



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**

Uvolňování radonu do životního prostředí po ukončení provozu uranového dolu Rožná a jeho vliv na okolní obyvatelstvo

**The Release of Radon into Environment after the Closure of the
Uranium Mine in Rožná and its Impact on the Surrounding
Population**

Diplomová práce

Studijní program: Ochrana obyvatelstva

Studijní obor: Civilní nouzové plánování

Konzultant práce: Ing. Oldřich Tomášek

Vedoucí práce: RNDr. Hana Kubátová, Ph.D.

Bc. Soňa Bajerová

Kladno, květen 2016

Z a d á n í d i p l o m o v é p r á c e

Student: **Soňa Bajerová**
Studijní obor: Civilní nouzové plánování
Téma: **Uvolňování radonu do životního prostředí po ukončení provozu uranového dolu Rožná a jeho vliv na okolní obyvatelstvo.**
Téma anglicky: The Release of Radon into Environment after the Closure of the Uranium Mine in Rožná and its Impact on the Surrounding Population.

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

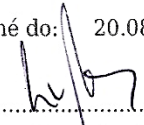
Diplomová práce se bude zabývat problematikou radonu v okolí uranového dolu Rožná. V teoretické části bude charakterizováno ionizující záření a radioaktivní prvek radon. Další část bude tvořit popis uranového dolu a princip ukončení jeho provozu. V praktické části bude následovat samotné měření koncentrace radonu a jeho dceřiných produktů. Zpracování výsledků bude vycházet z analýzy současného stavu a komparace s již uzavřeným uranovým dolem. Pro stanovení koncentrace budou využity přístroje pro měření ekvivalentní a objemové aktivity radonu. Na základě výpočtů se pak odhadne předpokládaná dávka pro okolní obyvatelstvo. Cílem práce bude zhodnotit, k jakému ozáření obyvatelstva by mohlo dojít po uzavření uranového dolu.

Seznam odborné literatury:

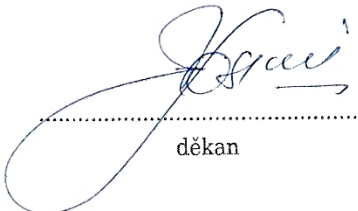
- [1] KLENER, Vladislav , Principy a praxe radiační ochrany, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000, ISBN 80-238-3703-6
- [2] ŠVEC, Jiří, Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením, Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005, ISBN 80-866-3462-0
- [3] Kolektiv autorů, Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření, Dům techniky Ostrava, 2003, ISBN 80-02-01529-0

Vedoucí: RNDr. Hana Kubátová, Ph.D.
Konzultant: Ing. Oldřich Tomášek

Zadání platné do: 20.08.2017


.....
vedoucí katedry / pracoviště

l.s


.....
děkan

V Kladně dne 01.11.2015

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Uvolňování radonu do životního prostředí po ukončení provozu uranového dolu Rožná a jeho vliv na okolní obyvatelstvo“ vypracovala samostatně. Veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v přiloženém seznamu literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne 18. května 2016

.....

podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu Ing. Oldřichovi Tomáškoví za ochotu, věnovaný čas a celkovou spolupráci při psaní diplomové práce, neboť právě konzultant umožnil její realizaci a poskytl všechny potřebné podklady a informace. Děkuji vedoucí práce RNDr. Haně Kubátové, Ph.D. za rady a návrhy, které byly velkým přínosem a přispěly tak k lepší podobě práce. Celkové poděkování patří státnímu podniku DIAMO a jeho představitelům, kteří mi vycházeli vstříc a snažili se poskytnout co nejlepší podporu. Na závěr bych poděkovala panu Ladislavovi Mošnerovi za vzorné vedení při terénním měření.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá problematikou radonu a jeho dceřiných produktů v okolí uranového dolu Rožná I.

V teoretické části je charakterizováno ionizující záření a jeho vlastnosti. Podstatná část je věnována přírodním radionuklidům. Pro objasnění radiační ochrany je zařazena problematika veličin a monitorování pracovního i životního prostředí v okolí uranových dolů. V této části je též popsáno ložisko Rožná a současná těžba, včetně odvětrávání radonu, které hraje významnou roli nejen při těžbě, ale také po ukončení provozu uranového dolu.

Praktická část zahrnuje samotné měření ekvivalentní objemové aktivity radonu a analýzu dat získaných kontinuálním měřením v zájmové lokalitě. Závěr práce je věnován zhodnocení, zda po uzavření uranového dolu Rožná I dojde k ozáření obyvatelstva vlivem zvýšení koncentrace radonu.

Klíčová slova:

ekvivalentní objemová aktivita, ozáření obyvatelstva, radon, uranový důl Rožná.

Abstract:

The thesis deals with the issue of radon and its decay products in the nearby area of the uranium mine Rožná I.

The theoretical part characterizes the ionizing radiation and its attributes. A substantial part is devoted to natural radionuclides. To clarify the radiation protection the issues of quantities and monitoring of workplaces and environment around uranium mines are included. This part also describes the deposit Rožná and the current mining, including venting radon, which plays an important role not only in mining itself, but also after the closure of the uranium mine.

The practical part includes the actual measurement of the equivalent radon concentration and the analysis of the data obtained by continuous measurement of the area of interest. The conclusion presents the outcome whether the uranium mine Rožná I will expose the public to radiation due to radon concentrations after its closure.

Key words:

equivalent volume activity, exposure of population, radon, uranium mine Rožná.

Obsah

Úvod.....	1
1 Současný přehled	3
1.1 Radioaktivita	3
1.2 Charakteristika ionizujícího záření	3
1.2.1 Zdroje ionizujícího záření	4
1.2.2 Druhy ionizujícího záření	4
1.2.3 Biologické účinky	5
1.3 Radionuklidy	7
1.3.1 Přírodní radionuklidy v okolním prostředí	8
1.3.2 Uran	8
1.3.3 Radium.....	9
1.3.4 Radon.....	9
1.4 Veličiny a jednotky v radiační ochraně.....	14
1.4.1 Veličiny popisující zdroj záření	14
1.4.2 Veličiny popisující působení záření na látku	14
1.4.3 Veličiny z oblasti radiační ochrany	15
1.5 Radiační ochrana.....	15
1.5.1 Limity.....	16
1.5.2 Monitorování pracovního prostředí uranových dolů	17
1.5.3 Obyvatelstvo a životní prostředí v okolí uranových dolů.....	17
1.6 DIAMO	17
1.7 Uranový důl Rožná I	18
1.7.1 Historie těžby.....	18
1.7.2 Charakteristika ložiska Rožná a jeho okolí.....	19
1.7.3 Dobývací metoda	23
1.7.4 Zpracování uranové rudy v chemické úpravně.....	23
1.7.5 Technologická voda a odkaliště.....	24
1.7.6 Princip ukončení provozu uranového dolu Rožná I.....	25
1.7.7 Odvětrávání radonu.....	27
1.7.8 Rozptylová studie radonu	29

2	Cíl práce a hypotézy	30
2.1	Cíl práce	30
2.2	Stanovené hypotézy	30
3	Metodika	31
3.1	Bodové měření	31
3.2	Kontinuální měření.....	33
3.3	Výpočet úvazku efektivní dávky.....	35
4	Charakteristika zájmové lokality	36
4.1	Dolní Rožinka	36
4.2	Rožná.....	37
4.2.1	Dvořiště.....	38
4.2.2	Zlatkov	38
4.3	Rodkov	39
4.4	Milasín.....	40
4.5	Bukov	40
5	Výsledky	41
5.1	Bodové měření	41
5.2	Kontinuální měření.....	44
5.3	Výpočet úvazku efektivní dávky.....	51
6	Komparace radonové situace oblasti Rožná s Příbramí.....	53
6.1	Ukončení provozu	54
6.2	Zaplavování dolu.....	54
6.3	Monitorování radonu.....	55
6.4	Výpočet úvazku efektivní dávky na Příbramsku	56
6.5	Odhad předpokládané dávky po ukončení těžby na ložisku Rožná.....	58
7	Diskuse.....	60
	Závěr	64
	Seznam použité literatury	65
	Seznam zkratk a symbolů	71
	Seznam obrázků.....	73
	Seznam grafů	74
	Seznam tabulek	75
	Seznam příloh	76

Úvod

Pojmy jako ionizující záření nebo radioaktivita vyvolávají v mnoha lidech obavy z možných důsledků jejich působení. Zpravidla se lidé mylně domnívají, že největším zdrojem ozáření obyvatelstva jsou zdroje umělé, obzvláště pak jaderná zařízení. Opak je však pravdou a zdaleka největší procento ozáření obyvatelstva je způsobeno přírodními zdroji záření. Přirozená radioaktivita je nedílnou součástí životního prostředí. Jde o významný faktor ovlivňující lidské zdraví tak, že nebezpečné účinky záření většinou způsobí nevratné poškození. Účinky na lidský organismus lze do jisté míry kontrolovat prostřednictvím rozsáhlé monitorovací sítě, která odhalí nadlimitní koncentrace záření a umožní tak provedení vhodných opatření k minimalizaci negativních projevů. Monitorování úrovně přirozené radioaktivity je i z preventivního hlediska významným krokem pro zajištění bezpečnosti obyvatelstva.

Jedním z největších zdrojů ozáření obyvatelstva je přírodní radioaktivní prvek radon a jeho rozpadové produkty. Přítomnost radonu v životním prostředí je ovlivněna řadou faktorů. Jedním z nejvýznamnějších je hromadění plynného radonu v uzavřených prostorech, ať už jde o budovy, podzemní stavby, jeskyně či doly. V otevřeném prostředí je koncentrace radonu poměrně nízká, neboť dochází k silnému působení atmosférických procesů. Problematika radonu je zkoumána pouze desítky let, avšak i přes takto krátkou dobu dospěly technologie a bezpečnostní postupy k významnému pokroku, který umožňuje nejen radon detekovat, ale také zavést účinné ochranné prvky do míst, kde je koncentrace radonu vysoká a hrozí tak ohrožení lidského zdraví.

Uranové doly představují významné místo pro výskyt radonu. Důvodem je přítomnost uranu, jehož rozpadem vzniká mimo jiné radon a produkty jeho přeměny. Závod Rožná I je poslední uranový důl v Evropě, který je v současné době v provozu. I tento provoz však bude v blízké době ukončen. Následovat bude sanace a rekultivace území zasaženého hlubinnou těžbou uranové rudy. Při podzemních činnostech je v provozu nucené odvětrávání radonu, které však bude po skončení prací zastaveno. Otázkou tak je, jaký vliv bude mít ukončení provozu uranového dolu na hromadění radonu v podzemí a jeho následné pronikání na povrch v okolních obcích.

Základem pro zpracování práce jsou interní dokumenty státního podniku DIAMO. Zejména jde o „Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby“ z roku 1998, která je páteří pro současné ukončování provozu a následná opatření. Podkladem pro analýzu dat jsou každoročně vydávané dokumentace „Vyhodnocení vlivu činnosti odštěpného závodu GEAM Dolní Rožinka na životní prostředí“.

Základním cílem práce je provést bodové měření a analyzovat data z kontinuálního měření ekvivalentní objemové aktivity radonu v zájmové lokalitě kolem uranového dolu Rožná I. Výpočet úvazku efektivní dávky z inhalace radonu a produktů jeho přeměny umožňuje odhadnout předpokládaný vliv na obyvatelstvo po ukončení provozu Závodu Rožná I.

1 Současný přehled

1.1 Radioaktivita

Radioaktivitu objevil francouzský vědec Henri Becquerel v roce 1896 při studiu solí uranu. Jedná se o vlastnost, kterou lze jednoduše charakterizovat jako schopnost látky vysílat neviditelné záření. Jde o emise částic, záření nebo obou současně, ke kterým dochází při rozpadu či přeměně nestabilních jader atomů na stabilnější jádra atomů. Radioaktivní přeměna tedy znamená změnu chemické podstaty látky. Jestliže se změní počet protonů v jádře, změní se celý prvek.

Rozlišují se dva druhy radioaktivity:

- přirozená,
- umělá.

Radioaktivita přirozená je výsledkem spontánní přeměny atomových jader. Jestliže je nestabilita jader atomů vyvolána uměle, většinou jadernou reakcí, mluví se o radioaktivitě umělé. I ta se však řídí stejnými zákonitostmi jako radioaktivita přirozená. [1, 2]

1.2 Charakteristika ionizujícího záření

Záření, které je schopné při průchodu látkou či prostředím vytvořit z původně elektricky neutrálních atomů iontové páry, lze definovat jako záření ionizující. Ionizace souvisí se stavbou atomů a strukturou atomových jader. Všechny látky jsou tvořeny atomy, které se skládají z jádra a obalu. Jádro atomu tvoří protony a neutrony a představuje téměř celou hmotnost atomu. Kolem jádra pak obíhají po elipsových drahách elektrony. V důsledku dodání energie neutrálnímu atomu dojde k jeho excitaci nebo vyražení elektronu z elektronového obalu atomu, a tím ke vzniku kladného iontu. Elektrony, které byly vyraženy a disponují dostatečnou energií, mohou okolní prostředí dále ionizovat. [3]

Podle způsobu průběhu ionizace lze záření rozdělit na přímo ionizující a nepřímo ionizující. Záření, které je tvořeno protony, pozitrony, elektrony apod., tedy nabitými částicemi, je přímo ionizující. Částice však musí mít dostatečnou kinetickou energii

k tomu, aby byly schopné ionizaci způsobit. Naopak záření, které je tvořeno nenabitými částicemi, tedy neutrony, fotony apod., se nazývá nepřímo ionizující. Pro tento druh záření je charakteristické, že samotné částice nemohou ionizovat, avšak při kontaktu s látkami nebo prostředím uvolňují sekundární – přímo ionizující záření. [1]

1.2.1 Zdroje ionizujícího záření

Ionizující záření je emitováno z přírodních a umělých zdrojů. Přírodní zdroje zahrnují kosmické záření a přírodní radionuklidy, tedy takové zdroje, které se vyskytují v přírodě. Naopak umělé zdroje záření vytvořil člověk a jedná se o jaderné reaktory, jaderné zbraně, urychlovače, přístroje ve zdravotnictví, defektoskopie, tloušťkoměry, hladinoměry apod. [4]

Kosmické záření tvoří nejen sluneční kosmické záření, ale také galaktické kosmické záření z hlubokého vesmíru a van Allenovy radiační pásy obklopující planetu Zemi. Podle původu se přírodní radionuklidy dělí rovněž do několika skupin. Jedná se o kosmogenní radionuklidy, které vznikají vzájemným působením kosmického záření se stabilními prvky vnějšího obalu Země při jaderných reakcích. Radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, které vznikly již při utváření vesmíru, se nazývají primordiální a poslední skupinou jsou radionuklidy charakterizované jako rozpadové produkty v přeměnových řadách. Právě takto vzniká i plynný radon, který má celou řadu dceřiných produktů již v pevném skupenství. [5]

1.2.2 Druhy ionizujícího záření

Ionizující záření se rozděluje na několik druhů, přičemž každý typ má jinou pronikavost a tvoří ho různé částice či záření. Jedná se o:

- záření alfa,
- záření beta,
- záření gama,
- rentgenové záření,
- neutronové záření. [3]

Největší ionizační schopností disponuje záření alfa, které je tvořeno heliovými jádry. Oproti ostatním druhům má však nejkratší dolet, který je způsobený rychlou ztrátou energie v důsledku ionizace. V plynech urazí několik centimetrů, v kapalných a pevných

látkách pak pouze zlomky milimetrů. Ochrana je v případě zevního ozáření poměrně jednoduchá, neboť jej zastaví i list papíru nebo lidská pokožka. V případě vnitřního ozáření je však situace vážnější. Typickým příkladem alfa zářiče je radium nebo radon.

Vyšší pronikavost má záření beta, které je složeno z elektronů nebo pozitronů. Dolet je možné popsat v plynech metry, v kapalinách centimetry a v pevných látkách milimetry. K zastavení postačí hliníkový plech. Ionizační schopnost je výrazně menší než u záření alfa. Příkladem beta zářiče je stroncium.

Poměrně podobného charakteru jsou elektromagnetické záření gama a rentgenové, které jsou tvořené fotony. Dané nepřímo ionizující záření se vyznačuje velmi krátkými vlnovými délkami a vysokou pronikavostí. Zastavit tento druh záření může pouze masivnější překážka z olova či betonu, která jej pohltí. Často využívaným gama zářičem je kobalt nebo cesium. Umělý zdroj pro rentgenové záření je rentgenová trubice.

Neutronové záření je tvořeno elementárními částicemi bez elektrického náboje. Tím se značně liší od předchozích typů záření. Vysoká pronikavost může být dobře odstíněna vrstvou vody, která je bohatá na vodík. [1, 3, 6]

1.2.3 Biologické účinky

Účinky záření na organismus jsou ovlivněny několika faktory. Druh a energie záření, které působí na živou hmotu, je ovlivňují dle obecných zákonitostí, které jsou známy i u neživých látek. Při absorbování energie dochází k excitaci a ionizaci. Na tyto fyzikální jevy navazují fyzikálně-chemické a biochemické procesy. Důsledky ozáření jsou sledovány jak na úrovni buněčné, tak na úrovni celého organismu.

K jakým změnám či destrukcím v organismu dojde, ovlivňuje rovněž dávka záření a dávkový příkon, tedy energie záření předaná látce v určitém čase. Při vyšších dávkách v krátkém časovém intervalu nejsou buňky schopné aktivovat reparační mechanismy a dané poškození opravit. Jestliže je však organismus vystaven záření v delším časovém úseku v menších dávkách, je schopen poškození eliminovat nebo alespoň snížit.

Posledním významným faktorem ovlivňujícím účinky záření na lidský organismus je radiosenzitivita jednotlivých orgánů a tkání. Stejná dávka záření způsobuje různé poškození v těle, neboť citlivost vůči záření je u jednotlivých orgánů a tkání odlišná.

Tkáně, ve kterých probíhá rychlé buněčné dělení, jsou obecně nejvíce citlivé vůči účinkům ionizujícího záření. [2, 7]

1.2.3.1 Účinky záření na buňku

Vysoká dávka ozáření může způsobit okamžitou smrt buňky v klidovém období mezi buněčným dělením. Častějším typem je však buněčná smrt způsobená ztrátou schopnosti se dělit, která nastává při ozáření menšími dávkami. Poškození buňky se pak projeví později.

Další typ poškození buňky je změna cytogenetické informace. V jádře buňky je uložena genetická informace, která je vlivem záření pozměněna – je vyvolána mutace. Rozlišuje se somatická mutace, která se projevuje u ozářeného jedince a genetická mutace, kterou lze pozorovat až u následující generace. [1, 4]

1.2.3.2 Účinky záření z hlediska vztahu dávky a účinku

Prahové účinky, které se zákonitě projeví po překročení určité prahové dávky, se nazývají deterministické. Jejich souvislost s ozářením je zřejmá. Nastávají při smrti velkého počtu buněk nebo při ztrátě schopnosti buněk se dělit. Intenzita projevů roste s dávkou záření a většinou mají charakteristický klinický obraz. Často se účinky projeví právě v místech, která byla ozářena. Mezi deterministické účinky se řadí například:

- akutní nemoc z ozáření,
- poškození plodnosti,
- radiační dermatitida,
- chronická radiodermatitida,
- poškození oční čočky. [2, 7]

Účinky záření, které jsou vyvolané změnami genetické informace, jsou označovány za stochastické. Se vzrůstající dávkou stoupá i pravděpodobnost výskytu těchto poškození, nikoliv však jejich intenzita jako u deterministických účinků. Stochastické účinky nemají charakteristický klinický obraz a nelze je odlišit od případů spontánního výskytu tohoto poškození. Charakteristickým znakem je pozdní nástup účinků, kdy doba latence může trvat i mnoho let. Příznačné jsou pro tyto biologické účinky:

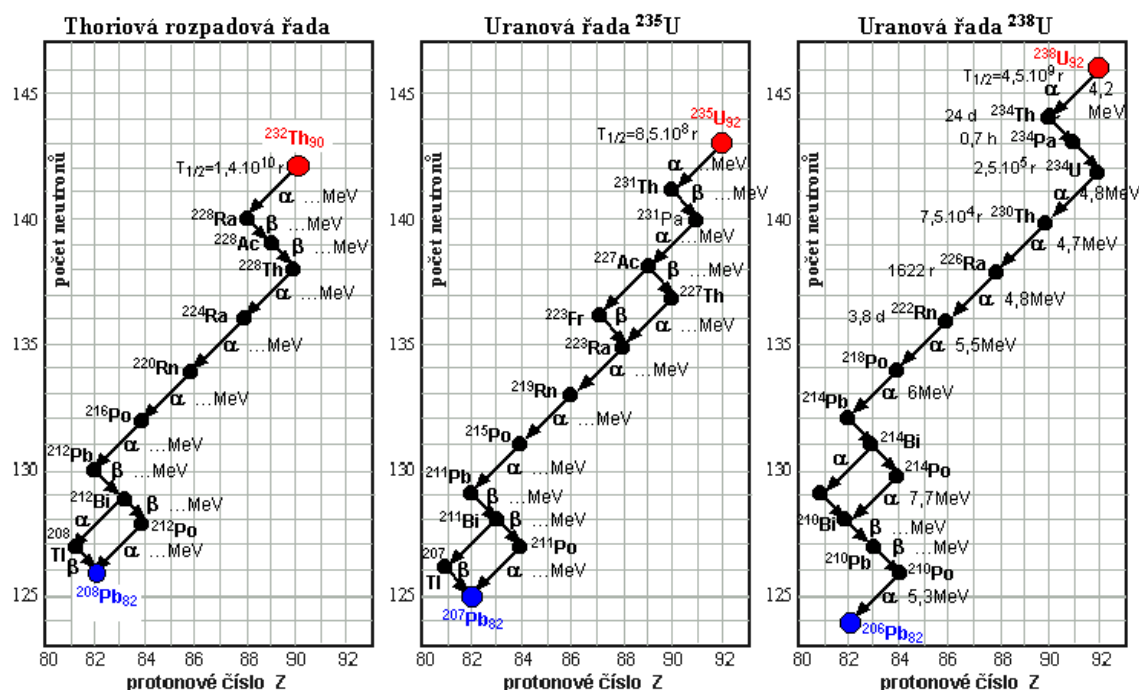
- genetické změny,
- zhoubné novotvary. [2, 7]

1.3 Radionuklidy

Nestabilní nuklid, tedy skupina atomů se stejným protonovým i nukleonovým číslem, který podléhá spontánní radioaktivní přeměně, se nazývá radionuklid. Radioaktivní prvky, které se vyskytují v přírodě, mohou mít radioaktivní nebo stabilní rozpadové produkty. Nestabilní izotopy, které se rozpadají na další nestabilní izotopy, tvoří základ rozpadových řad. Jsou známy tyto rozpadové řady:

- uran-radiová (uranová),
- uran-aktiniová (aktiniová),
- thoriová,
- neptuniová (ta je však umělá).

Uran–radiová rozpadová řada začíná radioaktivním izotopem ^{238}U a končí stabilním izotopem ^{206}Pb . Dceřiných rozpadových produktů je velké množství a jedním z nejznámějších je ^{222}Rn . [3, 7]



Obr. 1 – Přírodní rozpadové řady [8]

1.3.1 Přírodní radionuklidy v okolním prostředí

Pouze některé přírodní radionuklidy jsou významné z hlediska ozáření člověka. Jedná se o ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , které tvoří největší původce pro zevní ozáření. Pro vnitřní ozáření zcela převažuje ^{222}Rn , ^{220}Rn , a to v souvislosti s produkty jejich přeměny. [9]

Nejvýznamnějším zdrojem přírodních radionuklidů jsou horniny a půda. Ty jsou nejen původcem záření, ale také radionuklidy z nich uvolňované migrují do vody, ovzduší a potravinových řetězců. I samotné stavební materiály mohou být zdrojem záření, neboť jsou vyráběny z hornin, které mohou vykazovat určitou radioaktivitu.

Uvolňování radionuklidů do vod probíhá složitými procesy, při kterých dochází k vyplňování pórů a dutin v půdách a horninách vodou. V podzemních vodách jsou vyšší hodnoty radioaktivity, neboť zde jsou vody v dlouhodobém kontaktu s horninami s vyšším obsahem radionuklidů. Výjimku tvoří oblasti, kde jsou vypouštěny vody z důlní činnosti do vodních toků. [4]

Do ovzduší se uvolňují radionuklidy převážně z hornin a půdy. Jedná se o radionuklidy v podobě prachu a o radon, který uniká ze Země do atmosféry.

Potravinové řetězce obsahují rovněž přírodní radionuklidy, které se do nich dostávají prostřednictvím rostlin z půdy, z kontaminované vody nebo požitím masa či mléka. [4]

1.3.2 Uran

Uran jako prvek je pojmenovaný po planetě Uran, která byla objevena jen několik let před tímto radioaktivním prvkem. Prvek s chemickým označením U patří do skupiny aktinoidů. Tento stříbrobílý, lesklý kov se řadí mezi nejtěžší prvky, konkrétně je cca o 70 % těžší než olovo, díky své vysoké hustotě. Vyskytuje se ve formě několika izotopů. V přírodě jako směs radioaktivních izotopů ^{238}U , ^{235}U a ^{234}U . První zmíněný je zastoupen v největším měřítku, a to 99,3 %. Uran se rozpadá velice pomalu, poločas rozpadu ^{238}U se přibližně rovná stáří Země, tedy 4,5 miliardy let.

Ačkoliv se uran vyskytuje v přírodě poměrně často, většinou se jedná o nízké koncentrace (0,04 % – 3 %). Mezi státy bohaté na zásoby uranu patří Kazachstán, Kanada, Austrálie a Rusko. V České republice (dále jen ČR) bylo nalezeno a prozkoumáno 164 ložisek a rudních výskytů uranu. Následně se zahájila těžba v 66 z nich. Dnes je

v provozu pouze jediné, ložisko Rožná. Jednou z nejznámějších a nejvýznamnějších rud je uraninit, česky zvaný smolinec. V současné době je využíván zejména obohacený ^{235}U jako palivo do jaderných reaktorů. [10]

1.3.3 Radium

Chemické označení Ra nese radioaktivní prvek radium, který se řadí mezi kovy alkalických zemin. Objev tohoto prvku je spojen s oblastí Jáchymovska, neboť právě odtud byl získán první vzorek radia Marií Curie-Sklodowskou. Výskyt v přírodě je spojen s rozpadovými řadami – uranové a thoriové. Z mateřských radionuklidů se postupem času stává nestabilní radium, které se dále přeměňuje. Poločas přeměny činí u nejvýznamnějších izotopů ^{226}Ra 1602 let a u ^{228}Ra je hodnota mnohem kratší a představuje 6,7 let. Přírodním rozpadovým produktem je radon.

Radium je nebezpečný radionuklid pro svoji vysokou radioaktivitou. Do životního prostředí se dostává zejména těžbou uranu, při které se uvolňuje ze zemské kůry. Ohrožuje lidský organismus zejména svými karcinogenními účinky. [11]

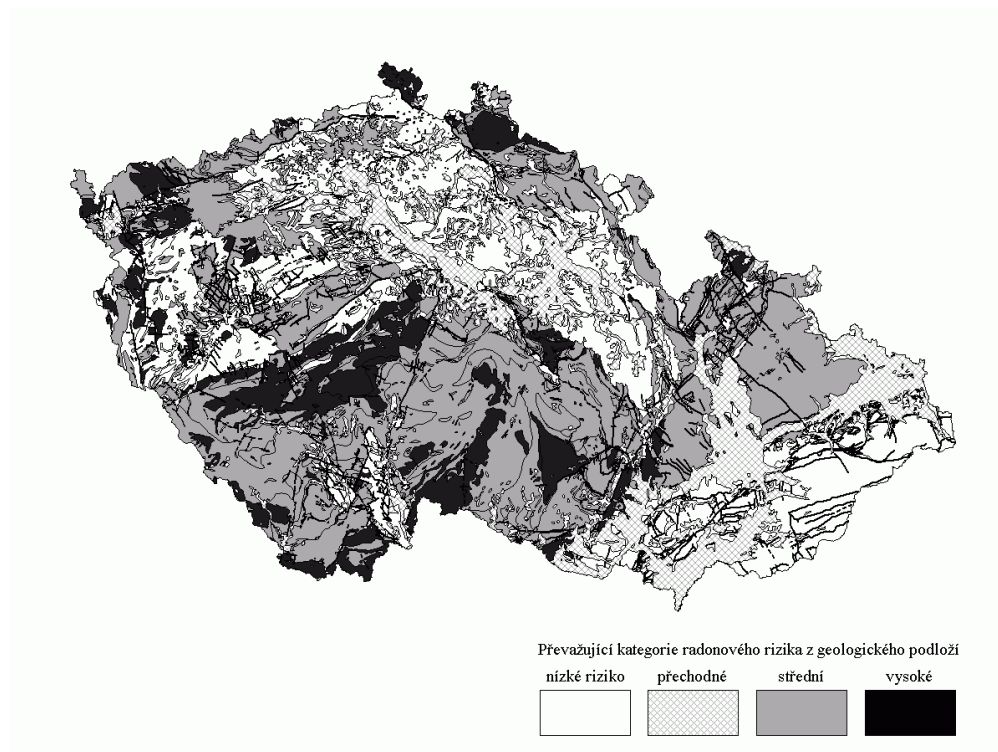
1.3.4 Radon

Radon je název pro prvek, který nemá žádný stabilní izotop. V uranové rozpadové řadě vzniká izotop ^{222}Rn (radon). Existují ještě další dva izotopy ^{220}Rn (thoron) a ^{219}Rn (aktion) s ohledem na rozpadovou řadu, ze které pochází. Z hlediska významnosti je však prioritní radon. Ten zaujímá 86. místo v Mendělejevově soustavě prvků, což znamená, že je nejtěžší z inertních plynů. Tento fakt charakterizuje jeho chování v různém skupenství. Příkladem je jednoduchá difúze a rozpustnost ve vodě. [4]

Poločas přeměny radonu činí 3,82 dne (v další části práce je používán název radon pro izotop ^{222}Rn). Po této době se přemění na polonium ^{218}Po s poločasem rozpadu 3,05 min. Následuje olovo ^{214}Pb s poločasem 26,8 min. Na něj navazuje bismut ^{214}Bi a po 19,9 min krátkodobé polonium ^{214}Po . Posledním již stabilním izotopem je olovo ^{210}Pb s poločasem rozpadu 22 let. Nebezpečnost spočívá právě v krátkodobých rozpadových radionuklidech. Tyto kovové prvky se zachycují na povrchu aerosolových částic ve vzduchu. Mohou být vdechovány nebo deponovány na povrch předmětů. [4, 12]

1.3.4.1 Objev radonu

Již na přelomu středověku s novověkem bylo u horníků pracujících ve stříbrných dolech v Jáchymově a na saské straně Krušných hor pozorováno poškození zdraví. Choroba, v té době označovaná „hornická choroba“, byla až v minulém století definována jako rakovina plic. Vdechování přeměnových produktů radonu bylo označeno za příčinu až v roce 1952. Od tohoto období bylo cílem snížit výskyt rakoviny plic u horníků uranových dolů. Epidemiologické studie sloužily pro bližší charakteristiku vztahu mezi produkty radonu a rakovinou. V sedmdesátých letech se závažnost radonové problematiky prokázala i v domech a přistoupilo se k protiradonovým programům. V ČR byla příprava programu zahájena v Jáchymově v roce 1978. Důvodem bylo nejen radioaktivní podloží s vyšší koncentrací radonu, ale také stavební materiál použitý ve městě, pro jehož výrobu byly využity radioaktivní odpady z místních firem vyrábějících radium a uranové barvy. Na základě geologického průzkumu bylo území ČR zmapováno a došlo k vymezení oblastí s různými úrovněmi radonového rizika. Studie vychází zejména z objemové aktivity radonu v půdním vzduchu a z propustnosti základové půdy pro plyny. [4]



Obr. 2 – Prognózní mapa radonového rizika [13]

1.3.4.2 Zdravotní účinky radonu

Radon a zejména jeho dceřiné produkty přeměny emitují alfa záření o sice malé pronikavosti, avšak se silnými ionizačními účinky. Inhalací plyných a aerosolových částic pronikají radioaktivní látky do organismu a dochází k jejich usazování v dýchacích cestách, zejména v plicních sklípcích. Zde pokračuje jejich rozpad, který je provázen vysíláním rozpadových energií, které působí na tenkou plicní výstelku s matečnými buňkami, tedy na sliznici a ozařují ji. Při zásahu matečných buněk dochází k jejich poškození nebo usmrcení, a tím je narušena jejich funkce regenerace výstelky dělením, jež jinak funguje po celý život. Jestliže se dané poškození jinak řečeno mutace kumuluje, po překročení určité hranice již nevzniká funkční buňka výstelky při dělení, ale vzniká rakovinová buňka.

Rychle se množící rakovinové buňky jsou velké, nefunkční a postupem času prorůstají plicemi. Následkem je smrt. V současné době je prokázáno, že dlouhodobá expozice radonu a jeho dceřiným produktům výrazně zvyšuje pravděpodobnost vzniku rakoviny plic. Rovněž čím vyšší dávky organismus obdrží, tím vyšší je možnost vzniku tohoto onemocnění. [16]

Z celosvětové epidemiologické studie vyplývá, že riziko vzniku rakoviny plic je prokázáno pro koncentrace radonu 150 Bq/m^3 a vyšší. Jestliže se koncentrace radonu zvýší o 100 Bq/m^3 , roste riziko rakoviny plic o 16 %. V případě, že se k působení radonu přidá i kouření, pravděpodobnost vzniku rakoviny je mnohem vyšší.

Radon je na základě odhadu celosvětové epidemiologické studie druhým největším původcem rakoviny plic v ČR. Ročně je detekováno cca 6 000 případů rakoviny plic dle Českého statistického úřadu. Absolutně největším původcem je kouření. Na druhém místě pomyslného žebříčku je však umístěn radon. Ten zaujímá asi 15 % z celkového počtu, tedy 900 případů rakoviny plic ročně v ČR, způsobené radonem a jeho dceřinými produkty. [12, 17]

1.3.4.3 Výskyt radonu

Radon, který se vyskytuje v horninách a půdách, difunduje do okolního prostředí. Část se přitom rozpadne, část se rozpustí ve vodě a část se uvolní do atmosféry. Jaká je objemová aktivita radonu v půdním vzduchu, závisí na hornině a měrné aktivitě radia, na koeficientu emanace, propustnosti podloží a dalších parametrech. Vyšší hodnoty

radonu budou v oblastech, kde je podloží tvořeno granity s vysokým obsahem radia. Do atmosféry se radon dostává difúzí a rychle se rozptyluje i do vyšších vrstev. V přízemní vrstvě atmosféry je průměrná objemová aktivita radonu 5 – 10 Bq/m³. Během dne i noci však koncentrace kolísá v důsledku inverzních stavů. [4]

1.3.4.3.1 Radon v budovách

Radionuklid radon se vyskytuje prakticky všude a stále. Je přítomen v atmosféře, hydrosféře i litosféře. Proto i při užším pohledu jej lze detekovat v pracovním i životním prostředí. Právě přítomnost radonu má za následek nejvyšší radiační ozáření populace. Budovy nejrůznějších typů mohou obsahovat vysoké koncentrace radonu. Hodnoty se pohybují od nejnižších 5 – 10 Bq/m³ až po extrémně vysoké hodnoty 10 000 Bq/m³.

Radon může prostupovat z podloží přes kontaktní plochu, která je poškozena závadami. Může jít o starší stavební technologie, nekvalitní izolace, levný základ domů, sedání stavby, vznik prasklin apod. Dalším faktorem, který způsobuje zvýšenou koncentraci radonu v budově, je podtlak v domě, který vede k nasávání půdního plynu. Příčinou je rozdíl venkovních a vnitřních teplot. Daný tzv. komínový efekt je nejvýraznější v topné sezóně. Je ovlivněn jak kvalitou základové bariéry, tak těsněním dveří a oken. [4]

Protiradonová opatření

Hrozí-li v souvislosti s výskytem radonu v budovách nebezpečí, lze související riziko výrazně snížit zavedením odpovídajících bezpečnostních opatření, tzv. protiradonových opatření. Postupy se rozlišují u stávajících budov a nových staveb.

Směrné hodnoty jsou určující pro obsah radonu ve stavbách. Pro stávající budovy by neměla průměrná hodnota objemové aktivity radonu překročit 400 Bq/m³. Z hlediska nových staveb jsou limity přísnější, neboť vhodnými opatřeními lze hodnoty radonu snížit. Jedná se o 200 Bq/m³. [14]

Aby mohla být zavedena adekvátní opatření u stávajících budov, musí se provést analýza zdrojů radonu a také zjistit jeho šíření v budově. Provedení radonové diagnostiky objektu pak vede k zavedení níže uvedených adekvátních bezpečnostních opatření v závislosti na zdroji radonu.

- **Radon z podloží** – utěsnit cesty vstupu, zvýšit výměnu vzduchu. Při vyšších koncentracích zavedení bodového odvětrávání, podlahové rekonstrukce, nucené ventilace.
- **Radon ze stavebních materiálů** – nucená ventilace a rekuperace tepla.
- **Radon z vody** – nejvhodnější je jeho eliminace ještě před přivedením vody do budovy pomocí aeračních věží (to je však reálné u velkých vodních zdrojů). V domovech je základním opatřením dostatečné větrání v místnostech s velkou spotřebou vody.

V případě protiradonových opatření u nových staveb se ochrana zaměřuje na radon z podloží. Nejprve je nutné provést důkladný terénní radonový průzkum a na jeho základě stanovit radonový index (dříve riziko) pozemku.

- **Nízký radonový index** – není potřeba zavádět speciální opatření.
- **Střední radonový index** – všechny konstrukce v přímém kontaktu s půdou musí obsahovat protiradonovou izolaci, která má rovněž hydroizolační funkci.
- **Vysoký radonový index** – platí předchozí opatření doplněné o odvětrávanou vzduchovou mezeru pod izolací nebo odvětrávací drenážní systém pod stavbou. [4, 12]

Radonový program

Česká republika i další státy usilují o regulaci ozáření obyvatel zavedením radonového programu. Ten aplikuje preventivní opatření, jejichž cílem je snížit výskyt radonu v nových stavbách, respektive již při výstavbě zajistit dostatečnou ochranu proti radonu. Dále upravuje právní rámec a zvyšuje informovanost obyvatelstva o dané problematice. Dalším aspektem radonového programu je intervence k omezení ozáření v již postavených objektech. To znamená vyhledat co nejvíce starších budov s koncentracemi radonu vyššími než průměr a vhodnými opatřeními je snížit na přijatelnou úroveň. [12]

1.3.4.3.2 Radon v uranových dolech

V podzemí uranových dolů jsou pracovníci vystaveni třem způsobům ozáření. Jedná se o inhalaci dlouhodobých radionuklidů z uran-radiové řady, které vysílají alfa záření, dále zevní ozáření gama a posledním typem je ozáření z inhalace produktů přeměny radonu. Nejvýznamnější složkou je právě radon ^{222}Rn , který je v uranovém

hornictví monitorován od doby, kdy byly zjištěny jeho závažné účinky. Zásadní vliv na radiační situaci v podzemním uranovém dole má složení aerosolu ve vzduchu, neboť krátkodobé produkty přeměny radonu se vážou na aerosolové částice v ovzduší, a ty jsou pak vdechovány do plic. [4]

Nejčastěji bylo v souvislosti s hlubinnou těžbou pozorováno onemocnění u horníků uranových dolů způsobené ionizujícím zářením. Hlášena byla zejména rakovina plic, která vzniká v důsledku působení rozpadových produktů radonu a její doba latence se pohybuje kolem 15 – 25 let. Zásadní snížení výskytu tohoto onemocnění nastalo díky zavedení výkonnějšího větrání v dolech, zlepšení pracovních podmínek a zejména celkovou kvalitnější radiační ochranou. [15]

1.4 Veličiny a jednotky v radiační ochraně

Oblast ionizujícího záření a radiační ochrany obsahuje celou řadu veličin a jednotek, které je nutno znát pro správné posouzení a orientaci v dané problematice. Prakticky vždy se popisuje zdroj záření, který emituje určitý druh záření do okolního prostředí. Z hlediska účinků se pak určuje působení záření jak na jakoukoli látku, tak na člověka či jiný živý organismus. Z toho důvodu se veličiny rozdělují do několika skupin. [2]

1.4.1 Veličiny popisující zdroj záření

- **Poločas rozpadu (přeměny)** – lze definovat jako dobu, za kterou se rozpadne právě polovina atomů z původního množství určitého radionuklidu. Značí se T a vyjadřuje se jako časový údaj, který může mít hodnotu v sekundách nebo až v rocích.
- **Aktivita** – udává počet radioaktivních přeměn neboli rozpadlých atomů v radionuklidu v závislosti na čase. Označuje se A a jednotkou je becquerel [Bq].

1.4.2 Veličiny popisující působení záření na látku

- **Absorbovaná dávka** – zkráceně se užívá dávka a značí se D . Charakterizuje energii záření, jež je pohlcována v hmotnostní jednotce ozařované látky. Užívanou jednotkou je gray [Gy].

- **Dávkový příkon** – představuje, jak rychle dochází ke změně dávky za jednotku času. Označení je stejné jako u absorbované dávky D a jednotkou je [Gy/s].

1.4.3 Veličiny z oblasti radiační ochrany

- **Ekvivalentní dávka** – je veličina, která se využívá pro popis biologických účinků ionizujícího záření. Při výpočtu je závislá na typu daného záření a velikosti absorbované dávky. Nese označení H a jednotku sievert [Sv].
- **Efektivní dávka** – zohledňuje různou radiosenzitivitu v jednotlivých orgánech a tkáních. Jako veličina se označuje E a vyjadřuje součet vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v lidském těle. Jednotkou je rovněž [Sv].
- **Objemová aktivita radonu** – vyjadřuje koncentraci radonu, tedy počet přeměn radonu v 1 m^3 za 1 s, přičemž radon má stejnou aktivitu jako jeho dceřiné produkty – jsou tedy v radioaktivní rovnováze. Zkráceně se používá OAR a jednotka Bq/m^3 .
- **Ekvivalentní objemová aktivita radonu** – definuje, jaká je koncentrace dceřiných produktů radonu, tedy jaká je souhrnně objemová aktivita těchto krátkodobých produktů přeměny radonu. Pro označení se využívá EOAR a jednotka Bq/m^3 . [2]

1.5 Radiační ochrana

Největší ozáření způsobují přírodní zdroje, ačkoliv se lidé obávají spíše zdrojů umělých, jako jsou jaderná zařízení. Odjakživa jsou organismy vystaveny přírodnímu radioaktivnímu záření, a to často nevyhnutelně. K ozáření však dochází nerovnoměrně na celé Zemi, což má za následek někdy i násobně vyšší dávky určitým skupinám lidí. Vůbec největší zdroj ozáření je radon v ovzduší budov. Z hlediska rozdělení dávek obyvatelstvu tvoří radon 49 %, a tím značně převyšuje všechny ostatní zdroje. Proto je daná problematika zaměřena zejména na ochranu před radonem. [4]

Radiační ochrana představuje princip ochrany zdraví před škodlivými faktory. Jejím cílem je umožnit přínos z využití zdrojů jaderné energie a záření, přitom však zajistit dostačující stupeň ochrany zdraví. Zahrnuje čtyři základní prvky:

- optimalizace radiační ochrany,
- dodržení obecných dávkových limitů,
- zdůvodnění činností vedoucích k ozáření,
- zajištění bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření.

V ČR se radiační ochranou zabývá zejména Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB), Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. (dále jen SÚRO) a Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i. (dále jen SÚJCHBO). Všechny tyto orgány se řídí zákonem č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a jeho prováděcími předpisy ve formě vyhlášek SÚJB. Z hlediska radiační ochrany se jedná zejména o vyhlášku č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. Všechny tyto předpisy přitom vychází z doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany (ICRP) a mezinárodních standardů. Podmínky pro osoby pracující v daném odvětví se mění v závislosti na aktuálně přijaté legislativě. [4, 18]

1.5.1 Limity

Dle vyhlášky o radiační ochraně jsou stanoveny hraniční hodnoty dávek, které nesmí být překračovány. Jedná se tedy o nejvyšší přípustné dávky. Obecný limit je stanoven na 1 mSv za rok. Pro pracovníky se zdroji ionizujícího záření činí limit 50 mSv za rok, maximálně však 100 mSv za 5 let. Limit pro studenty a učně je pak stanoven na 6 mSv za rok.

Pro ozáření způsobené radonem a jeho produkty přeměny jsou rovněž stanoveny limity. Jedná se o odvozený limit, jehož hodnota je 3 MBq pro roční příjem ekvivalentní objemové aktivity radonu (dále jen EOAR). Tato hodnota odpovídá celoroční průměrné EOAR 1260 Bq/m³. [19]

Na základě monitorovacího programu jsou určeny referenční úrovně, které předurčují potřebná opatření a postupy. Jedná se o tři úrovně:

- **Záznamová úroveň** – určuje hodnoty dávky či jiné veličiny, od kterých je nutné monitorovací výsledky zaznamenávat.
- **Vyšetřovací úroveň** – vyžaduje vyšetření situace, kdy dojde k překročení limitu, jež je obvykle očekáván.
- **Zásahová úroveň** – vyžaduje vykonání mimořádných opatření (zásahu).

1.5.2 Monitorování pracovního prostředí uranových dolů

Podzemí uranových dolů je charakteristické zvýšeným rizikem ozáření v důsledku vyšší koncentrace přírodních radionuklidů. Proto zde musí být přítomen soustavný dohled se zvláštní odbornou způsobilostí v radiační ochraně, který kontroluje dodržování požadavků radiační ochrany. V uranovém průmyslu jsou systematicky zjišťovány a zaznamenávány dozimetrické údaje až od roku 1997, kdy vstoupily v platnost nové právní předpisy a s nimi nové podmínky monitorování. Do této doby šlo zejména o nahodilé kontroly nebo potřeby různých studií. Monitorování pracovního prostředí je zajištěno dle monitorovacího programu, který je schválen SÚJB. [4]

Ochrana zdraví pracovníků uranových dolů je dána zabezpečením přijatelných pracovních podmínek, jako je dostatečné větrání a zkrápění pracovního prostředí, vybavení pracovníků osobními ochrannými prostředky a dozimetry pro osobní monitorování, monitorování pracovního prostředí apod. Každý pracovník, který je vystaven riziku ionizujícího záření má vedenou osobní dozimetrickou kartu. [4]

1.5.3 Obyvatelstvo a životní prostředí v okolí uranových dolů

Těžba a zpracování uranové rudy má za následek ovlivnění obyvatel i životního prostředí v jejich okolí. Proto je nutné přijímat potřebná technická opatření, která napravit vzniklý stav. Neméně důležité je monitorovat uranový důl i jeho okolí, zda nedochází k navýšení ionizujícího záření nebezpečného pro obyvatelstvo i životní prostředí. Vlivem těžby uranové rudy dochází k ovlivnění základních složek životního prostředí, tedy ovzduší, vody a půdy. V souvislosti s tím i člověka, který tyto složky užívá. To je důvod, proč se neustále monitoruje ovzduší, podzemní i povrchové vody a půdy. Na rozdíl od minulosti se v dnešní době provádí řízené uvolňování radionuklidů do životního prostředí, které nesmí překročit stanovené hodnoty. [4]

1.6 DIAMO

Státní podnik DIAMO je organizace, která sídlí ve Stráži pod Ralskem a zajišťuje celou řadu činností spojených s těžbou uranu. Jejím hlavním úkolem byla těžba a zpracování uranu. V současné době je to zejména zabezpečení zahlazování následků hornické činnosti, které s sebou nesou těžby nerostných surovin, jako je uran, rudy a části

uhelného hornictví v ČR. Pro jadernou energetiku plní důležitou produkci uranového koncentráту diuranátu amonného, od kterého je odvozen název podniku.

Strategie této organizace je založena na útlumovém a sanačním programu, který je v souladu se státní politikou. Cílem je vytvořit takové životní prostředí, které nebude ohrožené starými environmentálními zátěžemi. Celkové zlepšení kvality životního prostředí je tedy prioritou. K jeho dosažení napomáhá stát, který jej financuje. Likvidační a sanační práce jsou konkretizovány pro jednotlivé lokality formou technických projektů likvidace a sanace. Podmínky jsou stanoveny usnesením vlády a musí být v souladu s přísnými požadavky na ochranu a tvorbu životního prostředí. [20]

DIAMO tvoří celkem 4 odštěpné závody v několika regionech. Plní různé funkce dle toho, jaké aktivity v souvislosti s těžbou na daném území probíhaly. Jde o odštěpné závody:

- Těžba a úprava uranu ve Stráži pod Ralskem,
- Geologie Ekologie Atom Morava (dále jen GEAM) v Dolní Rožince,
- Správa uranových ložisek v Příbrami,
- ODRA v Ostravě. [21]

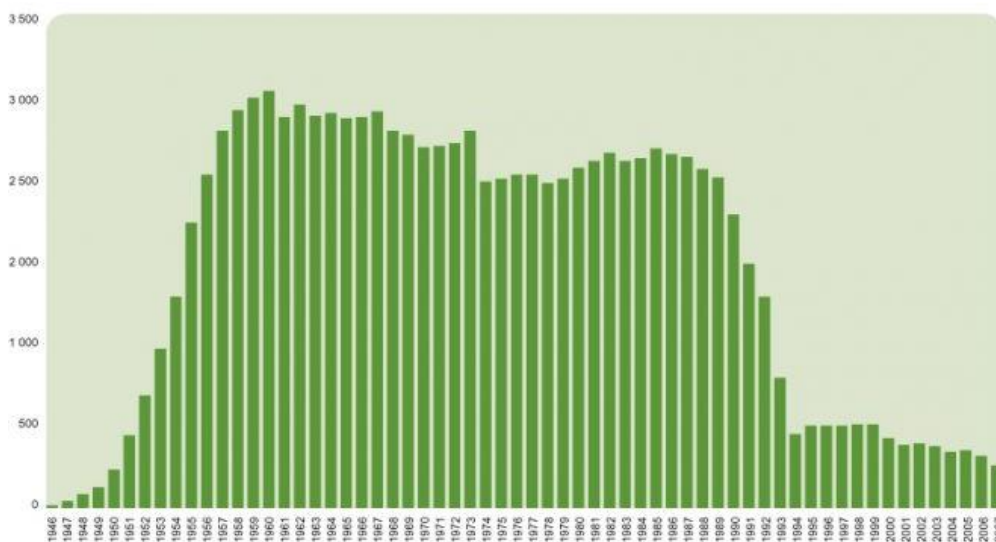
1.7 Uranový důl Rožná I

1.7.1 Historie těžby

Na základě pěšího a auto-gama průzkumu bylo v roce 1954 objeveno ložisko Rožná. Pak následovaly geologické práce zaměřené na geologické mapování, povrchové geologické práce, vrtné práce a geofyzikální práce. Samotná hlubinná těžba uranu byla zahájena v roce 1958 a probíhá i v současnosti. Vyvrcholení těžby nastalo zejména v 70. letech. V následujícím období již těžba postupně klesala. Provoz uranového dolu byl provázen mnoha transformacemi, zejména v souvislosti s technickými, politickými a ekonomickými změnami ve státě a vedení podniku. Rozsáhlé ložisko Rožná bylo rozděleno na dvě části, a to Rožná I (bývalý název Karel Havlíček Borovský) a Rožná II (původní název Jasan). V roce 1995 došlo ke sloučení v jeden celek v rámci útlumového programu s názvem Rožná I, který je zachován dodnes. [22]

Po celém území ČR byla zkoumána celá řada ložisek. Z celkového počtu 164 jich bylo použito pro těžbu 66. Za jedny z největších lze považovat ložiska Rožná, Příbram,

Jáchymov, Stráž, Horní Slavkov, Zadní Chodov a Hamr. Uranový důl Rožná I měl být uzavřen již několikrát v průběhu historie, avšak Usnesení vlády ČR č. 565 ze dne 23. května 2007 umožnilo prodloužení těžby uranové rudy a její zpracování na ložisku Rožná, v lokalitě Dolní Rožínka, po dobu ekonomické výhodnosti těžby. Jde o poslední uranový důl v provozu v ČR i v Evropě. [23]



Graf 1 – Produkce uranu (t/rok) [22]

Z předchozího grafu lze vidět postupné snižování produkce uranu. Důvodem je nejen menší koncentrace uranu v rudě, ale také vyhlášení útlumového programu. Celkem bylo vytěženo cca 16,3 milionů tun uranové rudy, přičemž průměrný obsah je 0,119 % uranu v rudě. Z toho vyplývá, že vytěženého U-kovu bylo 19 432 tun. Zpočátku dobývání rudy závod zaměstnával 3 000 – 4 000 pracovníků. V dnešní době je počet mnohonásobně menší a představuje 374 zaměstnanců na dole Rožná I, přičemž horníků je ještě méně. Odštěpný závod GEAM v Dolní Rožínce má v současnosti necelých 800 zaměstnanců. [24, 25]

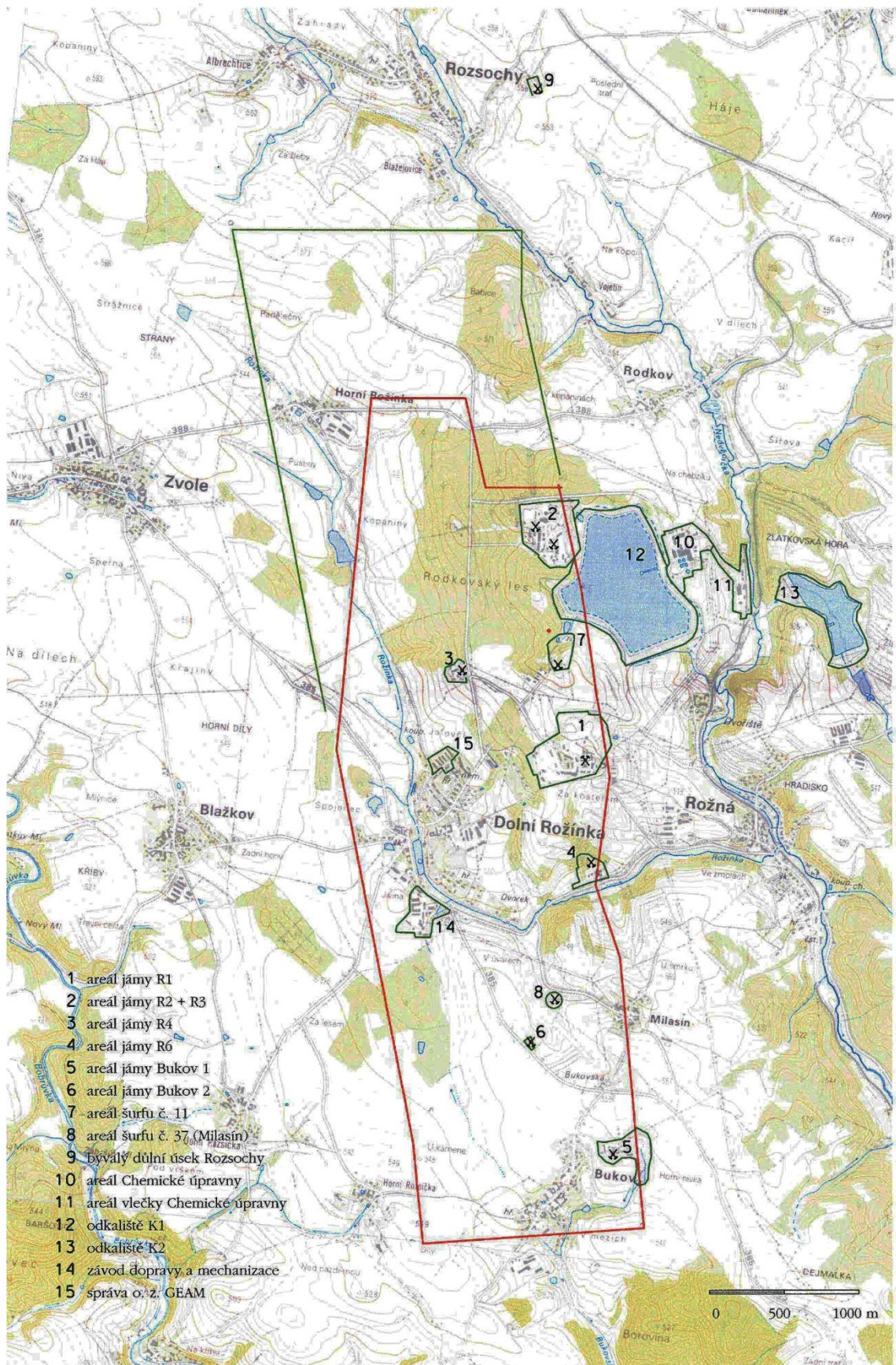
1.7.2 Charakteristika ložiska Rožná a jeho okolí

Ložisková oblast Rožná se nachází na Českomoravské vrchovině, v kraji Vysočina. V jejím blízkém okolí lze nalézt několik menších obcí a město Bystřice nad Pernštejnem, které je vzdáleno 11 km a jeho nadmořská výška činí 502 m n. m. Samotné dobývání rudy a činnosti s ním spojené zasahují do katastrálního území obcí:

- Bukov,
- Milasín,
- Rožná,
- Dolní Rožínka,
- Horní Rožínka,
- Rodkov,
- Rozsochy,
- Dolní Rozsíčka,
- Blažkov. [26, 27]

Z geologického hlediska se jedná o oblast v severovýchodní části strážeckého moldanubika, která se rozprostírá na rozhraní dvou geomorfologických podcelků – Bítešské a Nedvědicke vrchoviny. Základními těženými minerály jsou uraninit a coffinit. Ložisko je popsáno jako hydrotermální s rudními tělesy, které se nachází v žilách a zónách. Celý horninový komplex se vyznačuje intenzivním provrásněním a polohou v tektonicky výrazném pásmu. Pro odvodňování zde slouží přítoky řeky Svratky. Charakter krajiny je částečně zalesněn a zbytek je užíván pro zemědělské činnosti. Rudní pole je tvarem přibližně podobě obdélníku. [26, 28]

Celková rozloha dobývacích prostor je vymezena na 876 ha. Oblast zasažená průzkumnými a dobývacími pracemi se táhne od obce Rozsochy až po obec Habří. Zahrnuje celou řadu průzkumných šurfů, štol, těžních jam a obslužných areálů. Struktura uranového dolu tvoří 24 pater pod povrchem, kde probíhá těžba. Poslední 24. patro je v hloubce cca 1 200 m. Jednotlivá patra jsou umístěna zhruba 50 m od sebe ve vertikálním směru a 50 – 60 m v horizontálním směru. V podloží nejvýznamnějších rudových oblastí je ložisko rozfáráno jámami R 1, R 2, R 3, R 4, Milasín, R 6, Bukov, Rozsochy, R 7S (slepá jáma z 12. patra na 24. patro). Přičemž R 4, R 6, B 2 jsou pouze větrací jámy. V současné době probíhá těžba pouze na jámě R 7S na 23. a 24. patře, avšak i další jámy se využívají například pro čerpání či odvětrávání. [29]



Obr. 4 - Ložisková oblast Rožná I [DIAMO]

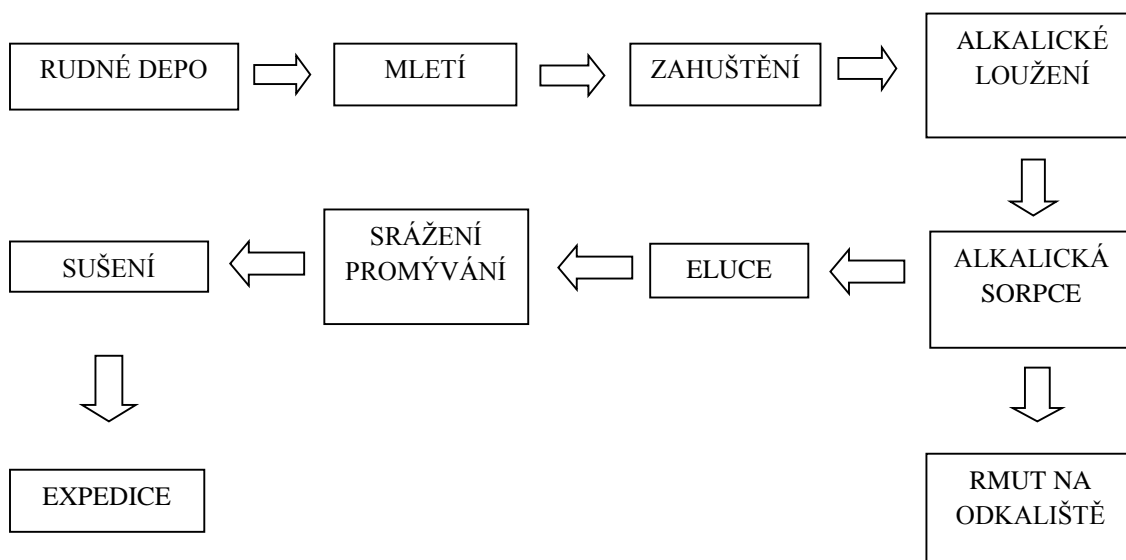
1.7.3 Dobývací metoda

Rudnina je získávána z ložiska od roku 1998 už pouze jednou metodou, a to sestupným lávkováním na zával pod umělým stropem. To znamená postup z horních pater směrem k dolním patřím takovým způsobem, při kterém se sestupně dobývají bloky pomocí horizontálně ražených lávek pod umělým stropem. Vydobyté prostory se zaplní závalem nadložních hornin na předem položený umělý strop, který tvoří drátěné pletivo s kulatinou o průměru 120 mm. Zával je pak proveden trhací prací, která zahrnuje porušení stávající dřevěné výztuže lávky. [24, 31]

1.7.4 Zpracování uranové rudy v chemické úpravně

Uranová ruda byla zpočátku zpracována v chemické úpravně Mydlovary. V roce 1968 zahájila provoz chemická úpravna, nacházející se u obce Dolní Rožínka. Ta je organizačně začleněna do odštěpného závodu GEAM. Chemická úpravna Dolní Rožínka je jedinou funkční úpravnou ve střední a západní Evropě.

Základem těžené rudy, která se zpracovává v chemické úpravně je amfiboliticko - biotitická rula, dále pak karbonáty, uranové minerály, smolinec, coffinit, uranové černě a silikáty uranu. [32]



Obr. 5 - Technologické procesy v chemické úpravně [vlastní, 34]

Vytěžená ruda je transportována na chemickou úpravnu nákladními automobily. Buldozerem je pak nahrnována do přijímacího zásobníku. Šikmý pás následně dopraví rudu do zásobníku kulových mlýnů, kde probíhá dvoustupňové mletí rudy v uzavřeném cyklu se spirálovými klasifikátory a kontrolním tříděním v hydrocyklónech. Aby byl rmut v požadované hustotě, musí být zahuštěn přidávkem flokulačního činidla s výsledným poměrem pevné a kapalné fáze 1:1 (z původních 1:6).

Následuje jeden z nejdůležitějších technologických uzlů procesu úpravy, a to alkalické loužení. Cílem je vyloužení uranu z pevné do kapalné fáze působením sody ve formě uranylkarbonátu. To umožňuje 8 kónických kolon, které jsou vyhřívány na 80 °C. Doba loužení je 5 dnů a výtěžnost cca 90 %.

V lince alkalické sorpce dochází k separaci kapalného a pevného podílu a zároveň k sorpci uranu na silně bazický ionex. 8 kónických kolon je mícháno vzduchem a probíhá v nich protiproudé dávkování ionexu a rmutu za teploty max 45 °C. Další částí procesu úpravy je eluce uranu z ionexu elučním činidlem (směs síranu sodného a uhličitanu sodného) ve dvou pulzačních kolonách.

Závěrečnými procesy úpravy je rozkyselení eluátu kyselinou sírovou, vysrážení uranového koncentrátu čpavkem na diuranát amonný a jeho sedimentace. Po vysrážení je ještě prováděna rafinace (čpavková, speciální a vodní), aby výsledný produkt splňoval předepsané kvality. Poslední fází úpravy je sušení výsledného produktu v proudu spalin topného plynu ve spalovací komoře sušárny a následné plnění do ocelových sudů. Vysušený diuranát amonný s obsahem uranu nad 70 % a výtěžností kovu z rudy 90 % – 94 % je skladován ve skladu chemického koncentrátu a připraven na expedici. [33, 34]

1.7.5 Technologická voda a odkaliště

Výroba výsledného diuranátu amonného zahrnuje vnik velkého množství technologické vody, která obsahuje širokou škálu chemických prvků. Proto je shromažďována na odkalištích a v uzavřeném cyklu zbavována vysoké solnosti. K tomu slouží propojení tří technologických procesů. První je odpařování vod v odpařovací stanici s následnou krystalizací síranu sodného, další tvoří membránové procesy a poslední je iontová výměna. Tento komplex procesů zajišťuje vysokou efektivitu při čištění technologické vody a umožňuje její vypouštění do vodotečí. Navíc se jako

vedlejší produkt získává síran sodný, který se následně prodává k dalšímu využití. [33, 34]

Odkaliště slouží pro ukládání vylouženého rmutu, který je ve formě suspenze do odkaliště přepraven potrubím z úpravny. Celá plocha odkaliště je rozdělena na menší části hrázemi a ty jsou postupně zaplňovány. Jako první bylo zřízeno odkaliště K 1, umístěné mezi areálem chemické úpravny a jámou R 3 v údolí potoka beze jména. Při jeho realizaci se postupně uzavřelo údolí vystavěnými hrázemi, které se táhnou po celém obvodu odkaliště. Lze jej charakterizovat jako obvodový hrázový systém. Při výstavbě se postupně zvyšovaly hráze až na maximální výšku 54 m. Použitý materiál na stavbu hrází je haldovina. Prostřednictvím obvodového drenážního systému jsou řešeny průsakové vody, které unikají z odkaliště. Tento systém jímá průsakovou vodu a ta je přečerpávána zpět do odkaliště. K těsnění celé hráze je využíván pouze naplavený rmut. Odkaliště K 1 souží také pro ukládání produktů z hornické činnosti. [35, 36]

Odkaliště K 2 bylo v provozu v letech 1980 - 1986 z důvodu nedostatečné kapacity odkaliště K 1, zejména v souvislosti s narůstáním objemu volné vody (voda v lagunách odkališť) v sedimentačním prostoru. Odkaliště K 2 je situováno v údolí Zlatkovského potoka, který se prostřednictvím 500 m dlouhé štoly podařilo převést do říčky Nedvědičky. Výstavbou dvou hrází v údolí vznikl akumulací prostor. Odkaliště K 2 je vybaveno asfaltomikrobetonovými těsníci prvky. Technické provedení zahrnuje potrubní spojení s chemickou úpravnou i odkalištěm K 1. Zmíněné řešení zajišťuje bezpečné hromadění nadbilančních vod chemické úpravny i případné sezónní kolísání. [35, 36]

1.7.6 Princip ukončení provozu uranového dolu Rožná I

Dle zasedání vlády ČR ze dne 25. ledna 2016 bude zahájena postupná uzavírka uranového dolu Rožná I, jehož provoz by měl skončit do roku 2017. V roce 2016 bude těžba probíhat obvyklým způsobem, avšak v návaznosti se již zahájí technická opatření k uzavření nejhlubší části dolu. [25]

Souběžně s postupným ukončováním uranového průmyslu je budováno unikátní podzemní výzkumné pracoviště Bukov, umístěné právě v prostorách uranového dolu. Laboratoř se nachází na 12. podzemním patře v hloubce cca 600 m pod povrchem, v blízkosti jámy B 1. Její hlavní účel bude zkoumat podmínky pro bezpečnost hlubinného

úložiště radioaktivních odpadů, které na území ČR bude realizováno. Pro vybudování hlubinného úložiště je vytipováno 7 lokalit, z nichž jednu představuje lokalita Kraví hora, která se nachází v blízkosti uranového dolu. V souvislosti s výzkumným programem bude postupná likvidace důlních prostor prováděna tak, aby nebyla narušena činnost podzemní laboratoře. Postupné zatopení dolu se tedy v období provozu výzkumného pracoviště omezí na hlubší části dolu, pod 12. patrem. [37, 38]

Na základě zákona č. 39/2015 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí patří těžba a úprava uranové rudy, odvaly a odkaliště včetně rekultivace do staveb, které jsou stanovené v příloze 1 tohoto zákona. Z toho důvodu podléhají posuzování vlivu na životní prostředí v současném stavu, v průběhu sanace a rekultivace, ale i po skončení těchto prací. Cílem tohoto procesu je zejména zmírnit nepříznivé působení stavby na životní prostředí. Hornická činnost v regionu Bystřicka byla a je velice intenzivní. Probíhá jako hlubinná těžba, která s sebou nese důsledky v podobě významných zásahů a změn do přírodního prostředí. Na povrchu vyrostly nové umělé stavby a odvaly hlušiny, krajina je poddolovaná a místy lze objevit i poklesy povrchu, které mají za následek praskání budov či silnic. Změny se nevyhnuly ani vodnímu režimu, fauně nebo flóře. [39, 40]

Vlastní ukončení provozu uranového dolu představuje rozsáhlý soubor technických prací, které vyžadují obrovské finanční náklady a časovou náročnost. Koncepce obsahuje likvidaci hlubinného i povrchového důlního zařízení, včetně chemické úpravně. Sanace a rekultivace zahrnuje několik základních kroků:

- zatopení dolu vodou,
- odstranění objektů na povrchu – v areálu odštěpného závodu,
- odstranění nepotřebných technologií v chemické úpravně,
- vyražení odvodňovací štoly pro odvod důlních vod do chemické úpravně,
- zasypaní odkališť materiálem z odvalů,
- zapouzdření odkališť,
- čištění důlních vod,
- výstavba vyrovnávací nádrže pro vody vypouštěné z chemické úpravně,
- vypouštění vod, které splňují limity do říční sítě. [29, 40, 41]

Při zahlazování důlní činnosti představuje nejsložitější a nejnákladnější prvek odkaliště. Způsob likvidace je téměř stejný u odkaliště K 1 i K 2. Lze ji však provádět až po odstranění volných vod ze sedimentačního prostoru. Spočívá v izolaci uložených produktů hornické činnosti od okolního prostředí. Toho bude docíleno vyplněním a přetvarováním objektu odkaliště do určeného tvaru, tedy restrukturalizací. Pro izolaci bude použito minerální těsnění bentofix a další izolační a těsnicí prvky. Povrch uzavřeného odkaliště bude sloužit pro výsadbu stromové vegetace. Cílem izolace odkališť je odstínit gama záření, odstranit prašnost, snížit průnik srážkových vod do odkaliště, včlenit jej do krajiny a snížit výdajnost radonu. [29, 41]

Při zvažování způsobu likvidace byla zvolena metoda podle dokumentace „Likvidace těžby a úpravy uranu v ložiskové oblasti Rožná“. Jedná se o způsob, kdy bude po ukončení těžby a úpravy uranu zřízena na chemické úpravně vyšší kapacita pro čištění volných vod z odkaliště K 1 (Odkaliště K 2 již v současné době prochází restrukturalizací). Znamená to postupně vyčistit všechny volné vody odkališť a postupně uzavřít odkaliště K 1. [40]

Sanace a rekultivace uranového dolu Rožná I je podstatná z mnoha důvodů. Jeden z nejvýznamnějších je ten, že jde o zdroj radioaktivního záření. Konkrétně lze mezi původce zařadit zejména odkaliště, chemickou úpravnu, odvaly a areály jam. Prioritou je tedy omezit uvolňování radionuklidů do životního prostředí obecně i ve vztahu k obyvatelstvu okolních obcí podle požadavků SÚJB. [41]

1.7.7 Odvětrávání radonu

Uranový průmysl zahrnuje mnohá rizika spojená s radioaktivitou těženého nerostu. Jedním z nejzákladnějších bezpečnostních opatření je zajištění důlního větrání. To je důležité nejenom z hlediska ochrany před radionuklidy, ale i pro ochranu před škodlivinami v ovzduší. Uranový důl Rožná I se řadí mezi neplynující doly, neboť koncentrace metanu nepřesahuje 0,1 %. To znamená jednodušší podmínky pro zajištění bezpečnosti. Avšak dobývání radioaktivního nerostu má svá specifika a klade vysoké nároky na radiační ochranu. Přesné požadavky jsou stanoveny v zákoně č. 18/1997 Sb., atomový zákon a zejména vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. [4, 42]

Větrání v dole Rožná I probíhá třemi způsoby:

- průchozí,
- separátní,
- stlačeným vzduchem.

Průchozí větrání je založeno na přívodu čerstvých větrů do podzemních prostor bez nutnosti zapojení lokálních ventilátorů. Přívod je řízen podtlakem hlavního ventilátoru na jámě R 6 nebo záložním větráním na jámě R 4. Tento způsob je určen zejména pro hlavní důlní díla a přístupové cesty. Separátní větrání pak zahrnuje přívod čerstvých větrů na pracoviště pomocí větraček s ventilátory. Toho se využívá při ražbě horizontálních a vertikálních důlních děl. Větrání stlačeným vzduchem je zakázáno, pouze doplňuje separátní větrání. Při volbě větrání se však vždy musí brát v úvahu nejrůznější aspekty konkrétního důlního díla. Jedná se o radioaktivitu hornin, ražený profil, metodu dobývání a samozřejmě vlastnosti radonu. Metoda sestupné lávkování na zával pod umělým stropem má své výhody v propojenosti veškerých dobývaných prostor a tedy příznivějších podmínek pro větrání. Avšak celková propojenost by byla problémem v případě vzniku požáru. [31, 42]

Odvětrávání dolu je charakterizováno jedním základním předpokladem. Pokud bude zajištěno účinné odsávání radonu (který je výrazně těžší než vzduch) z podzemních prostor, budou pravděpodobně splněna i další kritéria pro přivádění čerstvých větrů na pracoviště a nedojde k ohrožení zdraví v důsledku vysoké koncentrace škodlivin v ovzduší. [42]

Snížení koncentrace radonu v důlních prostorech lze docílit i jinými způsoby. Příkladem je rozpustnost radonu v důlních vodách. Při snížené teplotě je vázaný v hornině, při vyšší teplotě se uvolňuje do okolního prostředí. [42]

1.7.8 Rozptylová studie radonu

Při posuzování kontaminace prostředí radionuklidy při těžbě uranu je nutné brát v úvahu nejen samotný uran, ale také členy uran-radiové rozpadové řady. Zejména jde o radium a radon. Radionuklidy, které se uvolní do životního prostředí, podléhají dvěma základním vlivům:

- **rozptyl** – způsobuje redistribuci uvolněných radionuklidů ve složkách životního prostředí kolem zdroje,
- **akumulace** – způsobuje ukládání rozptýlených radionuklidů v jiných složkách životního prostředí. [43]

Pro rozptylovou studii se uvažují 4 varianty scénáře. Současný stav, situace v průběhu sanace K 1, doba po ukončení sanace K 1 a doba po ukončení sanace K 2. V jednotlivých scénářích se rozlišují bodové a plošné zdroje emisí radonu.

Bodové zdroje znečištění:

- chemická úpravna,
- výdušná jáma.

Plošné zdroje znečištění:

- areály,
- odvaly,
- chemická úpravna.

Po ukončení sanace odkaliště K 2 lze očekávat snižování emisí radonu v důsledku snižující se kontaminace drenážních a důlních vod. Toto snižování však bude pomalé a nemá z hlediska prognózování konečného stavu již praktický význam. Naopak postupné zaplavování důlních prostor by mělo významně ovlivnit koncentraci radonu uvolňovaného do okolního prostředí. Zaplavování bude trvat podle předpovědi maximálně 8 let a během toho již nebude v provozu odvětrávání radonu z důlních prostor. Tím vyvstává otázka, zda a jak bude růst koncentrace radonu po ukončení provozu uranového dolu Rožná I v okolním prostředí. Výsledky rozptylové studie pro jednotlivé scénáře jsou přenesené do map a uvedeny v příloze I - IV. [43]

2 Cíl práce a hypotézy

2.1 Cíl práce

Hlavní cílem diplomové práce je zhodnotit, k jakému ozáření obyvatelstva v okolí uranového dolu Rožná I by mohlo dojít, po ukončení jeho provozu. Těžba uranové rudy je složitý proces, který s sebou nese mnohá rizika. Důležité je, aby byla rizika eliminována nebo alespoň zmírněna na přijatelnou úroveň. Znalost všech aspektů, které by mohly ovlivnit bezpečnost obyvatelstva v okolí uranového dolu, představuje nezbytnou součást vědomí a svědomí nejen státního podniku DIAMO, který provozuje těžbu, ale také samotného obyvatelstva.

2.2 Stanovené hypotézy

- Bodové měření koncentrace radonu je neobjektivní.
- Uranový důl uzavřený v minulosti nepředstavuje riziko pro obyvatelstvo v dnešní době.
- Po ukončení provozu uranového dolu Rožná I vzroste koncentrace radonu v okolních obcích.

3 Metodika

Zpracování dané práce vyžaduje celou řadu prostředků a metod. Následující text obsahuje popis použité metodiky, včetně bližší charakteristiky nejdůležitějších postupů a využitých technických prostředků.

Úvod do problematiky je založen na analýze současného stavu. K tomu jsou využity dostupné materiály a interní dokumenty státního podniku DIAMO a jeho odštěpných závodů. Syntéza obsahu dostupné literatury je rovněž podstatná pro ucelení získaných informací a jejich aplikaci v praxi. Konzultování dané problematiky s odborníky ze státního podniku DIAMO a SÚJB má významný přínos pro pohled na věc z praktického hlediska. Návštěva Závodu Rožná I a Závodu Chemická úpravna umožnila získat osobní zkušenost s probíhajícími procesy, které provází těžbu od samotné ražby uranové rudy až po získání uranového koncentráту diauranátu amonného. Také návštěva Příbrami, kde je již hlubinná těžba ukončena od roku 1991, přinesla poznatky o stavu lokality po těžbě uranových rud.

Komparace údajů a informací získaných o dolu Rožná I s údaji a informacemi o již uzavřeném uranovém dole v Příbrami umožňuje získat představu o možném vývoji radonové situace.

3.1 Bodové měření

Osobně prováděné bodové měření ekvivalentní objemové aktivity radonu a jeho dceřiných produktů ve vzduchu slouží spíše pro získání osobní zkušenosti s měřicími přístroji a postupy. Důvodem je skutečnost, že koncentrace radonu neustále kolísá a je nutné dlouhodobější sledování. Bodové měření ve venkovním prostředí probíhá metodou BUSH, která byla sestavena již v době, kdy alfa-spektrometrické přístroje téměř neexistovaly. Postup metody BUSH je rozebrán v následujícím textu. Pro měření byly využity tyto měřicí přístroje:

- odběrové čerpadlo Quick Take 30 a NOPV - 20,
- Comet Commeter - teploměr, vlhkoměr, barometr,
- analyzátor produktů přeměny radonu RPA – 50,
- odběrový mikrovláknitý filtr AFPC.



Obr. 6 - Odběrové čerpadlo Quick Take 30 [vlastní]



Obr. 7 - Odběrové čerpadlo NORV - 20 [vlastní]

Před zahájením měření je nutné zkontrolovat stav baterií v přístrojích, neboť měření probíhá v terénu, kde není možné jejich nabití. Dále je třeba připravit filtry AFPC, které budou pro měření využívány. Manipulace s čistými filtry musí být opatrná tak, aby nedošlo k zanesení nečistot na citlivý mikrovláknitý povrch. Filtry se mohou používat opakovaně, avšak před odběrem je nutné se přesvědčit, že nedošlo k jejich zbarvení – zanesení prašným aerosolem nebo vytržení vláken z jejich povrchu. Opakované použití je možné po 24 hodinách od posledního použití. V průběhu měření se zaznamenají

atmosférické hodnoty, naměřené při konkrétním odběru. Jedná se o teplotu, tlak a vítr. Hodnoty souží pro následné zhodnocení výsledků měření.



Obr. 8 - Comet Commeter a analyzátor produktů přeměny radonu RPA – 50 [vlastní]

Samotné odběry proběhly pomocí čerpadla Quick Take 30 nebo čerpadla NOPV – 20. Oba typy jsou založeny na stejném principu a lze je střídat. Odběr se provádí po dobu 20 minut, během kterých dochází k prosávání vzduchu přes filtr. Objemová rychlost je 20 l/min. Po uběhnutí stanovené doby přístroj ohlásí konec prosávání a následuje 1 minuta manipulační přestávky. Během této doby je filtr přemístěn z čerpadla do analyzátoru produktů přeměny radonu RPA – 50. Po zmíněné minutě je zahájeno měření v režimu OUTDOOR, které 14 min vyhodnocuje ekvivalentní objemovou aktivitu radonu. Po ukončení daného procesu akustický signál oznámí konec vyhodnocování a na displeji se objeví hodnota EOAR v jednotkách Bq/m³. Po skončení měření je použitý filtr umístěn odděleně od čistých filtrů.

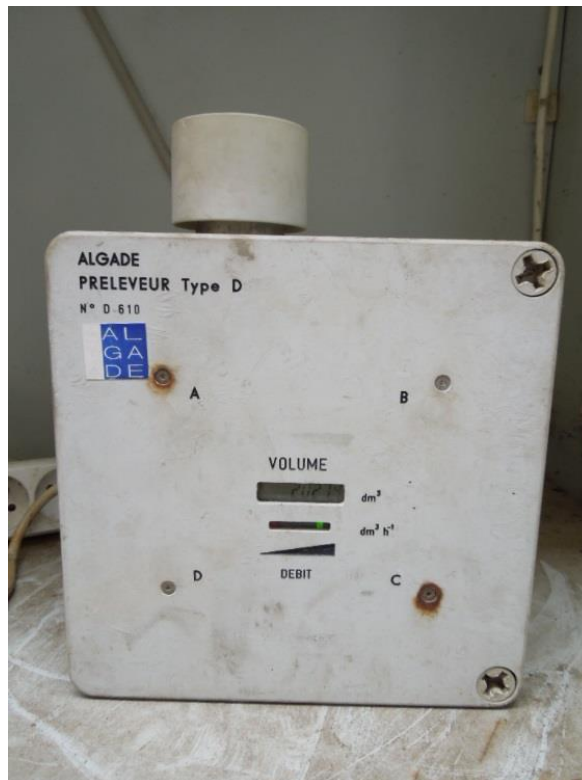
3.2 Kontinuální měření

V rámci programu monitorování probíhá celoroční měření ekvivalentní objemové aktivity radonu ve schválené síti monitorovacích bodů. Data získaná tímto měřením slouží pro posuzování radiační zátěže na obyvatelstvo v okolí Závodu Rožná I. Právě tato skutečnost je důvodem pro jejich využití v další části diplomové práce. Stálé měřicí body v okolí Závodu Rožná I jsou:

- Rodkov,
- Zlatkov,
- Dvořiště,
- Dolní Rožínka,
- p. Nečasník, Rožná 85,
- p. Uher, Rožná 32,
- Milasín,
- p. Bureš, Rozsochy 106.

K odběru vzorků se používá stacionární dozimetr ALGADE, který slouží pro monitorování radiačních veličin v ovzduší. Průměrný průtok vzduchu činí 80 l/h. Jednotlivé součásti ALGADE jsou:

- odběrový systém,
- napájecí blok,
- modul plynoměr – průtokoměr,
- displejový soubor,
- detekční hlavice se stopovým detektorem. [44]



Obr. 9 - ALGADE [vlastní]

Každý měsíc jsou filtry vyhodnocovány v laboratořích SÚJCHBO v Kamenné. Na základě výstupů se pak zpracovává dokument „Vyhodnocení programu monitorování a dodržování ustanovení vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění pozdějších předpisů, o. z. GEAM za příslušný rok.“

3.3 Výpočet úvazku efektivní dávky

V důsledku inhalace radonu a jeho produktů přeměny může dojít k vnitřnímu ozáření obyvatelstva. Na základě získaných hodnot ekvivalentní objemové aktivity radonu se provede výpočet úvazku efektivní dávky, který bude základem pro následný odhad přepokládané dávky pro obyvatelstvo po ukončení provozu uranového dolu Rožná I.

Pro výpočet úvazku efektivní dávky se použije vztah:

$$E_{RN} = k \cdot (a_{EOAR} - a_{EOAR,0}) \cdot t_1 + k \cdot (a_{EOAR} - a_{EOAR,0}) \cdot t_2$$

- E_{RN} úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu,
- k obecný koeficient přepočtu objemové aktivity radonu na efektivní dávku pro obyvatelstvo, $k = 6 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{Bq}/\text{m}^3$,
- a_{EOAR} ekvivalentní objemová aktivita radonu [Bq/m^3],
- $a_{EOAR,0}$ hodnota pozadí ekvivalentní objemové aktivity radonu [Bq/m^3] v dané lokalitě,
- t_1 doba pobytu venku za 1 rok, dle tabulky doporučených hodnot $t_1 = 2\,000 \text{ h}$,
- t_2 doba pobytu v budovách za 1 rok, dle tabulky doporučených hodnot $t_2 = 7\,000 \text{ h}$. [45]

Při výpočtu se vychází z měsíčních průměrných hodnot EOAR v monitorovacích bodech za celý rok. Nejprve se v každém měsíci zjistí hodnota rozdílu $a_{EOAR} - a_{EOAR,0}$. V případě, že vyjde rozdíl záporný, dosadí se nulová hodnota. Z vypočítaných hodnot se pak stanoví celoroční průměr a ten se dosadí do rovnice pro výpočet úvazku efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu.

4 Charakteristika zájmové lokality

Zájmová lokalita pro měření výskytu radonu zahrnuje obce v blízkém okolí Závodu Rožná I. Jedná se o oblast, kde lze očekávat vyšší hodnoty EOAR z důvodu ovlivnění důlní činností, ať už se jedná o vliv odkališť, větrání radonu, odvalů, či jiných produktů hornické činnosti.

Konkrétní místa pro bodové měření jsou zvolena dle očekávané větší koncentrace osob a tedy častějšímu vystavení danému množství radonu. Pro kontinuální měření jsou pevně stanovená měřicí místa s vhodným zázemím, zejména zdrojem elektrické energie. Bodové i kontinuální měření probíhá v obcích, nacházejících se v kraji Vysočina. Následuje stručná charakteristika míst, vhodných pro měření koncentrace radonu.

4.1 Dolní Rožínka

Objev ložiska uranové rudy v 50. letech 20. století znamenal pro obec obrovský rozvoj, který přinesl výstavbu a rozšiřování ubytovacích i dalších kapacit pro nové obyvatelstvo, které do obce přišlo za zaměstnáním v uranovém průmyslu. S postupným útlumem těžby se sice počet obyvatel mírně snížil, nicméně obec zůstala významná z pohledu průmyslu i kultury. Ředitelství odštěpného závodu GEAM se nachází právě v obci Dolní Rožínka.

Rozlohou zabírá obec celkem 4,46 km² v nadmořské výšce 502 m n. m. Počet obyvatel činí cca 630. Do katastrálního území obce patří i Horní Rozsíčka.



Obr. 10 - Bodové měření Dolní Rožínka [vlastní]

Pro bodové měření bylo zvoleno centrum obce, které je obklopeno obchodním centrem s parkovištěm. Právě v této části obce je očekáván větší pohyb obyvatelstva, a proto se zde měřila koncentrace radonu, který lidé vdechují. V těsné blízkosti je rovněž zdravotní středisko a zámek.

4.2 Rožná

Objevení uranového ložiska Rožná znamenalo pro obec Rožnou, nacházející se v těsné blízkosti uranového dolu, mnoho změn. V současné době je však zásadní změnou postupné ukončení provozu dolu, a tím zvýšení nezaměstnanosti v oblasti.

Obec Rožná leží 6 km od Bystřice nad Pernštejnem a náleží k ní místní části Zlatkov a Josefov. Leží na soutoku potoků Nedvědičky a Rožinky. Katastrální výměra činí 12,87 km² v nadmořské výšce 460 m n. m. Počet obyvatel je dnes ustálen na cca 785. [48]



Obr. 11 - Bodové měření Rožná [vlastní]

Ve srovnání s ostatními obcemi pro měření EOAR je Rožná poměrně rozsáhlá. Jako vhodné místo pro bodové měření bylo zvoleno bývalé restaurační zařízení Slovácká chalupa, které je ve středu několika významných atributů dané obce. Konkrétně se jedná o autobusovou zastávku, vlakové nádraží, veřejné koupaliště, kulturní dům, školku, školu a sokolovnu. Kontinuální měření přístroji ALGADE je realizováno na dvou měřicích bodech v obci.

4.2.1 Dvořiště

Dvořiště je část obce Rožná, která je od ní vzdálena asi 1 km. Bodové měření probíhalo na konci této osady, kde je rovněž umístěno zařízení pro kontinuální měření. Dvořiště je místo, které je v těsné blízkosti odkaliště K 1 a Závodu Chemická úpravna, což může ovlivňovat koncentraci radonu v oblasti.



Obr. 12 - Bodové měření Dvořiště [vlastní]

4.2.2 Zlatkov

Část obce Rožná jménem Zlatkov se nachází cca 2 km severovýchodně od Rožné. Poloha Zlatkova je v blízkosti odkaliště K 2. Pro bodové měření bylo zvoleno dětské hřiště ve středu vesnice, kde lze očekávat větší pohyb osob. [48]



Obr. 13 - Bodové měření Zlatkov [vlastní]

4.3 Rodkov

Obec Rodkov se nachází asi 3 km od Bystřice nad Pernštejnem a zaujímá rozlohu 3,21 km². Poloha obce je v nadmořské výšce 520 m n. m. Současný počet obyvatelstva je cca 98.

Rodkov je obec v blízkosti odkaliště K I a chemické úpravný, které z jižní strany katastru sousedí s danou obcí. To je důvod pro bodové i kontinuální měření radonu. Pro bodové měření byla zvolena autobusová zastávka ve středu obce, kde je předpokládán výskyt vyššího počtu obyvatel. [48]



Obr. 14 - Bodové měření Rodkov [vlastní]

4.4 Milasín

Obec Milasín byla zařazena do kontinuálního monitoringu až v roce 2013, což znamená absenci dat z předchozích let. Přesto bude v práci zohledněna i tato obec, neboť její poloha v blízkosti Závodu Rožná I může negativně ovlivňovat tamní obyvatelstvo. Katastrální výměra činí 2,18 km² v nadmořské výšce 547 m n. m. Počet obyvatel je v dnešní době cca 46, ale rok od roku stále klesá.



Obr. 15 - Bodové měření Milasín [vlastní]

Bodové měření bylo stanoveno na centrum obce, kde se nachází dětské hřiště, fotbalové hřiště a zvonička s hasičskou zbrojnicí. Rovněž zde se konají kulturní akce a je očekávána vyšší koncentrace osob.

4.5 Bukov

Obec Bukov leží asi 9 km od Bystřice nad Pernštejnem. Zaujímá plochu 5,32 km² v nadmořské výšce 526 m n. m. Počet obyvatel činí cca 180. Odštěpný závod GEAM zde provozuje skládku komunálního odpadu v areálu bývalého dolu Bukov. [48]

V dané obci neprobíhá kontinuální měření EOAR, ani osobně prováděné bodové měření, avšak v případě ukončení provozu Závodu Rožná I bude Bukov ovlivněn uvolňováním radonu z podzemí.

5 Výsledky

5.1 Bodové měření

Bodové měření slouží pro okamžité zjištění koncentrace radonu a jeho dceřiných produktů. Využívá se při náhodném měření EOAR nebo při zjištění nezvykle vysokých hodnot, které je třeba ověřit. Další využití bodového měření je dle stanoveného programu monitorování. Na základě bodového měření byla v zájmové lokalitě zjištěna následující data.

Tab. 1 - Měření EOAR 14. 9. 2015 (8:15 – 11:45)

	Teplota [°C]	Tlak [hPa]	Vítr	EOAR [Bq/m ³]
Dolní Rožinka	15,7	1010	Silný	8
Milasín	16,4	1006	Silný	8
Rožná	19,5	1016	Slabý	8
Dvořiště	18,1	1014	Slabý	9
Zlatkov	17,4	1004	Mírný	8
Rodkov	20,9	1012	Mírný	6

Tab. 2 - Měření EOAR 2. 11. 2015 (8:23 – 11:23)

	Teplota [°C]	Tlak [hPa]	Vítr	EOAR [Bq/m ³]
Dolní Rožinka	6,5	1032	Bezvětří	7
Milasín	8,2	1028	Bezvětří	6
Rožná	7,8	1039	Bezvětří	7
Dvořiště	6,6	1035	Slabý	5
Zlatkov	6,4	1025	Mírný	6
Rodkov	8,9	1034	Bezvětří	5

Tab. 3 - Měření EOAR 2. 2. 2016 (8:12 – 10:57)

	Teplota [°C]	Tlak [hPa]	Vítr	EOAR [Bq/m ³]
Dolní Rožinka	8,6	1019	Bezvětří	2
Milasín	7,1	1015	Mírný	2
Rožná	7,0	1025	Bezvětří	7
Dvořiště	8,8	1022	Slabý	2
Zlatkov	7,7	1012	Slabý	2
Rodkov	8,5	1020	Slabý	2

Tab. 4 - Měření EOAR 14. 4. 2016 (8:00 – 12:00)

	Teplota [°C]	Tlak [hPa]	Vítr	EOAR [Bq/m ³]
Dolní Rožinka	7,0	1010	Mírný	5
Milasín	6,0	1012	Slabý	4
Rožná	7,5	1030	Slabý	4
Dvořiště	8,0	1015	Mírný	5
Zlatkov	9,0	1018	Mírný	5
Rodkov	9,0	1021	Slabý	4

Komentář k tab. 1 - 4:

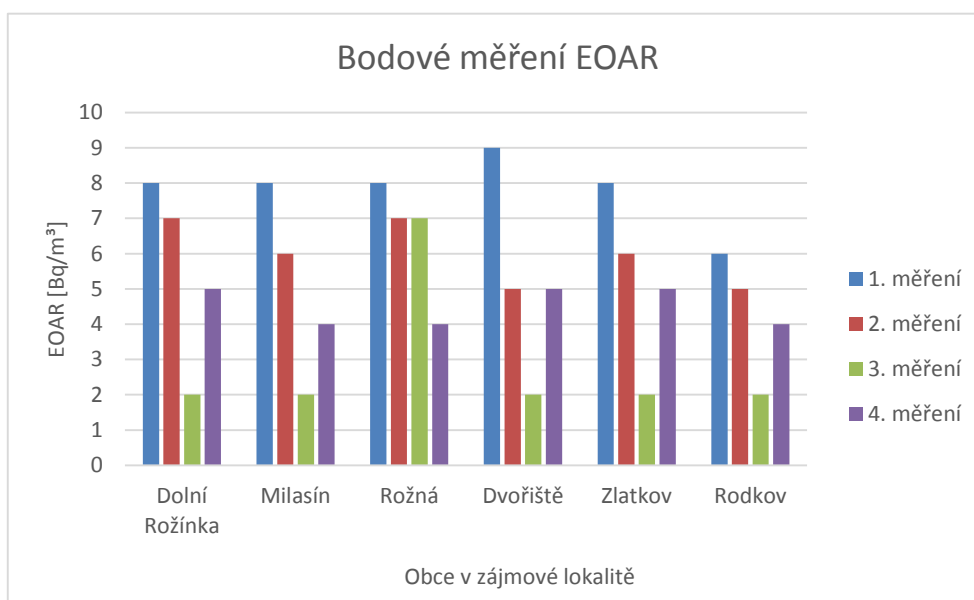
Měření probíhalo za různých atmosférických podmínek a v různých obdobích v roce. Ačkoliv bylo měření rozprostřeno do celého roku, teplota při konkrétním měření vykazuje poměrně podobné hodnoty, s výjimkou prvního měření, kdy byly teploty výrazně vyšší a tlak nižší. Začátek měření odpovídá vždy ranním hodinám, kdy lze očekávat vyšší uvolňování radonu.

Z výsledků jednotlivých měření vyplývá skutečnost, že za vyšší teploty a nižšího tlaku bude uvolňování radonu do okolního prostředí výraznější, než při chladném počasí s vyšším tlakem. Podstatný vliv na koncentraci radonu v okolním prostředí má také rychlost větru, který zásadním způsobem rozptyluje radon do atmosféry.

Nejen tyto atmosférické projevy mají vliv na uvolňování radonu z půdy, podzemní vody či stavebních materiálů. Dalšími významnými faktory jsou propustnost a pórovitost hornin a zemin, aktuální srážky či tektonické porušení hornin, které usnadňuje radonu pronikat na povrch země.

Tab. 5 - Srovnání hodnot EOAR v bodovém měření

	EOAR [Bq/m ³]				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	Průměr
Dolní Rožínka	8	7	2	5	5,5
Milasín	8	6	2	4	5
Rožná	8	7	7	4	6,5
Dvořiště	9	5	2	5	5,25
Zlatkov	8	6	2	5	5,25
Rodkov	6	5	2	4	4,25



Graf 2 - Bodové měření EOAR v zájmové lokalitě

Komentář k tab. 5:

V zájmové lokalitě proběhla celkem čtyři měření. Sledovaná veličina EOAR byla měřena v šesti různých obcích. Souhrn naměřených hodnot je uveden v tab. 5. Celkový průměr ze všech měření je 5,3 Bq/m³. Maximum bylo naměřeno ve Dvořišti s hodnotou 9 Bq/m³ při prvním měření. Naopak minimální hodnoty 2 Bq/m³ byly zjištěny hned v několika obcích při třetím měření. V žádném případě nebyly překročeny povolené limity, které by vyžadovaly následná opatření.

Graf 2 znázorňuje srovnání naměřených hodnot EOAR v obcích zájmové lokality. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v prvním měření, které se uskutečnilo v měsíci září. Převládaly nejvyšší teploty, nejnižší tlak a poměrně silný vítr. Nejnižší hodnoty byly získány třetím měřením v únoru, i když výjimku tvoří obec Rožná, ve které byla naměřena více než třikrát vyšší EOAR než v okolních obcích.

5.2 Kontinuální měření

V průběhu celého roku probíhá integrální měření EOAR přístroji ALGADE. Analýza dat z jednotlivých dokumentů „Vyhodnocení vlivu činnosti odštěpného závodu GEAM Dolní Rožinka na životní prostředí v roce 2011 - 2015“ slouží pro zhodnocení radonové situace v zájmové lokalitě. Dle plánu monitorování jsou nastaveny následující referenční úrovně. [49]

Tab. 6 - Referenční úrovně pro EOAR

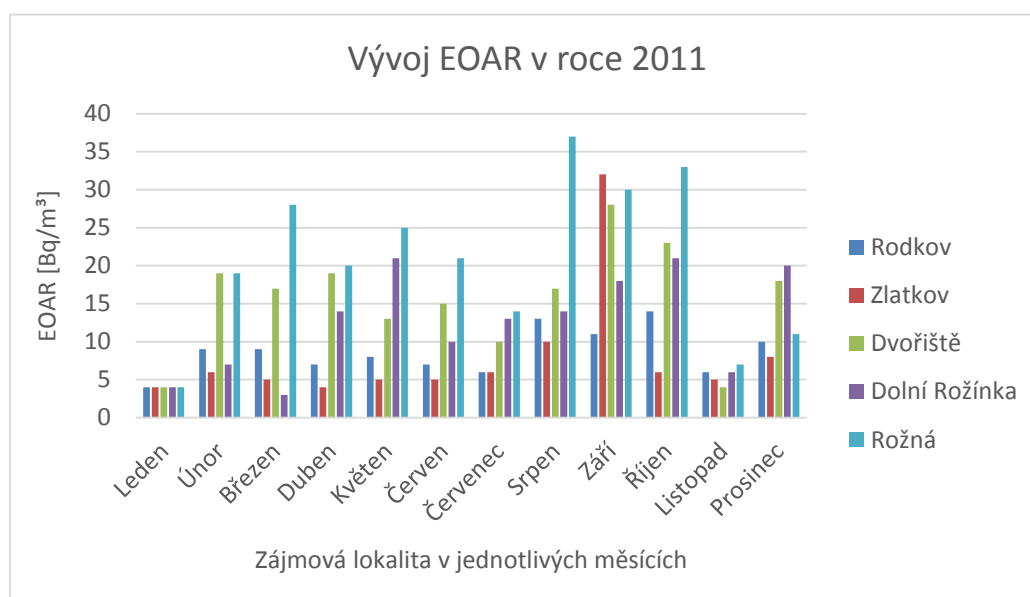
	EOAR [Bq/m ³]
Záznamová úroveň	1,0
Vyšetřovací úroveň	45,0
Zásahová úroveň	63,0

Referenční hodnoty jsou pevně stanoveny na základě zhodnocení ozáření kritické skupiny obyvatel, kteří jsou vystaveni uvolněným radionuklidům v blízkém okolí. Předurčují tak potřebu vyšetřit překročení stanovených limitů nebo provést účinný zásah k eliminaci hrozícího nebezpečí. Jestliže byla kontinuálním měřením zjištěna hodnota EOAR vyšší než 45 Bq/m³, následuje bodové měření a zjišťování příčin, které vedly ke zvýšení koncentrace radonu. V případě výsledků kontinuálního měření EOAR překračující 63 Bq/m³ je nutné provedení zásahu, který musí koncentraci radonu snížit na přijatelnou úroveň. Příkladem je spuštění jiného odvětrávání v podzemí.

V následujících tabulkách jsou uvedeny měsíční průměry z kontinuálního měření EOAR v zájmové lokalitě od roku 2011 až po aktuální vyhodnocení z roku 2015. Měření probíhalo v šesti obcích a v roce 2013 se přidala i obec Milasín. Jako pozadí pro následné výpočty slouží obec Rozsochy. V Rožné je měření realizováno ve dvou monitorovacích bodech, ale pro potřeby práce je brát ten bod měření, kde byly zjištěny vyšší hodnoty EOAR, se kterými se následně pracuje při výpočtech úvazku efektivní dávky.

Tab. 7 - EOAR v zájmové lokalitě 2011

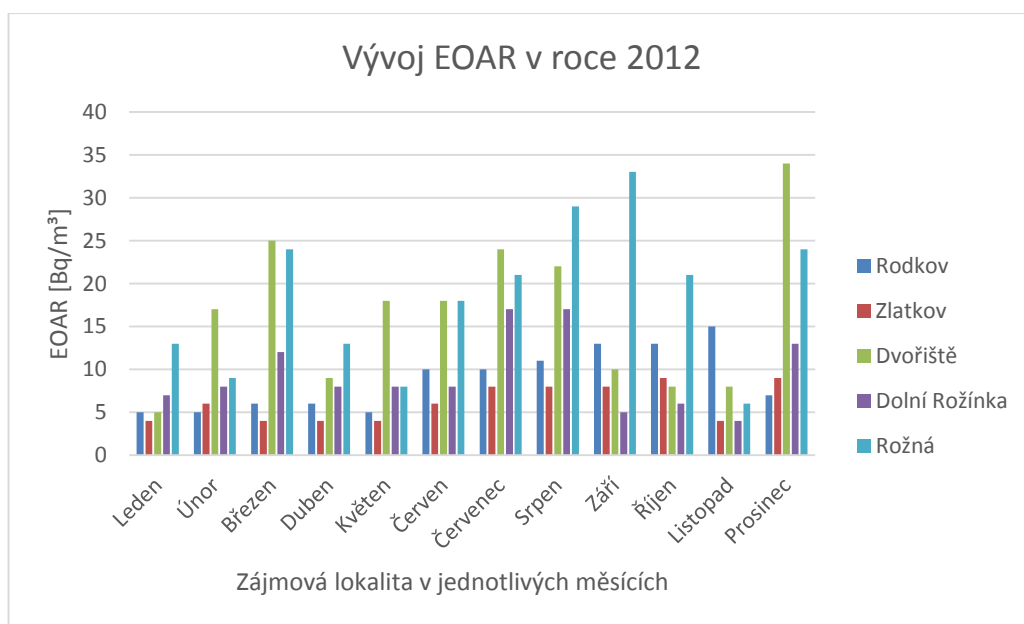
2011	Monitorovací body pro EOAR [Bq/m ³]					
	Rodkov	Zlatkov	Dvořiště	Dolní Rožínka	Rožná	Rozsochy (pozadí)
Leden	4	4	4	4	4	4
Únor	9	6	19	7	19	18
Březen	9	5	17	3	28	17
Duben	7	4	19	14	20	27
Květen	8	5	13	21	25	25
Červen	7	5	15	10	21	30
Červenec	6	6	10	13	14	13
Srpen	13	10	17	14	37	25
Září	11	32	28	18	30	34
Říjen	14	6	23	21	33	25
Listopad	6	5	4	6	7	4
Prosinec	10	8	18	20	11	19
Průměr	9	8	16	13	21	20
Minimum	4	4	4	3	4	4
Maximum	14	32	28 </tr			



Graf 3 - Vývoj EOAR v roce 2011

Tab. 8 - EOAR v zájmové lokalitě 2012

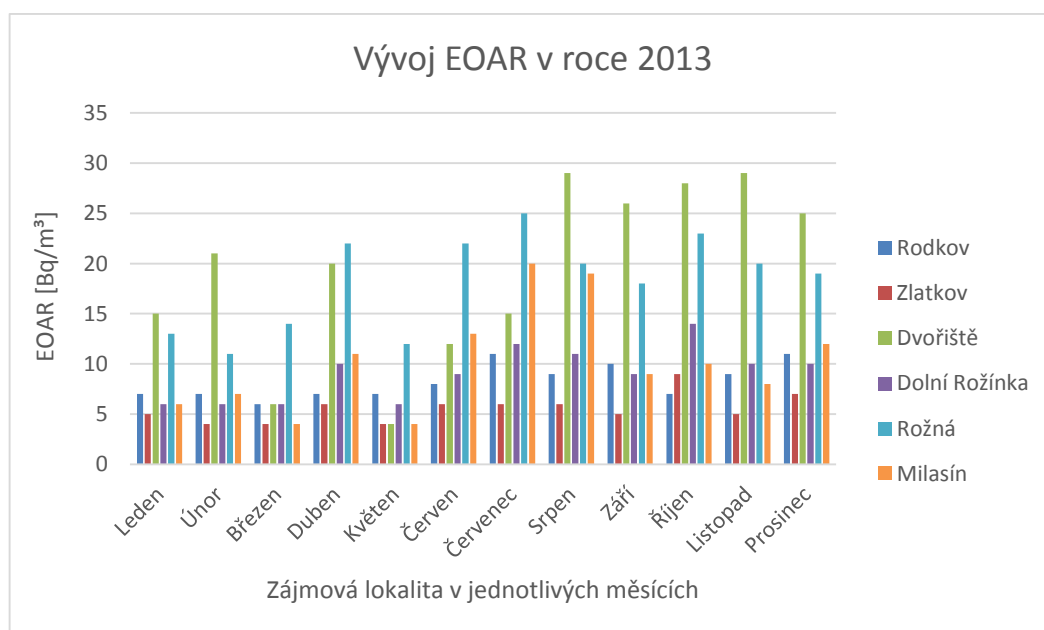
2012	Monitorovací body pro EOAR [Bq/m ³]					
	Rodkov	Zlatkov	Dvořiště	Dolní Rožínka	Rožná	Rozsochy (pozadí)
Leden	5	4	5	7	13	6
Únor	5	6	17	8	9	10
Březen	6	4	25	12	24	7
Duben	6	4	9	8	13	8
Květen	5	4	18	8	8	7
Červen	10	6	18	8	18	12
Červenec	10	8	24	17	21	12
Srpen	11	8	22	17	29	18
Září	13	8	10	5	33	21
Říjen	13	9	8	6	21	23
Listopad	15	4	8	4	6	16
Prosinec	7	9	34	13	24	12
Průměr	9	6	17	9	18	13
Minimum	5	4	5	4	6	6
Maximum	15	9	34	17	33	23



Graf 4 - Vývoj EOAR v roce 2012

Tab. 9 - EOAR v zájmové lokalitě 2013

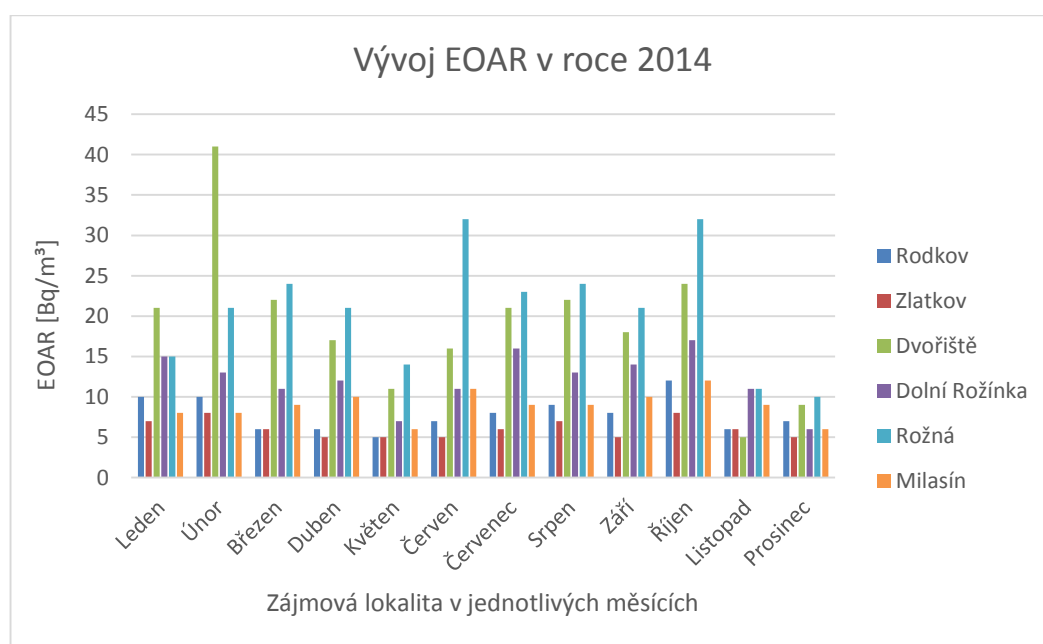
2013	Monitorovací body pro EOAR [Bq/m ³]						
	Rodkov	Zlatkov	Dvořiště	Dolní Rožínka	Rožná	Milasín	Rozsochy (pozadí)
Leden	7	5	15	6	13	6	10
Únor	7	4	21	6	11	7	6
Březen	6	4	6	6	14	4	8
Duben	7	6	20	10	22	11	10
Květen	7	4	4	6	12	4	8
Červen	8	6	12	9	22	13	11
Červenec	11	6	15	12	25	20	13
Srpen	9	6	29	11	20	19	12
Září	10	5	26	9	18	9	10
Říjen	7	9	28	14	23	10	12
Listopad	9	5	29	10	20	8	13
Prosinec	11	7	25	10	19	12	10
Průměr	8	6	19	9	18	10	10
Minimum	6	4	4	6	11	4	6
Maximum	11	9	29	14	25	20	13



Graf 5 - Vývoj EOAR v roce 2013

Tab. 10 - EOAR v zájmové lokalitě 2014

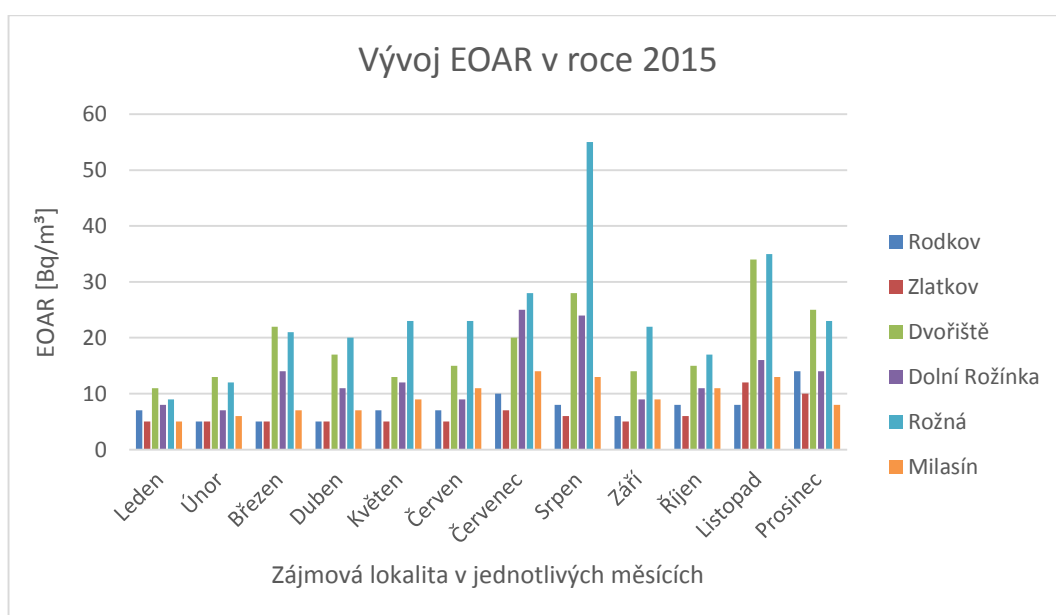
2014	Monitorovací body pro EOAR [Bq/m ³]						
	Rodkov	Zlatkov	Dvořiště	Dolní Rožínka	Rožná	Milasín	Pozadí (Rozsochy)
Leden	10	7	21	15	15	8	14
Únor	10	8	41	13	21	8	13
Březen	6	6	22	11	24	9	11
Duben	6	5	17	12	21	10	10
Květen	5	5	11	7	14	6	6
Červen	7	5	16	11	32	11	10
Červenec	8	6	21	16	23	9	14
Srpen	9	7	22	13	24	9	12
Září	8	5	18	14	21	10	11
Říjen	12	8	24	17	32	12	15
Listopad	6	6	5	11	11	9	9
Prosinec	7	5	9	6	10	6	8
Průměr	8	6	19	12	21	9	11
Minimum	5	5	5	6	10	6	6
Maximum	15	8	41	17	32	12	15



Graf 6 --- Vývoj EOAR v roce 2014

Tab. 11 - EOAR v zájmové lokalitě 2015

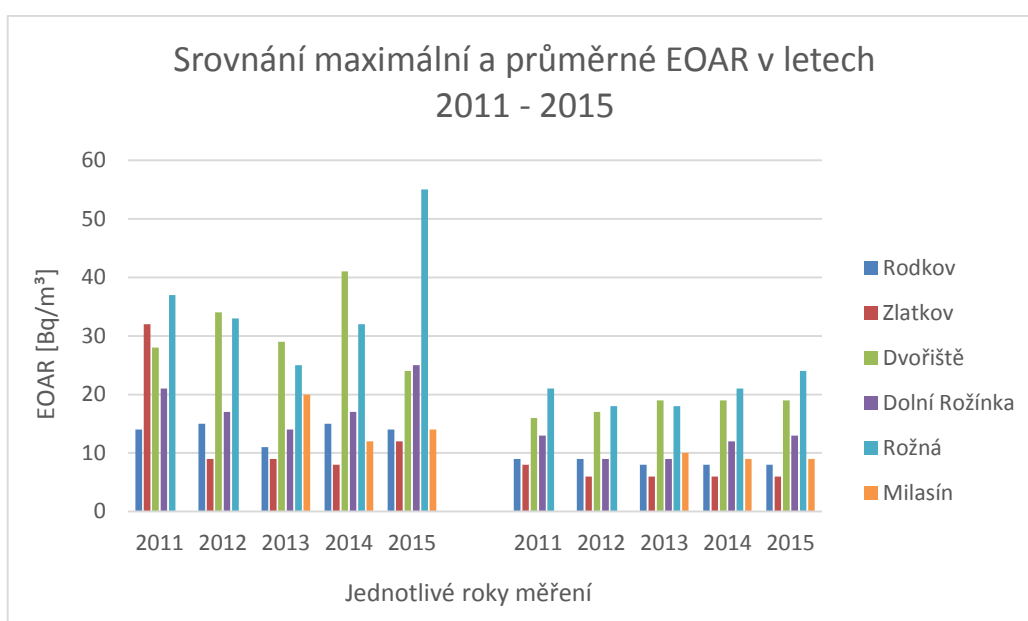
2015	Monitorovací body pro EOAR [Bq/m ³]						
	Rodkov	Zlatkov	Dvořiště	Dolní Rožínka	Rožná	Milasín	Rozsochy (pozadí)
Leden	7	5	11	8	9	5	7
Únor	5	5	13	7	12	6	6
Březen	5	5	22	14	21	7	8
Duben	5	5	17	11	20	7	10
Květen	7	5	13	12	23	9	9
Červen	7	5	15	9	23	11	13
Červenec	10	7	20	25	28	14	15
Srpen	8	6	28	24	55	13	18
Září	6	5	14	9	22	9	9
Říjen	8	6	15	11	17	11	11
Listopad	8	12	34	16	35	13	19
Prosinec	14	10	25	14	23	8	14
Průměr	8	6	19	13	24	9	12
Minimum	5	5	11	7	9	5	6
Maximum	14	12	24	25	55	14	19



Graf 7 - Vývoj EOAR v roce 2015

Komentář k tab. 7 – 11:

V tab. 7 - 11 je zaznamenán vývoj EOAR v jednotlivých měsících za příslušné roky. Hodnoty jsou výsledkem měsíčních průměrů a ukazují naměřená maxima, minima i celkové průměry za příslušné roky v jednotlivých obcích zájmové lokality. Obecně lze říci, že teplejší měsíce způsobují vyšší uvolňování radonu na povrch, avšak není to pravidlem. Záleží i na mnoha dalších faktorech, jako je poloha obce, srážky a další podmínky, které jsou uvedené u bodového měření. Monitorovací body Rožná a Dvořiště zaznamenávají podstatně vyšší hodnoty EOAR než ostatní monitorovací body.



Graf 8 - Srovnání maximální a průměrné EOAR z let 2011 – 2015

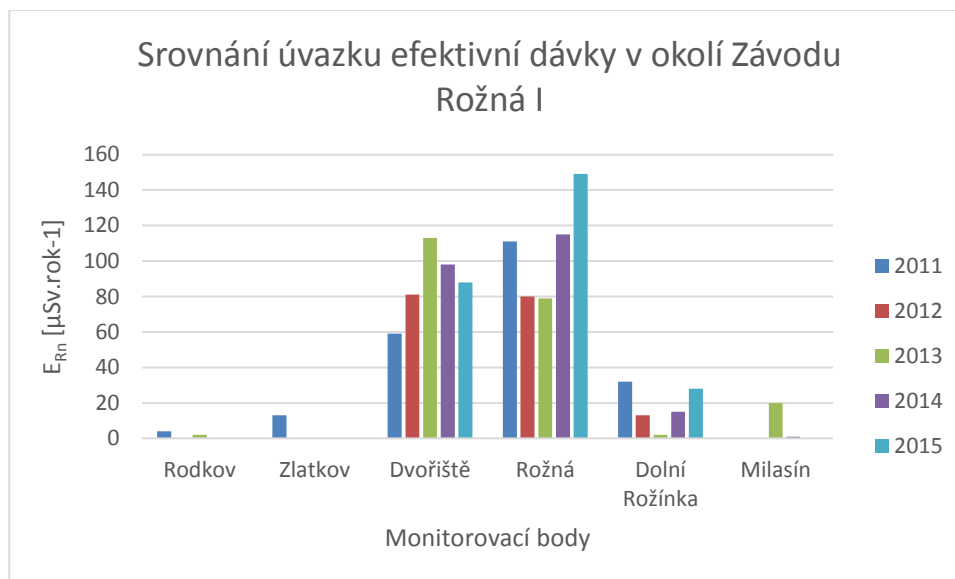
Graf 8 je výsledkem srovnání maximálních a průměrných hodnot EOAR, které byly získány kontinuálním měřením. Všechny hodnoty pochází z období, kdy byl Závod Rožná I v provozu, tedy i nucené odvětrávání radonu probíhalo neustále tak, aby nedošlo ke zvýšení hodnot na nepřijatelnou úroveň. V žádném případě nedošlo k překročení zásahové úrovně 63 Bq/m³. Avšak vyšetřovací úroveň 45 Bq/m³ byla překročena v srpnu roku 2015 v obci Rožná hodnotou 55 Bq/m³. Celkově vyšší hodnoty EOAR lze pozorovat u monitorovacích bodů Rožná a Dvořiště.

5.3 Výpočet úvazku efektivní dávky

Odhad předpokládané dávky pro obyvatelstvo v okolí uranového dolu Rožná I vyžaduje provedení výpočtu úvazku efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu dle vzorce $E_{Rn} = k \cdot (a_{EOAR} - a_{EOAR,0}) \cdot t_1 + k \cdot (a_{EOAR} - a_{EOAR,0}) \cdot t_2$. Výpočet tak umožňuje odhadnout vliv radonu na obyvatelstvo s ohledem na pobyt ve venkovním prostoru i uvnitř budov.

Tab. 12 - Úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu v okolí Závodu Rožná I

	E_{Rn} [$\mu\text{Sv}\cdot\text{rok}^{-1}$] (po odečtu pozadí)				
	2011	2012	2013	2014	2015
Rodkov	4	0	2	0	0
Zlatkov	13	0	0	0	0
Dvořiště	59	81	113	98	88
Rožná	111	80	79	115	149
Dolní Rožínka	32	13	2	15	28
Milasín	-	-	20	1	0

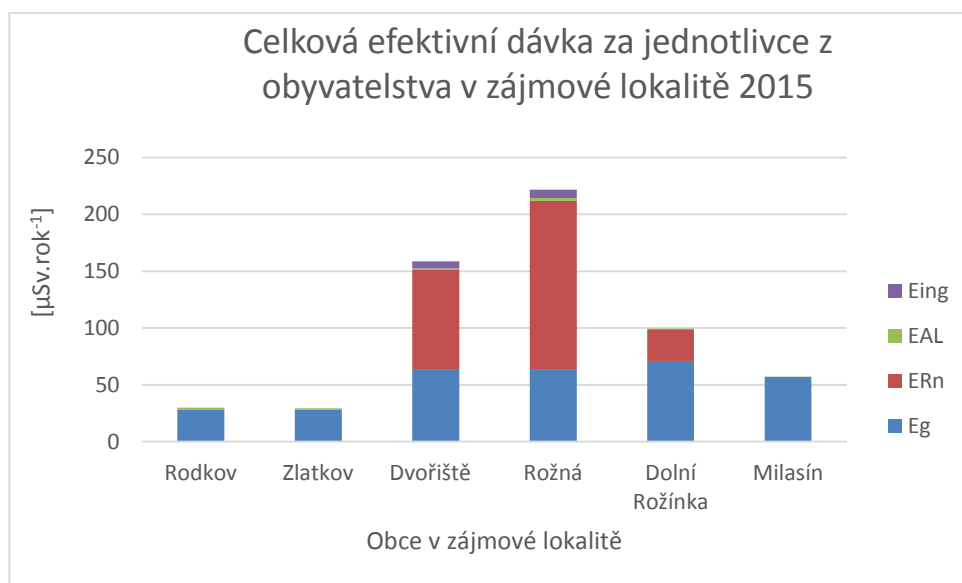


Graf 9 - Srovnání úvazku efektivní dávky v okolí Závodu Rožná I.

Komentář k tab. 14:

Období od roku 2011 do roku 2015 je charakteristické vyšším úvazkem efektivní dávky v obcích Rožná a Dvořiště. Nejvyšší hodnota byla vypočtena pro obec Rožná v roce 2015 dávkou $149 \mu\text{Sv}\cdot\text{rok}^{-1}$. Vzhledem k naměřeným hodnotám pozadí v Rozsochách byla stanovena nulová hodnota v roce 2015 pro tři obce - Rodkov, Zlatkov a Milasín, ve kterých hodnota pozadí převyšovala EOAR, naměřené v daném roce.

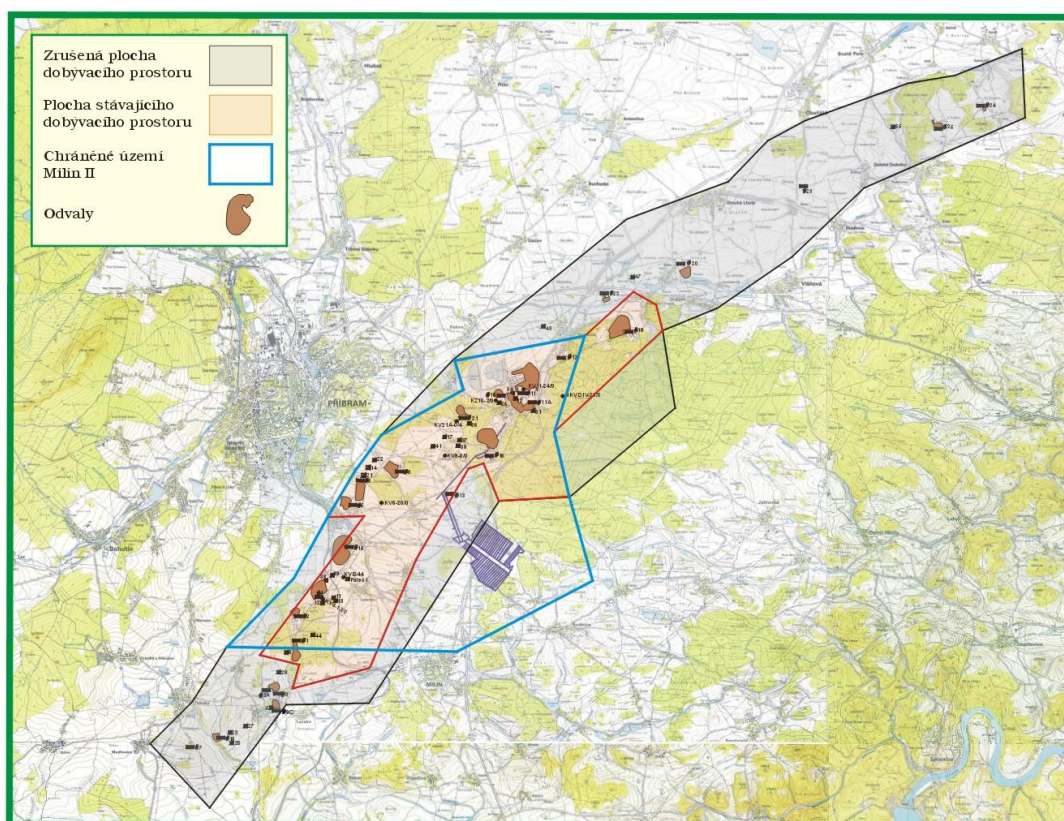
Kdyby se práce zaměřovala na celkovou efektivní dávku pro jednotlivce z obyvatelstva, nejen tedy na vliv radonu, bylo by nutné zahrnout do výpočtu mimo úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu (E_{Rn}) i zevní ozáření zářením gama (E_g), inhalaci dlouhodobých radionuklidů uran-radiové řady emitující záření alfa (E_{AL}) a dávku z ingesce vody a potravin kontaminovaných přírodními radionuklidy (E_{ing}). Pro přehled, jakou část celkové efektivní dávky zaujímá právě vnitřní ozáření inhalací produktů přeměny radonu, je vložen graf 10.



Graf 10 - Celková efektivní dávka jednotlivce z obyvatelstva v zájmové lokalitě 2015

6 Komparace radonové situace oblasti Rožná s Příbramí

Příbramské uranové ložisko patřilo svým rozsahem k nejvýznamnějším hydrotermálním žilným ložiskům nejen v Čechách, ale i ve světě. Státní podnik DIAMO zastřešuje Správu uranových ložisek v Příbrami (dále jen odštěpný závod SUL), která se mimo jiné zabývá zahlazováním následků hornické činnosti v lokalitě Příbram. I zde probíhala hlubinná těžba uranu a fyzikální úprava uranové rudy od roku 1950 do roku 1991. Celkem bylo vytěženo cca 48 432 t uranu v dobývacím prostoru 57,6 km². Na ložisku se navíc vytěžilo i 6 195 t olova, 2 417 t zinku a 17 790 kg stříbra. Počet jam byl 41, přičemž 14 z nich slepých. Oblast Příbramska, která je poměrně těžce zasažena těžbou, v současné době prochází sanací a rekultivací. [46, 47]



Obr. 16 – Uranové ložisko Příbram [47]

6.1 Ukončení provozu

Skončením těžebních prací v roce 1991 došlo i k postupnému přerušení nuceného větrání, které mimo jiné zajišťovalo odvod radonu z podzemních prostor a přívod čerstvého vzduchu.

Samotná likvidace jednotlivých úseků odštěpného závodu Příbram začala postupně již od konce 60. let. Na základě výzkumných překopů byla zjištěna vhodnost podzemních prostorů pro vytvoření zásobníku plynu. Práce na něm započaly v roce 1991 a skončily v roce 1996. Poté se zhotovila technologie potřebná pro zásobník plynu. Plyn se začal napouštět 14. 7. 1998. Poté došlo přirozenému zatopení ložiska vodou.

Menší odvaly byly hned na začátku likvidace sanovány především lesní výsadbou. Některé další odvaly byly odtěženy. Odval jámy č. 9 byl pokusně ozeleněn pomocí využití kalů z čistírny odpadních vod, díky němuž je celek zarostlý vegetací. Odvaly jámy č. 16 a 11 A jsou dnes využívány pro kamenivo (firma Ecoinvest). V dnešní době se zpracovává koncepce, která ustanoví, co bude provedeno se zbylými odvaly, především největším odvalem u šachty č. 15.

Odkaliště č. 2 bylo technicky rekultivováno a odkaliště č. 1 se využívá dodnes. Drenážní vody zpracovává čistírna důlních vod Příbram. [47]

Právě postupná rekultivace celé oblasti přispívá ke snižování koncentrace radonu v okolí uranového revíru Příbram. Důležitý aspekt pro snižování množství radonu v okolí představuje zaplavování dolu, které je součástí likvidace uranového dolu Příbram. Stejný princip ukončení provozu je připravován i pro Závod Rožná I. Rovněž zde je možnost postavení zásobníku plynu, jakmile bude ukončena komerční těžba uranové rudy. V současné době je však jeho realizace pozastavena.

6.2 Zaplavování dolu

V době těžební činnosti byly přítoky důlní vody do ložiska okolo 70 l/s, což představuje více jak 2,1 mil. m³ čerpaných a čištěných důlních vod za rok. Čištění bylo zajišťováno provozem čtyř dekontaminačních stanic. Po předání zásobníku (červenec 1998) začalo přirozené zaplavování ložiska. Původní předpoklad zaplavení celého ložiska a tedy nutnost znovu čistit důlní vodu byl rok 2012, ale došlo několikrát k upřesnění, až se vymezila doba, kdy může dojít k přelivu na přelom roku 2005 a 2006.

V tu dobu se znovu uvedla do provozu Čistírna důlních vod Příbram I, aby snížila rychlost zatápění. Čistírna důlních vod Příbram II byla do provozu uvedena v říjnu 2005. Od té doby prošla několika rekonstrukcemi, které zlepšovaly technologii čištění vod od radionuklidů. [47]

6.3 Monitorování radonu

Součástí činnosti odštěpného závodu SUL je zajištění plnění „Programu monitorování veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany“ (dále jen PM). Dokument je zpracován za účelem vyhodnocení plnění PM a dodržování ustanovení vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. Následující data jsou získána analýzou právě těchto jednotlivých dokumentů z let 2011 – 2015, které byly poskytnuty odštěpným závodem SUL.

Vzhledem k délce ložiska nelze vlivy jednotlivých pozůstatků po těžbě vyjádřit definováním jedné kritické skupiny obyvatel. Jako kritické skupiny obyvatel byly určeny následující sídelní útvary:

- Brod u Příbrami B – 1 (nahrazen bodem B – 3),
- Brod u Příbrami B – 2,
- Brod u Příbrami B – 3,
- Dubenec,
- Kamenná,
- Příbram – Sázky,
- Lešetice,
- Háje,
- Bytíz.

Měření EOAR probíhá na stejném principu jako v okolí Závodu Rožná I, tedy dozimetry ALGADE s celoročním provozem a jednoměsíčním vyhodnocováním v laboratoři. Zásadní rozdíl však tvoří referenční úrovně. Lokalita Příbram má stanovenou pouze záznamovou úroveň, vyšší úrovně již nejsou ustanoveny. V příloze V jsou uvedené roční vyhodnocení EOAR, která pochází ze zájmové lokality kolem odštěpného závodu Příbram z doby, kdy již několik let není v provozu nucené odvětrávání radonu.

6.4 Výpočet úvazku efektivní dávky na Příbramsku

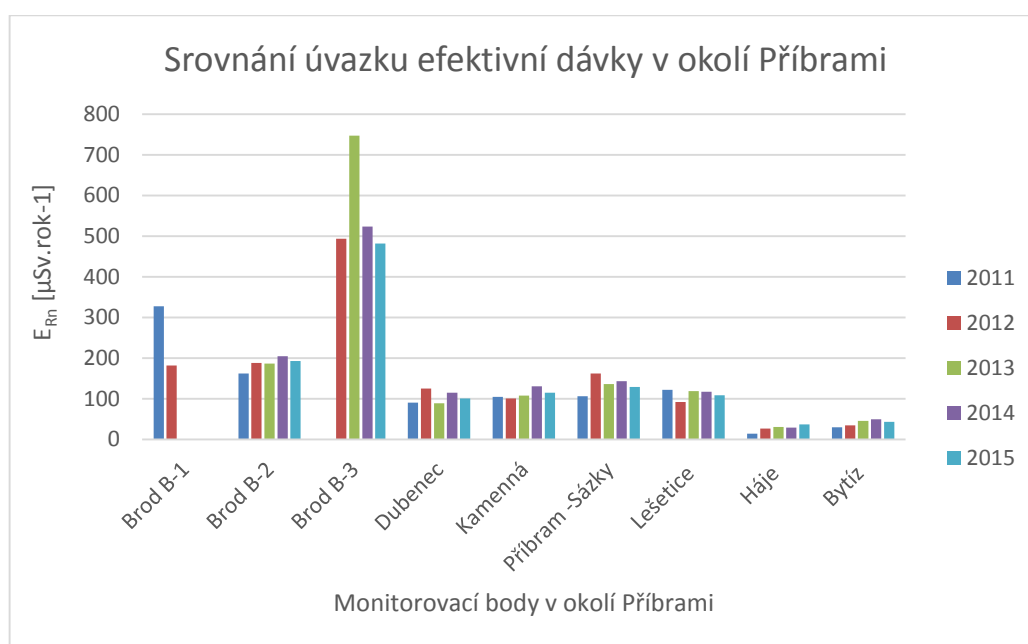
Aby bylo možné vypočítat úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu v oblasti Příbram, je nutné provést stejný výpočet jako u oblasti Rožná. Pro Příbramsko je stanovené pozadí v obci Narysov - na Výfuku a činí průměrně hodnotu $4,54 \text{ Bq/m}^3$.

Naměřené hodnoty EOAR v okolí Příbrami jsou vysoké zejména v obci Brod v teplejších měsících. Brod má celkem 3 monitorovací body, avšak výrazně vyšší hodnoty zaznamenává Brod - 3, ve kterém začalo sledování EOAR až v roce 2012. Od té doby však vykazuje hodnoty EOAR nejvyšší z daných monitorovacích bodů. V roce 2013 je naměřeno až 165 Bq/m^3 v měsících červen a červenec a následující roky je rovněž zaznamenána hodnota převyšující 100 Bq/m^3 . Průměrné hodnoty EOAR v obcích mimo Brod se pohybují od $4,8 \text{ Bq/m}^3$ po $16,3 \text{ Bq/m}^3$.

V tab. 13 jsou uvedené výpočty úvazku efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu v oblasti Příbramska. Nejvyšší dávku obdrželi obyvatelé obce Brod B - 3 v roce 2013, a to $747 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$. Monitorovací bod Brod B - 3 byl zaveden, aby nahradil Brod B - 1, který musel být zrušen z důvodu nesouhlasu vlastníka pozemku. Pro následné srovnávání E_{Rn} jsou využity výpočty z bodu Brod B - 2, který slouží pro monitorování radonové situace po celých pět let, které jsou zkoumány v této práci. Výrazně nižší hodnoty E_{Rn} lze sledovat v obcích Háje a Bytíz, kde představují hodnoty v rozmezí $14 - 46 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$. Ve srovnání s hodnotami v obci Brod je dané ozáření zanedbatelné.

Tab. 13 - Úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu v okolí Příbrami

	E_{Rn} [$\mu\text{Sv.rok}^{-1}$] (po odečtu pozadí)				
	2011	2012	2013	2014	2015
Brod B-1	328	182	-	-	-
Brod B-2	162	188	187	205	193
Brod B-3	-	494	747	524	482
Dubenec	91	125	89	115	101
Kamenná	105	101	108	131	115
Příbram -Sázky	106	162	136	143	129
Lešetice	122	92	119	117	109
Háje	14	27	31	29	37
Bytíz	30	35	46	50	43



Graf 11 - Srovnání úvazku efektivní dávky v okolí Příbrami

V letech 2012 – 2015 přetrvává zhoršený radonový stav v kritické skupině Brod B - 3, kde byly zjištěny neobvykle vysoké hodnoty EOAR vysoce překračující 100 Bq/m^3 . Původní předpoklad z roku 2013, že se jedná o poruchu odběrového zařízení, se nepotvrdil. V současné době jsou přisuzovány tak vysoké hodnoty odvalu č. 15, ze kterého se radon uvolňuje.

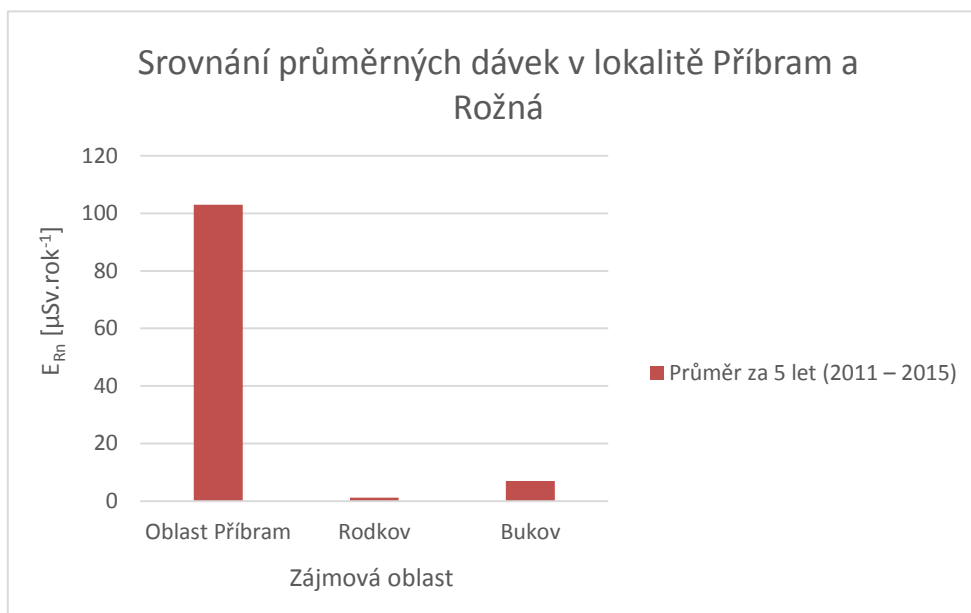
6.5 Odhad předpokládané dávky obyvatelstvu po ukončení těžby na ložisku Rožná

Ukončení těžby uranové rudy na ložisku Rožná může mít vliv na okolní obyvatelstvo z hlediska působení radonu. S ukončením těžby a dalších činností pod povrchem bude zastaveno i nucené odvětrávání radonu. Ten pak bude prostupovat na povrch země přirozeným větráním a prasklinami. Po uzavření Závodu Rožná I tak budou nejvíce ovlivněny obce v blízkosti výduchů z dolu. Jedná se zejména o obec Bukov (u Milasína) a Rodkov. V ostatních obcích v zájmové lokalitě by mělo dojít ke snížení množství radonu v ovzduší, díky postupné sanaci, rekultivaci a pronikání radonu na povrch jinými cestami, než při větrání za provozu dolu. Zvláště zaplavování dolu by mělo dle předpokladu výrazně snížit celkovou úroveň radonu v oblasti.

Odhad předpokládaného úvazku efektivní dávky i inhalace radonu a produktů jeho přeměny je založen na srovnání oblasti Příbramska, kde se již řadu let nevětrá radon, s oblastí Rožné, kde v současné době větrání probíhá téměř neustále. Základ pro srovnání tvoří průměrné hodnoty E_{Rn} z období pěti let.

Tab. 14 – Srovnání průměrných dávek v lokalitě Příbram a Rožná v průběhu 5 let

	E_{Rn} [$\mu\text{Sv.rok}^{-1}$]		
	Oblast Příbram	Oblast Rožná	
		Rodkov	Bukov
Průměr za 5 let (2011 – 2015)	103	1,2	7



Graf 12 - Srovnání průměrných dávek v lokalitě Příbram a Rožná v průběhu 5 let

Pro posouzení, k jakému vnitřnímu ozáření obyvatelstva by mohlo dojít po ukončení provozu odštěpného Závodu Rožná I, se nepodařilo získat potřebné údaje. V archivu odštěpného závodu SUL nejsou k dispozici potřebná data z měření EOAR v okolních obcích z období před uzavřením dolu. Při odhadu lze tedy vycházet pouze z měření po uzavření dolu. Příbramsko je charakteristické poměrně vysokými hodnotami EOAR ve srovnání s lokalitou Rožná. Jedním z důvodů je právě ukončený provoz dolu. Radon zde prostupuje do okolních obcí a tvoří tak největší podíl na celkové efektivní dávce pro obyvatelstvo.

Pokud se použijí hodnoty naměřené za posledních 5 let na Příbramsku, jeví se jako nejhorší možná varianta vývoje situace v lokalitě Rožná dosažení hodnot kolem $100 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$. Na základě výsledků měření v letech 2011 až 2015 by takové hodnoty mohly být dosaženy nejspíše v obcích Bukov a Rodkov.

7 Diskuse

Odštěpný závod GEAM Dolní Rožínka zajišťuje těžbu uranové rudy na ložisku Rožná. Ke dni 31. 12. 2016 dojde k ukončení provozu komerční těžby, avšak podzemní prostor bude ještě využíván pro výzkumné pracoviště Bukov, které bude sloužit pro zkoumání podmínek hlubinného úložiště radioaktivního odpadu. Teprve po skončení provozu podzemní laboratoře dojde k úplnému zatopení dolu, a tím dovršení jeho postupné likvidace.

Při provozu je v dole Rožná zajišťováno odvětrávání radonu a dalších nebezpečných látek tak, aby nedošlo k jejich hromadění, ohrožování zaměstnanců a následnému pronikání na povrch. Po skončení těžby však dojde k zastavení nuceného větrání a zejména radon bude přirozeně pronikat na povrch země všemi cestami, které to dovolí. V praxi to znamená prostupování prasklinami v horninách, výduchy dolu, přirozené pronikání půdou či uvolňováním z vody. Pro zjišťování úrovně radonu v podzemí, na povrchu i v okolí Závodu Rožná I slouží monitorovací síť. Právě působení radonu na obyvatelstvo v okolních obcích je předmětem zkoumání této práce.

Na základě provedeného bodového měření byly zaznamenány hodnoty EOAR v šesti obcích kolem Závodu Rožná I. Měření se realizovalo čtyřikrát za různých okolních podmínek. Z výsledků měření však nelze objektivně vycházet pro posouzení radonové situace v oblasti, neboť koncentrace se může rychle a často měnit v závislosti na okolních podmínkách. Důkazem jsou následná data z celoročního měření EOAR. Při bodovém měření byl celkový průměr ze všech měření v dané oblasti $5,3 \text{ Bq/m}^3$. Pro srovnání ve stejné oblasti za celý rok 2015 byl průměr EOAR $13,3 \text{ Bq/m}^3$. Koncentraci radonu v ovzduší ovlivňuje celá řada faktorů. Nejpodstatněji působí na hodnoty EOAR teplota, tlak, vítr, srážky, propustnost a pórovitost hornin a zemin nebo tektonické porušení hornin. Bodové měření bylo tedy shledáno za neobjektivní, avšak využitelné pro okamžité zjištění EOAR v případě potřeby. Vliv radonu na obyvatelstvo se tak zjišťuje pomocí celoročního, tedy kontinuálního měření radonu, které dokáže objektivně posoudit stav ve sledované lokalitě. První hypotéza tedy byla potvrzena – bodové měření koncentrace radonu je neobjektivní.

Přístroje ALGADE pro kontinuální měření EOAR jsou vyhodnocovány jednou měsíčně. Data z let 2011 až 2015 jsou uvedené v tab. 7 – 11. Výrazně vyšší hodnoty jsou zaznamenány z monitorovacích bodů Rožná a Dvořiště. Maximální hodnoty v Dvořišti dosahují až 41 Bq/m^3 v roce 2014 (únor) a Rožná má své maximum 55 Bq/m^3 v roce 2015 (srpen). Příčinou tak vysokých hodnot je několik významných zdrojů radonu v blízkosti těchto obcí. Jedná se o odval jámy R 1 a blízkou výust' d'lní vody, rudné depo na Závodě Chemická úpravna a odkaliště. Odvětrávání podzemí Závodu Rožná I také výrazně ovlivňuje množství radonu v obci Rožná a způsobuje tak vyšší hodnoty EOAR. Všechny tyto zdroje radonu po ukončení těžby uranové rudy a následné sanaci a rekultivaci přestanou mít tak významný příspěvek radonu pro okolní obce a tedy obyvatelstvo. Ostatní obce v zájmové lokalitě se v naměřených hodnotách EOAR pohybují kolem průměru $8,8 \text{ Bq/m}^3$. Výkyvy této hodnoty se však poměrně často objevují v obci Dolní Rožínka a výraznější odchylky v obci Milasín zejména během teplejších měsíců. Z tab. 7 – 11 se potvrzuje skutečnost, že úroveň radonu neustále kolísá a je ovlivněna celou řadou již zmíněných faktorů.

Úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu v okolí Závodu Rožná I je výsledek výpočtu, který je založený na měsíčních průměrných hodnotách EOAR za celý rok. Umožňuje tak určit, jaký vliv má radon a produkty jeho přeměny na vnitřní ozáření osob ve sledované lokalitě. Dle výsledků v tab. 12 je opět zřejmé, že nejvyšší úvazek efektivní dávky obdrželi obyvatelé obcí Rožná a Dvořiště. Konkrétně $149 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$ v Rožné (2015) a $113 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$ ve Dvořišti (2013). V žádném případě nebyl překročen nejvyšší přípustný limit 1 mSv za rok. Ostatní obce v zájmové lokalitě vykazují často hodnotu $0 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$, neboť hodnota pozadí převyšuje EOAR z dané oblasti a obyvatelé v zájmové lokalitě tak nedostávají vyšší dávku záření způsobené radonem z produktů hornické činnosti. Pozadí pro radon představuje takovou úroveň záření, která se vyskytuje běžně v životním prostředí. Kdyby se posuzovala celková efektivní dávka pro jednotlivce z obyvatelstva v zájmové lokalitě, vliv radonu by představoval největší podíl na celkovém ozáření. Druhým významným prvkem je pak zevní ozáření zářením gama, které zásadně přispívá k celkové efektivní dávce. Ostatní prvky jako inhalace dlouhodobých radionuklidů uran-radiové řady emitující záření alfa či ingesce vody a potravin kontaminovaných přírodními radionuklidy nepředstavují významnou část celkové dávky, spíše je lze označit za zanedbatelné.

Pro komparaci radonové situace s již uzavřeným uranovým dolem byla zvolena oblast Příbramska, neboť právě uranové ložisko Příbram patřilo mezi nejvýznamnější ložiska jak v ČR, tak ve světě a v současné době se stále pracuje na rekultivaci krajiny významně zasažené těžbou. Ukončení provozu dobývání uranové rudy v Příbrami je založeno na stejném principu jako na ložisku Rožná, tedy přirozené zatopení podzemních prostor a čištění důlní vody od radionuklidů. Důsledky těžby na povrchu odstranit, případně snížit uvolňování radioaktivních látek do okolního prostředí vysázením vegetace či zavedením jiných technických opatření. Právě z hlediska uvolňování radonu je sanace a rekultivace bývalého dolu významným krokem pro snížení koncentrace radonu v ovzduší. Provoz uranového dolu Příbram je ukončen už od roku 1991 a v současné době zcela zatopen.

Monitorování EOAR za roky 2011 až 2015 v okolí Příbrami probíhá na devíti místech, z toho 3 tvoří obec Brod, která se stále potýká s vysokými hodnotami EOAR. Monitorovací bod Brod B - 3 dosahuje hodnot až 165 Bq/m^3 v roce 2013 (červen a červenec). Zhoršený stav však přetrvává ve všech zkoumaných letech. Za zdroj takto vysokých hodnot je považováno těleso odvalu č. 15. Při výpočtu úvazku efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu v oblasti Příbram jsou získány hodnoty výrazně vyšší než v oblasti Rožná. Jedním z důvodů je skutečnost, že v Závodě Rožná I probíhá téměř neustálé větrání radonu z podzemí. Brod B - 3 za rok 2013 zaznamenal dokonce $747 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$. I přes takto vysoké úvazky efektivní dávky nedošlo v žádném případě k překročení stanovených limitů pro ozáření. Druhá hypotéza je potvrzena, neboť uranový důl uzavřený v minulosti nepředstavuje riziko pro obyvatelstvo v dnešní době. Důkazem je právě hodnocení úvazku efektivní dávky v průběhu několika let. Povolené limity nejsou ve sledovaném období překračovány.

Odhad předpokládaného vlivu radonu na obyvatelstvo po ukončení provozu Závodu Rožná I je založen právě na srovnání se situací v Příbrami. Ve zkoumané oblasti Příbrami se již řadu let netěží uranová ruda a podzemí je zatopeno. Původním plánem práce bylo využít údaje naměřené ještě před uzavřením dolu v Příbrami, tedy z let 1986 – 1991 a provést jejich komparaci s aktuálními údaji z let 2011 – 2015. Následně by došlo k odvození situace, která by mohla nastat po ukončení provozu Závodu Rožná I. Tento záměr se však nepodařilo uskutečnit, protože v archivu odštěpného závodu SUL nebyla nalezena potřebná data z měření EOAR v okolních obcích. Důvodem je pravděpodobně skutečnost, že těžba uranové rudy na Příbramsku a související měření

aktivity radonu probíhala v období, kdy se postupovalo dle jiných právních předpisů, než je tomu v současnosti. Důraz pro měření v okolí těžby na Příbramsku byl před rokem 1991 kladen zejména na monitorování vody, vypouštěné z dolů a čističek důlních vod. Tato skutečnost znemožnila srovnání radonové situace v průběhu těžby se situací po ukončení těžby v lokalitě Příbram. Z toho důvodu je komparace založena na prostém porovnání hodnot z let 2011 – 2015 v lokalitě Příbram, kde se radon nevětrá, s lokalitou Rožná, kde probíhá téměř neustálé větrání radonu.

Průměr úvazku efektivní dávky činí ve sledované oblasti Příbramska za 5 let $103 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$. V lokalitě Rožná dojde po ukončení provozu Závodu Rožná I zejména k ovlivnění obcí Bukov a Rodkov. V ostatních obcích se předpokládá EOAR nižší, neboť dojde k odstranění největších zdrojů radonu. Obec Bukov a Rodkov však budou ovlivněny přirozeným větráním radonu, který bude pronikat na povrch ve větší míře právě v blízkosti těchto obcí z výdychů z dolu. Dle srovnání oblasti Rožná a Příbram lze považovat za nejhorší variantu vývoje situaci, kdy se koncentrace radonu zvýší v obci Bukov a Rodkov na $103 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$ z původních $7 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$ v Bukově a $1,2 \mu\text{Sv.rok}^{-1}$ v Rodkově. Třetí hypotézu nelze potvrdit ani vyvrátit z důvodu nedostatku dat pro lokalitu Příbram.

Závěr

Problematika přirozené radioaktivity a zejména radonu vždy existovala a také vždy existovat bude. Důležité je, aby se lidé dokázali přizpůsobit okolním podmínkám a uměli na ně reagovat. Produkty lidské činnosti mají mnohdy za následek narušení přírodních procesů, avšak vývoj lidstva nelze zastavit. V dnešní době je již mnohem širší povědomí o životním prostředí a možnostech jeho ochrany a revitalizace. Právě následky těžby uranové rudy výrazně ovlivňují životní prostředí v jejím okolí. Příkladem je jak oblast Příbrami, tak oblast Rožné. Státní podnik DIAMO v dnešní době usiluje o zahlazení následků hornické činnosti.

Na základě zkoumání EOAR v okolí Závodu Rožná I vyplývá, že úroveň radonu v zájmové lokalitě nepředstavuje riziko pro obyvatelstvo při těžbě uranové rudy, ani po jejím skončení. Ačkoliv pravděpodobně dojde k navýšení EOAR v obcích Bukov a Rodkov vlivem přirozeného větrání radonu z podzemí, v ostatních obcích v zájmové lokalitě by hodnoty EOAR měly klesnout, a tím i úvazek efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu.

V případě realizace nejhorší možné varianty dle provedeného odhadu bude úroveň radonu v obci Bukov a Rodkov stále výrazně pod hranicí 1 mSv/rok. Srovnání situace oblasti Příbrami a Rožné je však odhad založený na výpočtech předpokládaného vývoje. Situace se může změnit a v případě nepřijatelného zvýšení úrovně radonu by musela být zavedena adekvátní technická opatření.

Seznam použité literatury

- [1] Kolektiv autorů: *Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření: sborník učebních textů*. 1. vyd. Ostrava: Dům techniky Ostrava, 2003. ISBN 80-02-01529-0.
- [2] ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. ISBN 80-866-3462-0.
- [3] PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC. *Zásahy při radiační mimořádné události*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-046-3.
- [4] KLENER, Vladislav (ed.). *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vyd. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
- [5] HUŠÁK, Václav. Zdroje ionizujícího záření. In: *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích* [online]. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2016 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch01.htm.
- [6] Druhy ionizujícího záření. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a. s, 2016 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/druhy_5.html.
- [7] Stručný přehled biologických účinků záření. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha: SÚJB [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologicky-ucinku-zareni/>.
- [8] ULLMANN, Vojtěch. Jaderná a radiační fyzika: Radionuklidy. *Astro Nukl Fyzika* [online]. Ostrava [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>.

- [9] Přírodní radioaktivita a problematika radonu. *Státní ústav radiační ochrany*, v. v. i. [online]. Praha: SÚRO, v.v.i., 2016 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/radprirodni-radioaktivita-a-problematika-radonu>.
- [10] What is Uranium? How Does it Work? *World nuclear association* [online]. London: World Nuclear Association, 2014 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/what-is-uranium-how-does-it-work.aspx>.
- [11] Radium. *Periodická tabulka* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/88.html>.
- [12] NEZNAL, Matěj a Martin NEZNAL. *Ochrana staveb proti radonu*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-6164-0.
- [13] Geologická prognózní mapa radonového rizika. *Státní ústav radiační ochrany*, v. v. i. [online]. Praha: SÚRO, v.v.i., 2016 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/radonove-mapy/geologicka-prognozni-mapa-radonoveho-rizika>.
- [14] Základní informace o RADONU. *Státní ústav radiační ochrany*, v. v. i. [online]. Praha: SÚRO, v.v.i., 2016 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace>.
- [15] KOLÁŘOVÁ, Zdenka. Dědictví uranových dolů. In: *Zdravotnický deník* [online]. Praha: Media Network s.r.o., 2015 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.zdravotnickydenik.cz/2015/09/dedictvi-uranovych-dolu/>.
- [16] Biologické účinky radonu. *Alfa - radon* [online]. Olomouc: ALFA-RADON, 2007 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.alfa-radon.com/page/ucinky/>.
- [17] Více o zdravotních účincích RADONU. *Státní ústav radiační ochrany* [online]. Praha: SÚRO, v.v.i., 2016 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/zdravotni-ucinky-radonu>.

- [18] Vyhlášky SÚJB. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha: SÚJB [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/legislativa/provadedci-pravni-predpisy/vyhlasiky-sujb/>.
- [19] Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně.
- [20] DIAMO, státní podnik Stráž pod Ralskem. *DIAMO: státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. DIAMO, státní podnik, 2016 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://www.diamo.cz/diamo-statni-podnik-straz-pod-ralskem>.
- [21] Odštěpné závody. *DIAMO: státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. DIAMO, státní podnik, 2016 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://www.diamo.cz/odstepne-zavody>.
- [22] Těžba. *DIAMO: státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. DIAMO, státní podnik, 2016 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: <http://www.diamo.cz/tezba>.
- [23] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Příloha 2 Historie těžby a úpravy uranu ložiska Rožná*. Mníšek pod Brdy, 1998.
- [24] *DIAMO: 55 let těžby uranové rudy na o. z. GEAM Dolní Rožínka*. Stráž pod Ralskem: DIAMO Stráž pod Ralskem, 2012, XVII (zvláštní číslo).
- [25] DIAMO: Vláda schválila postupnou uzavírku uranového dolu Rožná I. In: *Parlamentní listy.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: <http://www.parlamentnilisty.cz/zpravy/tiskovezpravy/DIAMO-Vlada-schvalila-postupnou-uzavirku-uranoveho-dolu-Rozna-I-418916>.
- [26] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Část C Komplexní popis a zhodnocení vlivů na životní prostředí*. Mníšek pod Brdy, 1998.
- [27] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Příloha 4 Popis současného stavu v ložiskové oblasti Rožná*. Mníšek pod Brdy, 1998.

- [28] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Příloha 3 Základní charakteristika ložiskové oblasti*. Mníšek pod Brdy, 1998.
- [29] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Část A*. Mníšek pod Brdy, 1998.
- [30] Kolektiv autorů. *Likvidace těžby a úpravy uranu na lokalitách ve správě o. z. GEAM Dolní Rožínka: Aktualizovaný technický a sociální projekt likvidace*. DIAMO, státní podnik, odštěpný závod GEAM. 2011.
- [31] *Technologický postup: pro ražbu, dobývání, vrtání průzkumných vrtů a plenění důlních děl*. DIAMO státní podnik odštěpný závod GEAM Dolní Rožínka, 2008.
- [32] Odštěpný závod GEAM. *DIAMO: Státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. DIAMO, státní podnik, 2016 [cit. 2015-10-21]. Dostupné z: <http://www.diamo.cz/geam>.
- [33] *DIAMO: 45 let provozu Chemické úpravny uranové rudy v Dolní Rožínce*. Stráž pod Ralskem: DIAMO Stráž pod Ralskem, 2013, XVIII (4).
- [34] TOMAN František - ústní sdělení (vedoucí závodu Chemická úpravna, DIAMO, státní podnik, odštěpný závod GEAM, 592 51 Dolní Rožínka) dne 16. 10. 2015.
- [35] *DIAMO: Uzavření a rekultivace skládky Bukov I – I. etapa*. Stráž pod Ralskem: DIAMO Stráž pod Ralskem, 2010, XV (6).
- [36] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Příloha 24 Modelové hodnocení vývoje radiačního rizika pro obyvatelstvo*. Mníšek pod Brdy, 1998.
- [37] Ministr průmyslu navštívil podzemní laboratoř PVP Bukov. In: *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. 2016 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/O-SURAO/Aktuality/Ministr-prumyslu-navstivil-podzemni-laborator-PVP-Bukov>.

- [38] Uranový důl Rožná znovu ožívá, budou tu podzemní laboratoře. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2016 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument168338.htm>.
- [39] Zákon č. 39/2015 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí), ve znění pozdějších předpisů.
- [40] HRÁDEK, Mojmír a Jan LACINA. Monitoring změn krajiny v okolí Rožné v důsledku těžby a úpravy uranových rud [online]. In: *DIAMO státní podnik Stráž pod Ralskem*. Brno, 2001 [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: <http://slon.diamo.cz/hpvt/2001/sekce/sanace/09/S09.htm>.
- [41] JEŽ, Jiří. Sanace následků těžby a úpravy uranové rudy v oblasti Dolní Rožínky [online]. In: *DIAMO státní podnik Stráž pod Ralskem*. DIAMO, státní podnik odštěpný závod GEAM Dolní Rožínka, 2008 [citováno 2013-12-02]. Dostupné z: <http://slon.diamo.cz/hpvt/2008/sanace/S01.pdf>.
- [42] KŘÍŽ, Petr a Mir Muhammad NÁSIR. Problematika větrání uranového dolu Rožná I. In: *DIAMO státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. DIAMO, státní podnik odštěpný závod GEAM Dolní Rožínka [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://slon.diamo.cz/hpvt/2007/SZ/Z12.pdf>.
- [43] Kolektiv autorů. *Dokumentace o hodnocení vlivu na životní prostředí stavby: Sanace a rekultivace odkališť Dolní Rožínka, Příloha 23 Rozptylová studie radonu*. Mníšek pod Brdy, 1998.
- [44] Algade INSTRUMENTATION. *ALGADE* [online]. BESSINES SUR GARTEMPE (France): ALGADE, 2014 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://instrumentation.algade.com>
- [45] *Radiační ochrana: DOPORUČENÍ: Postupy při výpočtu ozáření obyvatelstva přírodními radionuklidy uvolňovanými do životního prostředí a při posuzování zásahů v oblastech ovlivněných hornickou činností*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2008.

- [46] Příbram. *DIAMO: státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. Stráž pod Ralskem: DIAMO, státní podnik, 2016 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.diamo.cz/lokality-sul/pribram-uran>.
- [47] ŘEHORĚ, Vratislav, Ladislav KRAMÁŘ a Karel LUSK. Čištění důlních vod střední a východní části příbramského ložiska uranové rudy. In: *DIAMO státní podnik Stráž pod Ralskem* [online]. Stráž pod Ralskem: DIAMO, státní podnik Stráž pod Ralskem, 2016 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://slon.diamo.cz/hpvt/2006/sanace/s_12.htm.
- [48] TROJAN, Jiří a Iva TROJANOVÁ. *Na křídlech za poznáním obcí Žďárska: [168 samostatných obcí a městysů, města a zajímavosti Žďárska]*. 1. vyd. Velké Meziříčí: J. Trojan, 2008. ISBN 978-80-904169-0-1.
- [49] *Vyhodnocení: vlivu činnosti odštěpného závodu GEAM Dolní Rožínka na životní prostředí v roce 2011 - 2015*. Odštěpný závod GEAM Dolní Rožínka, 2011 - 2015.
- [50] *Vyhodnocení: programu monitorování a dodržování ustanovení vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění pozdějších předpisů, o. z. SUL za rok 2011 - 2015*. Odštěpný závod SUL Příbram, 2011 - 2016.

Seznam zkratek a symbolů

A	Aktivita
a_{EOAR}	Ekvivalentní objemová aktivita radonu
$a_{\text{EOAR},0}$	Ekvivalentní objemová aktivita radonu na pozadí
Bi	Bismut
Bq/m^3	Becquerel na metr krychlový
ČR	Česká republika
D	Absorbovaná dávka / dávkový příkon
E	Efektivní dávka
E_{AL}	Úvazek dávky z inhalace dlouhodobých radionuklidů uran-radiové řady emitující záření alfa
E_{g}	Úvazek dávky ze zevního ozáření zářením gama
E_{ing}	Úvazek dávky z ingesce vody a potravin kontaminovaných přírodními radionuklidy
EOAR	Ekvivalentní objemová aktivita radonu
E_{Rn}	Úvazek efektivní dávky produktů přeměny radonu
GEAM	Geologie Ekologie Atom Morava
Gy	Gray
H	Ekvivalentní dávka
ICRP	Mezinárodní komise radiologické ochrany
k	Obecný koeficient přepočtu objemové aktivity radonu na efektivní dávku pro obyvatelstvo
K	Draslík
OAR	Objemová aktivita radonu
Pb	Olovo
PM	Program monitorování
Po	Polonium
Ra	Radium
Rn	Radon
SUL	Správa uranových ložisek v Příbrami
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚJCHBO	Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany

Sv	Sievert
T	Poločas rozpadu
t	Doba pobytu
Th	Thorium
U	Uran
v. v. i.	Veřejná výzkumná instituce

Seznam obrázků

Obr. 1 – Přírodní rozpadové řady	7
Obr. 2 – Prognózní mapa radonového rizika	10
Obr. 3 – Schéma uranového dolu Rožná I.....	21
Obr. 4 - Ložisková oblast Rožná I.....	22
Obr. 5 - Technologické procesy v chemické úpravně	23
Obr. 6 - Odběrové čerpadlo Quick Take 30.....	32
Obr. 7 - Odběrové čerpadlo NOPV - 20	32
Obr. 8 - Comet Commeter a analyzátor produktů přeměny radonu RPA – 50.....	33
Obr. 9 - ALGADE	34
Obr. 10 - Bodové měření Dolní Rožínka.....	36
Obr. 11 - Bodové měření Rožná	37
Obr. 12 - Bodové měření Dvořiště	38
Obr. 13 - Bodové měření Zlatkov	38
Obr. 14 - Bodové měření Rodkov.....	39
Obr. 15 - Bodové měření Milasín	40
Obr. 16 – Uranové ložisko Příbram	53

Seznam grafů

Graf 1 – Produkce uranu (t/rok).....	19
Graf 2 - Bodové měření EOAR v zájmové lokalitě.....	43
Graf 3 - Vývoj EOAR v roce 2011	45
Graf 4 - Vývoj EOAR v roce 2012	46
Graf 5 - Vývoj EOAR v roce 2013	47
Graf 6 - Vývoj EOAR v roce 2014	48
Graf 7 - Vývoj EOAR v roce 2015	49
Graf 8 - Srovnání maximální a průměrné EOAR z let 2011 – 2015	50
Graf 9 - Srovnání úvazku efektivní dávky v okolí Závodu Rožná I.	51
Graf 10 - Celková efektivní dávka jednotlivce z obyvatelstva v zájmové lokalitě	52
Graf 11 - Srovnání úvazku efektivní dávky v okolí Příbrami.....	57
Graf 12 - Srovnání průměrných dávek v lokalitě Příbram a Rožná v průběhu 5 let	59

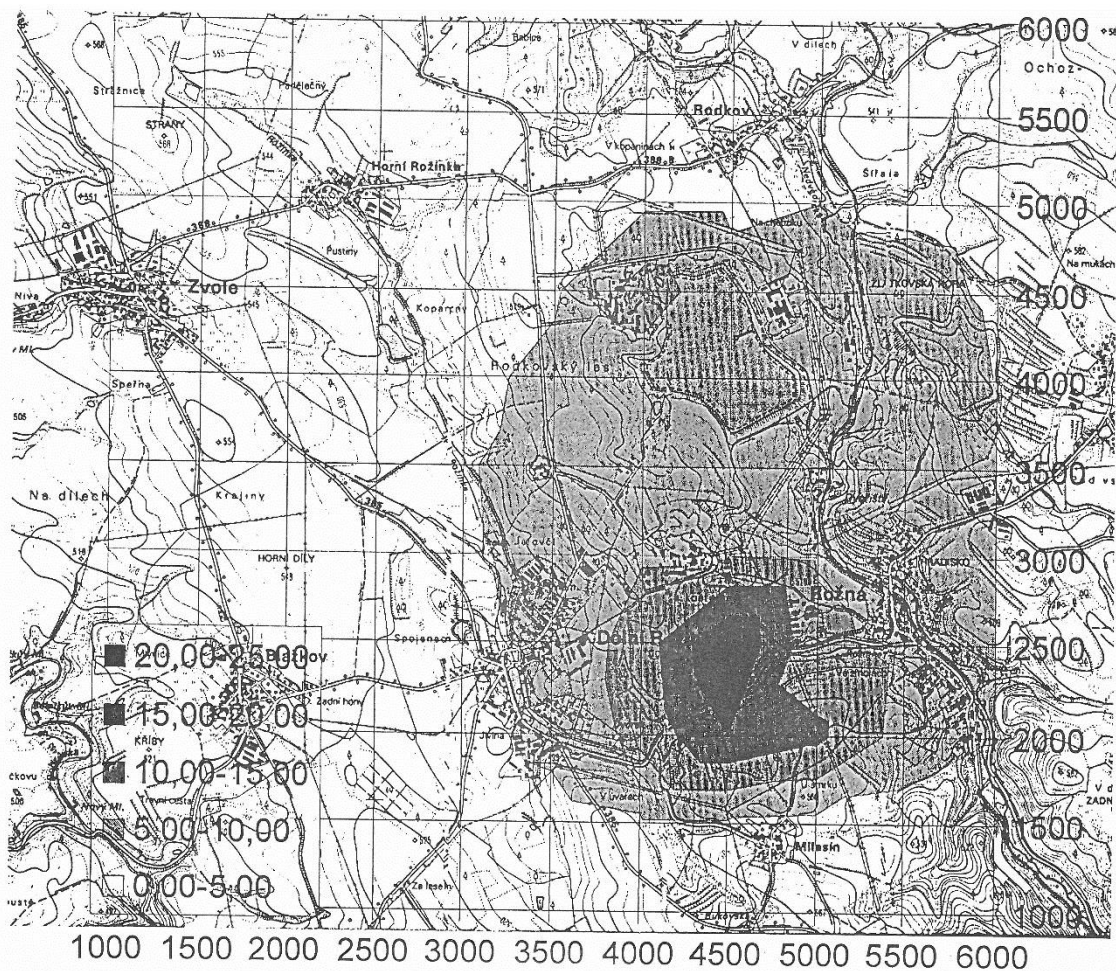
Seznam tabulek

Tab. 1 - Měření EOAR 14. 9. 2015 (8:15 – 11:45).....	41
Tab. 2 - Měření EOAR 2. 11. 2015 (8:23 – 11:23).....	41
Tab. 3 - Měření EOAR 2. 2. 2016 (8:12 – 10:57).....	42
Tab. 4 - Měření EOAR 14. 4. 2016 (8:00 – 12:00).....	42
Tab. 5 - Srovnání hodnot EOAR v bodovém měření	43
Tab. 6 - Referenční úrovně pro EOAR	44
Tab. 7 - EOAR v zájmové lokalitě 2011	45
Tab. 8 - EOAR v zájmové lokalitě 2012	46
Tab. 9 - EOAR v zájmové lokalitě 2013	47
Tab. 10 - EOAR v zájmové lokalitě 2014	48
Tab. 11 - EOAR v zájmové lokalitě 2015	49
Tab. 12 - Úvazek efektivní dávky v okolí Závodu Rožná I.....	51
Tab. 13 - Úvazek efektivní dávky v okolí Příbrami	57
Tab. 14 – Srovnání průměrných dávek v lokalitě Příbram a Rožná v průběhu 5 let.....	59

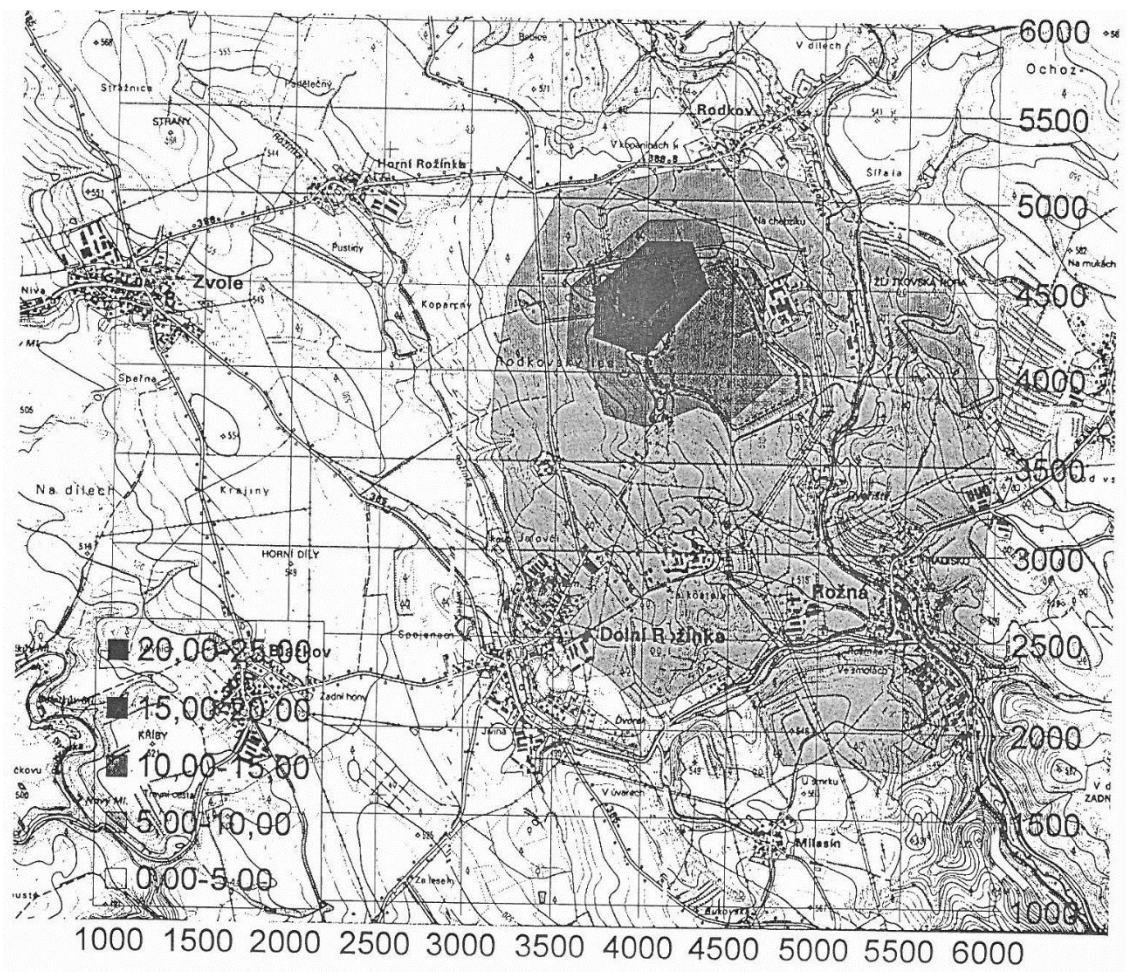
Seznam příloh

Příloha I: Roční průměrná aktivita radonu [Bq/m ³] varianta I	77
Příloha II: Roční průměrná aktivita radonu [Bq/m ³] varianta II.....	78
Příloha III: Roční průměrná aktivita radonu [Bq/m ³] varianta III.....	79
Příloha IV: Roční průměrná aktivita radon [Bq/m ³] varianta IV.....	80
Příloha V: Roční průměrná EOAR v okolních obcích Příbrami 2011 - 2015	81
Příloha VI: Závod Rožná I.....	84
Příloha VII: Závod Chemická úpravna, v pozadí odkaliště K 1	84

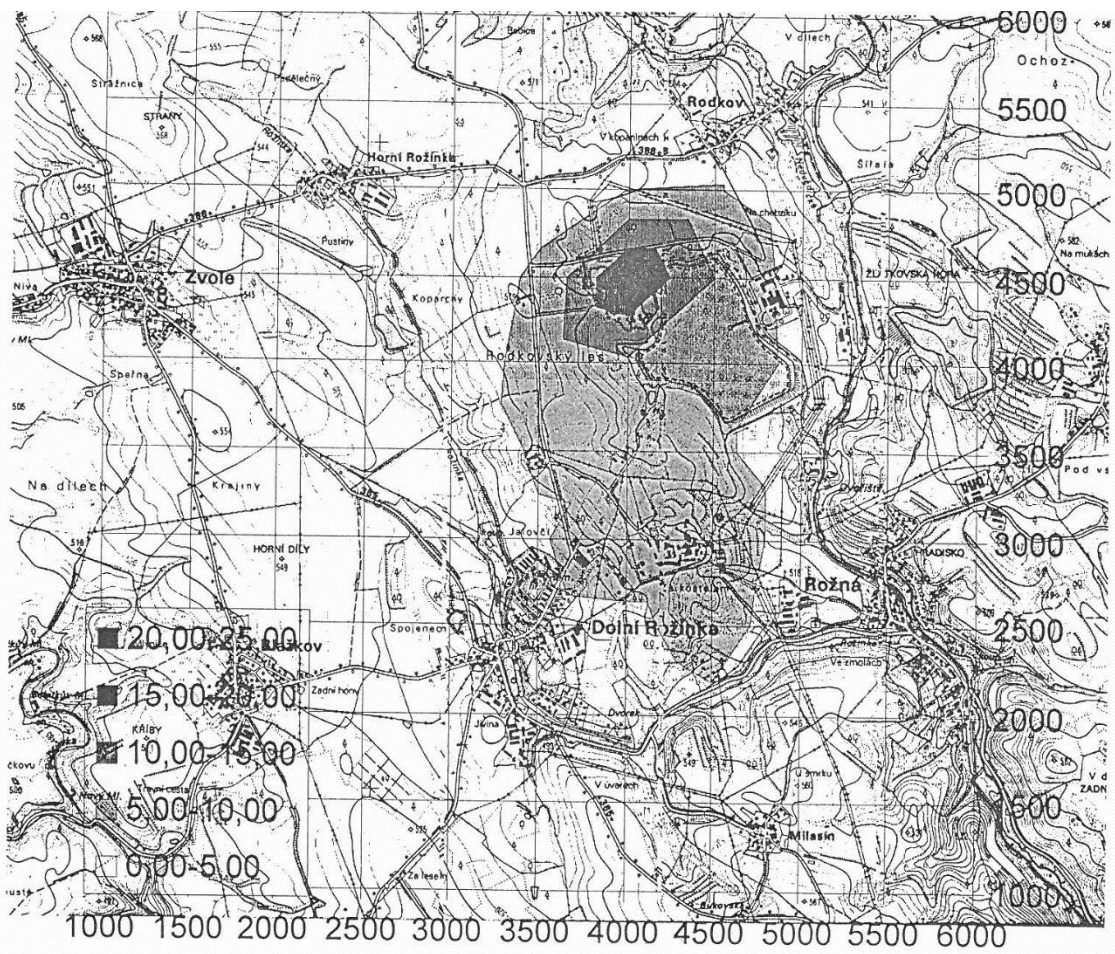
Příloha I: Roční průměrná aktivita radonu [Bq/m³] varianta I [19]



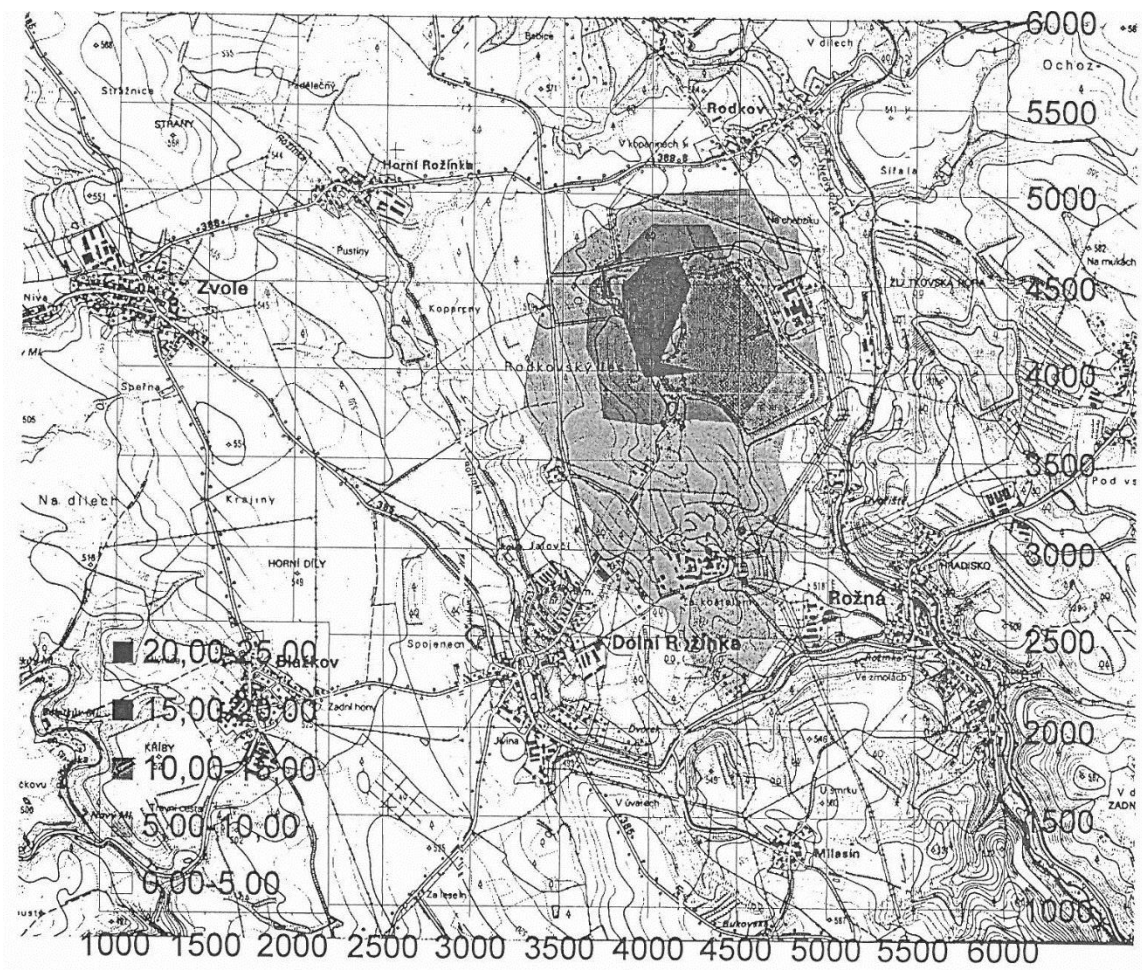
Příloha II: Roční průměrná aktivita radonu [Bq/m³] varianta II [19]



Příloha III: Roční průměrná aktivita radonu [Bq/m³] varianta III [19]



Příloha IV: Roční průměrná aktivita radon [Bq/m³] varianta IV [19]



Příloha V: Roční průměrná ekvivalentní objemová aktivita radonu v okolních obcích Příbrami 2011 – 2015 [50]

2011	EOAR [Bq/m ³]												Průměr
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Brod B - 1	7	<4	17	4	48	49	34	85	79	36	5	<4	31,0
Brod B - 2	7	10	16	15	18	16	11	42	34	19	15	4	17,3
Dubeneč	9	4	17	11	12	13	11	17	16	16	5	5	11,4
Kamenná	16	8	21	11	7	11	11	16	25	14	5	5	12,5
Příbram - Sázky	5	9	14	13	18	15	13	22	17	15	4	4	12,4
Lešetice	5	11	8	14	15	32	14	19	14	15	16	<4	13,9
Háje	4	4	5	5	<4	4	4	4	4	5	<4	<4	4,3
Bytíz	7	6	5	5	5	4	5	6	7	6	13	6	6,3
Narysov - na Výfuku (pozadí)	5	<4	<4	<4	4	5	4	6	5	6	6	5	3,8

2012	EOAR [Bq/m ³]												Průměr
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Brod B - 1	5	11	40	18	15	-	-	-	-	-	-	-	17,8
Brod B - 2	6	12	23	9	21	20	34	38	34	12	10	7	18,8
Brod B - 3	-	-	-	-	-	-	83	25	122	19	13	10	45,3
Dubeneč	5	17	14	10	13	11	16	18	18	13	14	14	13,6
Kamenná	6	9	17	6	7	11	13	15	15	13	15	12	11,6
Příbram - Sázky	4	<4	16	8	9	14	21	69	23	12	9	6	16,3
Lešetice	4	16	10	7	12	13	13	17	17	7	8	6	10,8
Háje	4	4	4	<4	4	4	5	4	6	7	6	6	4,8
Bytíz	4	6	5	5	<4	4	5	6	6	8	10	7	5,8
Narysov - na Výfuku (pozadí)	<4	9	<4	<4	4	<4	4	5	<4	5	7	4	3,2

2013	EOAR [Bq/m ³]												Průměr
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Brod B - 2	5	5	13	19	15	29	37	32	24	20	10	10	18,3
Brod B - 3	<4	9	13	73	74	165	165	129	75	46	14	12	64,9
Dubenec	8	7	12	10	7	13	13	12	8	16	6	9	10,1
Kamenná	7	7	9	15	8	13	14	15	9	18	12	13	11,7
Příbram - Sázky	10	6	11	14	13	27	25	19	11	14	9	9	14,0
Lešetice	5	7	9	8	11	23	27	19	12	15	7	8	12,6
Háje	4	5	5	4	<4	<5	<5	<5	<5	6	6	5	4,9
Bytíz	7	7	8	6	4	5	6	7	5	5	7	7	6,2
Narysov - na Výfuku (pozadí)	4	4	5	5	<4	<5	<5	<5	<5	9	<5	5	5,1

2014	EOAR [Bq/m ³]												Průměr
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Brod B - 2	10	11	22	34	16	18	34	17	30	23	13	5	19,4
Brod B - 3	12	14	37	134	46	58	75	47	65	40	18	6	47,7
Dubenec	12	10	21	16	9	15	11	9	15	9	10	6	11,9
Kamenná	15	20	21	15	8	13	13	11	13	10	13	7	13,3
Příbram - Sázky	10	11	20	26	13	19	23	12	12	10	10	5	14,3
Lešetice	9	8	17	22	6	15	20	11	10	13	9	5	12,1
Háje	8	6	<5	5	<5	<5	5	5	<5	5	8	<5	5,6
Bytíz	10	6	7	8	5	5	7	<5	9	7	11	<5	7,1
Narysov - na Výfuku (pozadí)	7	5	<5	<5	<5	<5	5	<5	5	<5	6	<5	5,3

2015	EOAR [Bq/m ³]												
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Průměr
Brod B - 2	5	8	12	14	23	24	29	41	27	24	5	8	18,3
Brod B - 3	6	8	15	23	46	61	110	109	57	49	19	8	42,6
Dubenec	5	8	7	5	9	10	16	24	10	15	13	8	10,8
Kamenná	6	12	11	10	9	10	11	12	12	12	22	17	12
Příbram - Sázky	5	8	11	10	12	13	18	28	18	17	9	9	13,2
Lešetice	<5	6	8	7	12	11	22	22	11	17	11	6	11,5
Háje	<5	5	<5	5	5	<5	5	5	7	7	5	5	5,3
Bytíz	<5	5	5	<5	5	5	6	7	6	9	6	7	5,9
Narysov - na Výfuku (pozadí)	5	5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	7	7	<5	5,3

Příloha VI: Závod Rožná I [vlastní]



Příloha VII: Závod Chemická úpravna, v pozadí odkaliště K 1 [vlastní]

