

Příloha 1:

Závěrečná zpráva o dekontaminačních úpravách sedimentů (termická desorpce, vymývání, chemická oxidace a chemická redukce pomocí nZVI)

Listopad 2017

AQUATEST a.s., Geologická 4, 152 00 Praha 5
zápis v obchodním rejstříku u Městského soudu v Praze, oddíl B, vložka 1189

Tel.: +420 234 607 111, Fax: +420 234 607 700, <http://www.aquatest.cz>

Kontaktní osoba: Ing. Irena Šupíková Ph.D., tel.: +420 604 221 888

e-mail: supikova@aquatest.cz

Vyhodnocení laboratorních testů na reálných vzorcích sedimentů z lokalit Povrly a Malé Březno

Na třech lokalitách v povodí Labe (Povrly, Malé Březno A a Malé Březno B) byly nejprve provedeny dva počáteční odběry (Obrázek 1). První vzorkování proběhlo za účelem prvotního zjištění druhu kontaminace a zhodnocení koncentrací jednotlivých polutantů. Odběry byly prováděny z pramice mechanickým vzorkovačem sedimentů („Eijkelkamp“) a prodloužené tyče (Obrázek 2). Každý vzorek byl získán ze 4-5 vpichů. Ruční homogenizace byla provedena ve směsné nádobě nerezovou špachtlí.

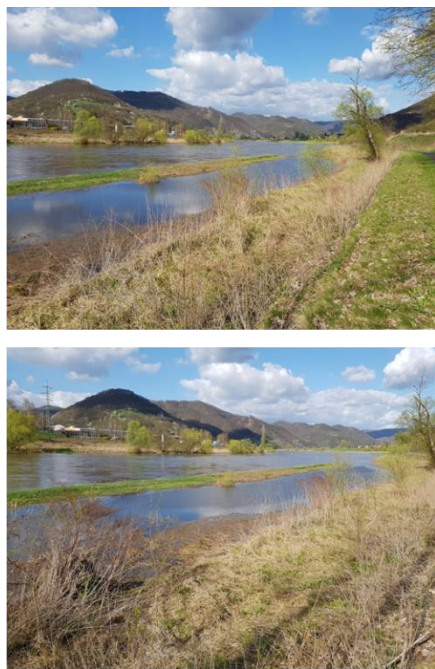
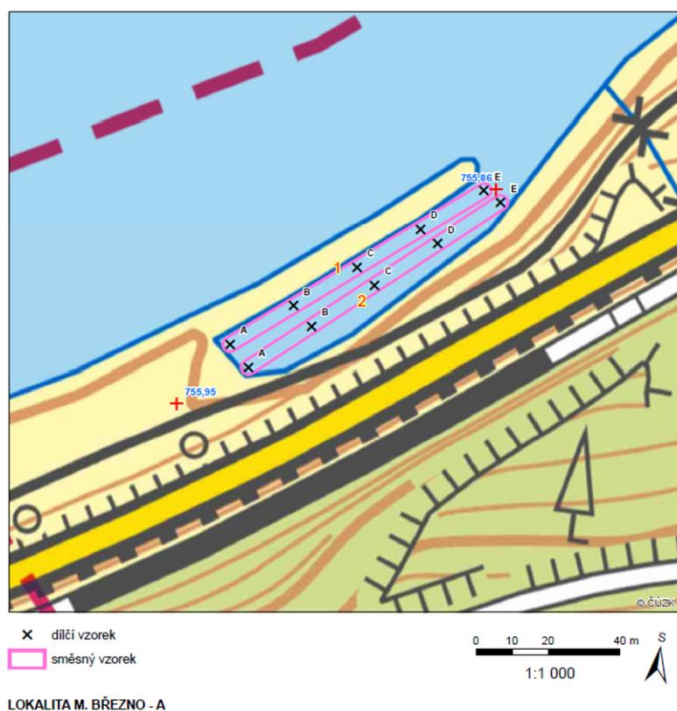


Obrázek 1: Mapa zájmových lokalit (Povrly, Malé Březno A, Malé Březno B)

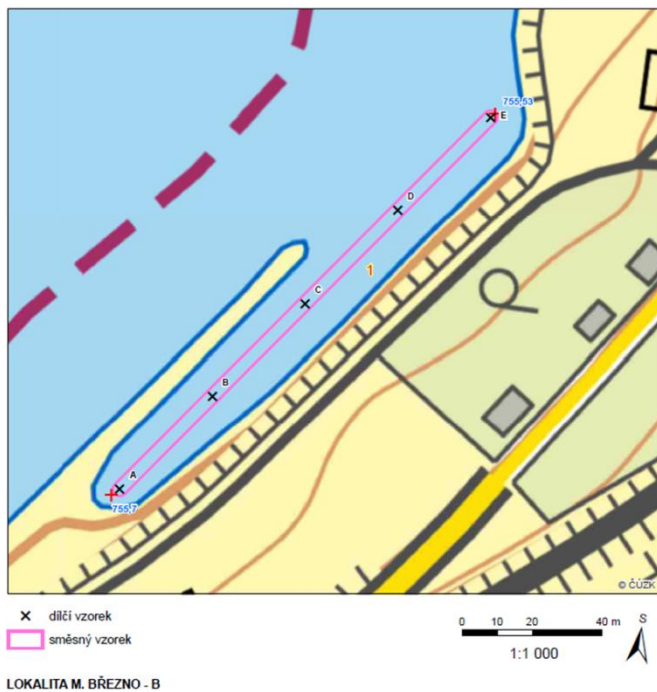


Obrázek 2: Odběry sedimentů pomocí mechanického vzorkovače

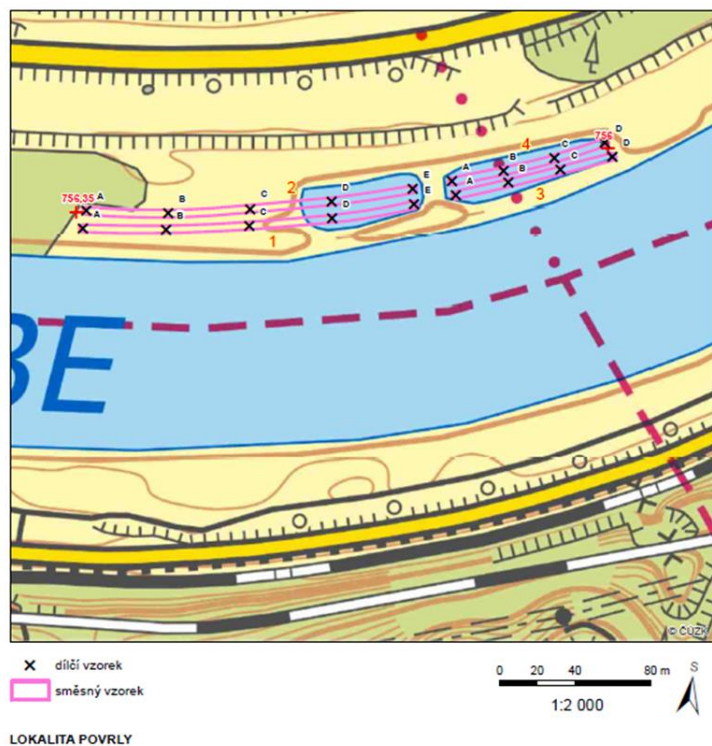
Druhé vzorkování proběhlo systematicky, bodově, kdy se udělala síť odběrných míst dílčích vzorků (Obrázek 3, Obrázek 4, Obrázek 5) dle legislativy zákona o odpadech. Každý dílčí vzorek byl vytvořen 3-5 vpichy a následně ručně homogenizován ve směsné nádobě.



Obrázek 3: Mapa systematického vzorkování lokality Malé Březno A



Obrázek 4: Mapa systematického vzorkování lokality Malé Březno B



Obrázek 5: Mapa systematického vzorkování lokality Povrly

Výsledky vstupní analýzy počátečních odběrů z 21.3. 2017 a 6.4. 2017:

Vstupní analýzy byly provedeny v laboratořích AQ. Koncentrace jednotlivých skupin kontaminantů jsou znázorněny na následujících tabulkách. Výsledky koncentrací byly porovnány s indikačními hodnotami kontaminace HpH a DpH dle MKOL a doplňkově i s indikátory znečištění pro ostatní plochy dle metodické příručky Ministerstva životního prostředí.

Tabulka 1: Těžké kovy

21.3.2017						
Označení vz.	Lokalita	Kadmium	Olovo	Měď	Rtuť	Zinek
		mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.
Povrly - nad výpustí	Povrly	1,14	48,40	55,20	1,56	263,00
Povrly - pod výpustí	Povrly	2,84	133,00	5 850,00	14,50	2 120,00
Malé Březno A	Malé Březno A	0,88	51,60	38,50	1,20	202,00
Malé Březno B	Malé Březno B	<0,50	40,20	36,30	0,51	124,00
Dolní prahová hodnota		0,22	25	14	0,15	200
Horní prahová hodnota		2,3	53	160	0,47	800
indikátory znečišt. Ostatní plochy		70,00	400,00	3 100,00	10,00	23 000,00
6.4.2017						
Označení vz.	Lokalita	Kadmium	Olovo	Měď	Rtuť	Zinek
		mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.
Povrly 1	Povrly	0,70	31,4	50,1	0,561	247
Povrly 2	Povrly	1,55	64,6	1030	0,908	679
Povrly 3	Povrly	<0,50	18,1	80,3	0,277	173
Povrly 4	Povrly	2,95	123	4310	2,69	2850
Malé Březno A/1	Malé Březno A	2,34	90,0	71,2	1,64	445
Malé Březno A/2	Malé Březno A	2,14	82,8	70,8	1,49	433
Malé Březno B	Malé Březno B	2,24	161	107	3,76	541
Dolní prahová hodnota		0,22	25	14	0,15	200
Horní prahová hodnota		2,3	53	160	0,47	800
indikátory znečišt. Ostatní plochy		70,00	400,00	3 100,00	10,00	23 000,00

Tabulka 2: Polycyklické aromatické uhlovodíky

21.3.2017														
Označení vz.	Lokalita	Fluoranthén	Benzo(b)fluoranthén	Benzo(k)fluoranthén	Benzo(a)pyren	Benzo(ghi)perylene	Indeno(1,2,3-cd)pyren	Fenantren	Antracen	Pyren	Benzo(a)antracen	Chrysen	Naftalen	Suma PAU
		mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.
Povrly - nad výpustí	Povrly	1,008	0,459	0,192	0,369	0,268	0,324	0,533	0,116	1,080	0,488	0,488	0,061	4,75
Povrly - pod výpustí	Povrly	2,230	0,968	0,449	0,797	0,639	0,642	1,043	0,165	2,241	0,960	1,016	0,213	10,0
Malé Březno A	Malé Březno A	1,397	0,540	0,255	0,514	0,367	0,399	0,797	0,204	1,270	0,661	0,629	0,103	6,29
Malé Březno B	Malé Březno B	0,126	0,064	0,026	0,052	0,050	0,007	0,050	0,013	0,108	0,069	0,071	0,020	0,559
Dolní prahová hodnota		-	-	-	0,01	-	-	-	0,03	-	-	-	-	-
Horní prahová hodnota		0,18	-	-	0,6	-	-	-	0,31	-	-	-	-	-
Indikátory znečišť. Ostatní plochy		2 300,00	0,150	1,500	0,015	-	0,15	-	3 400,00	1 700,00	0,150	15,00	3,60	-
6.4.2017														
Označení vz.	Lokalita	Fluoranthén	Benzo(b)fluoranthén	Benzo(k)fluoranthén	Benzo(a)pyren	Benzo(ghi)perylene	Indeno(1,2,3-cd)pyren	Fenantren	Antracen	Pyren	Benzo(a)antracen	Chrysen	Naftalen	Suma PAU
		mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.	mg/kg suš.
Povrly 1	Povrly	0,643	0,326	0,139	0,263	0,213	0,235	0,289	0,058	0,543	0,276	0,275	0,077	2,88
Povrly 2	Povrly	0,889	0,414	0,185	0,324	0,266	0,275	0,379	0,105	0,775	0,363	0,375	0,091	3,83
Povrly 3	Povrly	0,422	0,170	0,074	0,157	0,099	0,087	0,277	0,064	0,354	0,188	0,200	0,140	1,86
Povrly 4	Povrly	0,867	0,473	0,190	0,326	0,334	0,316	0,352	0,095	0,840	0,396	0,402	0,370	4,02
Malé Březno A/1	Malé Březno A	1,474	0,670	0,288	0,481	0,379	0,374	0,991	0,144	1,304	0,526	0,590	0,148	6,41
Malé Březno A/2	Malé Březno A	1,303	0,624	0,291	0,503	0,358	0,309	0,687	0,138	1,091	0,545	0,584	0,155	5,67
Malé Březno B	Malé Březno B	3,091	1,700	0,763	1,328	0,920	0,964	1,377	0,312	2,561	1,265	1,351	0,370	13,6
Dolní prahová hodnota		-	-	-	0,01	-	-	-	0,03	-	-	-	-	-
Horní prahová hodnota		0,18	-	-	0,6	-	-	-	0,31	-	-	-	-	-
Indikátory znečišť. Ostatní plochy		2 300,00	0,150	1,500	0,015	-	0,15	-	3 400,00	1 700,00	0,150	15,00	3,60	-

Tabulka 3: Polychlorované bifenyly

[illegible]

Tabulka 4: Pesticidy organicky chlorované

21.3.2017										
Označení vz.	Lokalita	Aldrin	alfa - HCH	beta - HCH	gama - HCH (lindan)	delta - HCH	epsilon - HCH	p,p'-DDD	p,p'-DDE	o,p'-DDT
		µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.
Povrly - nad výpustí	Povrly	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	16,6	15,1	14,9
Povrly - pod výpustí	Povrly	<5,00	<5,00	5,81	<5,00	<5,00	<5,00	1150	366	292
Malé Březno A	Malé Březno A	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	63,2	28,9	35,9
Malé Březno B	Malé Březno B	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Dolní prahová hodnota			0,5	-	0,5			0,06	0,31	
Horní prahová hodnota			1,5	5	1,5			3,2	6,8	
indikátory znečišť. Ostatní plochy		29	77,0	270,0	520,0			2 000,0	1 400,0	1 700,0
6.4.2017										
Označení vz.	Lokalita	Aldrin	alfa - HCH	beta - HCH	gama - HCH (lindan)	delta - HCH	epsilon - HCH	p,p'-DDD	p,p'-DDE	o,p'-DDT
		µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.
		45,0	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	22,3	<5,00	<10,0
		2980	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	37,4	<5,00	<10,0
		127	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	19,9	<5,00	<10,0
		<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	243	<5,00	<10,0
		1						0,0004		
		3						17		
		1 700,0	30,0	370 000,0	370 000,0	18 000,0	110,0	300,0	310 000,0	53,0
6.4.2017										
Označení vz.	Lokalita	Aldrin	alfa - HCH	beta - HCH	gama - HCH (lindan)	delta - HCH	epsilon - HCH	p,p'-DDD	p,p'-DDE	o,p'-DDT
		µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.
Povrly 1	Povrly	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	26,9	10,8	<5,00
Povrly 2	Povrly	<5,00	<5,00	9,44	<5,00	<5,00	<5,00	49,9	16,4	<5,00
Povrly 3	Povrly	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	13,9	5,97	<5,00
Povrly 4	Povrly	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	184	8,56	<5,00
Malé Březno A/1	Malé Březno A	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	75,5	15,7	6,90
Malé Březno A/2	Malé Březno A	<5,00	<5,00	7,60	<5,00	<5,00	<5,00	96,9	16,0	13,1
Malé Březno B	Malé Březno B	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	400	226	<5,00
Dolní prahová hodnota			0,5	-	0,5			0,06	0,31	
Horní prahová hodnota			1,5	5	1,5			3,2	6,8	
indikátory znečišť. Ostatní plochy		29	77,00	270,00	520,00			2 000,00	1 400,00	1 700,00
6.4.2017										
Označení vz.	Lokalita	Aldrin	alfa - HCH	beta - HCH	gama - HCH (lindan)	delta - HCH	epsilon - HCH	p,p'-DDD	p,p'-DDE	o,p'-DDT
		µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.	µg/kg suš.
		69,9	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	212	<5,00	<10,0
		128	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	106	<5,00	<10,0
		77,2	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	31,4	<5,00	<10,0
		114	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	167	<5,00	<10,0
		440	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	92,7	<5,00	<10,0
		25,8	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	87,6	<5,00	<10,0
		137	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	114	<5,00	<10,0
		1						0,0004		
		3						17		
		1 700,00	30,00	370 000,00	370 000,00	18 000,00	110,00	300,00	310 000,00	53,00

Z výsledků vstupních analýz bylo zjištěno, že v sedimentech lokality Povrly jsou vysoce nadlimitní koncentrace mědi, rtuti, zinku, olova, kadmia a některých polyaromatických sloučenin (Benzo(b)fluoranthén, Benzo(a)pyren, Indeno(1,2,3-c,d)pyren, Benzo(a)antracen), a p, p'-DDT. V sedimentech lokality Malé Březno byly naměřeny nadlimitní koncentrace některých polyaromatických sloučenin (Benzo(b)fluoranthén, Benzo(a)pyren, Indeno(1,2,3-c,d)pyren, Benzo(a)antracen) a některých polychlorovaných bifenylů (PCB kong. 138, PCB kong. 153, PCB kong. 180, PCB suma kong. (7)).

Na základě vyhodnocení vstupních analýz byly navrženy tři typy sanačních metod pro ošetření vytěžených kontaminovaných sedimentů (termická desorpce, oxidace peroxodisíranem sodným aktivovaným teplotou, vymytí tenzidy). Současně byla odzkoušena sanační metoda redukce pomocí nanočástic nulmocného železa (nZVI). Pro laboratorní ověření navrženého sanačního řešení bylo odebráno cca 10 kg sedimentů a odvezeno na Technickou univerzitu v Liberci (TUL). Na TUL byly dovezeny vzorky s názvy Povrly 4, Povrly 3 a Malé Březno A. Dle dohody z KD 4. 5. 2017 na povodí Labe byly pro laboratorní testy použity vzorky Povrly 4 a Malé Březno A.

Laboratorní testy byly nejprve zahájeny rešeršními pracemi. Před zahájením laboratorních prací bylo nutné vzorky homogenizovat. Homogenizace proběhla na plastovém platě. Lopatkou byly sedimenty manuálně míchány a vybírány ručně větší kameny a kořínky. Zbytek byly jemné sedimenty až bahno. Vybrané kamínky a kořínky byly zváženy. Zvážen byl i samotný sediment určený pro laboratorní testy. (Obrázek 6, Obrázek 7)



Obrázek 6: Homogenizace vzorku Malé Březno A



Obrázek 7: Homogenizace vzorku Povrly 4

Laboratorní ověření navržených metod sanace

a) Metodika

Následujících pár odstavců je věnováno metodice jednotlivých testovaných sanačních metod.

Termická desorpce:

Do porcelánových kelímků byly naváženy jednotlivé vzorky, o hmotnosti cca 150 g. Termická desorpce probíhala v muflové peci. Doba zdržení byla různá (3h, 6h, 24h) a vzorky byly vystaveny teplotě 350°C a 500°C. Po skončení experimentu vážily jednotlivé vzorky cca 65 g, což bylo nedostatečné množství pro jednotlivé analýzy v laboratořích AQ (min. množství vzorku po sanačním ošetření muselo být 100 g). Experiment se tedy z toho důvodu opakoval s navázkou cca 250 g. Ke každé sadě byl navážen i vzorek jako blank. Pro termickou desorpci za 500°C byly testovány doby zdržení 3h a 6h.



Obrázek 8: Příprava vzorků pro ošetření termickou desorcí



Obrázek 9: Vzorky po ošetření termickou desorpčí

Oxidace peroxodisíranem sodným (PSF):

10 g peroxodisíranu bylo přidáno k 200 g zeminy a 800 g vody (1:4). Nejprve byla do litrové fischerky navážena zemina, pak přisypán PSF a nakonec nalita demi voda. Dále byl současně připraven blank, který sloužil jako referenční. Vzorky byly ohřívány a udržovány o teplotě 50°C v prvním kole a 60°C v kole druhém a kontinuálně míchány magnetickým míchadlem. Průběžně byla stanovována koncentrace PSF v roztoku. Tomu předcházela kalibrace této metody stanovení. První kolo experimentu, kdy byl PSF aktivován teplotou 50°C byla doba reakce 2 týdny, v druhém kole, kdy byl PSF aktivován teplotou 60°C, pouze týden. Na začátku a na konci experimentu byly změřeny fyzikálně-chemické parametry vzorků. Po ukončení experimentu byl vzorek ponechán přes noc stát, aby došlo ke kompletnímu usazení sedimentu na dně fischerky a poté byla voda z fischerky odpipetována a celá fischerka poslána na analýzy do laboratoří AQ.



Obrázek 10: Příprava experimentu – navážka zeminy



Obrázek 11: Průběh experimentu oxidace PSF aktivovaným teplotou

Vymytí tenzidy:

Nasazen blank a různé koncentrace SDS (dodecylsírán sodný), který byl vybrán jako vhodný surfaktant. Do každé vzorkovnice (litrové fischerky) bylo odváženo 200 g zeminy a 800 g vody a následně přidáno různé množství SDS. 1% SDS na hmotnost zeminy (navážka 2 g), 3% SDS na hmotnost zeminy (navážka 6 g), 5% SDS na hmotnost zemin (navážka 10 g). Po navážení byly vzorky umístěny na vertikální třepačku i s blankem. Na začátku a na konci experimentu byly změřeny fyzikálně-chemické parametry ve vodě. Po týdnu byl experiment ukončen. Vzorky byly ponechány v klidu přes noc, aby se sediment kompletně usadil. Poté byla odpipetována voda a vzorky byly poslány ve fischerkách na analýzy do laboratoří AQ.



Obrázek 12: Průběh experimentu vymytí tenzidy

Redukce za použití nZVI:

nZVI NANOFER STAR o koncentracích 5 a 10 g/L bylo přidáno ke 200 g zeminy a 800 g vody (1:4). Nejprve byla do litrové fischerky navážena zemina, pak nadávkováno 40 ml (10 g/L) a 20 ml (5g/L) 20% suspenze nZVI a nakonec nalita demi voda. Po nadávkování nanoželeza byly vzorky umístěny na vertikální třepačku společně s blankem. Na začátku a na konci experimentu byly změřeny fyzikálně-chemické parametry vzorků. Experiment byl ukončen po šesti týdnech reakce. Po ukončení experimentu byl vzorek ponechán přes noc stát, aby došlo ke kompletnímu usazení sedimentu na dně fischerky a poté byla voda z fischerky odpipetována a celá fischerka poslána na analýzy do laboratoří AQ.



Obrázek 13: Příprava experimentu – navážka zeminy a vody



Obrázek 14: Průběh experimentu redukce nZVI



b) Výsledky

Výsledky z analýz jednotlivých metod byly vyhodnoceny a jsou znázorněny na následujících tabulkách. Koncentrace jednotlivých polutantů byly opět porovnány s indikátory znečištění pro ostatní plochy dle MŽP. Pro lepší přehlednost jsou kontaminanty rozděleny po skupinách stejně jako u vstupních analýz.

Tabulka 5: Koncentrace těžkých kovů po různých metodách sanačního ošetření

Těžké kovy	Cd mg/kg suš.	Pb mg/kg suš.	Cu mg/kg suš.	Hg mg/kg suš.	Zn mg/kg suš.
počáteční blank Povrly 4 (10 kg kbelík)	2,77	99	3340,0	1,96	2240
počáteční blank M. Březno A (10 kg kbelík)	2,88	107	88,8	2,26	501
Dolní prahová hodnota	0,22	25	14	0,15	200
Horní prahová hodnota	2,3	53	160	0,47	800
indikátory znečišť. Ostatní plochy	70	400	3100	10	23000
Termická desorpce					
TD_Povrly -blank	2,91	118	3150	1,79	2180
TD_Povrly 350°C, 3h	3,14	121	3140	0	2280
TD_Povrly 350°C, 6h,	3,08	122	3110	0	2350
TD_Povrly 350°C, 24h	3,26	118	3100	0	2420
TD_Povrly 500°C, 3h	2,59	102	2830	0	2350
TD_Povrly 500°C, 6h	2,58	101	2990	0	2540
TD_M. Březno blank	3,04	125	108	2,12	600
TD_M. Březno 350°C, 3h	2,90	109	81,7	0	542
TD_M. Březno 350°C, 6h	2,87	110	75,6	0	560
TD_M. Březno 350°C, 24h,	2,96	124	72,5	0,127	677
TD_M. Březno 500°C, 3h	2,70	111	69,6	0	619
TD_M. Březno 500°C, 6h	2,80	112	80,9	0	783
Vymytí za použití surfaktantu					
SDS_Povrly blank	2,63	101	3450	1,85	2330
SDS 1% Povrly, 2g SDS	3,62	126	3990	1,93	2650
SDS 3% Povrly, 6g SDS	2,77	102	3080	1,83	2000
SDS 5% Povrly, 10g SDS	2,78	101	3020	1,58	2000
SDS_M. Březno blank	3,07	117	103	2,25	563
SDS 1% M. Březno, 2g SDS	2,99	115	104	1,90	599
SDS 3% M. Březno, 6g SDS	3,17	115	95,5	1,63	543
SDS 5% M. Březno, 10g SDS	3,02	106	95,0	1,49	505
Oxidace persulfátem akt. teplotou					
PSF_Povrly blank	2,52	97	3540	1,63	2440
PSF_Povrly 10g, 50°C	2,33	91,2	2760	1,09	1740
PSF_Povrly 10g, 60°C	3,02	117	3220	2,09	2240
PSF_M. Březno blank	2,64	105	94,7	1,94	523
PSF_M. Březno 10g, 50°C	0,79	87,8	74,5	1,48	397
PSF_M. Březno 10g, 60°C	1,92	115	95,8	2,19	458
Redukce nZVI					
nZVI_Povrly blank	3,18	113	3160	1,95	2330
nZVI_Povrly 5g/l	2,78	101,0	2910	1,95	2100
nZVI_Povrly 10g/l	2,37	112	2720	1,71	1950
nZVI_M. Březno blank	3,09	116	100	1,89	604
nZVI_M. Březno 5g/L	3,00	116	175	2,29	619
nZVI_M. Březno 10g/L	2,41	103	203	1,84	537

Tabulka 6: Porovnání účinností jednotlivých testovaných metod na odbourání těžkých kovů

	Cd účinnost [%]	Pb účinnost [%]	Cu účinnost [%]	Hg účinnost [%]	Zn účinnost [%]
Termická desorpce					
TD_Povrly -blank					
TD_Povrly 350°C, 3h	x	x	x	100	x
TD_Povrly 350°C, 6h,	x	x	1	100	x
TD_Povrly 350°C, 24h	x	x	2	100	x
TD_Povrly 500°C, 3h	11	14	10	100	x
TD_Povrly 500°C, 6h	11	14	5	100	x
TD_M. Březno blank					
TD_M. Březno 350°C, 3h	5	13	24	100	10
TD_M. Březno 350°C, 6h	6	12	30	100	7
TD_M. Březno 350°C, 24h,	3	1	33	94	x
TD_M. Březno 500°C, 3h	11	11	36	100	x
TD_M. Březno 500°C, 6h	8	10	25	100	x
Vymytí za použití surfaktantu					
SDS_Povrly blank					
SDS 1% Povrly, 2g SDS	x	x	x	x	x
SDS 3% Povrly, 6g SDS	x	x	11	1	14
SDS 5% Povrly, 10g SDS	x	x	12	15	14
SDS_M. Březno blank					
SDS 1% M. Březno, 2g SDS	3	2	x	16	x
SDS 3% M. Březno, 6g SDS	x	2	7	28	4
SDS 5% M. Březno, 10g SDS	2	9	8	34	10
Oxidace persulfátem akt. teplotou					
PSF_Povrly blank					
PSF_Povrly 10g, 50°C	8	6	22	33	29
PSF_Povrly 10g, 60°C	x	x	9	x	8
PSF_M. Březno blank					
PSF_M. Březno 10g, 50°C	70	16	21	24	24
PSF_M. Březno 10g, 60°C	27	x	x	x	12
Redukce nZVI					
nZVI_Povrly blank					
nZVI_Povrly 5g/l	13	11	8	x	10
nZVI_Povrly 10g/l	25	1	14	12	16
nZVI_M. Březno blank					
nZVI_M. Březno 5g/L	3	0	x	x	x
nZVI_M. Březno 10g/L	22	11	x	3	11

Z pohledu účinnosti jednotlivých sanačních metod pro dekontaminaci těžkých kovů (konkrétně Cu a Hg) přítomných v odtěžených sedimentech se jako nejefektivnější ukázala termická desorpce. V případě Hg byla tato metoda 100% úspěšná a došlo ke kompletnímu odbourání zmíněného polutantu již po třech hodinách při 350°C u sedimentů z obou lokalit. V případě Cu byla účinnost metody se sedimenty z lokality Malé Březno okolo 30% a u sedimentů z lokality Povrly 10% při teplotě 500°C. Co se týče ostatních těžkých kovů, účinnost metody na odbourání Cd se za použití vyšší teploty pohybovala okolo 10% pro obě lokality, účinnost metody na odbourání Pb se pohybovala u lokality Povrly okolo 15% za použití vyšší teploty a u lokality Malé Březno okolo 10% již za teploty nižší. Z hlediska odbourání Zn byla účinnost neurčitá. Účinnost metody oxidace persulfátem aktivovaným teplotou na odbourání Cu ze sedimentů obou lokalit se pohybovala okolo 20%, v případě Hg okolo 25%, v případě Cd se účinnost pohybovala až okolo 70% u lokality Malé Březno a u lokality Povrly se účinnost blížila 10%. V případě Pb se pohybovala účinnost metody kolem 5% u lokality Povrly a kolem 15% u lokality Malé Březno. Účinnost metody na odbourání zinku se pohybovala okolo 25% pro obě lokality. Metoda praní půdy za použití surfaktantu dodecylsíranu sodného (SDS) byla účinná na odbourání Cu ze sedimentů obou lokalit z 10% za

použití vyšších koncentrací. Z hlediska schopnosti odbourání Hg bylo SDS o nejvyšší koncentraci účinné 15% na sedimenty lokality Povrly a 30% u lokality Malé Březno. Účinnost metody praní půdy na odbourání Cd byla téměř nulová, na odbourání Pb se za použití nejvyšší koncentrace pohybovala okolo 10% u lokality Malé Březno, u lokality Povrly byla však metoda neúčinná. Z hlediska schopnosti odbourání Zn bylo SDS o nejvyšší koncentraci účinné 15% na sedimenty lokality Povrly a 10% u lokality Malé Březno. Účinnost metody redukce nZVI NANO FER STAR na odbourání Cu ze sedimentů lokality Povrly se pohybovala okolo 10%. Z hlediska schopnosti odbourání Hg bylo nZVI o nejvyšší koncentraci účinné 12% na sedimenty lokality Povrly. U lokality Malé Březno k žádné redukci Hg nedošlo. Metoda byla účinná na redukci Cd z 25% pro obě lokality, na redukci Pb byla účinná okolo 10% pro obě lokality a na redukci Zn také okolo 10% opět pro obě lokality. (Tabulka 6)

Tabulka 7: Koncentrace polyaromatických uhlovodíků po různých metodách sanačního ošetření

Polyaromatické uhlovodíky	Fluoranthen mg/kg suš.	Benzo(b)fluoranthen mg/kg suš.	Benzo(k)fluoranthen mg/kg suš.	Benzo(a)pyren mg/kg suš.	Benzo(g,h,i)perylene mg/kg suš.	Indeno(1,2,3-c,d)pyren mg/kg suš.	Fenantren mg/kg suš.	Antracen mg/kg suš.	Pyren mg/kg suš.	Benzo(a)antracen mg/kg suš.	Chrysen mg/kg suš.	Naftalen mg/kg suš.	Suma PAU mg/kg suš.
počáteční blank Povrly 4 (10 kg kbelík)	1,308	0,642	0,27	0,484	0,439	0,312	0,638	0,12	1,341	0,581	0,577	0,108	5,950
počáteční blank M. Březno A (10 kg kbelík)	1,147	0,64	0,276	0,461	0,43	0,347	0,615	0,207	1,13	0,538	0,594	0,117	5,540
Dolní prahová hodnota	-	-	-	0,01	-	-	-	0,03	-	-	-	-	-
Horní prahová hodnota	0,18	-	-	0,6	-	-	-	0,31	-	-	-	-	-
Indikátory znečišt. Ostatní plochy	2300	0,15	1,5	0,015	-	0,15	-	3400	1700	0,15	15	3,6	-
Termická desorpce													
TD_Povrly -blank	1,682	0,663	0,304	0,551	0,401	0,432	0,957	0,178	1,323	0,600	0,610	0,325	6,86
TD_Povrly 350°C, 3h	0,002	0	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	<0,001	0,004	0	0,001	0,022	0,007
TD_Povrly 350°C, 6h	0,002	0	<0,001	0	<0,001	0	0,001	0,001	0,002	0	0,001	0,015	0,006
TD_Povrly 350°C, 24h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	<0,001	0,001	0	<0,001	0,015	0,001
TD_Povrly 500°C, 3h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	<0,001	0,001	0	<0,001	0,022	0,001
TD_Povrly 500°C, 6h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	0,003	<0,001	<0,001	0,000	<0,001	0,020	0,004
TD_M. Březno blank	1,145	0,667	0,273	0,441	0,357	0,497	0,587	0,219	1,201	0,557	0,558	0,158	5,62
TD_M. Březno 350°C, 3h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	0,001	<0,001	<0,001	0	<0,001	0,023	0,001
TD_M. Březno 350°C, 6h	0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	<0,001	0,003	0,001	0,001	0,022	0,006
TD_M. Březno 350°C, 24h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	0,001	<0,001	0,001	0	0,001	0,018	0,003
TD_M. Březno 500°C, 3h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0,001	0,001	0	<0,001	0,014	0,001
TD_M. Březno 500°C, 6h	<0,001	0	<0,001	0	<0,001	0	0,001	<0,001	<0,001	0	<0,001	0,014	0,001
Vymytí za použití surfaktantu													
SDS_Povrly blank	2,879	1,053	0,516	0,909	0,702	0,629	1,729	0,416	2,300	1,153	1,018	0,234	11,8
SDS 1%_Povrly, 2g SDS	1,222	1,645	0,233	0,413	0,340	0,324	0,462	0,111	1,061	0,485	0,496	0,300	5,04
SDS 3%_Povrly, 6g SDS	3,574	1,429	0,648	1,263	0,858	0,908	1,899	0,481	3,080	1,459	1,357	0,180	15,0
SDS 5%_Povrly, 10g SDS	1,255	0,491	0,231	0,417	0,282	0,331	0,664	0,118	1,076	0,491	0,527	0,162	5,27
SDS_M. Březno blank	1,100	0,614	0,268	0,423	0,306	0,429	0,525	0,178	1,168	0,519	0,531	0,162	5,27
SDS 1%_M. Březno, 2g SDS	1,121	0,590	0,270	0,440	0,301	0,418	0,481	0,179	1,025	0,544	0,518	0,157	5,12
SDS 3%_M. Březno, 6g SDS	1,088	0,610	0,263	0,409	0,302	0,358	0,520	0,191	1,103	0,507	0,519	0,163	5,07
SDS 5%_M. Březno, 10g SDS	1,070	0,556	0,251	0,405	0,296	0,349	0,477	0,172	0,975	0,489	0,495	0,169	4,81
Oxidace persulfátem akt. teplotou													
PSF_Povrly blank	2,744	1,185	0,520	0,814	0,744	0,424	0,980	0,232	2,585	1,106	1,045	0,597	11,00
PSF_Povrly 10g, 50°C	1,234	0,586	0,252	0,419	0,347	0,375	0,478	0,086	0,997	0,595	0,461	0,136	5,16
PSF_Povrly 10g, 60°C	0,693	0,368	0,163	0,254	0,221	0,123	0,295	0,052	0,649	0,358	0,333	0,215	3,09
PSF_M. Březno blank	1,092	0,615	0,260	0,438	0,414	0,368	0,487	0,201	1,025	0,467	0,506	0,199	5,06
PSF_M. Březno 10g, 50°C	0,888	0,524	0,225	0,252	0,271	0,295	0,557	0,090	0,770	0,387	0,463	0,210	4,11
PSF_M. Březno 10g, 60°C	1,038	0,527	0,222	0,086	0,295	0,233	0,484	0,072	0,878	0,402	0,482	0,185	4,12
Redukce nZVI													
nZVI_Povrly blank	0,998	0,504	0,229	0,381	0,301	0,291	0,451	0,103	0,900	0,553	0,410	0,161	4,51
nZVI_Povrly 5g/l	1,381	0,602	0,274	0,442	0,349	0,429	0,650	0,163	1,336	0,697	0,532	0,219	6,09
nZVI_Povrly 10g/l	1,038	0,508	0,226	0,413	0,349	0,395	0,533	0,092	1,001	0,446	0,437	0,099	4,84
nZVI_M. Březno blank	1,204	0,698	0,307	0,499	0,409	0,490	0,589	0,218	1,183	0,567	0,549	0,152	5,80
nZVI_M. Březno 5g/L	1,593	0,752	0,331	0,581	0,484	0,492	0,857	0,244	1,252	0,633	0,652	0,183	6,88
nZVI_M. Březno 10g/L	2,020	0,875	0,401	0,716	0,570	0,584	1,195	0,311	2,030	0,870	0,821	0,193	9,21

Tabulka 8: Porovnání účinností jednotlivých testovaných metod na odbourání PAU

	Benzo(b)fluoranthen účinnost [%]	Benzo(a)pyren účinnost [%]	Indeno(1,2,3-c,d)pyren účinnost [%]	Benzo(a)antracen účinnost [%]
Termická desorpce				
TD_Povrly -blank				
TD_Povrly 350°C, 3h	100	100	100	100
TD_Povrly 350°C, 6h,	100	100	100	100
TD_Povrly 350°C, 24h	100	100	100	100
TD_Povrly 500°C, 3h	100	100	100	100
TD_Povrly 500°C, 6h	100	100	100	100
TD_M. Březno blank				
TD_M. Březno 350°C, 3h	100	100	100	100
TD_M. Březno 350°C, 6h	100	100	100	100
TD_M. Březno 350°C, 24h,	100	100	100	100
TD_M. Březno 500°C, 3h	100	100	100	100
TD_M. Březno 500°C, 6h	100	100	100	100
Vymytí za použití surfaktantu				
SDS_Povrly blank				
SDS 1% Povrly, 2g SDS	x	55	48	58
SDS 3% Povrly, 6g SDS	x	x	x	x
SDS 5% Povrly, 10g SDS	53	54	47	57
SDS_M. Březno blank				
SDS 1%_M. Březno, 2g SDS	4	x	3	x
SDS 3%_M. Březno, 6g SDS	1	3	17	2
SDS 5%_M. Březno, 10g SDS	9	4	19	6
Oxidace persulfátem akt. teplotou				
PSF_Povrly blank				
PSF_Povrly 10g, 50°C	51	49	12	46
PSF_Povrly 10g, 60°C	69	69	71	68
PSF_M. Březno blank				
PSF_M. Březno 10g, 50°C	15	42	20	17
PSF_M. Březno 10g, 60°C	14	80	37	14
Redukce nZVI				
nZVI_Povrly blank				
nZVI_Povrly 5g/l	x	x	x	x
nZVI_Povrly 10g/l	x	x	x	19
nZVI_M. Březno blank				
nZVI_M. Březno 5g/L	x	x	x	x
nZVI_M. Březno 10g/L	x	x	x	x

Na odbourání polyaromatických uhlovodíků z odtěžených sedimentů obou lokalit byla nejúspěšnější opět metoda termické desorpce. Již po třech hodinách za vystavení teplotě 350°C byly PAU ze sedimentů kompletně odbourány. Metoda oxidace persulfátem aktivovaným teplotou byla účinná u lokality Povrly z 70% a účinnost odbourání PAU ze sedimentů lokality Malé Březno se pohybovala mezi 30-80% v závislosti na typu kontaminantu. Metoda praní půdy za použití surfaktantu SDS o nejvyšší testované koncentraci byla účinná na sedimenty lokality Povrly z 50-60% a na sedimenty lokality Malé Březno z 5-20% opět v závislosti na konkrétním typu kontaminantu. Metoda redukce nZVI na odbourání PAU se ukázala jako zcela neúčinná. (Tabulka 8)

Tabulka 9: Koncentrace polychlorovaných bifenyly po různých metodách sanačního ošetření

Polychlorované bifenyly	PCB kong. 28 μg/kg suš.	PCB kong. 52 μg/kg suš.	PCB kong. 101 μg/kg suš.	PCB kong. 118 μg/kg suš.	PCB kong. 138 μg/kg suš.	PCB kong. 153 μg/kg suš.	PCB kong. 180 μg/kg suš.	PCB suma kong. (7) μg/kg suš.
počáteční blank Povrly 4 (10 kg kbelík)	<5,00	19,1	49,6	11,9	139	176	121	517
počáteční blank M. Březno A (10 kg kbelík)	5,93	23,9	18,8	<5,00	39	52	39,9	180
Dolní prahová hodnota	0,1	0,54	0,43	1	1,5	0,44	0,04	0,1
Horní prahová hodnota	20	20	20	20	20	20	20	20
indikátory znečist. Ostatní plochy	110	110	110	110	110	110	110	220
Termická desorpce								
TD_Povrly -blank	8,15	16,0	29,6	6,99	74,7	88,9	65,7	290
TD_Povrly 350°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 350°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 350°C, 24h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 500°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 500°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M. Březno blank	0	21,1	17,7	<5,00	40,7	48,6	41,8	180
TD_M. Březno 350°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M. Březno 350°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M. Březno 350°C, 24h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M. Březno 500°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M. Březno 500°C, 6h	0	0	0	0	5,73	9,30	5,11	20,1
Vymytí za použití surfaktantu								
SDS_Povrly blank	11,5	23,2	33,1	7,33	80,8	90,2	79,8	326
SDS 1%_Povrly, 2g SDS	10,8	19,3	34,2	11,0	87,9	101	82,3	347
SDS 3%_Povrly, 6g SDS	9,75	20,6	29,0	7,60	73,2	86,9	71,2	298
SDS 5%_Povrly, 10g SDS	9,27	20,4	41,0	9,28	126	111	104	421
SDS_M. Březno blank	8,55	34,9	30,0	6,57	57,3	67,3	64,8	269
SDS 1%_M. Březno, 2g SDS	10,6	33,4	45,7	9,74	108	123	117	447
SDS 3%_M. Březno, 6g SDS	8,83	36,9	28,7	6,13	48,3	58,5	54,2	242
SDS 5%_M. Březno, 10g SDS	9,40	46,8	32,7	5,49	49,5	62,0	56,2	262
Oxidace persulfátem akt. teplotou								
PSF_Povrly blank	11,1	23,5	54,1	11,70	147	169	124	540
PSF_Povrly 10g, 50°C	7,36	16,8	29,7	5,74	71,2	84,0	70,8	286
PSF_Povrly 10g, 60°C	15,4	32,4	79,9	17,10	221	258	221	845
PSF_M. Březno blank	7,57	35,5	26,0	5,72	50,1	59,6	53,6	238
PSF_M. Březno 10g, 50°C	7,53	28,1	22,2	5,98	41,1	44,2	42,6	192
PSF_M. Březno 10g, 60°C	11,5	46,1	35,6	7,40	68,9	81,1	75,4	326
Redukce nZVI								
nZVI_Povrly blank	5,9	14,8	34,9	7,41	99,1	102	104	368
nZVI_Povrly 5g/l	7,47	19,9	32,2	5,60	66,0	85,7	62,1	279
nZVI_Povrly 10g/l	9,5	19,1	32,0	6,53	75	91,4	72,7	306
nZVI_M. Březno blank	6,12	25,6	22,9	0,00	39	45,4	36,7	176
nZVI_M. Březno 5g/L	5,35	29,0	34,1	0,00	46,2	53,2	51,9	220
nZVI_M. Březno 10g/L	6,2	24,9	24,3	0,00	39,5	58,9	38,4	192

Tabulka 10: Porovnání účinností jednotlivých testovaných metod na odbourání PCB

	PCB kong. 138 účinnost [%]	PCB kong. 153 účinnost [%]	PCB kong. 180 účinnost [%]	PCB suma kong. (7) účinnost [%]
Termická desorpce				
TD_Povrly -blank				
TD_Povrly 350°C, 3h	100	100	100	100
TD_Povrly 350°C, 6h	100	100	100	100
TD_Povrly 350°C, 24h	100	100	100	100
TD_Povrly 500°C, 3h	100	100	100	100
TD_Povrly 500°C, 6h	100	100	100	100
TD_M. Březno blank				
TD_M. Březno 350°C, 3h	100	100	100	100
TD_M. Březno 350°C, 6h	100	100	100	100
TD_M. Březno 350°C, 24h	100	100	100	100
TD_M. Březno 500°C, 3h	100	100	100	100
TD_M. Březno 500°C, 6h	86	81	88	89
Vymytí za použití surfaktantu				
SDS_Povrly blank				
SDS 1% Povrly, 2g SDS	x	x	x	x
SDS 3% Povrly, 6g SDS	9	4	11	9
SDS 5% Povrly, 10g SDS	x	x	x	x
SDS_M. Březno blank				
SDS 1% M. Březno, 2g SDS	x	x	x	x
SDS 3% M. Březno, 6g SDS	16	13	16	10
SDS 5% M. Březno, 10g SDS	14	8	13	3
Oxidace persulfátem akt. teplotou				
PSF_Povrly blank				
PSF_Povrly 10g, 50°C	52	50	43	47
PSF_Povrly 10g, 60°C	x	x	x	x
PSF_M. Březno blank				
PSF_M. Březno 10g, 50°C	18	26	21	19
PSF_M. Březno 10g, 60°C	x	x	x	x
Redukce nZVI				
nZVI_Povrly blank				
nZVI_Povrly 5g/l	33	16	40	24
nZVI_Povrly 10g/l	24	10	30	17
nZVI_M. Březno blank				
nZVI_M. Březno 5g/L	x	x	x	x
nZVI_M. Březno 10g/L	x	x	x	x

V případě odbourání PCB ze sedimentů obou lokalit byla opět nejúčinnější metoda termické desorpce. Kompletního odbourání PCB jsme dosáhli již po třech hodinách za vystavení teplotě 350°C. Oxidace persulfátem aktivovaným teplotou byla u lokality Povrly účinná z 50% a u lokality Malé Březno z 20%. Účinnost metody praní půdy za použití surfaktantu se pohybovala pro lokalitu Povrly mezi 5-10% a pro lokalitu Malé Březno mezi 10-15%. Účinnost redukce nZVI se u lokality Povrly pohybovala mezi 10-40% a u lokality Malé Březno byla účinnost této metody nulová. (Tabulka 11)

Tabulka 11: Koncentrace organicky chlorovaných pesticidů po různých metodách sanačního ošetření

Organicky chlorované pesticidy	alfa - HCH µg/kg suš.	beta - HCH µg/kg suš.	gama - HCH (lindan) µg/kg suš.	delta - HCH µg/kg suš.	epsilon - HCH µg/kg suš.	o,p'-DDD µg/kg suš.	p,p'-DDD µg/kg suš.	o,p'-DDE µg/kg suš.	p,p'-DDE µg/kg suš.	o,p'-DDT µg/kg suš.	p,p'-DDT µg/kg suš.	Hexachlorbenzen µg/kg suš.
počáteční blank Povrly 4 (10 kg kbelík)	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	37,2	88,7	<5,00	16,1	61,4	175	236
počáteční blank M. Březno A (10 kg kbelík)	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	112	150	<5,00	13,1	8,98	17,4	49,8
Dolní prahová hodnota	0,5	-	0,5				0,06		0,31		1	0,0004
Horní prahová hodnota	1,5	5	1,5				3,2		6,8		3	17
Indikátory znečišť. Ostatní plochy	77		520				2000		1400	1700	1700	300
Termická desorpce												
TD_Povrly -blank	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	32,2	54,8	0	16,2	33,8	40,1	462
TD_Povrly 350°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 350°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 350°C, 24h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 500°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_Povrly 500°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M_Březno blank	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	153	227	<5,00	12,5	6,24	11,9	47,2
TD_M_Březno 350°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M_Březno 350°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M_Březno 350°C, 24h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M_Březno 500°C, 3h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TD_M_Březno 500°C, 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vymytí za použití surfaktantu												
SDS_Povrly blank	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	46,5	109	33,1	25,6	15,0	11,9	1130
SDS 1%_Povrly, 2g SDS	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	38,4	112	0	21,2	20,3	50,4	488
SDS 3%_Povrly, 6g SDS	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	43,1	80,4	0	18,9	16,0	12,8	307
SDS 5%_Povrly, 10g SDS	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	41,5	213	0	17,3	22,8	60,8	622
SDS_M_Březno blank	<5,00	5,10	<5,00	<5,00	<5,00	164	327	0	20,5	9,36	11,0	94,2
SDS 1%_M_Březno, 2g SDS	<5,00	14,0	<5,00	<5,00	<5,00	150	137	0	17,7	0	7,60	227
SDS 3%_M_Březno, 6g SDS	<5,00	11,7	<5,00	<5,00	<5,00	156	186	0	17,7	0	14,9	64,4
SDS 5%_M_Březno, 10g SDS	<5,00	6,27	<5,00	<5,00	<5,00	145	407	0	18,9	7,66	13,9	75,7
Oxidace persulfátem akt. teplotou												
PSF_Povrly blank	<5,00	7,18	<5,00	<5,00	<5,00	38	115	0	22,9	21,6	294	296
PSF_Povrly 10g, 50°C	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	29,7	101	0	14,3	55,7	498	230
PSF_Povrly 10g, 60°C	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	60	244	6,53	30,8	34,7	88,7	713
PSF_M_Březno blank	<5,00	<5,00	12,7	<5,00	<5,00	151	241	0	17,4	14,1	55,4	161
PSF_M_Březno 10g, 50°C	<5,00	6,07	<5,00	<5,00	<5,00	119,00	131	0	13,7	0	12,6	61,1
PSF_M_Březno 10g, 60°C	<5,00	10,6	<5,00	<5,00	<5,00	241	322	6,14	27,3	10,4	49,8	151
Redukce nZVI												
nZVI_Povrly blank	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	24	47	<5,00	13,0	9,59	93,2	311
nZVI_Povrly 5g/l	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	46,0	172	<5,00	17,9	128,0	617	272
nZVI_Povrly 10g/l	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	26	55	<5,00	17,7	15,4	68,3	285
nZVI_M_Březno blank	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	148	227	<5,00	15,1	8,36	44	70,4
nZVI_M_Březno 5g/L	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	71,50	87	<5,00	10,9	0	12,6	230
nZVI_M_Březno 10g/L	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	64,2	95	<5,00	13,6	0	0	335

Tabulka 12: Porovnání účinností jednotlivých testovaných metod na odbourání organicky chlorovaných pesticidů

	o,p'-DDD účinnost [%]	p,p'-DDD účinnost [%]	o,p'-DDE účinnost [%]	p,p'-DDE účinnost [%]	o,p'-DDT účinnost [%]	p,p'-DDT účinnost [%]	Hexachlorbenzen účinnost [%]
Termická desorpce							
TD_Povrly -blank							
TD_Povrly 350°C, 3h	100	100		100	100	100	100
TD_Povrly 350°C, 6h	100	100		100	100	100	100
TD_Povrly 350°C, 24h	100	100		100	100	100	100
TD_Povrly 500°C, 3h	100	100		100	100	100	100
TD_Povrly 500°C, 6h	100	100		100	100	100	100
TD_M. Březno blank							
TD_M. Březno 350°C, 3h	100	100		100	100	100	100
TD_M. Březno 350°C, 6h	100	100		100	100	100	100
TD_M. Březno 350°C, 24h,	100	100		100	100	100	100
TD_M. Březno 500°C, 3h	100	100		100	100	100	100
TD_M. Březno 500°C, 6h	100	100		100	100	100	100
Vymytí za použití surfaktantu							
SDS_Povrly blank							
SDS 1%_Povrly, 2g SDS	17	x	100	17	x	x	57
SDS 3%_Povrly, 6g SDS	7	26	100	26	x	x	73
SDS 5%_Povrly, 10g SDS	11	x	100	32	x	x	45
SDS_M. Březno blank							
SDS 1%_M. Březno, 2g SDS	9	58		14	100	31	x
SDS 3%_M. Březno, 6g SDS	5	43		14	100	x	32
SDS 5%_M. Březno, 10g SDS	12	x		8	18	x	20
Oxidace persulfátem akt. teplotou							
PSF_Povrly blank							
PSF_Povrly 10g, 50°C	22	12		38	x	x	22
PSF_Povrly 10g, 60°C	x	x		x	x	70	x
PSF_M. Březno blank							
PSF_M. Březno 10g, 50°C	21	46		21	100	77	62
PSF_M. Březno 10g, 60°C	x	x		x	26	10	6
Redukce nZVI							
nZVI_Povrly blank							
nZVI_Povrly 5g/l	x	x		x	x	x	13
nZVI_Povrly 10g/l	x	x		x	x	x	8
nZVI_M. Březno blank							
nZVI_M. Březno 5g/L	52	62		28	100	71	x
nZVI_M. Březno 10g/L	57	58		10	100	100	x

I z hlediska odbourání organicky chlorovaných pesticidů z odtěžených sedimentů byla nejúčinnější metody termické desorpce, kdy již po třech hodinách (350°C) byly polutanty kompletně odbourány. Metoda oxidace persulfátem a vymytí za použití SDS fungovaly odlišně v závislosti na konkrétním typu pesticidu a jejich účinnosti se rapidně lišily. Účinnost metody redukce nZVI u lokality Malé Březno byla poměrně vysoká. Pohybovala se mezi 50-100% v závislosti na konkrétním typu pesticidu. Na sedimenty lokality Povrly redukce nZVI nefungovala. (Tabulka 12).

c) Závěr

V laboratořích TUL byly otestovány tři typy navrhovaných sanačních metod (termická desorpce, oxidace persulfátem sodným aktivovaným teplotou a vymytí za pomoci surfaktantu) pro dekontaminaci sedimentů v povodí Labe a analýzy těchto experimentů byly prováděny v laboratořích AQ. Sedimenty byly kontaminované jak organickými (polyaromatické uhlovodíky (PAU), polychlorované bifenyly (PCB), organicky chlorované pesticidy), tak anorganickými látkami (těžké kovy – Cu, Hg, Zn, Pb a Cd). Metoda redukce za použití nanočástic nulmocného železa byla odzkoušena jako náhrada za metodu dekontaminace technologií CDC. V minulosti byly na Technické Univerzitě v Liberci provedeny série rektorových testů, v rámci kterých byla provedena základní literární rešerše zaměřená na možnosti zvýšení reaktivity ZVI úpravou jejich povrchu, vytvořením nesouvislé vrstvy druhého kovu na povrchu ZVI, která funguje jako katalyzátor chemických reakcí a zvyšuje tak reaktivitu výsledných částic. Výsledky rešerše potvrdily, že při použití částic jiných kovů na povrchu ZVI jako katalyzátorů, lze zásadně zvýšit reaktivnost ZVI, a to až o 2 řády. Z pohledu reaktivity dosahují nejlepších výsledků bimetalické částice s kombinací Pd/Fe, širšímu použití však brání jejich ekonomická náročnost. Tuto nevýhodu bez zásadního poklesu výsledné reaktivity odstraňují další dvě nalezené modifikace Ni/Fe a Cu/Fe, které dosahují velmi podobné reaktivity. Z provedených laboratorních rektorových testů vyplynulo, že reaktivita povrchově upraveného nZVI/Cu je velmi podobná jako reaktivita povrchově neupraveného nZVI a proto testy dekontaminace sedimentů byly provedeny pouze s nZVI.

Výsledky jsou shrnuty v tabulce níže. Z výše uvedených výsledků jednotlivých experimentů fungovala na tuto složitou směsnou kontaminaci nejlépe termická desorpce. Byly testovány dvě teploty (350 a 500 °C a tři doby zdržení (3, 6 a 24h). Již za teploty 350 °C a po třech hodinách došlo ke kompletnímu odbourání organické kontaminace a Hg. Koncentrace Cu zůstala v matrici takřka neměnná, díky vysokému bodu varu mědi a protože je na sedimenty jinak vázaná. Konkrétně byla účinnost metody na odbourání Cu přítomné v sedimentech z lokality Malé Březno okolo 30% a v sedimentech z lokality Povrly 10% při teplotě 500°C. Co se týče ostatních těžkých kovů, účinnost metody na odbourání Cd se za použití vyšší teploty pohybovala okolo 10% pro obě lokality, účinnost metody na odbourání Pb se pohybovala u lokality Povrly okolo 15% za použití vyšší teploty a u lokality Malé Březno okolo 10% již za teploty nižší. Z hlediska odbourání Zn byla účinnost neurčitá.

Další testovanou metodou byla oxidace persulfátem sodným (PSF) aktivovaným teplotou. Použitá koncentrace byla 10g PSF na 200g zeminy a zkoušely se dvě teploty, 50°C a 60°C. Výsledky dekontaminace sedimentů za použití PSF však nebyly takové, jaké se dle rešerše a předchozích zkušeností očekávalo. Účinnost metody oxidace persulfátem aktivovaným teplotou na odbourání Cu ze sedimentů obou lokalit se pohybovala okolo 20% a v případě Hg okolo 25%. Účinnost metody oxidace persulfátem aktivovaným teplotou na odbourání Cu ze sedimentů obou lokalit se pohybovala okolo 20%, v případě Hg okolo 25%, v případě Cd se účinnost pohybovala až okolo 70% u lokality Malé Březno a u lokality Povrly se účinnost blížila 10%. V případě Pb se

pohybovala účinnost metody kolem 5% u lokality Povrly a kolem 15% u lokality Malé Březno. Účinnost metody na odbourání zinku se pohybovala okolo 25% pro obě lokality. Metoda oxidace persulfátem aktivovaným teplotou byla účinná na odbourání PAU u lokality Povrly z 70% a účinnost odbourání PAU ze sedimentů lokality Malé Březno se pohybovala mezi 30-80% v závislosti na typu kontaminantu. Na odbourání PCB z odtěžených sedimentů byla oxidace persulfátem aktivovaným teplotou u lokality Povrly účinná z 50% a u lokality Malé Březno z 20%. Na organicky chlorované pesticidy fungovala metoda zcela odlišně v závislosti na konkrétním typu pesticidu a účinnost na odbourání jednotlivých typů pesticidů se výrazně lišila.

Poslední testovanou metodou bylo praní půdy za použití surfaktantu dodecylsírany sodného (SDS). Testovaly se tři koncentrace SDS (2g, 6g a 10g na 200g zeminy). I v tomto případě se očekávaly výraznější poklesy koncentrací polutantů (zejména Cu, Zn a některých organických polutantů) dle rešerše. Metody praní půdy za použití surfaktantu dodecylsírany sodného (SDS) byla účinná na odbourání Cu ze sedimentů obou lokalit z 10% za použití vyšších koncentrací. Z hlediska schopnosti odbourání Hg bylo SDS o nejvyšší koncentraci účinné 15% na sedimenty lokality Povrly a 30% u lokality Malé Březno. Účinnost metody praní půdy na odbourání Cd byla téměř nulová, na odbourání Pb se za použití nejvyšší koncentrace pohybovala okolo 10% u lokality Malé Březno, u lokality Povrly byla však metoda neúčinná. Z hlediska schopnosti odbourání Zn bylo SDS o nejvyšší koncentraci účinné 15% na sedimenty lokality Povrly a 10% u lokality Malé Březno. Účinnost metody praní půdy za použití surfaktantu SDS o nejvyšší testované koncentraci na odbourání PAU byla u lokality Povrly 50-60% a u lokality Malé Březno z 5-20% v závislosti na konkrétním typu kontaminantu. Účinnost metody praní půdy za použití surfaktantu na odbourání PCB se pohybovala pro lokalitu Povrly mezi 5-10% a pro lokalitu Malé Březno mezi 10-15%. Stejně jako u metody oxidace persulfátem i tato metoda fungovala odlišně na organicky chlorované pesticidy v závislosti na konkrétním typu pesticidu a účinnost na odbourání jednotlivých typů pesticidů se výrazně lišila.

Účinnost metody redukce nZVI NANOFER STAR na odbourání Cu ze sedimentů lokality Povrly se pohybovala okolo 10%. Z hlediska schopnosti odbourání Hg bylo nZVI o nejvyšší koncentraci účinné 12% na sedimenty lokality Povrly. U lokality Malé Březno k žádné redukci Hg nedošlo. Metoda byla účinná na redukci Cd z 25% pro obě lokality, na redukci Pb byla účinná okolo 10% pro obě lokality a na redukci Zn také okolo 10% opět pro obě lokality. Metoda redukce nZVI na odbourání PAU se ukázala jako zcela neúčinná. Účinnost redukce nZVI na PCB se u lokality Povrly pohybovala mezi 10-40% a u lokality Malé Březno byla účinnost této metody nulová. Účinnost metody redukce nZVI na organicky chlorované pesticidy u lokality Malé Březno byla poměrně vysoká. Pohybovala se mezi 50-100% v závislosti na konkrétním typu pesticidu. Na sedimenty lokality Povrly redukce nZVI nefungovala.

Shrnutí účinností testovaných metod na odbourání jednotlivých skupin polutantů je znázorněn na následujících tabulkách.

Tabulka 13: Souhrn účinností testovaných metod na odbourání těžkých kovů pro jednotlivé lokality

POVRLY	Cu	Hg
Termická desorpce	10% účinnost při 500°C	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	20% účinnost	25% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	10% účinnost za použití vyšších koncentrací	15% účinnost za použití nejvyšší koncentrace
Redukce nZVI	15% účinnost za použití vyšší koncentrace (10 g/l)	10% účinnost za použití vyšší koncentrace (10 g/l)
POVRLY	Cd	Pb
Termická desorpce	10% účinnost při 500°C	15% účinnost při 500°C
Oxidace Persulfátem	10% účinnost	5% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	---	---
Redukce nZVI	20% účinnost za použití vyšší koncentrace (10 g/l)	10% účinnost
POVRLY	Zn	
Termická desorpce	---	
Oxidace Persulfátem	30% účinnost	
Praní půdy za pomoci SDS	15% účinnost za použití vyšších koncentrací	
Redukce nZVI	10-15% účinnost	

MALÉ BŘEZNO	Cu	Hg
Termická desorpce	30% účinnost při 500°C	100% účinnost již po třech hodinách za teploty 350°C
Oxidace Persulfátem	20% účinnost	25% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	10% účinnost za použití nejvyšší koncentrace	30% účinnost za použití nejvyšší koncentrace
Redukce nZVI	---	---
MALÉ BŘEZNO	Cd	Pb
Termická desorpce	10% účinnost při 500°C	10% účinnost již při 350°C
Oxidace Persulfátem	70% účinnost	15% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	---	10% účinnost za použití nejvyšší koncentrace
Redukce nZVI	20% účinnost za použití vyšší koncentrace	10% účinnost za použití vyšší koncentrace
MALÉ BŘEZNO	Zn	
Termická desorpce	10% účinnost při 350°C	
Oxidace Persulfátem	25% účinnost	

Praní půdy za pomoci SDS	10% účinnost za použití nejvyšší koncentrace	
Redukce nZVI	10% účinnost za použití vyšší koncentrace	

Tabulka 14: Souhrn účinností testovaných metod na odbourání polyaromatických uhlovodíků pro jednotlivé lokality

POVRLY	PAU
Termická desorpce	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	70% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	50-60% účinnost
Redukce nZVI	---

MALÉ BŘEZNO	PAU
Termická desorpce	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	30-80% účinnost v závislosti na konkrétním typu PAU
Praní půdy za pomoci SDS	5-20% účinnost v závislosti na konkrétním typu PAU
Redukce nZVI	---

Tabulka 15: Souhrn účinností testovaných metod na odbourání polychlorovaných bifenylů pro jednotlivé lokality

POVRLY	PCB
Termická desorpce	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	50% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	5-10% účinnost
Redukce nZVI	10-40% účinnost v závislosti na konkrétním typu PCB

MALÉ BŘEZNO	PCB
Termická desorpce	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	20% účinnost
Praní půdy za pomoci SDS	10-15% účinnost
Redukce nZVI	---

Tabulka 16: Souhrn účinností testovaných metod na odbourání organicky chlorovaných pesticidů pro jednotlivé lokality

POVRLY	Organicky chlorované pesticidy
Termická desorpce	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	Účinnost metody zcela odlišná v závislosti na konkrétním typu pesticidu
Praní půdy za pomoci SDS	Účinnost metody zcela odlišná v závislosti na konkrétním typu pesticidu
Redukce nZVI	---

MALÉ BŘEZNO	Organicky chlorované pesticidy
Termická desorpce	100% účinnost již po třech hodinách při teplotě 350°C
Oxidace Persulfátem	Účinnost metody zcela odlišná v závislosti na konkrétním typu pesticidu
Praní půdy za pomoci SDS	Účinnost metody zcela odlišná v závislosti na konkrétním typu pesticidu
Redukce nZVI	50-100% účinnost v závislosti na konkrétním typu pesticidu

Z laboratorních experimentů k otestování metod, které byly vybrány pro dekontaminaci říčních sedimentů kontaminovaných těžkými kovy, polyaromatickými uhlovodíky, polychlorovanými bifenylly a organicky chlorovanými pesticidy, vyšla nejlépe metoda termické desorpce, další dvě

testované metody (oxidace persulfátem sodným a praní půdy za pomoci tenzidu) také neměly špatné výsledky, ale dosahovaly daleko nižších účinností. Na základě provedených testů a jejich výsledků doporučujeme metodu termické desorpce a metodu oxidace persulfátem sodným k pilotnímu ověření.