



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

TĚŽKÉ KOVY VE ZDROJÍCH PITNÉ VODY A MOŽNOSTI JEJICH ODSTRANĚNÍ

HEAVY METALS IN DRINKING WATER SOURCES AND POSSIBILITIES OF THEIR REMOVAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Halašta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Renata Biela, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství obcí
Student: **Bc. Tomáš Halašta**
Vedoucí práce: **Ing. Renata Biela, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: N0732A260025 Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Těžké kovy ve zdrojích pitné vody a možnosti jejich odstranění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

První část diplomové práce bude zaměřena na problematiku těžkých kovů, jejich výskyt ve zdrojích pitné vody České republiky a možnosti jejich odstranění vodárenskými procesy. V druhé části diplomové práce bude proveden laboratorní experiment odstranění vybraných těžkých kovů z vody s využitím zvoleného vodárenského procesu. Závěrem bude posouzena účinnost daného procesu na odstranění těžkých kovů ze zdrojové vody.

Cíle a výstupy diplomové práce:

V rámci diplomové práce by mělo být dosaženo následujících cílů:

1. vypracování rešeršní části práce se zaměřením na problematiku těžkých kovů, jejich výskyt ve zdrojích pitné vody České republiky a možnosti jejich odstranění vodárenskými procesy,
2. provedení laboratorního experimentu zaměřeného na odstranění vybraných kovů z vody s využitím zvoleného vodárenského procesu,
3. vyhodnocení experimentu a posouzení účinnosti vodárenského procesu na odstranění vybraných kovů ze zdrojové vody.

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] GRAY, N. F. Drinking Water Quality. Problems and Solutions. 2nd Edition. Cambridge University Press, 2008. 520 p. ISBN 978-0-521-70253-9.

[2] GRAY, N. F. Water Technology. An Introduction for Environmental Scientists and Engineers. Third Edition. Elsevier, 2010. 747 p. ISBN 978-1-85617-705-4.

[3] FERRANTE, M., OLIVERI CONTI G., RASIC-MILUTINOVIC Z., JOVANOVIC D. Health Effects of Metals and Related Substances in Drinking Water. 1st Edition. IWA Publishing, 2014. 126 p. ISBN 978-1-78040-597-1.

[4] PITTER, Pavel. Hydrochemie. 4. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2009. 568 s. ISBN 978-80-7080-701-9.

[5] BIELA, R., ŠOPÍKOVÁ, L. Efficiency of sorption materials on the removal of lead from water. Applied Ecology and Environmental Research, 2017, 15(3), p. 1527–1536, ALÖKI Kft., Budapest, Hungary. ISSN 1785-0037.

[6] Články z odborných časopisů Vodní hospodářství, Sovak, TZB-info.

[7] Odborné články ze sborníků konferencí a seminářů.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2022

L. S.

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
vedoucí ústavu

Ing. Renata Biela, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na těžké kovy ve zdrojích pitné vody a možnosti jejich odstranění. První část práce je zaměřena na seznámení se s těžkými kovy a jejich zdroji. Ohledně problematiky těžkých kovů je podstatná jejich toxicita, kterou se tato práce také zabývá. V další kapitole jsou rozebrány možnosti odstraňování těžkých kovů ze zdrojů pitné vody. Druhá část práce je věnována experimentu, který je zaměřen na odstraňování vybraných těžkých kovů, a to niklu a kadmia, pomocí adsorpce. Jako adsorpční materiály byly vybrány GEH a Bayoxide E33. V této části práce je popsán postup experimentu a jeho výsledek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Těžké kovy, zdroje těžkých kovů, toxicita těžkých kovů, úprava vody, adsorpce, pitná voda

ABSTRACT

This diplomat thesis focuses on heavy metals in drinking water sources and possibilities of their removal. The first part of the work is focused on getting know about heavy metals and their sources. Regarding the issue of heavy metals, their toxicity is essential, which i salso dealt with in this work. The next chapter discusses the possibilities of removing heavy metals from water sources. The second part of the work is dedicated to the experiment, which is focused on the removal of selected heavy metals nickel and cadmium using the removal process of adsorption. GEH and Bayoxide E33 were selected as adsorbent materials. This part of the thesis describes the procedure of the experiment and its result.

KEY WORDS

Heavy metals, sources of heavy metals, toxicity of heavy metals, water treatment, adsorption, drinking water

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

HALAŠTA, Tomáš. *Těžké kovy ve zdrojích pitné vody a možnosti jejich odstranění*. Brno, 2023, 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí Ing. Renata Biela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Těžké kovy ve zdrojích pitné vody a možnosti jejich odstranění* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13.1.2023

.....

Bc. Tomáš Halašta
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Těžké kovy ve zdrojích pitné vody a možnosti jejich odstranění* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13.1.2023

.....

Bc. Tomáš Halašta
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval paní Ing. Renatě Biele, Ph. D. za trpělivost, čas, ochotu, odborné rady a za dohled jako vedoucí mé diplomové práce. A také Ing. Světlaně Moravčíkové za cenné rady a pomoc při vytváření a plánování experimentu.

Obsah

1. ÚVOD	4
2. Těžké kovy v životním prostředí	5
2.1 Těžké kovy ve vodním prostředí.....	5
2.2 Zdroje těžkých kovů	6
2.3 Zdroje těžkých kovů ve vodě.....	7
2.3.1 Přírodní zdroje	8
2.3.2 Antropogenní zdroje	8
2.3.3 Odpadní vody z domácnosti	9
2.3.4 Průmyslové zdroje.....	9
2.3.5 Zemědělský rozvoj	9
2.3.6 Atmosférické zdroje	9
2.3.7 Zdroje z těžby	10
2.4 Toxické účinky těžkých kovů na vodní organismy	11
2.5 Těžké kovy a jejich toxicita	11
2.5.1 Arsen (As)	12
2.5.2 Olovo (Pb).....	14
2.5.3 Kadmium (Cd)	15
2.5.4 Nikl (Ni).....	16
2.5.5 Měď (Cu)	17
2.5.6 Zinek (Zn).....	18
2.5.7 Selen (Se).....	19
2.5.8 Chrom (Cr).....	19
2.5.9 Rtuť (Hg)	20
3. Technologie pro odstraňování těžkých kovů.....	22
3.1 Koagulace/filtrace (sedimentace)	22

3.2	Adsorpční technologie.....	23
3.2.1	Aktivní uhlí.....	24
3.2.2	Povrchy na bázi železa.....	24
3.2.3	Aktivovaný oxid hlinitý (AA).....	25
3.2.4	Greensand.....	25
3.2.5	Ostatní média.....	26
3.3	Iontová výměna.....	26
3.4	Membránové procesy.....	27
3.4.1	Reverzní osmóza (RO).....	28
3.4.2	Nanofiltrace (NF).....	28
3.4.3	Ultrafiltrace (UF).....	28
3.5	Chemické srážení.....	29
3.6	Fotokatalýza.....	29
3.7	Ostatní.....	29
3.8	Výhody a nevýhody rozvoje technologií úpravy vody.....	30
4.	Vliv vlastností jakosti vody na odstranění těžkých kovů.....	31
4.1	Vliv pH.....	31
4.2	Vliv teploty.....	32
4.3	Vliv iontové síly.....	33
4.4	Vliv přítomnosti přírodních organických látek.....	33
5.	Bilance jakosti vody v ČR týkající se těžkých kovů.....	35
6.	Laboratorní experiment.....	38
6.1	Vybraný úpravárenský proces – adsorpce.....	38
6.2	Vybrané adsorpční materiály.....	39
6.2.1	GEH.....	39
6.2.2	Bayoxide E33.....	40
6.3	Postup měření.....	41

6.3.1	Příprava měření.....	41
6.3.2	Průběh měření.....	46
6.4	Vyhodnocení experimentu.....	49
6.5	Zhodnocení experimentu.....	54
7.	Závěr.....	57
	Použitá literatura	60
	Seznam zkratk.....	63
	Seznam tabulek	65
	Seznam obrázků	66

1. ÚVOD

Voda je vedle vzduchu nejdůležitějším a nenahraditelným prvkem pro zajištění života. Podle údajů je Země pokryta 71 % vodou, z toho 96,5 % tvoří moře a oceány, 1,7 % podzemní vody a 1,7 % ledy a ledovce. S rozvojem technologií a rostoucím nedostatkem vody se lidé začínají pouštět do většího odčerpávání podzemních vod. Podzemní voda má značný význam jako obživa života a jako finanční a ekonomický stav pro obyvatele žijící v suchých oblastech po celém světě. Když se budeme bavit o významu podzemní vody pro zemědělství v suchých oblastech, dojde nám, že je tento zdroj vzácný. Zdroje podzemních vod zažívají tlak na kvantitu a kvalitu v důsledku rychlého růstu populace, urbanizace, zemědělského využívání a rozvojových aktivit. Podzemní voda má využití nejen pro společnost a průmysl, ale je také nezbytná pro udržení ekosystémů závislých na vodě. Na základě výzkumu spojuje mělká podzemní voda asi jednu třetinu zemských povrchů, přes které jsou vodonosnými vrstvami spojeny řeky, rybníky a záplavové oblasti. Pokud tedy dojde ke kontaminaci nebo snížení kvality podzemní vody, bude to mít přímý vliv na kvalitu zdroje vod povrchových, které jsou napojeny na vody podzemní. [1]

Využití podzemní vody se v posledních několika desítkách let enormně zvýšilo, protože je pro nás v dnešní době dobře dostupná a neobsahuje tolik organické aktivity. Avšak zvýšením růstu populace a průmyslu se také zvýšila kontaminace zdrojů podzemních vod a stává se z toho globální problém, který způsobují polutanty, do kterých se řadí i těžké kovy. Ačkoli některé z nich působí jako základní mikroživiny pro živé bytosti, ve vyšších koncentracích mohou vést k těžké otravě. Těžké kovy jsou stále významnými znečišťujícími látkami životního prostředí a jejich toxicita je stále větším problémem z ekologických, evolučních a ekologických důvodů. [1]

Těžké kovy se stávají jedním z nejzávažnějších enviromentálních problémů kvůli jejich perzistenci, biologické toxicitě, nerozložitelnosti a schopnosti vstupovat do potravinového řetězce. Vzhledem k tomu, že znečišťující látky z těžkých kovů mohou být nakonec přeneseny na lidi a další

pokročilé organismy prostřednictvím potravního řetězce, představují také vážnou hrozbu pro lidské zdraví. [2]

2. Těžké kovy v životním prostředí

V periodické soustavě je řazeno přibližně osmdesát kovů, z čeho je jich asi třicet označováno jako toxické nebo těžké kovy. Jejich typickou vlastností oproti organickému znečištění je skutečnost, že se nerozkládají. V přírodě se vyskytují trvale, mění se pouze jejich formy, a to podle prostředí, ve kterém se vyskytují. Těžké kovy a toxické kovy jsou často vzájemně obměňovány. Toxické kovy se vyznačují hlavně tím, že při jisté koncentraci mají nebezpečné působení na člověka a jiné biotické jedince v ekosystému. Za to těžké kovy jsou všechny kovy, u kterých je specifická hmotnost vyšší než 5 g/cm^3 . Ohledně ekotoxikologické terminologie, která se týká nebezpečných kovů pro život, se nejčastěji objevuje termín těžké kovy, kdy se do této skupiny zařazují hlavně měď, kadmium, zinek, olovo, rtuť, nikl, chrom, železo a mangan a připojují se k nim i polokovy jako je arsen a selen. [3] [4]

V přírodním prostředí se tyto kovy objevují buď jako ryzí nebo ve formě solí. Také se v jistých nízkých koncentracích přirozeně vyskytují v zemské kůře. Ve větším množství jsou přirozeně součástí hlavně v dotyčných rudách. V přírodě se těžké kovy vyskytují ve všech skupenstvích, jako jsou tuhé látky, plyny, kapaliny a také se můžou držet v aerosolech. [3] [4]

Všechny těžké kovy jsou svou povahou velmi nebezpečné. Různé mezinárodní orgány jako např. Agentura pro registr toxických látek a nemocí (ATSDR), Program OSN pro životní prostředí (UNEP) a Světová zdravotnická organizace (WHO) je považují za látky s nejvyšší hrozbou. ATSDR zařadilo arsen, olovo, rtuť, kadmium a chrom na 1., 2., 3., 7. a 17. místo v prioritním seznamu nebezpečných látek pro toxikologický profil. [3] [4]

2.1 Těžké kovy ve vodním prostředí

Ve vodním systému jsou těžké kovy přítomny ve více rozpustných formách než v suchozemském systému. Výskyt těžkých kovů ve vodním prostředí

ovlivňuje teplota, pH, rozpuštěný kyslík, tvrdost, dokonce i slanost (pokud se jedná o mořskou vodu). V mořském ekosystému je však sledování těžkých kovů složitější kvůli komplikovanějšímu chemickému složení vody a hydrodynamice. Částice kovů se stejně jako ve zbytku prostředí většinou uvolňují z minerálů procesem zvětrávání, kdy se rozpouští do vody. Největší obsah těžkých kovů má většinou sediment u povrchových vod, kde se tyto rozpuštěné částice nejvíce usazují. [4]

2.2 Zdroje těžkých kovů

Těžké kovy se dostávají do okolí přirozenou cestou a lidskou činností. Mezi různé zdroje těchto prvků patří eroze půdy, přirozené zvětrávání zemské kůry, těžba, průmyslové odpadní vody, vypouštění odpadních vod, šedé vody a mnoho dalších. Díky velice pestrému využití různých sloučenin těžkých kovů k nim můžeme přiřadit nespočet zdrojů. Nejčastější zdroje jsou z antropogenních činností. Jde hlavně o výrobní procesy, kde je základním prvkem ruda určitých kovů, které se věnují zpracovávání rud pomocí drcení, mletí, tavení nebo pražení. Z této činnosti se do životního prostředí dostává hlavně kadmium, olovo, arsen, selen, rtuť a nikl. Další průmyslovou činností je spalování fosilních paliv, kdy se do ovzduší dostává směs látek, která obsahuje sloučeniny chromu, olova, kadmia, selenu a rtuti. Dalším významným zdrojem těžkých kovů je zemědělská výroba, která se zaměřuje na užívání průmyslových hnojiv, kde se vyskytuje hlavně kadmium a olovo spolu s pesticidy, které v sobě také ukrývají určitou dávku arsenu, olova, kadmia, rtuti a mědi. Každý těžký kov má svůj specifický zdroj. Chrom se používá pro ochranu dřeva. Rtuť se využívá v lékařství a v elektrochemických procesech a nejznámější zdroj olova jsou hlavně výfukové plyny ze spalovacích motorů, který by měl být omezen díky zavedení bezolovnatého benzínu. Další kontaminační zdroje můžete nalézt v tabulce Tab. 1. [3] [4]

Tab. 1 Zdroje těžkých kovů [4] (upraveno autorem)

Těžké kovy	Zdroje kontaminace
Olovo	Úpravny rud, rafinerie, hutě, chemický průmysl, akumulátory, pigmenty v barvách, olovnaté sklo, glazury, hnojiva, pesticidy, spalování fosilních paliv, používání olovnatého benzínu
Arsen	Zpracování rud, zemědělství, kouření, veterinární medicína, aditiva do skla, ochranné prostředky pro dřevo
Selen	Zpracování rud, spalování fosilních paliv, komunální odpad, povrchové úpravy kovů, polovodiče
Měď	Elektrotechnický materiál, slitiny, chemický průmysl, komunální odpad, plechky a měděné dráty
Zinek	Pigmenty v barvách, glazury, slitiny, galvanizace, zemědělství, komunální odpad, kouření
Kadmium	Doprovodný kov v zinkových a olovených rudách, zemědělství, baterie, spalování fosilních paliv, kouření pigmenty v barvách
Rtuť	Zpracování rud, elektrochemie, zemědělství, baterie, lékařství, spalování fosilních paliv, zemědělství
Chrom	Chemický průmysl, pigmenty v barvách, ochranné prostředky, zpracování kůže, výroba cementu, slitiny, spalování fosilních paliv
Nikl	Úpravny rud, hutě, baterie, rafinerie, slitiny, kosmetické přípravky, kouření

2.3 Zdroje těžkých kovů ve vodě

Přítomnost těžkých kovů ve vodním prostředí je zapříčiněn přírodními nebo antropogenními aktivitami. Mezi přírodní patří zvětrávání hornin obsahujících kovy, erupce sopek, lesní požáry a přirozeně se vyskytující zvětrávání. Samozřejmě velká část těžkých kovů přechází do vody při kontaktu voda-hornina nebo voda-půda. [5]



Obr. 1 Zdroje těžkých kovů ve vodě [5] (upraveno autorem)

2.3.1 Přírodní zdroje

Stopové prvky jako jsou těžké kovy se v nadbytečném množství nachází v životním prostředí. Vznikají geografickými procesy, jako jsou sopečné erupce, zvětrávání hornin a vyplavování do řek, jezer a oceánů díky působení vody. Přítomnost těžkých kovů hodně závisí na geologii, hydrogeologii a geochemických vlastnostech zvodnělé vrstvy daného místa. Největším přírodním zdrojem znečištění je zvětrávání. Nejčastěji jsou to sedimentární horniny, jako je vápenec, dolomit a břidlice, které zvětráváním způsobují kontaminaci nebo znečištění vody. Nejčastěji dochází ke kontaminaci při kontaktu vody s horninovým prvkem. Příklady těchto prvků jsou žula, syenit, čedič, gabro, nefelin a andezit. A vlivem konkrétní rudy nebo minerálu se hladiny prvku zvyšují. Příklady prvků jsou magnetit, hematit, goethit, siderit, kalcit, kuprit, malachit, azurit, kaolinit, arsenopyrit, pyrolusit atd. Dále se hladina prvku zvyšuje ukládáním sulfidů, které je spojeno s mineralizací rud zlata a hydratovaných oxidů železa. [5]

2.3.2 Antropogenní zdroje

Poté co lidské osídlení a industrializace nahradil přirozené lesní a zemědělské aktivity, zvýšil se celkový dopad na životní prostředí. Všechny lidské aktivity kontaminovaly vodní ekosystémy, které zahrnují jak povrchovou, tak podzemní vodu. Hlavními antropogenními zdroji jsou odpadní vody, spalování pevného odpadu, spalování uhlí a ropy, pyrometalurgické procesy a těžba. Voda, ať už sněhem nebo deštěm, přenáší kontaminovanou půdu do přilehlých vodních ploch. Zdrojem niklu jsou zkorodované kovové potrubí a nádoby. Hlavní zdroje olova ve vodě jsou převážně přísady používané do barev, benzínu a aerosolových sraženin, které se tvoří při vysokých teplotách používaných v průmyslu pro výrobu cementu, baterií, zářivek, teploměrů a elektroniky. [5]

2.3.3 Odpadní vody z domácnosti

Do vodního prostředí se z velké části dostávají těžké kovy také z odpadních vod z domácností, které nejsou přečištěné. Tento problém je hlavně na územích, které nemají možnost mít čistírny odpadních vod. Tyto neupravené vody totiž obsahují toxiny. Pokud je voda odpadní vodou kontaminována, obohacuje se o prvky dusíku a fosforu, které pomáhají k rychlosti růstu řas a ty berou ostatním organismům kyslík z vody. Přítomnost dusitanových a dusičnanových aniontů vede k velkému ohrožení organismů. [5]

2.3.4 Průmyslové zdroje

Asi nejhlavnějším zdrojem těžkých kovů ve vodě jsou zbytky z průmyslu, a jejich akumulace se liší podle typu použitého čištění odpadních vod. Některé zdroje kontaminace vody představují odpadní vody z průmyslu, úniky z průmyslových vodních nádrží, skládky u vodních ploch a kvůli radioaktivnímu odpadu. Likvidované těžké kovy a odpad z průmyslu se hromadí v řekách a jezerech, což vede ke škodlivým účinkům na vodní organismy a lidi. [5]

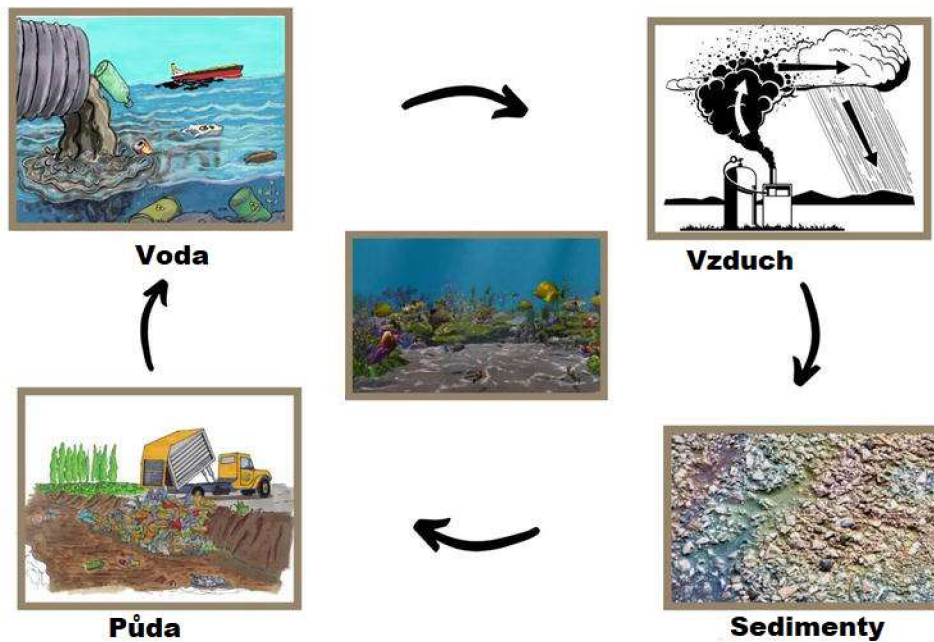
2.3.5 Zemědělský rozvoj

Vodní prostředí se může kontaminovat také díky používání hnojiv a pesticidů, kde mohou být v určité formě také obsaženy těžké kovy. Díky půdní erozi se tak tyto škodlivé látky mohou dostat do vodních zdrojů. Napomáhá tomu také déšť, který funguje pro tyto látky jako transport. Tyto vody, ve kterých jsou obsaženy hnojiva a pesticidy, jsou schopny protlačit se až do podzemních vod a tím je znehodnotit. [5]

2.3.6 Atmosférické zdroje

Drobné částičky těžkých kovů jsou ve vzduchu přítomné pomocí aerosolů a deště, většinou blízko průmyslových závodů. Nejčastěji se tyto znečišťující

látky dostávají do vzduchu ze spalování fosilních paliv nebo také vulkanickou erupcí. A dešťová voda je pak přenáší do vodních zdrojů. [5]



Obr. 2 Cirkulace kontaminantů v životním prostředí [5] (upraveno autorem)

2.3.7 Zdroje z těžby

Posledním možným způsobem, jak se těžké kovy dostávají do vodních systému, je z těžebních dolů. Většinou jsou při deštích nebo průtocích vody v dolech těžké kovy vyluhovány a poté se usazují ve vodních zdrojích. Často se jedná o důlní oblasti, kde už je důlní činnost zastavená a je vystavena vodě a vzduchu bez jakýchkoliv zásahů ošetření. Tento problém vede ke kyselému odvodnění dolů (acid mine drainage). Většina starých dolů byla postavena tak, aby mohla gravitační voda vypouštět přebytečnou vodu z dolů. Ta se poté dostává do údolí, kde kontaminuje vodu v potocích a řekách. Ve Spojených státech bylo tímto znečištění zasaženo dohromady 9 tisíc mil toků. Ve východní části 4 tisíce mil a v západní více než 5 tisíc mil. Nejčastější hornina, která tento jev provádí, je pyrit. Tato hornina obsahuje sulfid železa a při styku s vodou se rozkládá na kyselinu sírovou a železo. Kyselina sírová dramaticky snižuje pH a železo se může vysrážet a vzniká tak oranžová nebo červená vrstva oxidu železa na dně potoka. A samozřejmě se z dolů podobně mohou vyluhovat také škodlivé prvky, jako je olovo, měď, arsen nebo rtuť a znečišťovat tak vodní útvary. [5] [6]



Obr. 3 Kyselé odvodnění dolů [6]

2.4 Toxické účinky těžkých kovů na vodní organismy

Díky těsnému kontaktu vodních organismů s vodními útvary mohou těžké kovy ve vodách snadno proniknout do vodních organismů. Těžké kovy se do vodních živočichů dostávají třemi cestami. První cestou je absorbování iontů těžkých kovů rozpuštěných ve vodě pomocí žaber vodních živočichů. Poté se těžké kovy dostávají do kožních povrchových buněk nebo se dále transportují do orgánů či tkání pomocí oběhu krve. Další možností je, že do sebe vodní obyvatelstvo dostává těžké kovy pomocí trávicího traktu prostřednictvím příjmu potravy. Poslední možnou absorpcí těžkých kovů u vodních organismů je přes podkožní vrstvy. [2]

2.5 Těžké kovy a jejich toxicita

Účinky těžkých kovů z pohledu toxicity jsou velice různorodé. Tyto prvky mohou způsobovat spoustu závažných problémů, otravu krve, poškození důležitých orgánů a mohou také způsobovat rakovinu. Veličinou pro určení toxického působení těžkých kovů na organismus je jejich biologický poločas.

Ionty kovů totiž působí škodlivě uvnitř buněk, tím pádem se nejpřesněji škodlivé působení vyjádří dávkou kovu, která pronikne do jednotlivých buněk. Tím pádem jsou velmi špatně ovlivňovány specifické biochemické procesy a poškozují se cílová místa, hlavně buněčné membrány a orgány. Jednodušeji řečeno brání ionty kovu vazbou na buněčné membráně transportu přes buněčné stěny a tím blokuje přístup živin potřebných pro buňku. Další nebezpečnou schopností těžkých kovů je, že se hromadí v různých tělních tkáních. Často se proto akumulují v kostech, např. ionty olova a kadmia. [4]

V toxicitě je i velký rozdíl mezi organickými a anorganickými sloučeninami kovů, a to jak v intenzitě toxického působení, tak i v kvalitě. K nejtoxičtějším látkám patří organokovové látky, které jsou lipofilní (rozpustné v tucích, olejích) a snadno procházejí nezměněny přes buněčné membrány. [4]

Náhlé otravy těžkými kovy jsou otravy profesní. Jedná se o poškození plic, různé typy dermatitidy nebo poruchy zažívacího ústrojí. Díky kyselému prostředí v trávicí soustavě je vstup těžkých kovů do organismu požitím hodně ulehčen. [4]

Těžké poškození postiženého organismu nebo také chronické otravy jsou způsobeny díky akumulační schopnosti kovů. Nejzávažnějším chronickým účinkem těžkých kovů je karcinogenita. Kovy jsou karcinogenní ve formě svých iontů. V hodně případech kationty kovu nevyvolávají přímo karcinogenní proces, ale často spolupracují jako promotory nebo karcinogeny s organickými látkami např. polyaromatické uhlovodíky. Karcinogenní účinky jsou často spojovány s účinky mutagenními a embryotoxickými. [4]

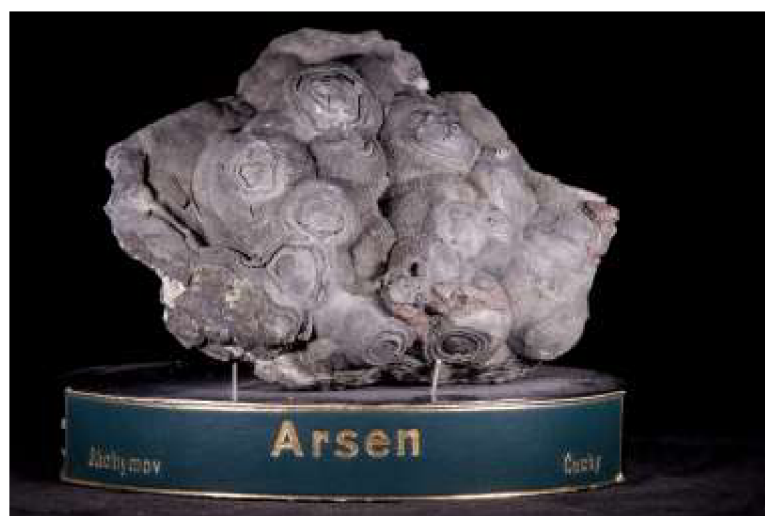
2.5.1 Arsen (As)

Arsen má polokovové vlastnosti, je výrazně toxický a karcinogenní a je široce dostupný ve formě oxidů nebo sulfidů nebo jako sůl železa, sodíku, vápníku, mědi atd. Vyskytuje se v ovzduší, půdě i ve vodách. Celková produkce arsenu ve světě je asi 36–45 tisíc t/rok, hlavně díky Číně (2016). Arsen je dvacátým nejrozšířenějším prvkem na Zemi a jeho anorganické

formy, jako je arsenit a sloučeniny arseničitanu, jsou smrtelné pro životní prostředí a živé tvory. Voda může být kontaminována používáním arsenových pesticidů, přírodními ložisky nerostů nebo nesprávnou likvidací arsenových chemikálií. Celosvětově je asi 70 zemí zasaženo kontaminací pitné vody arsenem, což ohrožuje až 150 milionů lidí. [3] [4] [5]

Arsen je protoplazmatický jed, který způsobuje poruchu buněčného dýchání, buněčných enzymů a mitózu. Sloučeniny arsenu mají silné toxické účinky s vysokou kumulativní schopností v organismech. Nejčastěji se tyto sloučeniny ukládají v ledvinách a játrech a mohou také zůstat v kůži, vlasech a nehtech. Dokonce dokážou prostoupit přes bariéru placenty a poškodit tak plod. Mají také schopnost zasáhnout nervovou soustavu. Otravu arsenem jsme schopni zachytit i pouhým okem. Při otravě se kůže rohovatí a získává charakteristický pigment v podobě šedozeleného zbarvení. Na nehtech se mohou začít objevovat bílé proužky a dech jde cítit po česneku. Nejnebezpečnější jsou anorganické sloučeniny arsenu a ohledně organického je to jeho pětimocná forma. [3] [4] [7]

Akutní otrava sloučeninami arsenu je spojena se závratěmi, bolestmi hlavy, zažívacími problémy, které se mohou posunout až k selhání krevního oběhu a tím dojít ke smrti organismu. Chronická otrava vyvolává záněty kůže, zažívací problémy natrvalo a poškození nervové soustavy, které se může projevit např. mravenčením v končetinách. Nejzávažnějšími chronickými onemocněními jsou rakovina kůže a plic, a také mutagenní účinky. [3] [4] [7]



Obr. 4 Arsen [8]

2.5.2 Olovo (Pb)

Olovo je vysoce toxický kov, který způsobuje kontaminaci životního prostředí a zdravotní problémy v mnoha částech světa. Je to zářivě stříbrný kov, někdy lehce namodralý. Při kontaktu se vzduchem se začíná zbarvovat, čímž dochází k vytváření složité směsi sloučenin. Těžba olova probíhá ve více než 40 zemích, které produkují asi 4,8 milionu t/rok (2015), kde jsou hlavními producenty Čína a Austrálie. Vysoká kontaminace olovem způsobila ohrožení na životě cca 26 milionům lidí a asi 540 tisíc úmrtí za rok (2018, WHO) zejména v rozvojových zemích. [3] [4] [7]

Na rozdíl od jiných kovů jako je měď, zinek a mangan, neplní olovo žádné biologické funkce a narušuje tak různé fyziologické procesy rostlin a živočichů. V lidském těle se 90 % olova drží hlavně v našich kostech, kde negativně ovlivňuje tvorbu krve. V časech, kdy tělo nemá dostatečně vápníku (např. těhotenství) se olovo dokáže přemístit do krve a škodlivě působit na ostatní orgány, kdy tím pádem dochází k poškození jater, ledvin a reprodukčního systému. Zvláště u malých dětí působí toxicky i na nervový systém a může způsobovat mentální retardaci. Podobně jako ionty jiných těžkých kovů jsou ionty olova také karcinogenní. Největší riziko způsobuje při vstupu olova do lidského těla požití přes trávicí soustavu (60 %), oproti inhalaci, která je asi 30 %. [3] [4] [7]



Obr. 5 Olovo [8]

2.5.3 Kadmium (Cd)

Kadmium je sedmý nejtoxičtější kov podle žebříčku ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Je to měkký kov se stříbrným leskem využívaný také pro vysokou odolnost proti korozi. Jedná se o vedlejší produkt zinku. Jakmile je tento kov absorbován lidmi, bude se hromadit uvnitř těla celý život. V dnešní době se používá v dobíjecích bateriích, pro výrobu speciálních slitin a také se vyskytuje v tabákovém kouři. Na výrobu baterií se podílí asi tři čtvrtiny celkové produkce. Odhadovaná celosvětová spotřeba se pohybuje kolem 20–24 tisíc t/rok. Jakmile se kadmium dostane do životního prostředí, zůstává v půdě až několik desetiletí. Rostliny poté z půdy kadmium přijímají, kde se v nich hromadí až se nakonec dostanou do lidského těla. Kadmium se často nachází převážně v zelenině a ovoci kvůli jeho vysoké rychlosti přenosu z půdy na rostlinu. [3] [4] [7]

Požití nadměrného množství kadmia způsobuje vysoký krevní tlak, poškození ledvin, reprodukčních orgánů, destrukci krvinek a dokáže spustit také rakovinu plic. Ionty kadmia mohou způsobovat křehnutí kostí a pokud se nahromadí velké množství kadmia v kostech, dojde ke zborcení celé stavby kostí. [3] [4] [7]



Obr. 6 Kadmium [8]

2.5.4 Nikl (Ni)

Nikl je přirozeně se vyskytující prvek a má rozsáhlé průmyslové využití. Výrazně účinkuje na lidský organismus toxicky v jeho některých sloučeninách, jako je chlorid, dusičnan, síran a fosforečnan. Vyskytuje se ve všech prostředích: v atmosféře, hydrosféře i pedosféře. Zdrojem jsou hlavně metalurgické provozy, spalovny komunálního odpadu, kouření, baterie, slitiny. [3] [4] [7]

Toxicitu vykazuje hlavně prach, který vzniká při zpracování různých niklových či poniklovaných materiálů. Absorbování velkého množství tohoto prášku může vést až k příčině rakoviny plic nebo sliznice. Při kontaktu s lidskou pokožkou může docházet k dermatitidám, které pak. Dále můžou přecházet do forem chronického ekzému. Otravy chronických forem mohou způsobovat poničení srdečního svalu, ledvin a nervového systému. Ženy jsou oproti mužům náchylnější na negativní působení niklových sloučenin. [3] [4] [7]

Znečištění niklu ve vodním prostředí nebývá úplně výrazná. Více než ryby pohlcují složky niklu vodní řasy a bezobratlí živočichové. Co se týče citlivosti na toxicitu niklu, tak jsou na tom sladkovodní organismy poměrně hůř než mořské organismy. Mnohem horší jsou dopady niklu oproti vodě na půdní prostředí. Jedná se hlavně o půdy blízko hutí a rafinerií niklu, kde často dochází ke zničení přirozeného prostředí. [3] [4] [7]



Obr. 7 Nikl [8]

2.5.5 Měď (Cu)

Měď je nezbytný prvek pro život, ale je také jedním z hlavních prvků znečištění vodního prostředí těžkými kovy. Měď je pro vodní organismy toxičtější než pro člověka a jiné suchozemské organismy. Toxicita mědi v přírodní vodě se mění se změnami hydrochemických vlastností. Mezi hlavní faktory patří vápník, pH a rozpuštěná organická hmota. V přírodě se vyskytuje hlavně ve formě svých rud. [3] [4] [7]

Měď je pro lidské tělo důležitá pro syntézu hemoglobinu a pro snížení přítomnosti zinku a kadmia v lidském organismu. Pokud se však koncentrace mědi zvýší, může docházet k vážným zdravotním komplikacím. Její přebytečné množství se poté hromadí hlavně v játrech a kostní dřeni. Rozpuštěné soli mědi poté mohou způsobit závažné problémy a poškození ledvin a jater nebo také zažívací problémy spojené s krvácením do zažívacího traktu. Zdravotním problémům spojeným s naakumulovanou mědí v játrech, ledvinách, mozku a oční rohovce se říká také Wilsonova nemoc. Další způsobenou nemocí pomocí mědi je také Mankesova choroba, která velmi negativně působí na děti do tří let a poškozuje jim nervový systém, kdy může dojít k retardaci. Pro zvířata a rostliny měď není výrazně toxická. Největší účinek má na organismy nižšího řádu jako jsou plísňe, bakterie a houby. Proti napadení organismů (např. vinná réva) v přírodě se často používá modrá skalice. [3] [4] [7]



Obr. 8 Měď [8]

2.5.6 Zinek (Zn)

Zinek je měkký základní a všudypřítomný kov namodralé barvy. Jeho hlavním zdrojem je tavení a těžba. Vyskytuje se ve všech důležitých slitinách. Nejvíce v mosazi a slitině mědi a cínu. Pro organismy je však nízká koncentrace zinku potřebná pro život. Je součástí více než dvaceti metaloenzymů a dalších cca sto enzymů ho potřebuje ke své funkci. Je důležitý také pro bílkoviny. Nedostatečné množství zinku škodí hlavně dětem (chlapcům) v období dospívání a může jim způsobovat poruchy. [3] [4] [7]

Naopak velké množství zinku může vyvolávat zdravotní problémy. Nejčastěji se zinek dostává do těla dýchacími cestami. Při vdechu velkého množství zinku např. páry s obsahem zinku se může projevit tzv. horečka z kovů. Příznaky jsou kašel, bolest hlavy, únava. Toto onemocnění se může projevit i inhalací jiných těžkých kovů např. kadmia, mědi, rtuti, olova, niklu. Sloučeniny zinku, které jsou rozpustné, jako je síran zinečnatý či chlorid zinečnatý způsobují leptavé účinky a tím vyvolávají žaludeční potíže, zvracení a průjemy. Zinek je také zastoupen ve všech přírodních prostředích, a to jak v atmosféře, vodě i půdě. Na vodní organismy působí víc toxičtěji jak na lidský organismus, a to jak na ryby, tak i na vodní mikroorganismy. [3] [4] [7]



Obr. 9 Zinek [8]

2.5.7 Selen (Se)

Selen je jeden z polokovů, který se řadí do skupiny těžkých kovů. Pro lidské tělo je selen důležitý a funguje jako antioxidant a díky jeho přítomnosti v organismu snižuje toxicitu kadmia, rtuti, stříbra a thalia. Tento prvek je nejvíce rozšířený v půdě, zvláště v sedimentárních zeminách. Do prostředí se dostává erozí půdy a hornin. Jako u všech těžkých kovů je jeho větší množství toxické, ale pro člověka nejsou otravy tímto kovem běžné. Více působí hlavně na zvířata. Člověk selen přijímá hlavně z potravin jako jsou obilné produkty, masové a mléčné výrobky. Avšak otravy selenem jsou u člověka ojedinělé. Pokud však člověka zasáhnou, způsobuje dermatitidy, poškození nehtů a zubů, padání vlasů a zásah do nervové soustavy. [3] [4] [7]



Obr. 10 Selen [8]

2.5.8 Chrom (Cr)

Chrom je sedmým nejrozšířenějším prvkem na Zemi. V přírodním prostředí se vyskytuje v oxidačních stavech od Cr^{2+} do Cr^{6+} . Nejčastější formy jsou trojmocný chrom a šestimocný, které jsou toxické pro zvířata, rostliny i lidi. Chrom se do prostředí antropogenně uvolňuje prostřednictvím hnojiv a odpadních vod. V jejich oxidačních číslech jsou patrné rozdíly, kdy například Cr^{3+} je ve vodě nerozpustný, ale Cr^{4+} je vysoce rozpustný. Kvůli přebytku

kyslíku v životním prostředí Cr^{3+} oxiduje na vyšší oxidační číslo a stává se z něj extrémně toxický kov rozpuštěný ve vodě. Celková produkce chromu je asi 18-30 milionu t/rok. Z této produkce je 90 % kovu využito v metalurgickém průmyslu, který se zabývá výrobou slitin, ve kterých dominuje chrom. Zbytek je využit v chemickém průmyslu a slévárnách. [3] [4] [7]

Nejvíce toxický je šestimocný chrom, kdy jsou jeho sloučeniny výrazné karcinogeny, některé mají mutagenní účinky, špatně působí na ledviny a játra a mohou způsobit také vnitřní krvácení. [3] [4] [7]



Obr. 11 Chrom [8]

2.5.9 Rtuť (Hg)

Rtuť je přirozeně vyskytující se kov, který je lesklou stříbrno bílou kapalinou bez zápachu a při zahřátí se stává bezbarvým plynem bez zápachu. Je velmi toxická a bioakumulativní (zvyšování koncentrace látky v organismu). Rtuť se široce používá v teploměrech, barometrech, hustoměrech, zářivkách a jako katalyzátor. Celková světová produkce rtuti je asi 2300 t/rok. Rtuť se odlišuje ve třech formách: kovová rtuť, anorganické sloučeniny a organické sloučeniny, z nichž má každá jinou toxicitu a biologickou dostupnost. Tyto formy jsou přítomny ve vodních zdrojích, jako jsou jezera, řeky a oceány, kde je přijímají mikroorganismy, ve kterých se sloučeniny přeměňují na

methylnrtuť, což narušuje vodní život. Konzumace těchto živočichů je hlavním zdrojem příjmu methylrtuti do lidského těla. [3] [4] [7]

Methylrtuť se zařazuje mezi nejnebezpečnější sloučeniny rtuti a je rozpustná ve vodě i v tucích, proto má tendence držet se ve vodním prostředí. Kvůli její toxicitě, která je vysoká, dokáže prostoupit plodovou placentou a hematoencefalickou membránou, které mají v našem těle nejvyšší ochrannou činnost. Díky této schopnosti ji v toxicitě zařazujeme mezi embryotoxické a mutagenní látky. Je tedy velmi nebezpečná hlavně pro těhotné ženy, kdy může poškodit plod či vyvolat potrat. Je toxická i pro malé děti, u kterých nabeurává jejich smysly až do úplného selhání (slepota, hluchota, ztráta chuti). [3] [4] [7]



Obr. 12 Rtuť [8]

3. Technologie pro odstraňování těžkých kovů

V současné době je k dispozici mnoho způsobů, jak se dají odstranit těžké kovy z vod. Procesy jako jsou iontová výměna, membránová filtrace a chemické srážení jsou konvenčními procesy. Metoda chemického srážení je široce využívána díky své jednoduchosti. Procesy membránové filtrace jsou také účinným prvkem čištění, avšak vyžaduje vysoké náklady na jeho počáteční provoz. Iontová výměna selhává v koncentrovaných roztocích kovů. Tyto procesy jsou závislé na pH a je potřeba je stále sledovat a kontrolovat pH. Všechny tyto jmenované procesy mají nevýhodu, jako je jejich vysoká cena, tvorba kalu, dodatečné provozní náklady a vysoké pracovní náklady v důsledku zanášení membrán. V posledních letech se objevují další možné čisticí procesy jako je fotokatalýza, flotace, koagulace a adsorpce. [9]

3.1 Koagulace/filtrace (sedimentace)

Koagulační procesy využívají pro vytváření vloček buď železnaté nebo hlinité soli. Po smíchání s přitékající vodou do úpravny vod vytvářejí srážecí činidla železité nebo hlinité soli hydroxidy železa nebo hliníku. Velikou výhodou této metody je možnost kombinovat ji s odstraňováním železa a manganu a dalších kovů z vody. Vysrážený $\text{Fe}(\text{OH})_3$ nebo $\text{Al}(\text{OH})_3$ lze odstranit buď filtrací na granulovaném médiu, což znamená použití flokulace, aby se zvýšil růst větších částic nebo můžeme použít membránové mikrofiltry u kterých není potřeba přidávání kroku flokulace. Účinnost této metody závisí na pH, dávce a typu koagulantu (většinou Fe nebo Al soli), kvalitě surové vody a koncentraci kovů atd. Zlepšit účinnost flokulace může také přidavek kationtového polymerního koagulantu. [9]

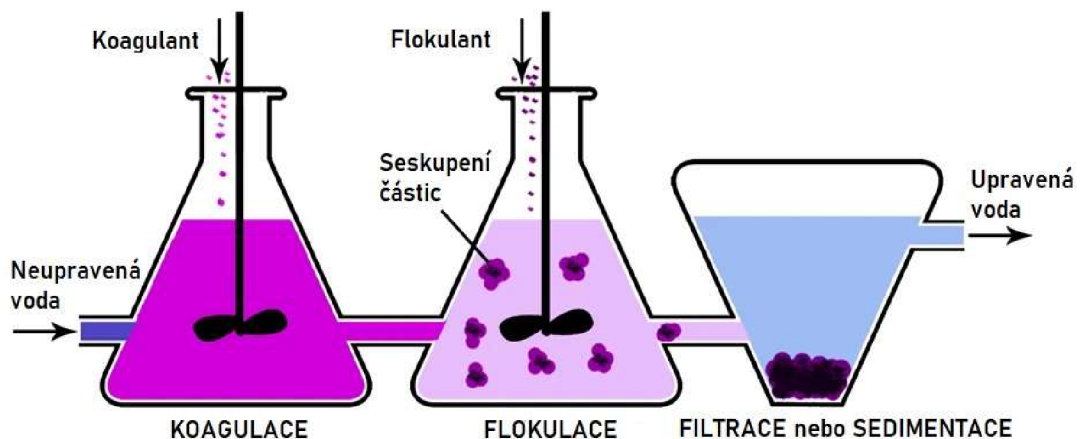
Chemické srážení se také používá při úpravě vody jako účinný proces odstraňování kovů, jako je koagulace a změkčení vápna. Tento proces funguje na principu přeměny těžkých kovů, které jsou ve vodě jako kationty, na nerozpustné hydroxidy a uhličitany přidáním chemických srážedel. Díky tomu můžeme nečistoty odstraňovat fyzikálními metodami jako je např.

filtrace nebo sedimentace. Při těchto úpravách je množství srážedla potřebné ke správné funkčnosti závislé na pH a zásaditosti vody. Při procesu srážení hydroxidem můžeme přidáním koagulantu jako je např. soli železa nebo organické polymery zlepšovat odstraňování těžkých kovů ze znečištěné vody.

Při odstraňování arsenu je optimální pH nižší než 7,5. Fe soli jsou účinnější než Al soli v rozmezí pH 7-7,5, ale při nižším pH je účinnost odstraňování docela podobná. [9]

Při přidání vápna ke změkčení vody (odstranění Ca a Mg) se i často odstraní velké množství anorganických látek jako je As, Cd, Ni, Cu, Pb, Zn díky sorpčnímu příjmu uhličitany a hydroxidy kovů. Pokud jde o změkčování vápnem, je nejúčinnější, když je pH vody vysoké (nad 10,5). Chlor se používá k oxidaci arsenitu na arsenát. Pro odstranění arsenu je účinnější hydroxid hořečnatý než přidávání uhličitanu sodného. [9]

Účinnost koagulantu ovlivňuje také přítomnost fosforečnanu v surové vodě. Fosforečnan totiž tvoří nerozpustné sraženiny s přidáním koagulantem, což snižuje množství dostupného koagulátu pro odstranění arsenu. Přítomnost oxidu křemičitého v surové vodě inhibuje růst vloček a například Fe(III) a oxid křemičitý tvoří rozpustné polymery. [9]



Obr. 13 Proces koagulace/flokulace se sedimentací [10] (upraveno autorem)

3.2 Adsorpční technologie

Adsorpce se řadí mezi efektivní a ekonomický proces odstraňování těžkých kovů z vody. Adsorpční proces poskytuje flexibilní provoz a ve většině případů poskytuje vysoce kvalitní zpracování. Jejich velká výhoda je také možnost regenerace vhodným desorpčním procesem. [9]

Nejrozšířenějším adsorbentem pro úpravu vody je aktivní uhlí. Avšak tento adsorbent je velmi drahý a má vysoké provozní náklady kvůli vysoké ceně aktivního uhlí a potřeby velkého průtoku vody. Proto jsou v posledních letech pozornost a studie věnovány různým typům levnějších materiálů za účelem odstranění těžkých kovů ze znečištěných vod. [9]

3.2.1 Aktivní uhlí

Aktivní uhlí je známo jako chemicky stabilní materiál a má velmi vysokou adsorpční kapacitu pro mnoho těžkých kovů díky svému velkému povrchu a přítomnosti různých typů povrchových funkčních skupin jako jsou např. hydroxyl, karbonyl, lakton a karboxylová kyselina. Podle studií je granulované aktivní uhlí velmi vhodné pro použití v propustných bariérách, nejčastěji při odstraňování Cr(IV) z kontaminované podzemní vody. Regenerace aktivního uhlí probíhá pomocí fosfátovou extrakcí a kyselým promýváním, díky čemuž můžeme použít uhlí opakovaně pro odstranění Cr(IV) z vody. Komerční aktivní uhlí se široce používá pro adsorpci As(III) a As(V) z vody. U aktivního uhlí byla vyzkoušena vysoká kapacita sorpce arsenu (2860 mg/g). [9]

Mezoporézní uhlík obsahující železo připravené z křemičité šablony lze použít pro odstranění As z pitné vody. Maximální adsorpční kapacity byly 5,96 mg/g pro arsenit a 5,15 mg/g pro arseničnan. V kolonových sorpčních systémech bylo také zjištěno, že adsorpční kapacita granulovaného uhlí pro Pb(II) je 2,0132 mg/g pro vstupní koncentraci Pb(II) 60 mg/l při hydraulickém zatížení $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ při výšce sloupového lože 0,6 m. [9]

3.2.2 Povrchy na bázi železa

Povrchy na bázi železa jsou široce známé pro svou afinitu k arsenu, avšak ne všechny minerály železa mají vysokou kapacitu. Amorfní $\text{Fe}(\text{OH})_3$ je zvláště účinný a je komerčně dostupný jako GFH-granulovaný hydroxid železitý, který je syntetizován z vysoce kvalitních surovin. GFH obsahuje asi 50 % Fe-OH a 50 % vody. Kvůli vysokému obsahu vody je při přepravě a manipulaci s GFH vyžadována zvláštní péče. V Evropě je velmi rozšířený Bayoxide E33. [9]

Tento čistící proces kombinuje jednoduché ošetřovací materiály, méně údržby a bezpečný provoz na dlouhou dobu. Proces adsorpce GFH nevyžaduje žádné chemické přísady jakéhokoli druhu. GFH má velmi vysoké adsorpční kapacity, kdy pro arsen to je až 60 g/kg. [9]

Médium je účinné i při odstraňování arsenu v širokém rozsahu pH, ale pokud je pH vyšší než 7,5, odstranění arzenátu klesá. Při nízkém pH je adsorpční hustota arsenu(V) mnohem vyšší než arsenu(III), ale při mírně alkalickém pH je adsorpce téměř stejná pro oba oxidační stavy arsenu. Alkalické pH snižuje životnost GFH. [9]

GFH dokáže také adsorbovat další látky jako je měď, olovo, uran, selen, vanad, které patří do těžkých kovů stejně jako arsen. Další výhodou GFH je možnost použitého materiálu likvidovat jako netoxický pevný odpad. V některých zemích je však klasifikován jako toxický odpad. [9]

3.2.3 Aktivovaný oxid hlinitý (AA)

AA je nejběžněji používaným adsorbentem pro odstraňování arsenu, protože je dostupný jako komerční adsorpční materiál pro úpravu vody. Aktivovaný oxid hlinitý se připravuje částečnou dehydratací $\text{Al}(\text{OH})_3$ při vysokých teplotách. Maximální adsorpční kapacita je 5 až 24 mg/g při rovnovážných koncentracích arsenu 0,05 až 2 mg/l. AA nejlépe funguje při pH 5,5-6,0. Často je potřeba pro aplikování procesu vyžadováno přidání kyseliny. Nevýhodou tohoto procesu je použití nebezpečných chemikálií pro potřebu udržení správného pH, kdy se jedná o HCl a dále se pro regeneraci AA používá hydroxid sodný. Aktivní oxid hlinitý má však také problém s velkou selektivostí vůči As(V), a jako následek toho je problém regenerace, což znamená ztrátu 5 až 10 % adsorpční kapacity pro každý proběhlý proces. [9]

3.2.4 Greensand

Tento materiál přezdívaný Greensand obsahuje glaukonit, který je bohatý na prvky jako je mangan a železo a je to přirozeně se vyskytující materiál. Greensand funguje na principu oxidace, kdy mangan v Greensandu oxiduje všechn arsenit na arsenát, který se poté adsorbuje na železo, které obsahuje

Greensand. K regeneraci se používá manganistan draselný. Při srovnání s materiály na bázi železa je tento materiál méně účinným adsorbentem. [9]

3.2.5 Ostatní média

Vzhledem k náročnějším nárokům některých používaných adsorbentů se začalo bádát nad jinými možnostmi dalších potencionálních méně náročných adsorbentů, které by byly schopny odstraňovat těžké kovy při úpravě pitné vody. V dnešní době už bylo publikováno mnoho studií a článků, kde byly zmiňovány nízkonákladové adsorpční materiály. Jako materiál pro odstranění těžkých kovů z vody bylo zkoušeno např. dřevěné uhlí, uhelný popílek, čajové listy, houby, piliny, rýžové slupky, písek a různé další zemědělské odpady a průmyslové vedlejší produkty. [9]

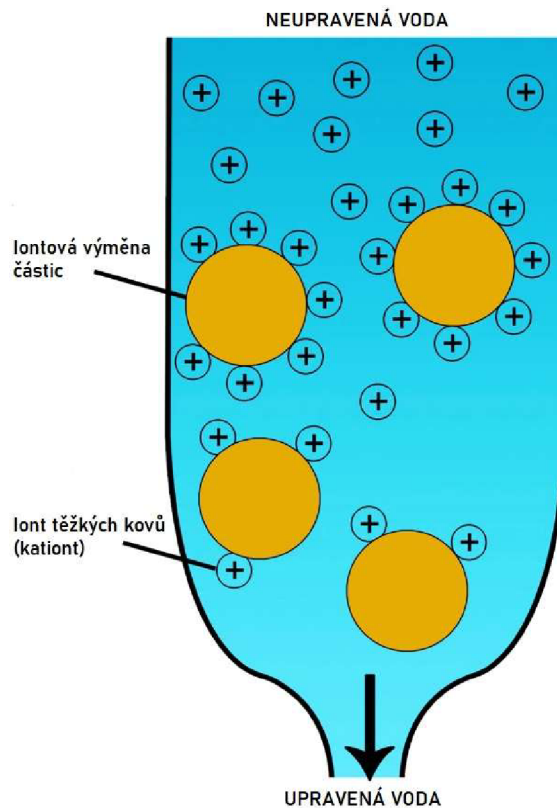
3.3 Iontová výměna

Iontoměniče jsou buď syntetické, jako třeba polymerní pryskyřice, nebo přírodní pevné látky. Iontoměniče fungují na principu vyměňování svých kationtů s kovy v upravované vodě. V tomto procesu jsou více používány syntetické pryskyřice z důvodu její účinnosti při odstraňování těžkých kovů z vody. Nejběžnějšími jsou silně kyselé pryskyřice se skupinami sulfonových kyselin a slabě kyselé pryskyřice se skupinami karboxylových kyselin. Tyto látky jsou však ovlivněny různými proměnnými jako je pH, teplota, počáteční koncentrace kovu a doba kontaktu. [9]

Kromě syntetických pryskyřic se pro odstraňování těžkých kovů z vody široce používají také přírodní zeolity, které jsou přirozeně se vyskytující silikátové minerály. Používají se díky jejich nízké ceně a velké hojnosti. Podle mnoha výzkumů mají zeolity dobré kationtové výměnné kapacity vůči iontům těžkých kovů za různých podmínek. [9]

Pokud se jedná o odstranění arsenu z vody, lépe iontoměničové pryskyřice odstraňují As(V) než As(III) a to v rozmezí pH 6,0-9,0. Pro odstranění arsenu jsou nejlepší aniontoměničové, sulfátové pryskyřice. Kationtově selektivní pryskyřice jsou pro odstraňování nevhodné.

K regeneraci pryskyřice se používá NaCl, kdy chlorid je aniontem, který je během provozního procesu vytěsňován z pryskyřice za arsen. Tento proces však nemusí být vhodný pro některé podmínky, kdy například obsahuje přitékající voda vysoký obsah chloridů, protože po výsledné koncentraci chloridů ve vodě může vést ke korozi železa z vodovodního potrubí. [9]



Obr. 14 Proces iontové výměny [10] (upraveno autorem)

3.4 Membránové procesy

Membránové procesy, které využívají různé typy membrán, je možné také použít pro odstraňování těžkých kovů díky jejich vysoké účinnosti, snadnému ovládnutí a úspoře místa. Procesy, které se používají pro odstranění kovů z vody, jsou reverzní osmóza (RO), ultrafiltrace (UF), nanofiltrace (NF) a elektrodialýza (ED). Mikrofiltry (MF) a ultrafiltrace vylučuje částice ve vodě na základě jejich velikosti. Velikost pórů MF a UF je v rozmezí (0,1-3) a (0,01-0,1) μm . NF má oproti MF a UF menší velikost pórů (0,001-0,01) μm a díky tomu může vyloučit výraznou část rozpuštěných částic těžkých kovů, avšak je náchylnější na zanášení než MF nebo UF. [9]

3.4.1 Reverzní osmóza (RO)

V tomto čistícím procesu voda prochází membránou, zatímco rozpuštěná hmota na částice je odváděna mimo. Reverzní osmóza je velmi účinný proces pro odstranění těžkých kovů z vody. Avšak tyto procesy nejsou široce používány. Podle studií je nejúčinnějším typem membrány polyamidová membrána (PA). [9]

Pokud při odstraňování těžkých kovů reverzní osmózou bude pH v rozmezí 4-8, proces neovlivní. Nevýhoda tohoto procesu je nízký poměr upravené vody k požadovanému přítoku. A dále také použití RO způsobuje, že je upravená voda korozivní a měla by být mineralizována. [9]

3.4.2 Nanofiltrace (NF)

Nanofiltrace je proces mezi ultrafiltrací a reverzní osmózou. Tento způsob čištění vod od těžkých kovů je jednoduchý na obsluhu, spolehlivý a má poměrně nízkou spotřebu energie a vysokou účinnost odstraňování znečišťujících látek. Avšak kvůli zvýšené regeneraci při odstraňování těžkých kovů se ukázalo, že je NF účinná pouze v malých systémech úpraven vod (<1000 m³/d). Při používání NF je také potřeba, aby byla voda v úpravě vody mineralizována. [9]

3.4.3 Ultrafiltrace (UF)

U tohoto typu membrán se využívá koncentrační gradient nebo hydrostatický tlak pro posílení průchodu kapaliny polopropustnou membránou. Pro zlepšení procesu UF, zejména při odstraňování těžkých kovů, se přidávají povrchově aktivní látky nebo polymery. Ve vodě se polymery používají ke zvýšení iontové velikosti kovu. Tímto se kovové ionty mění na částice s vysokou hmotností, které pak mohou být zachyceny membránou. Tento proces závisí na pH. Nejlepší účinnost bývá zaznamenávána okolo hodnoty 6. [9]

3.5 Chemické srážení

Tento proces funguje na principu vytváření nežádoucích částic chemicky vázaných s nějakým jiným činidlem. Proto se při této technice přidává do čištěné vody další chemická sloučenina, která iniciuje chemickou reakci s částicemi, které je mění na pevné skupenství, které je dále potřeba oddělit. Nejčastěji se do vody přidává vápno nebo vápenec. Přidáním těchto chemikálií se zvýší pH a přeměňují kovy na sloučeniny hydroxidu a uhličitanu. Tyto sloučeniny jsou nerozpustné ve vodě a lze je tedy snadno oddělit. [10]

Chemické srážení má mnoho výhod, jako jsou např. levné náklady, jednoduchý způsob úpravy a nekovová selektivita. Produkuje však velké množství kalu a je neefektivní při nízké koncentraci kovů ve vodě. [10]

3.6 Fotokatalýza

Tento proces je jednou z nejslibnějších technik pro odstranění těžkých kovů z vod. Je to oxidační proces, který je pokročilejší od ostatních procesů. Tento proces využívá polovodiče, jako jsou TiO_2 , ZnO , CdS , ZnS atd. Fotokatalýza se vyznačuje vysokou oxidační silou, schopností ničit komplexy těžkých kovů a zároveň je schopna oxidovat a degradovat organické komplexy. Tento způsob je od ostatních procesů složitější. V jednoduchosti je to fotochemický proces rozkladu pomocí katalyzátoru a světelného záření. Do vody se přidá katalyzátor, který reaguje na světelné záření a aktivuje svůj povrch a tím se spustí fotokatalytická reakce, kdy dochází k rozkladu látek. [10]

3.7 Ostatní

Mezi novější technologie, které prochází testováním a zkoumáním, patří např. písková koagulace/sedimentace, oxidační adsorpce ve fluidním loži, filtrace keramických médií pomocí koagulace nebo ponořená média s nosnými částicemi. Koagulace/sedimentace s pískovým balastem používá ke koagulaci přísady písku a polymer ke zvyšování odstranění arsenu. Oxidační adsorpce

ve fluidním loži zahrnuje adsorpci železitého železa na kontinuálně vytvářený pískový povrch. Tím železo oxiduje a chytá a odstraňuje těžké kovy z vody. [9]

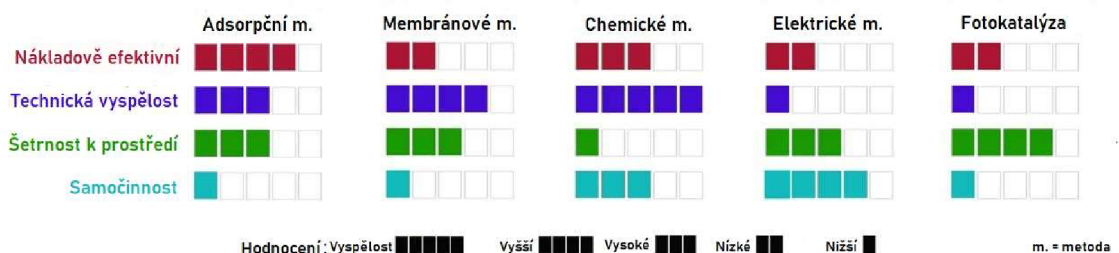
3.8 Výhody a nevýhody rozvoje technologií úpravy vody

V současné době nabízejí různé technologie úpravy vod spoustu výhod jako je ekonomická proveditelnost a flexibilita při úpravách vod, kdykoliv je potřeba. U některých procesů převyšují výhody řadu nevýhod jako jsou vysoké provozní náklady, vysoká spotřeba energie, vysoká produkce kalu a selektivita kovů v procesu. Tyto výhody a nevýhody se mohou měnit podle situace ohledně trhu s energiemi a také třeba s cenou zpracování toxického odpadu (kalu). Výhody a nevýhody jednotlivých procesů jsou uvedené v tabulce. [11]

Tab. 2 Výhody a nevýhody technologií úpravy vod [11] (upraveno autorem)

Procesy	Výhody	Nevýhody
Koagulace/filtrace	Usazování kalu, odvádění kalů	Vysoký provozní výkon, tvorba velkého objemu kalu
Adsorpce	Vysoké vázání kovů, nízká cena, proměnný rozsah pH, snadná obsluha, jednoduchost, flexibilita	Nízká selektivita, nadměrná produkce odpadu, požadavek na regeneraci adsorbentu
Iontová výměna	Selektivní na kovy, vysoké oživení materiálu	Menší počet odstraněných kovových částic, vysoká cena
Reverzní osmóza	Selektivní na kovy, vhodné pro odstranění organického a anorganického odpadu	Vysoká spotřeba energie v důsledku čerpacího tlaku, obnova membrán
Nanofiltrace	Nízký tlak, vysoká separační selektivita	Vysoké provozní náklady
Ultrafiltrace	Nízký tlak, vysoká separační selektivita, vhodné pro odstranění organického a anorganického odpadu	Vysoké provozní náklady v důsledku znečištění membrány, velká koncentrace produkovaného kalu
Chemické srážení	Levná, jednoduchá obsluha, odstranění většiny kovů	Výroba kalu, dodatečné provozní náklady na likvidaci kalu
Fotokatalýza	Žádná produkce kalu, okamžité odstranění kovů i organických látek	Omezená aplikace, dlouhá doba trvání, značná potřeba O ₂

METODY PRO ÚPRAVU VODY



Obr. 15 Hodnocení metod podle hlavních kritérií [10] (upraveno autorem)

4. Vliv vlastností jakosti vody na odstranění těžkých kovů

Při zkoumání odstraňování těžkých kovů je důležitá součást vyhodnocování chování těžkých kovů spolu s charakteristikami adsorbentů za různých podmínek kvality vody. Mezi nejdůležitější parametry kvality vody související s odstraňováním těžkých kovů patří pH, teplota, přítomnost přírodních organických látek (NOM) a iontová síla. Kontaminace těžkými kovy je nejčastěji spojována s průmyslovými odpadními vodami, avšak kovy byly detekovány také v podzemních vodách, řekách a jezerech. Tyto zdroje vody mají různé charakteristiky kvality vody, které v konečném důsledku mohou ovlivnit schopnost adsorbentů účinně odstranit kontaminované vody těžkými kovy. [12]

4.1 Vliv pH

pH vodního zdroje má významný vliv na přítomnost těžkých kovů a jejich vlastnosti. Těžké kovy ve vodním roztoku jsou na pH vysoce závislé. Při nízkých nebo neutrálních hodnotách pH se těžké kovy vyskytují v kationtovém stavu a mají větší tendenci se rozpouštět a být pohyblivější ve vodních zdrojích. Pokud pH stoupne, začnou těžké kovy tvořit komplexy s hydroxidy a dalšími anionty, které se ve vodách mohou vyskytovat. Díky této ovlivnitelnosti těžkých kovů může pH ovlivnit také povrchový náboj adsorbentu, koncentraci iontů na funkčních skupinách adsorbentu a ionizační stav adsorbentu. [12]

Už několik studií prokázalo vliv pH na odstranění těžkých kovů z vody. Například u mědi se ukázalo, že se stabilita a mobilita zvyšuje při klesajícím pH. Ve spoustě případech, pokud se pH zvýší nad neutrální, se těžké kovy začnou tvořit do pevných látek, které se vysrážejí z vody. U chromu bylo dokázáno, že pokud se pH zvýší, oxidační stav chromu se změní z Cr(III) na jeho stabilnější formu Cr(IV), která je více toxická. U olova nižší hodnoty pH zvyšují koncentraci volných iontů olova ve vodním zdroji a zvýšené hodnoty pH vedou k znehybnění v důsledku srážení. [12]

Při hodnocení odstraňování těžkých kovů adsorpcí mají vodní zdroje s nízkými hodnotami pH (<4,0) vysoké koncentrace iontů H⁺, které často bojují mezi rozpustnými kovovými ionty a povrchem adsorbentů o adsorpční místo. Pokud se pH zvýší, adsorpce se často zvyšuje, protože povrch adsorbentu se stává záporněji nabitým a je pro něj snadnější pracovat s kladně nabitými těžkými kovy. Tento jev byl pozorován u použití spousty adsorbentů. Výrazná výjimka je však odstraňování chromu, který existuje v záporně nabitých iontech, pokud se pH zvýší. V tomto případě je dokázáno, že adsorpce klesá s rostoucím pH roztoku. Je to způsobeno elektrostatickým odpuzováním vyplívajícím z negativních povrchových nábojů na adsorbentu. [12]

Celkově je tedy při odstraňování těžkých kovů pH významným parametrem, který ovlivňuje jejich chování a odstranění. Z publikovaných přezkoumaných experimentů se ukázalo, že nízké hodnoty pH (<4) brání v adsorpci těžkých kovů, zatímco hodnoty pH mezi 5 až 7 se ukázaly jako nejefektivnější. V tomto případě by se zdroje vody, které mají být upraveny, měly udržovat na neutrální hodnotě pH, aby byla adsorpce co nejúčinnější. [12]

4.2 Vliv teploty

Dalším důležitým pojmem u chování a odstraňování těžkých kovů z vody je vliv teploty. Teplota je faktor, který je schopen ovlivnit vlastnosti jak adsorbentu, tak koncentrace těžkých kovů ve vodě. K zjištění vhodné teploty pro úpravu vody pomáhají termodynamické studie. Vliv teploty na adsorpci mají termodynamické parametry, jako je změna entalpie, změna volné energie a entropie. [12]

Nejllepší možná teplota se však u každého adsorpčního materiálu liší. Například adsorpce olova (Pb II) oxidem grafenu je při 20 °C nižší než při 30 °C. Avšak u rtuti (Hg II) byla adsorpce účinnější při nižších teplotách. Proto při posuzování vlivů teploty na odstraňování těžkých kovů musí být každý adsorbent a odpovídající kovové ionty vyhodnoceny specificky, aby bylo možné určit detailní dopad teplotních změn na adsorpční proces. V některých

studiích se poukazuje na to, že teplota může způsobit změny v rozpustnosti, a to může být důvodem, proč teplota ovlivňuje adsorpci. Většina experimentů se ale shodla, že pro nejúčinnější adsorpci je vhodné, aby proces probíhal za normální teploty v rozmezí 15-30 °C pro reálnou situaci a vyhnout se tak dodatečnému zahřívání nebo chlazení roztoku. [12]

4.3 Vliv iontové síly

Dále se také ukázalo, že i iontová síla vodního zdroje má vliv na těžké kovy a schopnost jejich odstranění. Přítomnost chloridu může vést k tvorbě neutrálních nebo záporně nabitých částic těžkých kovů a chloridu, které jsou rozpustné a obtížně se odstraňují. Tento jev byl pozorován v experimentech, které uvedly významný pokles účinnosti odstraňování Cu(II) a Ni(II) při zvýšení iontové síly v důsledku zvýšené tvorby komplexů těžkých kovů a chloridu, které měly nízkou afinitu k adsorpci. [12]

Vztahy mezi těžkými kovy a jinými povrchy jsou silně ovlivněny elektrostatickými silami, a tím může mít iontová síla v roztoku významný vliv na chování a odstraňování těžkých kovů. Na základě této teorie související s povrchovou chemií se elektrická dvojvrstva zmenšuje se zvyšující se iontovou silou ovlivňující elektrostatické interakce, což vede ke snížené adsorpci těžkých kovů s rostoucí iontovou silou. [12]

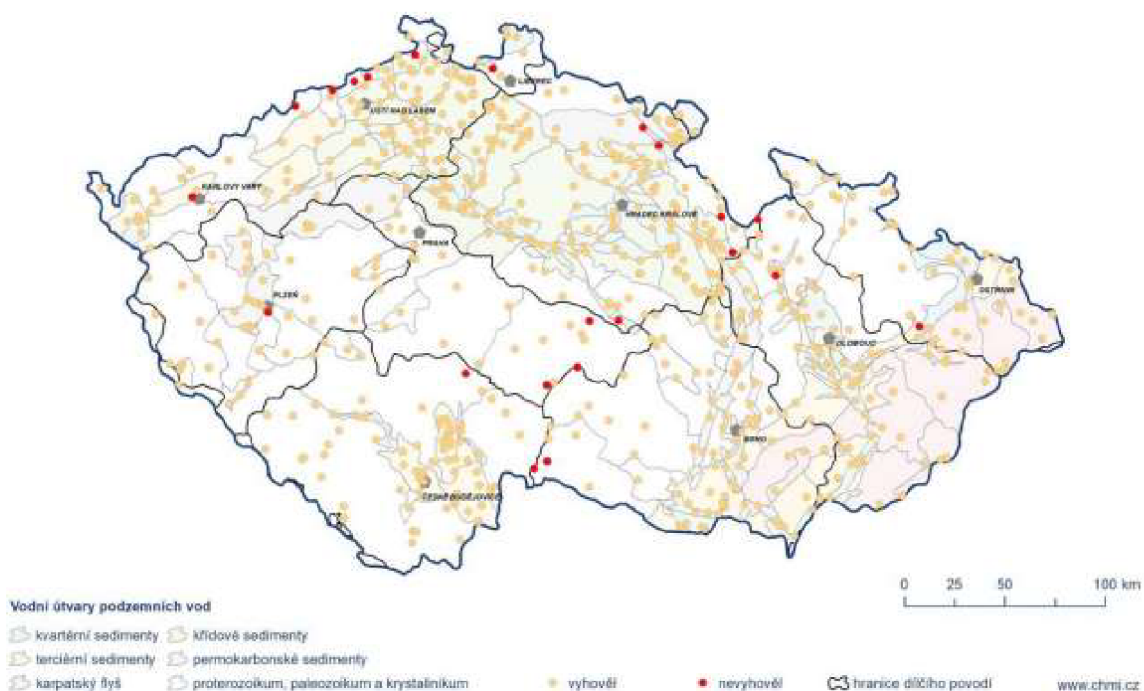
4.4 Vliv přítomnosti přírodních organických látek

Přítomnost přírodních organických látek (NOM) se běžně chápe tak, že se skládá z huminových (kyseliny nerozpustné ve vodě s $\text{pH} < 2$) a fulvokyselin (kyseliny rozpustné ve vodě nezávislé na pH), které pocházejí z rozkladu rostlinné a živočišné hmoty. NOM je komplexní soubor organických kyselin a je vysoce reaktivní s těžkými kovy. NOM a těžké kovy na sebe mohou vzájemně působit a může tak docházet ke změně reaktivity těžkých kovů v prostředí a ovlivnit jejich pohyb, biologickou dostupnost a toxicitu. Konkrétní dopad NOM na těžké kovy může být obtížné zjistit, především kvůli široké škále dalších faktorů, které přispívají ke způsobu, jakým NOM ovlivňuje těžké kovy, včetně pH , humifikace a oxidačního stavu těžkého kovu. [12]

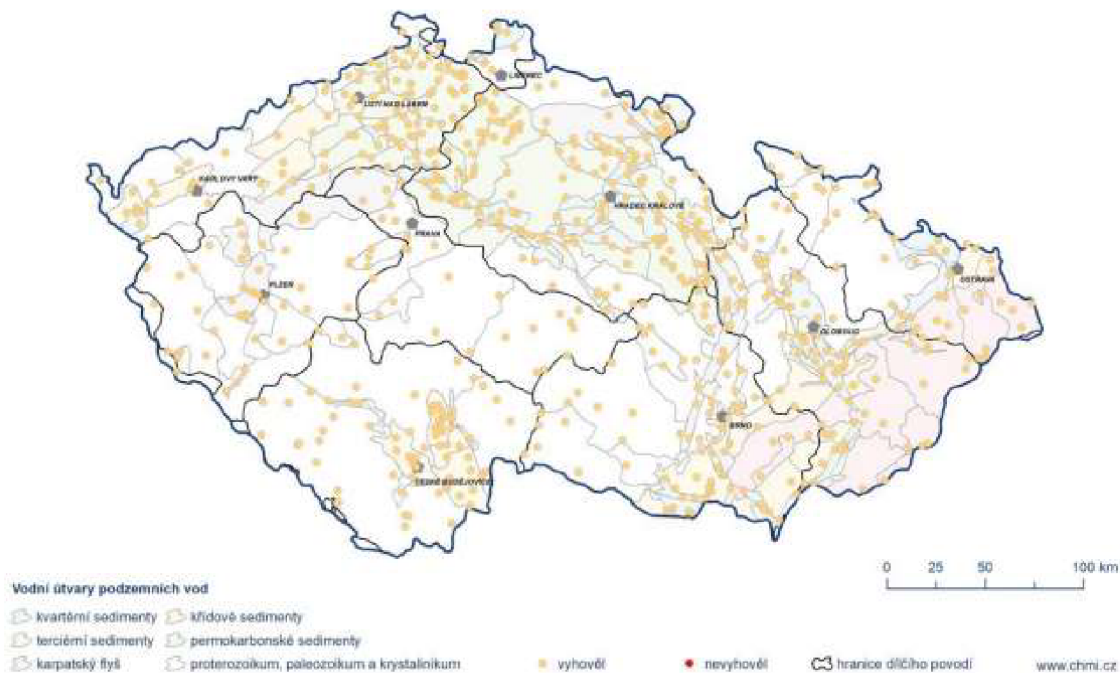
Ve studiích bylo například zjištěno, že arsen tvoří komplexy s huminovými i fulvovými kyselinami, což může přispívat ke zvýšení nepohyblivosti arsenu. Další kovy jako je měď a zinek také tvoří komplexy s NOM. Podle studie je ukázáno, že přítomnost NOM může redukovat chrom z jeho toxické šestimocné formy Cr(VI) na méně škodlivou, stabilnější formu Cr(III). Naopak u arsenu může NOM redukovat arsen z jeho méně toxické formy As(V) na jeho toxičtější formu As(III). Všechny tyto studie dokazují, že NOM může často nepředvídatelně ovlivnit odstraňování těžkých kovů a komplikovat identifikaci převládajících mechanismů spojených s odstraňováním těžkých kovů. [12]

5. Bilance jakosti vody v ČR týkající se těžkých kovů

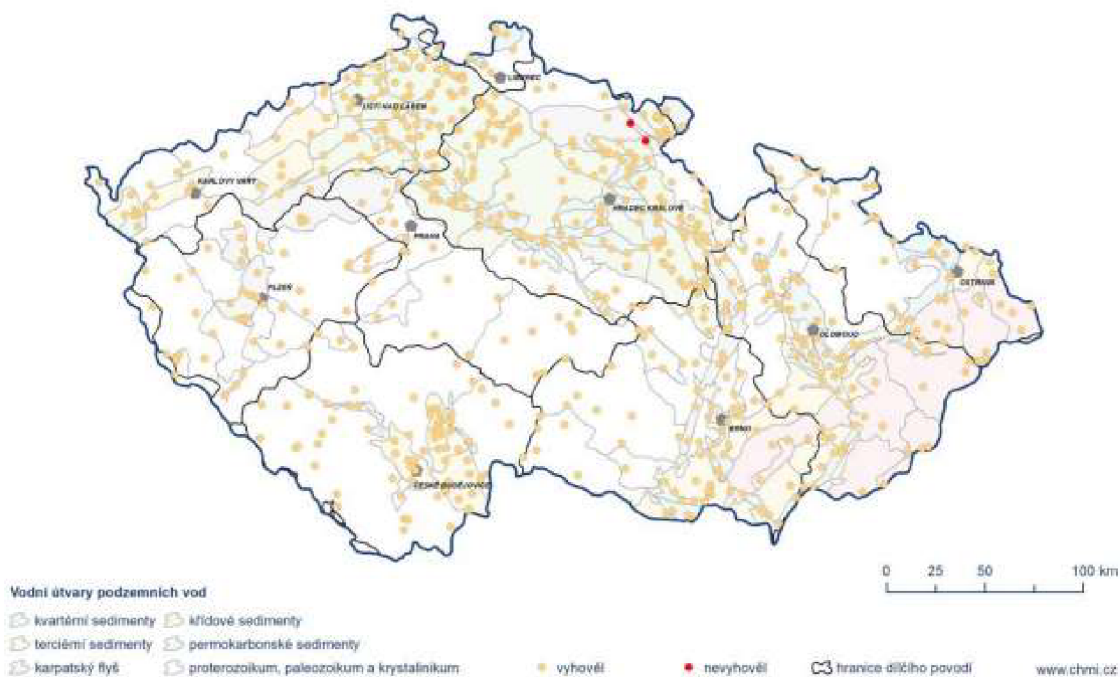
V roce 2021 se v ČR hodnotilo 1410 vzorků podzemní vody pro ukazatel kadmia. Limit kadmia je 0,25 µg/l, který byl překročen u 3,3 % ze vzorků. Asi 96 % se pohybovalo pod mezí stanovitelnosti, která je 0,2 µg/l. Dále se stanovovaly vzorky mědi, kdy jich bylo vyhodnocováno také 1410 a z toho u žádného vzorku nebyl překročen limit 1 µg/l. Pod mezí stanovitelnosti 2 µg/l bylo 92 %. Dále byly vyhodnocovány vzorky olova, kdy se odebíralo také 1410 vzorků. Pod mezí stanovitelnosti, která je 0,5 µg/l bylo 98 % a limit 5 µg/l byl překročen u 0,4 % vzorků. Veškeré ukazatele pro limity podzemní vody v roce 2021 byly stanoveny dle vyhlášky MŽP a MZe 5/2011 Sb., pro měď a celkovou mineralizaci se použily limity pro pitnou vodu dle vyhlášky MZ 252/2004 Sb. Místa odebraných vzorků a přesažené limity jsou znázorněny na obrázcích pod odstavcem. [13]



Obr. 16 Objekty podzemních vod dle ukazatele kadmium [13]



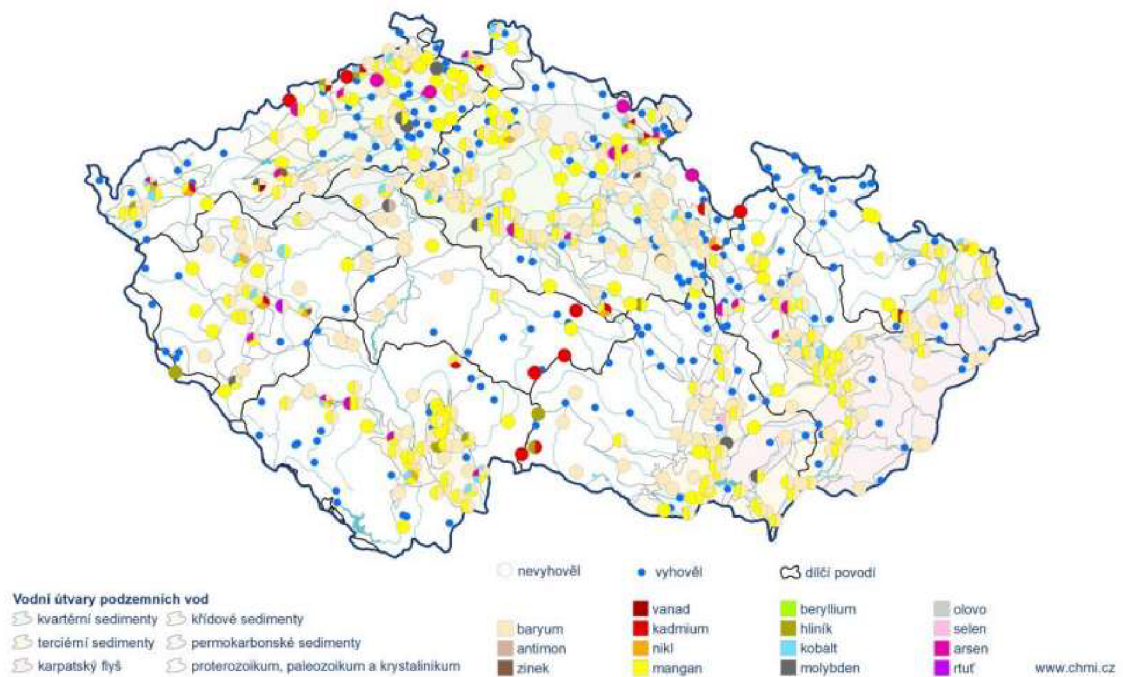
Obr. 17 Objekty podzemních vod dle ukazatele měď [13]



Obr. 18 Objekty podzemních vod dle ukazatele olovo [13]

Dále bylo pro podzemní vody vyhodnocováno množství toxických stopových prvků v nadlimitních koncentracích, do kterých se řadí těžké kovy. Nejčastěji se ve vzorcích vyskytovalo baryum s 48 % nadlimitních vzorků, arsen a kobalt s 4 % nadlimitních vzorků, kadmium se 3 % nadlimitních

vzorků a nikl, hliník, molybden s 2 % nadlimitních vzorků. U barya je hodnota procent vysoká z důvodu přísné vyhlášky MŽP a MZe č. 5/2011 Sb., kde je referenční hodnota 50 µg/l. Tato hodnota je ale přirozenou požadovanou koncentrací tohoto prvku v podzemních vodách. Nadlimitní koncentrace barya se objevují často v mělkých vodách. U ostatních kovů nelze s převahou říct, jestli se častěji vyskytují v mělkých nebo hlubokých zdrojích podzemních vod. Toxické stopové prvky jsou znázorněny na obrázku. [13]



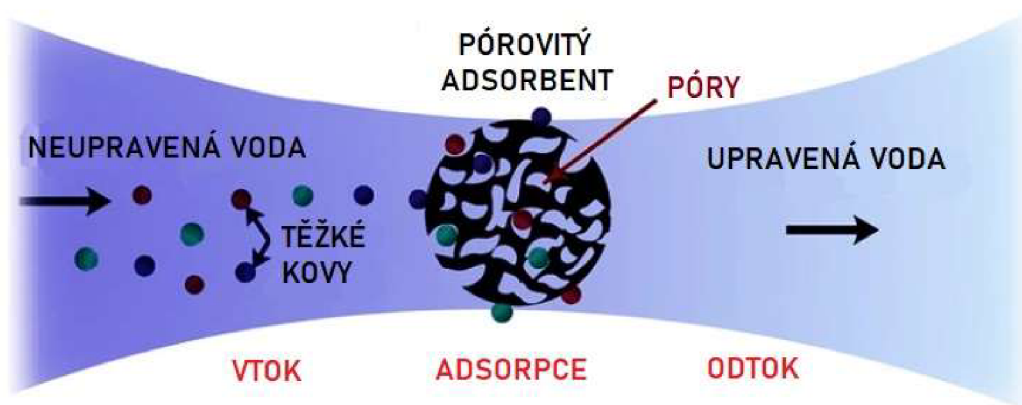
Obr. 19 Objekty podzemních vod dle stopových prvků (kovy) [13]

6. Laboratorní experiment

Cílem tohoto experimentu bylo odstranit vybrané těžké kovy zvoleným vodárenským procesem. Jako těžké kovy byly vybrány dva: nikl a kadmium. A jako úpravárenský proces byla zvolena adsorpce s použitím dvou adsorpčních materiálů GEH a Bayoxide E33. Toto měření probíhalo v laboratoři Ústavu vodního hospodářství obcí na Fakultě stavební VUT v Brně.

6.1 Vybraný úpravárenský proces – adsorpce

Adsorpční proces je definován hlavně fyzikálně-chemickými vlastnostmi adsorbentů a těžkých kovů a také provozními podmínkami, jako je teplota, hodnota pH, množství adsorbentu a doba adsorpce. Obecně adsorpce funguje tak, že jsou v tomto případě experimentu těžké kovy adsorbovány na povrch adsorbentu. Při zkoušení tohoto procesu jsou dokázány jeho nízké provozní náklady, vysoká kapacita odstraňování, snadná manipulace a jednoduchá možnost regenerace adsorbentu znečištěného ionty těžkých kovů. Pro tento proces bylo vyvinuto mnoho účinných adsorbentů, ale tento experiment je zaměřen na GEH a Bayoxide E33, pro jejich dobré výsledky při jiných výzkumech na odstranění těžkých kovů z vody. [10]



Obr. 20 Odstranění těžkých kovů adsorpcí [10] (upraveno autorem)

6.2 Vybrané adsorpční materiály

6.2.1 GEH

GEH je patentovaný vysoce účinný adsorbent pro úpravu vody. Je to granulát na bázi hydroxidu oxidu železitého, který váže těžké kovy a další nečistoty a odstraňuje je z vody. Dokáže to beze změny přirozených vlastností vody. Tento materiál má vysoký specifický adsorpční povrch, což znamená, že má zvýšenou adsorpční kapacitu a výkon odstranění částic. Podle výrobce má 1 kg GEHu plochu ekvivalentní velikosti 30 fotbalových hřišť. Byl vyvinut hlavně pro odstraňování arsenu a uranu z vod, ale i dalších těžkých kovů.

GEH se používá hlavně při úpravě pitné vody, ale také k čištění odpadních vod. Jeho životnost dokáže být až pět let. Umožňuje provozům jednoduchou údržbu a nenáročnost technologií. K jejímu použití není potřeba elektrické energie. A také nezpůsobuje žádné kaly nebo znečištění. Dále ho také není potřeba skladovat jako nebezpečné chemikálie, tím pádem se snižují náklady na technické zdroje a údržbu. Byl vyvinut německou firmou GEH Wasserchemie GmbH & Co. KG. [14]

Tab. 3 Vlastnosti GEH [15] (upraveno autorem)

Chemické složení	β -FeOOH (52-57 %) a $\text{Fe}(\text{OH})_3$
Popis	Vlhký zrnitý materiál
Barva	Tmavě hnědá
Velikost zrna	0,2 - 2,0 mm
Sypná (objemová) hmotnost	1,22-1,29 g/cm ³
Specifický adsorpční povrch	250-300 m ² /g
Pórovitost zrn	72-77 %
Pracovní oblast pH	5,5-9,0
Regenerace	Ne



Obr. 21 Adsorbent GEH [autor]

6.2.2 Bayoxide E33

Ten materiál je technický adsorbent na bázi oxidu železa v granulované formě. Slouží k odstraňování nečistot v pitné vodě, a to hlavně na odstranění těžkých kovů. Jeho výhodou je vysoká adsorpční kapacita a dále také vysoká oteruvzdornost vůči proudění vody, čímž zůstává filtrační lože čirá a není potřeba ho dále prát nebo filtrovat. Používá se hlavně pro odstranění arsenu ze silně kontaminovaných vod, a dále také k odstraňování fosfátů z podzemních a povrchových vod nebo jiných těžkých kovů. Byl vyvinut společností Severn Trent ve spolupráci s firmou Bayer AG. [16]

Tab. 4 Vlastnosti Bayoxidu E33 [15] (upraveno autorem)

Chemické složení	Fe_2O_3 (>70 %) a $\alpha\text{-FeOOH}$ (90,1 %)
Popis	Suchý zrnitý materiál
Barva	Jantarová
Velikost zrna	0,5-2,0 mm
Sypná (objemová) hmotnost	0,45 g/cm ³
Specifický adsorpční povrch	120-200 m ² /g
Pórovitost zrn	85%
Pracovní oblast pH	6,0-8,0
Regenerace	Ne



Obr. 22 Adsorbent Bayoxide E33 [autor]

6.3 Postup měření

6.3.1 Příprava měření

Při měření se používaly výše zmíněné adsorpční materiály GEH a Bayoxide E33 dodané od výrobců. Měřilo se ve dvou kolonách s vnitřním průměrem 4,4 cm, které se naplnily adsorbenty. Dříve než adsorpční materiál se na spod skleněných trubic nasypala drenážní vrstva, kterou tvořily kamínky o velikosti 1 až 2 cm. Na kamínky se poté uložily větší skleněné kuličky o průměru 4 mm a nejvyšší drenážní vrstva se utvořila z kuliček o průměru 2 mm. Tato drenážní vrstva se provedla z důvodu zabránění úniku sorpčního materiálu z kolon.



Obr. 23 Drenážní vrstva v koloně [autor]

Po drenážní vrstvě už přišlo na řadu nasypání sorpčních materiálů do kolon. Výšku filtrační vrstvy u adsorbentů většinou stanovují výrobci, a proto se i v tomto případě tato veličina dodržela. Podle výrobců materiálu GEH má být výška filtrační vrstvy 0,8 m. Jelikož je ze dvou vybraných adsorbentů hodnota u GEHu vyšší, byla tedy výška 0,8 m vybrána pro oba materiály.

Po naplnění kolony drenáží a adsorpčním materiálem se kolony připevnilly na držáky umístěné na zdi. Dále bylo potřeba adsorbenty proprat. Proprání se provádělo za pomoci hadice a vody z vodovodního řadu, kdy nebyla potřeba pomoc čerpadla, protože tlak z řadu stačil na vytlačení vody v koloně. Nejprve se hadice zapojila na spodní kohout kolony a voda se protlačovala zespod nahoru. Voda byla pouštěna a regulována konstantě pomocí kulového kohoutu, aby nedošlo ke vznosu adsorpčních materiálů. Na horní kohout kolony se napojila hadice, která měla odtok do kanalizace. Voda z vodovodního řadu tedy v tomto případě proudila zdola nahoru, aby bylo umožněno co nejlepšího proprání materiálu. Voda byla zastavena ve chvíli, kdy z kolony odtékala už pouze čirá voda bez známek zákalu. Po zafiltrování, které probíhalo obráceně než praní, se kolona nechala z části zaplněna vodou. Podle výrobců sorpčních materiálů je potřeba nechat materiál

v kolonách aspoň 16 hodin namočený, což bylo u tohoto experimentu dodrženo.

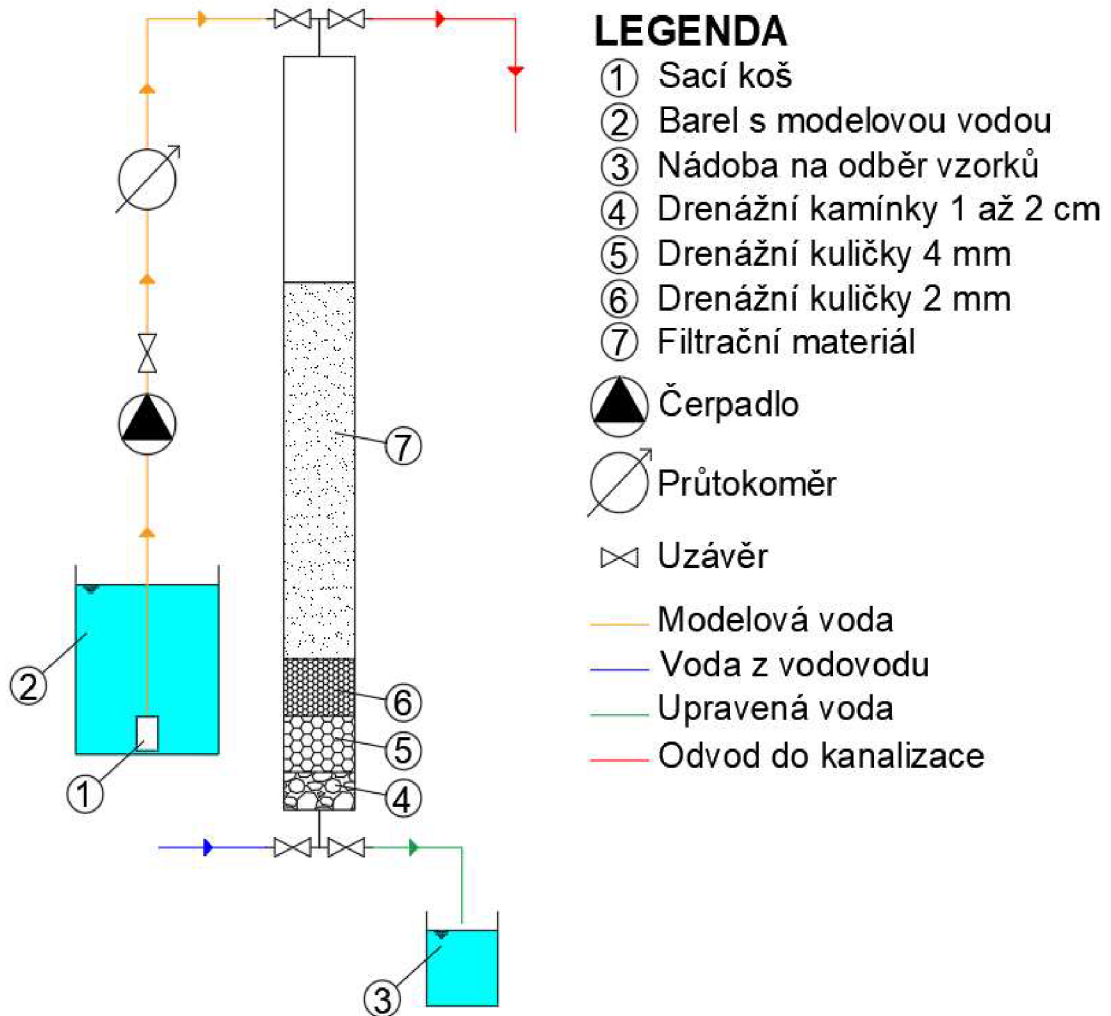


Obr. 24 Propírání adsorbentů [autor]



Obr. 25 Kolony připravené k měření (první a druhá zleva) [autor]

Celková sestava v laboratoři na provádění tohoto měření se skládá z barelu na modelovou vodu, ze kterého vede hadice do čerpadla se sacím košem ponořeným v barelu. Z čerpadla vede hadice přes průtokoměr a z něj je napojena hadice na příslušnou kolonu, u které je potřeba měřit. Celková sestava je opatřena uzavíratelnými armaturami tam, kde je potřeba (viz obr. 22).



Obr. 26 Schéma sestavy pro měření [autor]



Obr. 27 Čerpadlo a barel s modelovou vodou [17]

Další nutností pro tento experiment byla příprava modelové vody, která má simulovat podzemní vodu s výskytem těžkých kovů jako je nikl a kadmium. Modelová voda byla vytvořena uměle a nebyla získána přímo ze zdroje kvůli přesnějším výsledkům experimentu. Modelová voda se skládala z vody z vodovodu vedeného k Stavební fakultě VUT, který má přívod z vodojemu Palackého vrch a dále s přidanými koncentracemi niklu a kadmia. Do barelu se tedy napustila voda s objemem 20 l a postupně se přidalo potřebné množství těžkých kovů pro simulaci podzemní vody. Niklu bylo přidáno 0,6 ml a kadmia 2 ml. Po přidání těchto dvou prvků se barel musel zamíchat pro důkladné smíchání přidaných koncentrací a modelová voda v něm se nechala odstát aspoň třicet minut pro ustálení koncentrace. Výsledná hodnota koncentrace kadmia v modelové vodě byla 10 $\mu\text{g/l}$ a hodnota koncentrace niklu činila 37,9 $\mu\text{g/l}$. Výsledné hodnoty můžeme vidět v tabulce Tab. 4. Jak je z tabulky patrné, tak obě koncentrace záměrně překračují limity stanovené vyhláškou č. 252/2004 Sb. pro pitnou vodu.

Tab. 5 Složení modelové vody [autor]

Prvek	Množství dávkovaného roztoku [ml]	Limit koncentrace [µg/l]	Výsledná koncentrace [µg/l]
Cd	0,6	max. 5,0	10,0
Ni	2	max. 20,0	37,9

6.3.2 Průběh měření

Den měření probíhal 15. listopadu 2022 v laboratoři na Ústavu vodního hospodářství obcí Fakulty stavební VUT v Brně. Začátek měření byl takový, že se do modelové vody ponořila hadice se sacím košem, která byla napojena na čerpadlo, kdy průtok modelové vody byl na průtokoměru nastaven na 20 l/h (viz Obr. 24). Hadice vedena z čerpadla byla napojena na vrchní kohout kolony a přes ni se kolona postupně naplňovala vodou.



Obr. 28 Průtokoměr [autor]

Podle rovnice kontinuity, která zobrazuje vztah mezi rychlostí proudění a průřezem v jednom místě uzavřené trubice při ustáleném proudění se zjistila filtrační rychlost v koloně:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi r^2} = \frac{0,02}{\pi * 0,022^2} = \frac{0,02}{0,00152} = 13,16 \text{ m/h} \quad (6.1)$$

kde:

v...	rychlost proudění [m/h]
Q...	objemový průtok [m ³ /h]
S...	plocha [m ²]

Z výpočtu je patrné, že při průřezu kolony 4,4 cm a ploše kolony 15,2 cm² je výsledná filtrační rychlost 13,16 m/h.

Vzorky přefiltrované vody byly odebírány do kádinek v časovém rozmezí 1, 2, 4 a 6 minut od doby, kdy začala voda vytékat z kolony. Dále se u vzorků vody určovalo pH, teplota a zákal. Z kádinek se poté upravená voda přelévala do zkumavek (viz Obr. 25) dodaných od Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě, pobočce v Brně, z centra hygienických laboratoří, kde se stanovovaly koncentrace kadmia a niklu po filtraci přes vybrané sorbenty. V laboratoři na fakultě jsem tedy vyhodnocoval pouze pH, teplotu a zákal.

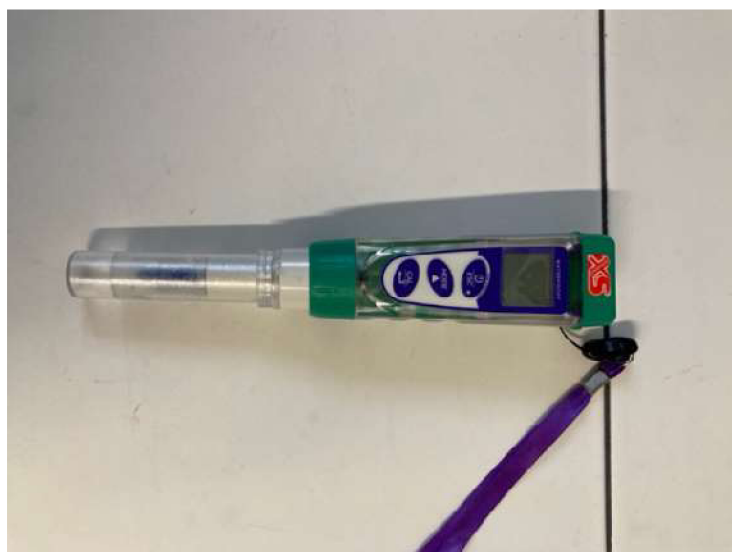


Obr. 29 Zkumavky připravené pro vzorky vody [autor]

Měření pH, teploty a zákalu

Jak už bylo zmíněno, jako součást experimentu je i měření pH, teploty a zákalu vzorků. Měření se dělalo u každého vzorku v daném časovém rozmezí, které je uváděno výše.

Měření pH a teploty probíhalo pomocí pH metru označeným XS Instruments pH 5 Tester Kit. Jedná se o vodotěsný přenosný pH metr s rozlišením 0,01 pH a rozsahem měření 2-16. Tento přístroj dokáže měřit i teplotu, vlhkost vzduchu a vodivost. Je vybaven displejem, který ukazuje všechny naměřené hodnoty. [18]



Obr. 30 XS Instruments pH 5 Tester Kit [autor]

Měření zákalu se provádělo zároveň s měřením pH a teploty pomocí přenosného turbidimetru. Tento přístroj s označením HACH 2100Q IS měří na přesnost ± 2 % při rozptýleném světle 0–1000 FNU. FNU je zkratka pro Formazine Nephelometric Units, což jsou mezinárodně uznávané jednotky u měření zákalu. Přístroj funguje na principu primárního nefelometrického signálu rozptylu světla a signálu procházejícího rozptylu světla. [19]

Aby přístroj měřil správně je potřeba jej nakalibrovat pomocí kalibračních standardů (20 FNU, 100 FNU a 800 FNU), které obsahuje kufřík s přístrojem. Tato kalibrace u tohoto pokusu byla provedena pro přesné měření.



Obr. 31 Přístroj HACH 2100Q IS [autor]

6.4 Vyhodnocení experimentu

Ve vyhodnocení experimentu jsou uvedeny tabulky s naměřenými hodnotami a grafy pH, teploty a zákalu společně s hodnotami koncentrace niklu a kadmia stanovenými Zdravotním ústavem se sídlem v Ostravě, kde byly vzorky zkoumány. Nadlimitní koncentrace niklu a kadmia jsou označeny červeně, nejvyšší mezní hodnoty koncentrací těchto kovů jsou dány vyhláškou č. 252/2004 Sb. Limitní hodnota kadmia je 5 µg/l a u niklu je tato hodnota 20 µg/l.

Měření koncentrací probíhalo mimo Fakultu stavební, a to na Zdravotním ústavu v laboratoři v Olomouci pomocí metody hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS).

Tato metoda je analytická spektrální technika, která kombinuje ICP neboli indukčně vázané plazma (Inductively Coupled Plasma) jako zdroj kationtů a MS neboli hmotnostní spektrometrii (Mass Spectrometry), která tyto částice rozpoznává. [20]

Tab. 6 Laboratorní rozbor modelové vody

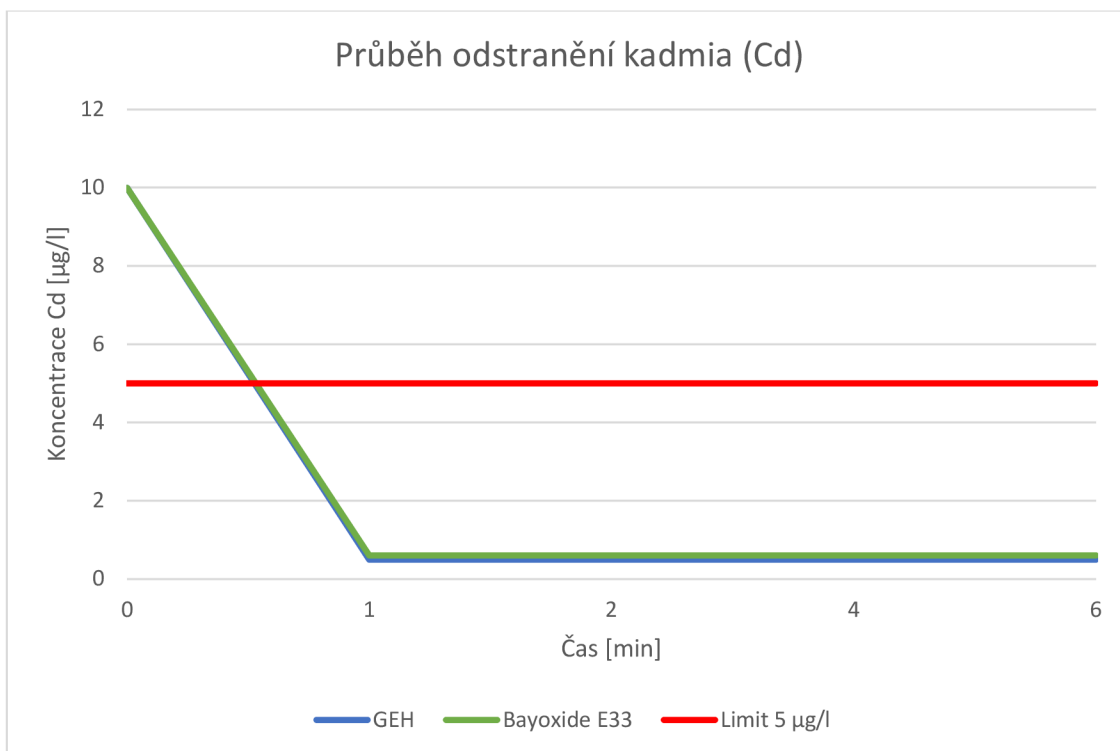
Modelová voda					
čas [min]	pH [-]	Teplota [C°]	Zákal [FNU]	Koncentrace Cd [µg/l]	Koncentrace Ni [µg/l]
0	7,33	20,7	1,85	10	37,9

Tab. 7 Výsledné hodnoty adsorpce pomocí GEHu

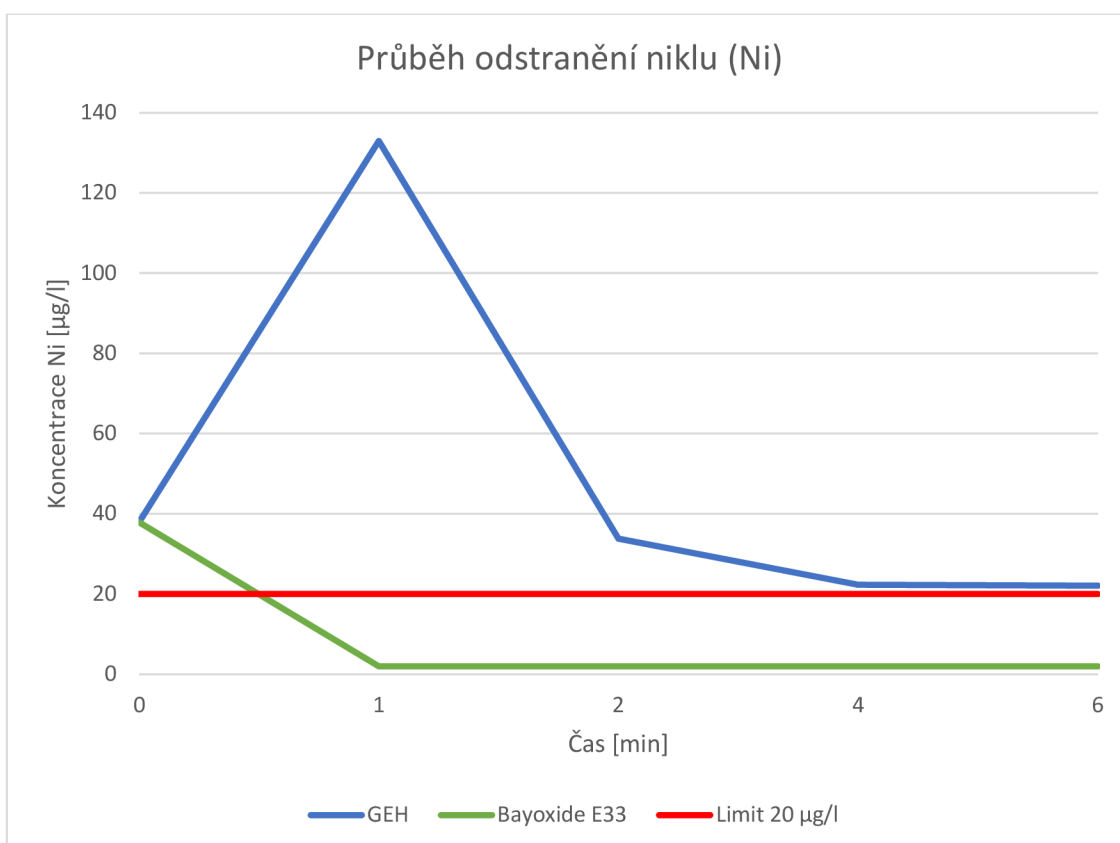
GEH					
čas [min]	pH [-]	Teplota [C°]	Zákal [FNU]	Koncentrace Cd [µg/l]	Koncentrace Ni [µg/l]
1	7,01	19,9	66,9	<0,50	133
2	6,71	20,3	2,78	<0,50	33,8
4	6,25	20,9	0,98	<0,50	22,3
6	5,99	21,7	0,88	<0,50	22,1

Tab. 8 Výsledné hodnoty adsorpce pomocí Bayoxidu E33

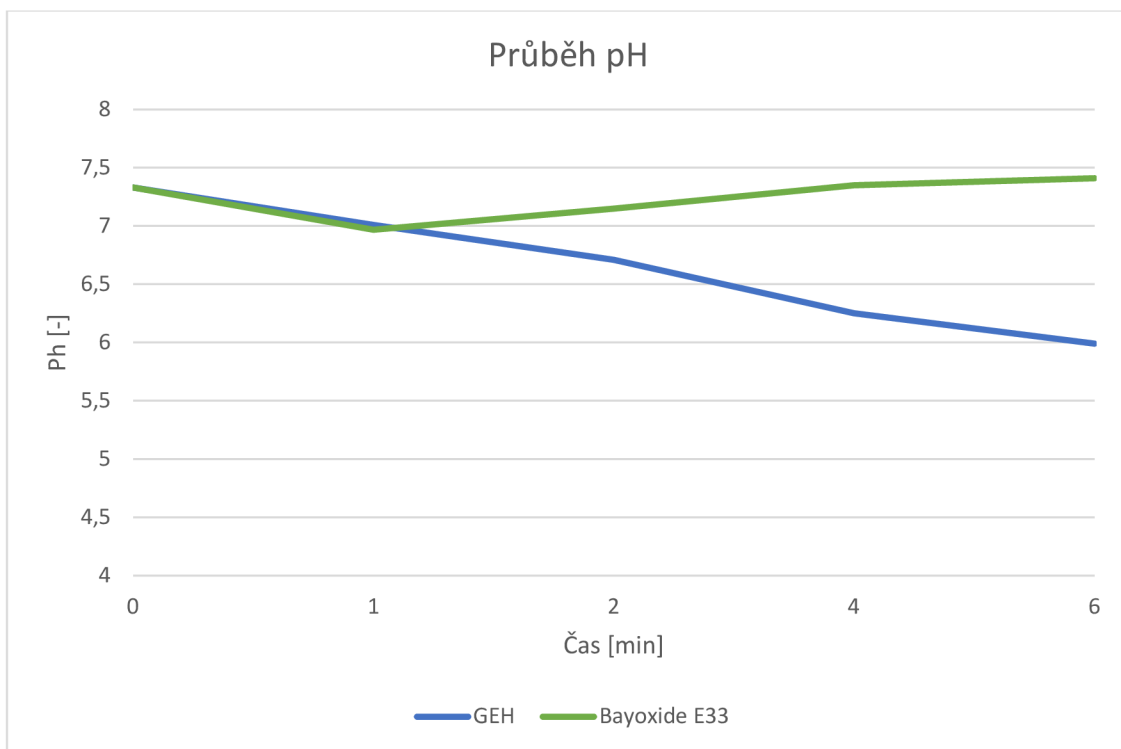
Bayoxide E33					
čas [min]	pH [-]	Teplota [C°]	Zákal [FNU]	Koncentrace Cd [µg/l]	Koncentrace Ni [µg/l]
1	6,97	20	1,52	<0,50	<2,0
2	7,15	21,5	1,3	<0,50	<2,0
4	7,35	23,2	1,11	<0,50	<2,0
6	7,41	23,6	1,07	<0,50	<2,0



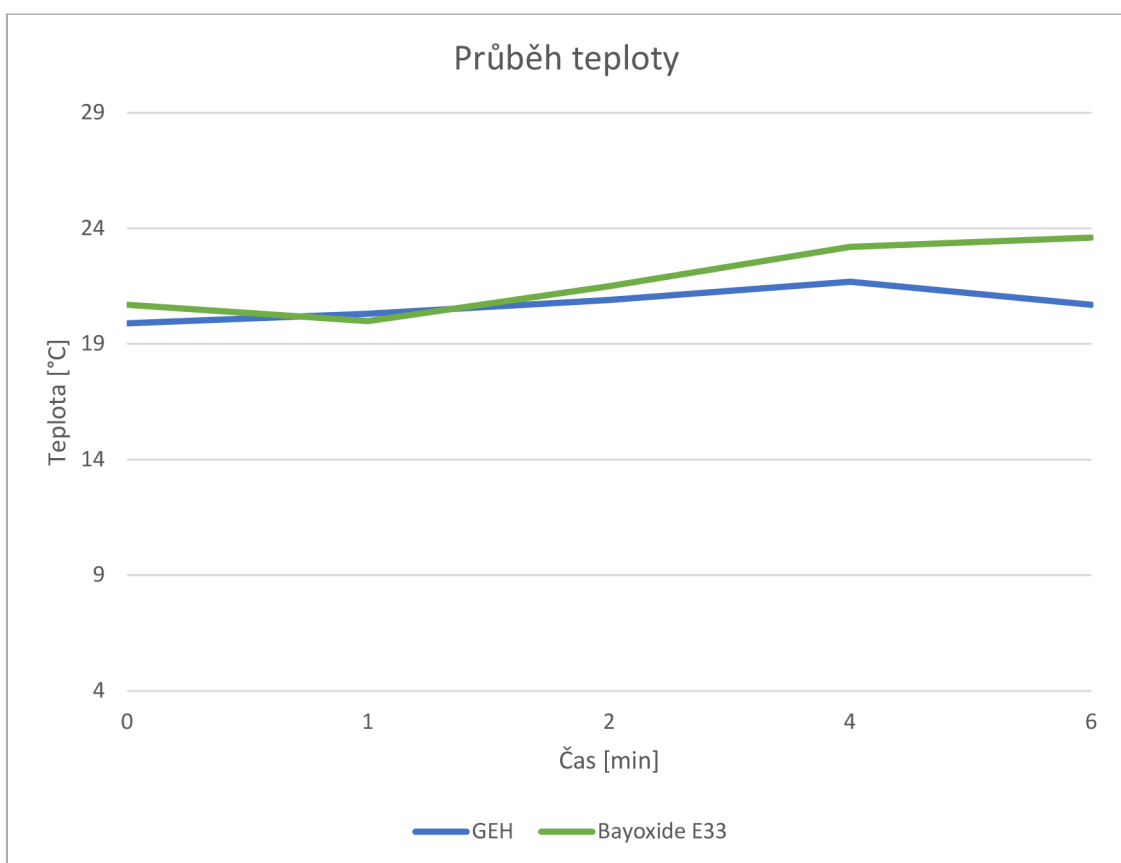
Obr. 32 Graf průběhu odstranění kadmia (Cd)



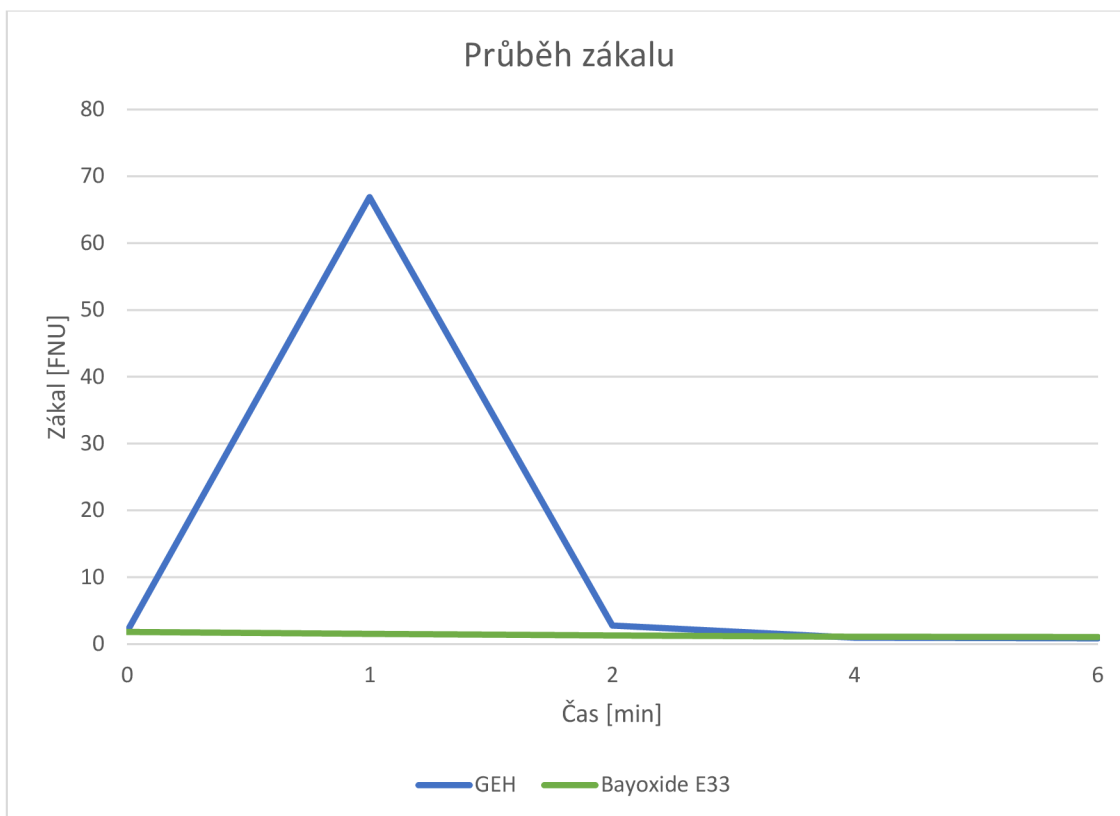
Obr. 33 Graf průběhu odstranění niklu (Ni)



Obr. 34 Graf průběhu pH



Obr. 35 Graf průběhu teploty



Obr. 36 Graf průběhu zákalu

Tab. 9 Účinnost odstraňování kadmia (Cd)

Účinnost odstraňování kadmia (Cd)		
čas [min]	η GEH [%]	η Bayoxide E33 [%]
1	95	95
2	95	95
4	95	95
6	95	95

Tab. 10 Účinnost odstraňování niklu (Ni)

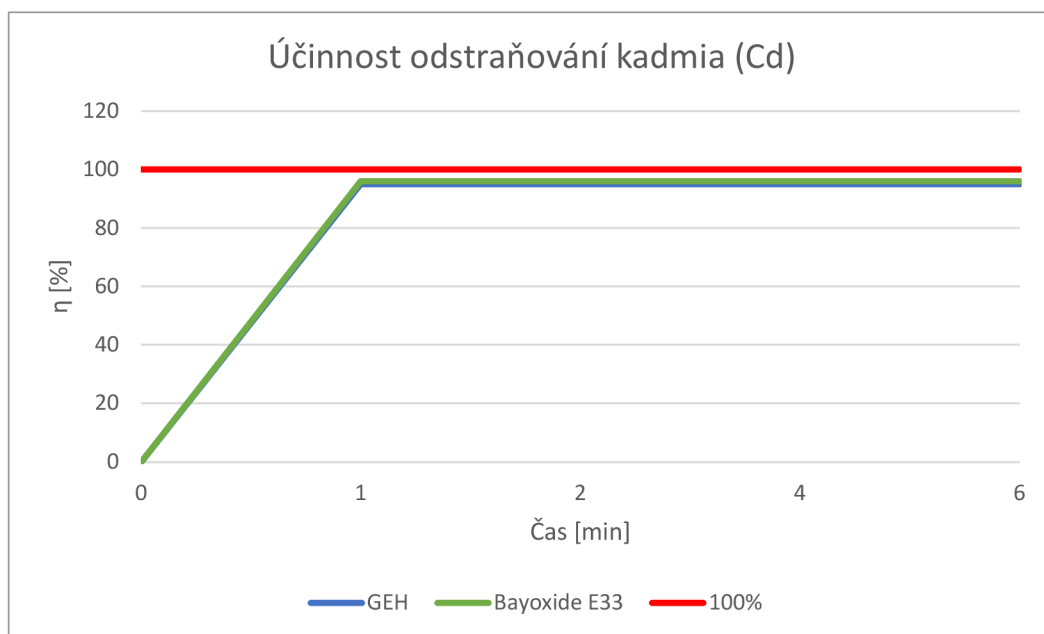
Účinnost odstraňování niklu (Ni)		
čas [min]	η GEH [%]	η Bayoxide E33 [%]
1	-250,92	94,72
2	10,82	94,72
4	41,16	94,72
6	41,69	94,72

Účinnost byla vypočítána pro oba adsorpční materiály při odstraňování kadmia i niklu v čase 1, 2, 4 a 6 minut podle vzorce:

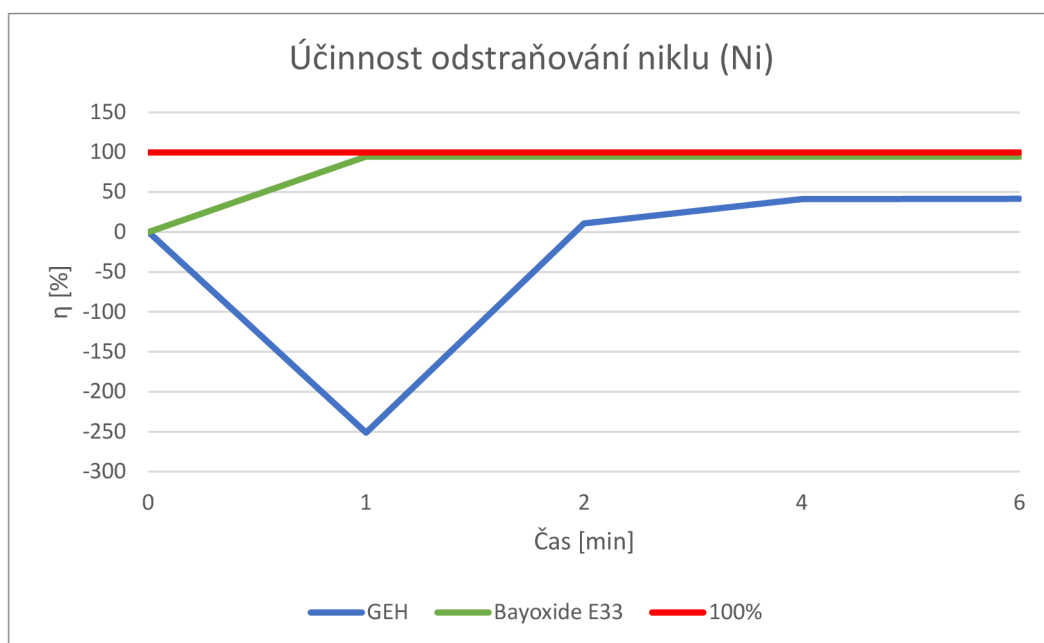
$$\eta = \frac{C_{RW} - C_F}{C_{RW}} * 100 \quad (6.1)$$

Kde: η ... účinnost odstranění [%]
 C_{RW} ... koncentrace kovu v surové vodě [$\mu\text{g/l}$]
 C_F ... koncentrace kovu po adsorpci [$\mu\text{g/l}$]

Výsledky jsou znázorněny v tabulkách Tab. 8 a Tab. 9.



Obr. 37 Graf účinnosti odstranění kadmia (Cd)

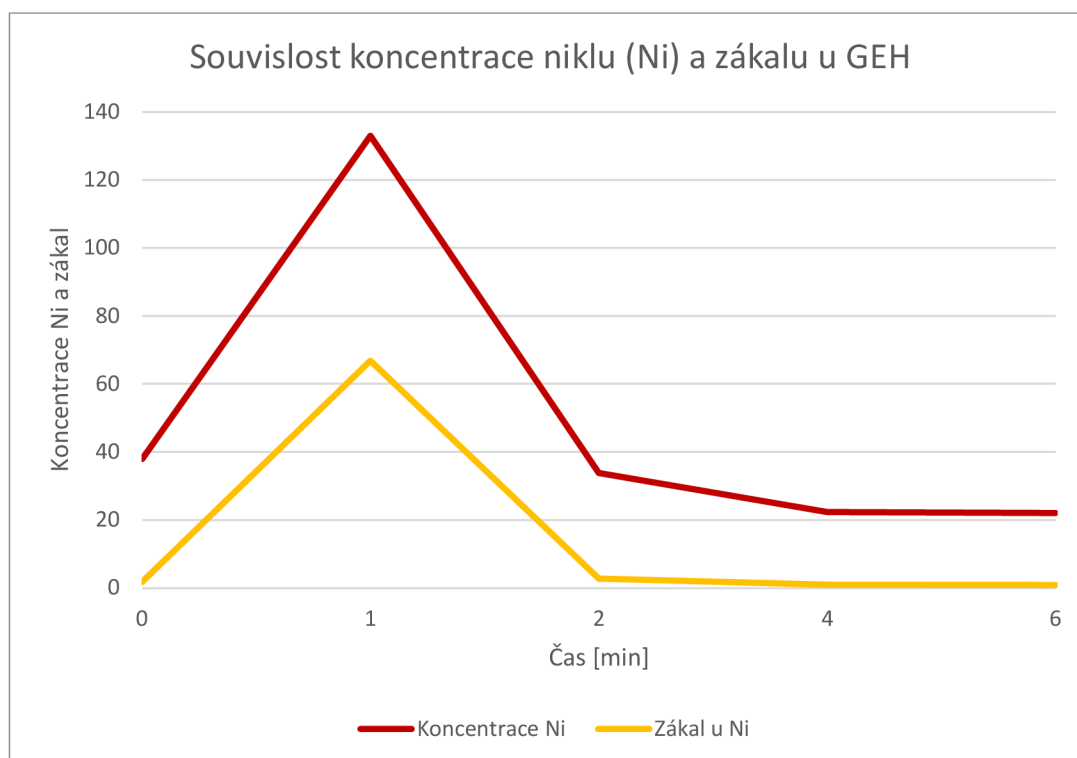


Obr. 38 Graf účinnosti odstranění niklu (Ni)

6.5 Zhodnocení experimentu

Při odstraňování kadmia si vedly oba adsorpční materiály bez problému a podle očekávání kadmium odstranily. Oběma adsorbentům se to povedlo už v první minutě odstraňování. A hodnota koncentrace se tak už v počáteční fázi úpravy dostala pod limitní ($5 \mu\text{g/l}$), a to na $0,5 \mu\text{g/l}$ a méně.

U odstraňování niklu si materiál Bayoxide E33 vedl také bez problému a podle očekávání. Odstranění niklu se mu povedlo také v první minutě jako u kadmia, a to pod hodnotu koncentrace $2 \mu\text{g/l}$, kdy u niklu je limitní hodnota $20 \mu\text{g/l}$. Problém však vznikl u materiálu GEH, jak můžete vidět v tabulce i v znázorněných grafech. Hodnota koncentrace niklu při odstraňování adsorbentem GEH při první minutě dokonce vzrostla tři a půl násobně. Proto se po experimentu pokračovalo dále pro vyšetření těchto neobvyklých výsledků měření. Podle možností porovnávání je největší pravděpodobnost této vysoké hodnoty spojena také s velmi vysokou hodnotou zákalu v první minutě odstraňování ($66,9 \text{ FNU}$) oproti modelové vodě ($1,85 \text{ FNU}$). Pro porovnání těchto hodnot jsem vytvořil graf a na obou křivkách je viditelná podobnost průběhu.



Obr. 39 Grafické porovnání koncentrace niklu (Ni) a zákalu u materiálu GEH

Na grafu jde znatelně vidět, že obě křivky mají v každém bodě stejný směr a jdou téměř identicky. Tím pádem je největší pravděpodobnost, že na stanovení vysoké koncentrace niklu má vysoký podíl zákal. Při šetření vysokých ukazatelů hodnoty niklu se zjistila zásadní informace ohledně čerpadla v laboratoři. Čerpadlo je používáno k čerpání vody při laboratorních experimentech podobných tomuto již nějakou dobu a kvůli stáří zkorodovala vrtule čerpadla. Tento jev je potvrzen na fotce, kde můžeme vidět částky rzi přímo z čerpadla.



Obr. 40 Úlomky rzi a čerpadla v laboratoři

S největší pravděpodobností se kousky rzi odtrhly od vrtule čerpadla a průtokem vody se dostaly do kolony. To vysvětluje náhlou vysokou hodnotu koncentrace niklu ve výsledcích. A tím se také ukázalo, že zdrojem těžkých kovů může být také zkorodované potrubí nebo armatury. I tak dokázal GEH, že po první minutě při vysoké koncentraci niklu je v dalších minutách velice účinný a hodnotu snížil na konečných 22,1 $\mu\text{g/l}$, která je sice nad limitní hodnotou koncentrace niklu (20 $\mu\text{g/l}$), ale hodnota je menší než v modelové vodě a také šestkrát menší než v první minutě. Pro detailnější výsledky by bylo potřeba udělat tento pokus na sorpčním materiálu GEH znovu. Avšak

z důvodu vytíženosti laboratoře při výuce a delšímu vyhodnocování výsledků Zdravotním ústavem to nebylo možné.

U průběhu pH na obou zkoušených materiálech si můžeme všimnout odlišnosti. U materiálu GEH pH klesá a skončí na hodnotě 5,99 což je hodnota pod limitem pH pro pitnou vodu (6,5-9,5). U Bayoxidu E33 pH stoupá a drží se v hodnotách limitů. Při vyhodnocování pH jsem si všiml u experimentů, které byly již dříve prováděny na Ústavu vodního hospodářství obcí, že adsorbent Bayoxide E33 má tendenci zvyšovat pH u upravené vody.

Průběh teploty je v rozmezí 19,9 °C až 23,6 °C. U obou materiálů hodnoty teploty stoupají v závislosti na trvání experimentu. Prvním testovaným byl GEH, u kterého je konečná teplota 21,7 °C a u druhého testovaného Bayoxidu E33 je teplota v šesté minutě 23,6 °C. Vyšší teplota u posledního vzorku může být způsobena, jak už bylo jednou zmíněno stářím čerpadla, kdy čerpadlo se přehřívá a může tak ovlivňovat teplotu vzorků. Stále je však teplota v normě a neovlivnila tak výsledky měření. Mírný nárůst teploty může také způsobit teplota v laboratoři, kdy voda z vodovodu má menší teplotu a po průchodu kolonou a stáním v kádince při měření pH a teploty se může teplota zkoumané vody zvýšit.

U vyhodnocení zákalu si můžeme všimnout, že oba adsorbenty fungují velice dobře. Výjimku dělá pouze už jednou zmiňovaná chyba čerpadla. Pokud si tuto chybu však odmyslíme, na průběhu odstranění zákalu jde vidět pozitivní funkčnost těchto dvou adsorbentů a hodnota zákalu postupně klesá. Počáteční zákal modelové vody měl hodnotu 1,85 FNU a GEH i přes komplikace dokázal zákal po šesti minutách odstranit na hodnotu 0,88 FNU, Bayoxid E33 odstranil zákal konečnou hodnotu 1,07 FNU. Kromě jednoho zvýšeného zákalu na hodnotu 66,9 FNU u sorpčního materiálu GEH všechny ostatní vzorky splňují limitní hodnotu zákalu pro pitnou vodu 5 FNU.

7. Závěr

Tato práce je věnována problematice zaměřené na těžké kovy a jejich odstranění z vod.

V první části této práce je kladen důraz na informace ohledně definice těžkých kovů, jejich výskytu v různých formách, zdrojů těžkých kovů a odborně popsány prvky, které patří do těžkých kovů. Těžké kovy jsou definovány jako kovy, kdy je jejich specifická hmotnost vyšší než 5 g/cm^3 . Vyskytují se ve všech životních prostředích. S přibývajícím růstem populace a průmyslu vzniká také čím dál tím větší odpad a znečištění, do kterého patří i tyto těžké kovy. Proto také přibývá zdrojů těžkých kovů, kdy jde hlavně o průmysl a urbanizaci a malá část zdrojů vzniká přirozeně. Popis prvků je zaměřen hlavně na toxicitu, která je podstatná právě při upravování vody, kdy by mělo dojít k nejvyšší účinnosti odstranění pro nejlepší kvalitu vody.

Toxicita kovů je velice široké a velmi zkoumané téma. Těžké kovy dokáží způsobovat širokou řadu zdravotních problémů u lidí, ale také u zvířat a rostlin. Účinky těchto prvků jsou velice různorodé a každý toxický prvek má ojedinělé vlastnosti, které jsou probrány v kapitole zabývající se toxicitou těžkých kovů. V této kapitole byly vybrány nejčastější zmiňované těžké kovy. Práce je v experimentální části zaměřena na nikl a kadmium a zbytek vybraných kovů je rozepsán z důvodu porovnání ostatních prvků. Jejich síla v toxicitě záleží na jejich poločase rozpadu, který je většinou dlouhý a částice kovů mají tendenci se shromažďovat a je těžké tyto vlastnosti sledovat. Nejzávažnějším účinkem při poškození organismu je karcinogenita. Největší podíl na toxicitě a celkové problematice má arsen.

Odstraňování těžkých kovů z vod se řeší už několik let, a proto bylo vyvinuto několik systémů na jejich eliminaci. Tyto procesy jsou v této práci probrány samostatně a text je věnován přímo na odstranění těžkých kovů. Některé technologie jsou vyspělejší a jiné jsou teprve na začátku zkoumání jejich efektivity. Tato práce je v pozdější části věnována adsorpci, která je jedním z nejméně ekonomicky náročných procesů s velkou efektivností. Největší pozornost je zaměřena na aktivní uhlí, které je však vysoce nákladné, a tak se novější studie snaží hledat levnější a efektivnější varianty adsorbentu,

kdy v této práci se jedná o materiál GEH a Bayoxide E33. Oba adsorbenty fungují na bázi oxidu železa a jsou zaměřeny čistě na odstraňování těžkých kovů.

Ohledně bilance jakosti vod v ČR si můžeme všimnout, že nejčastějším těžkým kovem, který se vyskytuje v podzemních vodách s nadlimitní hodnotou koncentrace je kadmium a arsen. Další prvky jako je měď nebo olovo se v podzemních vodách také vyskytují, avšak ne v nadlimitních hodnotách koncentrace. Dalším velmi častým stopovým prvkem v podzemní vodě je baryum, který se u skoro poloviny zdrojů vyskytuje v nadlimitních koncentracích. Je však těžké určit v jakých hloubkách zdrojů se tyto prvky vyskytují.

V poslední části se tato práce zabývá experimentem věnovaným adsorpci pomocí materiálů GEH a Bayoxide E33 při odstraňování niklu a kadmia. Tyto dva prvky byly odstraňovány z podzemní vody, která byla vytvořena v laboratoři pomocí koncentrátů niklu a kadmia. Simulovaná voda byla čerpána do kolon, které byly naplněny filtračními materiály a v čase 1, 2, 4 a 6 minut se odebíraly vzorky do zkumavek. Tyto vzorky poté putovaly do akreditované laboratoře Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě, kde byl proveden rozbor na koncentraci niklu a kadmia. Mimo jiné se při odebírání vzorku v laboratoři na Fakultě stavební VUT v Brně měřily hodnoty jako pH, teplota a zákal.

Závěrem práce je provedeno zhodnocení celého experimentu a porovnání účinnosti obou materiálů. Při posuzování účinnosti se jeví jako nejlepší možnost adsorpčního materiálu pro odstranění těžkých kovů z vody Bayoxide E33, který dosahoval vysoké účinnosti u niklu i kadmia. Tato účinnost byla u kadmia 95 % a u niklu 94,72 %. Filtrační materiál GEH dokázal se stejnou účinností jako Bayoxide E33 odstranit kadmium, avšak kvůli poruše na čerpadle, kterou způsobila zkorodovaná vrtule čerpadla, dosáhla hodnota účinnosti odstraňování niklu u materiálu GEH v první minutě mínusových hodnot, což se podepsalo na výsledcích experimentu. I přes vniknutí jednoho z možných zdrojů těžkých kovů (zkorodované potrubí) do kolony dokázal GEH vysoké hodnoty stáhnout a skoro dosáhnout pod limit hodnoty koncentrace niklu.

Pro odstraňování niklu a kadmia z podzemních vod bych vybral jako nejvhodnější materiál Bayoxide E33, který u obou prvků dosáhl vysokých hodnot účinnosti už v první minutě adsorpce. Avšak z důvodu poruchy zařízení je materiály složité porovnat. A i při zvýšené koncentraci si druhý použitý materiál GEH vedl v dalších časových úsecích odběru vzorků dobře a hodnotu koncentrace dokázal snižovat.

Použitá literatura

- [1] CHANDNANI, Gaurav, Priyancy GANDHI a Divya KANPARIYA. *A comprehensive analysis of contaminated groundwater: Special emphasis on nature-ecosystem and socio-economic impacts* [online]. 2022, 19 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100813>
- [2] HONG, Ya-jun, Wei LIAO, Zhen-fei YAN a Ying-chen BAI. *Progress in the Research of the Toxicity Effect Mechanisms of Heavy Metals on Freshwater Organisms and Their Water Quality Criteria in China* [online]. 2020 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1155/2020/9010348>
- [3] JAISHANKAR, Monisha, Tenzin TSETEN, Naresh ANBALAGAN a Blessy B. MATHEW. *Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals* [online]. 2014 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: doi:10.2478/intox-2014-0009
- [4] KAFKA, Zdeněk a Jana PUNČOCHÁŘOVÁ. Těžké kovy v přírodě a jejich toxicita. *Chemické listy* [online]. 2002(96), 611-617 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2002_07_05.pdf
- [5] SINGH, Anubhav, Rohit K. VERMA a Vinay ASERI, SHARMA, Anuj, ed. Heavy Metal Contamination of Water and Their Toxic Effect on Living Organisms. In: DORTA, Daniel J. a Danielle OLIVEIRA. *The Toxicity of Environmental Pollutants* [online]. [cit. 2022-12-30]. ISBN 978-1-80355-580-5. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/82246>
- [6] BEAUDRY, Frederic. Co je kyselý odvodnění. *EFerrit* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://cs.eferrit.com/co-je-kysele-odvodneni/>
- [7] RAHMAN, Z. a V.P. SINGH. *The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview* [online]. 2019 [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7528-7>
- [8] Chemické prvky. *Chemické prvky* [online]. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 2015 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.chemickeprvky.cz/>

- [9] ERSOZ, Mustafa a Lisa BARROTT. *Best Practice Guide on Metals Removal From Drinking Water By Treatment* [online]. Londýn, 2012 [cit. 2023-01-12]. ISBN 9781780400686.
- [10] QASEM, Naef A.A., Ramy H. MOHAMMED a Dahiru U. LAWAL. *Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review* [online]. 2021 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- [11] SALEH, Tawfik A., Mujahid MUSTAQEEM a Mazen KHALED. *Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review* [online]. 2022 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617>
- [12] JOSEPH, Lesley, Byung-Moon JUN, Joseph R.V. FLORA, Chan Min PARK a Yeomin YOON. *Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review* [online]. 2019 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>
- [13] *Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky* [online]. 2021 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/opzv/voda/rezim/bilance/zprava_bilance_21.pdf
- [14] *GEH Wasserchemie* [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.geh-wasserchemie.com/en/about-geh/>
- [15] ILAVSKÝ, J. a D. BARLOKOVÁ. *Nové sorpčné materiály Bayoxide E33, GEH, CFH12 v úprave vody* [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.smv.cz/res/data/024/002789.pdf>
- [16] *Lanxess: Bayoxide E33* [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://lanxess.com/en/Products-and-Brands/Products/b/BAYOXIDE--E-33>
- [17] MARZINOVÁ, Kristýna. *Možnosti odstraňování kovů ze zdrojů pitné vody vodárenskými procesy*. Brno, 2021. 81 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Renata Biela, Ph.D.

- [18] *XS Instruments: pH 5 Tester Kit* [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.xsinstruments.com/pocket-testers-/50014063/ph-5-tester-kit.htm>
- [19] *Hach: 2100Q IS Portable Turbidimeter* [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.hach.com/p-2100q-is-portable-turbidimeter/2100QIS01>
- [20] MIHALJEVIČ, Martin, Ladislav STRNAD a Ondřej ŠEBEK. Využití hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem v geochemii. *Chemické listy* [online]. 2004, (98), 8 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2004_03_02.pdf

Seznam zkratek

ČR	Česká republika
ATSDR	Agentura pro registr toxických látek a nemocí
OSN	Organizace spojených národů
UNEP	Program OSN pro životní prostředí
WHO	Světová zdravotnická organizace
As	Arsen
Pb	Olovo
Cd	Kadmium
Ni	Nikl
Cu	Měď
Zn	Zinek
Se	Selen
Cr	Chrom
Hg	Rtuť
Fe	Železo
Al	Hliník
Ca	Vápník
Mg	Mangan
GFH	Granulovaný hydroxid železitý
AA	Aktivovaný oxid hlinitý
HCl	Kyselina chlorovodíková
NaCl	Chlorid sodný
Al(OH) ₃	Hydroxid hlinitý
Fe(OH) ₃	Hydroxid železitý
RO	Reverzní osmóza
UF	Ultrafiltrace
NF	Nanofiltrace
ED	Elektrodialýza
MF	Mikrofiltrace
PA	Polyamidová membrána
TiO ₂	Oxid titaničitý

ZnO	Oxid zinečnatý
CdS	Sulfid kademnatý
ZnS	Sulfid zinečnatý
O ₂	Kyslík
NOM	Přírodní organické látky
°C	Stupeň Celsia
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
MZ	Ministerstvo zemědělství
GEH	Granulated Eisen Hydroxide
VUT	Vysoké učení technické
FNU	Formazine Nephelometric Units

Seznam tabulek

Tab. 1 Zdroje těžkých kovů [4] (upraveno autorem)	7
Tab. 2 Výhody a nevýhody technologií úpravy vod [11] (upraveno autorem)	30
Tab. 3 Vlastnosti GEH [15] (upraveno autorem)	39
Tab. 4 Vlastnosti Bayoxidu E33 [15] (upraveno autorem)	40
Tab. 5 Složení modelové vody [autor]	46
Tab. 6 Laboratorní rozbor modelové vody	49
Tab. 7 Výsledné hodnoty adsorpce pomocí GEHu	49
Tab. 8 Výsledné hodnoty adsorpce pomocí Bayoxidu E33.....	49
Tab. 9 Účinnost odstraňování kadmia (Cd)	52
Tab. 10 Účinnost odstraňování niklu (Ni)	52

Seznam obrázků

Obr. 1 Zdroje těžkých kovů ve vodě [5] (upraveno autorem)	7
Obr. 2 Cirkulace kontaminantů v životním prostředí [5] (upraveno autorem)	10
Obr. 3 Kyselé odvodnění dolů [6].....	11
Obr. 4 Arsen [8].....	13
Obr. 5 Olovo [8].....	14
Obr. 6 Kadmium [8]	15
Obr. 7 Nikl [8]	16
Obr. 8 Měď [8]	17
Obr. 9 Zinek [8]	18
Obr. 10 Selen [8]	19
Obr. 11 Chrom [8].....	20
Obr. 12 Rtuť [8]	21
Obr. 13 Proces koagulace/flokulace se sedimentací [10] (upraveno autorem)	23
Obr. 14 Proces iontové výměny [10] (upraveno autorem)	27
Obr. 15 Hodnocení metod podle hlavních kritérií [10] (upraveno autorem)	30
Obr. 16 Objekty podzemních vod dle ukazatele kadmium [13].....	35
Obr. 17 Objekty podzemních vod dle ukazatele měď [13]	36
Obr. 18 Objekty podzemních vod dle ukazatele olovo [13]	36
Obr. 19 Objekty podzemních vod dle stopových prvků (kovy) [13]	37
Obr. 20 Odstranění těžkých kovů adsorpcí [10] (upraveno autorem)	38
Obr. 21 Adsorbent GEH [autor]	40
Obr. 22 Adsorbent Bayoxide E33 [autor]	41
Obr. 23 Drenážní vrstva v koloně [autor]	42
Obr. 24 Propírání adsorbentů [autor]	43
Obr. 25 Kolony připravené k měření (první a druhá zleva) [autor]	43
Obr. 26 Schéma sestavy pro měření [autor].....	44
Obr. 27 Čerpadlo a barel s modelovou vodou [17].....	45
Obr. 28 Průtokoměr [autor].....	46
Obr. 29 Zkumavky připravené pro vzorky vody [autor].....	47

Obr. 30 XS Instruments pH 5 Tester Kit [autor].....	48
Obr. 31 Přístroj HACH 2100Q IS [autor]	48
Obr. 32 Graf průběhu odstranění kadmia (Cd).....	50
Obr. 33 Graf průběhu odstranění niklu (Ni).....	50
Obr. 34 Graf průběhu pH.....	51
Obr. 35 Graf průběhu teploty.....	51
Obr. 36 Graf průběhu zákalu.....	52
Obr. 37 Graf účinnosti odstranění kadmia (Cd).....	53
Obr. 38 Graf účinnosti odstranění niklu (Ni).....	53
Obr. 39 Grafické porovnání koncentrace niklu (Ni) a zákalu u materiálu GEH	54
Obr. 40 Úlomky rzi a čerpadla v laboratoři	55