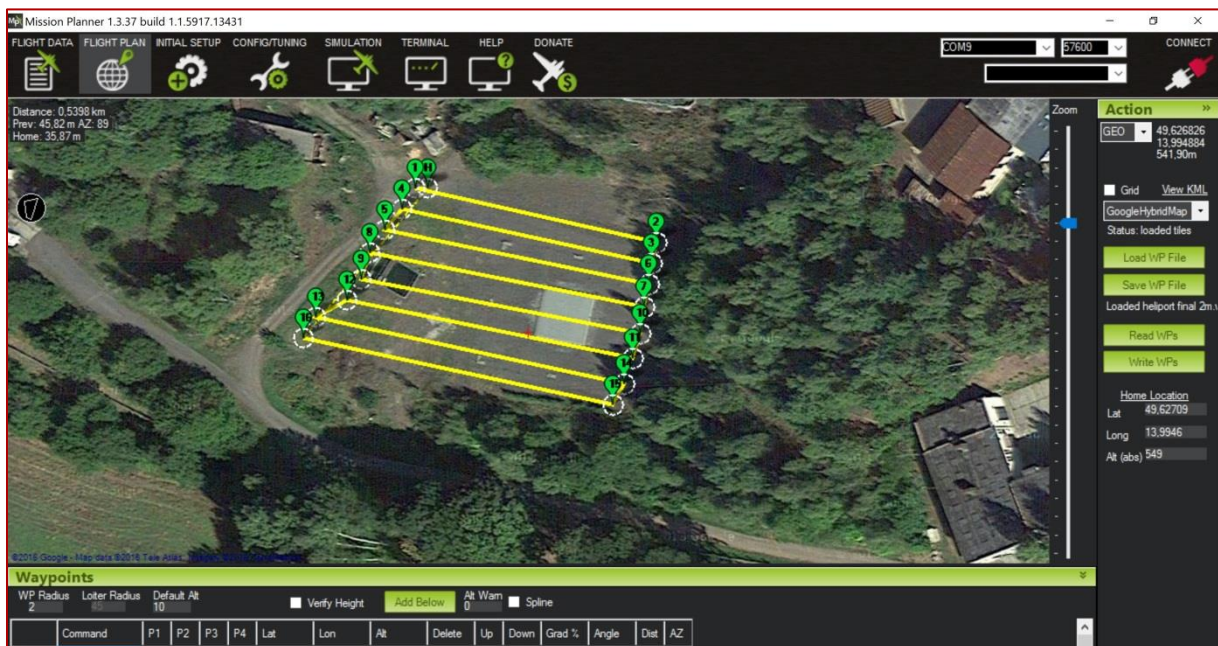
Ve vhodném plánovacím SW, viz kap. 3.1.3.1, je nejprve lokalizována zájmová plocha s využitím vhodného zdroje map (např.: Google maps). Zpřesnění hranic zájmové oblasti se provede zadáním GPS souřadnic z přenosného GPS zařízení. Na hranice této plochy jsou v plánovacím systému umístěny tzv. „waypointy“ vymezující trasu letu. V místě „waypointu“ je možné BLP zadat instrukci, např. změnu směru letu, vyčkávání, atd. Spojením zadaných „waypointů“ jsou vymezeny linie trasy letu, rovnoměrně pokrývající zájmovou oblast. Příklad vymezených linií trasy letu je uveden na obr. 4. V plánovacím software je nastavena vzdálenost BLP od zadaného „waypointu“, která definuje toleranci pro dosažení „waypointu“. Po zadání sady „waypointů“ a startovací pozice BLP (je aktualizována vždy při spojení létajícího prostředku s programem) je programem automaticky dopočtena vhodná letová trasa, kterou je možno dále upravovat. Příklad umístění „waypointů“ a teoretických linií trasy letu spolu s dopočtenou trasou je uveden na obr. 4.

Vzdálenost linií trasy letu je volena podle požadavků v zadání prováděného měření. Je-li požadováno rychlé screeningové měření je volena síť 20 m x 20 m, nebo 10 m x 10 m. Pro podrobnější měření je volena vzdálenost linií trasy letu 5 m. Tímto jsou nastaveny rozměry v jednom směru (X) měřicí sítě.

Dále je nastavena rychlost letu. Rychlost letu je volena s ohledem na schopnost užitého BLP pohybovat se po zadané trase bez větších odchylek. Do volby vhodné rychlosti je též třeba zahrnout i povětrnostní podmínky. Za vhodnou se obvykle považuje rychlost letu v rozmezí 0,5 - 2 m.s<sup>-1</sup>. Rychlost letu je stanovena na základě technických parametrů BLP a měřicího zařízení. V závislosti na nastavené rychlosti letu je později navolena délka periody vzorkování podle kap. 3.2.1.2.

Zadaná trasa, společně s parametry letu, je uložena do vhodného datového souboru a následně načtena a uložena do řídicí jednotky bezpilotního létajícího prostředku. Automatické měření je inicializováno přepnutím bezpilotního létajícího prostředku do tzv. automatického módu.

Pro následné vyhodnocení naměřených dat jsou vždy pro měření  $\dot{H}^*(10)$  připraveny a následně proměřeny dvě identické letové trasy, lišící se pouze výškou letu. Tyto měřicí trasy se volí optimálně ve výškách letu 3 m a 8 m, pokud to podmínky v místě měření neumožňují, je zvolena nejnižší možná výška letu a výška o 5 m vyšší.



**Obr. 4** Ilustrativní příklad letové trasy, naplánované s využitím programu Mission Planner ([www.ardupilot.org](http://www.ardupilot.org))

### **3.2.1.2 Nastavení detekčních systémů a záznamu měřených dat**

V programu pro ovládání detekčních systémů jsou nastaveny parametry pro provedení zadaného měření. Je zde nastaveno vysoké napětí pro daný detekční systém na odpovídající úroveň podle požadavků daného měřicího systému.

Dále jsou nastaveny parametry měření, pro měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu je to četnost snímání měřené hodnoty, tedy doba, po kterou je  $\dot{H}^*(10)$  integrován a následně zprůměrován. Tato doba musí být volena s ohledem na nastavenou rychlost letu tak, aby v druhém směru (Y) (směr X viz kap. 3.2.1.1 ) bylo rovněž dosaženo dostatečného pokrytí měřicí sítě (dostatečným pokrytím mříže se rozumí rozestupy mezi měřicími body v pravoúhlé měřicí síti X x Y odpovídající zadání, tedy maximálními rozestupy v obou směrech sítě jsou vzdálenosti definované požadavky na vzdálenost měřených bodů v zadání). Pro maximální dobu periody vzorkování  $t_{max}$  platí“

$$t_{max} = \frac{y}{v_{let}},$$

kde y je rozměr měřicí sítě ve směru Y podle požadavků v zadání (viz kap. 3.2.1.1) a  $v_{let}$  je zadaná rychlost letu. Perioda vzorkování t je pak tedy volena tak, aby platilo  $t \leq t_{max}$ .

### **3.2.1.3 Provedení leteckého měření**

Měření je provedeno v tzv. „automatickém módu“. Bezpilotní létající prostředek je po odstartování uveden do automatického módu a křížuje zájmovou oblast po předem zadané trase. Během letu je BLP operátorem pouze sledován, aby bylo umožněno okamžité převzetí kontroly nad létajícím prostředkem v případě jakékoliv mimořádné události. Dále jsou parametry letu monitorovány on-line na bezdrátově připojeném PC zařízení. V případě automatické indikace nízkého stavu napětí na akumulátoru, je let v automatickém módu operátorem přerušen a po výměně akumulátoru je let v automatickém módu obnoven z posledního dosaženého „waypointu“. Po dokončení zadané letové trasy je let ukončen operátorem.

### **3.2.1.4 Měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v dané oblasti**

Měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu je prováděno podle zadaných parametrů v integrálním režimu, a měřená hodnota je stanovena jako průměr přes dobu integrování. Během měření jsou hodnoty on-line monitorovány na bezdrátově připojeném PC zařízení a zároveň ukládány na paměťové medium detekčního přístroje jako záloha dat pro případ ztráty datového spojení s detekčním zařízením.

### **3.2.2 Rychlá vizualizace dat naměřeného $\dot{H}^*(10)$ a lokalizace plošné anomálie**

Rychlá vizualizace dat naměřeného příkonu prostorového dávkového ekvivalentu je provedena ve vhodném systému pro zpracování a vizualizaci geografických dat, např. software QGIS: Pro rychlou vizualizaci měřených dat v terénu je využito pouze zobrazení měřených bodů v závislosti na jejich GPS souřadnicích s přiřazením vhodné škály znázorňující velikost příkonu prostorového dávkového ekvivalentu, jak je popsáno dále v kap. 3.3.1.1. Příklad rychlé vizualizace měřených dat je uveden v příloze, viz kap. 3.2.2.

Na základě vizualizovaných dat s přiřazenou barevnou škálou je na vytvořené mapě lokalizována oblast plošné anomálie s vyšším dávkovým příkonem a jsou odhadnuty souřadnice středu plošné anomálie. Tyto souřadnice definují polohu BLP při gamaspektrometrickém měření.

### **3.2.3 Provedení spektrometrického měření za účelem identifikace zdroje záření**

Po dosažení souřadnic plošné anomálie je zahájeno spektrometrické měření, a naměřené spektrum je ukládáno na paměťové medium detekčního zařízení, a současně on-line zobrazováno na bezdrátově připojeném PC zařízení. Výška letu pro spektrometrické měření je volena jako nižší hodnota z výšek, ve kterých bylo provedeno měření  $\dot{H}^*(10)$ . Doba měření je volena tak, aby byl naměřen statisticky významný počet impulsů ve spektru a s ohledem na maximální dobu letu při daném nabití akumulátoru bezpilotního létajícího prostředku (obvykle alespoň 10 min.). Doba měření je volena tak, aby použitý vyhodnocovací SW byl schopen identifikovat ve spektru jednotlivé radionuklidy. Měření je možné za stejných podmínek opakovat a získaná spektra sčítat.

### **3.2.4 Měření ke stanovení korekčního faktoru na výšku**

Pro stanovení korekčního faktoru je provedeno měření na minimálně 15 měřicích bodech vybraných na základě výsledků rychlé vizualizace leteckého měření. V těchto bodech je realizováno statické měření po dobu alespoň 30 s (se vzorkovacím krokem 1 s) ve výšce 1 m a ve výškách při kterých bylo prováděno letecké měření. Pro další zpracování je pak uvažována průměrná hodnota  $\dot{H}^*(10)$  pro každý měřicí bod a každou výšku měření.

### **3.2.5 Provedení pozad'ového měření**

Pro správné zpracování a interpretaci dat je nezbytné provést měření pozad'ových hodnot, obvyklých v daném místě, zejména je-li požadováno porovnání naměřených dat s hodnotou podle hodnotícího kritéria. Za tímto účelem jsou poblíž zájmové oblasti určeny dvě plochy, kde se nepředpokládá radioaktivní kontaminace. Na těchto plochách je způsobem

analogickým postupem, uvedenému v kap. 3.2.1, proměřen příkon prostorového dávkového ekvivalentu. Třetí kvartil naměřených hodnot  $\dot{H}^*(10)$  je brán s ohledem na nejistotu stanovení jako pozad'ová hodnota  $\dot{H}^*(10)$ , obvyklá v daném místě.

Na vybrané pozad'ové ploše je rovněž změřeno spektrum záření gama. Toto spektrum při analýze slouží jako tzv. spektrum pozadí. Pro snížení nejistoty měření pozad'ového spektra je žádoucí, aby celková délka měření spektra pozadí byla minimálně trojnásobkem doby měření spektra v zájmové oblasti.

### **3.3 Zpracování a vizualizace naměřených dat, tvorba mapového výstupu**

#### **3.3.1 Vizualizace naměřených hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu**

Je vyžadováno naměřená data vizualizovat s ohledem na jejich GPS souřadnice, a následně barevně klasifikovat s ohledem na zadané hodnotící kritérium. Poté jsou data interpolována přes zájmovou oblast za účelem vytvoření barevné mapy, vizualizující rozložení měřené veličiny. SW mohou být generovány izolinie pro danou veličinu. Data jsou využita pro tvorbu mapového výstupu, zobrazujícího rozložení dané veličiny v zájmové oblasti společně s vhodným komentářem. Vzhledem k širší škále použitelného SW vybavení a jejich různému použití je v tomto pracovním postupu popsáno zpracování a vizualizace dat s využitím programu QGIS.

Výstup vizualizující naměřená data musí obsahovat:

- grafické znázornění rozložení měřených hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v zájmové oblasti;
- odstupňování naměřených hodnot a jim přiřazenou barevnou škálu s legendou;
- případnou lokalizaci plošné anomálie a identifikaci radionuklidů.

##### **3.3.1.1 Vizualizace naměřených dat v prostředí QGIS**

Naměřená data jsou do programu QGIS načítána jako typ vrstvy s odděleným textem ve formátu (GPS longitude; GPS latitude; measured value) nejlépe ze souboru ve formátu CSV. Načtená data jsou programem vizualizována v závislosti na GPS souřadnicích. Pro vizualizaci

je vhodné mapu diskrétních dat podložit vrstvou obsahující vhodná mapová data se zafixovanými GPS souřadnicemi (např.: vhodnou WMS vrstvou). Pro vizualizaci naměřených hodnot je možné odstupňovat barevné vyobrazení měřených bodů podle hodnot zájmové veličiny. Barevnou škálu je nutné volit tak, aby po provedené vizualizaci byly barevně jasné odděleny hodnoty, přesahující danou směrnou hodnotu.

### ***3.3.1.2 Interpolace naměřených dat v prostředí QGIS***

Program QGIS umožňuje provést interpolaci naměřených dat přes zájmovou oblast. Na základě interpolovaných hodnot je pak možné vytvořit barevnou mapu s vizualizací rozložení dané veličiny v zájmové oblasti. Pro tuto mapu je nutné opět využít barevnou škálu, barevně oddělující lokality, kde příkon prostorového dávkového ekvivalentu překračuje hodnotící kritérium.

### ***3.3.1.3 Další zpracování dat v prostředí QGIS***

Vzhledem k tomu, že interpolace měřených hodnot je programem prováděna přes obdélníkovou oblast zahrnující naměřené body, je vhodné následně interpolovanou vrstvu oříznout na zájmovou oblast. Za tímto účelem lze využít například tzv. konvexního obalu dat, podle kterého se následně vrstva obsahující interpolovaná data ořízne.

Na základě vrstvy interpolovaných dat, je pak možné extrahovat vrstvu izolinií pro interpolovanou hodnotu a následně vynést izolinie do mapy.

### ***3.3.1.4 Tvorba mapového výstupu v prostředí QGIS***

Mapový výstup se pomocí programu QGIS tvoří s využitím modulu Tvůrce map. Pomocí tohoto modulu je možné vytvořit mapový výstup obsahující nejen zpracovaná mapová data, ale též je možno do výstupu umístit další prvky mapy, jako je legenda a měřítko. Mapový výstup je možné a také vhodné doplnit vhodnými popisky a komentáři. Příklad mapového výstupu je uveden v příloze 2 v kap. 8.3.

## **3.3.2 Zpracování naměřených hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu**

Pro porovnání hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu s hodnotícím kritériem je nutné provést odhad rozložení přepočtených hodnot ve výšce 1 m nad povrchem země. Je-li v místě měření realizovatelné pozemní měření podle kap. 3.2.5, pak lze stanovit odhad korekce na výšku letu. Přesné stanovení korekčního koeficientu na výšku letu by bylo možné pouze za předpokladu znalosti geometrie zdroje záření.



Zpracování naměřených hodnot  $\dot{H}^*(10)$  se pro potřeby této metodiky provádí ve dvou krocích:

- 1) je stanoven odhad procentuálního rozložení přepočtených hodnot  $\dot{H}^*(10)$  ve výšce 1m, podle kap. 3.3.2.1
- 2) je stanoven odhad korekčního koeficientu na výšku letu umožňující přepočet naměřených hodnot  $\dot{H}^*(10)$  na odpovídající hodnotu ve výšce 1 m, podle kap. 3.3.2.2

### ***3.3.2.1 Provedení odhadu rozložení hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu ve výšce 1 m***

Pro analýzu jsou použity veškeré hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  naměřené v dané oblasti. Je-li rozložení hodnot  $\dot{H}^*(10)$  v celé ploše homogenní, hodnoty průměrného  $\dot{H}^*(10)$  se v rámci chyby měření neliší od pozad'ových hodnot, obvyklých v daném místě a hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  nepřekračují hodnotu danou hodnotícím kritériem, pak není radioaktivní kontaminace zájmové oblasti prokázána. Tímto však není vyloučena případná přítomnost bodových zdrojů záření, které vzhledem k výšce měření (tedy vzdálenosti od detektoru) nepřispívají signifikantně k odezvě detektoru. Rozhodnout o homogenitě hodnot  $\dot{H}^*(10)$  je možno podle hodnoty variačního koeficientu pro sadu naměřených hodnot  $\dot{H}^*(10)$ , viz Neubauer et al. (2012):

$$v = \frac{s_n(PFDE)}{PFDE},$$

kde  $v$  je variační koeficient pro sadu naměřených hodnot  $\dot{H}^*(10)$ ,  $\overline{PFDE}$  je aritmetický průměr hodnot a  $s_n$  směrodatná odchylka. Je-li hodnota  $v > 0,5$  je možné soubor hodnot považovat za silně nehomogenní. Pak s jistou rezervou můžeme za homogenní soubory považovat sady měřených hodnot, pro něž je variační koeficient  $v < 0,3$ .

Nesplňuje-li soubor naměřených hodnot výše uvedené podmínky, a tento soubor naměřených hodnot je dostatečně rozsáhlý pro každou měřenou sadu (alespoň 200 měřených bodů v sadě – soubor obsahující naměřené hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ze všech proměřených konvexních čtyřúhelníků v dané zájmové oblasti), je možno v každém souboru hodnot určit vhodné percentily hodnot  $\dot{H}^*(10)$ , a ty následně využít k relativnímu popsání rozložení naměřených hodnot v uvažované oblasti ve výšce 1 m. Pro zpracování je vhodné uvažovat jednotlivé kvartily (tedy 25., 50., a 75. percentil) hodnot  $\dot{H}^*(10)$  doplněné o 90. a 95. percentil  $\dot{H}^*(10)$ . V případě opravdu rozsáhlého souboru hodnot  $\dot{H}^*(10)$  (alespoň 2000 bodů) je vhodné zahrnout i 99. percentil.

Získané hodnoty výše uvedených percentilů  $\dot{H}^*(10)$  jsou dále vyneseny do grafu v závislosti na výšce měření. Předpokládáme-li plošný zdroj a lineární charakter výše uvedené závislosti, je možné body odpovídající jednotlivým percentilům proložit přímkou ve tvaru:

$$\dot{D}_k = Ah + b,$$

kde:

$\dot{D}_k$  je k-tý percentil dávkového příkonu,

$h$  je výška letu při měření.

Z rovnic obdržených lineárních prokladů je možno dosazením výšky jednoho metru stanovit odhady výše uvedených percentilů hodnot  $\dot{H}^*(10)$  v 1 m. Na základě takto obdržených hodnot vybraných percentilů  $\dot{H}^*(10)$  ve výšce 1 m lze stanovit procentuální odhad hodnot  $\dot{H}^*(10)$  v dané oblasti v 1 m.

Obdobně je vhodné zpracovat i hodnoty maxima v jednotlivých sadách měření a použít je k odhadu maximální hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  v 1 m. Tento odhad je však nutné posuzovat s ohledem na citlivost maxima na odlehlé hodnoty měření. Odhad maxima je tedy nutno posuzovat v kontextu odhadu vybraných percentilů  $\dot{H}^*(10)$ , zejména podle 95. a 99. percentilu.

### **3.3.2.2 Stanovení odhadu korekčního koeficientu na výšku letu**

Stanovení odhadu korekčního koeficientu je prováděno na základě naměřených hodnot podle kap. 3.2.4 a za předpokladu plošného zdroje. Z naměřených hodnot jsou stanoveny průměrné hodnoty pro každý bod a každou výšku měření. Označme  $[\dot{H}^*(10)]_{1m}$ ,  $[\dot{H}^*(10)]_{3m}$ ,  $[\dot{H}^*(10)]_{8m}$  po řadě průměrné hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ve výšce 1m, 3m a 8 m nad zemí z hodnot naměřených v jednotlivých bodech. Pak lze zavést pro jednotlivé měřicí body korekční koeficienty na výšku měření:

$$k_{13} = [\dot{H}^*(10)]_{1m} / [\dot{H}^*(10)]_{3m},$$

$$k_{18} = [\dot{H}^*(10)]_{1m} / [\dot{H}^*(10)]_{8m}.$$

Pro další použití pak označme  $\overline{k_{13}}$  a  $\overline{k_{18}}$  průměrné hodnoty odpovídajících korekčních koeficientů přes všechny měřicí body podle kap. 3.2.4 po vyloučení korekčních koeficientů z bodů na nichž se hodnoty  $[\dot{H}^*(10)]_{3m}$  a  $[\dot{H}^*(10)]_{8m}$  v rámci stanovené nejistoty měření neliší od hodnoty pozadí obvyklého v místě měření.

Korekčními koeficienty jsou násobeny naměřené hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ve 3 m, resp. v 8 m podle kap. 3.2.1.4 za účelem stanovení odhadu měřené veličiny ve výšce 1 m. Přepočítávají jsou pouze naměřené hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ve 3 m, resp. v 8 m podle kap. 3.2.1.4, které převyšují pozadřovou hodnotu obvyklou v místě měření minimálně 1,5násobně.

Označme  $\dot{H}^*(10, 3)_{\text{měřená}}$ , resp.  $\dot{H}^*(10, 8)_{\text{měřená}}$  hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  naměřené ve výšce 3 m, resp. v 8 m podle kap. 3.2.1.4, pak lze stanovit odhad odpovídajících hodnot ve výšce 1 m následovně:

$$\dot{H}^*(10, 1)_{\text{přepočtená}} = \overline{k_{13}} \times \dot{H}^*(10, 3)_{\text{měřená}}, \text{ resp. } \dot{H}^*(10, 1)_{\text{přepočtená}} = \overline{k_{18}} \times \dot{H}^*(10, 8)_{\text{měřená}}$$

Takto lze přepočítat hodnoty naměřené podle kap. 3.2.1.4 a stanovit odhad přepočtených hodnot  $\dot{H}^*(10)$  ve výšce 1 m pouze za předpokladu plošného zdroje. Experimentálně bylo ověřeno, že takto lze odhadnout přepočet na hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ve výšce 1 m pro měřené hodnoty v intervalu od hodnot pozadřových až po hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  v řádu dolních jednotek  $\mu\text{Sv/hod}$ .

### **3.3.3 Diskuze dílčích nejistot, ovlivňujících celkovou nejistotu stanovení měřených veličin**

Vzhledem k náročnosti celého procesu měření k výsledné nejistotě stanovení přispívá celý soubor dílčích nejistot, ovlivňujících stanovený výsledek. Mimo nejistoty spojené s použitím samotných měřicích zařízení, jde o další nejistoty spojené s nastavením měřicí trasy a použitím bezpilotního létajícího prostředku a v neposlední řadě o nejistoty zanesené do výsledku během zpracování dat, zejména pak při odhadu korekce na výšku letu.

#### **3.3.3.1 Nejistoty spojené s použitými přístroji a pracovním postupem**

Mimo nejistoty samotných měřených hodnot, zde jde o další soubor možných vyskytujících se nejistot, spojených zejména s použitím bezpilotního létajícího prostředku. Sem lze zahrnout nejistoty spojené s výběrem zájmové plochy na použité podkladní mapě v plánovacím SW letu, dále sem přispívá nejistota určení GPS souřadnic a to, jak pro plánování letové trasy, tak i během navigace při samotném měření. Dále nejistoty způsobené při zpracování a interpretaci zadaných instrukcí bezpilotním létajícím prostředkem a schopností dodržet zadanou letovou trasu. Dále je to nejistota ve výšce měření způsobená mírnými změnami výšky letu v závislosti na povětrnostních podmínkách a členitosti povrchu terénu během samotného měření, výška letu musí být také občas korigována operátorem.

### **3.3.3.2 Nejistoty spojené s vyhodnocením dat**

Zejména s ohledem na požadavek porovnat naměřené hodnoty  $\dot{H}^*(10)$  ve výškách letu s hodnotou podle hodnotícího kritéria ve výšce 1 m nad zemí, je třeba provést odhad korekce na výšku letu. Během tohoto procesu může do výsledné nejistoty stanovení přispívat poměrně značná dílčí nejistota. Stanovení korekce na výšku letu podle této metodiky lze totiž uvažovat pouze jako kvalifikovaný odhad, protože stanovení této korekce je velmi závislé na znalosti geometrie zdroje ionizujícího záření. Bez této znalosti se lze pokusit pouze o provedení odhadu. Poněkud menší chyba bude do výsledku zanesena, bude-li v místě měření možnost provést na vybraných bodech pozemní měření ve výšce 1 m a z naměřených hodnot experimentálně stanovit korekční koeficient na výšku letu. Zde vstupující chyba stanovení korekčního koeficientu bude záviset na dostatečném navzorkování zájmové oblasti pozemním měřením. Nebude-li možno provést pozemní měření, pak se lze pouze pokusit za podmínek popsaných v textu výše, tedy zejména za podmínky plošného zdroje, provést odhad procentuálního zastoupení hodnot  $\dot{H}^*(10)$  na zájmové ploše ve výšce 1 m. Zde je vhodné zdůraznit, že jde pouze o odhad. Tento odhad je možné zpřesnit provedením měření ve více výškách, v postupu uvedené dvě měřicí výšky jsou nutnou podmínkou.

Vzhledem k tomu, že na výsledné nejistotě stanovení se podílí, jak bylo popsáno výše, celý soubor dílčích nejistot a jejich kvantifikace by byla velmi obtížná, je možno se pokusit výslednou nejistotu stanovení pouze zhruba odhadnout. Na základě provedených experimentů lze výslednou relativní nejistotu stanovení  $\dot{H}^*(10)$  odhadnout na  $\pm 25\%$ .

## **4 INOVAČNÍ ASPEKTY, NOVOST POSTUPŮ**

Výhodou leteckého měření v nízkých výškách s využitím bezpilotního létajícího prostředku je oproti pozemnímu pochůzkovému měření možnost měřit v předem definované pravidelné měřicí síti bez nutnosti fyzického vytyčení trasy předem. Tím je zaručena výborná reprodukovatelnost měřicí sítě při opakovaném měření. S možností využití automatického módu měření souvisí rychlejší a přesnější vzorkování, než je tomu při prováděném pozemním pochůzkovém měření. Vzhledem k měření ve vyšších výškách a s tím spojenému většímu citlivému prostorovému úhlu detektoru než v případě pochůzkového měření je v případě leteckého měření vyšší pravděpodobnost detekce lokální anomálie. Měření je možné provádět i ve špatně přístupném terénu, např. podmáčený či nestabilní povrch, hustý nízký porost apod., kde je pochůzkové pozemní měření realizovatelné pouze s většími obtížemi.

## **5 POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY**

Výsledky užití metodiky budou primárně využívány jako jeden z podkladů k rozhodování inspektorů SÚJB při dozorové činnosti v rámci posačnického monitoringu remedializovaných (ozdravených) ploch po skončení hornické činnosti spojené s dobýváním a úpravou radioaktivního nerostu. Tato metodika umožňuje proměření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v zadané oblasti a toto měření využít pro screeningové měření a rychlý průzkum rozsáhlých ploch, kde existuje podezření na zvýšený příkon prostorového dávkového ekvivalentu překračující hodnotu podle hodnotícího kritéria. Metodika umožňuje na základě naměřených dat sestavit mapu, vizualizující rozložení příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v dané oblasti. Na základě naměřených hodnot příkonu prostorového dávkového ekvivalentu je možno lokalizovat případný zdroj záření a s využitím spektrometrického měření jej následně identifikovat.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

*ArduPilot Autopilot Suite* [online]. Ardupilot community, 2016 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://www.ardupilot.org>

*Google maps* [online]. Google, 2016 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/>

NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KRÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4273-1.

*QGIS* [online]. QGIS community, 2016 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://www.qgis.com>

*Úřad pro civilní letectví* [online]. Úřad pro civilní letectví, 2011 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://www.caa.cz>

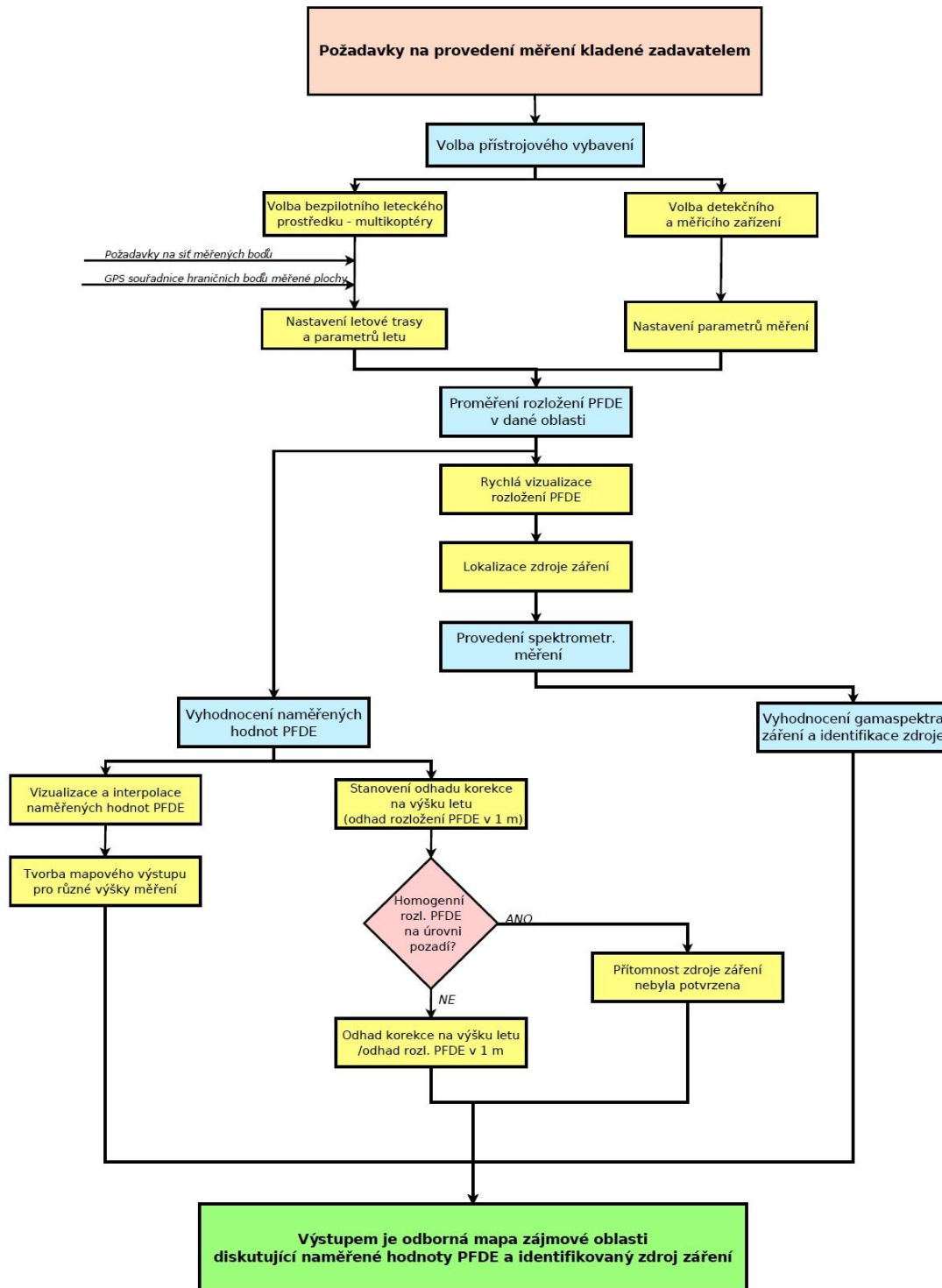
## 7 SEZNAM PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ

Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech postižených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud. *Příspěvek na konferenci Dny radiační ochrany 2016*, Mikulov, 2016.

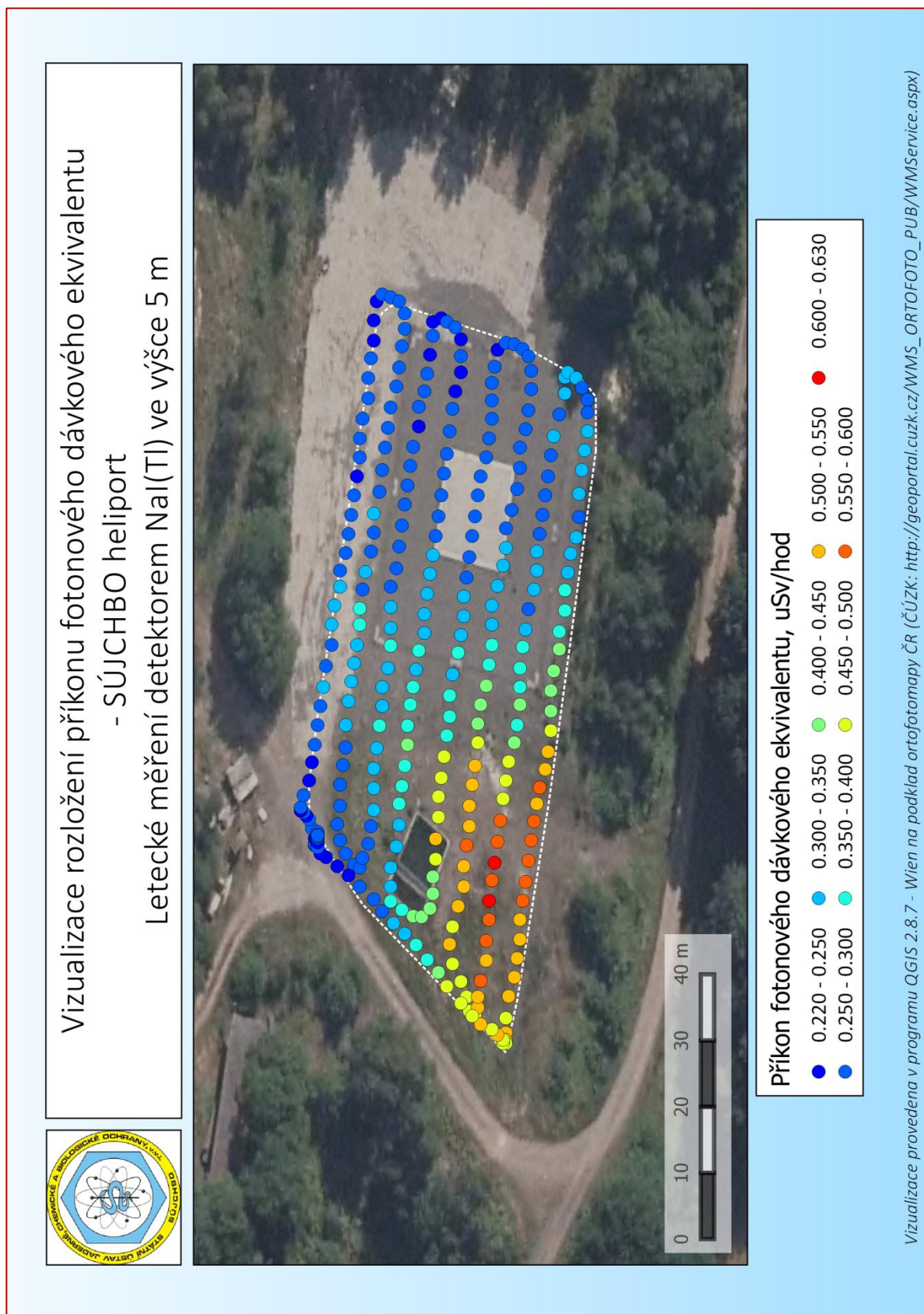
Závěrečná zpráva z řešení projektu: TB05SUJB001: Mapování a kontrola radiačních veličin (s využitím multikoptéry – DRON) v rámci kontroly provedené sanace po těžbě a úpravě uranové rudy v o. z. TÚU, s. p. DIAMO Stráž pod Ralskem.

## 8 PŘÍLOHY

### 8.1 Příloha 1 - Vývojový diagram pracovního postupu



## 8.2 Příloha 2 – Příklad rychlé vizualizace naměřených dat





### 8.3 Příloha 3 – Příklad mapového výstupu

