



Využití nanomateriálů v čištění podzemní vody na území Ústí nad Labem

Bakalářská práce

Studijní program:

B1301 Geografie

Studijní obor:

Aplikovaná geografie

Autor práce:

Iveta Pešková

Vedoucí práce:

RNDr. Jan Kocum, Ph.D.

Katedra geografie





Zadání bakalářské práce

Využití nanomateriálů v čištění podzemní vody na území Ústí nad Labem

Jméno a příjmení: **Iveta Pešková**
Osobní číslo: P16000712
Studijní program: B1301 Geografie
Studijní obor: Aplikovaná geografie
Zadávací katedra: Katedra geografie
Akademický rok: **2017/2018**

Zásady pro vypracování:

Cíle:

1. Literární rešerše týkající se možností využití principů nanotechnologie v rámci zlepšení kvality podzemní vody.
2. Vymezení a fyzicko-geografická charakteristika zájmového kontaminovaného území Ústecký kraj.
3. Realizace procesu čištění odebraných vzorků podzemní vody kontaminované chlorovanými uhlovodíky pomocí nulmocného železa.
4. Zhodnocení úspěchů sanačního činidla v čištění vzorků podzemní vody.

Metody:

1. Teoretická část – Podrobná literární rešerše dostupných tuzemských a zahraničních zdrojů informací.
2. Praktická část – Realizace laboratorních experimentů (sledování poklesu koncentrace kontaminace, monitoring fyzikálně-chemických parametrů). Vyhodnocení a zpracování získaných dat pomocí vhodných statistických metod.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
40 stran
tištěná
Čeština



Seznam odborné literatury:

ČERNÍK, Miroslav. Chemicky podporované in situ sanační technologie. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-767-5.

MATĚJŮ, Vít, ed. Kompendium sanačních technologií. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2006. ISBN 80-868-3215-5.

FETTER, C.W. Contaminant hydrogeology. 2nd ed. Long Grove, IL: Waveland Press, 2008. ISBN 978-157-7665-830.

NANO IRON, s.r.o., <http://www.nanoiron.cz/>

Vedoucí práce:

RNDr. Jan Kocum, Ph.D.
Katedra geografie

Datum zadání práce:

25. dubna 2018

Předpokládaný termín odevzdání:

19. dubna 2019

prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.
děkan

L.S.

doc. RNDr. Kamil Zágoršek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 25. května 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

20. července 2020

Iveta Pešková

Poděkování

Srdečně děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu RNDr. Janu Kocumovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a trpělivost. Také bych chtěla poděkovat Technické univerzitě v Liberci, Ústavu pro nanomateriály, moderní technologie a inovace za možnost provedení laboratorních testů v jejich laboratořích, poskytnutí materiálů a výsledných dat. Závěrem srdečně děkuji své rodině a blízkým, za podporu a cenné připomínky, ať už při tvorbě bakalářské práce, tak i při celém mém studiu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na využití nanomateriálů v čištění podzemní vody na území Ústí nad Labem, konkrétně v areálu Spolchemie, a.s. Práce obsahuje celkovou charakteristiku území z geografického hlediska v souvislosti se znečištěním podzemní vody a testování účinnosti nanoželeza při čištění podzemní vody v laboratoři. Metodami pro zpracování tohoto tématu jsou literární rešerše dostupných tuzemských a zahraničních zdrojů informací, realizace laboratorních experimentů (sledování poklesu koncentrace kontaminace, monitoring fyzikálně-chemických parametrů) a vyhodnocení a zpracování získaných dat pomocí vhodných metod.

Klíčová slova

Sanace podzemní vody, nanoželezo, kontaminant, nanomateriál, podzemní voda, Ústí nad Labem, Spolchemie, a.s., vodní tok, hydrologie, hydrogeologie

Annotation

This bachelor thesis is focused on using of nanomaterials for groundwater treatment in the area of Ústí nad Labem, specifically in the factory of Spolchemie, a.s. The thesis contains the overall characteristics of the area from a geographical point of view in connection with groundwater pollution and testing the effectiveness of nanoiron in groundwater treatment in the laboratory. Methods for processing this topic are literature sources of available domestic and foreign sources of information, implementation of laboratory experiments (monitoring the decrease in contamination concentration, monitoring of physico-chemical parameters) and evaluation and processing of obtained data using appropriate methods.

Key words

Groundwater remediation, nanoiron, contaminant, nanomaterial, groundwater, Ústí nad Labem, Spolchemie, a.s., watercourse, hydrology, hydrogeology

Obsah

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Úvod a cíle práce..... | 11 |
| 2 | Stav poznání..... | 13 |
| 2.1 | Kvalita podzemních vod a možnosti jejich čištění..... | 13 |
| 2.2 | Nanomateriály a principy jejich čištění | 13 |
| 2.3 | Popis organických kontaminantů | 14 |
| 2.4 | Šíření kontaminantů | 15 |
| 2.5 | Chemicky podporované <i>in situ</i> sanační technologie | 15 |
| 2.5.1 | In situ chemické oxidace | 16 |
| 2.5.2 | In situ chemické a biologické redukce | 17 |
| 2.5.2.1 | Využití nanoželeza | 17 |
| 3 | Fyzicko-geografická charakteristika zájmového území..... | 19 |
| 3.1 | Vymezení zájmového území | 19 |
| 3.2 | Geologické a geomorfologické poměry..... | 21 |
| 3.3 | Klimatické podmínky | 23 |
| 3.4 | Pedologické poměry | 25 |
| 3.5 | Hydrogeologické a hydrologické poměry | 26 |
| 3.6 | Kvalita povrchových a podzemních vod v zájmovém území..... | 28 |
| 3.7 | Ochrana životního prostředí a jeho současný stav | 28 |
| 4 | Materiál a metody..... | 30 |
| 4.1 | Zdroje dat | 30 |
| 4.1.1 | Mapová data a podklady..... | 30 |
| 4.1.2 | Data potřebná pro laboratorní testy..... | 31 |
| 4.2 | Metodické postupy | 33 |
| 4.2.1 | Mapová tvorba..... | 33 |
| 4.2.2 | Laboratorní analýza | 33 |

| | | |
|-----|--------------------------------|----|
| 5 | Výsledky..... | 46 |
| 5.1 | Grafy a výsledky analýz | 46 |
| 6 | Diskuze..... | 51 |
| 7 | Závěry | 54 |
| 8 | Seznamy použitých zdrojů | 56 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| <i>Obrázek 1: Složení nanočástice a její redukční schopnosti</i> | 18 |
| <i>Obrázek 2: Schématická mapa zájmového území pro rok 2019</i> | 19 |
| <i>Obrázek 3: Geologické a geomorfologické poměry v Ústí nad Labem v roce 2019</i> | 22 |
| <i>Obrázek 4: Klimatické podmínky v Ústeckém kraji v roce 2019</i> | 23 |
| <i>Obrázek 5: Průměrný roční úhrn srážek v Ústeckém kraji v období 1981-2010</i> | 24 |
| <i>Obrázek 6: Pedologické poměry v Ústí nad Labem v roce 2019</i> | 25 |
| <i>Obrázek 7: Hydrologické a hydrogeologické poměry v Ústí nad Labem v roce 2019</i> | 27 |
| <i>Obrázek 8: Lokalizace odběrového místa v rámci Ústí nad Labem v roce 2019</i> | 31 |
| <i>Obrázek 9: Suspenze nanoželeza NANO FER STAR</i> | 32 |
| <i>Obrázek 10: Reálné uspořádání reaktorového testu</i> | 34 |
| <i>Obrázek 11: Sestavené reaktory</i> | 34 |
| <i>Obrázek 12: Připravené vialky a směs s nanoželezem</i> | 35 |
| <i>Obrázek 13: Uzávěry na reaktory s míchadlem potírány těsnící masťou</i> | 35 |
| <i>Obrázek 14: Reaktor s připojením elektřiny</i> | 36 |
| <i>Obrázek 15: Slepý reaktor R1</i> | 37 |
| <i>Obrázek 16: Nalévání podzemní vody do reaktorů</i> | 38 |
| <i>Obrázek 17: Přidávání směsi s nanoželezem do reaktoru R3 pomocí pipety</i> | 39 |
| <i>Obrázek 18: Míchání směsi nanoželeza</i> | 40 |
| <i>Obrázek 19: Naplněné reaktory se zapnutým mícháním</i> | 41 |
| <i>Obrázek 20: Odstátá voda a připravené vialky pro odběr na analýzu na GC/MS</i> | 42 |
| <i>Obrázek 21: Pipetování blanc vzorku</i> | 43 |
| <i>Obrázek 22: Blanc a vialky před pipetováním vzorku z reaktorů</i> | 43 |
| <i>Obrázek 23: Odběr prvotních vzorků z reaktorů R1 a R3</i> | 44 |
| <i>Obrázek 24: Odebraný vzorek z R1 v kádince, při měření pH, ORP</i> | 45 |
| <i>Obrázek 25: První odebrané vzorky ve vialkách</i> | 45 |
| <i>Obrázek 26: Graf degradace chlorovaných uhlovodíků pomocí nanoželeza</i> | 48 |
| <i>Obrázek 27: Graf poklesu koncentrací perchlorethylenu a trichlorethylenu ve slepém reaktoru (R1)</i> | 49 |
| <i>Obrázek 28: Graf poklesu koncentrací perchlorethylenu a trichlorethylenu v reaktoru (R3)</i> | 49 |
| <i>Obrázek 29: Vialky se vzorky po prvním odebrání</i> | 49 |
| <i>Obrázek 30: Vialky se vzorky ze 3. odběrového dne</i> | 50 |
| <i>Obrázek 31: Vialky se vzorky ze závěrečného odběrového dne</i> | 50 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| <i>Tabulka 1: Pokles koncentrací CIU v čase ve slepém reaktoru R1</i> | 46 |
| <i>Tabulka 2: Vývoj fyzikálně – chemických parametrů ve slepém reaktoru R1</i> | 47 |
| <i>Tabulka 3: Pokles koncentrací CIU v čase v reaktoru R3</i> | 47 |
| <i>Tabulka 4: Vývoj fyzikálně – chemických parametrů v reaktoru R3</i> | 47 |

Seznam zkratek

AOPK = Agentura ochrany přírody a krajiny

CENIA = Česká informační agentura životního prostředí

CIU = chlorovaný uhlovodík

ČHMÚ = Český hydrometeorologický ústav

ČGS = Česká geologická služba

ČÚZK = Český úřad zeměměřičský a katastrální

DCE = dichlorethylen

DCM = dichlormethan

CHKO = Chráněná krajinná oblast

CHOPAV = chráněná oblast přirozené akumulace vod

ISCO = in situ chemická oxidace

ISCR = in situ chemická redukce

GC/MS = Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií (Gas chromatography – mass spectrometry)

ORP = oxidačně – redukční potenciál

PCE = perchlorethylen

PCM = tetrachlormethan

R1 = reaktor 1

R3 = reaktor 3

TCE = trichlorethylen

TCM = trichlormethan

TKSP = taxonomický klasifikační systém půd ČR

TUL = Technická univerzita v Liberci

UJEP = Univerzita Jana Evangelisty Purkyně

VC = vinylchlorid

WMS = Web Map Service (webová mapová služba)

1 Úvod a cíle práce

Bakalářská práce se zabývá tématem využití nanomateriálů v čištění podzemní vody na území Ústí nad Labem. Čištění podzemní vody je prováděné pomocí různých technik, které souvisejí s tím, že se odborníci snaží podzemní vodu, která je především hlavním zdrojem pitné vody, čistit bez dalšího ekologického zatížení území. Podzemní voda může být značně znečištěna kontaminanty, které se nachází především v půdě a je ovlivněna i tím, kudy voda proteče, čili skladbou dané půdy. Podobnými tématy se zabývá fyzická geografie, přesněji přímo hydrologie, avšak konkrétně se toto téma v teoretickém studiu nerozebíralo. Zájem o tuto problematiku a její hlubší pochopení byl stěžejním důvodem pro výběr tématu.

Území, kterým se bakalářská práce zabývá, je zájmové území v okolí průmyslového areálu Spolchemie Ústí nad Labem. Toto území bylo pro práci vybráno z důvodu možnosti využít vzorky (kontaminované podzemní vody) od Technické univerzity, Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, který se Spolchemií v Ústí spolupracuje, podílet se na provedení laboratorních testů sanační metody a získat tak data pro samotnou praktickou část bakalářské práce. Vzhledem k činnosti v průmyslovém areálu Spolchemie jsou podzemní vody a geologické podloží v okolí vysoce kontaminované toxickými organickými látkami, a proto je možné na těchto vzorcích dobře ověřit funkčnost vybrané sanační metody (in situ chemické redukce pomocí nanomocného železa).

Mezi nejčastější kontaminanty podzemní vody patří chlorované uhlovodíky. Nejvyskytovanější z nich jsou například tetrachlorethen, neboli také perchlorethen (PCE), trichlorethen (TCE), dichlorethen (DCE), vinylchlorid (VC), chlormethan, dichlormethan (DCM), trichlormethan (chloroform, TCM), tetrachlormethan (PCM) a spadají do skupiny chlorovaných ethenů a methanů.

K čištění podzemních vod se používá řada technik. Souhrnně se tyto techniky nazývají sanační technologie a dělí se na metody ex situ a in situ podle způsobu nakládání. Při použití in situ se podzemní voda čistí přímo na místě postižení. In situ rozlišujeme několik druhů podle toho, zda jsou založeny na fyzikálních, chemických či biologických postupech. Chemické metody in situ spočívají v tom, že chemická či podpůrná látka je aplikována přímo do zdrojového místa kontaminace v půdě a dochází tak k reakci mezi aplikovaným činidlem a daným kontaminantem, za vzniku méně toxických či netoxických produktů. Technologie ex situ probíhají vždy po vyčerpání podzemní vody a její čištění probíhá mimo místo postižení, jelikož jsou k ní často potřebné velké stroje a jiné pomocné technologie. Do hloubky bude práce věnována pouze chemické technologii in situ z důvodu možnosti tuto technologii prakticky ověřit v laboratořích TUL.

Teoretická i praktická část se zabývá metodou čištění pomocí nanomateriálů, konkrétně pomocí nanoželeza. Tato sanační metoda, při které se používá nanoželezo je vhodná pro velké množství kontaminantů od těch jednoduchých, až po ty složité. Patří mezi ně chlorované uhlovodíky, těžké kovy, pesticidy, atd. Dále se má práce věnuje geografickému hledisku této problematiky. Do praktické části tedy také spadají mapy daného území, které znázorňují hned několik geografických poměrů dané oblasti.

Cíle mé práce jsou geografická charakteristika zájmového území, čištění podzemní vody kontaminované chlorovanými uhlovodíky pomocí nulmocného železa a zhodnocení úspěchů sanačního činidla. Dále také vytvoření map, které poukazují na charakter a poměry dané lokality, z hlediska geologie, geomorfologie, srážek, klimatu, pedologie, hydrogeologie, hydrologie, či na místo odběru vzorku vody v dané lokalitě.

2 Stav poznání

2.1 Kvalita podzemních vod a možnosti jejich čištění

Podzemní voda je často kontaminována různými škodlivými látkami, které mohou ovlivňovat podmínky půdy a mít negativní vliv na organismy žijící v půdě. Kontaminovaná voda může také přímo ohrozit život obyvatelstva, jelikož je podzemní voda významným zdrojem pitné vody. Můžou v ní být přítomny závadné látky jako pesticidy, těžké kovy, chlorované uhlovodíky, ropné látky, apod. [Ministerstvo životního prostředí ČR, 2020]

Systematické odstraňování starých ekologických zátěží na území České republiky začalo ve větší míře až po nastolení demokracie (počínaje rokem 1990). Nejrozsáhlejším zdrojem informací o starých ekologických zátěžích v ČR je databáze Ministerstva životního prostředí. [Ministerstvo životního prostředí ČR, 2020]

Kontaminovaná místa mohou být rozmanitého charakteru. Můžou to být skládky odpadů, průmyslové a zemědělské areály, drobné provozovny, nezabezpečené sklady nebezpečných látek, bývalé vojenské základny, území postižená těžbou nerostných surovin nebo opuštěná a uzavřená úložiště těžebních odpadů představující závažná rizika. [Ministerstvo životního prostředí ČR, 2020]

O počátečních informacích o ekologických zátěžích z naší historie se dozvíme z ekologického auditu, který pořizovali nabyvatelé průmyslových objektů v rámci privatizace. Ten dával informace o tom, zda je v podniku stará ekologická zátěž, jakého druhu, velikosti a intenzity. Další a podrobnější informace se dají zjistit z analýzy rizika, která je podrobnějšího rázu. Zda je škodlivost zátěže vysoká, jaké je riziko jejího šíření a jaké jsou nejvyšší možné koncentrace kontaminantů. Tyto informace jsou pak zpracovávány pro sanační limity, dle České inspekce životního prostředí, které ukládá povinnost starou ekologickou zátěž odstranit. [Ministerstvo životního prostředí ČR, 2020]

Poté nastupuje postup sanace, poté monitoring, který ověřuje trvalé vyčištění lokality. [Černík a kol., 2010]

2.2 Nanomateriály a principy jejich čištění

Nanomateriály jsou částice o rozměrech nanometrů až mikrometrů, které mají individuální charakter a jsou významné svou konstrukcí a funkcí. Vykazují unikátní vlastnosti, které se v makroskopických rozměrech dané látky nevyskytují. [Fojtík a kol., 2014]

Nanomateriálů existuje mnoho a jejich využití je velmi rozsáhlé. Na čištění vody a aplikace do půdy se ale především používá nanoželezo. Tato látka proto byla také použita při čištění odebraných vzorků z areálu Spolchemie, se kterými se pracovalo v praktické části bakalářské práce. [Fojtík a kol., 2014]

Nanoželezo se používá při sanační metodě založené na in situ chemické redukci, která je použitelná pro degradaci mnoha kontaminantů nacházejících se v půdě. Právě proto se nanoželezo využívá nejvíce. Z anorganických látek jsou to především těžké kovy a z organických látek pak například pesticidy či chlorované uhlovodíky. [Zhang, 2003]

Sanace je proces, při kterém je například pomocí chemických látek čištěné kontaminované území. Výběru použití správného procesu ale může předcházet ještě podrobný průzkum za účelem volby optimálního sanačního postupu. Po samotné sanaci následuje postsanační monitoring díky kterému se zjistí, zda je daná lokalita trvale vyčištěná. Kontaminace mohou být odstraněny s pomocí fyzikálních procesů například sanačním čerpáním, při němž se čerpaná voda různým způsobem čistí na povrchu (gravitační separací, stripováním, filtrací apod.) a vyčištěná vypouští zpět do horninového prostředí, popř. do toku nebo kanalizace. Z pokročilých sanačních technologií se čím dál více uplatňují tzv. metody in situ. Spočívají v tom, že se aktivní chemická látka aplikuje přímo do horninového prostředí a podzemní vody, kde reaguje s kontaminantem za vzniku neškodných sloučenin. Jedná se o in situ chemickou oxidaci (ISCO) s využitím manganistanu draselného nebo směsí peroxidu vodíku (Fentonovo činidlo), nebo in situ chemickou či biologickou redukcí s možným využitím biodegradovatelných substrátů (syrovátka, melasa, kyselina mléčná) nebo například elementárního železa (nano, mikro nebo makroskopického). [Matějů a kol., 2006]

2.3 Popis organických kontaminantů

Kontaminant je znečišťující látka, která může být v půdě přítomna v mnoha podobách. Například ve vodné fázi, což znamená, že je rozpuštěná ve vodě, v pevné fázi, v půdě nebo také ve formě kapalné nevodné fáze. [Šráček a kol., 2000]

Organické znečišťující látky se dělí na dvě základní skupiny. V první skupině se nachází organické látky lehčí než voda. Jsou to především areny, což jsou aromatické uhlovodíky, které plavou na hladině vody. Druhou skupinou jsou látky těžší než voda a to především chlorované uhlovodíky. [Šráček a kol., 2000]

Mezi nejčastější kontaminanty podzemní vody patří chlorované uhlovodíky (především chlorované etheny, chlorované methany). Tento typ kontaminantů je vysoce rizikový pro zdraví člověka a pro životní prostředí. Je vysoce karcinogenní a toxický pro vodní organismy. [Nosek, Černík, 2011]

2.4 Šíření kontaminantů

Organické kontaminanty dokáží také vytvořit vlastní nevodnou organickou fází, která má možnost se množit v nepropustných kapsách horninového prostředí. Díky tomu za pomoci srážek může docházet k rozpuštění do podzemní vody. Tím se tyto akumulace stávají velmi dlouhodobým zdrojem kontaminace. [Šrámek a kol., 2000]

Když se kontaminace ve formě volné organické fáze šíří kolektorem, je zadržována kapilárními silami v úzkých pórech. Její šíření obvykle není přímočaré, ale vyhledává preferenční vrstvy s větším rozměrem pórů a tím i vyšší propustností. Podobně se kontaminanty chovají i při migraci v puklinách. [Fetter, 2008]

2.5 Chemicky podporované *in situ* sanační technologie

Horninové prostředí i podzemní voda můžou být charakterizovány několika základními parametry. Oxidačně-redukčním potenciálem (který určuje, jak se látky chovají) a pH. Pokud se tyto parametry změní, může to vést i ke změně stavu kontaminantu, ke změně jeho vlastností. To dále také ovlivňuje jeho migrační schopnosti. Například dvojmocné železo je v povrchových podmínkách značně rozpustné, zatímco trojmocné železo tvoří oxidy a hydroxidy, které jsou rozpustné málo. Proto tyto vlastnosti znečišťujících látek, závisí na tom, zda je prostředí oxidační nebo redukční. Metody, které využívají změn oxidačně-redukčních vlastností prostředí, se z většiny aplikují *in situ*, což má řadu výhod – podzemní voda spolu s kontaminantem se nevynáší na povrch, takže není nutné použití strojů či nějaké likvidace, atd., má to ale i své nevýhody – tyto metody potřebují větší a podrobnější přípravnou fázi, jelikož jsou novější metodou a liší se od metod, které byly rutinně využívány. [Černík a kol., 2010]

Většinou se při sanaci řídí tímto schématem: posouzení nedostatků metod *ex situ*, stanovení cíle použití nových metod, výběr vhodných metod (oxidační metody, redukční metody či biotechnologie, typ činidla), odhad rizik spojených s použitím navržené metody – povolovací řízení, provedení laboratorních ověřovacích zkoušek, vyhodnocení laboratorních zkoušek a plán pro pilotní aplikaci, provedení pilotní aplikace, vyhodnocení pilotní aplikace

a návrh plného využití technologie pro sanaci, provedení sanace a postsanačního monitoringu [Černík a kol., 2010]

In situ technologie, které využívají oxidačně-redukčních procesů, je možné rozdělit na dvě skupiny:

- in situ chemická oxidace (ISCO)
- in situ chemická redukce (ISCR)

Jako hlavní výhody se uvádějí rychlost snížení koncentrace kontaminantů, vznik neškodlivých látek a finanční i materiální úspora. [Matějů a kol., 2006]

2.5.1 In situ chemické oxidace

Tato metoda in situ je agresivní sanační technologií, která se používá prakticky pro všechny druhy znečištění jakýmkoli kontaminantem. Nejčastějšími z nich jsou chlorované uhlovodíky, ropné uhlovodíky, aromatické uhlovodíky, polyaromatické uhlovodíky a pesticidy. Při této metodě dochází k redukčním i oxidačním reakcím, které chemicky přeměňují nebezpečné sloučeniny na netoxické, či alespoň částečně odbourávají jejich toxicitu.

Při sanaci se využívá mnoho oxidačních činidel, které jsou razantní. Jsou to manganistan draselný, peroxid vodíku, peroxodisíran sodný. Můžeme k nim zařadit i ozon nebo železany. [Siegrist, 2000]

Oxidant se při sanaci zanášá přímo do zdrojové zóny, kde chemicky reaguje se škodlivými látkami a během procesu produkuje neškodné látky jako je voda, CO₂, atp. [Siegrist, 2000]

Velkou výhodou této metody, díky které v posledních letech dochází k nárůstu počtu jejích aplikací v ČR, je potencionální rychlost sanace. Při správném prozkoumání lokality, může sanační zásah trvat pouhých pár měsíců. Důležitým parametrem ale je správné určení spotřeby daného oxidačního činidla. Vzhledem k tomu, že se činidlo spotřebuje nejen při oxidaci daného kontaminantu, ale i při reakci s ostatními oxidovatelnými látkami ve sběrači/kolektoru, je potřebné a vhodné provést laboratorní testy (screeningové testy). Díky těmto testům se už v začátku aplikace dá říct, zda bude tato metoda vhodná či ne. Pokud vše vyhovuje, přistoupí se k pilotnímu testu na dané lokalitě. [Černík a kol., 2010]

Oxidační činidla jsou i přesto stále závadné látky, což znamená, že pro jejich aplikaci do podzemních vod je třeba získat výjimku od daného vodovodního úřadu. Pro obhájení použití právě těchto látek je potřeba závažných argumentů. Proto je tato oxidační metoda vhodná především pro biovzdorující organické polutanty, které nejdou jinými sanačními

metodami odstranit. Důležité je také to, aby vlastním produktem daného oxidačního činidla byly netoxické nezávadné látky. [Černík a kol., 2010]

2.5.2 In situ chemické a biologické redukce

Pro redukční zásahy se používá činidel, která snadno uvolňují do prostředí elektrony a jejichž stabilita leží na spodní hranici stability vody nebo pod ní. Pokud jsou v systému přítomny látky, které jsou schopny přijímat elektrony, pak jim je tato činidla vnutí.

Nejčastější redukční činidla jsou: dithioničitan sodný, siřičitan sodný, síran železnatý, elementární (kovové, nulmocné) železo v podobě špon i nanočástic aj. [Černík a kol., 2010]

Kromě toho se často využívají i organické zbytky z potravinářských výrob, například syrovátka, která obsahuje anion mléčné kyseliny. Ten se rozkládá za uvolnění elektronů až na CO₂. Reakce je obdobou obecného rozkladu organických látek působením kyslíku, což je opak fotosyntézy. [Černík a kol., 2010]

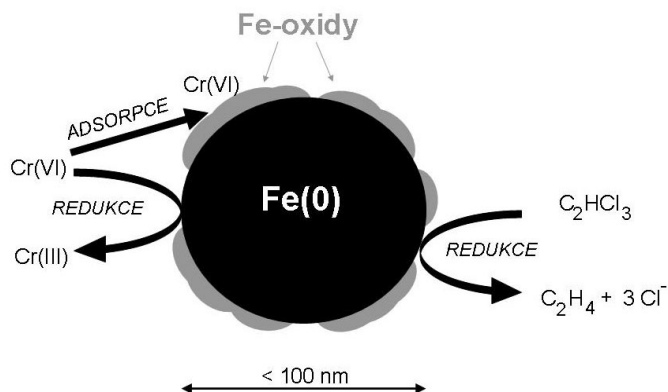
2.5.2.1 Využití nanoželeza

Použití nanoželeza je sanační metodou použitelnou pro široké spektrum kontaminantů, od jednoduchých kationtů a aniontů až po složité organické halogenované sloučeniny. Z anorganických látek jsou to především těžké kovy (chrom, arsen, uran). Další skupinou jsou redukovatelné anionty (fosforečnany, dusičnany, sírany). Největší uplatnění má však nanoželezo při dechloraci organických sloučenin (především chlorovaných ethenů, PCB a dalších halogenovaných sloučenin). [Zhang, 2003]

Nanoželezo je na lokalitách aplikováno do horninového prostředí ve formě vodné suspenze. Od aplikačních vrtů je pak nanoželezo transportováno prouděním podzemní vody. [Nosek, Černík, 2011]

Mechanismus abiotické redukce chlorovaných uhlovodíků pomocí železa popisuje reakce: $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} + \text{RX} \rightarrow \text{RH} + \text{Fe}^{2+} + \text{OH}^- + \text{X}^-$, kde R představuje uhlovodíkový zbytek a X halogen. Elementární železo Fe⁰ v této reakci vystupuje jako donor elektronů nutných k redukci kontaminantů a oxiduje se na ionty Fe²⁺. [Černík a kol., 2010]

Obecně se nanočástice skládají z jádra tvořeného elementárním železem a obalu tvořeného oxidy železa (viz obrázek 1). Povrch částic je zpravidla stabilizován vhodným povrchově aktivním činidlem. Na velikost, tvar a složení nanočástic má významný vliv především způsob jejich přípravy. [Li a kol., 2006]

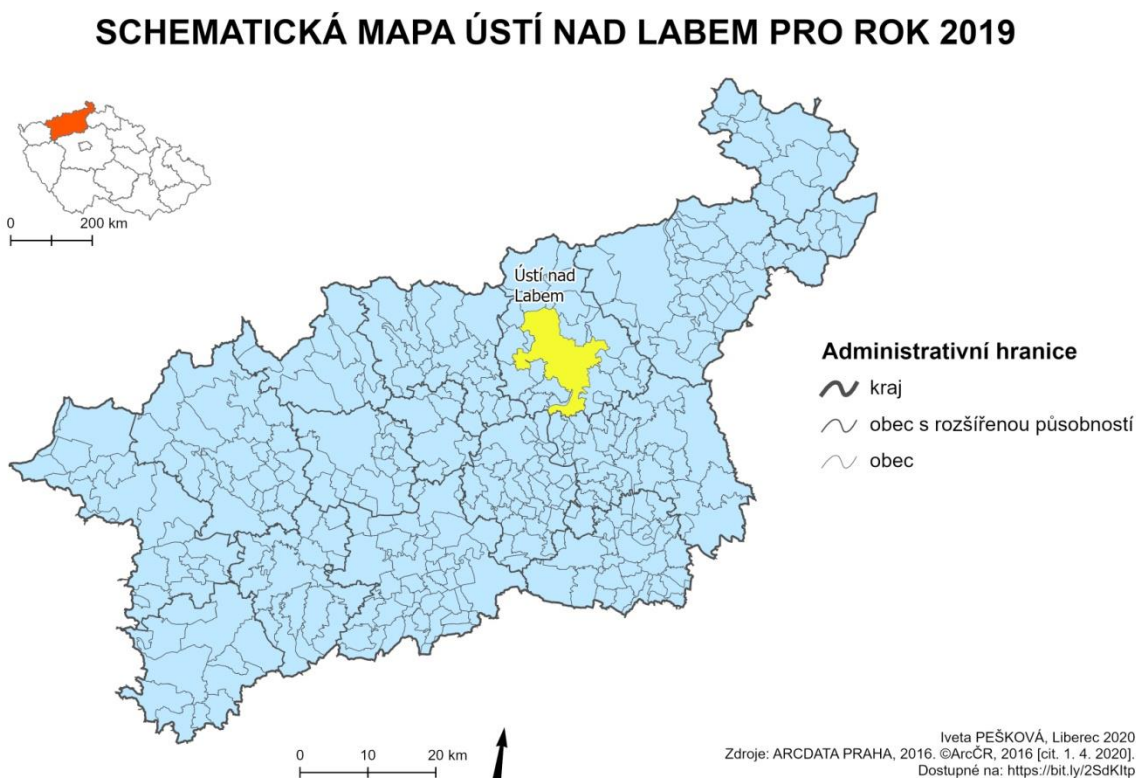


Obrázek 1: Složení nanočástice a její redukční schopnosti [Zdroj: Li a kol. 2006]

3 Fyzicko-geografická charakteristika zájmového území

3.1 Vymezení zájmového území

Zájmové území, které je v práci rozebíráno, se nachází v Ústeckém kraji na severozápadě Čech. Jedná se konkrétně o město Ústí nad Labem. To se nachází v severovýchodní části Ústeckého kraje v okrese Ústí nad Labem, jak je zobrazeno v následující mapě (obrázek 2). Tvoří centrum Ústeckého kraje a leží na soutoku řek Labe a Bíliny mezi Českým středohořím a Krušnými horami. [ČSÚ, 2012]



Obrázek 2: Schématická mapa zájmového území pro rok 2019

Ústí nad Labem má 92 952 obyvatel [ČSÚ, 2019] a rozlohu 9397 ha [RISY, 2019]. Vzhledem k poloze Ústeckého kraje blízko hranice se Spolkovou republikou Německo je také významným železničním, silničním a vodním uzlem. Ve městě Ústí nad Labem se nachází sídlo Chráněné krajinné oblasti (CHKO) České středohoří a několik přírodních rezervací. [ČSÚ, 2017]

Daná lokalita byla vybrána z důvodu možnosti zkoumání vzorků, které byly právě v této lokalitě odebírány. Konkrétně je původ vzorků z areálu Spolchemie, a.s. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005]

Areál Spolku pro chemickou a hutní výrobu, a.s. se nachází v jižní části města v údolí blízko soutoku Labe a Bíliny. Závod je rozložen na ploše 52 ha. Areál je přístupný zaměstnancům podniku, zaměstnancům firem se sídlem v areálu. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005]

Okolí podniku je zastavěno obytnou i průmyslovou zástavbou. Na severu od areálu je sklad chemikálií, starší bytová zástavba, zahrádkářská osada, učiliště a kampus Univerzity Jana Evangelisty Purkyně (UJEP). Jižně od Spolku je železniční nádraží Ústí nad Labem - západ a teče tam řeka Bílina. Východním směrem je situována starší neobydlená zástavba a nachází se zde centrum města. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005]

Katastrálně spadá závod do území města Ústí nad Labem. Většina ploch Spolchemie, a.s. je zastavena průmyslovou zástavbou, komunikacemi a železničními vlečkami. Převážnou plochu tedy zabírají technologické celky, budovy a zpevněné plochy. Místně se vyskytují plochy upravené zeleně, lokálně je zaznamenán výskyt ruderalní vegetace osídlující antropogenní substráty vzniklé průmyslovou činností. Pod zemí jsou uloženy inženýrské sítě, zejména vodovody, kanalizace a elektrické rozvody silno i slaboproudé. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005]

Ústí nad Labem je historicky velmi spjata s průmyslovou výrobou. I nyní ve městě funguje stále mnoho průmyslových výroben. Klíčovým odvětvím, které využilo polohy města, se stal chemický průmysl. Vznik první výroby je datován rokem 1808. Rok založení Spolchemie (původně "Rakouský spolek pro chemickou a hutní výrobu") v r. 1856 znamenal přelom v rozvoji chemie v Rakousku-Uhersku. Nejvýznamnějším podnikem potravinářského průmyslu se stala Setuza. Johann Schicht sem v roce 1882 přenesl výrobu mýdla a položil základ kombinátu na zpracování tuků. Svého času patřil podnik k největším svého druhu na světě. [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

Dlouholetou tradici má také energetika. V části města Na Skřivánku se dobývalo hnědé uhlí již od roku 1760. Roku 1840 bylo v Ústí v provozu 6 šachet. Městská elektrárna zahájila provoz roku 1899 (zrušena 1969). Po roce 1945 došlo postupně k otevírání lomů v severozápadní a v roce 1976 v západní části města. V důsledku rozvoje těžby bylo likvidováno mnoho obcí a osad (např. Tuchomyšl, Vyklice a Hrbovice). [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

Současný výrobní program ústeckých podniků je velmi bohatý a některé výrobky jsou specifické právě pro zdejší průmysl. Náleží mezi ně např. organické a anorganické chemikálie, barviva, syntetické pryskyřice ze Spolchemie. [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

Především z důvodu dlouholeté intenzivní chemické výroby se podzemní voda čistí právě v Ústí nad Labem. Vzhledem k minulosti, ale částečně i současnosti, je právě tato lokalita velkým zdrojem znečištění. [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

3.2 Geologické a geomorfologické poměry

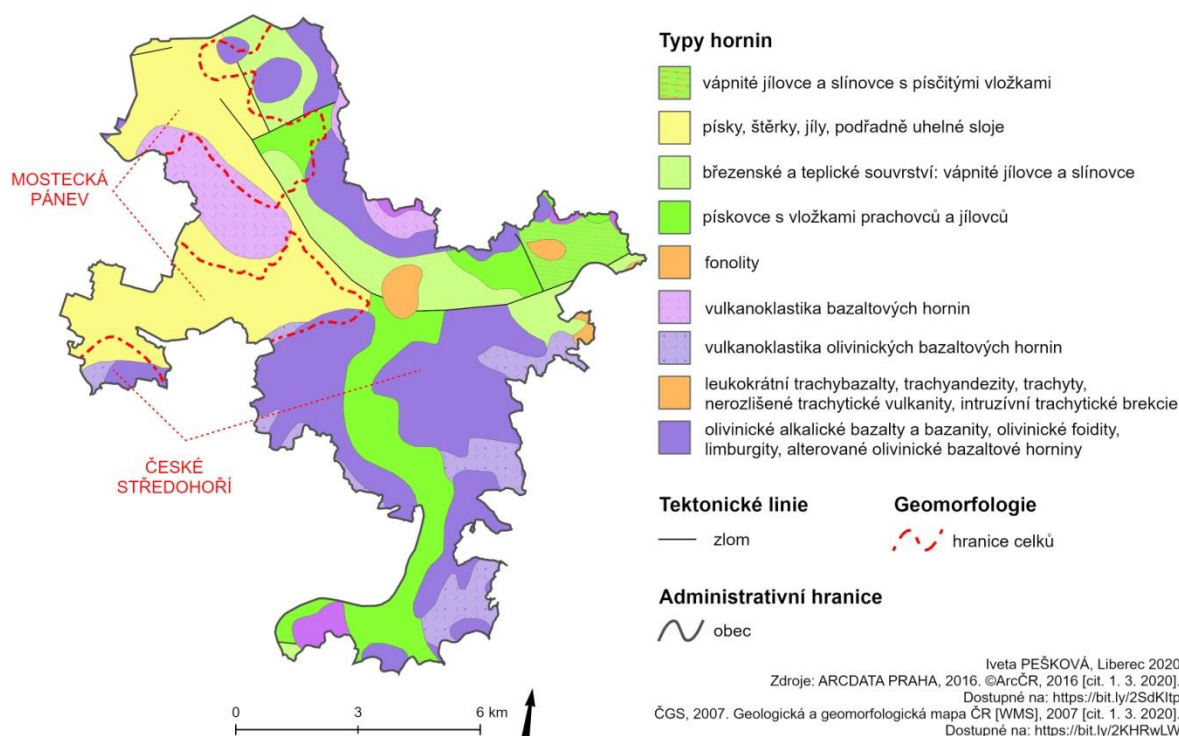
Ústí nad Labem leží z geomorfologického hlediska v systému Hercynském v subsystému Hercynské pohoří. Spadá do geomorfologické provincie Česká vysočina, která je zde zastoupena Krušnohorskou subprovincií, do geomorfologické oblasti Podkrušnohorské, celkem do Českého středohoří a Mostecké pánve (viz obrázek 3). [Brandos, 2009; AOPK ČR, 2019]

Reliéf terénu je z regionálního geomorfologického hlediska velmi členitý s morfologicky patrnými tělesy vulkanitů s mezihorskými kotlinami a četnými výrazně erozními údolími. Nadmořská výška Ústí nad Labem je 218m n. m. [Sedláček, 1999; AOPK ČR, 2019]

Konkrétně pak areál Spolchemie, a.s. leží v morfologicky patrném starém meandru řeky Bíliny, jehož nárazový břeh tvoří svahy Ovčího vrchu, situovaném severně od areálu. V severo-západní části je morfologie meandru ovlivněna soutokem s Klíšským potokem. Meandr je druhotně vyplněn různými svahovými sedimenty a starými sesuvy. [Sedláček, 1999; AOPK ČR, 2019]

Z geologické mapy je patrné (obrázek 3), že je Ústí nad Labem podloženo z většiny olivinickými alkalickými bazalty a bazanity, olivinickými foidity a alterovanými olivnickými bazaltovými horninami a to jsou různé typy čedičů. Velké zastoupení mají také písky, štěrky, jíly a podřadné uhelné sloje nacházející se převážně na severu Ústí nad Labem. Z velké většiny jsou také zastoupeny vápnité jílovce, slínovce a pískovce s vložkami prachovců a slínovců. Ty jsou především na jihu území. Z geologického hlediska spadá zájmové území do podkrušnohorské terciární pánve, na jejíž hranici zasahují sedimenty České křídové pánve a vulkanické terciární horniny. [Kvapil a kol. 2012; AOPK ČR, 2019]

GEOLOGIE A GEOMORFOLOGIE ÚSTÍ NAD LABEM 2019



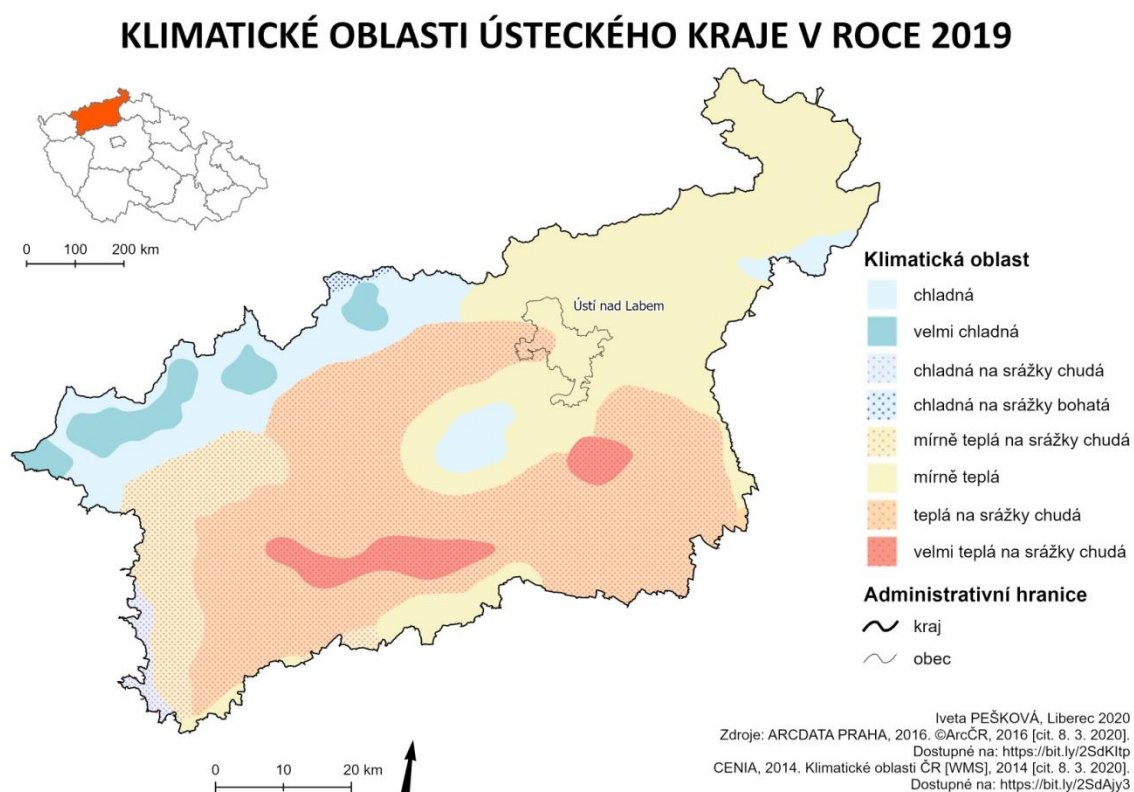
Obrázek 3: Geologické a geomorfologické poměry v Ústí nad Labem v roce 2019

Konkrétně pak podloží Spolchemie je terciárního a křídového stáří. Jihovýchodní část areálu tvoří křídové pískovce, zatímco střed a severní část závodu je reprezentována terciárními sedimenty mosteckého souvrství, tvořeného především šedými vápnitými jílovcí. V nadloží těchto jílovců se vyskytuje vrstva vulkanosedimentární horniny reprezentovaná různobarevnými jíly a rozloženými vulkanity. V severní části lze najít též eolické sedimenty, tvořené odvápněnými sprašovými hlínami. [Kvapil a kol., 2012; AOPK ČR, 2019]

Vhledem k poloze areálu Spolchemie a jeho blízkosti k meandru řeky Bíliny je i přes zabudované sanační bariéry, tzv. podzemní těsnící stěny, vlivem charakteristiky podloží areálu možný únik znečištění mimo průmyslový areál.

3.3 Klimatické podmínky

Území Ústí nad Labem se nachází v mírně teplé oblasti a částečně také patří do oblasti teplé ale na srážky chudé, jak zobrazuje následující mapa (obrázek 4). V oblasti je převážně mírná zima s průměrnou roční teplotou vzduchu 8,4 °C a průměrnými ročními úhrny srážek od 584mm. Nejdeštivějším měsícem je červenec. Ten je také měsícem nejteplejším s průměrnou teplotou 18,8°C. Teplota v nejchladnějším měsíci lednu se pohybuje v rozmezí 1°C - 2°C. [ČSÚ, 2012; AOPK ČR, 2020]

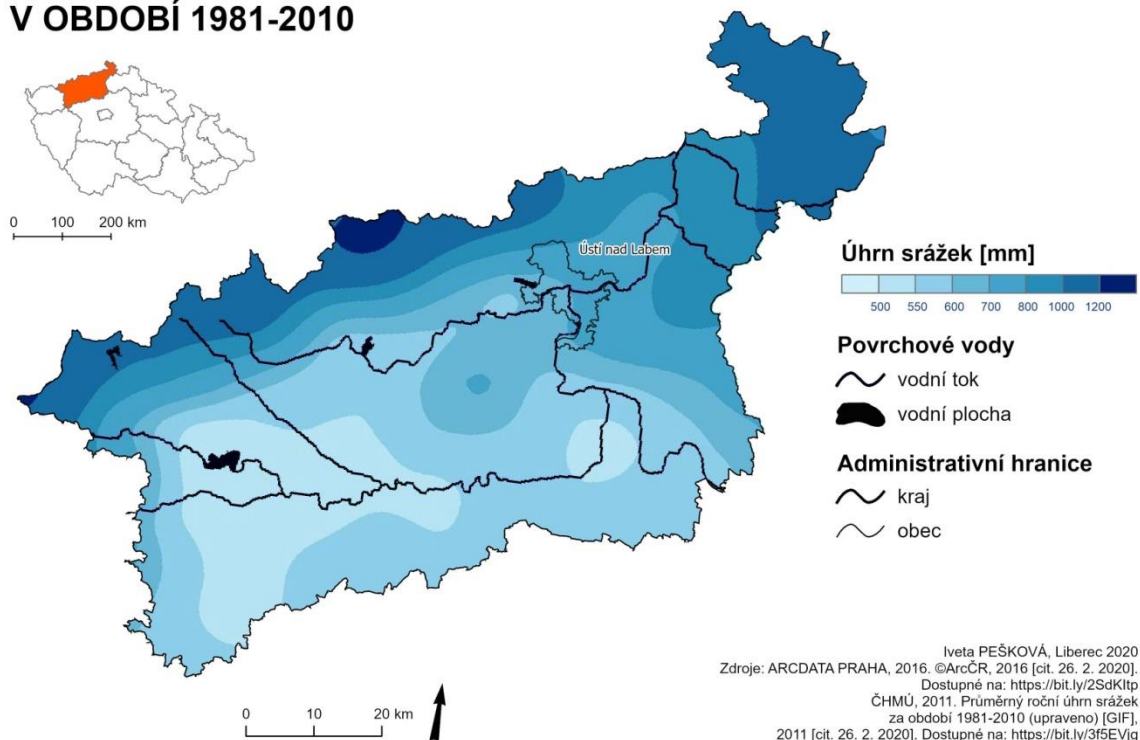


Obrázek 4: Klimatické podmínky v Ústeckém kraji v roce 2019

Atmosférické srážky mají významný vliv na koncentraci a následnou migraci kontaminantů v půdě. Vlivem srážek je kontaminant z povrchu vsakován do půdy a tím vymýván na hladinu podzemní vody, jak je patrné z následující mapy (viz obrázek 5).

Dotace kolektoru na území závodu infiltrací srážek je ale vzhledem k zakrytí povrchu a relativní nepropustnosti nadloží terasových sedimentů značně omezena. K dotaci také zřejmě dochází na okraji areálu, případně při vyšších stavech ve vodotečích i zpětným prouděním. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005]

PRŮMĚRNÝ ROČNÍ ÚHRN SRÁŽEK V ÚSTECKÉM KRAJI V OBDOBÍ 1981-2010

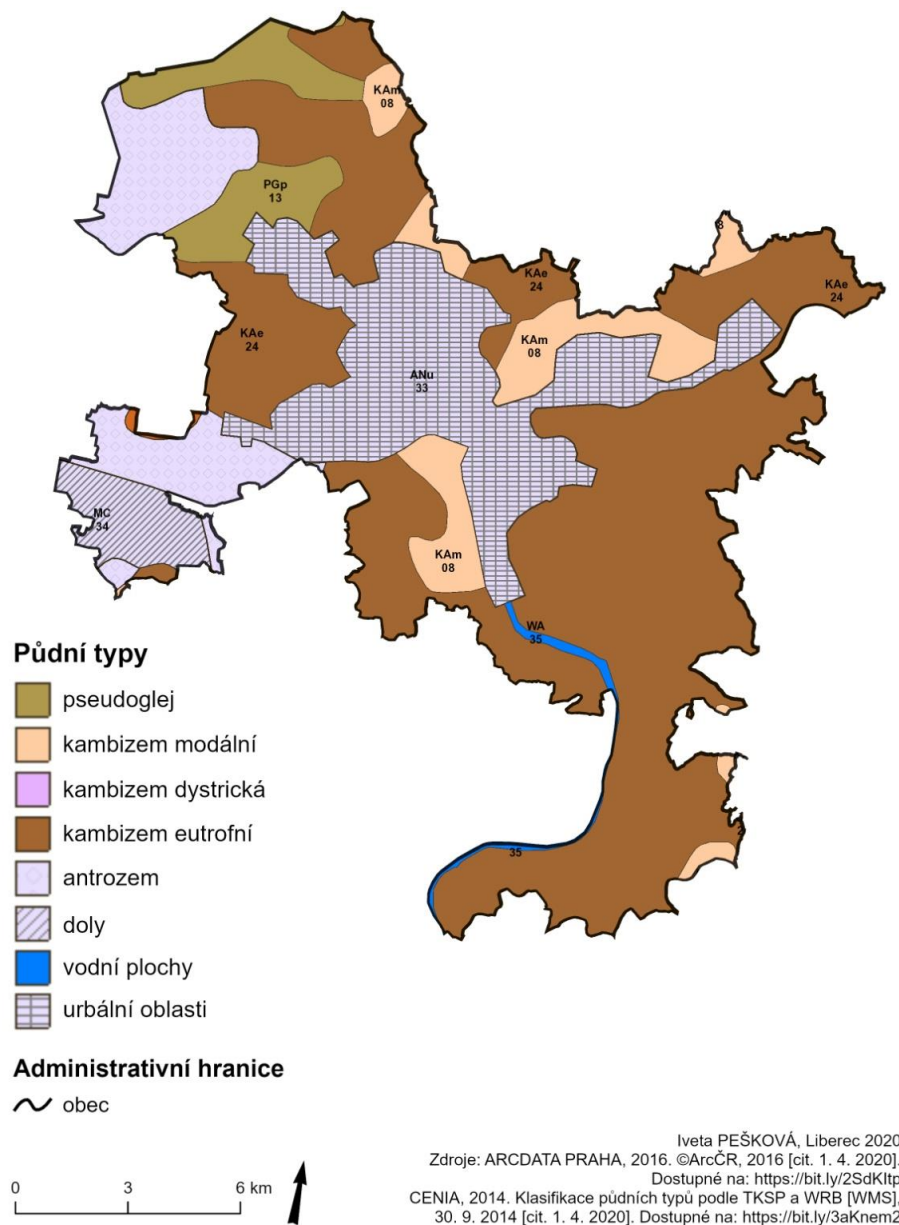


Obrázek 5: Průměrný roční úhrn srážek v Ústeckém kraji v období 1981-2010

3.4 Pedologické poměry

Mapa půdních typů znázorňuje (obrázek 6), že v oblasti Ústí nad Labem se nejvíce nacházejí kambizemě (hnědé půdy). Konkrétně kambizemě eutrofní, které jsou typické pro České středohoří. V menším zastoupení jsou pak kambizemě modální. Na severu pseudogleje, které jsou typické pro Verneřické středohoří nacházející se v tomto místě, a antrozemě. Na západě Ústí nad Labem se nacházejí uhelné doly. [AOPK ČR, 2020]

PŮDNÍ TYPY V ÚSTÍ NAD LABEM V ROCE 2019



Obrázek 6: Pedologické poměry v Ústí nad Labem v roce 2019

Z historického hlediska má těžba v Ústí velkou tradici. Hnědé uhlí se začalo dobývat již v roce 1760, kdy vzniklo několik šachet. Po roce 1945 se otevřelo mnoho dalších lomů přímo ve městě. Kvůli těžbě zaniklo i mnoho dřívějších obcí. [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

Vzhledem k faktu, že kambizemě, nacházející se ve většině zkoumaného území, jsou většinou bezuhlíkaté a skeletovitá. Zrnitost a fyzikálně chemické vlastnosti kambizemě jsou velmi rozmanité, avšak jejich kyprost usnadňuje větší vymývání. [TAXONOMICKÝ KLASIFIKAČNÍ SYSTÉM PŮD ČR, 2020]

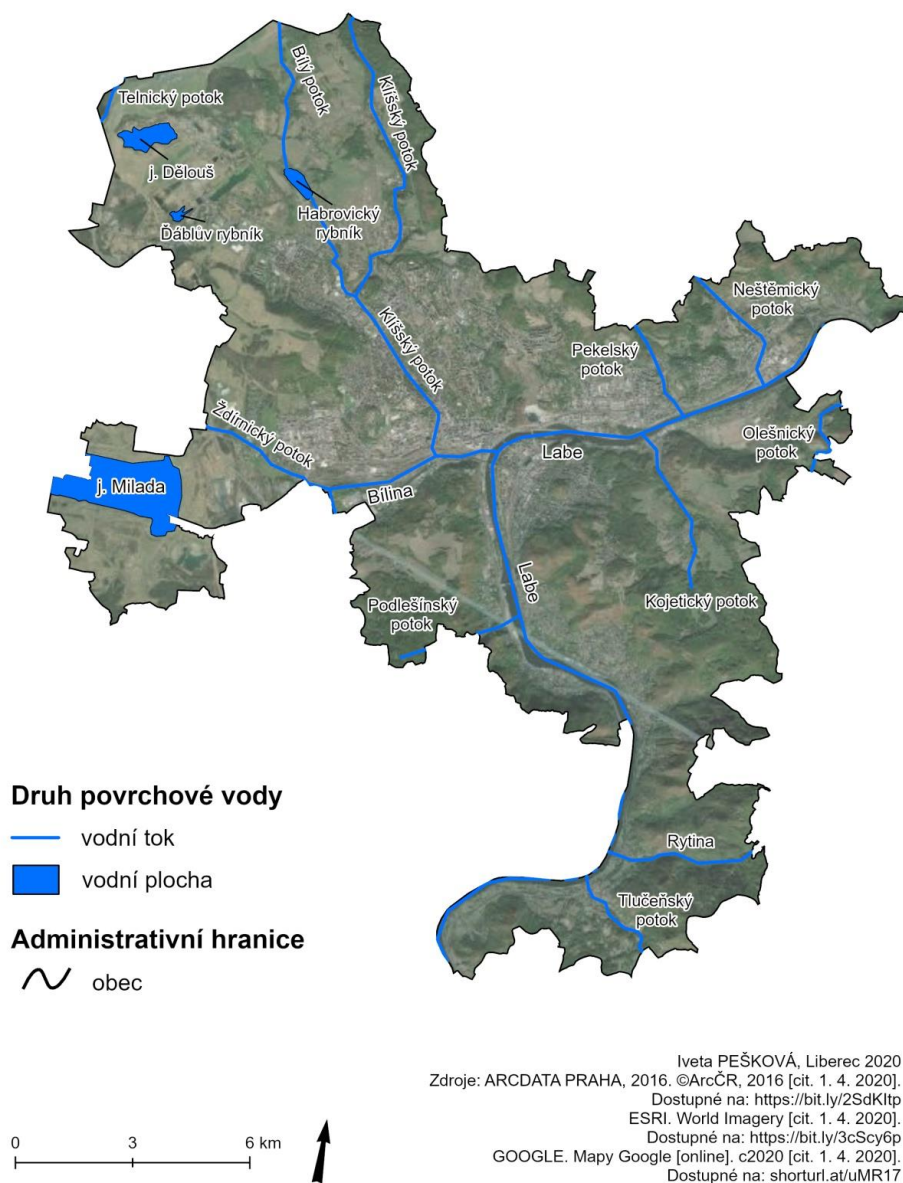
Díky těmto vlastnostem a tím, že propustnost na území areálu Spolchemie je střední až vyšší, může být snadnější a rychlejší vymývání kontaminantů do půdy a na hladinu podzemní vody. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005]

3.5 Hydrogeologické a hydrologické poměry

Dle mapy povrchových vod (obrázek 7), je páteří vodních toků na Ústecku řeka Labe. Na Ústecku je Labe přehrazeno zdymadly pod hradem Střekovem a po celé délce jeho toku jsou jeho břehy technicky upravované. V Ústí nad Labem se pod Větruší do Labe vlévá Bílina. Ta je největším přítokem Labe na Ústecku a vyhloubila zde údolí mezi Českým středohořím a Krušnými horami. [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

Z hlediska hydrologického náleží území do povodí Bíliny, která je levostranným přítokem Labe. Podle Hazrdové [1980] je plocha povodí Labe měřeno k profilu v hydrologické stanici Ústí nad Labem 48556,93 km².

POVRCHOVÉ VODY V ÚSTÍ NAD LABEM V ROCE 2019



Obrázek 7: Hydrologické a hydrogeologické poměry v Ústí nad Labem v roce 2019

Nejvýznamnější sběrné místo, tj. kolektor podzemní vody na lokalitě ve Spolku se vytváří v kvartérních štěrcích a pískách terasových náplavů řeky Bíliny a Klíšského potoka. Podzemní voda je v těchto náplavech v přímém vzájemném kontaktu s vodou v povrchových vodních tocích. Propustnost je střední až vyšší. Směr proudění podzemní vody je k jihu až jihovýchodu. Přirozené proudění podzemní vody je výrazně ovlivněno základy budov, kanalizacemi, starými šachtami apod. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005; FETTER, 2008]

Podzemní voda je skrytými výrony drenovaná do řeky Bíliny i do Klíšského potoka. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005; FETTER, 2008]

Zájmové území není součástí žádné oblasti se zvláštním režimem ochrany vod, tj. chráněných oblastí přirozené akumulace vod (CHOPAV) nebo ochranných pásem vodních zdrojů ve smyslu vodního zákona č. 245/2001 Sb. [Sedláček, 1999; Lederer, Kvapil, Sedláček a kol., 2005; FETTER, 2008]

3.6 Kvalita povrchových a podzemních vod v zájmovém území

Kontaminace chlorovanými uhlovodíky pokrývá prakticky celé území areálu. Na tomto znečištění má nejvýraznější podíl pravděpodobně výroba a používání barviv v závodě. V minulosti totiž sloužila kontaminovaná oblast jako sklad sulfidů (pyrity, chalkopyrity, atd.). [Sedláček, 1999]

Povrchová voda v lokalitě Spolchemie je nejvíce kontaminovaná kvůli únikům kontaminantů zejména z odpadních vod. Při vyústění Klíšského potoka do Bíliny a místo přibližně 200m před soutokem s Labem byly indikovány zvýšené koncentrace především chlorovaných a aromatických uhlovodíků, rtuti, naftalenu, pesticidů, iontů sodíku, draslíku, železa a fluoridů. [Sedláček, 1999]

Rizika byla vyhodnocena na základě zjištěného stavu kontaminace nenasurované zóny, podzemní a povrchové vody. [Sedláček, 1999]

Vlivem technologických, manipulačních, příp. havarijních úkapů z technologických zařízení, netěsností rozvodů, zásobníků surovin a produktů dochází k dlouhodobé kontaminaci nenasurované zóny. Působením atmosférických srážek dochází k vymývání kontaminantů na hladinu podzemní vody a následné migraci kontaminačního mraku do okolí. Kontaminace se také díky srážkám dostává do půdy a ovlivňuje tak koncentraci a složení kontaminantů v půdě. Na lokalitě Spolchemie bylo popsáno větší množství zdrojů kontaminace zemin a podzemní vody. Vzájemným působením uniklých škodlivin z několika zdrojů může naopak dojít ke zvýšení koncentrace kontaminantů. [Sedláček, 1999]

3.7 Ochrana životního prostředí a jeho současný stav

V okrese Ústí nad Labem se nachází celkem šest chráněných území. Jedná se o CHKO České středohoří, dvě přírodní památky Divoká rokle a Loupežnická jeskyně. Dále se v této oblasti nacházejí dvě přírodní rezervace Kozí vrch a Sluneční stráně a národní přírodní památka Vrkoč. [AOPK ČR, 2019]

Areál Spolchemie se rozprostírá cca 500m severním směrem od údolí řeky Bíliny, kterou vede hranice CHKO České středohoří a východním směrem od lokality sběru

se nachází přírodní zajímavost Mariánská skála. Lokalita sběru a aplikace se ale nenachází v žádném zvláště chráněném území přírody ve smyslu zákona ČNR č. 114/92 Sb. o ochraně přírody a krajiny. Dále nezasahuje do oblasti zdrojů pitné vody ani do jejich ochranných pásem. Na lokalitě se nenacházejí vodní zdroje využívané k hromadnému či individuálnímu zásobování obyvatelstva pitnou vodou. [Sedláček, 1999]

4 Materiál a metody

Praktická část bakalářské práce se zabývá zpracování mapových výstupů a provedení - laboratorních testů. Tato kapitola se věnuje zdrojům dat a metodickým postupům, které byly při této části práce využívány.

4.1 Zdroje dat

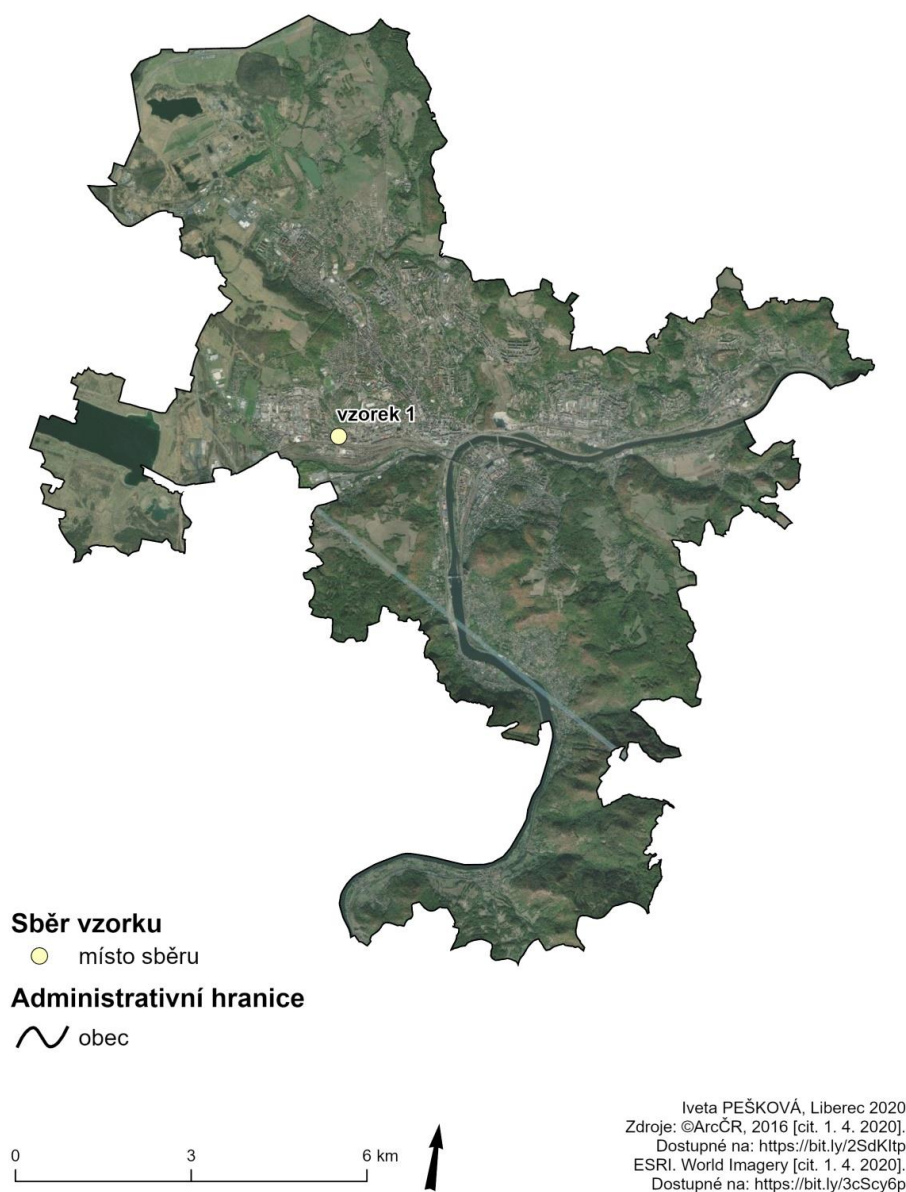
4.1.1 Mapová data a podklady

Bakalářská práce obsahuje sedm vlastních mapových výstupů. Každá mapa má vlastní komentář, ale i dohledané informace, které popisují charakteristiku zájmového území hned v několika parametrech. V práci je tedy popsáno a zobrazeno celkové zkoumané území pomocí schématické mapy, popsány jsou jeho geologické a geomorfologické poměry, které jsou zobrazeny také v mapě. Dále jsou v pedologické mapě zobrazeny půdní typy v daném území, klimatické podmínky v mapě klimatu. Zobrazena a okomentována je také povrchová voda v zájmovém území a úhrn srážek za určité období. Pomocí další schématické mapy je zobrazena lokalizace sběru vzorku podzemní vody (viz obrázek 8).

Při tvorbě map byla jako topografický podklad použita ortofotomapa od poskytovatele ČÚŽK a datová vrstva hranic od firmy ARCDATA PRAHA.

Data pro tématický obsah map byly čerpány z několika zdrojů. Pro mapu geologických a geomorfologických poměrů byla použita mapa v měřítku 1 : 500 000 od České geologické služby, poskytována jako WMS služba. Datovou vrstvu s klimatickými oblastmi ČR pro mapu klimatu poskytla CENIA, také jako WMS službu. Pro mapu s průměrným ročním úhrnem srážek byla využita datová vrstva od Českého hydrometeorologického ústavu. Datová vrstva od CENIA byla využita k vyobrazení a klasifikaci půdních typů podle TKSP, poskytována jako WMS služba. Mapu povrchových vod zobrazuje datová vrstva od firmy ARCDATA PRAHA. Pro mapu lokalizace odběrového místa byly použity data z mapy.cz, jakožto souřadnice daného místa.

LOKALIZACE ODBĚROVÉHO MÍSTA V RÁMCI ÚSTÍ NAD LABEM V ROCE 2019



Obrázek 8: Lokalizace odběrového místa v rámci Ústí nad Labem v roce 2019

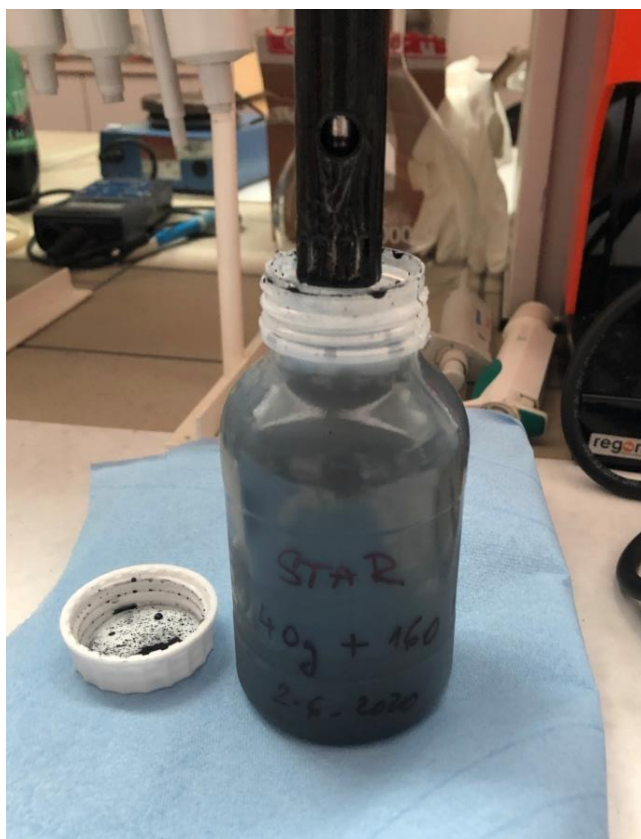
4.1.2 Data potřebná pro laboratorní testy

Praktická část bakalářské práce se kromě mapových výstupů věnuje laboratornímu ověření funkčnosti sanačního činidla pro čištění podzemí vody kontaminované chlorovanými uhlovodíky. Laboratorní testy se konkrétně zabývaly ověřením účinnosti metody in situ chemické redukce chlorovaných uhlovodíků (CIU) za pomoci nanoželeza. Bakalářská práce obsahuje výsledky laboratorních testů, prováděných v laboratořích Technické univerzity v Liberci pod záštitou Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace.

K provedení laboratorních testů bylo použito nanoželezo jako sanační činidlo, podzemní voda kontaminovaná chlorovanými uhlovodíky, laboratorní aparatury (reaktorů) a přístrojů pro analýzy a měření parametrů. Veškerý potřebný materiál k provedení testů pro danou práci byl tedy poskytnut TUL.

Druh nanoželeza, který byl použit, se nazývá NANOFER STAR od české firmy NANO IRON, s.r.o. (viz obrázek 9). Podzemní voda, pro testy potřebná, byla získána a dovezena ze Spolchemie v Ústí nad Labem (zájmové lokality), se kterou Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, dlouhodobě spolupracuje v rámci různých sanačních projektů. Výsledky, naměřených hodnot daných testů, poskytnuty TUL byly poté mnou zpracovány do tabulek a grafů. Veškerý fotografický materiál jsem zpracovávala a vytvořila sama.

Testy byly celkově prováděny za pomoci odborníků a pracovníků Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace.



Obrázek 9: Suspenze nanoželeza NANOFER STAR [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

4.2 Metodické postupy

4.2.1 Mapová tvorba

Při tvorbě map do bakalářské práce bylo využito programu ESRI ArcMap verze 10.5.1. Souřadnicový systém, který byl použit, je systém jednotné trigonometrické sítě katastrální neboli takzvané Křovákovo zobrazení. Do map pak byly přidány základní kompoziční prvky jako mapové pole, měřítko, tiráž, název a legenda. Z nadstavbových prvků bylo u map, schématická mapa Ústí nad Labem, klimatická mapa a mapa průměrného ročního úhrnu srážek za dané období, použito dvou nadstavbových prvků a to doplňkové mapy a severky. V ostatních mapách byla z nadstavbových použita pouze severka.

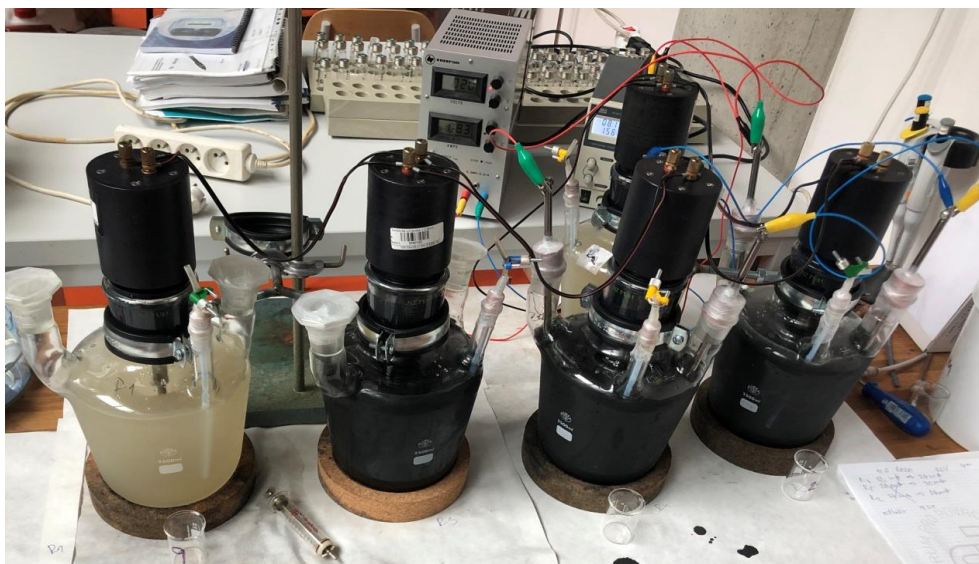
Ke každé mapě byl poté připsán komentář, který mapu a to co zobrazuje, popisuje. V komentářích jsou místy použity informace z internetových zdrojů, či literatury, aby text nabral plnohodnotnosti a obsahoval kompletní informace k danému tématu, nejen popis a charakteristiku mapy.

4.2.2 Laboratorní analýza

Reaktorové testy jsou navrženy pro sledování rychlosti odbourávání kontaminantů a jsou navrženy jako uzavřený míchaný systém s kontaminovanou vodou a sanačním činidlem. Testy jsou prováděny ve skleněných nádobách, které jsou opatřeny vstupem se zábrusem. Do reaktorů jsou zavedena mechanická míchadla. Nejmenší otvor reaktorů je určen pro odebírání vodných vzorků. Systém je utěsněn a samotné vzorkování je prováděno bez přístupu vzduchu do systému. Ke každé sadě reaktorových testů je připraven také kontrolní (slepý) reaktor bez činidla a pomocí něhož je sledována případná netěsnost systému.

Do vzorkovacího portu je zavedena teflonová hadička, kterou jsou odebírány vodné vzorky pomocí skleněné stříkačky. Nejprve je odebráno určité množství vzorku pro analýzu CIU na plynovém chromatografu s hmotnostní spektrofotometrií (GC/MS). Poté jsou změřeny fyzikálně-chemické parametry (pH, oxidačně-redukční potenciál – ORP).

Četnost odběrů je závislá na použitém činidle a době trvání testu. Obecně je vzorkování prováděno na začátku testů častěji, v průběhu jsou pak intervaly prodlužovány (viz obrázek 10).



Obrázek 10: Reálné uspořádání reaktorového testu [Zdroj: Vlastní foto, 10. 6. 2020]

Experiment slouží pro demonstraci procesu dechlorace vody kontaminované chlorovanými ethyleny pomocí nanoželeza.

Práce v laboratoři probíhala za přítomnosti a vedení pracovníka z TUL. Nejprve musela být sestavena laboratorní aparatura (laboratorní reaktory) a bylo připraveno vše pro testy potřebné (viz obrázek 11, 12 a 13).



Obrázek 11: Sestavené reaktory [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

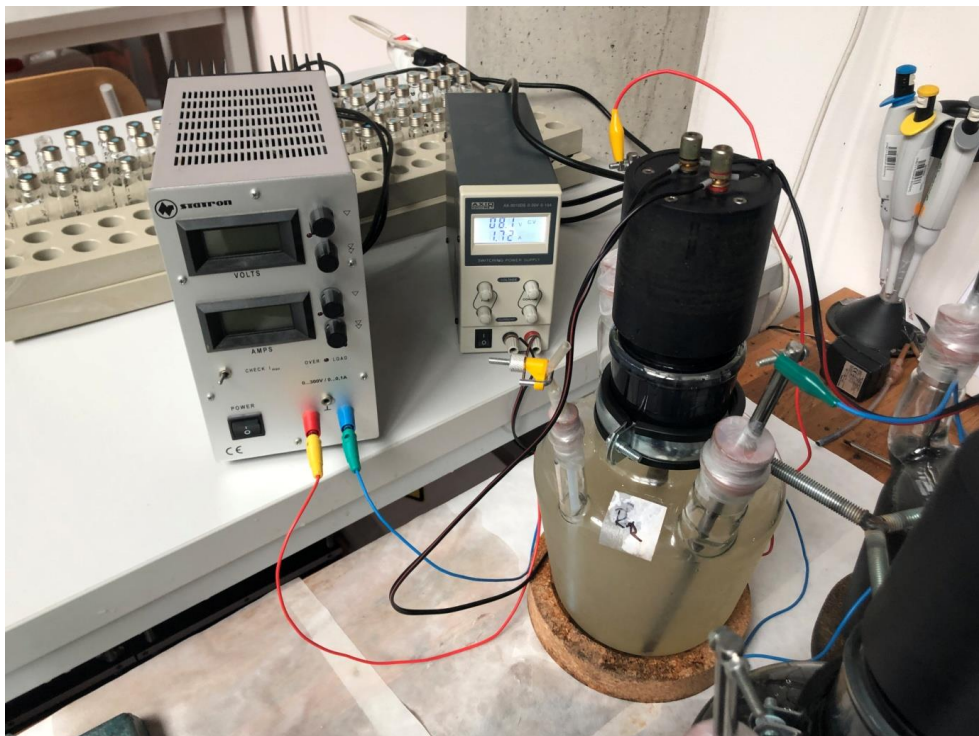


Obrázek 12: Připravené vialky a směs s nanoželezem. [Zdroj: vlastní foto, 10.6.2020]



Obrázek 13: Uzávěry na reaktory s míchadlem potřány těsnící mastí [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

Reaktorů bylo celkem pět, ovšem pro účely této práce byly důležité pouze dva. Průběh testu v ostatních reaktorech, které využívaly ještě přívodu elektřiny, nebyly předmětem mé práce a jejich výsledky si TUL dále zpracovala pro vlastní potřebu (viz obrázek 14).¹



Obrázek 14: Reaktor s připojením elektřiny [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

¹ Elektřina je při degradaci CIU používána jako náhrada za větší množství nanoželeza a přispívá k ekonomickému zefektivnění sanační metody. Podpora elektrickým proudem prodlužuje životnost nanoželeza, protože zpomaluje jeho oxidaci. Tento patent byl vymyslen, a poté i uznán, přímo na TUL, v Ústavu pro nanomateriály, moderní technologie a inovace.

Pro účely bakalářské práce byly využity pouze dva reaktory R1 a R3. Reaktor R1 se využívá jako slepý vzorek, aby bylo vždy u každého odběru známo prvotních vlastností, které voda měla a pro kontrolu svévolného úbytku koncentrace CIU z reaktorů, jelikož chlorované uhlovodíky jsou vysoce těkavé (viz obrázek 15).



Obrázek 15: Slepý reaktor R1 [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

Po celkové přípravě reaktorů, směsí do nich potřebných a vialek pro odběr vodných vzorků na počáteční analýzy, byla do reaktorů nalita podzemní voda sebraná z lokality ve Spolchemii (viz obrázek 16).



Obrázek 16: Nalévání podzemní vody do reaktorů [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

První reaktor byl ponechán bez přidání činidla (již zmíněný slepý), do druhého byla přidána již připravená směs nanoželeza a vody. Použitá koncentrace nanoželeza v reaktoru byla 5g/l (viz obrázek 17).



Obrázek 17: Přidávání směsi s nanoželezem do reaktoru R3 pomocí pipety [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

NANOFER STAR jsou na vzduchu stabilní nanočástice, které se před samotnou aplikací musejí ve vodě tzv. aktivovat 1-2 dny, jelikož jsou pokryty slabou vrstvou oxidů. Při takovéto aktivaci dochází k postupnému rozrušování slupky a odrývání reaktivního povrchu. Nanoželezné částice jsou tedy smíchány s vodou v poměru 1:4. Tato směs musí být při přípravě důkladně rozmíchávána, aby se netvořily velké shluky částic a aby se neusazovaly na dně nádoby a poté nanoželezo i správně reagovalo. Stejně tak je důležité kontinuální míchání reaktorových nádob v průběhu testu. Proto, když byly dané dva reaktory naplněny, a v jednom byla přidána směs s nanoželezem, bylo zapnuto míchání (viz obrázky 18 a 19).



Obrázek 18: Míchání směsi nanoželeza [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]



Obrázek 19: Naplněné reaktory se zapnutým mícháním [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

Celé testy trvaly cca dvanáct dní. Na počátku se odebíralo intenzivněji, po počátečním odběru byl druhý odběr proveden již po 4 hodinách trvání testu. Dále se pak odebíralo po dvacetitřech hodinách, dvacetiosmi hodinách, po dvou, pěti, osmi a dvanácti dnech. Pro analýzu složení a změření koncentrací CIU byly vzorky odebírány do 10ml vialek.² Vialky musí být ihned po odpipetování co nejrychleji uzavřeny, aby se zabránilo možnému vytékání látek ze vzorku. Do první vialky byla nalita jen odstátá voda. Tento vzorek slouží opět jako tzv. blanc pro kontrolu čistosti prostředí laboratoře. Jelikož jsou CIU vysoce těkavé a v laboratoři se pracuje i s jinými chemikáliemi. Vzorky se odebírají duplicitně, aby byl výsledek co nej přesnější a aby byla možná dvojitá kontrola průběhu testu (viz obrázek 20, 21, 22 a 23).



Obrázek 20: Odstátá voda a připravené vialky pro odběr na analýzu na GC/MS [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

² Odebrané vzorky vody se dávají na analýzu složení a měření koncentrací v daném vzorku. Analytické stanovení CIU ve vodných vzorcích bylo prováděno na plynovém chromatografu Varian CP 3800 s hmotnostním detektorem Saturn 2200 (GC/MS).



Obrázek 21: Pipetování blanc vzorku [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

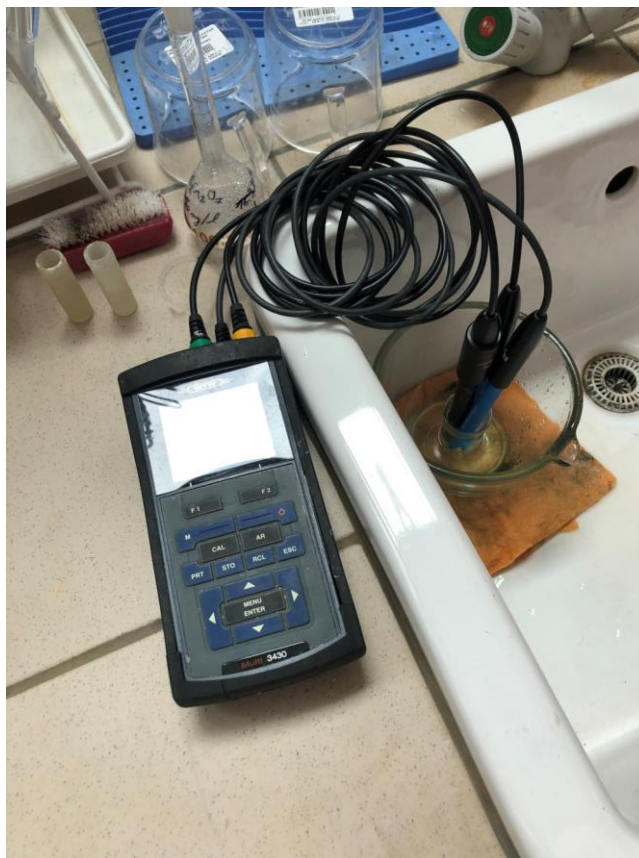


Obrázek 22: Blanc a vialky před pipetováním vzorku z reaktorů [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]



Obrázek 23: Odběr prvotních vzorků z reaktorů R1 a R3 [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

Po odebrání vodných vzorků do vialek se z daných reaktorů R1 a R3 ještě odebírá do malé kádinky, pro měření fyzikálně-chemických parametrů, kyselosti prostředí (pH) a oxidačně – redukčního potenciálu (ORP) pomocí měřicího přístroje WTW 343i (viz obrázky 24 a 25).



Obrázek 24: Odebraný vzorek z R1 v kádince, při měření pH, ORP [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]



Obrázek 25: První odebrané vzorky ve vialkách [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]

5 Výsledky

V následující kapitole jsou zobrazeny výsledky provedených laboratorních testů. V tabulkách je zobrazeno zastoupení jednotlivých chlorovaných uhlovodíků přítomných ve vzorku a jejich koncentrace na počátku a v celém průběhu testu a dále fyzikálně – chemické parametry k jednotlivým odběrovým časům. V následujících grafech jsou pak tyto hodnoty vyneseny a znázorňují pokles koncentrací CIU v čase, jak ve slepém reaktoru bez činidla, tak v reaktoru s nanoželezem. V závěru této kapitoly jsou shrnuty i výsledky z geografické části.

5.1 Grafy a výsledky analýz

Tabulka 1 zobrazuje zastoupení a koncentrace jednotlivých chlorovaných uhlovodíků v průběhu testu v reaktoru R1 bez přidaného činidla. Z počátečních hodnot je patrné, že v testované vodě, byly zastoupeny ve vysokých koncentracích pouze tetrachlorethylen (PCE) a trichlorethylen (TCE). Naměřené hodnoty ukazují, že i ve slepém reaktoru klesly koncentrace PCE z 2820 $\mu\text{g/l}$ na 906 $\mu\text{g/l}$ a koncentrace TCE z 4468 $\mu\text{g/l}$ na 2534 $\mu\text{g/l}$. Důvodem je fakt, že především PCE je vysoce těkavá látka a v laboratorním prostředí již při samotném odběru nebo vlivem netěsnosti systému reaktorů může dojít i k samovolnému úniku.

Tabulka 1: Pokles koncentrací CIU v čase ve slepém reaktoru R1 [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, zpracování vlastní]

| datum odběru vzorku | čas (d) | 1,1-DCE | cis-1,2-DCE | PCE | TCE | trans-1,2,-DCE | VC | suma |
|---------------------|---------|---------|-------------|------|------|----------------|----|------|
| 10.6.2020 9:30 | 0,0 | 0 | 0 | 2820 | 4468 | 0 | 0 | 7288 |
| 10.6.2020 13:30 | 0,2 | 0 | 0 | 1511 | 2786 | 0 | 0 | 4296 |
| 11.6.2020 8:00 | 0,9 | 0 | 4 | 1576 | 3389 | 0 | 0 | 4969 |
| 11.6.2020 13:30 | 1,2 | 2 | 7 | 1436 | 3228 | 0 | 0 | 4673 |
| 12.6.2020 10:30 | 2,0 | 2 | 7 | 1285 | 3032 | 0 | 0 | 4327 |
| 15.6.2020 10:00 | 5,0 | 0 | 12 | 1132 | 3038 | 0 | 5 | 4186 |
| 18.6.2020 10:00 | 8,0 | 3 | 14 | 951 | 2570 | 0 | 5 | 3543 |
| 22.6.2020 12:30 | 12,1 | 0 | 16 | 906 | 2534 | 0 | 5 | 3462 |

Naměřené hodnoty fyzikálně – chemických parametrů se ve slepém reaktoru R1 v průběhu testu nijak výrazně nemění. Hodnoty oxidačně redukčního potenciálu jsou až na pár odchylek způsobených chybou měření v rozmezí oxidačního prostředí (viz tabulka 2).

Tabulka 2: Vývoj fyzikálně – chemických parametrů ve slepém reaktoru R1 [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, zpracování vlastní]

| datum odběru vzorku | čas (d) | pH | ORP |
|---------------------|---------|------|------|
| 10.6.2020 9:30 | 0,0 | 7,58 | 233 |
| 10.6.2020 13:30 | 0,2 | 7,66 | 108 |
| 11.6.2020 8:00 | 0,9 | 7,58 | 40 |
| 11.6.2020 13:30 | 1,2 | 7,47 | -68 |
| 12.6.2020 10:30 | 2,0 | 7,54 | 69 |
| 15.6.2020 10:00 | 5,0 | 7,54 | 82 |
| 18.6.2020 10:00 | 8,0 | 7,56 | -240 |
| 22.6.2020 12:30 | 12,1 | 7,70 | 231 |

Tabulka 3 zobrazuje zastoupení a koncentrace jednotlivých chlorovaných uhlovodíků v průběhu testu v reaktoru R3 s přidanou suspenzí nanoželeza. Jelikož do všech reaktorů byla nalita stejná podzemní voda, je z počátečních hodnot patrné, že v testované vodě, byly zastoupeny ve vysokých koncentracích pouze tetrachlorethylen (PCE) a trichlorethylen (TCE). Naměřené hodnoty ukazují, že v reaktoru R3 klesly koncentrace PCE z 2614 $\mu\text{g/l}$ až na 509 $\mu\text{g/l}$ a koncentrace TCE z 4198 $\mu\text{g/l}$ až na 214 $\mu\text{g/l}$. Výrazné poklesy koncentrací poukazují na průběh dehalogenace CIU pomocí nanoželeza. Nanoželezo je zde redukčním činidlem, redukuje CIU a samo se při reakci oxiduje.

Tabulka 3: Pokles koncentrací CIU v čase v reaktoru R3 [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, zpracování vlastní]

| datum odběru vzorku | čas (d) | 1,1-DCE | cis-1,2-DCE | PCE | TCE | trans-1,2,-DCE | VC | suma |
|---------------------|---------|---------|-------------|------|------|----------------|----|------|
| 10.6.2020 9:30 | 0,0 | 0 | 0 | 2614 | 4198 | 0 | 0 | 6812 |
| 10.6.2020 13:30 | 0,2 | 0 | 0 | 1969 | 3263 | 0 | 0 | 5231 |
| 11.6.2020 8:00 | 0,9 | 10 | 13 | 1511 | 2691 | 0 | 12 | 4236 |
| 11.6.2020 13:30 | 1,2 | 9 | 15 | 1165 | 2126 | 0 | 5 | 3319 |
| 12.6.2020 10:30 | 2,0 | 9 | 20 | 1137 | 1952 | 0 | 7 | 3124 |
| 15.6.2020 10:00 | 5,0 | 7 | 29 | 777 | 1092 | 0 | 6 | 1911 |
| 18.6.2020 10:00 | 8,0 | 3 | 27 | 558 | 443 | 0 | 5 | 1036 |
| 22.6.2020 12:30 | 12,1 | 0 | 21 | 509 | 214 | 0 | 4 | 747 |

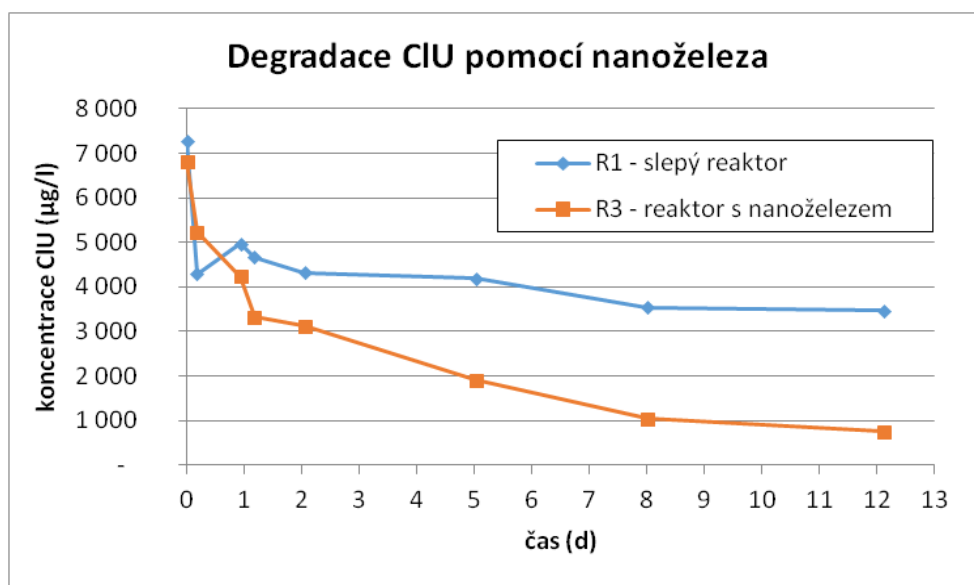
Oproti reaktoru R1 dochází v reaktoru R3 k výrazným změnám ve všech měřených parametrech v průběhu testu. ORP na počátku testu vykazuje velmi strmý pokles z hodnot okolo 200mV na -487 mV, což je způsobeno silným redukčním působením nanoželeza na přímé elektronové akceptory (voda, rozpuštěný kyslík, kontaminant) po smíchání s vodou

v reaktoru. V případě, že je redukční kapacita již vyčerpána, dochází k postupnému návratu na hodnotu před aplikací nanoželeza. Hodnota pH se po přidání nanoželeza většinou zvyšuje o desetiny až jednotky pH. Po vyčerpání reakční kapacity nanoželeza hodnota pH zůstává trvale zvýšena. Z tabulky 4 je zřetelný jak výrazný pokles ORP do silně redukčních hodnot, tak zvyšování hodnot pH (viz tabulka 4).

Tabulka 4: Vývoj fyzikálně – chemických parametrů v reaktoru R3 [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, zpracování vlastní]

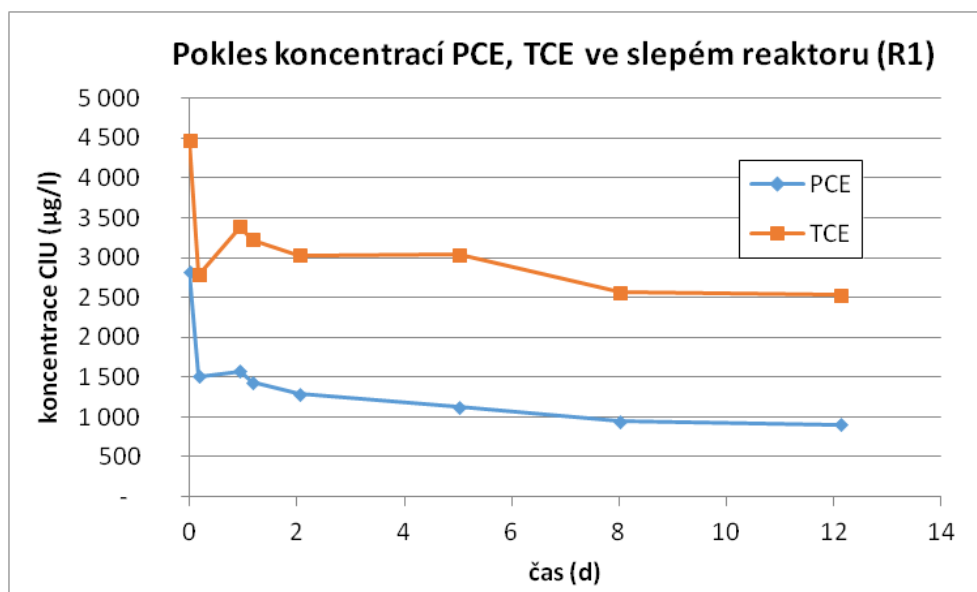
| datum odběru vzorku | čas (d) | pH | ORP |
|---------------------|---------|------|------|
| 10.6.2020 9:30 | 0,0 | 7,50 | -487 |
| 10.6.2020 13:30 | 0,2 | 7,60 | -553 |
| 11.6.2020 8:00 | 0,9 | 8,08 | -587 |
| 11.6.2020 13:30 | 1,2 | 8,15 | -568 |
| 12.6.2020 10:30 | 2,0 | 8,41 | -544 |
| 15.6.2020 10:00 | 5,0 | 8,93 | -550 |
| 18.6.2020 10:00 | 8,0 | 8,88 | -572 |
| 22.6.2020 12:30 | 12,1 | 9,59 | -496 |

Na obrázku 26 jsou vyneseny hodnoty koncentrací CIU v čase. Z vynesených křivek je zřejmý výrazný pokles koncentrací CIU v reaktoru R3 s nanoželezem.

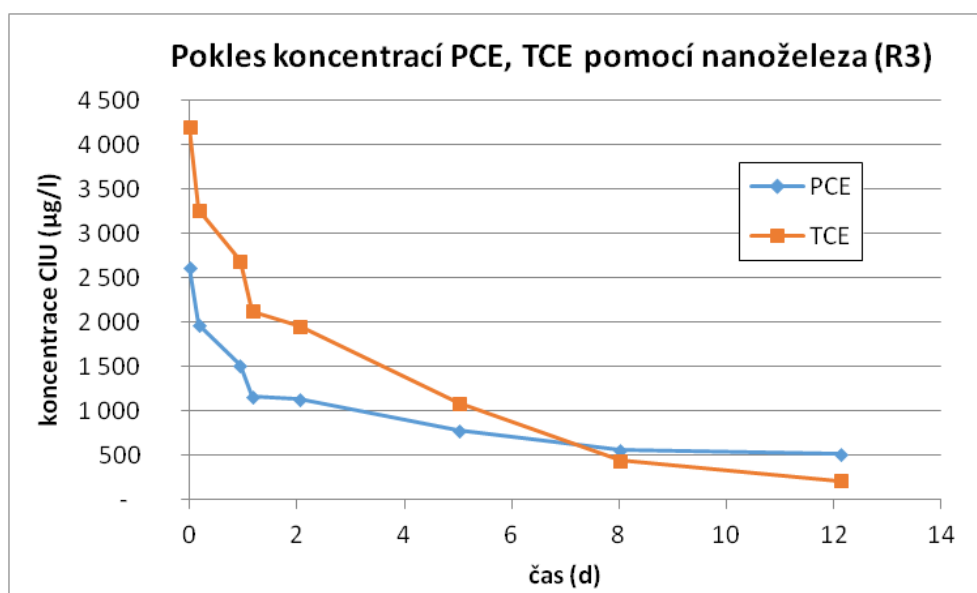


Obrázek 26: Graf degradace chlorovaných uhlovodíků pomocí nanoželeza [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, vlastní zpracování]

Obrázky 27 a 28 znázorňují detailní průběh vývoje koncentrací PCE a TCE v čase jednotlivě pro slepý reaktor R1 a pro reaktor R3. Při porovnání obou grafů opět vidíme výrazný pokles koncentrací PCE a TCE v reaktoru R3, což dokládá průběh degradace těchto produktů pomocí nanoželeza.



Obrázek 27: Graf poklesu koncentrací perchlorethylenu a trichlorethylenu ve slepém reaktoru (R1) [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, vlastní zpracování]



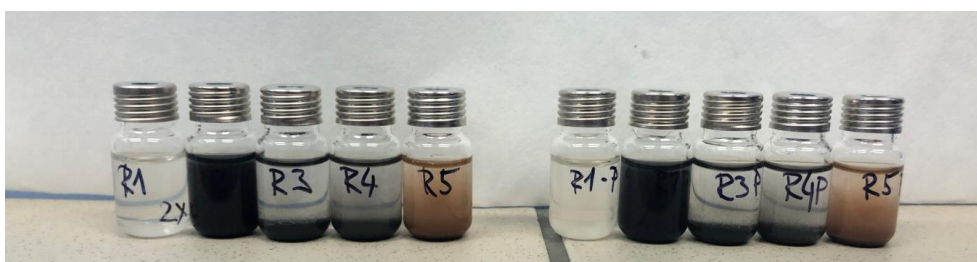
Obrázek 28: Graf poklesu koncentrací perchlorethylenu a trichlorethylenu v reaktoru (R3) [Zdroj dat: Technická univerzita v Liberci, vlastní zpracování]



Obrázek 29: Vialky se vzorky po prvním odebrání [Zdroj: vlastní foto, 10. 6. 2020]



Obrázek 30: Vialky se vzorky ze 3. odběrového dne [Zdroj: vlastní foto, 12. 6. 2020]



Obrázek 31: Vialky se vzorky ze závěrečného odběrového dne [Zdroj: vlastní foto, 22. 6. 2020]

Obrázky s vialkami z datovaných odběrů jsou pro ukázkou změny zbarvení vody v reaktorech v průběhu reakcí. Vzorky reaktoru R1 zůstaly čisté, jelikož do tohoto reaktoru nebyla přidána žádná příměs. Ze vzorků reaktoru R3 je patrné, že nanoželezo bylo ještě stále aktivní a můžeme pozorovat usazené nanočástice na dně vialky.

Obecným závěrem této kapitoly je, že vysoké počáteční koncentrace CIU jsou ve vodě přítomny kvůli historicky i stále probíhající průmyslové výrobě v areálu, přítomnosti těžby ať už z minulosti ve městě, či nyní v okolních obcích. Koncentrace CIU na dané lokalitě jsou také vysoké kvůli střední až vyšší propustnosti podloží, proto je daný kolektor ve Spolchemii dotován neustálými kontaminanty vlivem technologických, manipulačních, příp. havarijních úkapů z technologických zařízení, netěsností rozvodů, zásobníků surovin a produktů. Atmosférické srážky pak přispívají k vymývání kontaminantů na hladinu podzemní vody a následné migraci do okolí. Kontaminace se také díky srážkám dostává do půdy a ovlivňuje tak koncentraci a složení kontaminantů v půdě. Na lokalitě Spolchemie i z tohoto důvodu bylo popsáno větší množství zdrojů kontaminace zemin a podzemní vody.

6 Diskuze

Zájmové území, které v práci rozebíráme, se nachází v Ústeckém kraji na západě Čech. Jedná se konkrétně o město Ústí nad Labem a leží na soutoku řek Labe a Bíliny mezi Českým středohořím a Krušnými horami. [ČSÚ, 2012]

Dle Sedláčka [1999] a Lederera, Kvapila. Sedláčka a kol. [2005] se areál Spolku pro chemickou a hutní výrobu, a.s. nachází v jižní části města blízko výše zmiňovanému soutoku. Okolí podniku je zastavěno obytnou i průmyslovou zástavbou. Ústí nad Labem je historicky velmi spjata s průmyslovou výrobou. I nyní ve městě stále funguje mnoho průmyslových výroben. Klíčovým odvětvím, které využilo polohy města, se stal chemický průmysl.

Současný výrobní program ústeckých podniků je velmi bohatý a některé výrobky jsou specifické právě pro zdejší průmysl. Náleží mezi ně např. organické a anorganické chemikálie, barviva, syntetické pryskyřice ze Spolchemie. [Statutární město Ústí nad Labem, 2019]

Především z důvodu dlouholeté intenzivní chemické výroby se podzemní voda čistí právě v Ústí nad Labem. Vzhledem k minulosti, ale částečně i současnosti, je právě tato lokalita velkým zdrojem znečištění, jak píše Sedláček [1999]. Ten také tvrdí, že jelikož kontaminace podzemní vody může být toxická pro organismy v půdě žijící a ovlivňovat vodní toky v okolí a nepřímo i člověka, vzhledem k tomu, že je primárním zdrojem pitné vody, vzniká potřeba ji sanovat. Kontaminace chlorovanými uhlovodíky pokrývá prakticky celé území areálu. Při vyústění Klíšského potoka do Bíliny a v místě přibližně 200m před soutokem s Labem byly indikovány zvýšené koncentrace především chlorovaných a aromatických uhlovodíků, rtuti, naftalenu, pesticidů, iontů sodíku, draslíku, železa a fluoridů. Dále také Sedláček [1999] uvádí, že působením atmosférických srážek dochází k vymývání kontaminantů na hladinu podzemní vody a následné migraci kontaminačního mraku do okolí. Kontaminace se také díky srážkám dostává do půdy a ovlivňuje tak koncentraci a složení kontaminantů v půdě.

Dle předpokladu prokázala počáteční analýza odebrané vody z lokality areálu Spolchemie obsah vysokých koncentrací Tetrachlorethenu (PCE) a Trichlorethenu (TCE).

Fojtík a kol. [2014] uvádí, že nanomateriály jsou částice o rozměrech nanometrů až mikrometrů, které mají individuální charakter a jsou významné svou konstrukcí a funkcí. Vykazují unikátní vlastnosti, které se v makroskopických rozměrech dané látky nevyskytují.

Podle Černík a kol. [2010] pro sanaci kontaminovaných vod představuje nanoželezo velice efektivní materiál. Díky svým rozměrům má snadný přístup do porézního prostředí v půdě a je použitelný na širokou škálu kontaminantů.

Nosek, Černík [2011] ve svém díle píše, že nanoželezo je na lokalitách aplikováno do půdního prostředí ve formě vodné suspenze. Od aplikačních vrtů je pak nanoželezo transportováno prouděním podzemní vody.

Při redukci chlorovaných uhlovodíků nulmocné elementární železo Fe^0 vystupuje jako dárce elektronů nutných k redukci kontaminantů a oxiduje se na ionty Fe^{2+} . Obecně se nanočástice skládají z jádra tvořeného elementárním železem a obalu tvořeného oxidy železa, jak uvádí Li a kol. [2006] i Černík a kol. [2010].

Testované nanoželezo NANOFER STAR jsou na vzduchu stabilní nanočástice, které se před samotnou aplikací musejí ve vodě tzv. aktivovat 1-2 dny, jelikož jsou pokryty slabou vrstvou oxidů. Při takovéto aktivaci dochází k postupnému rozrušování slupky a odryvání reaktivního povrchu. Nanoželezné částice jsou tedy smíchány s vodou v poměru 1:4. Tato směs musí být při přípravě důkladně rozmíchávána, aby se netvořily velké hluky částic a aby se neusazovaly na dně nádoby a poté nanoželezo i správně reagovalo.

Dle Černík a kol. [2010] horninové prostředí i podzemní voda mohou být charakterizovány několika základními parametry. Oxidačně-redukčním potenciálem a pH. Pokud se tyto parametry změní, může to vést i ke změně stavu kontaminantu a ke změně jeho vlastností. To dále také ovlivňuje jeho migrační schopnosti. Například dvojmocné železo je v povrchových podmínkách značně rozpustné, zatímco trojmocné železo tvoří oxidy a hydroxidy, které jsou rozpustné málo. Proto tyto vlastnosti znečišťujících látek závisí na tom, zda je prostředí oxidační nebo redukční. Metody, které využívají změn oxidačně-redukčních vlastností prostředí, se z většiny aplikují in situ. Podzemní voda spolu s kontaminantem se nevyneší na povrch a není nutné použití větších strojů či nějaké likvidace apod.

Provedené laboratorní testy demonstrovaly průběh in situ chemické redukce pomocí nanoželeza při dekontaminaci chlorovaných uhlovodíků z odebrané podzemní vody. Naměřené hodnoty fyzikálně – chemických parametrů se ve slepém reaktoru R1 bez přidaného činidla v průběhu testu nijak výrazně nemění. Hodnoty oxidačně redukčního potenciálu jsou až na pár odchylek způsobených chybou měření v rozmezí oxidačního prostředí. Výrazné poklesy koncentrací CIU v reaktoru R3 v průběhu celého testu poukazují na pozitivní průběh dehalogenace CIU pomocí nanoželeza. Nanoželezo je zde redukčním činidlem, redukuje CIU a samo se při reakci oxiduje. Oproti reaktoru R1 dochází v reaktoru

R3 k výrazným změnám ve všech měřených parametrech v průběhu testu. ORP na počátku testu vykazuje velmi strmý pokles do redukčních hodnot, což je způsobeno silným redukčním působením nanoželeza na přímé elektronové akceptory (voda, rozpuštěný kyslík, kontaminant) v reaktoru.

Jak zmiňuje Černík a kol. [2010] v případě, že je redukční kapacita již vyčerpána, dochází k postupnému návratu na hodnotu před aplikací nanoželeza. Hodnota pH se po přidání nanoželeza většinou zvyšuje o desetiny až jednotky pH. Po vyčerpání reakční kapacity nanoželeza hodnota pH zůstává trvale zvýšena.

Silně záporné hodnoty ORP i po posledním odběru poukazují na to, že nanoželezo jev reaktoru stále aktivní. Hodnota pH se postupně zvyšuje a zůstává trvale zvýšena.

7 Závěry

V této práci bylo úkolem zpracovat literární rešerši týkající se možností využití principů nanotechnologie v rámci zlepšení kvality podzemní vody, konkrétně v území Ústí nad Labem, kde se vyskytuje i areál Spolchemie. Podzemní voda je často kontaminována různými škodlivými látkami, které mohou ovlivňovat podmínky půdy a mít negativní vliv na organismy žijící v půdě, na člověka, či na okolní vodní toky. Můžou v ní být přítomny závadné látky jako pesticidy, těžké kovy, chlorované uhlovodíky, ropné látky, apod. Nanomateriály jsou částice o rozměrech nanometrů až mikrometrů a vykazují unikátní vlastnosti. Nanomateriálů existuje mnoho a jejich využití je značně rozsáhlé. Nanoželezo se používá při sanační metodě založené na in situ chemické redukci a je použitelné pro degradaci široké škály kontaminantů nacházejících se v půdě, což je důvodem, že se nanoželezo pro sanace využívá velice často.

Dalším cílem této práce bylo vymezení a fyzicko – geografická charakteristika zájmového kontaminovaného území v Ústí nad Labem. Pro fyzicko – geografickou charakteristiku bylo využito sedmi mapových výstupů, které doplňovaly textovou část dané části bakalářské práce. Jednotlivé kapitoly této části obsahovaly vymezení zájmového území, geologické a geomorfologické poměry Ústí nad Labem, klimatické poměry a srážkové úhrny, hydrologické a hydrogeologické poměry, především povrchové vody v dané lokalitě a v neposlední řadě také lokalizaci odběrového místa vzorku podzemní vody, což bylo znázorněno ve vytvořené mapě. Všechny tyto poměry daného zájmového území byly také propojeny s celkovým tématem práce a bylo zhodnoceno, jak celá tato fyzicko – geografická charakteristika ovlivňuje danou problematiku s kontaminací podzemní vody.

Podzemní voda z areálu Spolchemie poskytnuta pro laboratorní ověření byla kontaminovaná chlorovanými uhlovodíky (konkrétně PCE, TCE). Vysoké počáteční koncentrace CIU jsou ve vodě přítomny kvůli historicky i stále probíhající průmyslové výrobě v areálu. Zvýšeným koncentracím CIU na dané lokalitě napomáhá také střední až vyšší propustnost podloží. Do půdy se kontaminanty nejčastěji dostanou z technologických, manipulačních, příp. havarijních úkapů z technologických zařízení, netěsností rozvodů, zásobníků surovin a produktů. Atmosférické srážky pak kontaminant z povrchu dostanou do půdy a na hladinu podzemní vody. Ten následně migruje půdním prostředím. V zájmovém území pak bylo zjištěno větší množství kontaminace z různých zdrojů, které kontaminují místní zeminu a podzemní vodu.

Poslední dva cíle se věnují laboratorní části práce, konkrétně realizaci procesu čištění odebraných vzorků podzemní vody kontaminované chlorovanými uhlovodíky pomocí

nanoželeza a následnému zhodnocení úspěchů sanačního činidla při čištění vzorků podzemní vody. Realizace laboratorních testů probíhala pomocí sady reaktorových testů, kdy pro účely této práce byly zkoumány a vyhodnoceny dva z nich, reaktor R1 bez přidaného činidla a reaktor R3 se suspenzí nanoželeza o koncentraci 5g/l. Výsledky reaktorových testů demonstrují pozitivní účinek nanoželeza jakožto redukčního činidla při dekontaminaci testované podzemní vody. Nanoželezo při reakci redukuje chlorované uhlovodíky na méně až netoxické produkty a samo se tak oxiduje. Pozitivní průběh reakce potvrzují i naměřené fyzikálně-chemické parametry, kdy ORP klesá do silně záporných hodnot a pH se po přidání nanoželeza a v průběhu reakce zvyšuje.

8 Seznamy použitých zdrojů

AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY (AOPK ČR). *Chráněná území ČR: Ústecko* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.ochranaprirody.cz/publikacni-cinnost/chranena-uzemi-cr/ustecko/>

AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY (AOPK ČR). *Maloplošná chráněná území ČR* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.ochranaprirody.cz/lokality/>

AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY (AOPK ČR). *Regionální pracoviště Správa CHKO České středohoří: Geologie* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://ceskestredohori.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/geologie/>

AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY (AOPK ČR). *Regionální pracoviště Správa CHKO České středohoří: Geomorfologie* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://ceskestredohori.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/geomorfologie/>

AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY (AOPK ČR). *Regionální pracoviště Správa CHKO České středohoří: Klimatické poměry* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://ceskestredohori.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/klimaticke-pomery/>

AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY (AOPK ČR). *Regionální pracoviště Správa CHKO České středohoří: Půdní poměry* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://ceskestredohori.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/pudni-pomery/>

BRANDOS, Otakar. *Geomorfologické celky ČR: Rozloha pohoří a dalších geomorfologických celků České republiky, žebříček* [online]. 2009 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.treking.cz/regiony/celky-rozloha.htm>

ČERNÍK, M., a kolektiv, 2010. *Chemicky podporované in situ sanační technologie*. VŠCHT Praha, Czech Republic, ISBN 978-80-7080-767-5.

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Krajská správa ČSÚ v Ústí nad Labem - Charakteristika kraje* [online]. 2017 [cit. 2020-03-16].

Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xu/charakteristika_kraje

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Krajská správa ČSÚ v Ústí nad Labem - Charakteristika okresu Ústí nad Labem* [online]. 2012 [cit. 2020-03-20].

Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xu/charakteristika_okresu_usti_nad_labem

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Počet obyvatel, průměrný věk k 1.1.* [online]. 2019 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xu/pocet-obyvatel-prumerny-vek>

FETTER, C. W., 2008. *Contaminant hydrogeology (2nd edition)*. University of Wisconsin-Oshkosh and C. W. Fetter, Jr. Associates, Hilton Head Island, SC, ISBN 978-1-57766-583-0.

FOJTÍK A. a kol., 2014. *NANO - fascinující fenomén současnosti*. 1. vyd. Praha, COMTES FHT, ISBN 978-80-260-7135-8.

HAZRDOVÁ, M., a kol.: *Základní hydrogeologická mapa ČSSR 1:200 000 list 02 - Ústí nad Labem*, 1980, Ústřední ústav geologický Praha

KVAPIL P.; GAŇA P.; ŠŤASTNÁ J.; HYNIE T., 2012. *Opatření vedoucí k nápravě starých ekologických zátěží v areálu společnosti Spolchemie Ústí nad Labem*. Souhrnná zpráva za rok 2011, AQUATEST a.s.

KVAPIL P.; GAŇA P., 2012. *Opatření vedoucí k nápravě starých ekologických zátěží v areálu společnosti Spolchemie Ústí nad Labem*. Zpráva zhotovitele pro 38. kontrolní den, AQUATEST a.s.

LEDERER, T., KVAPIL -P., SEDLÁČEK -M. A kol., 2005. *Opatření vedoucí k nápravě starých ekologických zátěží v areálu společnosti Spolchemie Ústí nad Labem*. Praha, Prováděcí projekt sanace saturované zóny.

LI, L., FAN, M., BROWN, R.C., VAN LEEUWEN, J., WANG, J., WANG W., SONG Y, ZHANG P., 2006. *Synthesis, Properties, and Environmental Applications of Nanoscale Iron-Based Materials*. A Review, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 36(5), 405-431.

LI, X-Q., ELLIOTT, D.W., ZHANG, W-X., 2006. *Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants*. Materials and Engineering Aspects, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 31, 111-122.

MATĚJŮ, V. a kol., 2006. *Kompendium sanačních technologií*. EKOMONITOR Chrudim, ISBN: 80-86832-15-5.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR. *Staré ekologické zátěže, resp. kontaminovaná místa* [online]. [cit. 2020-03-20].

Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/stare_ekologicke_zateze

NANOIRON FUTURE TECHNOLOGY [online]. 2017. Dostupné z: <https://nanoiron.cz/en/>

NOSEK, J.; ČERNÍK, M., 2011. *Laboratorní výzkum a modelování transportních vlastností nanoželeza*. Tribun EU, Brno, ISBN 978-80-263-0076-2.

REGIONÁLNÍ INFORMAČNÍ SERVIS. *Ústí nad Labem (okres Ústí nad Labem) - katastrální území Ústí nad Labem* [online]. 2019 [cit. 2020-03-16].

Dostupné z: <https://www.risy.cz/cs/vyhledavace/obce/554804-usti-nad-labem/774871-katastralni-uzemi-usti-nad-labem>

SEDLÁČEK M., 1999. *Aktualizace analýzy rizik v areálu a.s. Spolchemie v Ústí nad Labem*. KAP Praha.

SIEGRIST, R.L., 2000. *In Situ Chemical Oxidation for Remediation of Contaminated Soil and Ground Water*. Ground Water Currents, EPA 542-N-00-006, Issue No. 37.

STATUTÁRNÍ MĚSTO ÚSTÍ NAD LABEM. *Oficiální stránky / úřední* [online]. 2019 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.usti-nad-labem.cz/cz/zivot-mesta/uvod/hospodarstvi.html>

STATUTÁRNÍ MĚSTO ÚSTÍ NAD LABEM: Portál pro volný čas Ústí nad Labem. *Řeky a potoky* [online]. 2019 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.usti-nad-labem.cz/cz/volny-cas/turistum/priroda/vodstvo/reky-potoky.html>

ŠRÁČEK O.; DATEL J.; MLS J., 2000. *Kontaminační hydrogeologie*. skripta kolektivu pracovníků oddělení hydrogeologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, Praha.

TAXONOMICKÝ KLASIFIKAČNÍ SYSTÉM PŮD ČR. *Kambisoly: Kambizem KA* [online].
[cit. 2020-03-16].

Dostupné z: <https://klasifikace.pedologie.czu.cz/index.php?action=showKlasifikacniSystem>

ZHANG, W., 2003. *Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview*.
Journal of Nanoparticle Research 5(3-4), 323-332.