

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Kontaminace životního prostředí beryliem**

**Bakalářská práce**

**Adéla Krausová**

**Veřejná správa v zemědělství a krajině**

**Prof. Ing. Daniela Pavlíková, CSc.**

© 2024 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Kontaminace životního prostředí berylliem" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 24.04.2024

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala prof. Ing. Daniele Pavlíkové, CSc. za odborné vedení, rady, podněty a připomínky k mé bakalářské práci a za ochotu a čas, který mi věnovala.

# Kontaminace životního prostředí berylliem

## Souhrn

Bakalářská práce se zabývala shrnutím dostupných zdrojů a informací o berylliu a kontaminaci životního prostředí tímto prvkem.

Beryllium i jeho sloučeniny jsou toxické a Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny považuje beryllium a jeho sloučeniny jako karcinogeny pro člověka. Americká agentura pro ochranu životního prostředí považuje beryllium za pravděpodobný lidský karcinogen, Národní toxický program uvedl, že lze důvodně považovat beryllium za karcinogen a Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2004/37/ES ze dne 29. dubna 2004 o ochraně zaměstnanců před riziky spojenými s expozicí karcinogenům nebo mutagenům při práci klasifikuje beryllium jako karcinogen 1B, což znamená, že má beryllium karcinogenní a mutagenní potenciál pro člověka na základě údajů z pokusů na zvířatech.

Dle dostupných publikací jsou hlavními zdroji kontaminace berylliem v životním prostředí těžba a další antropogenní činnosti. V České republice proto byly stanoveny emisní limity beryllia, které se řídí vyhláškou 356/2002 Sb. Ministerstva životního prostředí ze dne 11. července 2002, kterou se stanoví seznam znečišťujících látek, obecné emisní limity, způsob předávání zpráv a informací, zjišťování množství vypouštěných látek, tmavosti kouře, přípustné míry obtěžování zápachem a intenzity pachů, podmínky autorizace osob, požadavky na vedení provozní evidence zdrojů znečišťování ovzduší a podmínky jejich uplatňování. Emise produkované zvláště velkými, velkými a středními stacionárními zdroji jsou z důvodu možné kontaminace zpoplatněny.

Beryllium je pro člověka nebezpečné při dlouhodobé expozici vdechováním. Dlouhodobá expozice může vést až k rozvinutí chronického onemocnění berylliem, které se nazývá beryllióza. Proto se u pracovníků, kteří pracují s tímto prvkem, provádí preventivně test proliferace lymfocytů berylliem, který je dle Smitha et al. (2018) jedním z kroků při diagnostice berylliózy. Z důvodu možné kontaminace byly po celém světě stanoveny limity maximální expozice při práci.

Beryllium se v České republice vyskytuje převážně v pegmatitech a bylo zjištěno, že byla atmosférická depozice beryllia z důvodu těžby hnědého uhlí v 80. letech v Čechách třikrát vyšší než na severovýchodě USA. Těžba uhlí zůstává v České republice hlavním důvodem



kontaminace. Problémem je také obsah beryllia v zemědělských půdách, který byl v letech 1998 – 2018 překročen v několika krajích České republiky.

V Plzeňském kraji nebyly zjištěny překročené limity v půdě, ani v pitné vodě a největším rizikem kontaminace by byla těžba berylu, který se v Plzeňském kraji nachází. Těžba berylu se však v České republice neprovádí, a proto zůstává největším rizikem vnik beryllia do prostředí ze společností, kde je s berylliem manipulováno.

**Klíčová slova:** beryllium, kontaminace, toxicita

# **Environmental contamination with beryllium**

## **Summary**

The bachelor thesis dealt with a summary of available sources and information on beryllium and environmental contamination by this element.

Beryllium and its compounds are toxic and the International Agency for Research on Cancer considers beryllium and its compounds as carcinogens to humans. The U.S. Environmental Protection Agency considers beryllium to be a probable human carcinogen, the National Toxicology Program has stated that beryllium can reasonably be considered a carcinogen, and Directive (EU) 2004/37/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens or mutagens at work classifies beryllium as a 1B carcinogen, meaning that beryllium has carcinogenic and mutagenic potential for humans based on animal experimental data.

According to available publications, the main sources of beryllium contamination in the environment are mining and other anthropogenic activities. In the Czech Republic, therefore, emission limits for beryllium have been set, which are governed by Decree 356/2002 Coll. of the Ministry of the Environment of 11 July 2002, which establishes a list of pollutants, general emission limits, the method of reporting and information, the determination of the amount of emitted substances, the darkness of smoke, the permissible level of odour nuisance and the intensity of odours, the conditions for authorising persons, the requirements for keeping operational records of air pollution sources and the conditions for their application. Emissions from particularly large, large and medium-sized stationary sources are subject to a charge because of possible contamination.

Beryllium is hazardous to humans through prolonged exposure by inhalation. Long-term exposure can lead to the development of a chronic beryllium disease called berylliosis. Therefore, as a precautionary measure, beryllium lymphocyte proliferation test is performed on workers who work with this element, which according to Smith et al. (2018) is one of the steps in the diagnosis of berylliosis. Because of potential contamination, maximum occupational exposure limits have been set worldwide.

Beryllium is mainly found in pegmatites in the Czech Republic and it has been found that atmospheric deposition of beryllium due to lignite mining in the 1980s was three times higher in the Czech Republic than in the northeastern USA. Coal mining remains the main cause

of contamination in the Czech Republic. The beryllium content in agricultural soils is also a problem, which was exceeded in several regions of the Czech Republic between 1998 and 2018.

In the Pilsen Region, no exceeded limits were found in soil or drinking water and the biggest risk of contamination would be beryllium mining, which is located in the Pilsen Region. However, beryllium mining is not carried out in the Czech Republic and therefore the biggest risk remains the introduction of beryllium into the environment from companies where beryllium is handled.

**Keywords:** beryllium, contamination, toxicity

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Cíl práce.....	11
3	Historie beryllia.....	12
4	Popis beryllia .....	13
4.1	Zdroje beryllia .....	13
4.1.1	Beryl.....	14
4.1.2	Bertrandit .....	15
4.2	Chemické vlastnosti beryllia .....	15
4.3	Fyzikální vlastnosti beryllia .....	16
5	Výroba a použití beryllia.....	18
5.1	Výroba beryllia.....	18
5.2	Použití beryllia.....	18
6	Jednoduché sloučeniny beryllia .....	21
	Oxid berylnatý .....	21
	Nitrid berylnatý .....	21
	Sulfid berylnatý .....	22
	Hydrid berylnatý .....	22
	Hydroxid berylnatý .....	22
	Fluorid berylnatý .....	22
	Chlorid berylnatý .....	23
	Bromid berylnatý a jodid berylnatý .....	23
	Uhličitan berylnatý.....	23
7	Dopady beryllia na zdraví člověka .....	24
7.1	Toxicita pro člověka .....	24
7.2	Chronické onemocnění (beryllióza).....	25
7.3	Limitní hodnoty expozice na pracovišti .....	26
7.4	BeLPT (test proliferace lymfocytů beryliem) .....	27
8	Ochrana a prevence před kontaminací beryliem .....	28
9	Výskyt beryllia v přírodě a jeho dopady na životní prostředí .....	33
9.1	Beryllium ve vzduchu .....	33
9.2	Beryllium ve vodě.....	34
9.3	Beryllium v půdě .....	34
9.4	Zdroje znečištění ve střední Evropě a v České republice.....	35

<b>9.5 Zdroje znečištění na Plzeňsku.....</b>	<b>37</b>
<b>10 Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>11 Literatura.....</b>	<b>40</b>

# 1 Úvod

Beryllium je prvek, který se objevil již při vzniku vesmíru při prvotní nukleosyntéze. V periodické tabulce je řazen v 2. periodě a v II. A skupině, a zařazuje se tak mezi kovy alkalických zemin. V přírodě se tento prvek vyskytuje pouze ve sloučeninách.

Beryllium je kov s jedinečnými vlastnostmi, díky nimž je užitečný pro řadu aplikací od spotřebních výrobků, jako jsou mobilní telefony, až po součástky jaderných zbraní. Tyto unikátní vlastnosti ztěžují hledání alternativ k berylliu a zajišťují, že se bude používat i v dohledné budoucnosti. Nicméně může u některých osob expozice částic beryllia na pracovišti vést k senzibilizační reakci (Brisson & Ekechukwu 2009).

## **2 Cíl práce**

Cílem mé práce je vypracování podrobné rešerše, která se zaměřuje na kontaminaci životního prostředí beryliem, jeho popis, vlastnosti, zdroje, použití a působení na člověka a ovzduší. Dále je práce zaměřena na výskyt tohoto prvku v prostředí, hlavní zdroje kontaminace v České republice, a to především na Plzeňsku a zhodnocení této kontaminace.

### 3 Historie beryllia

Beryl ve své nejčistší formě byl znám již ve starověku a byl považován za drahý kámen. Byl nalezen v nejstarších známých smaragdových dolech, které byly objeveny přibližně roku 1650 př. n. l. Uvádí se, že se doly nacházely v egyptském pohoří Zabarah, které se nachází jižně od města Kosseir. Smaragdový beryl má zelenou barvu, což je důsledkem obsahu nečistot  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Walsh 2009).

C. Plinius Secundus spatřoval hodnotu smaragdu v nesrovnatelné zelené barvě tohoto minerálu, která se co do intenzity nedá srovnat s žádnou jinou. Toto dělá ze smaragdu jediný ze všech vzácných drahokamů, po jehož spatření se oči nikdy neunaví. Zcestovalý čínský poutník FA:-HIEN zmiňoval smaragd mezi sedmi drahými minerály (Saptaratna), které se používaly k výzdobě chrámů a soch Buddhy (Meyer 1969).

Beryllium objevil v roce 1797 francouzský chemik Nicolas-Louis Vauquelin. Francouzský fyzik René-Just Haüy ho požádal, aby zjistil, zda smaragd a minerál beryl jsou totožné. Haüy vyvinul matematickou teorii minerálů založenou na úhlech mezi fasetami krystalů. Úhly faset a schopnost smaragdu a berylu rozdělit paprsek světla na dva paprsky naznačovaly, že oba minerály jsou stejné (Adair 2007). Redakce *Annales de Chimie et de Physique* navrhla pojmenovat beryllium glucin (řecky sladký), protože jeho ve vodě rozpustné soli měly sladkou chuť, a protože byl tento název snadno zapamatovatelný (Grew 2002). Při nezávislých pokusech Wohlera a Bussyho v roce 1828 byla kovová forma izolována redukcí chloridu draselného v platinovém kelímku. Wohler prvek pojmenoval beryllium, symbol Be, zatímco Bussy použil glucinium. Spory o název a symbol pokračovaly až do roku 1957, kdy byl název beryllium oficiálně uznán Mezinárodní unií pro čistou a užitou chemii (IUPAC) (Floyd & Lowe 1979).

Slitiny beryllia byly poprvé použity v USA v roce 1932, kdy společnost American Brass Company poprvé vyfrézovala beryliovou měď z hlavní slitiny. V důsledku druhé světové války a s ní spojené poptávky po strojním vybavení a zobrazovacích přístrojích bylo zapotřebí mnohem více berylliové mědi než kdykoliv předtím. Společnost Brush Beryllium Company byla první, kdo začal kovové beryllium vyrábět a prodávat. Dlouhou dobu byla jedinou aplikací konstrukce výstupních okének (berylliových destiček) rentgenek, protože beryllium vykazovalo značnou propustnost pro elektromagnetické záření. Tato aplikace existuje dodnes (Nagel 2017).



## 4 Popis beryllia

Beryllium (atomové číslo 4) je lehký kov (hustota  $1,85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) s vysokým bodem tání ( $1287 \text{ }^\circ\text{C}$ ), tuhostí (Youngův modul  $287 \text{ GPa}$ ) a tepelnou vodivostí. Tyto vlastnosti činí beryllium vysoce žádanou složkou pro širokou škálu aplikací (Brisson & Ekechukwu 2009).

V zemské kůře se odhaduje obsah beryllia na 2-5 dílů na milion (ppm) celkově, přičemž specifické horniny mají až 15 ppm. Pro extrakci beryllia je důležitým minerálem hlinitokřemičitan berylnatý, beryl ( $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ) a křemičitan berylnatý, bertrandit [ $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ ] (Brisson & Ekechukwu 2009).

### 4.1 Zdroje beryllia

Nejvyšší obsah beryllia je v minerálech beryl a helvit a také v minerálu bertrandit. Dle Grewa & Hazena (2014) je popsáno 112 minerálů s Be jako esenciálním prvkem. Některé z těchto minerálů uvádím v tabulce 1.

Pro ekonomickou extrakci se považuje za nezbytný obsah BeO 10 % beryllia z berylu a z bertranditových rud. Bertranditové rudy jsou stále považovány za komerčně využitelný zdroj beryllia, a to z důvodů velkých zásob, povrchové těžby a skutečnosti, že beryllium může být extrahováno loužením v kyselině sírové. Ve skutečnosti se většina beryllia nyní získává z bertranditu (EPA 2021).

Název	Chemický vzorec	Koncentrace, wt% Be
Beryl	$3\text{BeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$	5,0
Bertrandit	$4\text{BeO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$	15,2
Euklas	$2\text{BeO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$	6,2
Chrysoberyl	$\text{BeO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	7,0
Fenakit	$2\text{BeO}\cdot \text{SiO}_2$	16,2
Helvín	$3\text{BeO}\cdot 3[\text{Fe},\text{Zn},\text{Mn}]\text{O}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot \text{MnS}$	4,6
Epididymit	$2\text{BeO}\cdot \text{Na}_2\text{O}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ , rh	3,6
Eudidymit	$2\text{BeO}\cdot \text{Na}_2\text{O}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ , mon	3,6
Trimerit	$3\text{BeO}\cdot \text{CaO}\cdot 2[\text{Mn},\text{Fe},\text{Mg}]\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$	6,1
Gadolinit	$2\text{BeO}\cdot \text{FeO}\cdot \text{Y}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	3,6
Berylonit	$\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{BeO}\cdot \text{P}_2\text{O}_5$	7,2
Herderit	$\text{Be}[\text{F},\text{OH}]\cdot \text{PO}_3\text{CaO}$	5,0
Leukofán	$[\text{BeF}]\text{NaO}\cdot \text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$	3,7
Melifán	$2\text{BeO}\cdot 2\text{CaO}\cdot \text{NaF}\cdot 3\text{SiO}_2$	4,6
Hambergit	$4\text{BeO}\cdot \text{B}_2\text{O}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$	19,1
Rhodizit	$4\text{BeO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{B}_2\text{O}_3\cdot 5[\text{Cs},\text{Rb},\text{K},\text{Na},\text{Li},\text{H}]\text{O}$	3,6
Danalit	$\text{BeO}\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 5[\text{Fe},\text{Zn},\text{Mn}]\text{O}\cdot [\text{Fe},\text{Zn},\text{Mn}]\text{S}$	5,0
Alvit	$\text{BeO}\cdot \text{ZnO}\cdot \text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$	...
Bityit	$7[\text{Be},\text{Ca},\text{H}_2]\text{O}\cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	...
Bromellit	BeO	36,0
Barylit	$2\text{BeO}\cdot \text{BaO}\cdot 2\text{SiO}_2$	5,6
Milarit	$4\text{BeO}\cdot \text{K}_2\text{O}\cdot 4\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 24\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$	...
Kolbeckit	K, Be, F silikáty	3,1

Tabulka 1: Minerály beryllia (Walsh 2009)

### 4.1.1 Beryl

Čistý beryl,  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ , je vodově čirý a bezbarvý, ale existuje velká barevná rozmanitost v přírodních krystalech. Nejčastější názvy odrůd podle barvy jsou goshenit (bezbarvý až bílý), akvamarín (namodralý až zelenomodrý), heliodor (žlutavý až oranžově nebo zelenavě žlutý), morganit nebo vorobjevit (růžový) a maxix (tmavě modrý, na denním světla bledne) (Gaines 1976). V mnoha případech lze barvu berylu měnit, a to bělením, nebo indukovaným tepelným zpracováním, nebo ozařováním, jak uvádí Sinkankas (1989). Berylová ruda je za normálních podmínek při atmosférickém tlaku chemicky inertní materiál, ale při zvýšených teplotách může být atakována komerčně dostupnými surovinami. Beryl je pegmatitový minerál rozšířený po celém světě, který se obvykle vyskytuje ve formě hexagonálních krystalů (Hausner 1965).

V současnosti je beryl jediným průmyslově významným minerálem obsahujícím beryllium. Obsahuje až 5 wt%. Be a byl nalezen v komerčně přijatelné formě v mnoha pegmatitech. Ty se však nacházejí na malém zlomku 1 % zemské kůry a jen zřídka obsahují více než 1 wt% berylu. Vzhledem k nepravidelnému a řídkému rozšíření berylu je obtížné odhadnout jeho zásoby a těžba bývá nákladná, pokud není možné současně těžit i jiné nerosty a nést tak část nákladů. Při zvětrávání pegmatitů zůstává mnoho minerálů, z nich se skládají, neporušeno a těžší látky jako je monazit, cín, minerály wolframu a columbit-tantalit, se mohou koncentrovat ve zbytkovém plášti nebo být transportovány do ložisek. Beryl se však z ložisek nezískává, protože se snadno láme a je lehký. Ačkoliv se obsah beryllia může znovu objevit jako součást jiných sekundárních minerálů, jako je bertrandit, herderit nebo beryllonit, žádný z těchto minerálů není dostatečně těžký na to, aby mohl být oddělen třídícím účinkem proudů nebo jinými přírodními koncentračními činiteli. Proto je beryllium příliš zředěné, aby mohlo být komerčně získáno z ložisek nánosů (Walsh 2010).

Beryl se v České republice vyskytuje v pegmatitech v okolí Písku, u Otova a Meclova, v Lázních Kynžvart, Maršíkově (Střelecký důl), Nové Vsi u Českého Krumlova, Jeclově a Puklici (Vávra et al. 2013).

..

### 4.1.2 Bertrandit

Bertrandit je minerál hydroxidu sorosilikátového beryllia o složení  $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ . Bertrandit je bezbarvý až světle žlutý orthorhombický minerál s tvrdostí 6-7. Běžně se vyskytuje v pegmatitech bohatých na beryl a je částečně alternací berylu. Bertrandit se často vyskytuje jako pseudomorfní náhrada berylu a spolu s berylem jsou rudami beryllia (LUMITOS 2023).

Bertrandit se v České republice vyskytuje v pegmatitech, a to v lokalitách Písek (U Obrázku), Horní Novosedly, Rudolfov, Maršíkov (Střelecký důl), Lázně Kynžvart a Rožná (Vávra et al. 2013).

## 4.2 Chemické vlastnosti beryllia

Čisté beryllium je poměrně stabilní a mírně bledne při pokojové teplotě na suchém vzduchu a čistém kyslíku. Když je jemně namleté a foukané do plamene, hoří brilantní scintilací. Sloučeniny beryllia mají sladkou chuť, což odpovídá názvu glucinum nebo glucinium, který byl poprvé použit pro tento prvek. Když je beryllium zahříváno na vzduchu, je tenké a vzniká téměř neviditelná oxidová vrstva, podobně jako u oxidů hliníku. Tato vrstva chrání kov (Walsh 2009).

Chemické vlastnosti beryllia jsou dány elektronovou konfigurací izolovaného atomu, v níž jsou dva valenční elektrony 2s mimo zaplněnou slupku 1s, takže jeho normální oxidační stav je Be(II). Elektrony 2s nejsou dobře chráněny před jaderným nábojem, protože vnitřní slupku tvoří pouze dva elektrony 1s. To vede k charakteristicky vysokému ionizačnímu potenciálu a malému iontovému poloměru, který je tak extrémní, že prvek je nakloněn spíše tvorbě kovalentních než iontových vazeb a kationtový poloměr je dostatečně malý, aby podporoval čtyřnásobnou koordinaci (Talbot & Talbot 2018). Vzhledem ke své vysoké reaktivitě se beryllium nenachází v přírodě jako volný kov. Beryl je znám již od starověku ve formě drahých kamenů: smaragd (zelený), akvamarín (světle modrý) a beryl (žlutý) (ATSDR 2002b).

Beryl reaguje s hexafluorokřemičitanem sodným za vzniku fluoridu berylnatého, který je rozpustný ve vodě. Z fluoridu může být vysráženo beryllium jako hydroxid berylnatý úpravou pH na 12, nebo může být získáno redukcí fluoridu s hořčíkem. U bertranditu se rudný koncentrát louží kyselinou sírovou; extrakcí rozpouštědlem síranových roztoků nakonec vznikne hydroxid berylnatý. V roce 2007 byla aktivní těžba především ve Spojených státech,

Číně a Mosambiku, v menším množství pak také v jiných zemích (Brisson & Ekechukwu 2009).

### 4.3 Fyzikální vlastnosti beryllia

Beryllium, symbol Be, je ocelově šedý, lehký a tvrdý kovový prvek. Jeho hlavní užitečnou vlastností je schopnost kalit a zpevňovat jiné kovy. Měrná hmotnost beryllia je  $1,846 \text{ g.cm}^{-3}$ , teplota tání  $1\,285 \text{ }^\circ\text{C}$  a tvrdost 6 až 7 Mohsovy stupnice. Atomové číslo beryllia je 4, jeho atomová hmotnost je 9,02 a mezi prvky se sudým atomovým číslem je jedinečné tím, že má jediný stabilní izotop (Bureau of Mines 1953).

Beryllium si je podobné s hliníkem ve vlastnostech, které uvádí Jursík (2002):

1. oba kovy se působením konc.  $\text{HNO}_3$  pokrývají vstvičkou oxidu,
2. Be i Al se rozpouštějí v hydroxidech za vývoje vodíku,
3. mají shodné elektronegativity ( $\chi_{\text{Al}} = 1,61$ ),
4. beryllnaté i hlinité soli podléhají hydrolýze,
5. halogenidy se chovají jako Lewisovy kyseliny,
6. halogenidy beryllnaté jsou polymerní,  $\text{AlCl}_3$  je dimerní,
7. beryllium projevuje silný sklon k tvorbě kovalentních vazeb.

Beryllium se standardně vyskytuje v těsně zabalené hexanohické (*hcp*) krystalické formě, označované jako  $\alpha$ -beryllium, na rozdíl od  $\beta$ -beryllia, které je v tělesově centrované kubické formě, která je stabilní mezi  $1\,250 \text{ }^\circ\text{C}$  a bodem tání  $1\,287 \text{ }^\circ\text{C}$  (Walsh 2010).

Fyzikální a chemické vlastnosti beryllia a jeho vybraných sloučenin jsou uvedeny v tabulce 2.

Vlastnosti beryllia							
	CAS No.	Molekulární vzorec	Atomová hmotnost	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Bod tání (°C)	Bod varu (°C)	Rozpustnost ve vodě
<b>Beryllium</b>	7440-41-7	Be	9,012	1,846 (20°C)	1 287	2 970	Nerozpustné
<b>Fluorid berylnatý</b>	7787-49-7	BeF <sub>2</sub>	47,01	1,986 (25°C)	555	1 175	Extrémně rozpustný
<b>Chlorid berylnatý</b>	7787-47-5	BeCl <sub>2</sub>	79,93	1,899 (25°C)	405	520	Velmi rozpustný
<b>Oxid berylnatý</b>	1304-56-9	BeO	25,01	3,01 (20°C)	2 530	3 787	Velmi málo rozpustný (0,2)
<b>Hydroxid berylnatý</b>	13327-32-7	Be(OH) <sub>2</sub>	43,03	1,92 (20°C)	Při dehydrataci se rozkládá	ND	Mírně rozpustný
<b>Síran berylnatý (bezvodý)</b>	13510-49-1	BeSO <sub>4</sub>	105,07	2,443 (20°C)	550-600 Rozklad	ND	Nerozpustný ve studené vodě, v horké vodě se mění na tetrahydrát
<b>Síran berylnatý (tetrahydrát)</b>	77787-56-6	BeSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	177,14	1,713 (10,5°C)	100 Ztrácí 2H <sub>2</sub> O	400 Ztrácí 4H <sub>2</sub> O	Extrémně rozpustný (3,91 x 10 <sup>5</sup> )
<b>Dusičnan berylnatý</b>	13597-99-4	Be(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	187,07	1,557	60	142	Velmi rozpustný
<b>Uhlíčan berylnatý</b>	13106-47-3	BeCO <sub>2</sub> +Be(OH) <sub>2</sub>	112,05	ND	ND	ND	Nerozpustný ve studené vodě, v horké vodě se rozkládá
<b>Fosforečnan berylnatý</b>	35089-00-0	Be <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	271,03	ND	ND	ND	Rozpustný

\*ND= Nejsou data

**Tabulka 2:** Fyzikální a chemické vlastnosti beryllia a vybraných sloučenin beryllia (Bruce & Odin 2011).

## 5 Výroba a použití beryllia

Tabershaw (1972) uvádí některá průmyslová odvětví, v nichž se vyrábí a zpracovává beryllium a jeho sloučeniny. Tato odvětví jsou těžba a zušlechťování minerálů beryllia, extrakce beryllia, výroba slitin, metalurgický provoz, výroba fosforu, beryliové keramické výrobky, výroba elektronických zařízení, slévárenské výrobky z neželezných kovů, speciální vybavení v letectví a kosmonautice, výroba nástrojů a matric, speciální chemikálie a obrábění a výroba slitin beryllia.

Výroba a použití beryllia v různých aplikacích přispěly k jeho uvolňování do životního prostředí prostřednictvím likvidace odpadů. Emise Be do ovzduší z výroby a zpracování se odhadují na přibližně 8,9 tuny ročně, což představuje přibližně 4,4 % celkových emisí Be do ovzduší ze všech zdrojů (Bolan et al. 2023).

### 5.1 Výroba beryllia

Kovové beryllium se vyrábí tak, že se vezme přibližně 96 % technického kovu, rozdrť se na prášek a tvaruje se práškovou metalurgií. Výsledný produkt je sice přijatelný z hlediska jaderné čistoty, ale kvůli vysokému obsahu strusky je horší než kovové odlitky odlévané ve vakuu (U. S. Atomic Energy Commission 1950). Čisté, vakuově odlévané ingoty se obráběním přemění na třísky a ty se rozemelou na prášek v inertní atmosféře. Prášek se zhutní do hustých, jemnozrnných těles, obvykle lisováním za tepla ve vakuu (Petkof 1979).

### 5.2 Použití beryllia

Beryllium je v průmyslu široce využíváno ve třech základních formách: jako kov (33 %), jako slitiny Be (50 %), jako ostatní slitiny (10 %) a jako BeO (5 %) (Fishbein 1981).

V roce 1998 se začalo používat beryllium (jako slitina, kov nebo oxid) v elektronických a elektrických součástkách, v letectví, kosmonautice a v obraně představovalo více než 80 % jeho spotřeby (Cunningham 1999). Kovové beryllium se používá v kotoučových brzdách letadel, rentgenových přenosových oknech, optice vesmírných vozidel a přístrojích, konstrukcích letadel/satelitů, naváděcích systémech raket a neutronových odražečích jaderných reaktorů, spouštěcích zařízeních jaderných hlavic, palivových kontejnerech, přesných přístrojích, raketových palivech, navigačních systémech, tepelných štítech, zrcadlech, vysokorychlostních počítačích a zvukových komponentech a mnoha dalších. (ATSDR 2002b).

Oxid berylnatý se používá ve vysoce technologické keramice, elektronických chladičích, elektrických izolátorech, součástkách mikrovlnných trub, gyroskopech, pancířích vojenských vozidel, kelímcích raketových trysek, termočláncích, trubičkách, laserových konstrukčních součástkách, substrátech pro elektrické obvody s vysokou hustotou, automobilových zapalovacích zařízeních a dalších zařízeních (ATSDR 2002b).

Slitiny beryllia a mědi se používají v široké škále aplikací díky svým elektrickým a tepelným vlastnostem, vodivosti, vysoké pevnosti a tvrdosti, dobré odolnosti vůči korozi a únavě a nemagnetické vlastnosti. Ze slitin beryllia a mědi se vyrábějí pružiny, elektrické konektory a relé, přesné přístroje, pouzdra a ložiska v letadlech a těžkých strojích, nejiskřící nástroje, pouzdra a čepy kabelů pro ponorky, kola a pastorky, spínače v automobilech, formy pro vstřikování plastů do formy plastů, radary, přístroje pro telekomunikace a automatizaci výroby, počítače, domácí spotřebiče, přístrojové a řídicí systémy, trubky pro ropná a vrtná zařízení, konektory pro optická vlákna, integrované obvody a mnoho dalších. (Ballance et al. 1978; Cunningham 1998; ATSDR 2002b).

Na základě průmyslového a strategického zájmu zařadila Evropská unie materiály Be a beryllium na seznam prvků s vysokým rizikem dodávek a vysokým hospodářským významem, které posilují těžební a recyklační činnost (Fernández-Caliani et al. 2020).

Mimo použití beryllia je také důležité se věnovat beryliovému odpadu.

Nejvýznamnější množství beryliového odpadu vzniká při metodách kontroly znečištění, jako je např. pevná fáze jako skrubry pevných částic. Vzhledem k tomu, že je beryllium cenný prvek, je nejžádanějším způsobem nakládání s ním recyklace berylliových odpadů u výrobců (ATSDR 2002b).

Agentura EPA klasifikovala práškové beryllium jako nebezpečný odpad (40 CFR, oddíl 261.33). Podle zákona o zachování a obnově zdrojů (RCRA) je nutné dodržovat požadavky na označování a likvidaci a získání povolení k vypouštění do ovzduší a vody. Normy EPA vyžadují, aby emise do ovzduší ze stacionárních zdrojů byly  $< 10$  g beryllia za 24 hodin a aby koncentrace beryllia v okolí stacionárních zdrojů byla  $< 0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pevný odpad s obsahem beryllia by měl být ukládán do nepropustných, zavřených pytlů nebo kontejnerů (např. sudů), které jsou označeny v souladu s požadavky předpisů EPA (ATSDR 2002b).

Dle Zákona č. 541/2020 Sb. (Zákon o odpadech) je beryllium z důvodu jeho vysoké toxicity zařazeno mezi nebezpečné odpady. Původci odpadu a provozovatel zařízení, kteří

nakládají s nebezpečným odpadem, jsou povinni zajistit, aby nebezpečné odpady byly označeny písemně způsobem a v rozsahu stanoveném vyhláškou ministerstva a výstražným symbolem nebezpečnosti podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1272/2008 v rozsahu stanoveném vyhláškou ministerstva. Tito původci a provozovatelé zařízení, kteří nakládají, s nebezpečným odpadem, jsou též povinni zpracovat identifikační list nebezpečného odpadu a místa nakládání s nebezpečným odpadem tímto listem vybavit.

V České republice se emisní limity beryllia řídí vyhláškou 356/2002 Sb. Ministerstva životního prostředí ze dne 11. července 2002, kterou se stanoví seznam znečišťujících látek, obecné emisní limity, způsob předávání zpráv a informací, zjišťování množství vypouštěných látek, tmavosti kouře, přípustné míry obtěžování zápachem a intenzity pachů, podmínky autorizace osob, požadavky na vedení provozní evidence zdrojů znečišťování ovzduší a podmínky jejich uplatňování. Dle této vyhlášky při hmotnostním toku emisí kovového beryllia a jeho sloučenin vyšším než 10 g/h nesmí být překročena úhrnná hmotnostní koncentrace 2 mg/m<sup>3</sup> této látky v odpadním plynu. V případě skupiny znečišťujících látek s obsahem beryllia nesmí tyto látky při hmotnostním toku emisí vyšším než 1 g/h překročit úhrnné množství koncentrace 0,2 mg/m<sup>3</sup> těchto znečišťujících látek v odpadním plynu. Emise beryllia jsou zpoplatněny Seznamem zpoplatňovaných znečišťujících látek vnášených do ovzduší a sazby poplatků za znečišťující látky produkované zvláště velkými, velkými a středními stacionárními zdroji. Dle tohoto seznamu je beryllium zpoplatněno částkou 20 000,- Kč/t.



## 6 Jednoduché sloučeniny beryllia

Beryllium má ve všech svých sloučeninách výhradně oxidační stav +2. Jak jemně dělený kov, tak rozpustné sloučeniny ve formě roztoků, suchého prachu nebo výparů jsou toxické (Hanusa 2024). Jednoduché sloučeniny a názvy minerálů uvádím v tabulce 3.

Jednoduché sloučeniny a názvy minerálů				
Nitridy	Nitrid berylnatý	Be <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	+2	
Sulfidy	Sulfid berylnatý	BeS	+2	
Selenidy	Selenid berylnatý	BeSe	+2	
Telluridy	Tellurid berylnatý	BeTe	+2	
Hydridy	Hydrid berylnatý	BeH <sub>2</sub>	+2	
Hydroxidy	Hydroxid berylnatý	Be(OH) <sub>2</sub>	+2	
Fluoridy	Fluorid berylnatý	BeF <sub>2</sub>	+2	
Chloridy	Chlorid berylnatý	BeCl <sub>2</sub>	+2	
Bromidy	Bromid berylnatý	BeBr <sub>2</sub>	+2	
Jodidy	Jodid berylnatý	BeI <sub>2</sub>	+2	
Oxidy	Oxid berylnatý	BeO	+2	
Uhličitany	Uhličitán berylnatý	BeCO <sub>3</sub>	+2	
Boritany	Boritan berylnatý	Be <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> OH	+2	Hambergit
Dusičnany	Dusičnan berylnatý	Be(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	+2	
Sírany	Síran berylnatý	BeSO <sub>4</sub>	+2	
Fosfáty	Fosfát berylnatý	Be <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	+2	
Křemičitany	Křemičitan berylnatý	Be <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	+2	Fenakit

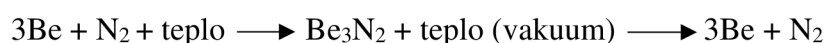
**Tabulka 3:** Jednoduché sloučeniny a názvy minerálů (Hudson Institute of Mineralogy 2023)

### Oxid berylnatý

V systému oxidů beryllia je znám pouze jeden oxid, BeO. Je to žáruvzdorná sloučenina s teplotou tání 2 550 °C a vysokou chemickou stabilitou (entalpie vzniku je 599 kJ). Oxid berylnatý vyniká vysokou tepelnou vodivostí, která zajišťuje tepelnou odolnost. Oxid berylnatý, pálený při 1 800 °C, je prakticky nerozpustný v kyselinách a nereaguje s tavenými kovy (Naboychenko et al. 2008).

### Nitrid berylnatý

Nitrid berylnatý má molekulový vzorec Be<sub>3</sub>N<sub>2</sub> a molekulovou hmotnost 55,0652 g / mol. Lze jej připravit z prvků při vysoké teplotě (1 100 – 1 500 °C). Be<sub>3</sub>N<sub>2</sub> se ve vakuu rozkládá na beryllium a dusík:



Je to bílý až žlutavý prášek o hustotě 2,71 g / cm<sup>3</sup>. Jeho bod tání je 2 208 °C a bod varu 2 240 °C (Ropp 2013).

## **Sulfid berylnatý**

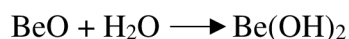
Sulfid berylnatý je bílá amorfni látka. Připravuje se zahříváním bezvodého chloridu se sírou sirovodíku nebo zahříváním karbidu berylnatého se sírou při vysoké teplotě (Prakash 2013).

## **Hydrid berylnatý**

Hydrid beryllia, BeH<sub>2</sub> je amorfni, bezbarvá, vysoce toxická látka polymerní pevná látka (H = 18,3 %), která je stabilní vůči vodě, ale hydrolyzuje se kyselinou. Je nerozpustný v organických rozpouštědlech, ale reaguje s terciárními aminy při 160 °C za vzniku stabilních aduktů (ECHEMI 2024).

## **Hydroxid berylnatý**

Hydroxid berylnatý má vzorec Be(OH)<sub>2</sub> a molekulární hmotnost 43,0268 g/mol. Přesněji je vzorec uváděn Be(OH)<sup>+</sup>OH<sup>-</sup>. Lze jej připravit reakcí oxidu s vodou:



Hydroxid berylnatý Be(OH)<sub>2</sub> je amfoterní hydroxid, který se rozpouští v kyselinách i zásadách. Průmyslově se vyrábí jako vedlejší produkt při extrakci kovového beryllia z rud „beryl“ a „bertrandit“. Když se k roztokům berylliových solí přidají zásady, vzniká α-forma (gel). Nechá-li se tato forma stát nebo vařit, vysráží se kosočtverečná β-forma (Ropp 2013).

## **Fluorid berylnatý**

Fluorid berylnatý je chemická sloučenina se vzorcem BeF<sub>2</sub>. Je to sloučenina beryllia s největším množstvím iontového charakteru (díky vysoké elektronegativitě fluoru), ale přesto ji mnoho chemiků nepovažuje za iontovou. Tento syntetický materiál je hlavním prekurzorem pro výrobu kovového beryllia, který se získává redukcí BeF<sub>2</sub> při teplotě 1 300 °C (LUMITOS 2023).

## **Chlorid berylnatý**

Chlorid berylnatý je nažloutlá krystalická anorganická sloučenina ostrého zápachu, která při zahřívání uvolňuje toxické výpary oxidů beryllia, kyseliny chlorovodíkové a dalších chlorovaných sloučenin (PubChem 2024). Je rozpustný v nepolárních organických rozpouštědlech, zatímco ostatní chloridy skupiny II jsou iontové a rozpouštějí se ve vodě. Rozpouštění chloridu v nepolárních rozpouštědlech dokládá jeho kovalentní charakter (Atkinson & Hibbert 2000).

## **Bromid berylnatý a jodid berylnatý**

Bromid berylnatý a jodid berylnatý,  $\text{BeBr}_2$  a  $\text{BeI}_2$ , se připravují reakcí par bromu nebo jódu s kovovým berylliem při teplotě 400 až 700 °C (930 až 1 390 °F). Nelze je připravit mokkými metodami. Ani jedna ze sloučenin nemá komerční význam a není známo ani žádné speciální využití (Walsh 2009).

## **Uhličitan berylnatý**

Uhličitan berylnatý má molekulový vzorec  $\text{BeCO}_3$  a molekulovou hmotnost 69,0211 g/mol. Uhličitan beryllia jsou méně stabilní než uhličitan hořčíku a snadno tvoří zásadité soli. To je způsobeno tím, že  $\text{Be}^{2+}$  ve spojení s molekulami vody přednostně tvoří hydroxykomplexy typu  $\text{Be}(\text{OH})^{3+}$  (Ropp 2013).

## 7 Dopady beryllia na zdraví člověka

### 7.1 Toxicita pro člověka

K expozici berylliem dochází při kontaktu s kůží, vdechováním aerosolů Be a konzumací potravin a pitné vody obsahující Be. Například při prvovýrobě kovového beryllia, který se používal v součástkách jaderných zbraní, se vyskytly případy těžké dermatitidy, což svědčí o dermální expozici. K expozici pracovníků berylliem může dojít při obrábění kovů, recyklaci beryllia ze slitin šrotu a při používání výrobků s berylliem. Absorpce beryllia probíhá převážně plicemi a beryllium se ukládá v organismu (Bolan et al. 2023). Pracovní expozice vysokou koncentrací rozpustných sloučenin beryllia může mít za následek akutní onemocnění již při vystavení relativně nízké koncentraci ( $0,5 \text{ mg/m}^3$ ). Karcinogenní potenciál beryllia a jeho sloučenin byl v posledním desetiletí hodnocen mnoha různými agenturami. Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (IARC 1993) klasifikuje beryllium a jeho sloučeniny jako karcinogeny pro člověka. Americká agentura pro ochranu životního prostředí (EPA 1998) považuje beryllium za pravděpodobný lidský karcinogen a Národní toxikologický program (NTP 1999, 2005) uvádí, že lze důvodně považovat beryllium za karcinogen (National Research Council of the National Academies 2008).

V České republice je beryllium hodnoceno na základě Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2004/37/ES ze dne 29. dubna 2004 o ochraně zaměstnanců před riziky spojenými s expozicí karcinogenům nebo mutagenům při práci. Dle této směrnice je beryllium klasifikováno jako karcinogen 1B a je zařazen na seznam CMD (klasifikace karcinogenů a mutagenů). Dle kategorie 1B se u beryllia předpokládá, že má karcinogenní potenciál pro člověka, což je převážně založeno na základě údajů z pokusů na zvířatech.

Sloučeniny beryllia byly pozitivně testovány v téměř 50 % studií genotoxicity provedených bez exogenní metabolické aktivace, ale ve většině bakteriálních testů byly bez genotoxických účinků. Chlorid berylnatý, dusičnan berylnatý, síran berylnatý a oxid berylnatý se ukázaly v Amesových testech a testech s *Escherichia coli* jako sloučeniny bez genotoxických účinků (National Research Council of the National Academies 2008).

## 7.2 Chronické onemocnění (beryllióza)

Chronické onemocnění berylliem (CBD) bylo poprvé popsáno v roce 1946 jako opožděná chemická pneumonitida u 17 pacientů, kteří pracovali ve výrobě zářivek. Tito pacienti trpěli úbytkem hmotnosti, dušností při fyzické námaze a kašlem asi 6 měsíců po první expozici. V roce 1962 byla detekována velmi vysoká koncentrace beryllia v plicních tkáních.

Beryllium je kov, jehož vdechování může být škodlivé. Účinky závisí na tom, jak moc a jak dlouho byl člověk berylliu vystaven. Při vdechování může beryllium poškodit plíce, pokud je vdechnuto velké množství rozpustných sloučenin beryllia (více než 1 mg beryllia na metr krychlový vzduchu  $1 \text{ mg/m}^3$ ). Tento stav se nazývá akutní berylliová nemoc. Poškození plic se může zhojit, pokud se expozice berylliem zastaví. Někteří lidé mohou být na beryllium citliví. Jedná se o tzv. přecitlivělost nebo alergii. Pokud se člověk stane citlivým (alergickým) na beryllium, může se u něj vyvinout imunitní nebo zánětlivá reakce. Reakce na malé množství beryllia (méně než  $1 \text{ mg/m}^3$ ) nezpůsobuje účinky u lidí, kteří nejsou na beryllium citliví. Když k tomu dojde, kolem beryllia se nahromadí bílé krvinky a vytvoří tak chronickou zánětlivou reakci zvanou granulomy (nejedná se o nádory). Tento stav se nazývá chronické berylliové onemocnění (CBD). Toto onemocnění se může objevit až dlouhou dobu po expozici berylliu (10-15 let) malým množstvím rozpustných nebo nerozpustných forem beryllia (větší než  $0,0005 \text{ mg/m}^3$ ). Pokud má člověk toto onemocnění, může se cítit slabý, unavený a mít potíže s dýcháním. Někteří jedinci, kteří mají CBD, mohou pociťovat nechutenství, úbytek hmotnosti a zmodrání rukou a nohou. Tento stav může v pokročilých případech vést ke zvětšení srdce a srdečnímu onemocnění. Krátkodobé onemocnění podobné zápalu plic i chronické onemocnění berylliem může být smrtelné. Úrovně expozice spojené s akutním nebo chronickým onemocněním berylliem jsou více než 100 000krát vyšší než běžná hladina beryllia v ovzduší. (ATSDR 2002a).

Akutní a chronická toxicita beryllia se projevuje velmi podobně jako jiná respirační onemocnění, mimo jiné to je plicní edém, chronická obstrukční plicní nemoc, astma, plicní embolie, zápal plic, chemická pneumonitida, plicní sarkoidóza, idiopatická plicní fibróza,

Na sympóziu s názvem Beryllium Sampling and Analysis v Nevadě (Ashley 2006) byly řešeny snahy o snížení expozice pracovníků berylliem prostřednictvím zdokonalených metod monitorování a vývoje standardních metodik.

### 7.3 Limitní hodnoty expozice na pracovišti

V USA byly původní limity expozice stanoveny na základě studií provedených koncem 40. let 20. stoletím komisí pro atomovou energii. V této době již byla prokázána existence CBD a potřeba ochrany proti ní, stejně jako akutní berylliové nemoci. Mimo to byly nahlášeny případy CBD u obyvatel v blízkosti berylliového závodu v Lorain ve státě Ohio. Původní návrh počítal s limitem maximální expozice  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , který měl chránit před akutním onemocněním (Brisson & Ekechukwu 2009)

V České republice a zemích Evropské Unie se limitní expozice na pracovišti řídí Směrnicí evropského parlamentu a rady (EU) 2019/983 ze dne 5. června 2019, kterou se mění směrnice 2004/37/ES o ochraně zaměstnanců před riziky spojenými s expozicí karcinogenům nebo mutagenům při práci. Tato limitní hodnota je pro 8hodinovou expozici stanovena na  $0,0002 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Přečasnými opatřeními je limitní hodnota stanovena na  $0,0006 \text{ mg}/\text{m}^3$  do 11. července 2026. Výzkumná služba Evropského parlamentu (EPRS) v roce 2018 zveřejnila předpokládaný počet zaměstnanců zasažených berylliem podle odvětví, tyto počty uvádím v tabulce 4.

Sektor	Předpokládaný počet zaměstnanců v EU vystavených působení beryllia BeST (Asociace pro vědu a technologie beryllia)	Předpokládaný počet zaměstnanců v EU vystavených působení beryllia (EU/USA)	Předpokládaný počet zaměstnanců v EU vystavených působení beryllia US-OSHA (Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci)	CAREX odhad počtu zaměstnanců v EU vystavených berylliui
Slévárny	1 276	5 099	10 205	2 620
Kovovýroba	4 878	19 491	27 225	5 743
Doprava	801	3 202	4 149	4 394
ICT	408	1 628	1 386	3 798
Specializovaná výroba	2 272	9 079	15 193	46 265
Zdravotnické přístroje	3 188	12 737	11 323	1 040
Sklářství	177	709	783	2 129
Laboratoře	410*	1 639*	2 556*	N/A
Recyklace	122*	487*	760*	N/A
<b>Celkem bez stavebnictví</b>	<b>13 532</b>	<b>54 071</b>	<b>73 580</b>	<b>65 989</b>
Stavebnictví	6 624*	26 469*	41 276*	490
<b>Celkem</b>	<b>20 156</b>	<b>80 540</b>	<b>114 856</b>	<b>66 479</b>

Poznámka: \* Na základě odhadovaného procenta zaměstnanců zasažených berylliem

**Tabulka 4:** Předpokládaný počet zaměstnanců zasažených berylliem podle odvětví (EPRS 2018)

## 7.4 BeLPT (test proliferace lymfocytů beryliem)

Test proliferace beryliových lymfocytů v krvi byl vyvinut jako in vitro klinický a lékařský screeningový test k identifikaci sulfidu berylnatého, který je jedním z kroků při diagnostice chronického onemocnění berylliem (Smith et al. 2018).

Vývoj a přijetí testu proliferace lymfocytů berylliem (BeLPT) v 80. letech 20. století umožnil identifikovat asymptomatické jedince, kteří byli senzibilizováni berylliem a měli buď chronickou beryliovou nemoc (CBD) nebo byli ohroženi rozvojem této nemoci. BeLPT byl hojně využíván pro dohled nad onemocněním berylliem pracovníků. Nesrovnalosti ve výsledcích testů BeLPT však vedly k tomu, že někteří lékaři vyžadovali více než jeden abnormální výsledek testů před tím, než jedince zařadili do kategorie „senzibilizovaný“. Při plánování testování komunity v USA, v okolí velkého beryliového výrobce svolala Agentura pro toxické látky a registr nemocí v USA odbornou komisi a požádala jednotlivé členy, aby poskytli své názory na to, jak nejlépe použít a interpretovat testování BeLPT (Dyer 2014).

Ministerstvo práce Spojených států amerických (DOL) zveřejnilo v lednu 2024 aktualizovaná kritéria pro stanovení citlivosti na beryllium, tato kritéria jsou:

- a. Jeden BeLPT nebo BeLTT (test transformace lymfocytů beryliem) provedený na buňkách krve nebo výplachu plic, který vykazuje abnormální nebo pozitivní nálezy
- b. Nebo tři hraniční BeLPT/BeLTT provedené na krevních buňkách, provedené v průběhu 3 let
- c. Nebo jeden beryliový epikutánní test, který vykazuje pozitivní reakci

Při BeLPT se v laboratoři vyšetřují bílé krvinky, tzv. lymfocyty, a oddělují se od ostatních krvinek. K malým skupinám těchto lymfocytů se poté přidá beryllium a další testovací látky. Pokud tyto lymfocyty reagují na beryllium specifickým způsobem, jsou výsledky testu „abnormální“. Pokud však lymfocyty na beryllium nereagují, výsledek testu je „normální“. Abnormální výsledek BeLPT není považován za onemocnění a také neznamená, že se u osoby s tímto výsledkem vyvine beryllióza (NSSP 2023).

## 8 Ochrana a prevence před kontaminací berylliem

V ovzduší jsou sloučeniny beryllia především nebezpečné ve formě prachových částic.

Dle publikace Národního institutu pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (NIOSH 2011) jsou doporučení pracovníků před vystavením částicím, výparům, mlhám nebo roztokům obsahujícím beryllium následující:

- Porozumění rizikům a dodržování všech správných postupů pro práci s berylliem včetně účasti na bezpečnostním školení.
- Prevence před inhalací beryllia:
  - dbát na to, aby prach, výpary a mlha z beryllia a roztoky a suspenze obsahující beryllium byly kontrolovány u jejich zdrojů.
  - používat ochranné pomůcky, pokud je doporučeno.
- Používání prostředků k ochraně pokožky:
  - to může zahrnovat nošení rukavic a oděvů vydaných společnostmi (s dlouhými rukávy a kalhotami) a sprchování po práci.
  - Neskladovat ani nekonzumovat potraviny, nápoje a tabákové výrobky a kosmetické přípravky v prostorách, kde se pracuje s berylliem.
  - Nepoužívat čisticí metody, které mohou vířit prach ve vzduchu (suché zametání, stlačený vzduch a další prostředky, které vytvářejí prach). Mezi vhodnější metody patří vysavače s HEPA filtrem nebo metody mokrého čištění, které nevytvářejí rozstřík nebo postřík.
- Zabránění tomu, aby prach a jiné kontaminující látky opustily pracovní prostory s berylliem v kůži, oděvu, obuvi a nářadí.
- Účast v lékařských preventivních programech na pracovišti, aby bylo možné identifikovat rizika související s pracovními úkoly a předcházet jim.
- Vyhledání lékařské pomoci v případě chronického kašle nebo dušnosti, které může ukazovat na berylliózu.
- Vyhledání lékařské pomoci při jakékoli vyrážce nebo nehojící se ráně nebo poranění.

Dále je v publikaci Národního institutu pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (NIOSH 2011) doporučeno zaměstnavatelům pracovníků vystavených částicím, výparům, mlze nebo roztokům obsahujících beryllium, přijmout následující opatření k ochraně pracovníků, dodavatelů a návštěv:



- Znat obsah beryllia ve všech materiálech na pracovišti. Výrobci nebo dodavatelé materiálů s obsahem beryllia vyšším než 0,1 % jsou povinni poskytnout tyto informace na webových stránkách výrobce a dále poskytnout bezpečnostní listy materiálů.
- Nahradit nebezpečné materiály, obsahující beryllium, kdykoliv je to možné.
- Minimalizovat počet pracovníků vystavených prachu, mlze, roztokům a suspenzím obsahujících beryllium.
- Instalovat, používat a dodržovat účinné technické kontroly procesů, při nichž vzniká beryllium a prach, výpary a mlha obsahující beryllium.
- Udržovat koncentrace beryllia v ovzduší co nejnižší, protože bezpečný expoziční limit beryllia nebyl stanoven.
- Monitorovat koncentrace beryllia v ovzduší, aby byla zdokumentována účinnost úsilí o snížení expozice v ovzduší.
- Informovat pracovníky o rizicích senzibilizace berylliem, chronického onemocnění berylliem, plicních chorob a rakoviny a také informovat o správných postupech při práci s berylliem a materiály obsahujícím beryllium.
- Omezit, aby se prach, výpary, mlhu, roztoky a suspenze obsahující beryllium dostaly mimo bezpečné pracovní prostory.
- Nepoužívat metody čištění, které mohou způsobit víření prachu ve vzduchu (suché zametání, stlačený vzduch a jiné pracovní ochranné prostředky). Místo toho používat vhodnější metody jako vysavače s HEPA filtry nebo metody mokrého čištění, které neprodukuje prach.
- Zabránit, aby prach z beryllia a další kontaminující látky opouštěly pracovní prostory s berylliem na kůži, oděvu, obuvi a nářadí.
- Identifikovat a vyčistit prostory, které mohly být kontaminovány berylliem před zavedením těchto opatření.
- Podle potřeby zavést vhodné ochranné prostředky dýchacích cest.
- Zavést prostředky na ochranu pokožky, aby byla kůže pracovníků chráněna před kontaminací prachem a roztoky beryllia:
  - Udržovat čistou pracovní plochu a pracovní prostory.
  - Zajistit pracovní rukavice, košile s dlouhými rukávy, dlouhé kalhoty a obuv, která zůstane na pracovišti.
  - Zajistit sprchy a převlékárny.

- Provádět lékařský dohled na senzibilizaci pomocí testu proliferace beryliových lymfocytů.
- Testovat pracovníky, kteří přicházejí do styku s prachem, mlhou, roztoky a suspenzemi obsahujícími beryllium:
  - identifikovat práce a procesy s vyšším rizikem, aby mohly být stanoveny priority preventivního úsilí a vyhodnoceny účinnosti při snižování rizika senzibilizace.
  - Zajistit, aby byli prostřednictvím dohledu identifikovaní senzibilizovaní pracovníci odesláni k lékařskému vyšetření, aby se zjistilo, zda mají chronické onemocnění berylliem a aby bylo možno stanovit radiografické a funkční plicní referenční hodnoty pro následné testování.

Dle Evropské agentury pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (OSHA 2020) jsou zaměstnavatelé ve státech Evropské unie povinni posoudit riziko expozice karcinogenům a posoudit preventivní opatření s přihlédnutím ke všem možným způsobům expozice a včetně skladování chemických látek a odpadů. Tyto údaje jsou povinni na požádání předložit úřadům.

Expozici zaměstnanců musí být zabráněno prováděním opatření ve stanoveném pořadí priorit (OSHA 2020). Tato preventivní opatření jsou:

- Odstranění je nejúčinnějším opatřením a lze ho dosáhnout změnou použité technologie nebo vlastnosti konečného produktu tak, aby použití karcinogenů nebylo potřeba.
- Měla by být provedena substituce nebezpečné látky nebo produktu bezpečnější látkou, výrobkem nebo postupem. Neměla by vést k dalším nebezpečím s nepřijatelnou úrovní rizika.
- Pokud není substituce technicky možná, použije zaměstnavatel uzavřený technologický systém.
- Pokud není uzavřený systém technicky možný, sníží zaměstnavatel expozici na minimum.
- Pokud existuje pro zaměstnance riziko, určené oblasti jsou přístupné pouze zaměstnancům, od kterých je z důvodu jejich pracovních povinností vstup vyžadován.
- Pokud je použit karcinogen, zaměstnavatel:
  - omezí množství karcinogenu;
  - udržuje počet exponovaných pracovníků co nejnižší;

- navrhne pracovní postupy pro minimalizaci uvolňování látek (tj. použití kolektivních preventivních opatření);
  - odstraní karcinogeny odtahem vzduchu u zdroje;
  - použije vhodné postupy k měření karcinogenů (zejména pro včasné odhalení abnormálních událostí nebo nehod);
  - používá individuální ochranná opatření, pokud kolektivní preventivní opatření nepostačují;
  - zřetelně označí rizikové prostory a používá vhodná upozornění a bezpečnostní značky;
  - pro skladování, manipulaci, přepravu a odstraňování odpadů používá uzavřené a zřetelně označené nádoby
- Expozice nesmí v žádném případě překročit limitní mezní hodnotu karcinogenu na pracovišti, pokud existuje.

Zaměstnavatel je též povinen zajistit zaměstnancům správnou hygienu pro minimalizaci rizika kontaminace. Opatření a podmínky musí být pro zaměstnance bezplatná a musí zahrnovat:

- zákaz jídla, pití a kouření v oblastech ohrožených kontaminací;
- zajištění vhodného ochranného oděvu a samostatných skladovacích míst pro pracovní i nepracovní oděvy;
- přístup k příslušným umývárnam a toaletám;
- dostupnost vhodných a dobře padnoucích, čistých, zkontrolovaných a udržovaných osobních ochranných pracovních prostředků uložených na dobře označeném místě.

Pokud jsou stanoveny úkoly, které mohou mít za následek dočasnou, plánovanou, vyšší expozici a tato práce je nevyhnutelná (např. údržba), musí zaměstnavatel projednávat se zaměstnanci či jejich zástupci vhodná preventivní opatření, která budou přijata za účelem minimalizace expozice a kontroly přístupu. Zaměstnavatelé musí o abnormálních expozicích ihned informovat zaměstnance či jejich zástupce. V postižené oblasti mohou pracovat pouze zaměstnanci s náležitou ochranou a nezbytným vybavením pro opravy. Expozice nesmí být stále a musí být minimalizovány. Musí být zavedeny plány pro řešení mimořádných situací v souvislosti s karcinogeny a musí být zajištěno odpovídající školení, pravidelný výcvik a nezbytné prostředky pro zásah (OSHA 2020).

Při hodnocení rizik musí zaměstnavatelé věnovat zvláštní pozornost ohroženým skupinám zaměstnanců:

- podle směrnice 94/33/ES o ochraně mladistvých pracovníků nesmí mladiství pracovníci pracovat za podmínek, které je vystavují karcinogenům;
- na základě směrnice 92/85/EHS o těhotných zaměstnankyních, musí zaměstnavatel posoudit veškerá rizika a případné účinky na těhotenství nebo kojení a přijmout vhodná opatření, například převést těhotnou nebo kojící zaměstnankyni na jinou pozici nebo jí poskytnout dovolenou;
- zaměstnancům, kteří mohou mít potíže s porozuměním jakémukoli poradenství nebo školení, jakou jsou migrující pracovníci nebo noví pracovníci;
- zaměstnancům provádějícím údržbu a pracovníkům pracujícím pro subdodavatele.

## 9 Výskyt beryllia v přírodě a jeho dopady na životní prostředí

Beryllium se dostává do vzduchu, vody a půdy v důsledku činnosti přírody a člověka. Emise ze spalování uhlí a ropy zvyšují hladinu beryllia ve vzduchu. Ve vzduchu se sloučeniny beryllia vyskytují většinou vázané na jemné prachové částice. Prach se poté usazuje na zemi a ve vodě a déšť se sněhem pomáhají při odstraňování beryllia ze vzduchu. Extrémně malé částice beryllia mohou zůstat ve vzduchu až 10 dní. Beryllium vstupuje do vodních toků z horninového podloží a půdy. Většina produktů z beryllia, které jsou antropogenního původu, pochází z průmyslových odpadů, odpadních vod a beryliového prachu z průmyslových činností. Většina beryllia ve vodě se usazuje na dně se sedimentem. Nerozpustné sloučeniny beryllia zůstávají v oceánských vodách několik stovek let, než se usadí na dně. Beryllium se přirozeně vyskytuje v půdě, nicméně z důvodu spalování uhlí, popelu ze spaloven a průmyslových odpadů se může množství beryllia v půdě zvýšit (ATSDR 2002a).

Ačkoliv se beryllium vyskytuje v přírodě, hlavním zdrojem jeho emisí do životního prostředí je spalování fosilních paliv (především uhlí), při kterém se do atmosféry uvolňují částice a popílek obsahující beryllium (National Cancer Institute 2022).

Jiwen et al. (2013) použili data z programu odběru vzorků povrchového ovzduší (SAPS) společnosti EML k analýze dlouhodobého trendu koncentrace izotopu beryllia  $^7\text{Be}$  na povrchu a k řešení možné korelace mezi tímto dlouhodobým trendem a klimatickými změnami, konkrétně změnami ve srážkách a teplotě. Uvedli tak údaje o koncentraci  $^7\text{Be}$  na 23 lokalitách celého světa, které pokrývají období více než 25 let.

Koncentrace izotopu  $^7\text{Be}$  na většině stanic vykazuje výrazně klesající trend, který potenciálně odpovídá statisticky významným změnám v přenosu  $^7\text{Be}$  z horních vrstev atmosféry do těchto míst. Byla rovněž pozorována slabá negativní korelace mezi koncentrací  $^7\text{Be}$  a množstvím srážek. Pro statistickou průkaznost tohoto trendu je však zapotřebí více údajů z reprezentativnějších lokalit po celém světě (Jiwen et al. 2013).

### 9.1 Beryllium ve vzduchu

Částice beryllia se do ovzduší uvolňují z přírodních i antropogenních zdrojů. Nejvýznamnějších přírodních zdrojem beryllia v atmosféře je větrem unášený prach (přibližně 95 %), zbytek tvoří vulkanická činnost. Hlavním antropogenním zdrojem atmosférického beryllia je spalování uhlí a topného oleje. Mezi další zdroje patří spalování komunálního odpadu, používání slitin beryllia a chemických látek (zahrnuje zpracování rudy, výrobu, využití

a recyklaci) a spalování pevného raketového paliva (WHO 2001; ATSDR 2002a). Okolní koncentrace atmosférického beryllia jsou obecně nízké. Na základě měření na 100 místech byla ve Spojených státech amerických zjištěna průměrná denní koncentrace nižší než 0,5 µg/m<sup>3</sup> (Jakubowski & Palczynski 2007). Atmosférické koncentrace beryllia v blízkosti závodu na zpracování beryllia jsou často vyšší než koncentrace naměřené jinde (IARC 1993; IARC 2012).

## 9.2 Beryllium ve vodě

Beryllium se dostává do vodních toků z opotřebení hornin a půdy. Většina beryllia, které je produktem lidské činnosti a dostává se do vodních toků, pochází z průmyslového vypouštění odpadních vod a z beryliového prachu ze vzduchu z průmyslových činností, který se usazuje ve vodě. Většina beryllia ve vodě se usazuje na dně se sedimentem. Nerozpustné sloučeniny beryllia zůstávají v oceánské vodě po dobu několika set let, než se usadí na dně oceánu (ATSDR 2002a).

V životním prostředí mohou chemické reakce měnit ve vodě nerozpustné sloučeniny beryllia na rozpustné formy. Expozice ve vodě rozpustným sloučeninám beryllia v životním prostředí obecně představuje větší hrozbu pro lidské zdraví než expozice ve vodě nerozpustným formám. Množství beryllia, které bylo naměřeno Agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA) v různých částech Spojených států, se pohybuje v rozmezí od nezjištěných hodnot po 2 µg/m<sup>3</sup>. Velmi malé prachové částice beryllia v ovzduší dopadají na povrch vody a povrch rostlin a půdy buď samy o sobě nebo při dešti či sněžení (ATSDR 2002a).

## 9.3 Beryllium v půdě

Údaje o osudu beryllia v životním prostředí jsou omezené. Vzhledem k tomu, že hlavním zdrojem atmosférického beryllia je spalování uhlí, je nejrozšířenější chemickou formou pravděpodobně oxid berylnatý, vázaný především na částice menší než 1 µm. Doba setrvání těchto v atmosféře je přibližně 10 dní (US EPA 1987). Beryllium se vrací na zem mokrou a suchou depozicí podobně jako u jiných kovů a částic srovnatelné velikosti (Kwapulinski & Pastuszka 1983; EPA 2005).

Reakce beryllia v roztoku a půdě závisí na pH. Při pH prostředí v rozmezí 4 až 8, je oxid berylnatý vysoce nerozpustný, což brání jeho mobilizaci v půdě. Beryllium je silně adsorbováno jemně rozptýlenými sedimentárními materiály včetně jílu, hydroxidů železa a beryllia (EPA 2005).

Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 153/2016 Sb. ze dne 9. května 2016 o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy a o změně vyhlášky č. 13/1994 Sb., kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu, jsou stanoveny preventivní hodnoty obsahů rizikových prvků a rizikových látek a indikačních hodnot obsahů rizikových prvků a rizikových látek v zemědělské půdě. Preventivní hodnoty obsahu beryllia v zemědělské půdě zjištěné lučavkou královskou ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  sušiny) byly u běžných půd (píščitohlinité, hlinité, jílovitohlinité a jílovité)  $2,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  a u lehkých půd  $1,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

## 9.4 Zdroje znečištění ve střední Evropě a v České republice

Obsah beryllia je jak v zemské kůře, tak v ekosystémech nízký (Ryan 2002). Obzvláště zajímavý je jeho kumulativní, dlouhodobý účinek při relativně nízkých koncentracích na živé organismy (Vesely et al., 2002).

Rozpustnost beryllia je silně závislá na pH. Při pH kolem 7 je beryllium špatně rozpustné, a proto je jeho biologická dostupnost ve většině ekosystémů považována za nízkou. Se snížením pH se Be stává rozpustnějším. Zde bylo porovnáno množství rozpustného, tj. biologicky dostupného a částicového Be v zimním období při atmosférické depozici ve střední Evropě. Pro účely této studie byla zřízena nová monitorovací síť ve vysoko položených pohraničních oblastech mezi pěti středoevropskými zeměmi, Českou republikou, Německem, Polskem, Slovenskem a Rakouskem. Všech 10 studijních míst se nachází na území České republiky, v jednom z nejhustěji osídlených a industrializovaných regionech Evropy, velmi blízko státních hranic. Centrálně plánované ekonomiky těchto národů (cca 1950-1989) byly orientované na těžký průmysl a vyznačovaly se zastaralou vědou o celém prostředí (Moldan & Schnoor 1992; Bohdálková et al. 2012).

Beryllium se používá jako vytvrzovací činidlo ve slitinách mědi, ale nejvíce malými bodovými zdroji znečištění jsou hutní provozy. Oproti tomu může povrchová těžba uhlí a jeho spalování v elektrárnách představovat velký regionální zdroj Be. Většina uhlí obsahuje  $<0,1 \text{ g Be}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Wedepohl 1969).

Koncentrace beryllia v Čechách jsou v měkkém hnědém uhlí extrémně vysoké (až  $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Bouška 1981).

V letech 1970 až 1990 byla Česká republika třetím největším producentem hnědého uhlí na světě (Erbanová et al. 2008). Seskupení 11 uhelných elektráren v severozápadní části země mělo instalováno filtry na odlučování prachu až v roce 1996 (Novák et al. 2010). Bezacinsky et al. (1984) uvedli, že atmosférická depozice beryllia v 80. letech byla v České republice třikrát

vyšší než na severovýchodě USA (Kráš et al. 1998; Skřivan et al. 2000; Navrátil et al. 2002). Depozice Be byla studována v otevřené oblasti a ve smrkovém podkosu na několika lokalitách v nízkých až středních nadmořských výškách. Atmosférické vstupy znečišťujících látek v horských oblastech mohou překročit depozici v sousedních nížinách několikrát (Berg et al. 1991). Ve vysokých nadmořských výškách může námraza dodávat značné množství znečišťujících látek v důsledku vysokorychlostního zakaleného proudění vzduchu a spojení mračen (Fišák et al. 2008).

Dle Práškové et al. (2020) byl nejvyšší obsah beryllia v běžných půdách v letech 1998-2018 zjištěn v Karlovarské kraji s maximální hodnotou  $17,7 \text{ mg.kg}^{-1}$ , druhý nejvyšší obsah beryllia byl pak zjištěn v kraji Ústeckém, kde byla hodnota  $12,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Maximální přípustnou hodnotu (MPH) pro obsah beryllia v běžných půdách ( $2,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) překročilo celkem 507 vzorků, z toho jich bylo nejvíce v Karlovarském kraji, 143 vzorků, a kraji Ústeckém, 94 vzorků.

Maximální obsah beryllia v lehkých půdách byl dle Práškové et al. (2020) zjištěn v letech 1998-2018 v Karlovarském kraji  $4,74 \text{ mg.kg}^{-1}$  a druhý nejvyšší v kraji Vysočina s hodnotou  $4,57 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Maximální přípustnou hodnotu pro obsah beryllia v lehkých půdách překročilo celkem 222 vzorků. Nejvíce jich bylo zjištěno v kraji Vysočina, 75 vzorků a v kraji Jihočeském, 62 vzorků.

K vyhodnocení zátěže jednotlivých pozemků je nutno přistupovat individuálně, se zřetelem na původ zátěže, půdní druh a způsob využívání pozemku, neboť zvýšené koncentrace rizikových prvků mohou být původu antropogenního či geogenního (Poláková et al. 2011).

Chládek et al. (2024) provedli studii beryllia metodami EPMA (elektronová mikroanalýza) a XRD (rentgenová prášková difrakce) v beryl-kolumbitovém pegmatitu D6e u Maršíkova. Studium mikrotextrur odhalilo komplexní tvorbu jemnozrnných sekundárních Be-silikátů na úkor primárního berylu a dřívějších sekundárních Be-minerálů. Beryl a produkty jeho rozpadu jsou v této oblasti běžnými minerály v beryl-kolumbitových granitových pegmatitech. Studované minerály byly odebrány z různých pegmatitových jednotek a jejich složení bylo analyzováno v režimu vlnové disperze a texturní vztahy mezi minerály v režimu zpětně odražených elektronů (BSE) byly studovány pomocí elektronové mikroanalýzy na katedře geologických věd v Brně. Bylo zjištěno, že v pegmatitových jednotkách jsou běžné prizmatické euhedrání až subhedrání krystaly berylu, které jsou lokálně spojeny s almandinem-spessartinem, zirkonem a kolumbitem. Albitizace jednotlivých jednotek a následné subsolidární změny způsobily rozpad primárního berylu na převážně jemnozrnná souvrství sekundárních Be-minerálů (sekundární beryl, bertrandit, fenakit, milarit, bavenit-bohseit), albit, K-živce, křemen, muskovit, gismondin-Ca, epidot a chamosit. Vysoké odchylky



byly zjištěny ve složení u řady bavenit-bohseit, mírné u berylu, zatímco bertrandit, fenakit a milarit byly blízké svým ideálním vzorcům. Primární a sekundární beryl se lišil svým chemickým složením. Texturní údaje o složení naznačili složité procesy subsolidárního rozkladu primárního magmatického berylu, které byly umožněny vnitřními reziduálními a vnějšími kapalinami během několika geologických fází, které vytvořily odlišné minerální soubory.

## 9.5 Zdroje znečištění na Plzeňsku

V minulosti bylo beryllium využíváno při výrobě komponentů a dílů automobilů v závodech Škoda v Plzni. Kvůli zdravotním rizikům spojeným s expozicí berylliem se jeho použití ve výrobě v průběhu let výrazně snížilo a bylo nahrazeno bezpečnějšími alternativami.

Výskyt beryllia ve vodě je vzácný, avšak může pocházet z lidské činnosti, nebo horninového podloží. Dle společnosti Vodárna Plzeň a.s. (2024) je koncentrace beryllia v pitné vodě v Plzni k únoru 2024 menší než 0,2 µg/l. Stejně hodnoty byly naměřeny i v předcházejících měsících i na ostatním místech Plzeňského kraje. Nejvyšší mezní hodnota pro výskyt beryllia v pitné vodě činní v České republice 2 µg/l. Dle této mezní hodnoty je koncentrace beryllia v Plzeňské kraji v posledním roce velmi nízká.

Nejdůležitějším minerálem s obsahem beryllia je beryl. V České republice se beryl v těžitelném množství vyskytuje na rozhraní Plzeňského a Jihočeského kraje, a to na Šumavě. Jednou z nejvýznamnějších lokalit z hlediska výskytu krystalů berylu je rovněž oblast Otovska a Meclovka nedaleko Poběžovic u Domažlic (Hlávka 2010). Riziko kontaminace však v této lokalitě není, neboť těžba berylu v České republice neprobíhá.

Největší hrozbou úniku beryllia na Plzeňsku jsou průmyslové podniky, které se zabývají produkcí a zpracováním beryllia.

Jako příklad společnosti, která využívá beryllium, uvádím Centrum výzkumu Řež s.r.o., kde se nachází experimentální zařízení HELCZA (High Load Czech Assembly), což je zařízení pro testování primární stěny fúzního reaktoru a cyklické testování materiálů vysokým tepelným tokem.

Tyto se zkoušky provádějí na součástech, které se částečně skládají z beryllia, přičemž zkoušky mohou vést k tvorbě prachových částic beryllia. Z tohoto důvodu je třeba zkoušky doprovázet monitorováním těchto částic. Přesná znalost jejich koncentrace slouží jako základ

pro vytvoření bezpečného pracoviště. Kromě toho bylo zařízení HELCZA rozděleno na zóny. Každá zóna byla vybrána na základě vzdálenosti od zdrojů beryllia. Nejvyšší koncentrace se očekává uvnitř vakuové komory (zóna 1) a pak v okolí (zóna 2). Přejížděcí místnost (zóna 3) slouží ke kontrole, zda nedochází k přenosu beryllia ze zóny 2 do zóny 4 (Toupal et al. 2019).

Laboratoř společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. je zapojena do programu BePAT (Beryllium Proficiency Analytical Testing), což je nezávislý program pro ověření kvality pro laboratoře měřící beryllium. Vzhledem k promyšlenému systému přechodových komor, ze kterých je složeno kontrolované pásmo, je riziko kontaminace ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. minimální.

## 10 Závěr

Dle dostupných informací není riziko kontaminace berylliem v České republice, i konkrétně v Plzeňském kraji, zvláště vysoké. Obecně hrozí zvýšený vnos beryllia do prostředí v souvislosti s antropogenní činností. Největší riziko představuje uvolňování beryllia do ovzduší ve formě aerosolu a prachu z povrchové těžby hnědého uhlí a jeho spalování v elektrárnách, jelikož dle dostupných údajů je obsah beryllia v měkkém hnědém uhlí vysoký. Rizikem by byl též únik při těžbě berylu, tato těžba však v České republice neprobíhá.

V Plzeňském kraji jsou společnosti, které využívají beryllium například k výrobě elektronických součástek, optických vláken či výzkumu a vývoji materiálu. U těchto společností je možné riziko kontaminace, které však není předvídatelné. Stejně tak může dojít ke kontaminaci při spalování uhlí s vysokým obsahem beryllia.

## 11 Literatura

ADAIR R. 2007. Understanding the Elements of the Periodic Table: Beryllium. 1. New York: Rosen Publishing Group, Inc. ISBN 978-1-40421003-5

ATKINSON J, HIBBERT C. 2000. AS Chemistry for AQA. 1. Heinemann Educational Publishers. ISBN 9780435581343

ATSDR. 2002a. Public health statement beryllium. Agency for Toxic Substances and Disease registry. Available from <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp4-c1-b.pdf> (accessed June 2023)

ATSDR. 2002b. Toxicological profile for beryllium. U. S. Dept of Health & Human services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Available from [https://stacks.cdc.gov/pdfjs/web/viewer.html?file=https://stacks.cdc.gov/view/cdc/7077/cdc\\_7077\\_DS1.pdf](https://stacks.cdc.gov/pdfjs/web/viewer.html?file=https://stacks.cdc.gov/view/cdc/7077/cdc_7077_DS1.pdf) (accessed June 2023).

ASHLEY K. 2006. Beryllium: Sampling and Analysis. 3. West Conshohocken: ASTM International. ISBN 978-0-8031-3499-7.

BALLANCE J, STONEHOUSE AJ, SWEENEY R, WALSH K. 1978. Beryllium and beryllium alloys In; MARK HF, OTHMER DF, OVERBERGER CG, SEABORG GT, GRAYSON N., eds. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 3, New York: John Wiley & Sons.

BERG N, DUNN N, FENN M. 1991. Spatial and temporal variability of rime ice and snow chemistry at five sites in California. Atmospheric Environment. 25(5-6), 915-926. DOI: 10.1016/0960-1686(91)90134-S

BEZAČINSKÝ M, PILÁTOVÁ B, JIŘELE V, BENCKO V. 1984. To the problem of trace elements and hydrocarbons emissions from combustion of coal. Journal of Hygiene, Epidemiology, Microbiology, and Immunology. 28(2), 129-138.

BOHDÁLKOVÁ L, NOVÁK M, VOLDŘICHOVÁ P, PŘECHOVÁ E, VESELOVSKÝ F, ERBANOVA L, KRACHLER M, KOMÁREK A, MÍKOVÁ J. 2012. Atmospheric deposition of beryllium in Central Europe: Comparison of soluble and insoluble fractions in rime and snow

across a pollution gradient. *Science of the Total Environment*. 439, 26-34. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.089

BOLAN S, WIJESEKARA H, TANVEER M, BOSCHI V, PADHYE LP, WIJESOORIYA M, WANG L, JASEMIZAD T, WANG C, ZHANG T, RINKLEBE J, WANG H, LAM SS, SIDDIQUE KHM, KIRKHAM MB, BOLAN S. 2023. Beryllium contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings. *Environmental Pollution*. **320**(3), 121077. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121077

BOUŠKA V. 1981. *Geochemistry of Coal*. 2. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

BRISSON MJ, EKECHUKWU AA. 2009. *Beryllium Environmental Analysis and Monitoring*. 1. Cambridge: Royal Society of Chemistry. ISBN 978-1-84755-903-6.

BRUCE M, ODIN M. 2011. *Concise International Chemical Assessment Document 32: Beryllium and beryllium compounds*. Geneva, World Health Organization. Available from <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42369/9241530324.pdf;jsessionid=CDB8672413B589FB465B12A0BDBDB16F?sequence=1> (accessed November 2023).

BUREAU OF MINES. 1953. *Material Survey: Beryllium*. 1. U.S. Government Printing Office.

CUNNINGHAM LD. 1998. *Beryllium, Mineral Yearbook*. U.S. Geological Survey. K1-K4.

CUNNINGHAM LD. 1999. *Beryllium, Mineral Commodity Summary*. U.S. Geological Survey. 34-35.

DYER P. 2014. *Beryllium: Physicochemical Properties, Applications and Safety Concerns*. 1. New York: Nova science Publishers, Incorporated. ISBN 9781633215900.

ECHEMI. 2024. *Beryllium hydride (BeH<sub>2</sub>)*. Available from [https://www.echemi.com/products/pid\\_Rock22423-berylliumhydride.html](https://www.echemi.com/products/pid_Rock22423-berylliumhydride.html) (accessed March 2024).

EPA. 1987. *Health Assessment Document for Beryllium*. United States Environmental Protection Agency. Available from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30001EIZ.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP>

A&Index=1981+Thru+1985&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&Toc Restrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQ FieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C 81thru85%5CTxt%5C00000002%5C30001EIZ.txt&User=ANONYMOUS&Password=anony mous&SortMethod=h%7C- &MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425 &Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=R esults%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL (accessed March 2024).

EPA. 1998. Toxicological Review of Beryllium and Compounds. United States Environmental Protection Agency. Available from <https://iris.epa.gov/static/pdfs/0012tr.pdf> (accessed March 2024).

EPA. 2005. Ecological Soil Screening Levels for Beryllium, Interim final. United States Environmental Protection Agency. Available from [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/eco-ssl\\_beryllium.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/eco-ssl_beryllium.pdf) (accessed March 2024).

EPA. 2021. US EPA Archive Document. United States Environmental Protection Agency. Available from <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/industrial/special/web/pdf/id4ber.pdf> (accessed March 2024).

EPRS. 2018. Protection of workers from exposure to carcinogens or mutagens: Third proposal. European Parliamentary Research Service. Available from [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/627144/EPRS\\_STU\(2018\)627144\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/627144/EPRS_STU(2018)627144_EN.pdf) (accessed April 2024).

ERBANOVÁ L, NOVÁK M, FOTTOVÁ D, DOUŠOVÁ B. 2008. Export of Arsenic from Forested Catchments Under Easing Atmospheric Pollution. *Environmental Science & Technology*. 42(19), 7187-7192. DOI: 10.1021.es800467j

FERNÁNDEZ-CALIANI JC, ROMERO-BAENA A, GONZÁLES I, GALÁN E. 2020. Geochemical anomalies of critical elements (Be, Co, Hf, Sb, Sc, Ta, V, W, Y and REE) in soils of western Andalusia (Spain). *Applied Clay Science*. 191, 105610

FISHBEIN L. 1981. Sources, Transport and Alterations of Metal Compounds: An Overview. I. Arsenic, Beryllium, Cadmium, Chromium, and Nickel. *Environmental Health Perspectives*. 40, 43-64. DOI: 10.1289/ehp.814043

FIŠÁK J, TESAŘ M, FOTTOVÁ D. 2008. Pollutant Concentrations in Rime and Fog Water. *Soil and Water Research*. 3(10), 68-73. DOI: 10.17221/1406-SWR

FLOYD DR, LOWE JN. 1979. *Beryllium Science and Technology*. 2. Springer Science + Business Media, LLC. ISBN 978-1-4757-0670-3

GAINES RV. 1976. Beryl – A Review. *The Mineralogical Record*, 7(5), 211-23

GREW ES. 2002. Volume 50: Beryllium: mineralogy, petrology, and geochemistry. 1. Washington: Mineralogical Society of America. ISBN 0-939950-62-6.

GREW ES, HAZEN RM. 2014. Beryllium mineral evolution. *American Mineralogist*. 99(5-6), 999-1021. DOI: 10.2138/am.2014.4675

HANUSA TP. Beryllium: Chemical element. Available from <https://www.britannica.com/science/beryllium> (accessed March 2024).

HAUSNER HH. 1965. *Beryllium. Its Metallurgy and Properties*. 1. University of California Press.

HLÁVKA J. 2010. Historie těžby živců na Poběžovicku. *Český les: Příroda a historie*. 7-8, 16-22

HUDSON INSTITUTE OF MINERALOGY. 2023. The mineralogy of Beryllium. Hudson Institute of Mineralogy. Available from <https://www.mindat.org/element/Beryllium> (accessed February 2023).

CHLÁDEK Š, NOVÁK M, UHER P, GADAS P, MATÝSEK D, BAČÍK P, ŠKODA R. 2024. Evolution of beryllium minerals in granitic pegmatite Maršíkov D6e, Czech Republic: Complex breakdown of primary beryl by internal and external hydrothermal-metamorphic fluids. *Geochemistry*. DOI: 10.1016/chemer.2024.126092

IARC. 1993. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human Volume 58: Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. International Agency for Research on Cancer. ISBN 978-92-832-1258-4

IARC. 2012. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human Volume 100C. Review of Human Carcinogens: Part C. Metals, Arsenic, Dusts and Fibres. 1. International Agency for Research on Cancer. 85. ISBN 978-92-832-1320-8

INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY. 1990. Beryllium – Environmental Health Criteria 106. World Health Organization. Available from <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/29434;jsessionid=001366A43A681E76414F893BD817E5D4> (accessed June 2023).

JAKUBOWSKI M, PALCZYNSKI C, 2007. Beryllium. In: Handbook on the Toxicology of Metals. 3. Academic Press. ISBN 978-0-12-369413-3

JIWEN L, STAROVOITOVA VN, WELLS DP. 2013. Long-term variations in the surface air <sup>7</sup>Be concentration and climatic changes. Journal of Environmental Radioactivity. 116, 42-47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.08015

JURSÍK F. 2002. Anorganická chemie kovů. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 117. ISBN 80-7080-504-8

KRÁM P, HRUŠKA J, DRISCOLL CT. 1998. Beryllium Chemistry in the Lysina Catchment, Czech republic. Water, Air, and Soil Pollution. 105, 409-415. DOI: 10.1023/A:1005091728272

KUSCHNER M. 1981. The carcinogenicity of beryllium. Environmental Health Perspectives. 40, 101-105. DOI: 10.1289/ehp.81400101

KWAPULINSKI J, PASTUSZKA J. 1983. Application of the mass balance equation in the estimation of beryllium and radium concentrations in the lower atmosphere. Science of The Total Environment. 26, 203-207. DOI: 10.1016/0048-9697(83)90112-2

LUMITOS INDUSTRY PORTALS. 2023. Bertrandite. LUMITOS AG, All rights reserved. Available from <https://www.bionity.com/en/encyclopedia/Bertrandite.html> (accessed February 2023).



LUMITOS INDUSTRY PORTALS. 2023. Beryllium fluoride. LUMITOS AG, All rights reserved. Available from [https://www.bionity.com/en/encyclopedia/Beryllium\\_fluoride.html](https://www.bionity.com/en/encyclopedia/Beryllium_fluoride.html) (accessed February 2023).

MEYER RJ. 1969. Beryllium. Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry. 8. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-11227-4

MOLDAN B, SCHNOOR JL. 1992. Czechoslovakia: Examining Critically Ill Environment. Environmental Science Technology. 26(1), 14-21

NABOYCHENKO S, MOURACHOVA IB, GOPIENKO VG, FRISHBERG IV, LOTSKO DV. 2008. Handbook of Non-Ferrous Metal Powders, 1st Edition. Technologies and applications. 1. Elsevier Science. ISBN 9781856174220

NAGEL N. 2017. Beryllium and Copper-Beryllium Alloys. ChemBioEng Reviews. 5(1). DOI: 10.1002/cben.201700016

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1272/2008 ze dne 16. prosince 2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí, o změně a zrušení směrnic 67/548/EHS a 1999/45/ES a o změně nařízení (ES) č. 1907/2006.

NATIONAL CANCER INSTITUTE. 2022. Beryllium. National Cancer Institute. Available from <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/substances/beryllium> (accessed February 2023).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES. 2008. Managing health effects of beryllium exposure. 1. Washington DC: The National academies press. ISBN 978-0-309-12532-1

NAVRÁTIL T, SKŘIVAN P, MINAŘÍK L, ŽLGOVÁ A. 2002. Beryllium Geochemistry in the Lesní Potok Catchment (Czech Republic), 7 Years of Systematic study. Aquatic Geochemistry. 8(2), 121-133. DOI: 10.1023/A:10211349228632

NIOSH. 2011. NIOSH Alert: Preventing Beryllium Sensitization & Chronic Beryllium Disease. National institute for Occupational Safety and Health. Available from

<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-107/pdfs/2011-107.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2011107> (accessed June 2023).

NOVÁK M, MÍKOVÁ J, KRACHLER M, KOŠLER J, ERBANOVA L, PRŔECHOVÁ E, JACKOVÁ I, FOTTOVÁ D. 2010. Radial distribution of lead and lead isotopes in stem wood of Norway spruce. A reliable archive of pollution trends in Central Europe. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 74(15), 4207-4218. DOI: 10.1016/j.gca.2010.04.059

NSSP. 2023. Beryllium Testing Information and Consent Form. National Supplemental Screening Program. Available from <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.31210024859942&seq=12> (accessed April 2024).

NTP. 1999. Report on Carcinogens Background Document for Beryllium and Beryllium Compounds. U.S. Department of Health and Human Services, National Toxicology Program. Available from [https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/newhomeroc/roc10/be\\_no\\_appendices\\_508.pdf](https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/newhomeroc/roc10/be_no_appendices_508.pdf) (accessed February 2024).

NTP. 2005. 11th Report on Carcinogens. U.S. Department of Health and Human Services, National Toxicology Program. Available from <https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/toc11.html> (accessed February 2024).

OSHA. 2020. Informační list: Karcinogeny při práci. Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci. Available from [https://osha.europa.eu/sites/default/files/Carcinogen\\_TE0419459CSN.pdf](https://osha.europa.eu/sites/default/files/Carcinogen_TE0419459CSN.pdf) (accessed April 2024).

PETKOF B. 1979. Beryllium. 1. Bureau of Mines, U.S. Department of the interior. Available from <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.31210024859942&seq=12> (accessed April 2024).

POLÁKOVÁ Š, HUTAŘOVÁ K, REINIGER D, KUBÍK L. 2011. Registr kontaminovaných ploch 2M HNO<sub>3</sub>. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně. Available from <https://eagri.cz/public/portal/-a17625---nKRfUFqH/registr-kontaminovanych-ploch-2m-hno3-pdf> (accessed December 2023).

PRAKASH S. 2013. Advanced Chemistry of Rare Elements. 5. S Chand and Company Limited. ISBN 978-81-219-4254-6

PRÁŠKOVÁ L, KUBÍK L, SVOBODA T. 2020. Registr kontaminovaných ploch: celkové obsahy rizikových prvků v zemědělských půdách, tabulkové přehledy a kartogramy (1998-2018). Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně. Available from [https://eagri.cz/public/portal/-a27806---bLA8QKMO/registr-kontaminovanych-ploch-1998-2018?\\_linka=a524584](https://eagri.cz/public/portal/-a27806---bLA8QKMO/registr-kontaminovanych-ploch-1998-2018?_linka=a524584) (accessed April 2024).

PUBCHEM. 2024. Compound summary: Beryllium chloride. Available from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Beryllium-Chloride> (accessed March 2024).

RYAN JG. 2002. Trace-Element Systematics of Beryllium in Terrestrial Materials. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. **50**(1), 121-145. DOI: 10.2138/rmg.2002.50.3

ROPP RC. 2013. Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds. 2. Elsevier. ISBN 9780444595508

SINKANKAS J. 1989. Emerald and other beryls. 2. Geoscience Press. ISBN 9780945005032

SKŘIVAN P, MINAŘÍK L, BURIAN M, MARTÍNEK J, ŽIGOVÁ A, DOBEŠOVÁ I, KVÍDOVÁ O, BENDL J, FOTTOVÁ D. 2000. Biogeochemistry of beryllium in an experimental forested landscape of the „Lesní potok“, catchment in Central Bohemia, Czech Republic. Geolines. 12, 41-62.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2004/37/ES ze dne 29. dubna 2004 o ochraně zaměstnanců před riziky spojenými s expozicí karcinogenům nebo mutagenům při práci.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/983 ze dne 5. června 2019, kterou se mění směrnice 2004/37/ES o ochraně zaměstnanců před riziky spojenými s expozicí karcinogenům nebo mutagenům při práci.

Směrnice Rady 92/85/EHS ze dne 19. října 1992 o zavádění opatření pro zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci těhotných zaměstnankyň a zaměstnankyň krátce po porodu nebo kojících zaměstnankyň (desátá směrnice ve smyslu čl. 16 odst. 1 směrnice 89/391/EHS).

Směrnice Rady 94/33/ES ze dne 22. června 1994 o ochraně mladistvých pracovníků.

SMITH DE, GOLDEN AP, STANGE AW, BARKER E, MROZ M, BARÓN AE, GHOSH D, MAIER L, CRAGLE D. 2018. Clinical and laboratory factors contributing to uninterpretable beryllium lymphocyte proliferation tests (BeLPT). *American Journal of Industrial Medicine*. 61(7), 592-604. DOI: 10.1002/ajim.22842

STEARNEY ER, JAKUBOWSKI JA, REGINA AC. 2022. *Beryllium Toxicity*. StatPearls Publishing. Available from <https://europepmc.org/article/NBK/nbk585042> (accessed April 2024).

TABERSHAW IR. 1972. *The Toxicology of Beryllium*. 2. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Health Services and Mental Health Administration, National Institute for Occupational Safety and Health.

TALBOT DEJ, TALBOT JDR. 2018. *Corrosion Science and Technology*. 3. CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4987-5241-1

TAYLOR TP, DING M, EHLER DS, FOREMAN TM, KASZUBA JP, SAUER NN. 2003. Beryllium in the environment: a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 38(2), 439-469. DOI: 10.1081/ese-120016906

TOUPAL L, KOUNOVSKÝ T, SKLENKA J, JÍLEK R, PROKŮPEK J. 2019. Monitoring and determination of Beryllium contamination at HELCZA. *Fusion Engineering and Desing*. 146(A), 770-772. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.01.073

U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION. 1950. *Beryllium and Beryllium Oxide Production and Development*. 1. U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION.

U.S. DEPARTMENT OF LABOR. 2024. EEOICPA BULLETIN NO.24-01: Updated Criteria for Establishing Beryllium Sensitivity. U.S. DEPARTMENT OF LABOR. Available from <https://www.dol.gov/sites/dolgov/files/OWCP/energy/regs/compliance/PolicyandProcedures/finalbulletinshtml/EEOICPABulletin24-01.pdf> (accessed April 2024).

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2005. *Ecological Soil Screening Levels for Beryllium*. United States Environmental Protection Agency. Available from [https://rais.ornl.gov/documents/eco-ssl\\_beryllium.pdf](https://rais.ornl.gov/documents/eco-ssl_beryllium.pdf) (accessed September 2023).

VÁVRA V, ŠTELCL J, LOSOS Z. 2013. Atlas minerálů. Masarykova univerzita. Available from <https://mineraly.sci.muni.cz/sorosilikaty/bertrandit.html> (accessed February 2023).

VESELÝ J, NORTON SA, SKŘIVAN P, MAJER V, KRÁM P, NAVRÁTIL T, KASTE J. 2002. Environmental Chemistry of Beryllium. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 50(1), 291-317. DOI: 10.2138/rmg.2002.50.7

VODÁRNA PLZEŇ A.S. 2024. Kvalita pitné vody: Plzeň město a skupinové vodovody. Available from <https://www.vodarna.cz/data/folders/2024-02-kvalita-vody-f499.pdf?show=1> (accessed March 2024).

Vyhláška Ministerstva životního prostředí 153/2016 Sb. ze dne 9. května 2016 o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy a o změně vyhlášky č. 13/1994 Sb. kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu

Vyhláška Ministerstva životního prostředí 356/2002 Sb. ze dne 11. července 2002, kterou se stanoví seznam znečišťujících látek, obecné emisní limity, způsob předávání zpráv a informací, zjišťování množství vypouštěných znečišťujících látek, tmavosti kouře, přípustné míry obtěžování zápachem a intenzity pachů, podmínky autorizace osob, požadavky na vedení provozní evidence zdrojů znečišťování ovzduší a podmínky jejich uplatňování.

WALSH KA. 2009. *Beryllium Chemistry and Processing*. 1. ASTM International. ISBN 9780871707215

WALSH KA. 2010. *Beryllium and Beryllium Alloys*. 1. ASTM International. ISBN 978-1-61583-978-0

WEDEPOHL KH. 1969. *Handbook of Geochemistry*. 1. Berlin: Springer-Verlag

WHO. 2001. *Beryllium and Beryllium Compounds*. Concise International Chemical Assessment, 32. Geneva: International Programme on Chemical Safety. Available from <https://incem.org/documents/cicads/cicads/cicad32.htm> (accessed March 2024).

Zákon č. 541/2020 Sb. Zákon o odpadech



