



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Nové strategie řešení následků úniku toxických kyanidů do prostředí

New Strategies of Managing Toxic Cyanide Spills in the Environment

Bakalářská práce

Studijní program: Ochrana obyvatelstva
Studijní obor: Plánování a řízení krizových situací
Autor bakalářské práce: Lukáš Václavíček
Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Pavla Bojarová, PhD.

Kladno 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Václaviček** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **473920**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Ochrana obyvatelstva**
Studijní obor: **Plánování a řízení krizových situací**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nové metody řešení následků úniku toxických kyanidů do prostředí

Název bakalářské práce anglicky:

New Methods of Management of Toxic Cyanide Spills in the Environment

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je analýza moderních přístupů k eliminaci toxických kyanidů z prostředí, kritické posouzení těchto metod, návrh nových perspektivních řešení a jejich srovnání se stávajícími postupy. Teoretická část bude zaměřena na popsání nejčastějších zdrojů kyanidového znečištění. Rovněž bude popsán stav průmyslové technologie, tj. výhody a nedostatky průmyslově používaných metod, a v neposlední řadě řešerše nových moderních způsobů eliminace kyanidu. V praktické části budou analyzovány vybrané příklady českých společností produkujících kyanidy v rámci své činnosti. Dále budou navrženy perspektivní biologické metody uplatnitelné v českém prostředí a bude kriticky posouzena využitelnost těchto metod v praxi, zejména při řešení situací vzniklých únikem kyanidu a nitrilů do odpadních vod a životního prostředí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PAPANIMITRIOU, C.A., DABOU, X., SAMARAS, P., SAKELLAROPOULOS, G.P., Coke oven wastewater treatment by two activated sludge systems, Global NEST Journal, ročník 8, číslo 1, 2006, 16-22 s., ISSN: 1790-7632
- [2] MARTINKOVÁ, L., VESELÁ, A.B., RINÁGELOVÁ, A., CHMÁTAL, M., Cyanide hydratases and cyanide dihydratases: emerging tools in the biodegradation and biodetection of cyanide, Applied Microbiology and Biotechnology, ročník 99, číslo 21, 2015, Listopad, 8875-8882 s., ISSN: 0175-7598
- [3] SANTOS, C., EL ZAHKAN, T., WEILAND, J., ANWAR, M., SCHIER, J., Characterizing Chemical Terrorism Incidents Collected by the Global Terrorism Database, 1970-2015, Prehospital and disaster medicine, ročník 34, číslo 4, 2019, Srpen, 385-392 s., ISSN: 1049023X

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

RNDr. Pavla Bojarová, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Ludmila Martinková, DSc.

Datum zadání bakalářské práce: **17.02.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., MBA, dr.h.c.
zodpis vedoucí(ho) katedry

prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student(ka) bere na vědomí, že je povinnen(a) vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.2.2020

Datum převzetí zadání

[Podpis]

Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem **Nové strategie řešení následků úniku toxických kyanidů do prostředí** vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

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), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 21.05.2020

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velice poděkovat vedoucí mé práce paní RNDr. Pavle Bojarové, PhD. a konzultantce paní Ing. Ludmile Martínkové, DSc. Obě při vedení mé bakalářské práce prokázali nesmírnou ochotu pomoci, sdílely se mnou své znalosti, poskytly cenné rady a připomínky a neztrácely se mnou trpělivost. Mé díky patří také společnostem Lučební závody Draslovka a.s. Kolín, Ostravské vodárny a kanalizace a.s. – provoz ČOV a Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s., které ochotně poskytly interní informace a bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je analýza nových strategií a metod využitelných při úniku toxických kyanidů do prostředí a při řešení následků s tím spjatých

Teoretická část se zabývá vymezením základních pojmů potřebných pro pochopení dané problematiky. Dále je zde popsán negativní vliv kyanidů na lidské zdraví a životní prostředí. Přestože se s kyanidem můžeme setkat i z přirozených zdrojů, tato práce se téměř výhradně soustřeďuje na jeho výskyt při antropogenních činnostech, protože jediné tak může dojít k nežádoucím únikům. Následně jsou zmapovány výhody a nedostatky běžně využívaných postupů při eliminaci kyanidů a řešerše alternativních biologických metod.

V praktické části je proveden průzkum českých společností, které nakládají s kyanidem, a jsou zde také popsány metody využívané k jeho likvidaci. Následně jsou navrženy alternativní biologické metody, kterými by mohly být nahrazeny standardní metody chemické. Součástí výsledků je rovněž rozbor aplikace moderních remediačních metod při havárii spojené s únikem kyanidu.

V diskuzi jsou rozebrány studie týkající se možností úniku kyanidů a odstraňování jejich následků, jsou diskutovány běžné postupy jednotek požární ochrany při havárii a porovnávány s alternativními navrženými postupy. Tato práce ukazuje, jak lze využít moderní vědecké zkoumání v krizovém managementu.

Klíčová slova

Bioremediace; havárie; kyanidy; životní prostředí; znečištění

ABSTRACT

This Bachelor thesis proposes new strategies and methods of dealing with leaks and spills of toxic cyanide into the environment and resolving the consequences of such events.

The theoretical part presents basic terminology necessary to understand the topic. It describes the negative effects of cyanides on human health and on the environment. Although some forms of cyanide occur in natural sources, this thesis focuses on its occurrence of anthropogenic origin as it is only in this case that unintended leaks occur. Moreover, the benefits and drawbacks of the common procedures used to eliminate cyanide are summarised, followed by research on alternative biological methods.

The practical part presents a survey among Czech companies that operate with cyanide including methods used for its disposal. Furthermore, alternative biological methods with the potential to replace the existing chemical methods are proposed. The results include the analysis of modern remediation methods applicable during industrial accidents connected with cyanide leaks.

The discussion provides a brief review of studies concerning cyanides, discusses common practices of units of the Czech Fire Rescue Service during industrial accidents and offers a comparison with herein proposed alternative procedures. The purpose of this thesis is to demonstrate how modern scientific research can be applied to crisis management.

Keywords

Bioremediation; Cyanide; Environment; Industrial accidents; Pollution

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle práce.....	11
3	Přehled současného stavu.....	12
3.1	Dopady kyanidů na lidské zdraví a životní prostředí.....	12
3.2	Havárie spjaté s únikem kyanidu.....	13
3.2.1	Vymezení základních pojmů.....	13
3.2.2	Havárie ohrožující vody.....	19
3.2.3	Koordinace složek IZS.....	20
3.3	Zdroje kyanidového znečištění.....	22
3.3.1	Přírozené zdroje kyanidového znečištění.....	22
3.3.2	Kyanidové znečištění způsobené antropogenní činností.....	22
3.3.3	Těžba drahých kovů.....	22
3.3.4	Kyanidové rybářství.....	24
3.3.5	Havárie.....	25
3.4	Výhody a nedostatky průmyslově používaných postupů.....	28
3.4.1	Fyzikálně-chemické procesy.....	28
3.4.2	Biologické procesy.....	30
3.5	Vybrané biologické metody eliminace kyanidu.....	30
3.5.1	Mikrobiální degradace kyanidu.....	30
3.5.2	Další způsoby biodegradace kyanidů.....	33
4	Metodika.....	40
5	Výsledky.....	42
5.1	Analýza remediačních metod vybraných českých společností.....	42

5.1.1	Ohlašovatelé znečištění kyanidem	42
5.1.2	Kritické posouzení současných metod degradace kyanidu.....	49
5.1.3	Návrh alternativních metod	50
5.2	Možné havárie související s únikem kyanidu na území ČR	54
5.2.1	Nástin možného řešení.....	54
5.2.2	Postupy provedení záchranných a likvidačních prací.....	55
6	Diskuze	57
7	Závěr	62
8	Seznam použitých zkratk.....	63
9	seznam použité literatury	65
10	Seznam použitých obrázků	75
11	Seznam použitých tabulek.....	76
12	Seznam Příloh.....	Chyba! Záložka není definována.

1 ÚVOD

Přítomnost kyanidu v životním prostředí je již dlouho předmětem zkoumání pro jeho vysokou toxicitu pro lidskou populaci, živočichy a vodní organismy. Kyanid se hojně používá v mnoha průmyslových odvětvích, jako jsou klenotnictví, těžba drahých kovů, galvanické pokovování, výroba plastů, barev a léčiv, zpracování potravin a koksování uhlí. Kyanidy představují vážné zdravotní riziko z důvodu své vysoké afinity ke kovům; způsobují poruchu buněčného dýchání inhibicí cytochrom c oxidázy. Tato inhibice nakonec vede k histotoxické hypoxii, zvýšené acidóze a snížené činnosti centrálního nervového systému a aktivity myokardu. Dostupné degradační procesy jsou vždy spojeny s určitými omezeními, danými např. provozními podmínkami, vznikem sekundárních znečištění a neefektivním využitím nákladů [1].

Práce se zabývá finančně výhodnými a efektivními metodami řešení úniku toxických kyanidů do prostředí. V rámci tohoto aktuálního tématu se vědci stále snaží přicházet s novými způsoby, jak touto problematiku řešit. Mezi modernější přístupy patří využití biologických procesů, například aktivního kalu nebo biodegradačních enzymů.

Kyanid je rychle působící, potenciálně smrtící chemikálie, která může existovat v různých formách. Kyanidová rezidua v důsledku průmyslové činnosti denně unikají do prostředí a je nezbytné jejich množství redukovat. U kyanidů představuje problém především chemický průmysl. Firmy, které vypouštějí kyanidy do vody, jsou zákonem nuceny jeho množství snižovat, nicméně nejsou schopny tak učinit ve 100% míře. Dále se do prostředí, ať už do vody nebo do půdy, dostávají kyanidy při extrakci zlata a dalších drahých kovů, jelikož využití kyanidu je finančně nejvýhodnější těžební řešení. V neposlední řadě je třeba zmínit rybaření pomocí kyanidu sodného, které, byť nelegální, je v jihovýchodní Asii běžné.

Znečišťování prostředí kyanidy a jeho deriváty představuje celosvětový problém. Pro okamžitý zisk lidé podstupují dlouhodobá rizika. Kyanid je škodlivý jak pro živočichy, tak rostliny, a dnes již existují metody, jak jej likvidovat šetrněji a efektivněji.

Práce si klade za cíl vytyčit nejúčinnější a zároveň finančně přijatelná a rychlá řešení v případě neočekávané kyanidové katastrofy a zároveň při dlouhodobém znečišťování prostředí. Některé běžně používané postupy již mohou být zastaralé nebo málo účinné.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je analýza moderních přístupů k eliminaci toxických kyanidů z prostředí, kritické posouzení těchto metod, návrh nových perspektivních řešení a jejich srovnání se stávajícími postupy. Teoretická část bude zaměřena na popis toxických účinků kyanidů na živé organismy a životní prostředí a výčet nejčastějších zdrojů kyanidového znečištění. Rovněž bude popsán stav průmyslové technologie, tj. výhody a nedostatky průmyslově používaných metod, a v neposlední řadě řešerše nových moderních způsobů eliminace kyanidu. V Praktické části budou analyzovány vybrané příklady českých společností produkujících kyanidy v rámci své činnosti. Dále budou navrženy perspektivní biologické metody uplatnitelné v českém prostředí a bude kriticky posouzena využitelnost těchto metod v praxi, zejména při řešení situací vzniklých únikem kyanidu a nitrilů do odpadních vod a životního prostředí.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Dopady kyanidů na lidské zdraví a životní prostředí

V posledních letech se globální produkce kyanidu zvýšila z důvodu vzniku nových trhů. Kyanid je především využíván pro zpracování zlata při těžebních aktivitách, kdy využití kyanidu je jediná ekonomicky přijatelná možnost. Tekuté odpady obsahující vysoké koncentrace kyanidu vznikají také při získávání cenných kovů ve šperkařském průmyslu. Kyanid je navíc nezbytný pro mnohá další průmyslová využití, jako jsou produkce nylonu, plastu, adheziv, kosmetiky, léků, zpomalovače hoření a silniční soli. Kyanid je produkován v řadě fyzikálních a chemických forem, jako jsou brikety kyanidu sodného, vločkový kyanid vápenatý a tekutý kyanid sodný, kromě plynné formy – kyanovodíku. Zvolená forma kyanidového činidla obvykle závisí na dostupnosti, vzdálenosti od zdroje a ceně. Pro bezpečné použití musí být kyanidová činidla rozpuštěná v alkalických roztocích, aby se předešlo odpařování kyanovodíku při nízkých hodnotách pH. Toxicita kyanidu vzniká především proto, že se *in vivo* váže na metaloproteiny (např. cytochrom c oxidázu) a inaktivuje je, čímž blokuje transportní řetězec mitochondriálních elektronů. Tato inhibice aerobního dýchání vede k histotoxické hypoxii a zvyšuje acidózu v důsledku anaerobní redukce pyruvátu na kyselinu mléčnou, což má za následek útlum centrální nervové soustavy a aktivity myokardu. Podezření na otravu kyanidem nastává, pokud se u dotyčného projevují metabolická acidóza, kóma, šok, záchvaty, bradykardie a nedostatečná reakce na léčbu kyslíkem. Kyanid není stabilní v krvi, ale některé jeho deriváty, jako je thiokyanát a 2-aminothiazolin-4-karboxylát, mohou být přesto detekovány při smrti způsobené kyanidy. Druhá zmíněná látka je stabilní metabolit, který působí jako důležitý forenzní kyanidový biomarker. Byly vyvinuty různé terapie k léčbě intoxikace kyanidem. Patří sem použití generátorů methemoglobinu nebo oxidu dusnatého, jako je dusitan sodný a dimethylaminofenol, protože kyanid má vyšší afinitu

k oxidované formě methemoglobinu než k hemoglobinu. Další možná terapie je využití látek jako např. thiosíran sodný a glutathion, které tvoří méně toxický thiokyanát v přítomnosti mitochondriálního enzymu rhodanázy. Poslední možností je aplikace přímých vazebných činidel, jako je hydroxokobalamin a dikobalt-edetát (Kelocyanor), které působí jako antidota [2; 3; 4].

Tabulka 1: Vystavení kyanovodíku v zaměstnání [5]

Koncentrace (ppm)	Efekt
Dýchací zóna: 0,7 Pracovní oblast: 0,2	Nedefinované symptomy otravy HCN
2-8 (průměr 5)	Monitorovací studie, nezaznamenány žádné symptomy
4-6	Monitorovací studie, nezaznamenány žádné symptomy
5-13	Bolest hlavy, únava, slabost, třas, bolest, žaludeční nevolnost; nárůst symptomů s přibývajícím rokem v zaměstnání
Pracovní oblast: <17 Vzduch v pracovní místnosti: <6,4	Efekt na zdraví nezaznamenán, koncentrace pod 5 ppm považována za koncentraci nemající žádný účinek
6, 8, 10 (průměrné koncentrace (rozptyl 4,2-12,4))	Nejčastější symptomy: bolest hlavy, slabost, změny v chuti a čichu (v zaměstnání 5-15 let)
>15	Bolest hlavy, závrať, žaludeční nevolnost až zvracení, podrážděné oči, nechutenství
25-75 po dobu cca 1 hodiny	Otupělost, slabost, závrať, žaludeční nevolnost, zrychlený tep, návaly horka

3.2 Havárie spjaté s únikem kyanidu

3.2.1 Vymezení základních pojmů

Havárie

Pojmem havárie je označována „nežádoucí událost, která způsobuje škody nebo zranění“. Z legislativního hlediska je problematika závažných havárií upravována zákonem č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a o

změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů [6].

Integrovaný záchranný systém

Integrovaný záchranný systém (dále jen IZS) není hmotným samostatným orgánem, jedná se o orgán sdružující jednotlivé složky, tj. složky základní a ostatní. Mezi základní složky IZS patří Hasičský záchranný sbor ČR (dále jen HZS ČR), jednotky požární ochrany (dále jen JPO) zařazené do plošného pokrytí JPO, Policie ČR (dále jen PČR) a poskytovatelé zdravotnické záchranné služby (dále jen ZZS). Významově lze IZS definovat jako *„koordinovaný postup jeho složek při přípravě na mimořádné události a při provádění záchranných a likvidačních prací“* [7; 8].

Jednotky požární ochrany

Jednotky požární ochrany jsou při řešení závažných havárií elementární. JPO se rozumí *„organizovaný systém tvořený odborně vyškolenými osobami (hasiči), požární technikou (automobily) a věcnými prostředky požární ochrany (výbava automobilů, agregáty apod.)“* [8; 9].

Vodoprávní úřad

V oblasti úpravy vztahů k nakládání s povrchovými či podzemními vodami, které jsou jako předmět zájmu chráněny, je v platnosti v rámci ČR tzv. vodní zákon, tedy zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), na jehož základě jsou udělována Vodoprávním úřadem udělována povolení pro provedení vodních děl a jejich možných úprav a změnách užitku děl, hospodárné využívání vodních zdrojů, ochrana vod v řízeních podle jiných předpisů, případně zrušení nebo kompletní odstranění vodních děl [10].

Asanace

Pojmem asanace jsou označeny úkony prováděné za účelem ozdravení životního prostředí a zlepšení hygienických podmínek bez rozdílu místa jejího výkonu – v přírodě či ve městě. Asanaci lze definovat jako *„soubor opatření sloužících k revitalizaci životního prostředí, činnosti směřující k odstraňování a zneškodňování kontaminantů, obnově společenského života a materiálních hodnot“*. Asanační neboli obnovovací práce se týkají revitalizace životního prostředí a činností, které určitým způsobem vedou k obnově stanoveného území. Může se jednat o obnovu již zmíněného životního prostředí, ovšem také společenského života nebo materiálních hodnot [11].

Dekontaminace

Jako dekontaminace je označován postup, kterého je cíleně využíváno za účelem odstranění nebo případně úplného zneškodnění škodlivé látky či organismu z povrchů, resp. z kontaminovaných osob, zvířat, techniky, materiálů, potravin, vody, terénu či staveb, zařízení a objektů. Dekontaminaci lze provádět mechanicky, fyzikálně, fyzikálně-chemicky nebo pouze chemicky [12].

Dekontaminace je rovněž definována jako *„soubor metod, postupů, organizačního zabezpečení a prostředků k účinnému odstranění nebezpečných látek“* [13].

Metody a typy dekontaminace je možné rozlišovat dle několika aspektů. Z hlediska doby zahájení dekontaminačních prací jsou rozlišovány dekontaminace prvotní a druhotná: cílem prvotní dekontaminace je bezprostřední záchrana života a zdraví, zatímco druhotná dekontaminace může být využita po prvotní dekontaminaci pro dosažení jejího maximálního účinku. Na základě rozsahu dekontaminace lze dále rozlišovat dekontaminaci částečnou a úplnou: metod částečné dekontaminace je využíváno zejména přímo na místě události, jsou při

ní využívány především jednoduché prostředky určené pro zabránění kontaminace osob manipulujících s kontaminovaným materiálem. K dekontaminace úplně jsou užívány speciální jednotky přímo v místě určeném k danému účelu [14].

I přes množství použitých metod dekontaminace zůstává tzv. zbytková kontaminace. Dekontaminací je míněno snížení škodlivého účinku kontaminantu na takovou úroveň, která je bezpečná a neohrožuje zdraví a život osob a zvířat. Celkový dekontaminační proces končí likvidací samotného dekontaminačního stanoviště včetně kontaminovaných věcných prostředků a vody, která byla užita k dekontaminaci [13].

Evakuace

V případě, že je vyhlášena evakuace vládou, hejtmanem, starostou či primátorem obce nebo velitelem zásahu, je každý občan de lege povinen uposlechnout nařízení a uzpůsobit se k evakuaci. Pokud tak neučiní, může být sankcionován. Evakuace je jedním z prvků kolektivní ochrany a je plánována pro události vyžadující 3. nebo zvláštní stupeň poplachu, tj. události při nichž může dojít k ohrožení více než 100 osob. Evakuací je rozuměn „*souhrn opatření k organizovanému přemístění osob, zvířectva a věcných prostředků*“ [15].

Z hlediska rozsahu opatření dělíme evakuaci na objektovou a plošnou. Objektová evakuace zahrnuje evakuaci osob jedné nebo malého počtu obytných budov, administrativně správních budov, technologických provozů nebo dalších objektů. Plošná evakuace zahrnuje evakuaci obyvatelstva z části nebo celého urbanistického celku, případně většího územního prostoru, přičemž obyvatelstvem jsou míněny všechny osoby v místech ohrožených mimořádnou událostí s výjimkou osob, které se budou podílet na záchranných pracích, na řízení evakuace nebo budou vykonávat jinou neodkladnou činnost [16].

System varování a vyrozumění

Pro potřeby upozornění obyvatelstva a zalarmování příslušných institucí a orgánů na hrozící nebo již vzniklou mimořádnou událost byl na území ČR od roku 1991 budován Jednotný systém varování a vyrozumění. Je jím síť poplachových sirén určených zejména k varování obyvatel a „soustava vyrozumívacích center, soustava dálkového vyrozumění (doprava signálu a informací mezi vyrozumívacími centry), soustava místního vyrozumění (infrastruktura pro ovládání poplachových sirén a vyrozumění osob)“. K varování obyvatel slouží tzv. „Všeobecná výstraha“, což je kolísavý tón sirény trvajícím po dobu 140 vteřin, může zaznít třikrát po sobě v cca třiminutovém intervalu. Signál je následně doplněn o mluvenou tísňovou informaci. Může být užito i sdělovacích prostředků jako jsou např. rozhlas, televizní nebo rádiové vysílání, místní rozhlas [17].

Vnitřní havarijní plán

„Havarijní plán je dokument, ve kterém jsou popsány činnosti a opatření, které vedou ke zmírnění nebo odstranění následků mimořádné události nebo případné havárie“ [17].

Vnitřní havarijní plán (dále jen VHP) zpracovávají pouze ti provozovatelé objektu a zařízení, u kterých je možnost vzniku závažné havárie a kteří jsou zařazeni do skupiny B. Dělení do skupin vychází z množství skladovaných nebezpečných látek. Pro zařazení objektu musí být splněna podmínka minimálního množství uvedeného v příloze č. 1 zákona č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií. Jejich povinností je vypracovat bezpečnostní zprávu, což je právní předpis stanovující zásady pro vypracování tak, aby bylo možné přijímat vhodná opatření v případě vzniku závažné havárie za účelem zmírnění jejich následků na životy a zdraví lidí a zvířat, životní prostředí a majetek [18].

Mimořádná událost

Mimořádnou událostí (dále jen MU) se ve smyslu zákona č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů, rozumí „škodlivé působení sil a jevů vyvolaných činností člověka, přírodními vlivy, a také havárie, které ohrožují život, zdraví, majetek nebo životní prostředí a vyžadují provedení záchranných a likvidačních prací“ [8].

Nebezpečné chemické látky

Jako nebezpečné chemické látky lze označit některé látky používané zejména v chemickém a farmaceutickém průmyslu, při výrobě umělých hmot a vláken, umělých hnojiv a prostředků na ochranu rostlin, dále se jedná o prostředky nalézající se v chladírenských zařízeních a ve vodárnách., které svými toxickými, výbušnými a hořlavými vlastnostmi mohou ohrozit zdraví a životy lidí, způsobit vážné poškození životního prostředí. V případě zasažení lidského organismu mohou způsobit vážné zdravotní potíže, zejména pak na V oblasti dýchacích cest, jejich následky mohou vést až k usmrcení organismu. Kyanidy spadají do kategorie toxických látek.

Únik nebezpečných chemických látek může být zapříčiněn:

- *„následkem působení člověka: havárie způsobená ve výrobě, při skladování nebo nehodou při přepravě nebezpečné látky,*
- *vlivem přírodních účinků: k úniku látek dojde vlivem povodně, větru, s sesuvem půdy apod.,*
- *při teroristických útocích,*
- *následkem válečných operací“ [17].*

Toxicita daných látek je definována pro konkrétní podmínky v závislosti na cestě vstupu do organismu, účinné dávce, biologickém druhu atd. V případě kyanidů dochází k blokáde buněčného dýchání, typickými projevy jsou malátnost, svalové křeče, nauzea, tachykardie či bezvědomí. Pokud by byl organismus exponován parám kyanidů, může dojít i k okamžité smrti [19].

Záchranné a likvidační práce

V rámci IZS jsou při řešení mimořádných událostí prováděny záchranné a likvidační práce (dále jen ZaLP).

Jako záchranné práce jsou dle zákona č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů, definovány *„činnosti k odvrácení nebo omezení bezprostředního působení rizik vzniklých mimořádnou událostí, zejména ve vztahu k ohrožení života, zdraví, majetku nebo životního prostředí, a vedoucí k přerušení jejich příčin“*.

Pojem likvidační práce označuje v duchu téhož zákona *„činnosti k odstranění následků způsobených mimořádnou událostí“* [8].

3.2.2 Havárie ohrožující vody

„Za havárii ohrožující vody se vždy považují případy závažného zhoršení nebo mimořádného ohrožení jakosti povrchových nebo podzemních vod ropnými látkami, zvlášť nebezpečnými látkami, popřípadě radioaktivními zářiči a radioaktivními odpady, nebo dojde-li ke zhoršení nebo ohrožení jakosti povrchových nebo podzemních vod v chráněných oblastech přirozené akumulace vod nebo v ochranných pásmech vodních zdrojů.

Ten, kdo způsobil havárii („původce havárie“), je povinen činit bezprostřední opatření k odstraňování příčin a následků havárie. Přitom se řídí havarijním plánem, popřípadě pokyny vodoprávního úřadu a České inspekce životního prostředí.

Kdo způsobil nebo zjistí havárii, je povinen ji neprodleně hlásit Hasičskému záchrannému sboru České republiky nebo jednotkám požární ochrany nebo Policii České republiky, případně správci povodí.

Dojde-li k havárii mimořádného rozsahu, která může závažným způsobem ohrozit životy nebo zdraví lidí nebo způsobit značné škody na majetku, platí při zabraňování škodlivým následkům havárie přiměřená ustanovení o Ochráně před povodněmi“ [20].

Jedná se o soubor činností a opatření určených k předcházení povodňových stavů a úspěšnému zvládnutí rizik spjatých s probíhajícími povodněmi na ohroženém území. Řídícím legislativním dokumentem je pro tuto problematiku zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) [21].

3.2.3 Koordinace složek IZS

Jednotlivé složky jsou v rámci IZS koordinovány. K dosažení úspěšné koordinace jsou určeny následující postupy:

- průběžný monitoring hrozící mimořádné události, vyhodnocení druhu a rozsahu události, vyhodnocení postupu na základě podobných událostí, které již v minulosti proběhly;
- uzavření místa zásahu, omezení vstupu nepovolaným osobám;
- záchrana bezprostředně ohrožených osob, zvířat nebo majetku, popřípadě jejich evakuace;
- poskytnutí neodkladné zdravotní péče raněným, přijetí opatření, která jsou nezbytná pro ochranu životů a zdraví osob zasahujících složek;

- rozdělení místa zásahu na zóny podle kritéria charakteristického nebezpečí a zvláštností v místě zásahu (výrobní technologie, konstrukce objektů, vlastnosti podloží atd.), vymezení vhodného pracovního režimu a způsobu ochrany života a zdraví osob včetně použití ochranných prostředků;
- vytvoření týlu, zajištění podmínky pro odpočinek zasahujících, případně vytvoření společného materiálního a finančního zabezpečení složek;
- přerušování záchranných prací v případě bezprostředního ohrožení životů a zdraví zasahujících osob nebo v případě, kdy by záchrannými pracemi vznikly závažnější následky než ty, které hrozí vzniklou MU;
- přerušování trvalých příčin vzniku MU (například zamezení úniku nebezpečných látek, oprava, omezením provozu havarovaných zařízení);
- stabilizace místa zásahu (například hašení požárů, ochlazování, odstranění staveb a porostů, provedení terénních úprav);
- přijetí opatření v místech předpokládaného šíření následků MU, varování potenciálně ohroženého obyvatelstva, případně vyhlášení evakuace, vyhledání zraněných, ošetření raněných, poskytnutí pomoci těm, které nelze evakuovat, regulace volného pohybu osob a dopravy v místě zásahu a v jeho okolí, ochrana evakuovaného území a majetku;
- poskytnutí nezbytné humanitární pomoci, poskytnutí neodkladné veterinární péče raněným zvířatům;
- poskytování nezbytných informací osobám, které jsou příbuzné s jedinci výrazně postiženými MU, komunikace se sdělovacími prostředky a veřejností;
- dokumentace údajů za účelem objasnění příčin vzniku MU, dokumentace provedených ZaLP pro vytvoření souhrnného přehledu o nasazených složkách a časovém sledu vykonaných činností [22].

3.3 Zdroje kyanidového znečištění

3.3.1 Přírodní zdroje kyanidového znečištění

Kyanidy jsou v přírodě všudypřítomné; produkují je bakterie, houby, rostliny i hmyz. Je známo přes 2000 druhů rostlin schopných produkovat kyanidové sloučeniny. Ty jsou syntetizovány ve formě kyanolipidů a kyanoglykosidů. Slouží jako odpuzující prostředek proti hmyzu a zvířatům. Kyanidy se vyskytují i jako běžná složka v některých druzích ovoce, to ale pro člověka není problém, v běžně konzumovaném množství neublíží [1; 23].

3.3.2 Kyanidové znečištění způsobené antropogenní činností

Přítomnost vyšších koncentrací kyanidů v prostředí způsobují především antropogenní aktivity. Kyanid se do životního prostředí dostává např. při spalování uhlí, plastů, domácího odpadu a fosilních paliv, rafinace ropy a kovů, kouření cigaret, šperkařství. Velké objemy odpadních vod s obsahem kyanidu vyprodukovaných šperkařským průmyslem obvykle také obsahují vysoké koncentrace kovů, hlavně mědi, železa a zinku. Tato toxická rezidua musí být rovněž cíleně odstraňována, aby se minimalizovala zdravotní a environmentální rizika. Značné množství kyanidu se může dostat do povrchových vod prostřednictvím komunálních čistíren odpadních vod a rozpuštěním silniční soli (kde běžně používanou protispěčkovou látkou je ferrokyanid draselný). Kyanid se také syntetizuje a používá pro řadu průmyslových procesů, jako je kalení oceli a výroba plastů. Spalování biomasy a zemědělské postupy jsou také uváděny jako jeden z hlavních důvodů přítomnosti kyanidu v životním prostředí [1; 2].

3.3.3 Těžba drahých kovů

Kyanid se v těžebním průmyslu k získání zlata používá více než sto let. Celosvětově se spotřebují stovky tun kyanidu ročně. Kyanidace zlata je hydrometalurgická technika pro získávání zlata z rudy nízké kvality přeměnou

zlata na koordinační komplex rozpustný ve vodě. Jedná se o nejčastěji používaný louhovací proces při těžbě zlata [24].

Drtivá většina zlata vyprodukovaného ročně po celém světě se získává technikami kyanidového loužení. Spojené státy, Čína, Austrálie, Rusko a africké státy jsou největšími producenty, kteří přispívají k celosvětové nabídce zlata, a těžební činnosti v Evropě v současné době rostou v důsledku poptávky po zlatých špercích a v různých technologických odvětvích. Těžební průmysl ročně produkuje několik milionů tun toxických odpadních vod, které kromě kyanidu obsahují arsen, olovo, rtuť, kadmium, chrom a kyselinu sírovou. Úniky odpadních vod s obsahem kyanidu, které v historii způsobily ekologické katastrofy, byly převážně spojeny s těžebními činnostmi, ale kyanid se také používá v klenotnickém průmyslu k selektivnímu odběru drahých kovů, tj. stříbra a zlata, ze šperkařských zbytků, které vznikají při galvanickém pokovování [2].

Výroba činidel pro zpracování nerostných surovin za účelem získání zlata, mědi, zinku a stříbra představuje přibližně 13 % celosvětové spotřeby kyanidů, přičemž zbývajících 87 % kyanidů se používá v jiných průmyslových procesech. Vzhledem k vysoké jedovatosti je jeho používání pro tyto účely v některých zemích zakázáno. Kyanidace zlata se používá v 90 % produkce zlata. Vodné roztoky kyanidu se na slunci rychle rozkládají; méně toxické produkty, jako jsou kyanatany a thiokyanáty, mohou však přetrvávat i několik let. Znečištění řek kyanidem může mít devastující účinek, někdy zabíjí všechny živé organismy i několik kilometrů po proudu [2].

Vodní toky obsahující kyanid bývají detoxikovány tak, aby byla co nejeфекtivněji snížena koncentrace toxických látek. Užité metody oxidují kyanid

na kyanatan, který není tak toxický jako kyanidový ion, a který pak může reagovat dále za vzniku uhličitanů a amoniaku [25].

Přestože je kyanid levný, účinný a biologicky rozložitelný, jeho vysoká toxicita vedla k novým metodám těžby zlata za použití méně toxických činidel. Byly zkoumány další extrakční látky včetně thiosíranu, thiomocoviny, jódu/ jodidu, amoniaku, kapalné rtuti a α -cyklodextrinu. Důležitými parametry jsou hlavně náklady na činidla a účinnost získávání zlata. Thiomocovina se komerčně využívá pro rudy obsahující antimonit [26].

Když byl Evropské komisi předložen návrh k zákazu těžby zlata pomocí kyanidu, tak jej zamítla s tím, že stávající předpisy poskytují odpovídající ochranu životního prostředí a zdraví. Česká republika tento zákaz v rámci vlastní legislativy přijala a je tak jedním z mála států, kde je těžba pomocí kyanidu zakázána.

3.3.4 Kyanidové ryběství

Kyanidový rybolov je metoda sběru živých ryb zejména pro použití v akváriích, která zahrnuje rozstříkávání směsi kyanidu sodného do vybraného prostředí ryb za účelem jejich omráčení. Škodí se tak nejenom cílené skupině ryb, ale také mnoha dalším mořským organismům, včetně korálových útesů [27].

V mořské vodě se kyanid sodný rozkládá na sodné a kyanidové ionty. U lidí kyanidy blokují protein hemoglobin transportující kyslík; hemoglobin v rybách úzce souvisí s hemoglobinem u lidí a může se s kyslíkem vázat ještě rychleji. Nevratnou konjugací kyanidových iontů do vazebné domény hemoglobinu je zabráněno v přístupu kyslíku k buňkám a výsledkem je účinek podobný otravě oxidem uhelnatým. Je známo, že použití kyanidu způsobuje úmrtnost na

laboratorních korálech, nicméně tyto údaje je velmi obtížné kvantifikovat s ohledem na rozsáhlost a rozmanitost přírodní populace [27; 28].

Mnoho rybolovných a potápěčských oblastí v celé jihovýchodní Asii, které již byly vážně poškozeny dopadem dynamitového rybolovu, bylo zničeno nebo úplně ztraceno kvůli kyanidovému rybolovu. Koncentrace kyanidu zpomaluje fotosyntézu u řas, což má za následek ztrátu barvy korálových útesů. I při velmi nízkých dávkách vede kyanid k vyšší úmrtnosti korálů [28].

3.3.5 Havárie

Jednou z významných oblastí, které jsou v gesci Ministerstva životního prostředí obsaženy a blíže definovány v rámci civilního nouzového plánování, je oblast prevence závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami. Jednou z takových látek, na které se pak zmíněná problematika vztahuje, je kyanid. Z perspektivy legislativního ukotvení dané tematiky na úrovni České republiky je dominantním právním předpisem zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií. V rámci tohoto zákona je závažná havárie definována jako *„mimořádná, částečně nebo zcela neovladatelná, časově a prostorově ohraničená událost, zejména závažný únik nebezpečné látky, požár nebo výbuch, která vznikla nebo jejíž vznik bezprostředně hrozí v souvislosti s užíváním objektu, vedoucí k vážnému ohrožení nebo k vážným následkům na životech a zdraví lidí a zvířat, životním prostředí nebo majetku a zahrnující jednu nebo více nebezpečných látek“*. Tento zákon vznikl zejména v reakci na již proběhlé závažné havárie, jako je například únik kyanidu z odkaliště dolu v Baia Mare, Rumunsko 2000. Zmíněným zákonem je upravována oblast prevence závažných havárií, dále jím jsou zapracovávány příslušné předpisy Evropských společenství a také implementována směrnice známá jako SEVESO III. Jedná se o směrnici Evropského parlamentu a Rady 2012/18/EU z července 2012, o kontrole nebezpečí závažných havárií s přítomností nebezpečných látek a o změně a následném

zrušení směrnice Rady 96/982/ES. Tato směrnice z roku 1996 je také známá jako SEVESO II. Nutnost implementace změn, které přinesla směrnice z července 2012, je obsažena právě ve výše zmíněném zákoně [18; 29].

S problematikou rozsáhlých průmyslových havárií s následným únikem nebezpečných látek toxického, hořlavého nebo výbušného charakteru se pojí množství nežádoucích důsledků včetně materiálních a finančních ztrát, škod na zdraví a životech zasažených i zasahujících a zpravidla nutnost evakuace osob ze zasažených oblastí a zón ohrožení. Častou koincencí může být následný požár, kontaminace podzemních vod či například znečištění životního prostředí [22; 30].

V reakci na únik kyanidu v lokalitě Baia Mare v Rumunsku roku 2000 přijal Evropský parlament a Rada směrnici 2006/21/ES o nakládání s odpady z těžebního průmyslu. Ustanovení čl. 13 odst. 6 vyžaduje, aby se koncentrace kyanidu snížila na nejnižší možnou úroveň za použití nejlepších dostupných technik a aby všechny doly, které zahájily provoz po 1. květnu 2008, nesměly vypouštět odpad obsahující kyanid v koncentraci vyšší než 10 ppm. Dolům zprovozněným nebo povoleným před tímto datem bylo povoleno nejdříve 50 ppm, od roku 2013 klesly tyto hodnoty na 25 ppm a od roku 2018 na 10 ppm [31].

Podle článku 14 směrnice 2006/21/ES musí společnosti rovněž poskytnout finanční záruky, aby se zajistila sanace prostředí po uzavření dolu. To se může dotknout zejména menších společností, které chtějí v EU vybudovat zlaté doly, protože je méně pravděpodobné, že budou mít finanční zdroje na poskytnutí takových záruk. Příklady závažných havárií týkajících se kyanidu v novodobé historii jsou shrnuty v Tabulce 2 [31].

Tabulka 2: Havárie spojené s únikem kyanidu [32]

Havárie spojené s únikem kyanidu			
Rok	Země	Činnost	Rozsah-následky
2000	Papua Nová Guinea	Pád bedny s kyanidem sodným z vrtulníku do deštného pralesa	100–150 kg kyanidu rozpuštěno v místních vodách – smrtící následky pro vodní ekosystém, žádné hlášené lidské oběti
2000	Rumunsko	Únik kyanidů z odkaliště dolu v Baia Mare	Cca 100 tun kyanidu, zákaz rybolovu a využívání Dunajské vody k pití, kontaminovaná zásoba pitné vody 2,5 mil. Maďarů, zabití velkého množství ryb
2018	Mexiko	Únik 200 litrů roztoku kyanidu z kamionu do řeky Piaxtla v Durangu	Průnik do podloží a ovlivnění kvality podzemní vody která zásobuje komunitu, bylo zabito neurčité množství ryb
1998	Kyrgyzstán	Převrácení kamionu, okolo 2 t kyanidu se dostalo do řeky Barskoon	Koncentrace kyanidu v řece dostatečně vysoká, aby způsobila závažné zdravotní potíže, možné poškození plodin – proto cca na měsíc přerušen zavlažovací systém, mohlo se vyskytnout až 16 případů expozice kyanidu člověku
1984–2013	Papua New Guinea	Neomezené vypouštění těžebního odpadu – cca 2 mld. tun	Velice vážné poškození životního prostředí po proudu řek Ok Tedi a Fly ve vzdálenosti až 1000 km, zničení vesnic, zemědělství a rybolovu – narušen život cca 50 000 lidí, okolo 1600 km ² lesa zničeno

Co se týče konkrétně kyanidových katastrof, jako zástupce můžeme uvést pád bedny s kyanidem sodným nad deštným pralesem v Nové Guinei v roce 2000 nebo relativně nedávnou nehodu kamionu z roku 2018, ze kterého uniklo 200 litrů kyanidového roztoku do řeky Piaxtla v Mexiku. Již zmíněná havárie v Baia Mare z roku 2000 je pak nejhorší katastrofa svého druhu.

Poblíž řeky Baia Mare v Rumunsku uniklo vysoké množství toxického kyanidu do řeky Someș prostřednictvím těžební společnosti *Aurul*, společného podniku australské společnosti *Esmeralda Exploration* a rumunské vlády.

Znečištěné vody nakonec dorazily do řeky Tisy a poté do Dunaje a zabily velké množství ryb v Maďarsku, Srbsku a Rumunsku. Únik je považován za jednu z nejhorších ekologických katastrof v Evropě. Katastrofa se stala 30. ledna 2000 kdy praskla přehrada s vodou kontaminovanou kyanidem a 100 000 m³ vody (obsahující cca 100 tun kyanidu) se rozlilo přes zemědělskou půdu a poté do řeky Somes. Po úniku měla řeka Somes koncentraci kyanidů více než 700krát vyšší, než byla povolená úroveň. Somes se vlévá do Tisy, druhé největší řeky Maďarska, která pak teče do Dunaje. Únik kontaminoval zásobu pitné vody více než 2,5 milionu Maďarů. Následky havárie byly odstraňovány za účasti dobrovolníků, kteří odstraňovali mrtvé ryby, aby se zabránilo šíření katastrofy v potravinovém řetězci, protože ostatní zvířata, jako např. lišky a vydry, by zemřela po konzumaci kontaminovaných ryb. Poté, co kyanid pronikl do Dunaje, byl zředěn velkým objemem vody, ale v některých částech zůstala jeho koncentrace cca 20 až 50krát vyšší, než byla přípustná koncentrace. V polovině února 2000, kdy se únik dostal do rumunské části Dunaje, rumunská vláda dočasně zakázala rybolov a využívání dunajské vody k pití. [33; 34].

3.4 Výhody a nedostatky průmyslově používaných postupů

3.4.1 Fyzikálně-chemické procesy

Jak fyzikální, tak chemické metody zpracování kyanidů se v přírodě pojí s určitými nedostatky, které se promítají do nákladů a šetrnosti k životnímu prostředí.

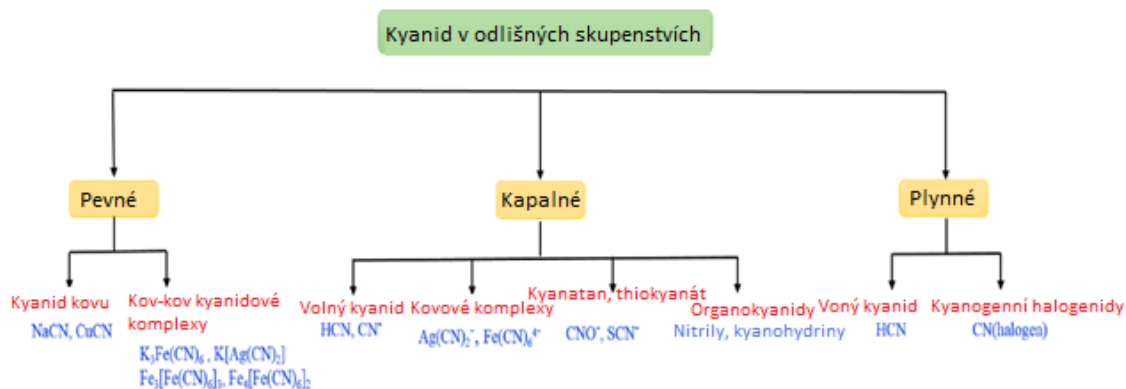
Výměna iontů a reverzní osmóza jsou dvě hlavní fyzikální metody pro nakládání s odpadními vodami obsahujícími kyanidy. Za použití těchto metod lze různé látky (kyanid, kyanatany, thiokyanát, amoniak a dusičnan) odstranit současně. S iontovou výměnou a reverzní osmózou se bohužel pojí tvorba

vedlejšího produktu (solanky). Likvidace vedlejších produktů je někdy obtížná a vyžaduje speciální manipulaci, což tyto procesy prodražuje [35].

Chemické metody zpracování toxického kyanidu spočívají v oxidaci kyanidu na neškodnou formu kyanatan. Existuje několik způsobů nakládání s odpadními látkami, které jsou bohaté na volný kyanid (CN^-). Patří mezi ně alkalická chlorace, oxidace vzdušným kyslíkem/ sulfoxidem nebo oxidace peroxidem vodíku. Pro oxidaci kyanidu jsou užívány látky jako chlor, peroxid vodíku, ozon, aktivovaný uhlík aj [35].

Nedávno byl navržen nový postup pro elektrodialýzu s pěti kompartmenty pro odstraňování kyanidu z odpadních vod vznikajících při těžbě zlata. Odstranění kyanidu adsorpcí je také zmíněno v několika studiích. Fotokatalytická degradace kyanidu v odpadních vodách za použití fotokatalyzátoru v podobě ultratenkého nanofilmu je další novou metodou [35].

Ačkoli chemické metody jsou užívané nejčastěji, přesto trpí některými vážnými nedostatky, jako je nemožnost degradovat stabilní komplexy kovů s kyanidy, potřeba nákladných činidel, vybavení a údržby a také tvorba chlorovaných sloučenin jako vedlejších produktů. Reálná možnost realizace těchto metod je ovlivněna několika faktory, jako je chemické složení odpadů, jejich objem, kvalita odpadních vod a dostupnost činidel [1; 35].



Obrázek 1: Kyanid v odlišných skupenstvích [35]

3.4.2 Biologické procesy

V posledních několika desetiletích jsou biologické procesy považovány za nejlepší alternativu k chemickému zpracování. Potenciálním řešením remediace míst kontaminovaných kyanidem (doly, opuštěné těžební oblasti, továrny na výrobu plynu aj.) je zavedení biologických metod (užití mikroorganismů nebo rostlin). Navzdory toxicitě kyanidu je mnoho organismů schopno jej syntetizovat, což je zpravidla obranný mechanismus, a některé mikroorganismy (tzv. kyanotrofní organismy) umí kyanid asimilovat tím, že použijí dusík jako zdroj pro růst. Konkrétně jsou tím myšleny bakterie, houby, rostliny, a dokonce i živočichové. Přestože bioremediace je ekologicky potentní technikou degradace kyanidů, její použití v průmyslovém měřítku je bohužel stále sporadické, viz. 3.4.1 a 3.4.2 [1; 2].

3.5 Vybrané biologické metody eliminace kyanidu

3.5.1 Mikrobiální degradace kyanidu

Mikrobiální degradace kyanidu je považována za jednu z nejúčinnějších bioremediačních technik. Expozice kyanidu poškozuje savce a další organismy, ale některé mikroorganismy jsou vůči jeho toxicitě imunní. Množství mikroorganismů je schopno procesovat kyanid jako zdroj uhlíku a dusíku a

přeměnit jej na neškodné/ méně toxické látky, tj. amoniak a oxid uhličitý. Na mikrobiální remediaci kyanidu se podílejí bakterie, houby, řasy a kvasinky. Teplota a pH jsou důležité parametry pro stanovení rychlosti biodegradace; bylo zjištěno, že teplota 20–40 °C a 6–9 pH jsou optimální pro mikrobiální bioremediační proces. Schopnost degradovat kyanid byla zjištěna u několika bakteriálních druhů, zejména zástupců rodů *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Acinetobacter* a *Burkholderia*. Mimoto byla schopnost degradovat kyanid prokázána také u značného množství hub. Volný kyanid se v kyselém prostředí mění na plynný kyanovodík (HCN), výsledky bioremediace by proto měly být interpretovány s opatrností. Vhodnější je zásadité prostředí. Když koncentrace HCN dosáhne 0,3 mg/kg za anaerobních podmínek, současně se snižuje účinnost degradace [35; 1].

Komunity mikroorganismů mohou kyanid v odpadech rozkládat i při vyšších koncentracích. Aklimatizované mikroorganismy v aktivovaném kalu mohou často převádět nitrily na amoniak. Mikroorganismy (bakterie a houby) mohou v prostředí rozkládat kyanid prostřednictvím řady chemických reakcí, zejména hydrolytických, oxidačních nebo redukčních [35; 36].

Efektivita degradace kyanidů mikroorganismy je ovlivňována několika faktory. Úspěch biodegradace závisí na koncentraci mikroorganismů s fyziologickými a metabolickými schopnostmi degradovat znečišťující látky v kontaminovaném prostředí. Prvním krokem v procesu biologického ošetření je tedy výběr mikrobiálních druhů, které mohou tolerovat a degradovat kyanid v alkalickém prostředí. Účinnost degradace kyanidů významně ovlivňuje řada faktorů včetně koncentrace kyanidů, dostupnosti živin, dostupnosti kyslíku a přítomnosti dalších znečišťujících látek [35].

V posledních letech nabízí úplná znalost genomu z různých mikroorganismů možnost navrhnout strategie pro použití vhodných mikroorganismů ve specifickém bioremediačním nebo biotechnologickém procesu. I přes toxicitu kyanidu mohou kyanotrofní mikroorganismy, jako je například alkalická bakterie *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, použít kyanid a jeho deriváty jako zdroj dusíku pro růst. To umožňuje biodegradaci průmyslového odpadu obohaceného o kyanid. Genomické, transkriptomické a proteomické techniky aplikované na biodegradaci kyanidu (tzv. „kyaomické“ metody; z angl. „cyan-omics“) poskytují ucelený pohled, který zvyšuje globální porozumění genetické stavbě kyanotrofních mikroorganismů. Získané znalosti by mohly být využity pro biodegradaci průmyslových odpadů bohatých na kyanid a další biotechnologické aplikace. Ačkoli mnoho mikroorganismů umí využít kyanid jako zdroj dusíku, pouze genom tří kyanid-degradujících bakterií byl sekvenován, a to bakterií *Pseudomonas Pseudoalcaligenes*, *Pseudomonas fluorescens* a *Azotobacter chroococcum*. K určování, jaké bakterie mohou být pro daný bioremediační účel využity, nám pomáhají takzvané metabolické mapy. Problémem je, že odpadní vody jsou produkovány z mnoha různých odvětví, což *de facto* znamená rozdílnou kompozici těchto vod. Z důvodu chemické heterogenity různých průmyslových odpadních vod s obsahem kyanidu je důležité stále studovat nové kyanotrofní bakterie s rozdílnou katabolickou kapacitou [2; 37].

Jak již bylo zmíněno dříve, kyanid je nejdůležitější chemikálie pro extrahování zlata. Alternativou ke konvenčním chemickým metodám by mohla být biotěžba, což je metoda nepoškozující životní prostředí. Při této metodě jsou využity biologické systémy podporující a usnadňující extrahování a získávání kovů z rud. Spočívá ve využití kyanogenních bakterií. Tyto bakterie produkují kyanid a s kyanotrofními mikroorganismy sdílí rezistenci na kyanid. V současné době

jsou kyanogenní bakterie využívány pro získávání zlata z elektronických odpadů [2].

Co se týče odpadů ze šperkařství, pro účely bioremediace se uvažuje o využívání bakteriálního kmenu *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, izolovaného z kalu z řeky Guadalquivir ve Španělsku, jelikož má optimální pH toleranci vůči kovům. Může růst za alkalických podmínek s kyanidem, kyanatany a různými sloučeninami kyanidu a kovů, což pro něj představuje jediný zdroj dusíku. Pro bioremediaci kyanidu z odpadů vznikajících při galvanickém pokovování se experimentuje s užitím bakterií rodu *Bacillus*, kde zemědělské odpady slouží jako zdroj uhlíku [2].

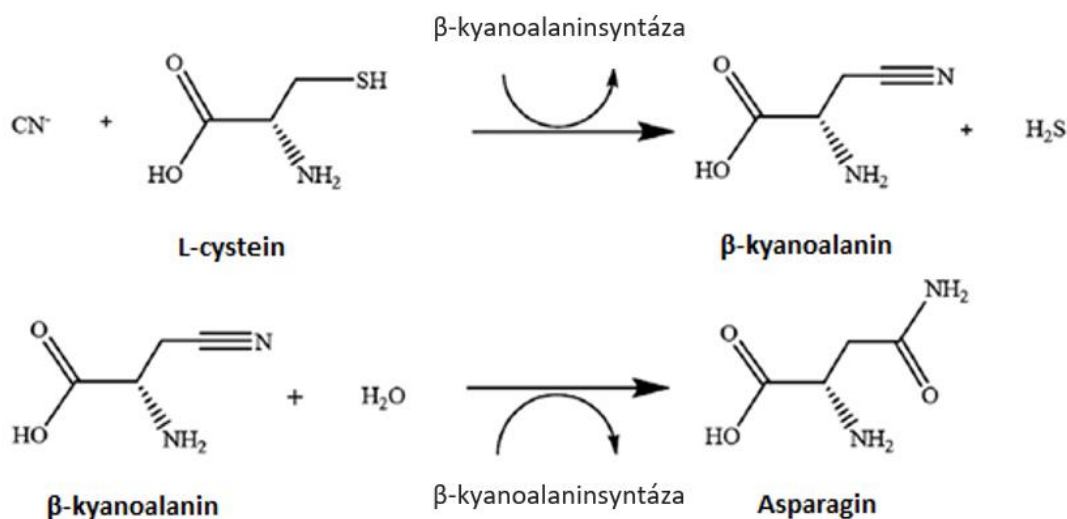
3.5.2 Další způsoby biodegradace kyanidů

Některé rostliny, některé druhy hub, mikro – či makro řas a vaskulárních rostlin jsou též známé pro své remediační mechanismy. Rostliny používají několik sanačních metod k přirozené sanaci znečišťujících látek. Bioremediace pomocí přirozených mechanismů v rostlinách byla klasifikována jako rhizoremediace a fytořemediace. Fytořemediace je jednou z úspěšných bioremediačních strategií pro detoxikaci kyanidu. Uměle vytvořené mokřady jsou typickým příkladem rostlinného systému akumulace, degradace a stabilizace polutantů [1; 35].

Kořenové exsudáty produkované kyanogenními suchozemskými i vodními rostlinami mohou obsahovat sloučeniny, které stimulují nebo regulují aktivitu mikroorganismů degradujících kyanidy. Tato metoda je nákladově efektivní a je atraktivní při vypořádávání se s touto škodlivou chemikálií. Například byla studována kontaminace řek kyanidem v blízkosti velkých průmyslových dolů. Vědci pěstovali vybrané druhy rostlin na kontaminovaných místech a pozorovali vysokou toleranci a účinnost při akumulaci kyanidu nebo rtuti v jejich kořenech

a nadzemích částech. Indická hořčice a parožnatka rovněž prokázaly svou schopnost při remediaci selenokyanatanů v horských a mokřadních oblastech. Účinnost odstranění přijatých kyanidů jejich kořeny a výhonky činila 9 % u parožnatky a 30 % u indické hořčice [35].

Dřevnaté rostliny degradují kyanid také efektivně z půdy i z vody. Mezi zástupce patří vrba, topol, růže a bříza, přičemž vrba je nejúčinnější a bříza je nejodolnější k vyšším koncentracím. Enzym β -kyanoalaninsyntáza katalyzuje konverzi kyanidu a cysteinu na β -kyanoalanin a sulfid. β -kyanoalanin se odbourává pomocí enzymu nitrilázy na kyselinu asparagovou a asparagin (viz Obr. 2), takže se nejen zneškodní kyanid, ale zároveň vznikají využitelné aminokyseliny a recykluje se dusík. β -Kyanoalaninsyntáza i nitriláza specifické pro β -kyanoalanin jsou široce zastoupené u vyšších rostlin a hrají důležitou roli v metabolismu kyanidů [35; 38].



Obrázek 2: Proces chemické přeměny cysteinu na asparagin [35]

Výběr vhodných druhů rostlin s požadovanými vlastnostmi je nezbytný pro dosažení požadovaných výsledků sanace. Jedním z parametrů je vhodná hloubka růstu kořene a morfologie. Kořeny rostlin mohou být směřovány tak, aby rostly do znečištěné zóny skrze hlubokou výsadbu a opláštění, což nutí

kořeny růst směrem dolů do znečištěné půdy a vody znečištěné kyanidem. Jsou-li známy symbioticky žijící mikrobiální skupiny odpovědné za remediační proces, je možné zvýšit početnost těchto druhů výběrem vhodného vegetačního porostu. Alternativním přístupem je tzv. bioaugmentace. Bioaugmentace je definována jako přidání biokatalyzátorů (obecně bakterií, ale také hub nebo enzymů) do prostředí za účelem degradace cílových znečišťujících látek. Pokud jsou houby zapojeny do symbiotického spojení s rostlinami, jsou někdy schopny zvětšit povrch kořene a mohou detoxikovat toxický kyanid stabilizací, extrakcí nebo degradací [35; 1].

Tabulka 3: Příklady rostlin používaných v kyanidové fytořemediaci [35]

Jméno rostliny	Běžný název	Fytořemediace
<i>Papaver dubium</i>	Mák	Tolerance vůči kyanidu
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Fazole	Kyanidová fototoxicita
<i>Plantago major</i>	Jitrocel	Tolerance vůči kyanidu
<i>Salix alba</i>	Vrba	Metabolismus kyanidu
<i>Scrophularia nodosa</i>	Fík	Tolerance vůči kyanidu
<i>Sonchus arvensis</i>	Bodlák	Tolerance vůči kyanidu
<i>Taraxacum officinale</i>	Pampeliška	Tolerance vůči kyanidu

Ukázalo se, že většina rostlinných druhů s fytořemediačními schopnostmi má nízkou toleranci a pomalou rychlost degradace kyanidů. Fytořemediace je zpravidla extrémně pomalý proces, který vyžaduje obrovskou plochu půdy a koncentraci kyanidů menší než 10 mg/l. Tento proces je proto prakticky nerealizovatelný v suchých regionech. V porovnání s mikrobiální degradací byl fytořemediační proces shledán účinnější v případě komplexů kyanidů kovů (např. kyanidů železa). V tomto případě byly rostlinné druhy nejen tolerantní, ale také vykazovaly pozitivní růstový vzorec v přítomnosti kyanidů [1].

Tabulka 4: Kapacita odstranění kyanidu odlišnými rostlinami [35]

Druh	Čeleď	Kapacita odstranění CN (mg CN kg ⁻¹ h ⁻¹)
<i>Sambucus chinensis</i> Lindl.	Zimolezovité	8,77

<i>Torilis japonica</i> (Houtt.) DC	Miříkovité	7,52
<i>Prunus persica</i> Sleb.	Růžovité	2,83
<i>Prunus pseudocerasus</i> Lindl.	Růžovité	6,28
<i>Salix babylonica</i> L.	Vrbovité	6,08
<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	Bobovité	3,45
<i>Chimonanthus praecox</i> (L.) Link	Sazaníkovité	5,97
<i>Liquidambar formosana</i> Hance	Vilínovité	5,22
<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & Cheng	Tisovcovité	5,32
<i>Capsicum frutescens</i> L.cv. 'Hexiniujiao'jiao'	Lilkovité	4,93
<i>Euonymus alatus</i> (Thunb.) Sieb	Jesencovité	4,27
<i>Zea mays</i> L.	Lipnicovité	4,75
<i>Cudrania tricuspidata</i> (Carr.) Bur.	Morušníkovité	4,33
<i>Sorghum vulgare</i> Pers.	Lipnicovité	3,98
<i>Calendula officinalis</i> L.	Hvězdnicovité	4,02
<i>Nymphaea teragona</i>	Leknínovité	3,6
<i>Salix matsudana alba</i>	Vrbovité	3,15
<i>Alternanthera philoeroides</i> Griseb	Laskavcovité	3,97
<i>Populus deltoides</i> Marsh.	Vrbovité	3,43
<i>Iris tectorum</i> Maxim	Kosatcovité	3,05
<i>Prunus persica</i> (L.) Batch	Růžovité	2,83
<i>Buxus sinica</i> (Rehd. & Wils.) M. Cheng	Zimostrázovité	2,72
<i>Trachycarpus fortunei</i> (Hook.f.) H. Wendl	Arekovité	1,63
<i>Viburnum odoratissimum</i> Ker-Gawl	Zimolezovité	2,28
<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Slézovité	1,52
<i>Pterocarya stenoptera</i> C.DC.	Ořešákovité	1,75
<i>Podocarpus macrophyllus</i> (Thunb.) D.Don.	Nohoplodovité	0,6
<i>Credrus deodara</i> (Roxb.) Loud	Borovcovité	0,23

Skupiny enzymů podílející se na mikrobiální degradaci jsou zvláště kyanidáza, kyanidhydratáza, nitriláza, nitrilhydratáza, kyaniddioxygenáza, kyanidmonooxygenáza, kyanáza a nitrogenáza. Na základě enzymatické degradace kyanidů bylo formulováno několik strategií, jak životní prostředí zbavit odpadu obsahujícího kyanid [1].

Při oxidační metodě se kyanidové sloučeniny přeměňují na amoniak a oxid uhličitý pomocí tří různých enzymů, tj. kyanidáza, kyanidmonooxygenáza, kyaniddioxygenáza [1].

Reduktivní způsob degradace kyanidů využívá enzym nitrogenázu. Tento enzym přeměňuje atmosférický dusík na amoniak a je také schopen redukovat kyanid na metan a amoniak [1].

Hydrolytická cesta je nejrozšířenějším způsobem degradace kyanidů mikroorganismy. Mnoho hydroláz, které jsou zodpovědné za degradaci anorganických i organických kyanidů a nitrilů, bylo rozsáhle studováno. Enzymy kyanidáza a kyanidhydratáza jsou vysoce specifické, co se týče jejich substrátové specifity. Kyanidhydratáza a kyaniddihydratáza hrají při hydrolytickém způsobu důležitou roli [1].

Kyanidázy jsou kyanid-degradující nitrilázy, které mají tu výhodu, že pro svoji katalytickou aktivitu nevyžadují žádný kofaktor ani ko-substrát. Tyto enzymy dokážou hydrolyzovat anorganický kyanid přímo na formiát bez tvorby jakéhokoli meziprojektu [1].

Kyanidhydratázy se podílejí na metabolismu kyanoaminokyselin. Vyskytují se pravděpodobně pouze u vláknitých hub. Bylo také zjištěno, že několik kyanidhydratáz transformuje nitrily, ale s nižší aktivitou ve srovnání s HCN. Je také známo několik hub, které mohou degradovat metalokyanid. Kyaniddihydratázy byly nalezeny pouze u několika bakteriálních rodů. Kyanidhydratázy a kyaniddihydratázy se od sebe liší v reakčních produktech (formamid nebo kyselina mravenčí). Mutanty kyaniddihydratáz a kyanidhydratáz byly připraveny ke studiu vztahů mezi strukturou a aktivitou v těchto enzymech nebo ke zlepšení jejich katalytických vlastností. Kyaniddihydratázy jsou při alkalickém pH méně aktivní než kyanidhydratázy. Některé z enzymů byly testovány na jejich potenciál eliminovat kyanid z odpadních vod. Kyaniddihydratázy byly také použity ke konstrukci kyanidových biosenzorů [1; 39; 40].

Společnost Novo-Nordisk zavedla enzymový přípravek obsahující kyanidhydratázu s průmyslovým potenciálem. Díky vysoké afinitě ke kyanidu byl tento přípravek schopen snížit vysoké koncentrace kyanidu (až do 26 g/l) na stopové hladiny při pH 7–7,6. Nadějným preparátem obsahující kyanidhydratázu byl „Cyclear“, jenž má výhodu životnosti 100–200 dnů, ale nevýhodu sensitivity k těžkým kovům. Ani jeden z těchto preparátů se však již nevyrábí [39].

Biodegradační mechanismus substituce spočívá v přenášení atomu síry z thiosulfátu na kyanid a tvorbu thiokyanatanu, který je dále asimilován jako zdroj dusíku během mikrobiálního růstu. Důležitou roli v substitučním mechanismu hrají enzymy rhodanázy. Rhodanázy hrají klíčovou roli v metabolismu síry. V kyanidovém metabolismu pomáhají rhodanázy přenášet síru z thiosulfátu na kyanid a vzniká méně toxická molekula thiokyanatanu, která je pak asimilována v cytoplazmě organismu. Rhodanázy jsou užívány také mnoha savci ke kyanidové detoxikaci v jejich metabolismu [1].

Tabulka 5: Biochemické reakce přeměny kyanidů katalyzované různými enzymy [35]

Typ reakce	Chemická reakce	Enzym	Mikroorganismus
Hydrolytická reakce	$\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCONH}_2$ $\text{R-CN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{R-CONH}_2$ $\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCOOH}$ $\text{R-CN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{R-COOH}$	Kyanidhydratáza Nitrilhydratáza Kyanidáza Nitriláza	Patogenní houby <i>Pseudomonas</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Brevibacterium</i> <i>Alcaligenes xylooxidans</i> <i>Klebsiella ozanae</i> , <i>Arthrobacter</i> sp., <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Norcadia</i> sp.
Oxidační reakce	$\text{HCN} + \text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{NAD(P)H} \rightarrow \text{HOCN} + \text{NAD(P)}^+ + \text{H}_2\text{O}$ $\text{HCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + \text{NAD(P)H} \rightarrow$	Kyanidmonooxygenáza Kyaniddioxygenáza Kyanáza	<i>Pseudomonas</i> sp. <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus cerus</i> , <i>Bacillus pumillus</i>

	$\text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{NAD(P)}^+$ $\text{HCN} + \text{O}_2 + \text{H}^+$ $+ \text{NADPH} \rightarrow$ $\text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{NADP}^+$		<i>Escherichia coli,</i> <i>Rhodococcus rhodochrous</i>
Reduktivní reakce	$\text{HCN} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_2=\text{NH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2=\text{O}$ $\text{CH}_2=\text{NH} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3-\text{NH} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_4 + \text{NH}_3$		
Substituční/transformační reakce	$\text{Cystein} + \text{CN}^- \rightarrow \beta\text{-kyanoalanin} + \text{H}_2\text{S}$ $\text{OAS} + \text{CN}^- \rightarrow \beta\text{-kyanoalanin} + \text{CH}_3\text{COO}^-$ $\text{CN}^- + \text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow \text{SCN}^- + \text{SO}_3^{2-}$	Kyanoalaninsyntáza Thiosulfátkyanid-sulftransferáza	<i>Bacillus megaterium</i> <i>Thiobacillus denitrificans,</i> <i>Bacillus subtilis,</i> <i>Bacillus stearothermophilus</i>
Biodegradace thiokyanátu	$\text{SCN}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{COS} + \text{NH}_3 + \text{OH}^-$ $\text{SCN}^- + 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CNO}^- + \text{HS}^- \rightarrow \text{HS}^- + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^- + \text{H}^+$ $\text{CNO}^- + 3\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{NH}_4^+ + 2\text{CO}_2$	Karbonylová cesta (thiokyanáthydrolyzáza) Kyanátová cesta (kyanáza)	

4 METODIKA

Základní metodou pro zhotovení práce byl sběr dat. Pro výsledkovou část bylo klíčové zjistit údaje od společností nakládajících s kyanidy v rámci své činnosti. S tímto záměrem byl telefonicky kontaktován pan Ing. Jan Slavík, Ph.D., vedoucí oddělení IPPC a IRZ na Ministerstvu životního prostředí, který mne následně odkázal na Integrovaný registr znečišťování (<https://www.irz.cz/>) a Evropský registr úniků a přenosů znečišťujících látek (<https://prtr.eea.europa.eu/>). Z těchto webů bylo zjištěno pět konkrétních společností na území České republiky, které produkují kyanidy. Tyto databáze poskytují další relevantní údaje o těchto společnostech, např. jejich činnostech, množství produkovaných kyanidů a používaných způsobech čištění kyanidových odpadů. Tyto údaje jsou pro konkrétní společnosti přehledně uvedeny v tabulce ve výsledkové části (Tab. 3). Tyto společnosti byly poté telefonicky a následně i emailem kontaktovány a požádány o spolupráci při tvorbě bakalářské práce. (zdroje informací jsou konkretizovány rovněž v Tab. 3). Žádané informace se podařilo získat u třech z pěti oslovených společností. Materiály a informace od nich získané (ve dvou případech ústní sdělení, v jednom případě písemná dokumentace [41]) byly kriticky analyzovány a porovnány. Srovnání společností ukázalo, že k odstraňování kyanidů využívají všechny tři chemické metody, a to postupy založené na stejném principu (oxidaci peroxidem vodíku). Analytickým rozborem odborné literatury popisující možnosti remediace biologickými a enzymovými metodami v laboratorním nebo pilotním měřítku [1; 2; 25; 26; 35; 36; 39; 40; 42; 43] byly navrženy alternativní bioremediační metody.

Výsledková část rovněž rozebírá možné kyanidové havárie a postupy, jak takové situace řešit. Jelikož pro nechtěný únik nebezpečných látek existují konkrétní metodické listy pouze pro chlor a čpavek, bylo třeba postup pro únik

kyanidu vytvořit deduktivně právě z nich a z ropných havárií ohrožujících vody [44; 45].

5 VÝSLEDKY

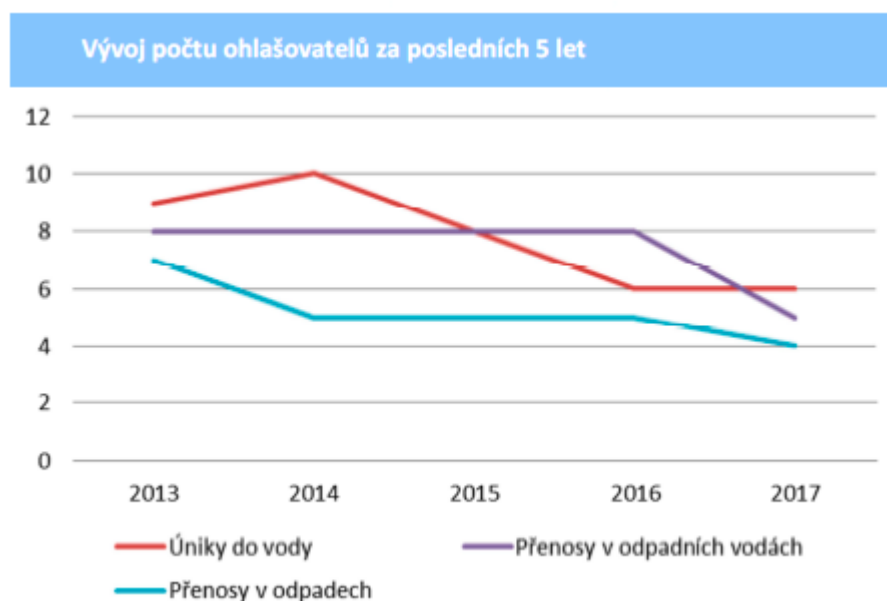
5.1 Analýza remediačních metod vybraných českých společností

5.1.1 Ohlašovatelé znečištění kyanidem

Podle údajů Evropského registru úniků a přenosů znečišťujících látek (E-PRTR) v České republice působí pět společností, které do vody vypouštějí kyanid. Tyto údaje jsou platné k roku 2017, což je nejaktuálnější dostupný rok v databázi. Ještě v roce 2010 byl počet společností produkujících odpadní vody dvojnásobný než v roce 2017. V roce 2010 byly v databázi oproti roku 2017 navíc společnosti Unipetrol RPA, s.r.o., DEZA, a.s., Veolia voda Česká republika, a.s., Energetika Třinec, a.s., a Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. V tomto směru se tedy situace v ČR v letech 2010-2017 zlepšila (viz Obr.3) [46].

Stejně údaje uvádí Integrovaný registr znečišťování (IRZ) spravovaný Ministerstvem životního prostředí ČR. Oba tyto registry evidují kyanid pod pořadovým číslem 82. Ohlašovací prahy pro úniky a přenosy pro hlášení do IRZ a E-PRTR jsou 50 kg/rok pro vodu, půdu a odpadní vody; pro přenos v odpadech to je 500 kg/rok.

Mezi současné ohlašovatele patří společnosti Lučební závody Draslovka a.s., Kolín (LZD), Ostravské vodárny a kanalizace, a.s. – provoz ČOV, Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s., Liberty Ostrava, a.s. (dříve pod názvem ArcelorMittal Ostrava, a.s.) a Třinecké železářny, a.s.



Obrázek 3: Vývoj počtu ohlašovatelů úniku a přenosu kyanidů v ČR v letech 2013-2017 (dokumentace IRZ)

Údaje o prvních třech společnostech byly získány telefonickou či mailovou korespondencí a podstatné informace jsou vypsány v tabulce níže. Tabulka je aktuální pro rok 2020. Společnost Liberty Ostrava a.s. nebyla sdílná, mluvčí společnosti odmítl poskytnout jakékoli relevantní informace. Komunikace se společností Třinecké železářny a.s. probíhala až v době pandemie, a tak se společnost podle sdělení generálního ředitele Ing. Jana Czudka omezovala pouze na činnosti nezbytně spjaté s chodem firmy, a informace tedy rovněž nebyly poskytnuty. Ke složení odpadních vod lze ale nalézt údaje v literatuře [47]; reprezentativní vzorek odpadní vody obsahoval kromě dalších látek fenoly (1,6 mg/l), kresoly (540 mg/l) a volný kyanid (CN⁻; 8 mg/l) (viz Tab. 3.). Běžné složení odpadních z koksoven uvádí také Papadimitriou a kol. [42]; mj. se jedná o fenoly (400–1200 mg/l), thiokyanatany (200–500 mg/l) a volný kyanid (4–15 mg/l). Je tedy vidět, že typické odpadní vody z těchto výrobních procesů obsahují řádově jednotky mg/l kyanidu. Vzhledem k tomu, že hygienické požadavky na vyčištěnou vodu stanovují hodnotu volného kyanidu cca 0.03 mg/l, musí vhodná

metoda bioremediace kyanidu snížit jeho hladinu v adekvátním časovém intervalu cca 100x (ze 4-15 na 0.03 mg/l) [42; 43].

Tabulka 6: Ohlašovatelé znečištění kyanidem

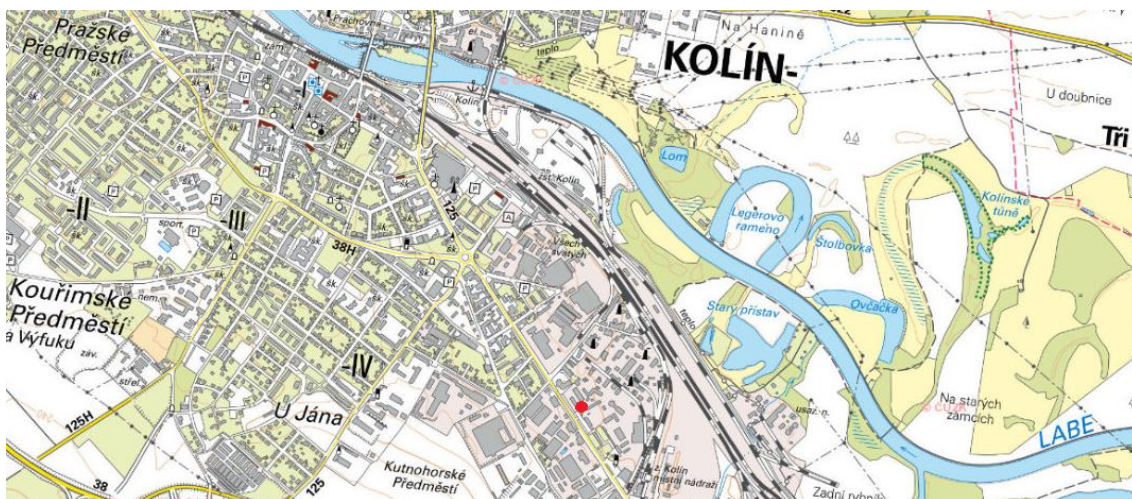
Vybrané české společnosti produkující kyanid			
Název společnosti	Průmyslová činnost	Množství CN	Zvolené remediační metody
Lučební závody Draslovka a.s. Kolín [41]	Průmyslová chemie, sektor chemických specialit (důraz kladen na CN) a agrochemikálie	Výroba – Cca 25 000 t/rok (2019) Odpady – zbytky	Oxidace peroxidem vodíku – katalyzátor modrá skalice
Ostravské vodárny a kanalizace a.s. – podle osobního sdělení Ing. Daniela Žárského (vedoucí provozu ČOV, ÚČOV Oderská 44/1106, 702 00 Ostrava-Přívóz) dne 4.2.2020	zajištění plynulé dodávky kvalitní pitné vody, zabezpečení odkanalizování, čištění odpadních vod	Stopové množství	Oxidace peroxidem vodíku, částečně kumulace v kalu
Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s. – podle osobního sdělení Ing. Ivety Dykové (vedoucí sekce Centrální laboratoře, 356 01 Sokolov) dne 5.2.2020	Výroba elektrické energie, hnědouhelná těžba, odborná likvidace odpadů vzniklých průmyslovou činností	Zbytky po analýzách	Oxidace peroxidem vodíku
Třinecké železářny a.s. [47]	Metalurgie – produkce ocelových dlouhých válcovaných výrobků	Cca 8 mg/l	nezjištěno

Poté, co je odpadní voda z uvedených společností remediována v chemických čističkách odpadních vod, je dále vypouštěna do dvou řek, Odry a Labe, kam odchází v poměru cca 85 %/ 15 %, což je dále znázorněno na Obr. 4 [46].



Obrázek 4: Schéma celkového množství vypouštěného na území ČR [46]

Jako příklad společnosti produkující kyanidy v rámci své činnosti byla pro tuto práci vybrána společnost Lučební závody Draslovka a.s. Kolín. Tato společnost sídlí na východě Středočeského kraje v Kolíně. Městem protéká řeka Labe, do které směřují odpadní vody a do které by směřoval i potenciální únik kyanidů (viz Obr. 5)



Obrázek 5: Umístění společnosti Lučební závody Draslovka a.s., Kolín vůči řece Labe [48]

Kyanidy se v této společnosti vyrábí neutralizací louhu sodného nebo draselného kapalným kyanovodíkem. Tento neutralizační proces je nejpoužívanější metodou ve světě. Kyanovodík je vlastní výroby a je mezistupněm pro výrobu kyanidů. Vzniklý roztok kyanidu se zahušťuje ve vakuové odparce na krystalickou kaši, krystaly se z kaše odstředí a suší se ve vírové sušárně. Podle potřeby se usušený kyanid plní do sudů přímo jako prášek nebo se tabletuje na kompaktoru a tablety se pak plní buď do sudů, nebo do beden. Výtěžek kyanidu draselného přepočtený na množství vstupního kyanovodíku je 89 %. Pro kyanid sodný to je 95,7 % [41].

Kyanid sodný je uskladňován do vaků, které jsou dále vloženy do dřevěných beden. Další možností uskladnění je vložení do ocelových sudů s plastovou vložkou nebo i bez vložky. Sudy jsou hermeticky uzavřeny, uzávěry jsou zajištěny plombou. Kapalné kyanidy se dopravují ve vratných obalech. Skladovací plocha kyanidů je jasně označena a nepovolaným osobám není povolen vstup do místností, ve kterých se kyanidy skladují nebo zpracovávají. Zajišťování dvojité ochranné stěny přízemních a záchytných jámek snižuje riziko uvolňování kyanidů do půdy nebo podzemních vod [41].

Produkty musí být uskladněny ve skladu kyanidů v hermeticky uzavřených nádobách odděleně od jiných látek. Kyanidy nesmí být skladovány v blízkosti silných oxidačních činidel (např. dusičnany, chlorečnany, kyselina dusičná, peroxidy), vody nebo výrobků obsahujících vodu. Sklad je vybaven odpovídajícími prostředky požární ochrany a zabezpečen proti vniknutí nepovolaných osob [41].

Výroba kyanovodíku i kyanidů probíhá v objektech účelově určených k provozování těchto výrob. Tyto objekty jsou vybaveny ochrannými systémy a prostředky, které omezují vliv na životní prostředí včetně havarijních stavů [41].

Odpadní vody jsou okyselovány kyselinou sírovou. Okyselené vody jsou stripovány v provozu HCN. Stripování je proces, kterým jsou z kapaliny odháněny těkavé látky proudem procházejícího plynu. Kondenzát ze stripovací kolony je využit ve výrobě HCN, stripovaná voda je na chemické čističce odpadních vod upravována roztokem NaOH a zbytkové kyanidy odstraňovány reakcí s peroxidem vodíku. Použitím technologie založené na H_2O_2 se nevytvářejí soli nebo halogenované organické sloučeniny, které vznikají jako vedlejší produkty při použití chloru [41].

Oplachová voda obsahující kyanidy se sbírá uzavřeným potrubním systémem a skladuje se v nádržích. Oplachová voda se potom recykluje zpět do procesu. Na chemické čističce odpadních vod jsou společně zpracovávány odpadní vody z výrob HCN a kyanidů [41].

Odpadní vody, produkované ve velkých objemech, jsou zpracovávány oxidačním způsobem na chemické čističce odpadních vod. Chemická oxidace umožňuje transformaci polutantů, u kterých je biologická degradace náročná nebo nemožná, které by představovaly riziko v dalších fázích biologického nebo fyzikálně-chemického čištění v rámci čistírny odpadních vod a u kterých by

samotné vypuštění do kanalizační soustavy bylo rizikové. V případech, kdy je chemická oxidace upřednostňována před oxidací biologickou, závisí způsobu řešení na místní situaci. Pokud jsou čištěna jen malá množství odpadních vod nebo v lokalitě není dostupné žádné biologické čištění, je možné doporučit chemickou oxidaci jako možnost čištění namísto výstavby centrální biologické čističky odpadních vod. V biologické čističce odpadních vod jsou zpracovány pouze splaškové vody závodu [41].

Výroba je zajištěna v rizikových uzlech automatickými monitorovacími a regulačními prvky, kterými je realizován systém automatických "blokad". Monitorovací systém je napojen na počítačovou síť společnosti. V závodě je aplikován systém mezinárodního kodexu nakládání s kyanidy z roku 2002 (*International Cyanide Management Code; ICMC*) [41].

Lučební závody Draslovka, a.s. Kolín jsou závodem, ve kterém se s nebezpečnými látkami (kyseliny, louhy, chlor, chlorkyan, kyanovodík, kyanidy apod.) nakládá dlouhodobě a za tuto dobu provozovatel získal bohaté zkušenosti jak s bezpečným způsobem nakládání s těmito látkami, tak i s odstraňováním nejrůznějších poruch nebo havárií různého rozsahu. Pro prevenci možných havárií a předcházení vzniku nestandardních stavů jsou ve společnosti vypracovány výrobně technologické dokumentace – pracovní instrukce. Tyto instrukce jsou zpracovány individuálně pro každou výrobu, která je v Lučebních závodech Draslovka provozována. Každá pracovní instrukce obsahuje podrobný a zcela jednoznačný postup pro najíždění, provoz a odstavení příslušného výrobního zařízení, a to jak při plánovaném odstavení zařízení, tak i pro případ, že zařízení musí být odstaveno z důvodů vzniku nestandardního stavu. Důsledné dodržování těchto instrukcí je základním předpokladem pro minimalizaci možných havárií [41].

Základním materiálem pro minimalizaci environmentálních rizik při možných haváriích a nestandardních stavech je podniková organizační směrnice „Vodohospodářský havarijný plán“. Tento materiál je na rozdíl od pracovních instrukcí zpracován pro celý závod LZD souhrnně a jeho obsah je v souladu s vyhláškou č. 450/2005 Sb. V rámci této směrnice jsou v souladu s požadavky výše citované vyhlášky uvedeny např. veškeré závadné látky, se kterými se v LZD nakládá, popisy cest možných havarijních odtoků závadných látek, popis stavebních, technologických a konstrukčních preventivních opatření a zejména pak postupy při vzniklých haváriích, a to jak z hlediska bezprostředního způsobu odstraňování příčin havárie a jejího zneškodnění, tak i z hlediska způsobu a rozsahu hlášení těchto havárií. Zpracovaný postup zásahu je nedílnou součástí havarijního plánu. „Vodohospodářský havarijný plán“ byl v roce 2018 aktualizován a následně byl 28. 5. 2018 Krajským úřadem Středočeského kraje schválen [41].

Areál LZD podléhá dikci zákona o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými přípravky. Množství nebezpečné látky umístěné v areálu závodu je větší, než je množství uvedené v příloze č. 1 k tomuto zákonu a areál se proto zařazuje do tzv. „skupiny B“ [41].

5.1.2 Kritické posouzení současných metod degradace kyanidu

V průmyslové praxi se pro degradaci kyanidu zatím používají převážně metody chemické, které jsou zavedené, tradiční a ekonomicky dostupné. Výdaje na zajištění bezpečnosti při práci s kyanidy a dalšími odpadními látkami mohou činit citelný podíl na celkových výdajích společnosti. Z ekonomického hlediska je proto velmi důležité dbát na optimalizaci operačních postupů, tzn. aby byl zvolený postup co nejefektivnější a za co nejnižší možnou cenu.

I když má každá ze zmíněných společností jiný předmět podnikání (tj. energetika, produkce a zpracování kovů, chemický průmysl, metalurgie a zpracování odpadu a odpadních vod), při nakládání s kyanidovým odpadem využívají stejnou remediační metodu – oxidaci peroxidem vodíku. Ostravské vodárny a kanalizace a.s. využívají také kumulaci v kalu (přesnější údaje bohužel nebyly poskytnuty). Bližší informace k této metodě jsou uvedeny v kapitole 5.1.3.

Oxidace peroxidem vodíku je jednou z nejpoužívanějších metod z několika důvodů. Především je peroxid vodíku relativně cenově dostupný – jeden litr 30% stabilizovaného peroxidu vodíku se prodává cca za 920 Kč (VWR Chemicals, Stříbrná Skalice, ČR), ale ve velkoobjemových odběrech může být jeho cena ještě daleko nižší. Peroxid vodíku se rozkládá bez vzniku nebezpečných produktů a během reakce s organickými složkami odpadní vody nevznikají žádné toxické plyny, soli ani jiné toxické produkty. Jeho aplikace je také relativně jednoduchá a efektivní. To ale neznamená, že se i s tímto postupem nepojí nevýhody. Metoda oxidace peroxidem vodíku vyžaduje, aby byl v roztoku přítomen katalyzátor (nejčastěji měď) ke zvýšení účinnosti degradace kyanidu. V roztoku ale zůstávají rezidua mědi, která poté mohou způsobovat environmentální problémy, jelikož měď je těžký kov. Může reagovat se sulfidy v pevné fázi, což vede k vysoké spotřebě činidla. Optimální dávka činidla (oxid měďnatý) je přibližně 5 g/l a optimální teplota 35 °C. Nedostatkem této metody je též hydrolyza kyanidu na nechtěný amoniak [49; 50].

5.1.3 Návrh alternativních metod

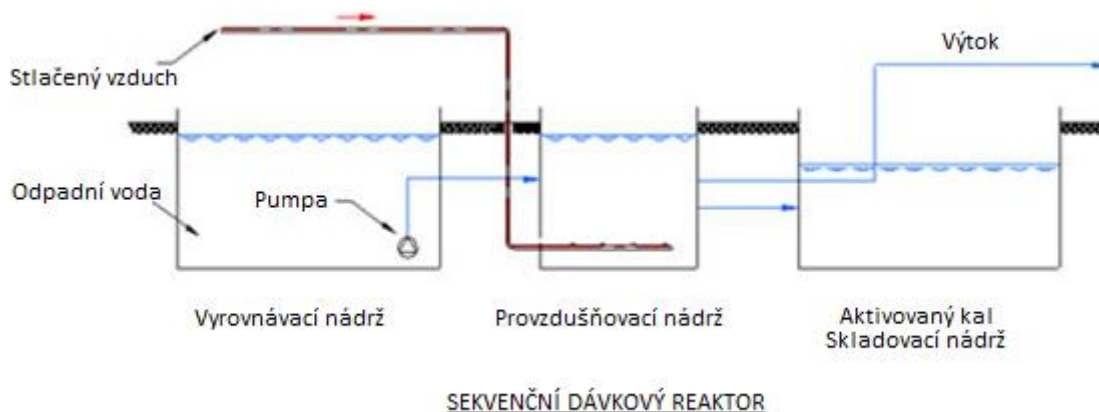
Máme-li navrhnout alternativní metodu vyčištění odpadní vody z koksoven, která obsahuje asi 4-15 mg volného kyanidu na litr (jako např. koksárenská odpadní voda, viz kap. 5.1.2) nebo odpadní vody ze společnosti Lučební závody Draslovka a.s., Kolín (kde koncentrace neznáme, ale předpokládáme podobné),

na základě analýzy různých možností z dostupné literatury se jeví jako nejvhodnější tyto možnosti:

a) Použití aktivovaného kalu

Aktivovaný kal je nejlevnější biokatalyzátor, ale může dojít k jeho poškození při náhlém zvýšení koncentrace kyanidu v odpadní vodě. Lze např. použít kal z městské čistírny odpadních vod a adaptovat ho. Procesy degradace kyanidů probíhající během remediace aktivovanými kaly jsou volatilizace, metabolismus, adsorpce na biomasu a chemická reakce. Kyanidy jsou přeměněny na thiokyanátové ionty, které vykazují toxické vlastnosti pouze při vysokých koncentracích. Pro aktivované kaly se dá využít více druhů bakterií a mikrofauny, čímž se mění parametry jako retenční čas, organické zatížení a čas sedimentace. To znamená, že se kaly dají svým způsobem naprogramovat dle činnosti, kterou zrovna potřebujeme. Studie ukazují, že značné zvýšení efektivity se dá docílit přidáním práškového aktivovaného uhlíku [36; 51; 42].

Nejúčinnější systém aktivovaného kalu je sekvenční dávkový reaktor (viz Obr. 6), který vykazuje účinnost 90 % odstranění polutantů. Po přidání aktivovaného uhlíku do provzdušňovací nádrže vykazuje odpadní voda zanedbatelnou toxicitu a je možné ji vypouštět i do environmentálně citlivých oblastí [42].

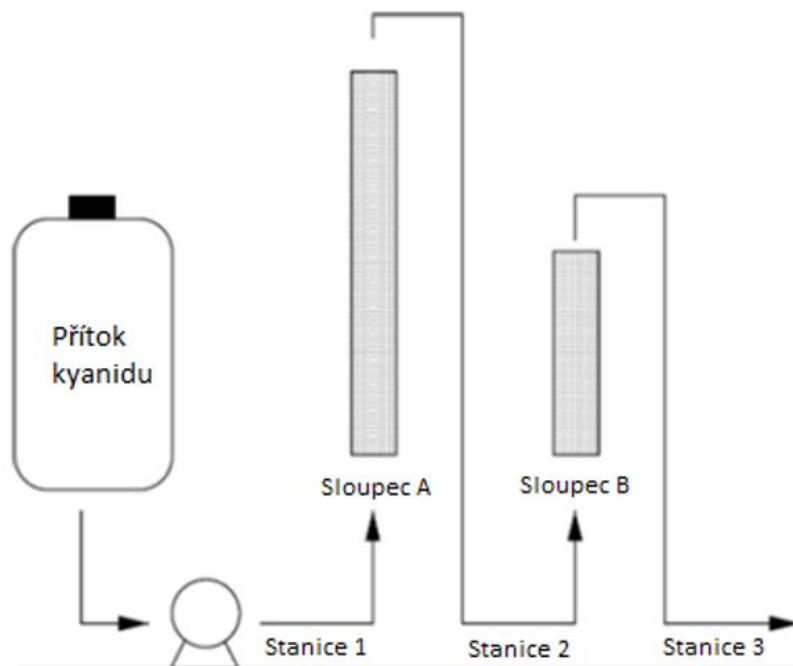


Obrázek 6: Schéma sekvenčního dávkového reaktoru [52]

b) Použití sušeného mycelia houby *Fusarium oxysporum*

Jinou možností je použití sušeného mycelia houby *Fusarium oxysporum*, které obsahuje enzym kyanidhydratasu. Tento typ katalyzátoru přechodně vyráběla v devadesátých letech 20. století firma Imperial Chemical Industries ve Velké Británii. Katalyzátor tohoto typu by také mohl být imobilizován, např. adsorpcí na nosič jako např. aktivním uhlí. U tohoto biokatalyzátoru lze předpokládat vyšší cenu pro náklady na kultivaci houby a sušení mycelia [53; 39].

Působením kyanidhydratázy vzniká formamid, který není zcela neškodnou látkou, a je výhodné přeměnit ho na formiát a amonné ionty. To je možné za použití enzymu amidasy z bakterie *Methylobacterium* sp. Hydrolyza formamidu amidasou je zařazena jako druhý stupeň bioremediace (viz Obr. 7) [53].



Dvouloupcový systém sloužící k detoxifikaci přítoku kontaminovaného kyanidem. Kyanid v prvním sloupci byl odbourán myceliem houby *Fusarium oxysporum* CCMI 876. Výtok vstupuje do druhého sloupce obsahujícího *Methylobacterium* sp. RXM CCMI908, kde dochází k likvidaci formamidu.

Obrázek 7: Systém detoxifikace myceliem houby *Fusarium oxysporum* [53]

c) Použití rekombinantních buněk

Můžeme také zvážit použití rekombinantních buněk nebo extraktu z buněk, které produkují požadované enzymy. Několik kyanidhydratas bylo připraveno v *E. coli*. S rekombinantními buňkami je však ten problém, že se kvůli předpisům o geneticky modifikovaných organismech nesmějí vypouštět do přírodního prostředí. Dá se také použít extrakt z buněk, čímž problém s geneticky modifikovanými organismy odpadá. Purifikovaný enzym byl sice vyzkoušen pro bioremediaci odpadů z galvanizace kovů v laboratorním měřítku, ale jeví se jako nevhodný pro průmyslové použití pro nákladnost purifikace. Příprava rekombinantních buněk nebo extraktu je sice dražší než v případě mycelia, ale aktivita na 1 mg katalyzátoru bude nejméně 10x vyšší. Proto tuto metodu při

současných cenách nelze považovat pro rutinní průmyslovou aplikaci za preferenční [40; 54; 55].

5.2 Možné havárie související s únikem kyanidu na území ČR

5.2.1 Nástin možného řešení

Vzhledem k tomu, že na území ČR se kyanidy a jejich deriváty vyrábějí a využívají (viz kap. 5.1.1 Ohlašovatelé znečištění kyanidem), únik kyanidu vlivem havárie je v ČR sice díky rozvinutému systému bezpečnostních opatření v příslušných podnicích nepravděpodobný, ale ne nemožný. Pokud by k takové mimořádné situaci došlo, stane se tak pravděpodobně následkem působení člověka, ať už při skladování, ve výrobě nebo při přepravě (statisticky nejpravděpodobnější). Únik kyanidů může také nastat druhotně v důsledku jiné havárie. Dalším možným scénářem je únik v důsledku přírodních účinků (nejspíše povodní) [44].

Pro účely této práce uvažujeme únik do vody, jelikož při havárii spojené pouze s únikem do interních prostor společnosti není většinou třeba aplikace speciálních remediačních metod. V zásadě můžeme uvažovat tři možnosti: únik do stojatých vod, tj. rybníků nebo přehrad, únik do tekoucích vod, tedy řek, a únik do kanalizace. Havárie spojená s únikem kyanidu do vody spadá do kategorie „havárií ohrožujících vody“ (viz kap. 3.1). Původce havárie je povinen činit bezprostřední opatření k odstranění následků havárie a nahlásit havárii na krajské operační a informační středisko hasičského záchranného sboru.

Rozsah ohrožení se přirozeně liší v závislosti na množství uniklého kyanidu, době, po jakou uniká a místě úniku. Z výše zmíněných představuje nejhorší možnost únik kyanidu do přehrady, jelikož ty představují zdroj pitné vody. Ve všech zmíněných případech je ohrožení obyvatelstva minimální. Riziko však představují nepřímé následky, jako jsou omezení nebo přerušování dodávky pitné

vody z důvodu kontaminace. Dekontaminace nádrže je však snazší oproti například kontaminaci vodních toků pro menší riziko šíření kontaminantu, kdy odstranění následků může trvat až několik měsíců. Děje se tak obzvláště v případě zasažení vodních toků (viz Tab. 2).

Vzniklé škody mohou dosahovat desítek, ne-li stovek milionů korun za náklady vynaložené na dekontaminaci, likvidaci havárie a sanaci. K tomu je však nutno přičíst škody na zvířatech, rostlinách, plodinách a škody vzniklé z přerušení výroby, jež se těžko kvantifikují.

5.2.2 Postupy provedení záchranných a likvidačních prací

Každý ze zmiňovaných typů úniku kyanidů v kapitole 5.2 by vyžadoval jiný přístup k řešení situace ze strany jednotek požární ochrany. Všechny tyto možnosti úniku jsou nesmírně škodlivé pro životní prostředí a dotčené organismy. Únik kyanidů na terén je nejméně nebezpečný. Stačí jej s použitím ochranných pomůcek neodkladně zachytit a uschovat do vhodných kontejnerů, znečištěný povrch pak sanovat vhodným oxidačním činidlem [44].

Pokud hrozí nebo nastal únik do kanalizace, je třeba neprodleně informovat správce kanalizace a provozovatele čističky odpadních vod. Jednotky požární ochrany se nadále snaží zamezit vniku kyanidů do kanalizace utěsněním vpustí nejlépe gumovou fólií. V žádném případě není možné očistit kontaminované území navedením kyanidů do kanalizace bez výslovného povolení vodohospodářského orgánu. Pokud se kyanid do kanalizace dostane, je třeba přehradit dotčená místa a za použití např. peroxidu vodíku danou oblast dekontaminovat [44].

Konkrétní opatření vypadají následovně; původce havárie nahlásí únik kyanidů jednotkám požární ochrany, případně správci povodí. Ať už kyanid

unikne do tekoucí nebo stojaté vody, jednotky požární ochrany zajistí základní úkoly spjaté s ochranou zdraví a životů, kterými jsou:

- Informovat příslušné úřady, tj. Česká inspekce životního prostředí a vodoprávní úřad – vodoprávní úřad řídí práce při zneškodňování havárie a urguje původce havárie, aby provedl asanační práce,
- identifikovat a zajistit příčiny havárie, aby kyanid nadále neunikal,
- zamezit šíření kyanidů,
- vyhodnotit rozsah mimořádné události,
- uzavřít místo zásahu a omezit vstup nepovolaným osobám na místo zásahu,
- evakuovat vážně postižené území,
- aplikovat chemické nebo remediační metody,
- informovat ohrožené obce,
- průběžně informovat veřejnost o vývoji mimořádné události [44; 45].

6 DISKUZE

Cílem bakalářské práce byla analýza současných metod používaných pro odstranění kyanidů z odpadů a odpadních vod na území ČR a výběr nejlepších alternativních metod bioremediace těchto odpadů, aby byla společností zabývající se touto problematikou předložena možná alternativa k současným (chemickým) metodám. Dalším cíem práce bylo navržení postupů při úniku kyanidů do prostředí.

Kyanid je jednou z nejdiskutovanějších nebezpečných látek a bioremediační metody s postupem výzkumu získávají stále více na popularitě pro jejich účinnost a selektivitu; v neposlední řadě i s ohledem na životní prostředí, neboť biologické metody jsou k přírodě nejšetrnější.

Návrh vhodné alternativní bioremediační metody degradace kyanidu závisí na mnoha různých faktorech a konkrétní situaci. Biologické metody jsou v porovnání s chemickými šetrnější k životnímu prostředí a mohou být srovnatelně účinné a v některých případech i levnější – to však ve velké míře závisí na ceně biokatalyzátoru. Využití bioremediačních metod je však podstatně specifitější, tj. cílené na daný polutant a vyžaduje podmínky vhodné pro daný katalyzátor. Chemické metody oproti tomu degradují zpravidla více látek (výše uvedený peroxid vodíku je nespecifické oxidační činidlo) a nejsou tak citlivé na změnu prostředí. Nežádoucí faktory, jakou jsou např. vysoké koncentrace anorganických solí, extrémní pH apod., mohou bioremediační proces narušit. Je tedy třeba vybranou metodu nejprve vyzkoušet na konkrétních reálných vzorcích v laboratorním měřítku. Biologické metody obecně pracují pomaleji než chemické, čímž nastává problém, chceme-li rychle odstranit kontaminaci způsobenou např. havárií, zejména pokud se jedná o velké objemy znečištěného materiálu. Náklady na biokatalyzátory lze snížit jejich opakovaným nebo kontinuálním použitím a pro tento účel je možné použít různé způsoby

imobilizace buněk nebo enzymů (zachycením v matrici, adsorpcí na nosič, kovalentní vazbou na nosič). Aby byla zvolená metoda využitelná v širším měřítku, cena imobilizace však nesmí být neúměrně vysoká.

Většina enzymů, které převádějí kyanid na méně toxické nebo netoxické produkty, vyžaduje pro tuto přeměnu specifické podmínky. Nitrogenázy vyžadují striktně anaerobní prostředí. Rhodanázy vyžadují ke své funkci thiosíran, který převádějí na thiokyanatan. Naproti tomu enzymy typu nitriláz tyto nedostatky nemají. Přeměňují kyanid za pomoci jednoduchého hydrolytického štěpení, a proto jsou pro tento účel nejvhodnější volbou. Ve fytopatogenních houbách, jako je *Fusarium solani* a *Fusarium lateritium*, nalezneme kyanidhydratázy (typ nitriláz), které přeměňují kyanid na formamid. Jiný typ nitriláz, bakteriální kyaniddihydratázy, přeměňují kyanid na formiát a amonné ionty. Obě skupiny enzymů mají mnoho kvalit – nevyžadují žádné kofaktory, při teplotách ca. do 30 °C jsou poměrně stabilní, a jsou rezistentní k vysokým koncentracím kyanidu a dalším kontaminantům. Mohou se použít jako purifikovaný enzym, surový buněčný extrakt nebo ve formě celých buněk. Proto se nitrilázy jeví jako vhodné pro různá prostředí, odpady různého původu (z různých průmyslových odvětví) a s různými vlastnostmi (různé pH, koncentrace dalších kontaminantů) [54].

Nejúčinnější metodou se zdá být použití rekombinantních buněk pro jejich vysokou specifickou aktivitu. Je však nutné navrhnout jejich použití tak, aby vyhovovalo předpisům o geneticky modifikovaných organismech tak, tj. zabránit úniku buněk do prostředí [55].

Možnostmi čištění odpadních vod se u nás zabývaly i aplikované grantové projekty ve spolupráci se samotnými ohlašovатели, např. TA04021212 (viz [záznam na stránkách RVVI](#)). Ve zmíněném projektu byly navrženy možnosti oxidace

organických látek za použití vzduchu obohaceného ozónem, adsorpce organických látek z odpadní vody na koksovém prachu a odstranění organických látek z odpadní vody biologickými metodami. V tomto projektu se však jednalo především o snížení obsahu fenolů, což ale s problematikou kyanidů souvisí. Byl navržen postup se dvěma enzymy. Tyrosinasa oxiduje fenoly a kyanidhydratasa odstraní kyanidy, které jsou inhibitory tyrosinasy [47]. Použití analogického postupu s enzymem kyanidhydratasou pro odstranění kyanidu se tedy v průmyslové praxi jeví jako proveditelné, což je i ve shodě s dostupnou literaturou.

Jiný aplikovatelný grantový projekt TA01021368 (viz <https://www.rvvi.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=TA01021368>). předkládal jako výstup technologický proces využitelný v praxi – postup aklimatizace anaerobního kalu. Tento postup byl aplikován na odpadní vody z koksáren, konkrétně v zařízení o objemu 5 000 l. Tento postup je tedy praxí ověřený a použitelný, čímž podporuje v této práci navržený moderní přístup remediace pomocí aktivovaného kalu.

Ideální by mohlo být (alespoň v určitých případech) kombinovat metodu aktivovaného kalu a použití sušeného mycelia houby *Fusarium* obsahující enzym kyanidhydratázu. Možné řešení by spočívalo v tom, že by se odpadní voda převáděla přes filtry s myceliem, který by většinu kyanidu přeměnil na formamid. Následně by se v nádrži s aktivním kalem odboural zbytkový kyanid spolu se vzniklým formamidem (a případně dalšími znečišťujícími látkami, např. fenoly). Kombinace dražšího enzymu použitého v 1. stupni s levným aktivním kalem (2. stupeň) není úplně obvyklá, ale její výhoda spočívá v tom, že aktivní kal nepřijde do kontaktu s vysokými koncentracemi kyanidu, které by jinak oslabily jeho účinnost. Zároveň se tím odstraní i vzniklý formamid. Tato

kombinace by tak byla vhodná zejména v případech vysoce znečištěné odpadní vody.

Bojový řád jednotek požární ochrany obsahuje, pokud se jedná o kategorii nebezpečných látek, jako pomůcku pro velitele zásahu metodické listy týkající se čpavku a chloru. Stálo by za zvážení, zda nezpracovat podobný dokument pro kyanid, popř. i další látky, i když je pravděpodobně výrazně nižší riziko jejich úniku [56].

V současné době by však bylo řešení úniku do stojatých vod značně komplikované. Neexistují prakticky žádné nezávadné způsoby, jak kyanid z vody odstraňovat. Prvotní a hlavní snahou je zamezení úniku v co nejvyšší možné míře. Dá se využít specializovaná firma, která pravděpodobně použije jednu z chemických metod oxidace peroxidem vodíku nebo alkalická chlorace. Pro únik kyanidu do stojatých vod, jako je rybník nebo přehrada, by se pro dekontaminaci dal pravděpodobně využít stejný postup, jaký je již doporučen pro ustálené použití k čištění průmyslových odpadů, tj. použití sušeného mycelia houby *Fusarium* (nicméně takové řešení nebylo nikdy vyzkoušeno a je možné, že vzhledem k potřebnému množství je tato metoda využitelná pouze pro menší objemy). Použití reaktorů s aktivními kaly, přes které by se voda filtrovala a neustále kolovala, je teoreticky také možná metoda, ale ještě zdlouhavější. Případně by se biologické a chemické metody daly kombinovat. Terénní úpravy potřebné k aplikaci chemických nebo biologických prostředků provedou jednotky požární ochrany. V tomto případě by úkoly jednotek požární ochrany spočívaly také ve varování před toxicitou vody a v remediaci území za spolupráce provozovatele, jehož zaviněním vzniklá situace nastala [49].

Při úniku do vodních toků by biologické čištění pravděpodobně nebylo možné pro rychlé šíření kontaminace a nižší rychlost degradace. Dekontaminace musí

být rychlá a spolehlivá a je třeba ošetřit obrovské objemy odpadu. Chemické metody by v tomto případě byly efektivnější právě pro svou rychlost odbourávání kyanidu. Vhodnou metodou je například oxidace peroxidem vodíku, jehož výhody jsou zmíněny výše, anebo alkalická chlorace. Alkalická chlorace byla použita i v případě katastrofy v Baia Mare. Reakce krizových orgánů nebyla bohužel tehdy dostatečně rychlá, jelikož vláda zdržovala informace. Výsledky chlorace tedy nebyly nijak přesvědčivé. Obecně ale platí, že je relativně snadné tuto metodu použít, dokáže oxidovat kyanid na thiokyanatan a kyanatan, a dále na dusík a oxid uhličitý a nevyžaduje žádný katalyzátor. Úkoly jednotek požární ochrany jsou v tomto případě podstatně rozsáhlejší. V první řadě je třeba varovat obyvatelstvo před toxicitou vod (systém varování a vyrozumění, webové stránky města atp.). V případě ohrožení obecného zdraví by dalším úkolem bylo evakuovat obyvatelstvo z části nebo celého území zasaženého mimořádnou událostí [34; 49].

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá řešením úniku toxických kyanidů do prostředí. V teoretické části seznamuje čtenáře s problematikou výskytu kyanidu, jeho škodlivostí, metodami odstraňování, pojmy týkající se havárie, výhody a nedostatky průmyslově používaných metod.

V praktické části jsou analyzovány dekontaminačních postupy u společností, které se kyanidem zabývají, a dále jsou navrženy perspektivních biologických metod pro odstraňování kyanidů jak při průmyslovém užití, tak v případě úniku při havárii. Z výsledků práce vyplývá, že existuje prostor pro zvýšení efektivity při odstraňování toxických kyanidů v průmyslu i při úniku spjatém s havárií. Práce uvažuje únik do stojatých i tekoucích vod, ale v druhém zmíněném případě nenachází žádné vhodné alternativní postupy, které by byly zásadně odlišné od stávajících. Nově navržené postupy, i když pečlivě uvážené, je nutné brát s rezervou a bude potřeba jejich ověření v praxi. Výsledky však naznačují, že bioremediace kyanidu může být efektivní, nákladově výhodná, ekologická a atraktivní alternativa k běžným fyzikálním a chemickým postupům.

Metody bioremediace kyanidů pomocí enzymů zatím nejsou plně prozkoumány a je jistě možné, že v budoucnosti bude nalezen nový, ještě lepší způsob. Tato práce ukazuje, že fúze krizového řízení s dalšími obory, jako právě mikrobiologie a biotechnologie, je možná a žádoucí, a tímto nebo podobným směrem by se mohl ubírat i další výzkum.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČR – Česká republika

E-PRTR – Evropský registr úniků a přenosů znečišťujících látek (European pollutant release and transfer register)

EU – Evropská unie

HCN – kyanovodík

HZS ČR – hasičský záchranný sbor České republiky

IRZ – integrovaný registr znečišťování

IZS – integrovaný záchranný systém

JPO – jednotky požární ochrany

LZD – Lučební závody Draslovka a.s., Kolín

SaP – síly a prostředky

MU – mimořádná událost

ZaLP – záchranné a likvidační práce

ZZS – zdravotnická záchranná služba

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SHARMA, Monica, Yusuf AKHTER a Subhankar CHATTERJEE. A review on remediation of cyanide containing industrial wastes using biological systems with special reference to enzymatic degradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2019, **35**(5). DOI: 10.1007/s11274-019-2643-8. ISSN 0959-3993. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11274-019-2643-8>
- [2] LUQUE-ALMAGRO, Víctor, Conrado MORENO-VIVIÁN a María ROLDÁN. Biodegradation of cyanide wastes from mining and jewellery industries. *Current Opinion in Biotechnology: Environmental biotechnology*. 2015, **2016**(38), 9–13.
- [3] VETTER, János. Plant cyanogenic glycosides. *Toxicon*. 2000, **38**(1), 11-36. DOI: 10.1016/S0041-0101(99)00128-2. ISSN 00410101. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041010199001282>
- [4] SINGHAL, Poonam, Santosh SATYA a Satya N . NAIK. Cyanogenic Toxicity and Human Health. *Current Nutrition & Food Science*. 2016, **12**(2), 150-154. DOI: 10.2174/1573401312666160218233434. ISSN 15734013.
- [5] Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. *National Research Council*. Washington, D.C: The National Academies Press, 2002, (2). DOI: 10.17226/10522.

- [6] ŠOVČÍKOVÁ, Lubica. *Závažné priemyselné havárie a ich nasledky* [online]. In: . Žilina, 2005 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.fsi.uniza.sk/kpi/dokumenty/zph.pdf>
- [7] ŠÍN, Robin. *Medicína katastrof*. Praha: Galén, 2017. ISBN 978-80-7492-295-4.
- [8] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 239/2000 Sb.: Zákon o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2000, číslo 239. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-239>
- [9] PECL, Jan. *Jednotky PO* [online]. Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR: Hasičský záchranný sbor České republiky, 2020 [cit. 2020-05-20].
- [10] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 254/2001 Sb.: Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: *Sbírka zákonů*. 2001. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>
- [11] *MIMOŘÁDNÉ UDÁLOSTI: Terminologický slovník - krizové řízení a plánování obrany stát* [online]. Odbor bezpečnostní politiky a prevence kriminality: Ministerstvo vnitra, 2016 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/clanek/terminologicky-slovník-krizove-řízení-a-planování-obrany-státu.aspx>
- [12] VIDUNOVÁ, Jana a Robin ŠÍN. *Medicína katastrof*. Praha: Galén, 2017. ISBN ISBN978-80-7492-295-4.

- [13] *Bojový řád jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu: Dekontaminace, dekontaminační prostor.* Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky: Ministerstvo vnitra, 2017.
- [14] HON, Zdeněk a Vladimír PITSCHMANN. ŠÍN, Robin. *Medicína katastrof.* Praha: Galén, 2017. ISBN 978-80-7492-295-4.
- [15] VAVROVÁ, Lenka, Tomáš HOLEC a René MILDORF. ŠÍN, Robin. *Medicína katastrof.* Praha: Galén, 2017. ISBN isbn978-80-7492-295-4.
- [16] FOLWARCZNY, Libor a Jiří POKORNÝ. *Evakuace osob.* Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2006. ISBN 9788086634920.
- [17] *Varování obyvatelstva v České republice* [online]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2017 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/varovani-obyvatelstva-v-ceske-republice.aspx>
- [18] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 224/2015 Sb.: Zákon o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2015. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-224>
- [19] PELCLOVÁ, Daniela. *Nemoci z povolání a intoxikace.* 2. vyd. Praha: Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1183-X.

- [20] *Havárie ohrožující vody - Ropné havárie: Bojový řád jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu.* generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky: Ministerstvo vnitra, 2017.
- [21] *Ochrana před povodněmi* [online]. Ministerstvo životního prostředí, c2008-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/ochrana_pred_povodnemi
- [22] ŠENOVSÝ, Michal, Vilém ADAMEC a Zdeněk HANUŠKA. *Integrovaný záchranný systém: management záchranných prací.* 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. ISBN 80-86634-65-5.
- [23] BOLARINWA, Islamiyat, Caroline ORFILA a Michael MORGAN. Amygdalin content of seeds, kernels and food products commercially-available in the UK. *Food Chemistry.* 2014, **152**, 133-139. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.11.002. ISSN 03088146. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814613016245>
- [24] RUBO, Andreas, Raf KELLENS, Jay REDDY, Norbert STEIER a Wolfgang HASENPUSCH. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Alkali Metal Cyanides.* **2006**. DOI: 10.1002/14356007.i01_i01.
- [25] MUDDER, Terry, Michael BOTZ a Adrian SMITH. Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes. *MINING JOURNAL BOOKS LTD.* Londýn, 2010, (), 327-333.
- [26] LA BROOY, S.R., H.G. LINGE, G.S. WALKER a Martin CHMÁTAL. Review of gold extraction from ores: emerging tools in the biodegradation

- and biodetection of cyanide. *Minerals Engineering*. 1994, 7(10), 1213-1241. DOI: 10.1016/0892-6875(94)90114-7. ISSN 08926875. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0892687594901147>
- [27] MCMANUS, JOHN a RODOLFO JR. Effects of Some Destructive Fishing Methods on Coral Cover and Potential Rates of Recovery. *Environmental Management*. 1997, 21(1), 69-78. DOI: 10.1007/s002679900006. ISSN 0364-152X. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s002679900006>
- [28] BARBER, Charles a Vaughan PRATT. Poison and Profits: Cyanide Fishing in the Indo-Pacific. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*. 1998, 40(8), 4-9. DOI: 10.1080/00139159809604600. ISSN 0013-9157. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00139159809604600>
- [29] PITSCHMANN, Vladimír. *Toxikologické aspekty chemických havárií a zneužití chemických zbraní* [online]. Kladno, 2016 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: https://predmety.fbmi.cvut.cz/sites/default/files/predmet/3319/metodicka_prirucka/17PBPTAH_20160219_201157_2db7141b685d196ae6bcef5185d3e432.pdf. Studijní opora. ČVUT.
- [30] Bezpečná přeprava nebezpečných látek. *EnviGroup* [online]. Envi Group s.r.o., 2015 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.envigroup.cz/bezpecna-preprava-nebezpecnych-latek.html>
- [31] DIRECTIVE 2006/21/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC. In: *Official*

Journal of the European Union. neuvědno: European Parliament, Council of the European Union, 2006, 11.4.2006, 102/15. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32006L0021>

- [32] RANKIN, W. J. *Minerals, metals and sustainability: meeting future material needs*. Neuvědno. Collingwood: CSIRO, 2011. ISBN 978-041-5684-590.
- [33] BRYAN, Nichol. *Danube: Cyanide Spill: Environmental Disasters*. Ilustrované vydání. World Almanac Education, 2003. ISBN 0836855051, 978-0836855050.
- [34] CUNNINGHAM, Solveig Argeseanu. *Incident, accident, catastrophe: cyanide on the Danube*. USA, 2005. University of Pennsylvania.
- [35] KUMAR, Rahul, Shouvik SAHA, Sarita DHAKA, Mayur KURADE, Chan KANG, Seung BAEK a Byong-Hun JEON. Remediation of cyanide-contaminated environments through microbes and plants: a review of current knowledge and future perspectives. *Geosystem Engineering*. 2016, **20**(1), 28-40. DOI: 10.1080/12269328.2016.1218303. ISSN 1226-9328. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/12269328.2016.1218303>
- [36] PAPADIMITRIOU, C.A., X. DABOU, P. SAMARAS a G.P. SAKELLAROPOULOS. COKE OVEN WASTEWATER TREATMENT BY TWO ACTIVATED SLUDGE SYSTEMS. *Global NEST Journal*. Greece, 2006, **2006**(1), 1-6.
- [37] PINTO ZEVALLOS, Delia, Marco PEREIRA QUEROL a Bianca AMBROGI. Cassava wastewater as a natural pesticide: Current knowledge and challenges for broader utilisation. *Annals of Applied Biology*. 2018,

- 173(3), 191-201. DOI: 10.1111/aab.12464. ISSN 00034746. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/aab.12464>
- [38] CRESSEY, Peter a John REEVE. Metabolism of cyanogenic glycosides: A review. *Food and Chemical Toxicology*. 2019, **125**, 225-232. DOI: 10.1016/j.fct.2019.01.002. ISSN 02786915. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027869151930002X>
- [39] MARTÍNKOVÁ, Ludmila, Alicja VESELÁ, Anna RINÁGELOVÁ a Martin CHMÁTAL. Cyanide hydratases and cyanide dihydratases: emerging tools in the biodegradation and biodetection of cyanide. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2015, **99**(21), 8875-8882. DOI: 10.1007/s00253-015-6899-0. ISSN 0175-7598. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00253-015-6899-0>
- [40] RINÁGELOVÁ, Anna, Ondřej KAPLAN, Alicja VESELÁ et al. Cyanide hydratase from *Aspergillus niger* K10: Overproduction in *Escherichia coli*, purification, characterization and use in continuous cyanide degradation. *Process Biochemistry*. 2014, **49**(3), 445-450. DOI: 10.1016/j.procbio.2013.12.008. ISSN 13595113. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359511313006934>
- [41] BAJER, Tomáš. *Dokumentace o hodnocení vlivů na životní prostředí dle přílohy č. 4 zákona č.100/2001 Sb. v platném znění: Konceptní řešení výroby v LZD, a.s. Kolín*. Vydání 2019. Kolín: ECO-ENVI-CONSULT, 2019.
- [42] PAPADIMITRIOU, C.A., P. SAMARAS a G.P. SAKELLAROPOULOS. Comparative study of phenol and cyanide containing wastewater in CSTR and SBR activated sludge reactors. *Bioresource Technology*. 2009, **100**(1), 31-

37. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.06.004. ISSN 09608524. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852408005221>
- [43] CHMÁTAL, M., A.B. VESELÁ, A. RINÁGELOVÁ, O. KAPLAN, L. MARTÍNKOVÁ, P. KALENDA a J. LEBOJACKÝ. Using the tyrosinase from *Agaricus Bisporus* and the cyanide hydratase from *Aspergillus Niger* K10 in the degradation of phenol and o-, m-, and p-cresol and the free cyanide from coke plant wastewater. *Czech Society of Industrial Chemistry*. Mikrobiologický ústav AV ČR, 2016. ISSN 978-80-86238-82-1.
- [44] HAVARIJNÍ ZNEČIŠTĚNÍ VOD - ÚNIK ROPNÝCH PRODUKTŮ. *Krizport* [online]. Jihomoravský kraj: Portál krizového řízení JmK, 2018 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://krizport.firebrno.cz/plany-havarijni/a2-05-havarijni-znecisteni-vod-unik-ropnych-produktu>
- [45] ŠAFR, Gusfav. *Organizace záchranných prací: studijní opora*. Kladno: České vysoké učení technické v Praze FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ, 2014.
- [46] Pollutant releases. *European Pollutant Release and Transfer Register* [online]. Copenhagen: European Environment Agency, 2006 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://prtr.eea.europa.eu/#/pollutantreleases>
- [47] MARTÍNKOVÁ, Ludmila a Martin CHMÁTAL. The integration of cyanide hydratase and tyrosinase catalysts enables effective degradation of cyanide and phenol in coking wastewaters. *Water Research*. 2016, **102**, 90-95. DOI: 10.1016/j.watres.2016.06.016. ISSN 00431354. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135416304547>

- [48] Nahlížení do katastru nemovitosti: zobrazení mapy. ČÚZK [online]. Praha 8: Český úřad zeměměřičský a katastrální, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://nahliznidokn.cuzk.cz/VyberKatastrMapa.aspx>
- [49] Cyanide destruction. *SGS minerals services*. Francie: Société Générale de Surveillance SA, 2005, (018), 1-3.
- [50] AMAOUCHE, Hamza, Salima CHERGUI, Farid HALET, Ahmed Réda YEDDOU, Abdelmalek CHERGUI, Boubekour NADJEMI a Aïssa OULD-DRIS. Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide catalyzed by copper oxide. *Water Science and Technology*. 2019, **80**(1), 126-133. DOI: 10.2166/wst.2019.254. ISSN 0273-1223. Dostupné také z: <https://iwaponline.com/wst/article/80/1/126/68976/Removal-of-cyanide-in-aqueous-solution-by>
- [51] WHITE, DANIEL M. a WILLIAM SCHNABEL. TREATMENT OF CYANIDE WASTE IN A SEQUENCING BATCH BIOFILM REACTOR. *Water Research*. 1998, **32**(1), 254-257. DOI: 10.1016/S0043-1354(97)00167-X. ISSN 00431354. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004313549700167X>
- [52] *Water Maxim: Sequencing Batch Reactor* [online]. Velká Británie: Key Multimedia, 2007 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.watermaxim.co.uk/sequencing-batch-reactor.php>
- [53] CAMPOS, M. Graça, Pablo PEREIRA a J. Carlos ROSEIRO. Packed-bed reactor for the integrated biodegradation of cyanide and formamide by immobilised *Fusarium oxysporum* CCM1 876 and *Methylobacterium* sp. RXM CCM1 908. *Enzyme and Microbial Technology*. 2006, **38**(6), 848-854. DOI:

10.1016/j.enzmictec.2005.08.008. ISSN 01410229. Dostupné také z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141022905003637>

- [54] BASILE, Lacy J., Richard C. WILLSON, B. Trevor SEWELL a Michael J. BENEDIK. Genome mining of cyanide-degrading nitrilases from filamentous fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008, **80**(3). DOI: 10.1007/s00253-008-1559-2. ISSN 0175-7598. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00253-008-1559-2>
- [55] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška o bližších podmínkách nakládání s geneticky modifikovanými organismy a genetickými produkty*. In: . Ministerstvo životního prostředí, 2004, 209/2004 Sb.
- [56] *Bojový řád jednotek požární ochrany: metodické listy* [online]. Praha: Hasičský záchranný sbor České republiky, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/bojovy-rad-jednotek-pozarni-ochrany-v-dokumentech-491249.aspx>

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Kyanid v odlišných skupenstvích [35]	30
Obrázek 2: Proces chemické přeměny cysteinu na asparagin [35]	34
Obrázek 3: Vývoj počtu ohlašovatelů úniku a přenosu kyanidů v ČR v letech 2013-2017 (dokumentace IRZ)	43
Obrázek 4: Schéma celkového množství vypouštěného na území ČR [46] ...	45
Obrázek 5: Umístění společnosti Lučební závody Draslovka a.s., Kolín vůči řece Labe [48]	46
Obrázek 6: Schéma sekvenčního dávkového reaktoru [52]	52
Obrázek 7: Systém detoxifikace myceliem houby <i>Fusarium oxysporum</i> [53]	53

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1: Vystavení kyanovodíku v zaměstnání [5].....	13
Tabulka 2: Havárie spojené s únikem kyanidu [32]	27
Tabulka 3: Příklady rostlin používaných v kyanidové fytořemediaci [35].....	35
Tabulka 4: Kapacita odstranění kyanidu odlišnými rostlinami [35].....	35
Tabulka 5: Biochemické reakce přeměny kyanidů katalyzované různými enzymy [35].....	38
Tabulka 6: Ohlašovatelé znečištění kyanidem	44