

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ –  
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
HORNICKO-GEOLOGICKÁ FAKULTA  
Institut environmentálního inženýrství

**VLIV SLANÝCH DŮLNÍCH VOD NA HALOFYTNÍ ROSTLINY**  
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Autor:**

Anna Brodská

**Vedoucí bakalářské práce:**

RNDr. Jana Nováková, Ph.D.

Ostrava 2016

**VŠB – TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA**  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY  
Institute of environmental engineering

**THE INFLUENCE OF MINE SALTWATER ON HALOTHYTA**  
BACHELOR'S THESIS

**Author:**

Anna Brodská

**Supervisor:**

RNDr. Jana Nováková, Ph.D.

Ostrava 2016

## Zadání bakalářské práce

Student: **Anna Brodská**

Studijní program: B2102 Nerostné suroviny

Studijní obor: 3904R005 Environmentální inženýrství

Téma: **Vliv slaných důlních vod na halofytní rostliny**  
**The influence of mine saltwater on halophyta**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl bakalářské práce
2. Slané důlní vody
  - 2.1 Charakteristika podle horního zákona
  - 2.2 Charakteristika podle vodního zákona
  - 2.3 Chemismus sodno-chloridových vod
3. Bioakumulace
  - 3.1 Fytoremediace
4. Slanomilné rostliny
5. Závěr

### Seznam doporučené odborné literatury:

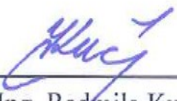
- ZEMAN, Josef, ČERNÍK, Miroslav, ŠUPÍKOVÁ, Irena. Geochemický model přírodního mokřadního systému. In Ekomonitor : Těžba a její dopady na životní prostředí 2. [s.l.] : [s.n.], 2008. s. 31-36.
- DVORSKÝ, J., et al, Ostravsko-karvinský detrit : Spodnobádenská bazální klastika české části hornoslezské pánve. Ostrava 2007, Montanex 150 s., ISBN 80-7225-23-3.
- PITTER, P., Hydrochemie. 4. přeprac. vyd. Vysoká škola chemicko- technologická v Praze, Praha 6 : Vydavatelství VŠCHT, 2009. 579 s. ISBN 978-80-7080-701-9.
- PAČES, Tomáš. Chemické rovnováhy v přírodním systému voda-hornina-atmosféra. Vyd. 1. Praha: Academia, 1972, 193 s.
- ČERNÍK, Miroslav. Geochemie a remediace důlních vod. Vyd. 2. Praha: Aquatest, c2009, 254 s. ISBN 978-80-254-2921-1.
- GRMELA, Arnošt. Hydrogeologie: aplikovaná hydrogeochemie. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1982, 109 s.
- ČERNÝ, Ivo. Uhelné hornictví v ostravsko-karvinském revíru. Ostrava: Anagram, 2003, 564 s. ISBN 80-7342-016-3.
- CRAWFORD, Ronald L a Don L CRAWFORD. Bioremediation: principles and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, xii, 400 s. ISBN 0-521-01915-x.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

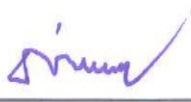
Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Jana Nováková, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
doc. Dr. Ing. Radmila Kučerová  
vedoucí institutu



  
prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení

- Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu. Byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 29. 4. 2016



Anna Brodská

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce paní RNDr. Janě Novákové, PhD. za ochotu, trpělivost, cenné rady a pomoc při vypracování celé práce. Rovněž patří dík mé rodině a blízkým za podporu při celém mém studiu.

## **Anotace**

V dnešní době se doly na Ostravsko – Karvinsku uzavírají, přesto je problematika důlních vod stále aktuální. Slané důlní vody negativně ovlivňují životní prostředí, faunu i flóru, proto by jim měla být věnována větší pozornost.

Vyskytují se i rostliny, které se adaptovaly na vysokou salinitu. Jedná se o halofytní rostliny, převážně rákosiny, které je možné využívat k fytořemediacím.

Bakalářská práce je zaměřena na vliv slaných důlních vod na halofytní rostliny. Charakterizuje důlní vody, jejich chemismus, dále se zabývá bioakumulací a fytořemediací a na závěr jsou popsány halofytní rostliny a jejich adaptační mechanismy.

**Klíčové slova:** slané důlní vody, halofytní rostliny, bioakumulace, fytořemediace, abiotický stres

## **Abstract**

Even though mines in the vicinity of Ostrava and Karvina are being closed down nowadays, the issue of mine waters is still topical. Salt mine waters negatively influence the environment, fauna, and flora and for that reason, special attention should be paid to them.

There are plants which have adapted to a high level of salinity. These are especially halophytes, mostly reeds, which can be used for phytoremediation.

The bachelor thesis focuses on the influence of salt mine waters on halophytes. It characterizes mine waters and their chemistry. Furthermore, the thesis deals with bioaccumulation and phytoremediation. Finally, halophytes and their adaptation mechanisms are described.

**Keywords:** salt mine water, halophytes, bioaccumulation, phytoremediation, abiotic stress

## OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Důlní vody</b> .....	<b>2</b>
2.1	Dělení důlních vod podle zdrojů.....	2
2.2	Dělení důlních vod podle složení.....	3
2.3	Základní typy důlních vod .....	4
2.4	Charakteristika důlních vod podle horního zákona .....	7
2.5	Charakteristika důlních vod podle vodního zákona.....	9
2.6	Charakteristika chemismu slaných důlních vod .....	10
<b>3</b>	<b>Bioakumulace</b> .....	<b>15</b>
3.1	Faktory ovlivňující bioakumulaci .....	15
3.2	Fytoremediace.....	16
3.2.1	Fytodekontaminace .....	18
3.2.2	Fytostabilizace .....	23
<b>4</b>	<b>Halofytní rostliny</b> .....	<b>24</b>
4.1	Charakteristika halofytních rostlin.....	24
4.2	Zástupci halofytních rostlin .....	27
4.2.1	Kosmatec třpytivý ( <i>Mesembryanthemum crystallinum</i> ).....	27
4.2.2	Slanorožec rozprostřený ( <i>Salicornia prostrata Pall.</i> ).....	28
4.2.3	Tlustobýl ( <i>Sesuvium portulacastrum (L.)</i> ).....	29
4.2.4	Rákos obecný ( <i>Phragmites australis</i> ).....	30
4.2.5	Sítina Gerardova ( <i>Juncus Gerardii Loisel.</i> ).....	32
4.2.6	<i>Bassia indica</i> a situace v Izraeli.....	32
<b>5</b>	<b>Vliv slaných důlních vod na halofytní rostliny</b> .....	<b>35</b>
5.1	Salinita .....	35
5.2	Salinita a rostliny .....	36



5.3 Tolerance salinity u halofyt .....	37
<b>6 Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>40</b>
<b>Použité normy a zákony .....</b>	<b>44</b>
<b>Seznam zkratk .....</b>	<b>45</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>46</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>46</b>

## 1 ÚVOD

Dobývání nerostných surovin, má nejen na Ostravsko – Karvinsku, ale v celé České republice závažný vliv na životní prostředí a to nejen při vlastní těžbě, ale i po jejím ukončení. K hlavním ekologickým problémům důlních činností řadíme zhoršení kvality podzemních a povrchových vod, které musí být často nákladným způsobem čištěny.

Za problematické důlní vody považujeme vody z hlubinné těžby uhlí (vysoce zasolené důlní vody) a vody z povrchové těžby hnědé uhlí (kyselé důlní vody), které vznikají vyluhováním a oxidací pyritů.

Slané důlní vody mají negativní dopad jak na faunu, tak i na flóru. Ovšem u některých rostlin se během evoluce vyvinuly mechanismy pro odolávání abiotickému stresu, například zasolení. Mezi tyto rostliny řadíme halofytní rostliny, kterým je věnována samostatná kapitola.

Cílem této práce je, formou rešerše, shrnout vlivy slaných důlních vod na halofytní rostliny a jejich možné využití při fytořemediacích. První část je věnována důlním vodám, především slaným důlním vodám na Ostravsko - Karvinsku, dále se jsou detailně popsány procesy bioakumulace a fytořemediace, na kterých se podílí i halofytní rostliny. Poslední část se zabývá halofytními rostlinami, jejich zástupci a vlivem na abiotický stres a zasolení.

## 2 DŮLNÍ VODY

V České republice, převážně na Ostravsko- Karvinsku, ovlivňuje ráz krajiny těžba uhlí. Na území ostravsko- karvinského revíru (OKR) najdeme 90 % všech zásob uhlí ČR. V současné době je společnost OKD jediným producentem černého uhlí v naší republice. Na Ostravsku jsou již všechny doly uzavřeny, ale na Karvinsku se nyní OKD stará o tři doly, které jsou činné a to důl Paskov (zde se těží nejkvalitnější uhlí), dále důl ČSM a důl Karviná. [1]; [6]

Uhlí, které těží a prodává společnost OKD má nízký obsah síry a je bez příměsí. Toto zušlechtěné a upravené uhlí lze využívat jako palivo, nebo pro účel koksování, ale své využití nachází i v chemickém průmyslu a v jiných průmyslových oblastech. Černého uhlí je na tomto území ročně produkováno přibližně 11 mil. tun. [6]

Vlivem těžby vznikají (mimo jiné) velké objemy důlních vod, které pronikají do hlubinných nebo povrchových důlních území. Zde se spojují se stálými podzemními nebo povrchovými vodami, jejichž složení se liší podle horninového prostředí, které je narušeno hornickou činností. [1]; [2]

### 2.1 Dělení důlních vod podle zdrojů

Důlní vody pochází z rozdílných zdrojů. Dělíme je na:

#### - **Antropogenní zdroje**

Vody provozní a technologické jsou důlní vody, které řadíme mezi **vody vzniklé lidskou činností**. Tyto vody bývají do důlního prostředí vedeny uměle a to ve většině případu potrubím. Používají se jako vody protiprašné a protipožární ochrany, ale zejména pro vrty, při nichž se používá výplach vodou a pro hydraulické mechanismy. V některých případech, kdy se nejedná o roztoky nebo tekutiny speciálního složení, hovoříme o vodách prostých. K těmto potřebám se používají už vyčerpané důlní vody (vody jsou recirkulované a dosáhly různých stupňů mineralizace). [14]

#### - **Přírodní zdroje**

**a) Ložiskové vody** mohou být hromaděny buď v ložiskové výplni nebo v horninách (nadložních, podložních nebo bočních), jestliže mají hydraulickou spojitost s ložiskem.

Jedná se o vody podzemní a vytváří systémy s napjatou nebo volnou hladinou vody. Ložiskové důlní vody dále dělíme na :

- *Ložiskové vody ovlivněné důlní činností.* Pro vodu pohybující se ve zvodněné struktuře je charakteristický vznik nových, umělých odvodňovacích bází. Po zásahu člověka do přirozené geohydrodynamické struktury dochází ke změnám hydraulických parametrů horninových komplexů, tlakového režimu, hydrochemickému složení atd. Pohyb vody je řízen zákony proudění kapalin horninovým prostředím. [14]

- *Ložiskové vody neovlivněné důlní činností.* Pohyb vody ve zvodněné struktuře se řídí zákony proudění kapalin horninovým prostředím a je ovlivňován jak geologickými, tak hydrogeologickými faktory. Jedná se o přirozený stav vody bez zásahu člověka. [14]

**b) Mimoložiskové vody** jsou vody, které se vyskytují v přírodních zvodních v horninách. Jde o přírodní vody, které infiltrují z povrchu do důlních děl, např. vody atmosférických srážek, vody z povrchových toků a nádrží. Přítok těchto vod do důlních děl je způsoben činností člověka, který ovlivňuje horninové prostředí důlní činností a to především vznikem nových cest infiltrace. Tyto zdroje nebo akumulace přírodních vod jsou v hornickém neporušeném stavu izolovány hydraulickými bariérami od vod ložiskových. [14]

- **Stařinové vody**

**Stařinové vody** mají specifické postavení v hydrogeologii. U tohoto typu vod dochází ke smísení vod provozních, ložiskových a mimoložiskových. Tyto vody proudí nebo se hromadí v prázdných důlních prostorech apod., ale nejde o přírodní akumulaci vod. Zanedbatelné množství stařinných vod je v zavřených dolech v případě, že nebyly tyto vody úmyslně využity k zatopení ložiska. [14]; [43]

## 2.2 Dělení důlních vod podle složení

Podle složení dělíme důlní vody na :

**a) Důlní vody kontaminované anorganickou suspenzí** (např. chloridem sodným), jedná se o vody z hlubinných dolů, které jsou charakteristické svou vysokou mineralizací. Chloridy mohou dosahovat jednotek až desítek g/l > 1, (z kationů dominuje sodík, v menším rozsahu jsou zastoupeny sírany a ostatní alkalické kovy např. Ca, Mg, K). Stálým zdrojem chloridů v důlních vodách jsou více méně jen přítoky podzemních vod z miocénních uloženin a z karbonu nebo jeho hlubšího podloží. [34]

**b) Kyselé důlní vody tzv. AMD** (acid mine drainage neboli kyselá důlní drenáž) Oxidace pyritu a sulfidů (galenit, markazit, sfalerit atd.) je hlavní činitel, který do důlních vod vnáší vodíkový iont. Pro tento typ důlních vod je typické nízké pH, extrémně vysoký obsah síranů a to více než 1000 mg/l, těžkých kovů např. u železa a hliníku je koncentrace větší než 100 mg/l, dále Cu, Pb, Cd, Co, Cr, Ni, Hg u nichž je koncentrace okolo 10 mg/l, polokovů např. As, Sb a ostatních prvků, které sice nejsou toxické, ale mohou limitovat využití vody, např. Al, Mn, Si, Ca, Na, K, Mg, Ba, F. Všechny tyto prvky jsou výsledkem oxidace sulfidických minerálů při níž vzniká kyselina a zároveň se do vod uvolňují sírany a kovy a dochází k loužení prvků z hlušiny. [1]; [33]

Kyselé důlní vody mají silné korozivní účinky a způsobují nepříznivé okyselení povrchových vod při jejich vypouštění, vyluhují totiž mimo horniny i části strojních zařízení. [1]

**c) Důlní vody s obsahem minerálních látek**, důlní vody, které jsou znečištěné bakteriemi a organickými látkami nebo zvláštními toxickými látkami (např. při úpravě zlata uvolněním kyanidů). [1]

### 2.3 Základní typy důlních vod

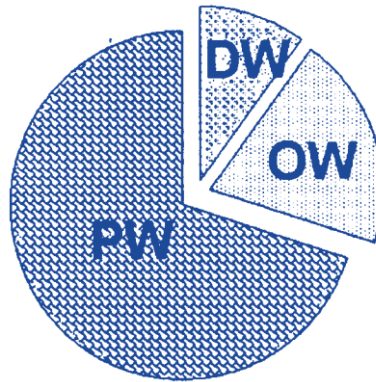
Nelze jednoznačně definovat, jaké jsou „typické důlní vody“ pro jednotlivá ložiska. Zdroje důlních vod jsou rozmanité a typy důlních vod se v rámci určitého podniku mění v prostoru i čase. Mění se s postupem dobývacích prací do hloubky, ke změně také dochází v závislosti na kvantitě a složení přírodních zdrojů důlních vod v dané době těžby apod. [14]

V ložiscích v České republice jsou vymezeny tyto typy důlních vod:

(legenda k níže přiloženým grafům:

- PW... vody infiltrované z povrchu (vody povrchových recipientů a mělkých zvodní, srážkové vody)
- DW... ložiskové vody
- OW... provozní vody) [14]

### Freaticko – atmosférický typ důlních vod tzv. PAT



Obrázek 1: PAT, typ důlní vody [14]

Z grafu (viz Obrázek 1) lze vyčíst, že největší podíl tvoří vody infiltrované z povrchu, srážkové vody, vody povrchových recipientů. V menším zastoupení jsou to pak vody ložiskové a provozní. [14]

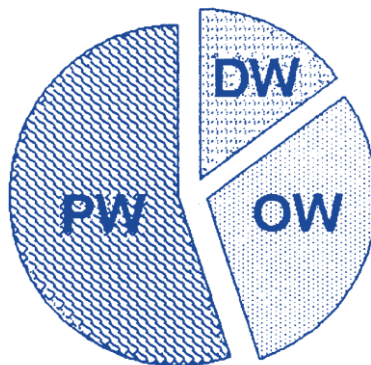
*Celková mineralizace:* 300 – 1 000 mg/l

*Hydrochemický typ:* smíšený Ca – Mg – HCO<sub>3</sub> – SO<sub>4</sub>

*Výskyt:* lomy nerudných surovin, rašeliniště, šterkovny a pískovny, jíloviště a kaoliniště, mělké železnorudné doly

*Charakteristika:* ložiskové vody a produkty zvětrávání hornin neovlivňují hydrogeochemický typ základního zdroje směsných vod [14]

### Alterovaný freaticko – atmosférický typ důlních vod tzv. aPAT



Obrázek 2: aPAT, typ důlní vody [14]

Graf (viz Obrázek 2) znázorňuje, že více než polovina jsou infiltrované vody z povrchu, menší zastoupení mají provozní vody, nejmenší podíl tvoří vody ložiskové. [14]

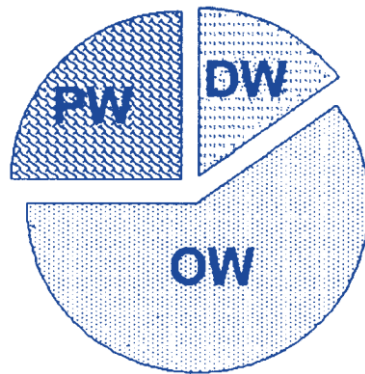
*Celková mineralizace:* 300 – 1 200 mg/l

*Hydrochemický typ:* smíšený Ca – HCO<sub>3</sub> – SO<sub>4</sub> (s podílem specifických iontů, popřípadě se specifickými fyzikálně – sensorickými vlastnostmi)

*Výskyt:* sádrovcové lomy, lomy a mělké doly uhelných ložisek, doly polymetalických rud

*Charakteristika:* ložiskové vody a produkty zvětrávání hornin ovlivňují hydrochemický typ základního zdroje směsných vod [14]

### **Provozně technologický typ důlních vod tzv. OTP**



*Obrázek 3: OTP, typ důlní vody [14]*

Z výše uvedeného grafu (viz Obrázek 3) je patrné, že v největším zastoupení jsou vody provozní a ložiskové vody jsou obsaženy v menší míře než vody srážkové vody a vody z povrchu. [14]

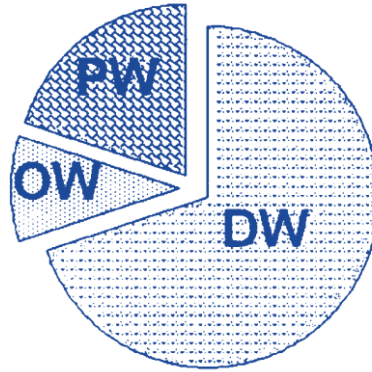
*Celková mineralizace:* 300 – 1 000 mg/l

*Hydrochemický typ:* smíšený Ca – Mg – HCO<sub>3</sub> – SO<sub>4</sub> (odpovídající hydrochemickému typu používaných provozních vod)

*Výskyt:* velmi nízko zvodnělé hlubinné doly polymetalických rud, štoly a povrchové doly nad úrovní místní erozní báze uhelných ložisek a jiných nerudních surovin

*Charakteristika:* provozní vody tvoří dominantní podíl směsných důlních vod [14]

### Ložiskový typ důlních vod tzv. WDT



Obrázek 4: WDT, typ důlní vody [14]

Jak můžeme vidět na grafu (viz Obrázek 4) výše, největší obsazení mají vody ložiskové, v menší míře se pak vyskytují vody infiltrované z povrchu a vody srážkové a nejmenší podíl mají ložiskové vody. [14]

*Celková mineralizace:* 1 000 – 10 000 mg/l

*Hydrochemický typ:* základní výrazný Na – Cl – SO<sub>4</sub> (s podílem specifických iontů, případně se specifickými fyzikálně – sensorickými vlastnostmi)

*Typický výskyt:* hlubinné doly polymetalických rud, hlubinné doly uhelných ložisek, těžba evaporitů

*Charakteristika:* produkty zvětrávání hornin, ložiskové a mimoložiskové vody utváří hydrochemický typ směsných vod [14]

## 2.4 Charakteristika důlních vod podle horního zákona

Problematikou důlních vod, jejím vypouštěním a nakládáním se zabývá horní zákon č. 44/1988 Sb. o **ochraně a využití nerostného bohatství**. Důlní vody jsou zde definovány jako „všechny podzemní, povrchové a srážkové vody, které vnikly do hlubinných nebo povrchových důlních prostorů, a to bez ohledu na to, zda se tak stalo průsakem nebo gravitací z nadloží, podloží nebo boku nebo prostým vtékáním srážkové vody, a to až do jejího spojení s jinými stálými povrchovými nebo podzemními vodami“. [3]; [4]



Důlními prostory myslíme veškerá důlní díla, ale také zavalené, vyrubané nebo založené prostory lokalizovány v hlubinných dolech, místa po vytěžení ložiska v lomu, hliništi či po těžbě písku a šterku z vody. Z tohoto důvodu jsou důlními vodami povrchové i podzemní vody, které pronikly do povrchových, hlubinných dolů, hlinišť, kamenolomů, pískoven nebo šterkoven, ale i vody, které jsou součástí nerostných surovin při těžbě zemního plynu nebo ropy a jsou tzv. transportním mediem. Ložiskové vody pokládáme za toxické díky obsahu přírodních rozpuštěných nebo nerozpuštěných uhlovodíků. Znečištění antropogenní není tak značné. [14]; [15]

Horní zákon dává hornickým organizacím právo na využívání důlních vod. Tyto organizace jsou oprávněny při hornické činnosti:

- a) Pro vlastní potřebu bezplatně užívat důlní vody.
- b) Na základě povolení vodohospodářského orgánu bezplatně používat důlní vodu jako náhradní zdroj pro potřebu těm, kteří byli činností organizace poškozeni ztrátou vody.
- c) Důlní vodu, kterou nepotřebují pro vlastní činnost, vypouštět do povrchových nebo podzemních vod a odvádět ji a pokud je to nutné, lze i přes cizí pozemky a to za podmínek, které stanovuje vodohospodářský orgán a orgán veřejného zdraví. [4]

Režim důlních vod najdeme i ve vodním zákoně. V § 7 vodního zákona ve znění pozdějších předpisů je uvedeno, že organizace může pro vlastní potřebu užívat důlní vodu bez povolení a bez souhlasu vodohospodářského orgánu. Pokud organizace nepotřebuje důlní vodu k vlastnímu provozu, je povinností organizace poskytnout její odběr, popřípadě jiné využití pro ni nepotřebného množství vody těm, kteří dostali k odběru povolení od vodohospodářského orgánu. Mimo jiné se může za využívání důlních vod považovat i výkon rybářského práva. Povinností důlní organizace je pečování a hospodárné využívání důlních vod. [4]

Vypouštění jiných vod do vod důlních je přípustné pouze v případě vydaného povolení vodohospodářského orgánu. Toto povolení musí být dohodnuto s obvodním úřadem a orgánem hygienické služby. [4]

## 2.5 Charakteristika důlních vod podle vodního zákona

Důlními vodami se podle vodního zákona č. 254/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů myslí povrchové i podzemní vody. Tento zákon se na důlní vody vztahuje, pokud zvláštní zákon<sup>1</sup> neurčí jinak. [5]

Povolení k nakládání s vodami, ale také vypouštění zvláštních vod do povrchových a podzemních vod vydává dle vodního zákona vodohospodářský orgán. Pro důlní vody ovšem tohle povolení neplatí a odkazuje se na zvláštní právní předpisy a to konkrétně na horní zákon. [5]

Vypouštění důlních vod je podle zákona povoleno, ale podmínky a způsoby vypouštění schvaluje příslušný orgán, stanovený horním zákonem. Horní zákon určil tímto zákonem vodohospodářský orgán. [5]; [15]

Protože v horním zákoně není přesně vymezený způsob a podmínky k vypouštění důlních vod, má vodohospodářský úřad možnost vlastního výběru prostředků pro způsob a podmínky vypouštění. [15]

Jedna z podstatných zásad legislativy týkající se vypouštění důlních vod je uvedena v ustanovení § 23 odst. 1 vodního zákona a zní: *“Kdo vypouští odpadní vody nebo zvláštní vody do vod povrchových nebo podzemních, je povinen dbát, aby jakost povrchových nebo podzemních vod nebyla ohrožena nebo zhoršena. Za tím účelem je povinen zejména zajišťovat zneškodňování vypouštěných vod způsobem odpovídajícím současnému stavu technického pokroku.”*. Výše uvedené povinnosti platí pro každého, kdo vypouští důlní nebo odpadní vody. [15]

Vodohospodářský úřad při vlastním stanovování podmínek pro vypouštění důlních vod do povrchových vod jedná podle daných ukazatelů povoleného stupně znečištění, které nalezneme v nařízení vlády. Ovšem v nařízení vlády č. 401/2015 Sb. nejsou uvedeny emisní standarty pro důlní vody, ale uvádí se: *„při stanovení způsobu a podmínek pro vypouštění důlních vod, průsakových vod ze starých ekologických zátěží, odkališť a skládek odpadů po rekultivaci s následnou péčí do vod povrchových postupuje vodoprávní úřad podle tohoto nařízení přiměřeně“*. Důležité je, aby povrchové vody byly co nejméně

---

<sup>1</sup> Zákon č. 44/1988 Sb. O ochraně a využití nerostného bohatství, ve znění pozdějších předpisů.

zasazeny vypouštěním důlních vod. Vodohospodářský orgán určuje limitní hodnoty jednotlivě podle místních vodohospodářských podmínek, podle kvality přirozeného pozadí podzemních a povrchových vod oblastí, kde je nutné přihlédnout k imisním standardům ukazatelů možného znečištění vod povrchových. [15]

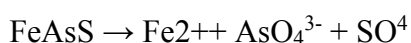
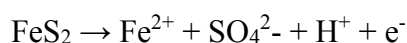
## 2.6 Charakteristika chemismu slaných důlních vod

Důlní vody se vlivem času, místa a postupem dobývání mění. Vody činných dolů mění své složení kvůli mísení s jinými typy vod, kvůli znečištění, produktům zvětrávání a díky biologického rozkladu. Z tohoto důvodu mají kvalitativní i kvantitativní údaje prostorově i časově omezenou platnost. [14]; [15]

V současnosti dochází v útlumu těžby, a z dlouhodobého hlediska není nejzávažnějším problémem likvidace důlních děl, ale změny složení důlních vod, ke kterým dochází až po zatopení a následném ustavení stabilního hydrologického režimu. [38]

Základními sledovanými parametry důlních vod na území OKR čerpaných na povrch a vypouštěných do vod povrchových, jsou koncentrace  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{Cl}^-$ . Tyto ukazatele jsou sledovány, protože byly od počátku stanoveny jako indikační. Později se začal sledovat i obsah železa, a to zejména z důvodu viditelného efektu v oblasti vypouštěcího objektu. V ostatních hydrochemických parametrech se nejeví důlní vody problémové. [34]

Atmosférické srážky, které jsou nasycené kyslíkem, patří mezi hlavní zdroj důlních vod. Po otevření ložiska dochází k značnému snížení hladiny podzemních vod a obnažení hornin, které jsou vystaveny působení atmosféry. Díky tomu dochází k oxidačnímu rozpouštění rudních i horninotvorných minerálů, např. pyritu a arsenopyritu. [44]



Když je ložisko zatopeno, zvyšují se hladiny důlních vod a mění se oxidačně-redukčních podmínky a původně oxidované partie ložiska se dostávají do redukční zóny. A tak začne docházet k redukčnímu rozpouštění produktů oxidace, prudkému zvyšování koncentrací původně nemobilních složek a dále k uvolnění sorbovaných a spolsrážených složek (těžkých kovů). [44]

Následkem spojení přírodních a umělých (antropogenních) zdrojů vznikají důlní vody. Jedná se o vody smíšené (s upraveným chemismem) s vlivem nízkého původního tlaku, proudění, odplynění nebo v důsledku setrvání ve starých důlních dílech atd. [15]

### **Slané důlní vody**

Slanými vodami myslíme vody z hlubinných dolů, pro které je charakteristické vysoká mineralizace. Z rozpuštěných anorganických solí dominují chloridy, které ve většině případů dosahují až desítek g/l. Co se týče kationů, převládá sodík a v menší míře jsou zastoupeny sírany a další alkalické kovy např. K, Ca, Mg. [42]

V důlních vodách se mimo jiné vyskytují i další kovy jako například železo, mangan a případně i arsen, kadmium, rtuť a vody obsahují i NL a NEL. [42]

### **Chloridy**

Slané vody se nevyskytují pouze v mořích a oceánech, ale také v povrchových i podzemních vodách ve vnitrozemních oblastech ve formách chloridů<sup>2</sup>. Chloridy se vyskytují ve většině případů jako jednoduchý  $\text{Cl}^-$  iont (kvůli nízké komplexační schopnosti). Chlorokomplexy, potlačující výskyt volného iontu  $\text{Cl}^-$ , jsou vytvářeny některými kovy při vyšších koncentracích chloridů. [2]

Přírodní cestou se chloridy do vody dostávají pomocí hornin, které obsahují chloridy jako například halit (sůl kamenná) nebo sylvín, vlivem zvětrávání a luhování přenášejí chloridy do vody. V roztoku se vyskytují kvůli své slabé komplexní schopnosti hlavně ve formě jednoduchého iontu  $\text{Cl}^-$ . [2]

Antropogenním způsobem se chloridy dostanou do vod odpadních (spláskových) močí. Člověk denně vyloučí přibližně 9 g chloridů. Vysoké koncentrace chloridů ve vodách jsou také v oblasti zemědělského průmyslu z živočišné výroby nebo v zimním období, když se v nechráněných oblastech pozemní komunikace sypou chloridy, z důvodu bezpečné sjízdnosti. Chlorací se v některých případech hygienicky ošetřuje znečištěná voda. [2]

Chloridy zároveň se sírany, hydrogenuhličitanů a dusičnanů řadíme mezi hlavní anionty s přirozeným výskytem ve vodách. Co se kvantitativně zastoupení aniontů v přírodních

---

<sup>2</sup> Chloridy myslíme soli kyseliny chlorovodíkové, jsou přirozenou součástí životního prostředí

vodách týče, zauímají třetí až čtvrté místo. Díky vysoké rozpustnosti chloridů jejich koncentrace stoupá zároveň s růstem mineralizace a mohou se stát dominujícím aniontem ve vodách např. chloridové vody. [2]

Mezi vlastnosti chloridu ve vodách patří biochemická a chemická stabilita (oxidace pouze při značných hodnotách potenciálu oxidačně – redukčního), hygienická nezávadnost. Při větších koncentracích chloridu může dokonce změnit původní chuť vody. Změna chuti je podmíněna přítomností kationtů a koncentrace 200 mg/l se uvádí jako přibližná hodnota, u které ještě nepozorujeme ovlivnění chuti. 100 mg/l je mezní hodnota určená pro pitnou, stolní a kojeneckou vodu. [2]

V důlních vodách se nachází  $\text{Cl}^-$  ionty z přítoků podzemních vod z uloženin miocenního a karbonského stáří nebo z jeho hlubokého podloží. Ve vodách miocénu se koncentrace pohybuje od 2 000 mg/l do 19 000 mg/l. Existuje však ještě jeden dočasný, avšak velmi významný zdroj chloridů v důlních prostorách, který podstatným způsobem ovlivňoval chemické složení důlních vod v aktivní zóně, jedná se o povlaky odpařené důlní vody na povrchu důlních děl. V současné době je tento zdroj v podstatě vyčerpán a koncentrace  $\text{Cl}^-$  iontů v důlních vodách výrazně klesá. [14]; [34]

Sodnochloridové vody proplyněné methanem  $\text{CH}_4$  najdeme v Ostravsko-Karvinském detritu na celém dětmarovickém výmolu a jeho mineralizace stoupá směrem na východ od těchto výmolů. [6]

### **Sírany**

Hlavním zdrojem  $\text{SO}_4^{2-}$  v důlních vodách nejsou přítoky kontaminované vody z povrchu či ze zvodní v horninovém prostředí, ale rozklad pyritu v uhelné hmotě a okolním horninovém prostředí. Oxidace pyritu probíhá při spolupůsobení bakterií v aerobním prostředí. Probíhá i při minimální vlhkosti, např. v povlaku kondenzované vody, což jsou právě podmínky vyvolané hornickou činností. Při nedostatku kyslíku aktivita mikrobů klesá, až zaniká. [34]

Oxidace sulfidů obsažených v uhlí, rudách i nerudách je důvodem nízkého pH a vysoké acidity. [1]

## **Železo**

Ráda bych se zmínila o železe ve vodách. Železo ve vodách reaguje na změny zvětrávacích procesů v horninové oblasti ložiska. Přítomnost pyritu  $\text{Fe}_2\text{S}$  v uhelné hmotě považujeme za hlavní zdroj železa. Při dostatku kyslíku, dochází k vzniku formy 3mocného stabilního Fe ve vodách, které ovlivňují pH a hodnoty Eh redox potenciálu. Acidofilní bakterie katalyzují oxidaci  $\text{Fe}^{2+}$  na  $\text{Fe}^{3+}$ . [14]

Rozpustné anorganické soli (RAS), jako jsou např. chloridy nebo sírany, uvolňují železité ( $\text{Fe}^{3+}$ ) nebo železnaté ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ionty. Hydrolyza iontů závisí na hodnotě pH, vytváří ve vodě málo rozpustné hydroxidy. [16]

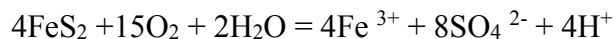
## **Mangan**

Mangan se ve vodách nejčastěji vyskytuje společně s železem, ovšem koncentrace manganu bývá mnohem nižší než u železa. Do vody se mangan uvolňuje ze sedimentů, manganových rud např. baumit, hausmanit, burel a manganit nebo průmyslových provozů. [1]

V přírodních vodách ho najdeme ve formách  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  a  $\text{Mn}^{4+}$ . Forma  $\text{Mn}^{2+}$  .  $\text{Mn}^{2+}$  je stabilnější při oxidaci a naopak náchylnější k redukci (opačné děje probíhají u železa). Množství Mn závisí na rozpustnosti sulfidů, uhličitánů a hydroxydů. [2]

## **RAS (rozpustné anorganické soli)**

Mezi hlavní složky RAS v důlních vodách řadíme především sírany a jejich soli. Jejich vznik je zapříčiněn oxidací sulfidických rud. Zdrojem  $\text{SO}_4^{2-}$  v důlních vodách je rozklad pyritu v uhelné hmotě a horninovém prostředí. Oxidace pyritu probíhá v aerobním prostředí za spolupůsobení bakterií. [40]



Reakce může probíhat i při minimální vlhkosti, např. v povlaku kondenzované vody (podmínky vyvolané hornickou činností). Ovšem při nedostatku kyslíku aktivita mikrobů se snižuje, až zaniká. Toto je zapříčiněno vysokým obsahem síranů v důlních vodách po těžbě černého uhlí. [40]

## pH

pH ovlivňuje biologické a geochemické procesy ve vodách. V přírodních vodách je pH dáno uhličitanovou rovnováhou a pohybuje se okolo od 4,5 do 8,3. Organické látky, sulfan, fosforečnany či kationty podléhající hydrolýze mohou ovlivňovat závislost volného CO<sub>2</sub> a vázaného CO<sub>2</sub>. [39]

Za pokles hodnoty pH pod 4,5 zapříčiňuje přítomnost anorganických a huminových kyselin. Naopak zvýšení pH nad 8,3 může být vyvolán přítomností iontů CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> nebo OH<sup>-</sup>. V důlních vodách je kyselé pH způsobeno oxidací sulfidů, při níž se uvolňují síranové ionty a produkují se protony, které vodu okyselují. Rozdělení důlních vod podle pH znázorňuje níže přiložená Tabulka 1. [39]

*Tabulka 1: Dělení důlních vod podle pH [2]*

Typ důlní vody	pH
Zásadité	> 7
Neutrální	7
Slabě kyselé	5- 7
Mírně kyselé	3- 5
Velmi kyselé	< 3

### 3 BIOAKUMULACE

Tato kapitola je věnována bioakumulaci, jelikož halofytní rostliny akumulují zároveň se slanou důlní vodou i kontaminanty v ní obsažené.

Bioakumulace je proces, při kterém se látky hromadí v organismu nebo v jeho částech a to buď prostřednictvím okolního média, nebo přes potravu, která je kontaminovaná. Halogenderiváty<sup>3</sup> jsou kontaminanty, které se vyskytují v půdě i v podzemních vodách a často se stávají cílem pro odstranění pomocí bioremediace. [23]

Jedná se intracelulární metabolické proměny (biotransformace, biomineralizace), formování nebo utváření nerozpustných sulfidů nebo fosfátů pomocí vypouštění jednotlivých iontů z buňky ven. Tato metoda se používá při odstraňování iontů železa, manganu a olova. [32]

Proces odstraňování škodlivin je ve velké míře ovlivněn provozními podmínkami. Konkrétně přítomnost škodlivin v růstovém médiu, může zabrzďovat jak růst tak samotnou bioakumulaci, což představuje závažné omezení procesu, protože znemožňuje roztoku pohltit velké množství škodlivin. [32]

#### 3.1 Faktory ovlivňující bioakumulaci

Při procesu bioakumulace závisí na fyzikálně - chemických vlastnostech látek, na biologických a fyziologických vlastnostech organismu a na okolním prostředí. Látky hydrofobní neboli lipofilní se snadno rozpouštějí v dvojvrstvé buněčné membráně a tím se zvyšuje bioakumulační schopnost organismu. V důsledku zvýšení teplot se zrychluje cirkulace tělních tekutin a zrychlení dýchaní a proto dochází ke zvýšení příjmu látek. [27]

Jako další z faktorů, které ovlivňují bioakumulaci, bych uvedla způsob potravy, např. ryby vyskytující se u dna vodního díla akumulují více těžkých kovů než tzv. ryby hladinové. Důležitý je i růst, kdy s růstem se zředňuje i příjem škodlivin. [27]

Jedná se o nerovnovážný proces, který je komplexnější než biosorpce a vyžaduje metabolickou aktivitu buněk. Existují i případy, kde proces bioakumulace je podpořen

---

<sup>3</sup> organické sloučeniny vznikající nahrazením jednoho nebo více atomů vodíku v molekule uhlovodíku atomem halogenu např. fluoru, chloru, bromu, jodu



metabolickými procesy. Děje se tak v případě řas, které přijímají CO<sub>2</sub> jako zdroj uhlíku pro růst. [32]

### 3.2 Fytoremediace

Remediací máme na mysli „ozdravnou“ metodu, při které se používají principy fyzikální, chemické a biologické [25]. Fytoremediace je proces „přirozeného snižování kontaminace“, který využívá rostliny obsahující chlorofyl k transportu, akumulaci a odstraňování kontaminantů, toxicity a mobility v životním prostředí bez zásahu člověka. Rostliny efektivně a levně dekontaminují znečištěné plochy pomocí absorpce. Absorbují jak anorganické, tak organické kontaminanty vyskytujících se v půdě, v podzemní i povrchové vodě (vodní rostliny), v kalech, v sedimentech a překvapivě i ve vzduchu. Rostliny vhodné pro fytoremediaci se používají k odstranění mnohých organických látek z půdy i vody a využití našly i k extrakci toxických kovů (i radioaktivní izotopy). Aby remediace proběhla bezchybně, je nezbytná biologická dostupnost kontaminantů z půdy a vody do rostliny, která je dána především rozpustností. [7]; [8]; [17]; [24]

Své uplatnění tato metoda našla především na plochách s povrchovým znečištěním, kde účinně absorbuje hydrofobní polutanty, jako je například toulén, benzen, nitrosloučeniny a již několikrát zmiňovaná chlorovaná rozpouštědla. [8]

#### Výhody fytoremediace :

- Metoda šetrná k životnímu prostředí (nepoužívá těžkou techniku, nedochází k vytěžení kontaminované půdy ani k vyčerpání podzemní vody).
- Nízké finanční náklady (přírodní proces, není potřeba laboratorní techniky).
- Zatraktivnění znečištěného prostředí (rostliny vysázené pro účel fytoremediace obvykle zabraňují pronikání kontaminantů do podzemních vod a do neznečištěných míst). [17]; [24]

#### Nevýhody fytoremediace :

- Časová náročnost procesu. [24]

Jak je zmíněno výše, fytoremediace je dlouhotrvající metoda, mnohdy vyžaduje několik vegetačních období. Protože některé rostliny mají vysokou schopnost akumulace,

ale jejich růst je pomalý, je lepší použít rostliny s nižší schopností akumulace, ovšem s vysokým nárůstem biomasy. [24]

Proces fytořemediace je stále ve vývoji, proto ji momentálně nelze využívat v širokém měřítku, ale úspěšně bývá používána v mnoha kontaminovaných oblastech. Největší úspěch má fytořemediace v oblasti dekontaminace látek organických. V zahraničí bývá použita pro remediaci na skládkách v chemickém průmyslu, v oblastech s muničním odpadem nebo v místech se zbytky pesticidů. [8]

Rostliny mají speciální mechanismy, kterými přijímají a přetvářejí organické látky:

#### **a) Příjem a následná akumulace**

Určité druhy rostlin mohou přijímat organické látky rovnou z kontaminovaných oblastí do svého organismu. Tato schopnost rostliny závisí na fyzikálně – chemických vlastnostech jak rostlin, tak kontaminantů. Problém nastane, pokud se hydrofobní organické sloučeniny navážou na kořeny, protože potom je obtížné je odstranit. Řešením v takovém to případě je sklizeň rostlin i s látkami, které se navázaly. Rozpustné kontaminanty se nesorbují tak pevně, jsou vedeny přes membrány do tkáně rostlin. Rostliny ukládají org. sloučeniny v nezměněné formě nebo jsou transformovány na nefytotoxické metabolity. Nefytotoxické metabolity se ukládají na různých místech buňky ve formě např. ligninu nebo ve vakuole. Další možností je, že organické sloučeniny jsou metabolizovány nebo dojde k rozkladu na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  a poslední možnost je výpar. [7]

#### **b) Biodegradace v rhizosféře**

V rhizosféře dochází k mikrobiální transformaci, které napomáhají rostliny. Mikroorganismy používají kontaminanty pro zdroj energie a uhlíku a přetvářejí je na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Některé organické sloučeniny jsou přeměňovány pomocí mikroorganismů procesem kometabolismu. Při tomto procesu organické polutanty neplní funkci zdroje energie a uhlíku. [7]

Organické polutanty metabolizují houby z čeledi *Mycorrhizae*. Houby této čeledi žijí v symbióze s kořeny rostlin a mají jedinečnou enzymovou dráhu, napomáhající při degradaci organických látek, protože rostliny ani bakterie nejsou schopny jejich transformace. Exudáty (enzymy, aromatické a alifatické látky, cukry a aminokyseliny) jsou vylučovány rostlinami, stimulují bakteriální přeměnu a podporují využití organického kyslíku v oblasti kořene. [7]

V rámci výzkumu se ukázalo, že se v rhizosféře se např. u kukuřice, hrachu a pšenice mnohonásobně zvýšil mikrobiální nárůst. Rychlý rozpad zbytků kořenů obohacuje půdu o jednoduché organické sloučeniny a ty zesilují mikrobiální mineralizaci. [7]

### **c) Absorpce listem**

Množství akumulace polutantů v rostlině ze vzduchu závisí na rozdělovacím koeficientu plynné a vodné fáze, na druhu rostliny, typu polutantu a zároveň na povrchu listů a obsahu lipidů v listovém epidermu. [7]

Výběr rostlin vhodných pro fytoremediaci závisí na nárůstu biomasy, schopnosti dekontaminovat znečištěnou oblast. Významnou roli hraje akumulace látek do nadzemní části rostliny, kvůli snazší sklizni. [25]

Fytoremediace můžeme dělit podle metodického postupu, který je závislý na charakteru znečištěného prostředí, na kontaminantu a na jeho koncentraci, na technologii fytodekontaminační a fytostabilizační. [17]

### **3.2.1 Fytodekontaminace**

#### *Fytodegradace*

Jedná se o proces přeměny a odbourávání kontaminantů přímo uvnitř rostliny. U fytodegradace je důležité předcházet přeměnám na metabolity, které by mohly naopak životní prostředí kontaminovat, protože jsou toxičtější než daný polutant. Podmínkou je, že produktem pro metabolickou aktivitu musí být látka netoxická a to nejen pro rostliny, ale také pro všechny ostatní organismy. [17]

Pomocí kořenů rostliny vylučují do rhizosféry množství exudátů, které obsahují aminokyseliny, sacharidy a další organické sloučeniny a ty slouží jako zdroj energie pro mikroorganismy a mohou se tak podílet na růstu jejich populací. A mikroorganismy naopak svými mechanickými pochody dávají rostlinám látky, které si samy neumí vyprodukovat. Můžeme tedy říct, že v rhizosféře vlivem vzájemného vztahu rostlin a mikroorganismů se mohou uskutečnit klíčové reakce dekontaminace. [17]

Fytodegradace je rovněž využívána na odstraňování organických polutantů např. PAH, PCB, výbušnin, herbicidů a detergentů v půdách, vodách, na vyluzích ze skládek a na půdách po aplikaci odpadních vod. [8]

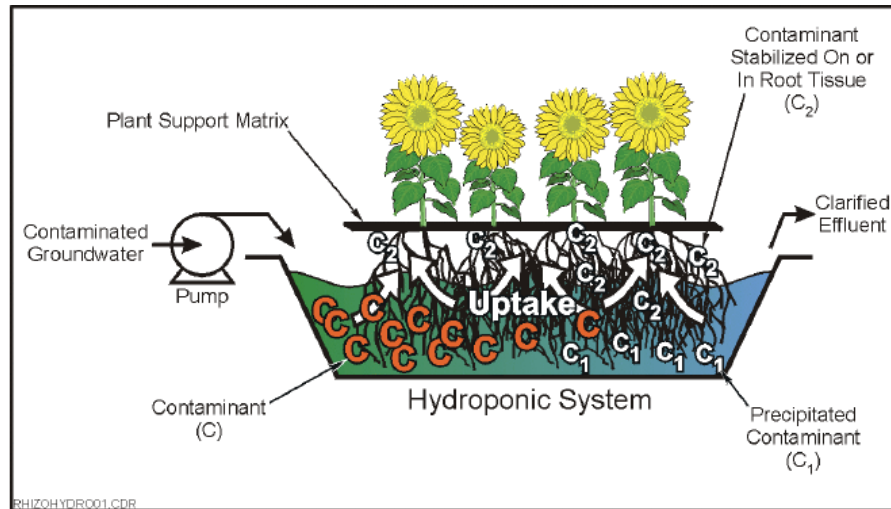
Rostliny typické pro fytodegradaci jsou stromy čeledi *Salix* (vrba, topol), rostliny rodu *Poaceae* žito seté (*Secale cereale*), kostřava (*Festuca*), proso (*Panicum*), rákos obecný (*Phragmites australis*) a rostliny z čeledi *Fabaceae* (jetel (*Trifolium*)), tolice vojtěška (viz Obrázek 5) (*Medicago sativa*). [8]



**Obrázek 5: Tolice vojtěška, Foto: Radim Cibulka, 2007, [36]**

#### *Rhizofiltrace*

Metoda rhizofiltrace (viz Obrázek 6) využívá kořenový systém k absorpci, koncentraci a precipitaci xenobiotik nacházejících se v znečištěných vodách. Rhizofiltrace se uplatňuje zejména u povrchových, splaškových nebo podzemních vod. Kontaminanty se uchycují na kořenech nebo jsou do nich absorbovány. Používá se především pro odstraňování nízkých koncentrací kovů, ale také při zachytávání radionuklidů, které jsou shromažďovány v kořenech některých rostlin, např. brukev sítinovitá (*Brassica juncea*) nebo slunečnice roční (*Helianthus annuus*). Tyto rostliny byly schopny absorbovat z vody některé kovy: měď, kobalt, nikl, chrom, mangan. [8]; [17]



Obrázek 6: Schéma rhizofiltrace [37]

Například díky slunečnici roční (*Helianthus annuus*) odstraňující izotopy Cs a Sr se v Černobylu podařilo ošetřit povrchové vody. Mezi další rostliny vhodné pro rhizofiltraci řadíme především vodní rostliny: orobinec (*Typha*), růžkatec (*Ceratophyllum*), vodní řasy (parožnatka (*Platycerium*), stolítek klasnatý (*Myriophyllum spicatum*)) [8]

#### *Rhizodegradace*

Rhizodegradace je metoda používající k snížení počtu kontaminantů v půdě nebo podzemní vodě kořenový systém. Potravou pro bakterie přežívající v půdě (podzemních vodách) jsou organické sloučeniny (cukry, alkoholy), které jsou vylučovány kořeny. Jelikož pro dostatek živin v půdě roste i počet mikroorganismů, dochází ke stimulaci jejich aktivity, což přispívá k odbourávání polutantů. [8]

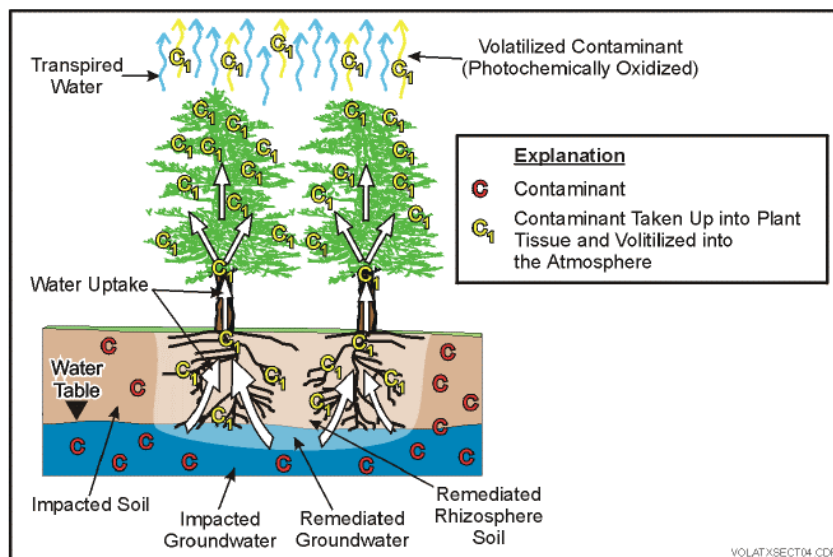
Pomocí rhizodegradace se odstraňují kontaminanty zvané biodegradované organické látky (BTEX, PAH, PCB, pesticidy) v půdách, sedimentech a skládkách. [8]

Traviny s vláknitými kořeny jsou nejvhodnějšími pro proces rhizodegradace. Řadíme mezi ně troskut prstnatý (*Cynodon dactylon*), čirok (*Sorghum*), proso (*Panicum*) nebo žito (*Secale*), dále uvolňovače fenologických látek (moruše (*Morus*), jabloň (*Malus*)). Pro tento proces jsou používány taktéž freatofytické stromy. [8]

### Fytovolatilizace

Kontaminanty vyskytující se v půdě nebo sedimentech jsou přijímány kořenovým systémem a následně přeneseny do povrchové části rostliny (v některých případech mohou být kontaminanty biotransformovány). [8]

Některé mikroorganismy jsou schopné enzymatické redukce rtuťnatých iontů na rtuť kovovou. Rtuť se rozptýluje ve formě par do okolí. Za odolnost vůči  $Hg^{2+}$  iontů v rostlinných tkáních může gen vnesený do genomu rostliny. Tento gen kóduje reduktasu rtuti. Do ovzduší je převedena rtuť ve formě  $Hg^0$ . Pokud se rozhodneme pro fytovolatilizaci (viz Obrázek 7), musí být prováděno opatření, které zamezí neovladatelnému rozptýlu plyných zplodin. [17]

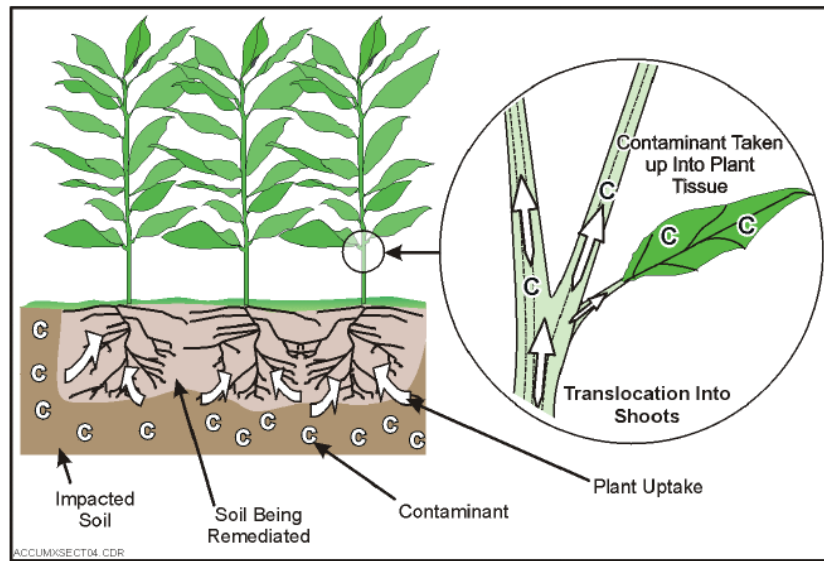


Obrázek 7: Schéma fytovolatilizace [37]

Mezi rostliny vhodné pro fytovolatilizaci řadíme huseníček rolní (*Arabidopsis thaliana*), liliovník tulipánokvětý (*Lyriodendron tulipifera*). [17]

### Fytoakumulace (fytoextrakce)

Rostliny určené k fytoakumulaci absorbují pomocí kořenů kontaminovanou látku a ukládají si jí v nadzemní části rostliny. Proto se musí při sklizni zacházet s úrodou jako s kontaminovaným odpadem. Je tedy k uvažování, zda tuto metodu aplikovat. Fytoakumulace (viz Obrázek 8) je nejvhodnější obzvláště při odstranění toxických kovů obsažených v půdě. [8]



**Obrázek 8: Schéma fytoakumulace [37]**

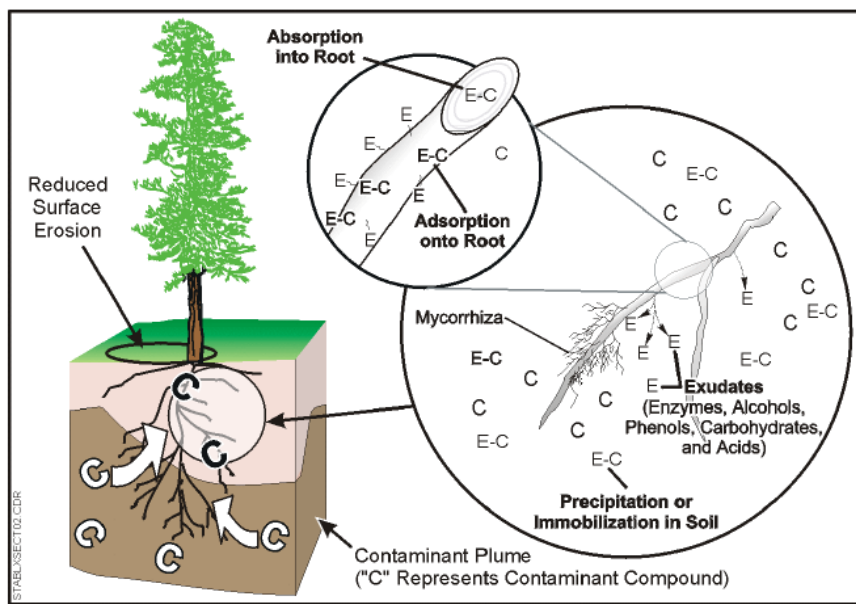
Hyperakumulační vlastnost rostliny pro daný kontaminant je podmínkou pro správné fungování metody, používanou pro sanaci již zmíněných těžkých kovů, polokovů (například arsen, selen) radionuklidů a nekovů (například bor). Hyperakumulátory akumulují vysoké koncentrace kovů v pletivech, aniž by byl nějak ovlivněn růst nebo prosperita. Vhodným hyperakumulátorem je penízeček modravý (*Thalyspi caerulescens*). Kdyby se podařilo najít případný druh odpovídající požadavkům, bylo by finančně výhodné z rostlinného materiálu získávat naakumulované kovy nazpět. [8]; [17]

Fytoakumulace není vhodná pro akumulaci organických látek, které mohou rostliny metabolizovat na látky více toxické nebo mohou vlivem dýchání kontaminanty vypouštět do ovzduší. [8]

Jedním z typů fytoakumulace je tzv. fytomining, který pomocí rostlin zpracovává neekonomické rudy. Jedná se o „green technologii“ u povrchového dolování rud, která nevyžaduje přesouvání půdního materiálu. Vysázené rostliny s hyperakumulační schopností jsou sklizeny, rostlinná biomasa se spálí a vyprodukuje se tzv. bio-ruda. Tato bio-ruda neobsahuje síru, taví se při menší spotřebě energie než u sulfidických rud a na rozdíl od rudy běžné má více kovů a tak nezabírá tolik skladovacího místa. [8]

### 3.2.2 Fytostabilizace

Tam kde se běžná vegetace není schopná uchytit pro vysokou kontaminaci území, se aplikuje fytostabilizace (viz Obrázek 9) pro obnovu vegetační příkrývky. Podle chemických a biologických vlastností půdy dochází k imobilizaci vodních a půdních kontaminantů pomocí rostlin. Absorpcí, komplexací, adsorpcí a precipitací (srážením) v kořenovém systému dochází se snižování vyplavování kontaminantů z půd, sedimentů i kalů. [8]



Obrázek 9: Schéma fytostabilizace [37]

Při procesu fytostabilizace hrají roli i produkované huminové látky, které na sebe vážou půdní kontaminant. Takto využívané rostliny svým vzrůstem zabraňují přírodním pohromám (vodní a větrná eroze) a tím i transportu kontaminace na povrchu zemském. [8]

Cílem fytostabilizace je zamezení kontaminantů do prostředí. Proto se ve většině případů využívá jako finální úprava ploch, které již byly sanovány jinými technologiemi. [17]



## 4 HALOFYTNÍ ROSTLINY

### 4.1 Charakteristika halofytních rostlin

Za halofytní neboli slanomilné druhy považujeme rostliny schopné růstu a reprodukce v místech s vysokou koncentrací solí (dokonce i v místech s několikanásobně vyšší koncentrací soli než je obsaženo v mořské vodě). Hlavními zdroji salinity jsou chemické sloučeniny NaCl a KCl, které mohou dosahovat vysokých koncentrací. [20]

Halofyta vystavena vysokým koncentracím rozpuštěných solí ve vodě, ale i v půdě mají vyvinutu širokou škálu mechanismů, jako jsou například morfologická stavba, biochemické a fyziologické adaptační organismy, které stanovují míru tolerance k salinitě. Naopak glykofyty jsou halofobní, to znamená, že jsou citlivé k zasolení, tzv. slanostřezné rostliny. Glykofyty tolerují pouze 0,1 % soli, proto se vyhýbají oblastem s vysokou salinitou. [20]; [21]

Dělení halofyt podle tolerance k salinitě:

- Halofyta obligátní (euhalofyty)
  - Jsou schopny maximálního růstu při mírném zasolení i při vysoké salinitě.
  - Při nízké koncentraci solí hynou, vyhledávají místa s vysokou salinitou.
  - Zástupci obligátních halofyt: zblochanec oddálený (*Puccinellia distans.*), který se vyskytuje podél vozovek a v zimním období detekuje solení cest, dále slanorožec rozprostřený (*Salicornia prostrata*), solnička rozprostřená (*Suaeda prostrata*), limonka obecná (*Limonium vulgare*) a mangrovník, které jsou jedinými dřevinami mezi halogyty.
- Halofyta fakultativní (halotolerantní)
  - Jsou odolné vůči zasolení, ale nevyžadují přítomnost solí.
  - Nejvyššího růstu dosahují při mírné salinitě, nízká růstová rychlost je důsledkem jak nízké tak i vysoké koncentrace solí.
  - Zástupci fakultativních halofyt, kteří se mohou vyskytovat na stanovištích s vysokou salinitou, ovšem sůl ke své existenci nepotřebují: mochna husí (*Argentina anserina*) a druhy rodu *Chenopodium* a *Atriplex*.

- Vysokou salinitu tolerují i některé kulturní rostliny, například bavlník toleruje až 0,8% solí. [21]

Halofytní rostliny dělíme podle kooperace adaptačních mechanismů na:

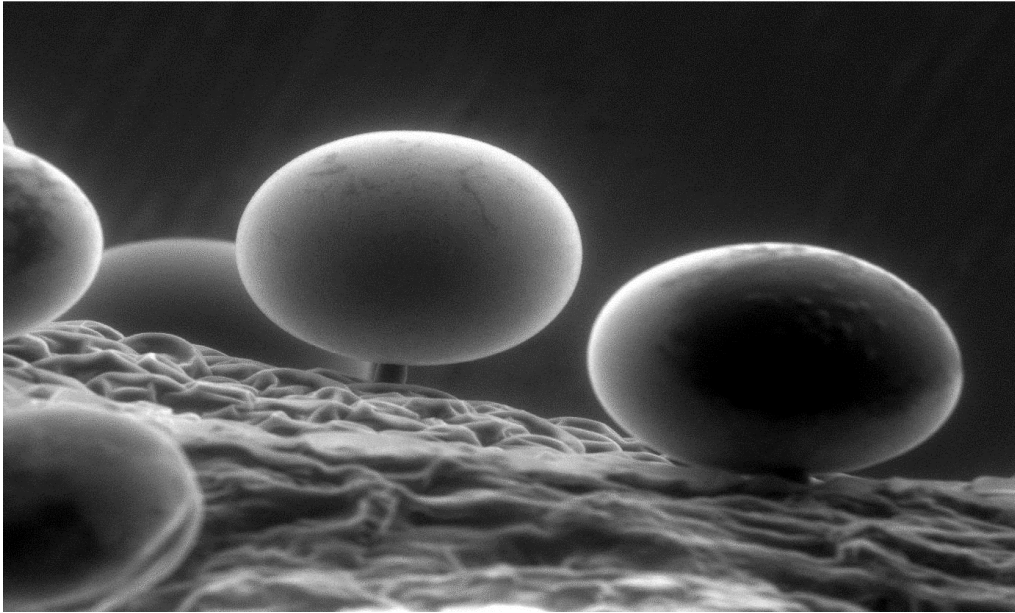
- Rostliny s mechanismy, které zamezují vstupu solí do buněk rostliny (např. kořenovník obecný (*Rhizophora mangale*) (viz Obrázek 10)).
- Rostliny, které jsou schopny sůl přijmout, ale posléze jej vyloučí (např. rostliny patřící do rodu *Tamarix*).
- Rostliny, u nichž dochází k akumulaci solí (např. rostliny patřící do rodu *Atriplex*). [18]



Obrázek 10: kořenovník obecný, Foto: Stolz, Gary M. [45]

Možnosti adaptace halofytních rostlin na NaCl závisí především na kontrolovaném příjmu a kompartmentalizaci (neboli rozdělení do tříd)  $\text{Na}^+$  a  $\text{Cl}^-$  iontů, osmoprotektantů (látky osmoticky aktivní, zabraňují únikům vody z cytoplazmy), syntéze a na stimulaci antioxidantního systému[18].

Některé druhy halofyt mají speciální mechanismus tolerance, kterou nazýváme fytoexkrece. V tomto procesu hrají hlavní roli exkreční orgány (solné žlázy, trichomy, solné měchýřky (viz Obrázek 11)) umístěny v listě, které regulují iontovou rovnováhu. Sůl se v těchto orgánech buď hromadí, nebo se vylučuje na povrch listu. *Tamarix aphylla* patří mezi halofyta s tímto sekundárním mechanismem. [18]



*Obrázek 11: Mikrosnímek solných měchýřků na listu [35]*

Rostliny se přizpůsobily k zasolení dvěma způsoby. První typ adaptace spočívá v řízeném přijímání solí přes vysoce selektivní plazmatickou membránu, která zabraňuje vniku přebytečných iontů do kořenových buněk. U druhého typu adaptace dochází k ukládání solí do vakuol nebo apoplastu (neboli do transportní cesty pro vodu, anorganické a organické látky na krátkou vzdálenost v rostlině) a určitý díl solí se přemístí do nadzemní části a poté je vylučována na povrch listů. Zvýšenou koncentraci slučitelných osmoticky aktivních látek (cukry, aminokyseliny, kvartérní amoniové soli) v cytosolu se vyrovnává vysoký osmotický tlak šťávy ve vakuolách. [18]

Halofytní rostliny jsou používány vzhledem ke svým vlastnostem k procesům fytostabilizace a fytoakumulace. Proces fytostabilizace zahrnuje imobilizaci kontaminantů ve vodě a v půdě pomocí rostlin a zabraňuje vznikům erozí. Fytoakumulací rozumíme absorpci kontaminantů pomocí kořenů a hromadění v nadzemní části rostliny.[18]

## 4.2 Zástupci halofytních rostlin

### 4.2.1 Kosmatec třpytivý (*Mesembryanthemum crystallinum*)

Čeleď: kosmatcovité (*Aizoaceae*)



Obrázek 12: Kosmatec třpytivý na pláži v Tenerife, Foto: Ladislav Hoskovec, 2006 [29]

#### Charakteristika

Kosmatec (viz Obrázek 12) je jednoletá až dvouletá rostlina dorůstající 10 – 20 cm. Poléhavou lodyhu byliny pokrývají papily a dužnaté listy jsou prvně zelené barvy a načervenalé. Oproti tomu korunní lístky jsou bílé barvy. [29]

#### Výskyt

Tato halofytní rostlina roste na písčitých březích a útesech poblíž moře a na místech po zásahu člověka. Pro kosmatec je charakteristická zvýšená tolerance k salinitě a odolnost vůči mědi obsažené v půdě. Najdeme jí i v evropských zemích kde se vysazuje jako letnička. [18]; [29]

#### Využití

V dobách minulých se z kosmatce vyráběla soda a do dnešních dob se v některých koutech světa pěstuje a konzumuje se jako salátová zelenina. [29]

Jak již bylo zmíněno bylina je slanomilná a odolná pro Cu. Při fytoimediačním výzkumu byly rostliny současně vystavovány koncentracím NaCl a CuSO<sub>4</sub>. Bylo zjištěno,

že rostliny stejnou mírou akumulovaly měď jako rostliny kontrolní, ale zároveň vykazovaly dvojnásobnou akumulaci prolinu v listech. Rostliny adaptované k vysokému zasolení nadprodukcí prolinu mohou lépe odolávat i jiným kontaminantům. [18]

#### 4.2.2 Slanorožec rozprostřený (*Salicornia prostrata* Pall.)

Čeleď: laskavcovité (*Amaranthaceae*)



Obrázek 13: Slanorožec rozprostřený, Foto: Pavol Eliáš, 2009 [30]

#### Charakteristika

Slanorožec rozprostřený (viz Obrázek 13) je sukulentní jednoletka s bohatě vyvinutým kořenovým systémem. Jeho článkované stonky jsou 5-30 cm vysoké, rozvětvené, přímé. Listy mají 1 mm široký objímavý lem na horním konci článků. [30]

Květy slanorožce jsou drobné, oboupohlavné a složené do vrcholových klasů. Dužnaté okvětí je srostlé s jednou až dvěma tyčinkami a dvěma péřovitými bliznami. Plodem je kožovitá nažka a světle hnědé semeno je asi 1 mm velké. [30]

#### Výskyt

Najdeme ho na stanovištích s vysokým zasolením, ve většině případů na dnech či březích periodicky zasolovaných jezer a v terénních depresích na slaniscích. Jak napovídá jeho název, slanorožec vytváří souvislé porosty. [30]

Z důvodů odsolování půd i vod v České republice slanorožec rozprostřený nenajdeme. Poslední zmínka o výskytu této halofytní rostliny v ČR je z roku 1976.

Sousední Polsko řadí slanorožec mezi chráněné rostliny a v Maďarsku, Srbsku a Rakousku ho najdeme na červeném seznamu. [30]

### Využití

U jiného druhu slanorožce (*Salicornia brachiata*) byl sledován fytořediční potenciál. Podle studie je tento druh vhodný pro fytořediaci a z jeho semen je možné získat jedlý olej. [30]

#### 4.2.3 Tlustobýl (*Sesuvium portulacastrum* (L.))

Čeleď: kosmaticovité (*Aizoaceae*)



Obrázek 14: Tlustobýl, Foto: Ljuba Procházková, 2015 [31]

### Charakteristika

Tlustobýl (viz Obrázek 14) je sukulentní a velmi vytrvalá rostlina, která vytváří porosty plazící se po povrchu. Stonky zakořeňují a bohatě se větví. Rostliny vytváří husté šedozelené, naoranžovělé až červeně naběhlé porosty. Lodyha je poléhavá, větvená a hustě pokrytá malými šupinkami. [31]

Vstřícné, přisedlé listy obkopynatého tvaru jsou dužnaté, přibližně 1,5 - 3 cm dlouhé a 3 - 5 mm široké, k bázi zúžené a na vrcholu tupé. Květy vyrůstají jednotlivě v úžlabí listů na stopkách. Bílé okvěti má 5 vejčitých cípů, které jsou dlouhé 4 - 5 mm. Plodem je tobolka. [31]

## Výskyt

Tato rostlina žije převážně v tropech a v subtropích, kde ji můžeme najít na mořském pobřeží a je velmi odolná k silné salinitě. S tlustobýlem byl proveden experiment při procesu fytoremediace. Bylo zjištěno, že salinita má pozitivní vliv na translokaci kadmia do nadzemní části rostliny. [31]

### 4.2.4 Rákos obecný (*Phragmites australis*)

Čeleď: lipnicovité (*Poaceae*)



Obrázek 15: Rákos obecný, Foto: Ladislav Hoskovec, 2005 [46]

## Charakteristika

Rákos obecný (viz Obrázek 15) je emerzní travina sahající do výšky 1 až 4 metrů (výjimečně až 6 metrů). Tuhé stéblo je v dolní části chlupaté a horní části holé. Listy jsou až 50 cm dlouhé, 4 cm široké. Objímavé listové pochvy dorůstají délky až 25 cm. A jazýček je nahrazen bílými chloupky. Květenstvím jsou laty a klásky jsou 3 -7 květů. [46]

Rozmnožuje se zejména vegetativně, ale produkce semen a klíčivost je ve srovnání s jinými rákosinami malá z důvodu potřeby mokrého substrátu, jež je nezbytný pro klíčení semen, což jsou jiné podmínky, než vyžaduje dospělá rostlina. [19]

Do země zapouští dlouhé a poměrně mohutné oddenky (rhizomy), které mohou dorůst do hloubky 70 cm i hlouběji. Oddenky se velmi rychle a hojně větví a vytváří porosty tzv. rákosiny. [19]

Rákos patří k vytrvalým a tolerantním rostlinám, snáší výkyvy pH a dobře se vyrovnává s vyššími hodnotami organického znečištění kvantifikovaného BSK i nutrienty jako jsou formy dusíku. [10]

### **Výskyt**

Rákos obecný je kosmopolitní rostlina rozšířená po celém světě s výjimkou vysokých hor a tropických oblastí. Roste v eutrofních i oligotrofních vodách obohacených na vápník, v kyselých vodách s hloubkou dosahující až 2 m, na březích tekoucích i stojatých vod, ve vodních příkopech, v bažinách, ale také na vlhkých polích, kde zapleveluje některé z plodin. Je konkurenčně silný druh a vytváří téměř monokultury. [19]

Na níže přiloženém obrázku (viz Obrázek 16) vidíme rákos obecný, který se nachází na dole Lazy v Karviné, kde slouží fytoimediačním procesům. Rostlina je vystavena vysoké koncentraci soli z tavných důlních vod a ta je akumulována v těle rostliny. V těchto podmínkách je rákos obecný schopný jak reprodukce, tak růstu, proto je uveden v této kapitole, i když ho přímo mezi halofytní rostliny neřadíme.



*Obrázek 16:Rákos obecný na dole Lazy, Foto: Anna Brodská, 2015*

### **Využití**

Rákos se v dřívějších dobách používal jako střešní krytina a až do dnes se používá jako podestýlka nebo jako krmivo pro dobytek. [19]



#### 4.2.5 Sítina Gerardova (*Juncus Gerardii* Loisel.)

Čeleď: sítinovitě (*Juncaceae* Juss.)



Obrázek 17: Sítina Gerardova, Foto: Daniel Dítě, 2006 [47]

#### Charakteristika

Sítina Gerardova (viz Obrázek 17) je vytrvalá, světle zelená trsovitá rostlina, která dorůstá výšky 5 – 50 cm. Lodyhy jsou přímé, tenké, oblé, tuhé, listy mají plochý nebo oblý tvar. Okvětí má červenohnědou barvu a okvětní lístky jsou tupé a vejčité. Plod je tobolka stejně dlouhá jako okvětí. [47]

#### Výskyt

Tato rostlina roste na vlhkých slaných loukách, slaniscích a pastvinách, vzácně v okolí vývěřů minerálních vod s vysokým obsahem solí. Vyžaduje vlhké, písčité a hlinité půdy. [47]

Sítinu najdeme jak na severu u pobřeží Skandinávie, Britských ostrovů, tak na jihu ve Středomoří, ale i ve vnitrozemí, např. ve Španělsku, Německu, na Sibiři. Vzácně se vyskytuje v České republice, ovšem na mnoha stanovištích již vyhynul. Proto je v ČR zařazen mezi kriticky ohrožené a chráněné druhy a je indikátorem zasolení. [47]

#### 4.2.6 *Bassia indica* a situace v Izraeli

##### Situace v Izraeli

Celosvětově se potýkáme s nedostatkem vody. Ráda bych se zmínila o situaci v Izraeli, kde jsou půdy zavlažovány předčištěnými odpadními vodami. Tato voda je sice

bohatá na živiny, ale také silně zasolená. Proto se do půdy dostávají ve velké míře látky jako je sodík, vápník, draslík nebo například chlor. Salinita je v dnešní době globální problém, který způsobuje degradaci půdy, snižování kvality vody a má škodlivé účinky na vegetaci. Proces zasolování je navíc v suchých oblastech urychlen silným slunečním zářením a zvýšenou evapotranspirací. Existuje více způsobů biologického čištění, například využitím aktivovaného kalu, ale nejšetnější k životnímu prostředí a zároveň nejčastější typ je čištění pomocí umělých mokřadů (CW), využívající přírodní procesy pro zlepšení kvality vody pro lidské potřeby. [11]

### **Charakteristika**

Čeleď: laskavcovité (*Amaranthaceae* Juss.)

*Bassia indica* (viz Obrázek 18) je celoročně rostoucí hustě větvená přisedlá rostlina s jedinečnými schopnostmi pro toleranci soli. Listy jsou kopinaté, květenství špičatá s 1-3 zelenými přisedlými květy. Plody jsou okřídlené se širokými semeny.[11]



*Obrázek 18: Bassia indica [41]*

### **Výskyt**

Tato rostlina je rozšířená po celém Izraeli, najdeme ji na pouštích, ale i v lesích. [11]

## **Využití**

Podle výzkumu snižuje slanost odpadních vod o 20-60 % ve srovnání s neosázenými systémy nebo se systémy osazenými jinými mokřadními rostlinami. Snížení salinity je způsobeno akumulací solí a to především sodíku a draslíku v listech rostlin. [11]

Na základě výsledku bylo zjištěno, že 80 % K, Na se akumuluje ve výhoncích a v kořenech méně než 20 %. Kromě toho, rostliny mohou zabránit zápachu škodlivin, zvýšit estetický vzhled, poskytovat plochu pro mikrobiální růst, a mohou být použity jako bioindikátory pro řízení CW. [11]

## 5 VLIV SLANÝCH DŮLNÍCH VOD NA HALOFYTNÍ ROSTLINY

### 5.1 Salinita

Jeden z hlavních faktorů, které ovlivňují živé organismy, je obsah soli ve vodě a v půdách. Tzv. salinitu neboli solnost, způsobuje vysoká koncentrace rozpuštěných látek (RL). Jde o rozpuštěné anorganické soli (RAS), především chloridy, sírany, uhličitany, dusičnany, soli vápníku, sodíku, hořčíku a draslíku. [12]; [13]

Zvýšenou salinitu našich toků zapříčiňuje vypouštění nedostatečně čistých vod do recipientu, což má za důsledek znečištění vod, čímž se snižuje i jejich další využití. Koncentrace solí vyjadřujeme v mg/l, v g/l nebo v promilích. V sladkých vodách se salinita pohybuje okolo 1 g/l, kdežto průměrná koncentrace moří a oceánů dosahuje až 35 g/l. U moří a oceánů závisí na mořských proudech, přítocích velkých řek atd. Největší obsah soli vykazují vnitrozemské slané vody nazývané saliny s až 25 % solí. Mrtvé moře má koncentrací solí dosahující 70 g/l a voda nadnáší takovou silou, že není možné se v ní utopit. [12]; [13]

S vysokou salinitou se setkáváme i u důlních vod s koncentrací 15 – 30 g/l, ale místně dosahuje až 200 g/l. Důlní vody s vysokým obsahem jodu a bromů mohou být využívány v lázeňství k léčebným účelům. [13]

Kvůli abnormální koncentraci solí najdeme ve slaniskách a slaných vodách především specializované druhy organismů, které se těmito podmínkám adaptovaly (například vylučováním přebytečných solí z těla). Rostliny tolerující a často i vyžadující vysokou koncentraci solí, nazýváme halofyta. [12]

Činnosti spojené s těžbou a se zpracováním nerostných surovin podstatným způsobem ovlivňují životní prostředí a jedince. I přes ohleduplný přístup k oblastem v životním prostředí, dochází v souvislosti s důlní činností k negativnímu ovlivnění flóry, fauny i již fungujících ekosystémů v areálech dolů, ale i v nejbližším okolí. Změny ekosystémů jsou způsobeny zvýšenou prašností, změnou režimu podzemních vod, technikou používanou k těžební činnosti. Na postupné likvidaci stávajících ekosystémů se ve velké míře podepsal i zábor ploch a jejich průmyslové využití. [9]

Ke vzniku nových ekosystémů a změně druhové diverzity na daném území dochází především po ukončení těžební činnosti. Nově vzniklé přirozené ekosystémy jsou prospěšné pro rozvoj flóry a fauny na problémovém území, které jsou významné z pohledu ochrany přírody. [9]

## 5.2 Salinita a rostliny

Solný stres závažně působí na existenci rostlin. Klíčení semen, růst, kvetení i vývoj plodu ovlivňuje nedostatečný příjem vody (nízký vodní potenciál) a esenciálních nutrientů, přímá toxicita ionty  $\text{Na}^+$  a  $\text{Cl}^-$ . [18]

U rostlin vystavovaných hyperosmotickému stresu můžeme pozorovat omezení růstu a po delší expozici dochází k úhynu rostliny. Dalším projevem stresu je narušení celistvosti membránového systému a změna aktivity enzymů, což má za příčinu vysoká koncentrace sodíku v podzemní části rostliny narušující přijímání draslíku, který udržuje buněčný turgor. Pokud sodík vnikne do cytoplasmy, inhibuje funkce několika enzymů. Následkem bývá poškození fotosyntetického aparátu a oxidativní stres. Inhibice enzymů je závislá na poměru výskytu sodíku a draslíku. Čím vyšší koncentrace sodíku, tím je draslík pro rostlinu škodlivější. Vápník hraje v tomto procesu nemalou roli. Zvýšený příjem vápníku chrání rostliny s vysokým obsahem sodíku. [18]; [22]

Reaktivní formy kyslíku tzv. ROS svým vznikem způsobují oxidativní poškození membránových lipidů, nukleových kyselin a proteinů, ale zároveň patří k prvkům ovlivňujících uzavření průduchů. [18]

Odezva rostlin na solný stres spočívá v syntéze slučitelných organických osmolytů. Mezi osmolyty, které mají za úkol udržení osmotického potenciálu a ochranu subbuněčné struktury, řadíme sacharidy, aminokyseliny, polyalkoholy a kvartérní aminové sloučeniny. [18]

Mannitol zachytává volné radikály, trehalosa a glycinbetain chrání membrány a stabilizuje kvartérní strukturu proteinů. Jako zásobárna dusíku a uhlíku slouží aminokyselina prolin, významný osmoprotektant. Prolin v rostlině stabilizuje subbuněčné kultury, zachytává volné radikály a vyrovnává buněčný redox potenciálu vyvolaném při stresu. [18]

### 5.3 Tolerance salinity u halofyt

Aby funkce v buňkách probíhaly bezchybně, je potřeba udržovat v cytosolu vysokou hodnotu poměru  $K^+/Na^+$  a to i za předpokladu salinity, kdy bývá sodík přijímán ve větší míře. Transport, syntéza osmolytů, ukládání  $Na^+$  iontů ve vakuolách a akumulace  $K^+$  při vysoké koncentraci iontů  $Na^+$  a  $Cl^-$  jsou mechanismy halofytních rostlin, které v cytosolu zabraňují toxickým účinkům  $Na^+$  a vyrovnávají osmotickou rovnováhu. [18]

Důležitou roli pro halofytní rostliny hrají transportní enzymy  $H^+$ -ATPasa a  $H^+$ -PPasa, které ve vakuole zajišťují přebytek protonů, které se pak mohou podílet na transportu  $Na^+$  iontů vedoucích do vakuoly prostřednictvím antiportů. [18]

Halofytní rostliny jsou schopny, na rozdíl od ostatních rostlin i ve stresu usměrňovat příjem vody do buněk vlivem vyšší koncentrace osmoticky aktivních sloučenin. Osmolyty najdeme v cytosolu, jsou to látky osmoticky aktivní a kompatibilní k prostředí v cytosolu, patří mezi ně: kvartérní amoniové a terciální sulfoniové sloučeniny, aminokyseliny a syntetizované cukerné alkoholy. [18]

Osmoprotektant glycinbetain, kvartérní amoniová sloučenina chrání rostlinu proti dehydrataci, je slučována dvoukrokovou oxidací chinolinu přes betainaldehyd v chloroplastech. Glycinbetain se vyskytuje u halofytních rostlin čeledi *Poaceae* a *Chenopodiaceae*. [18]

Prolin, nacházející se v cytosolu buněk, slouží k vyrovnání osmotického tlaku, snižuje účinky NaCl na buněčné membrány a má funkci ve stabilitě membrán. Mimo jiné usměrňuje množství využitelného dusíku. [18]

Rostliny produkují a akumulují aminokyselinu prolin při odezvě na abiotický stres (salinita, vodní deficit, změna teploty, vysoká koncentrace těžkých kovů). Závislost mezi produkcí prolinu a vysokou tolerancí k salinitě bývá některými autory popisována, ovšem přímá spojitost mezi stupněm zasolení a vytvářením prolinu v rostlinách zatím nebyla dokázána. Prolin má řadu enzymů syntézy, např. pyrrolin-5-karboxylreduktasa, pyrrolin-5-karboxylsyntetasa. [18]

Vědci přišli na pozoruhodné zjištění, co se týče akumulace osmoprotektátů glycinbetainu a prolinu. S vysokou akumulací prolinu rostliny produkují v menší míře glycinbetain a funguje to i naopak. [18]

Výzkumy mnoha autorů se zabývají vlivem solného stresu a s tím spojenou vysokou tvorbou reaktivních forem kyslíku a změnou aktivity enzymů antioxidantního systému. Ovšem není možné s přesností říci, zda halofytní rostliny mají k dispozici nějaké specifické stimulační či regulační mechanismy. [18]

U halofytů i u ostatních rostlinných druhů se v důsledku solného stresu zvyšuje celková aktivita enzymů (superoxid dismutasa (SOD), katalasa, peroxidasy, atd.), ale liší se v aktivitě individuálních isoform. Halofytní rostlina *Sueda salsa* byla vystavována solnému stresu. Po určité době se u ní nezměnila celková aktivita SOD a v mitochondriích a chloroplastech se prokázala zvýšená aktivita Fe-SOD a Mn-SOD isoform a došlo ke snížení aktivity Cu/Zn-SOD I. Rozdíly v aktivitě enzymu katalasy, díky kterému se v rostlině udržuje nízká hladina ROS, jsou charakterizovány u několika rostlinných druhů. [18]

Halofytní rostliny mají mechanismy, které jim dovolují odolávat vysokým příjmům  $\text{Na}^{2+}$  a  $\text{Cl}^-$  iontů. Tyto mechanismy se nejspíše uplatňují i při vyšším příjmu ostatních iontů. Z toho vyplývá, že halofyta jsou odolná i vůči těžkým a dají se využít ve fytořemediacích, jak již bylo zmíněno. [18]

Podle adaptace k salinitě rozdělujeme slanomilné rostliny na dva typy:

- **Typ kumulační**, kdy rostliny tolerují vysokou koncentraci solí v buněčné šťávě a kdy vlivem nízkého vodního potenciálu kořenů, jsou schopny přijímat vodu i v oblastech fyziologicky suchých (vysoce zasolený půdní roztok). [21]
- Slanomilné rostliny aktivně regulují (snižují) obsah solí v těle rostliny, řadíme mezi **typ regulační**. Rostliny vylučují přijatou sůl na povrch listu pomocí speciálních solných žlázek (travníčka (*Armeria*), tamaryšek (*Tamarix*)), žláznatými trichomy (lebeda (*Atriplex*)) nebo dojde k opadu starých listů (typické pro sítinu Gerardova (*Juncus attenuatus*)). Koncentraci solí (nejčastěji  $\text{Cl}^-$ ) regulují rostliny současným příjmem dostačujícího množství vody, buňky v tělech rostlin jsou proto mnohem větší než u druhů, které netolerují přítomnost solí. Rostliny s takovými buňkami jsou charakteristické sukulentním vzhledem, např. slanorožec (*Salicornia*) a solnička (*Sueda*). [21]

## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se blíže věnuje vlivům slaných důlních vod na halofytní rostliny. V první části jsem se zaměřila na problematiku důlních vod od jejich vzniku, výskytu, zařazení podle horního a vodního zákona až po chemismus. Co se týče chemismu, zajímaly mě slané důlní vody, které se vyskytují na Ostravsko – Karvinsku, například na dolech Lazy, kde je prováděn experiment s rákosinami. Zde jsou v rámci experimentu odebírány vzorky důlní vody, poté jsou analyzovány a zkoumají se stresové vlivy na rákos obecný. Na tomto experimentu se podílím a ráda bych v něm pokračovala v rámci diplomové práce.

Akumulaci a fytoremediaci jsem popsala v další části rešeršní práce. Rostliny, konkrétně halofyta, jsou schopné akumulovat slanou vodu i s jejími ionty a tím napomáhat odsolování vod a půd.

Cílem bakalářské práce bylo shrnutí vlivů slaných důlních vod na halofytní rostliny a jejich možné využití při fytoremediacích. Bylo zjištěno, že halofytní rostliny jsou vhodné pro růst a vývoj v prostředí s vysokým obsahem soli, tedy v místě s výskytem slaných důlních vod a to díky specifickým mechanismům, pomocí kterých mohou odolávat vysokým příjmům  $\text{Na}^{2+}$  a  $\text{Cl}^-$  iontům (tolerují vysokou koncentraci solí v buněčné šťávě a vlivem nízkého vodního potenciálu kořenů, jsou schopny přijímat vodu i v oblastech fyziologicky suchých). Můžeme tedy říci, že jsou vhodné i pro fytoremediace. Například *Bassia indica* je v Izraeli používána pro odsolování pomocí kořenů rostliny pravděpodobně metodou rhizodegradace.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERARUTY

- [1] KUKAL, Zdeněk a František. REICHMANN. *Horninové prostředí České republiky: jeho stav a ochrana*. Vyd. 1. Praha: Český geologický ústav, 2000, 189 s. ISBN 80-7075-413-3.
- [2] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 373
- [3] Zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon)
- [4] MAKARIUS, R. Horní zákon: komentář k zákonu č. 44/1988 Sb. o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon). V Ostravě: Anagram, 2012, 103 s. ISBN 978-80-7342-237-0.
- [5] Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon ve znění pozdějších předpisů)
- [6] ČERNÝ, Ivo. *Uhelné hornictví v ostravsko-karvinském revíru*. Ostrava: Anagram, 2003, 564 s. ISBN 80-7342-016-3.
- [7] KUČEROVÁ, Petra., Martina MACKOVÁ a Tomáš MACEK. *Perspektivy fytořediace při odstraňování organických polutantů a xenobiotik z životního prostředí*, Chemické listy 93, Praha: Česká společnost chemická, 1999, 346–352 s. ISSN 0009-2770.
- [8] SOUDEK, Petr a kol, *Fytořediace a možnosti zvýšení jejich účinnosti*, Chemické listy 102, Praha: Česká společnost chemická, 2008, 19-26 s. ISSN 0009-2770.
- [9] ČERNÍK, Miroslav. *Geochemie a řediace důlních vod*. Vyd. 1. Praha: Aquatest, 2008, 252 s. ISBN 978-80-254-2921-1.
- [10] STACH, Jaromír. et. al., *Rostliny pro kořenovou řističku*. Čističky Vše o čištění odpadní vody [online]. 2012 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.cisticka.info/potrebuji-čci-cisticku/jak-funguje-korenova-cisticka-odpadnich-vod/>
- [11] SHELEF Oren, GROSS, Amit and Shimon RACHMILEVITCH. *The use of *bassia indica* for salt phytořediation in constructed wetlands*. *Water research*, Vol. 46. Issue 13. 2012. 3967 - 3976 pp. ISSN: 0043-1354.

- [12] LAŠTŮVKA, Zdeněk a Pavla. KREJČOVÁ. *Ekologie*. 1. vyd. Brno: Konvoj, 2000, 184 s. ISBN 80-85615-93-2.
- [13] HERČÍK, Miroslav. *111 otázek a odpovědí o životním prostředí: chytrá kniha pro studenty, odborné pracovníky a širokou veřejnost*. Ostrava: Montanex, 2004, 150 s. ISBN 80-7225-123-6.
- [14] GRMELA, Arnošt. *Problematika důlních vod a ochrana kvality povrchových vod při jejich vypouštění*. In: Sborník vědeckých prací VŠB – TU Ostrava. Řada hornicko – geologická, 1999. Ostrava: ISSN 0474-8476- Roč. 45
- [15] GRMELA, Arnošt a Andrej BLAŽKO. *Důlní vody a jejich začlenění v legislativě České republiky 2008*. Dostupné z: <http://slon.diamo.cz/hpvt/2004/Z/Z06.htm>
- [16] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ. *Chemie a technologie vody*, 2. doplněné vydání, ARDEC,s.r.o., Brno, 2006, ISBN 80-86020-50-9
- [17] VANĚK, Tomáš., SOUDEK, Petr, TYKVA, Richard a Ivana KALIŠOVÁ. *Možnosti využití fytořemediace pro odstranění kontaminace způsobené toxickými kovy a radionuklidy*. 2002. Dostupné z : [http://slon.diamo.cz/hpvt/2002/sekce/zahlazovani/Z07/P\\_07.htm](http://slon.diamo.cz/hpvt/2002/sekce/zahlazovani/Z07/P_07.htm)
- [18] MOŤKOVÁ Kateřina., PODLIPNÁ, Radka., VANĚK, Tomáš a Zdeněk KAFKA. *Halofytní rostliny a jejich možné využití ve fytořemediacích*. Chemické listy. 2014, Roč. 108, č. 6, s. 586-591. ISSN 0009-2770. Dostupný z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014\\_06\\_586-591.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_06_586-591.pdf)
- [19] CHYTRÝ, Milan. *Vegetace České republiky*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2011. ISBN 978-80-200-1918-9.
- [20] VOLKOV, Vadim. *Salinity tolerance in plants. Quantitative approach to ion transport starting from halophytes and stepping to genetic and protein engineering for manipulating ion fluxes*. 2015 Front. Plant Sci. 6:873. doi: 10.3389/fpls.2015.00873
- [21] Chemické factory ovlivňující život rostlin. Dostupné z: [http://www.botany.upol.cz/pagedata\\_cz/vyukove-materialy/66\\_zaklady-ekologie-3-1.pdf](http://www.botany.upol.cz/pagedata_cz/vyukove-materialy/66_zaklady-ekologie-3-1.pdf)

- [22] ZHU, Jian-Kang. *Plant Salt Stress*. In: eLS. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. 2007 <http://www.els.net> [doi: 10.1002/9780470015902.a0001300.pub2]
- [23] CRAWFORD, Ronald. L and Don L CRAWFORD. *Bioremediation: principles and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, xii, 400 s. ISBN 0-521-01915-x.
- [24] OVESNÁ, Jaroslava a Vladimíra POUCHOVÁ. *Využití rostlin pro fytořemediaci: sborník z workshopu : VÚRV Praha, 23.6.2011 [CD-ROM]*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2011. ISBN 978-80-7427-073-4.
- [25] KADLÍKOVÁ, Lenka. *Fytořemediace aneb rostliny které čistí půdu* [online]. 2009 [cit. 2016-03-07]. ISSN 1801-2787. Dostupné z: <http://www.priroda.cz/clanky.php?detail=1242>
- [26] PAČES, Tomáš. *Chemické rovnováhy v přírodním systému voda-hornina-atmosféra*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1972.
- [27] ČABALA, Radomír. *Ekotoxikologie*. Praha, 2013. Akademická práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [28] GRMELA, Arnošt. *Hydrogeologie: aplikovaná hydrogeochemie*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1982.
- [29] HOSKOVEC, Ladislav. BOTANY.CZ: MESEMBRYANTHEMUM CRYSTALLINUM L. – kosmatec třpytivý / poludňovka trblietavá [online]. 2007 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/mesembryanthemum-crystallinum/>
- [30] ELIÁŠ, Pavol. BOTANY.CZ: SALICORNIA PROSTRATA Pall. – slanorožec rozprostřený / slanorožec rozprestretý [online]. 2009 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/salicornia-prostrata/>
- [31] GRULICH, Vít. BOTANY.CZ: SESUVIUM PORTULACASTRUM (L.) L. – tlustobýl [online]. 2011 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/sesuvium-portulacastrum/>
- [32] CHOJNACKA, Katarzyna. *Biosorption and bioaccumulation – the prospects for practical applications*. Wrocław, 2009. ISSN 0160-4120.

- [33] LOTTERMOSER, BG. *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impact*. 3rd edition. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-12418-1
- [34] MICHÁLEK, Bechřich a kol. *Využití tepelné energie důlních vod zatopených hlubinných dolů*. 2007, 12(Mimořádné 1), 92-98. ISSN 1335-1788.
- [35] SHABALA, SN and MACKAY, AS.: *Ion transport in halophytes. Advances in Botanical Research* 57: 2011, str.151-187
- [36] CIBULKA, Radim. *BOTANY.CZ: MEDICAGO SATIVA L. – tollice vojtěška / lucerna siata* [online]. Praha, 2007 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/medicago-sativa/>
- [37] ITRC: *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised* [online]. In: . Washington DC, 2009 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://itrcweb.org/GuidanceDocuments/PHYTO-3.pdf>
- [38] ZEMAN, Josef. *Geochemický model přírodního mokřadního systému*. In *Geochemie a remediace důlních vod*. 1. vyd. Praha: Aquatest, a s., 2008. s. 203-208, 6 s. ISBN 978-80-254-2921-1.
- [39] PAČES, Tomáš. *Základy geochemie vod*. Academia. Československá akademie věd. Praha. 1983
- [40] PITTER, Pavel. *Hydrochemie. 3. přeprac. vyd.* Vysoká škola chemickotechnologická v Praze, Praha 6 : Vydavatelství VŠCHT, 1999. 568 s. ISBN 80- 7080-340-1 Dostupný z www.: [http://www.muor.cz/meu/dokumenty/str\\_plan\\_2008.pdf](http://www.muor.cz/meu/dokumenty/str_plan_2008.pdf)
- [41] SHELEF, Oren, GROSS, Amit. And Shimon RACHMILEVITCH. *Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives*. *Water* 2013.5:405-419
- [42] In: List opatření: *Odsolování vysoce koncentrovaných slaných důlních vod* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: [http://www.pod.cz/plan-oblasti-povodi-Odry/c-stav/listyopatreni/c4\\_06/od130005.pdf](http://www.pod.cz/plan-oblasti-povodi-Odry/c-stav/listyopatreni/c4_06/od130005.pdf)
- [43] DVORSKÝ, Jiří. *Ostravsko-karvinský detrit: spodnobádenská bazální klastika české části hornoslezské pánve* : [monografie]. Ostrava: Montanex, 2007. ISBN 978-80-7225-231-2.

[44] Zuzana. *Důlní vody, jejich vznik, vývoj, ekologické dopady a řešení*. In Sborník odborného semináře. Nařízení REACH, Směrnice o povrchových vodách a Rámcová směrnice o vodách. Brno: Těžební Unie, 2008.

[45] Biolib.cz [online]. 2006 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.biolib.cz/cz/image/id21504/>

[46] MIŽÍK, Peter. *BOTANY.CZ: PHRAGMITES AUSTRALIS (Cav.) Steud. – rákos obecný / trst' obyčejná* [online]. 2008 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/phragmites-australis/>

[47] DÍTĚ, Daniel. *JUNCUS GERARDII Loisel. – sítina Gerardova / sítina Gerardova* [online]. 2009 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/juncus-gerardii/>

## **POUŽITÉ NORMY A ZÁKONY**

Horní zákon č. 44/1988 Sb. *o ochraně a využití nerostného bohatství*

Vodní zákon č. 254/2001 Sb. *o vodách a o změně některých zákonů*

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. *o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech*

## SEZNAM ZKRATEK

AMD	kyselé důlní vody (acid mine water)
aPAT	důlní vody alterované freaticko-atmosférického typu
BSK <sub>5</sub>	biochemická spotřeba kyslíku
BTEX	cyklické uhlovodíky (areny)
CW	umělý mokřad
NEL	nepolární extrahovatelné látky
NL	nerozpuštěné látky
OKD	Ostravsko-karvinské doly
OKR	Ostravsko-karvinské detrit
OTP	důlní vody provozně technologického typu
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PAT	důlní vody freaticko – atmosférického typu
PCB	polychlorované bifenyly
RAS	rozpuštění anorganické soli
RL	rozpuštěné látky
ROS	reaktivní formy kyslíku (reactive oxygen species)
SOD	superoxidismutasa
WDT	důlní vody ložiskového typu

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: PAT, typ důlní vody [14] .....	5
Obrázek 2: aPAT, typ důlní vody [14] .....	5
Obrázek 3: OTP, typ důlní vody [14] .....	6
Obrázek 4: WDT, typ důlní vody [14].....	7
Obrázek 5: Tolice vojtěška, Foto: Radim Cibulka, 2007, [36].....	19
Obrázek 6: Schéma rhizofiltrace [37] .....	20
Obrázek 7: Schéma fytovolatilizace [37].....	21
Obrázek 8: Schéma fytoakumulace [37].....	22
Obrázek 9: Schéma fytostabilizace [37] .....	23
Obrázek 10:kořenovník obecný, Foto: Stolz, Gary M. [45] .....	25
Obrázek 11: Mikrosnímek solných měchýřků na listu [35] .....	26
Obrázek 12: Kosmatec třpytivý na pláži v Tenerife, Foto: Ladislav Hoskovec, 2006 [29]	27
Obrázek 13: Slanorožec rozprostřený, Foto: Pavol Eliáš, 2009 [30].....	28
Obrázek 14:Tlustobýl, Foto: Ljuba Procházková, 2015 [31] .....	29
Obrázek 15:Rákos obecný, Foto: Ladislav Hoskovec, 2005 [46] .....	30
Obrázek 16:Rákos obecný na dole Lazy, Foto: Anna Brodská, 2015 .....	31
Obrázek 17: Sítina Gerardova, Foto: Daniel Dítě, 2006 [47].....	32
Obrázek 18: Bassia indica [41] .....	33

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1:Dělení důlních vod podle pH [2] .....	14
---	----