

Optimalizace solidifikační receptury pomocí vícefaktorové regresní analýzy

Bc. Pavla Hřivnová

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství ochrany životního prostředí
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavla Hřivnová**
Osobní číslo: **T14814**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Inženýrství ochrany životního prostředí**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Optimalizace solidifikační receptury pomocí vícefaktorové regresní analýzy**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte literární rešerši o využití statistických metod při stabilizaci/solidifikaci odpadů.
2. U vybraného vzorku odpadu se pokuste optimalizovat solidifikační recepturu pomocí vícefaktorové regresní analýzy.
3. Ověřte účinnost stabilizace/solidifikace pro nalezenou optimální recepturu.
4. Výsledky kriticky zhodnoťte a přehledně písemně zpracujte.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. T. Michael Gilliam: **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes**, ASTM, 1992, ISBN 0-8031-1443-5.
2. Lung Kwang Pan at al.: **Optimization for solidification of low-level- radioactive resin using Taguchi analysis**, *Waste Management* 21 (2001) 767772.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vratislav Bednařík, Ph.D.**
Ústav inženýrství ochrany životního prostředí

Datum zadání diplomové práce: **2. února 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

Ve Zlíně dne 2. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Mgr. Marek Koutný, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Hřivnová Pavla

Obor: Inženýrství ochrany životního prostředí

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15. května 2016


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá stabilizací/solidifikací odpadu s vysokým obsahem zinku. Odpad pochází od španělské firmy, která provádí pozinkování kovových součástí. Byly provedeny vyluhovací testy solidifikovaného odpadu s těmito pojivy: cementem, cementem + popílkem, produktem fluidního spalování uhlí a cementem s přísadou aditiva, hydrogenuhličitanu sodného.

U všech směsí došlo ke značnému snížení obsahu zinku ve vodném výluhu. Ani v jednom případě však hodnota zinku neodpovídala limitům tříd vyluhovatelnosti podle vyhlášky 294/2005 Sb. Nejlépe se jeví metoda stabilizace/solidifikace odpadu s pojivem cement a aditivní přísadou hydrogenuhličitanu sodného.

Klíčová slova: nebezpečný odpad, stabilizace/solidifikace, pojivo, vodný výluh, zinek, rozpuštěné látky.

ABSTRACT

The thesis deals with stabilization/solidification of waste with high content of zinc. The waste comes from the Spanish company, which performs galvanizing of metal components. There were done for-leach tests of solidified waste with the following binders: cement, cement + fly ash, cement + the product of fluidized burning and cement with additives bicarbonate solution.

By all the blends there was a substantial reduction of the zinc content in the water leach but in neither case, the value of zinc did not complied with the limits of leachability classes according to Decree 294/2005 Coll. The best method seems to be the stabilization/solidification of the waste with the binder cement and additive ingredient bicarbonate.

Keywords: hazardous waste, stabilization/solidification, binder, aqueous extract, zinc, dissolved substances.

Děkuji doc. Ing. Vratislavu Bednaříkovi, Ph.D, vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, připomínky a rady při její realizaci.

Dále děkuji Ing. Štěpánu Vinterovi za pomoc při řešení problémů experimentální části diplomové práce a vytvoření dobrých pracovních podmínek.

Motto: „Když jdeš na start s tím, že nevyhraješ, je to předem prohraný závod“.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 LEGISLATIVA V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ	13
1.1 ZÁKONY, VYHLÁŠKY A NAŘÍZENÍ VLÁDY ČR	13
1.2 SMĚRNICE EU V OBLASTI ODPADŮ	14
1.3 PLÁN ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.....	14
2 NAKLÁDÁNÍ S ODPADY	15
2.1 ZÁSADY PŘI NAKLÁDÁNÍ S ODPADY	15
2.2 ZAŘAZENÍ ODPADŮ PODLE KATEGORIÍ	15
2.2.1 Nebezpečné odpady	15
2.2.2 Ostatní odpady.....	15
2.2.3 Komunální odpady	16
2.3 SKLÁDKOVÁNÍ ODPADŮ.....	17
3 VÝSKYT ZINKU	19
3.1 VLASTNOSTI ZINKU	19
3.2 VÝROBA ZINKU	20
3.3 VYUŽITÍ ZINKU	21
3.4 TOXICITA ZINKU	21
4 STABILIZACE/SOLIDIFIKACE ODPADŮ	23
4.1 PRINCIP	23
4.2 ZPŮSOBY STABILIZAČNÍCH/SOLIDIFIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	24
4.2.1 Cementace	24
4.2.2 Vitifikace.....	24
4.2.3 Bitumenace.....	24
4.3 POJIVA POUŽÍVANÁ PŘI STABILIZACI/SOLIDIFIKACI ODPADŮ	25
4.3.1 Anorganická pojiva	25
4.3.1.1 Cemynty	26
4.3.1.2 Vápno.....	27
4.3.1.3 Sádra	28
4.3.2 Organická pojiva	28
4.4 VÝHODY STABILIZACE/SOLIDIFIKACE ODPADŮ	28
4.5 VYUŽITÍ STATISTICKÝCH METOD PŘI STABILIZACI/SOLIDIFIKACI ODPADŮ	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	30
5 POUŽITÉ MATERIÁLY	31

5.1	CHARAKTERISTIKA ZKOUŠENÉHO ODPADU	31
5.2	POJIVA.....	31
5.2.1	Cement	31
5.2.2	Popílek.....	31
5.2.3	Fluidní produkt.....	31
5.3	POUŽITÉ CHEMIKÁLIE	32
5.4	PŘÍSTROJE A POMŮCKY	32
6	METODIKA	34
6.1	PŘÍPRAVA SOLIDIFIKAČNÍCH SMĚSÍ A JEJICH VÝLUHŮ	34
6.2	PŘÍPRAVA VODNÉHO VÝLUHU SOLIDIFIKOVANÉHO ODPADU	34
6.3	STANOVENÍ SUŠINY PŮVODNÍHO ODPADU	34
6.4	MĚŘENÍ PH.....	34
6.5	MĚŘENÍ MĚRNÉ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	35
6.6	STANOVENÍ CHLORIDŮ	35
6.7	STANOVENÍ ROZPUŠTĚNÝCH LÁTEK.....	35
6.8	STANOVENÍ HUSTOTY	36
6.9	PŘÍPRAVA KALIBRAČNÍCH ROZTOKŮ PRO STANOVENÍ ZINKU METODOU AAS.....	36
6.10	STANOVENÍ KONCENTRACE ZINKU METODOU AAS	37
6.11	MULTIFAKTORIÁLNÍ ANALÝZA	37
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUZE.....	38
7.1	HODNOCENÍ PŮVODNÍHO ODPADU	38
7.2	HODNOCENÍ SOLIDIFIKOVANÉHO ODPADU PO 28 DNECH.....	39
7.2.1	První sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu.....	39
7.2.2	Druhá sada – odpad solidifikovaný pomocí popílku.....	41
7.2.3	Třetí sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu a popílku.....	43
7.2.4	Čtvrtá sada – odpad solidifikovaný pomocí fluidního produktu.....	45
7.3	HODNOCENÍ SOLIDIFIKOVANÉHO ODPADU PO 56 DNECH.....	47
7.3.1	První sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu.....	47
7.3.2	Druhá sada – odpad solidifikovaný pomocí popílku.....	48
7.3.3	Třetí sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu a popílku.....	49
7.3.4	Čtvrtá sada – odpad solidifikovaný pomocí fluidního produktu.....	51
7.4	HODNOCENÍ ODPADU SOLIDIFIKOVANÉHO POMOCÍ CEMENTU A NaHCO_3	53
7.5	MULTIFAKTORIÁLNÍ ANALÝZA	55
7.5.1	Statistické vyhodnocení první sady po 56 dnech	55
7.5.2	Statistické vyhodnocení druhé sady po 56 dnech.....	55
7.5.3	Statistické vyhodnocení třetí sady po 56 dnech	56
7.5.4	Statistické vyhodnocení čtvrté sady po 56 dnech.....	56
7.6	OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI S/S PRO NALEZENOU OPTIMÁLNÍ RECEPTURU	57
	ZÁVĚR	58

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM TABULEK.....	64

ÚVOD

Odpady úzce souvisejí s ochranou životního prostředí. Mohou znečišťovat a ohrožovat všechny jeho složky, tj. vodu, půdu, ovzduší a negativně ovlivňovat všechny živé organismy, včetně lidí. Odpady mohou mít různé stupně působení, od pouhé přítomnosti, až po závadnost, mohou být zdraví škodlivé až toxické. To se projevuje například úhynem ryb, výskytem různých onemocnění apod.

Všechny činnosti člověka, v domácnosti, přírodě a průmyslové výrobě, provází vznik odpadů, které jsou různým způsobem nebezpečné. Posuzování vlivu odpadů a odpadních materiálů na zdraví člověka a životní prostředí je základním předpokladem pro rozhodnutí, jak máme s odpadem nakládat a do jaké míry je nutné zajistit ochranu životního prostředí. [23]

Produkce odpadů má často negativní dopad na životní prostředí. Přitom hlavní cíl týkající se životního prostředí z hlediska odpadů je jejich produkci snižovat.

Důležité je zejména předcházení vzniku odpadů, vyprodukované odpady znova využít pro pracovní činnost nebo odpady recyklovat a až potom zpracovat ve spalovně nebo dle platné legislativy uložit na skládku.

Podle platných právních předpisů není možné zejména nebezpečné odpady bez patřičné úpravy ukládat na skládky. Úpravy, u kterých se využívá fyzikálních a chemických vlastností jsou technologické procesy označované jako stabilizace/solidifikace, tedy S/S, při nichž dochází k izolaci přítomných škodlivin od složek životního prostředí. S takto upravenými odpady je lepší manipulace a konečné odstranění je i méně finančně náročné. Mnohdy takový odpad nevykazuje žádné nebezpečné vlastnosti a je ho možno uložit bez problémů na skládku ostatních odpadů.

Diplomová práce se zabývá stabilizací/solidifikací odpadu zahraniční firmy. Odpad s vysokým obsahem zinku vzniká tzv. pozinkováním, při nanášení vrstvy zinku na povrch ocelových výrobků. K návrhu vhodné receptury pro S/S odpadu se běžně používá metoda pokus – omyl. Ve své diplomové práci jsem zvolila systematictější postup s využitím statistiky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LEGISLATIVA V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ

Legislativa na úseku odpadového hospodářství se zabývá předcházením vzniku odpadů, nakládáním s nimi, stanovuje limity pro ukládání odpadů na skládky, určuje práva a povinnosti osob pohybujících se v oblasti odpadového hospodářství, prosazuje principy ochrany životního prostředí a zdraví lidí při nakládání s odpady a řeší princip kontrolní činnosti orgánů životního prostředí. [1]

1.1 Zákony, vyhlášky a nařízení vlády ČR

185/2001 Sb. Zákon o odpadech, ve znění pozdějších předpisů.

223/2015 Sb. Novela zákona 185/2001 Sb., o odpadech, platná od 1. října 2015.

100/2001 Sb. zákon o posuzování vlivů na životní prostředí (EIA *Environmental Impact Assessment*).

76/2002 Sb. Zákon o integrované prevenci a omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování životního prostředí.

294/2005 Sb. Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.

341/2008 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady).

93/2016 Sb. Vyhláška Ministerstva životního prostředí, o Katalogu odpadů.

94/2016 Sb. Vyhláška Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zdravotnictví o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů.

383/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady, která byla novelizována Vyhláškou č. 83/2016 Sb.

163/2012 Sb. Vyhláška MŽP o zásadách správné laboratorní praxe

83/2016 Sb. Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů.

352/2014 Sb. Nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 ze dne 22. prosince 2014.

1.2 Směrnice EU v oblasti odpadů

98/2008/ES směrnice EU ze dne 19. 11. 2008, o odpadech

91/689/ES směrnice EU ze dne 12. 12. 1991, o nebezpečných odpadech

99/31/ES směrnice EU ze dne 26. 4. 1999, o skládkách odpadů

1.3 Plán odpadového hospodářství

Klíčovým dokumentem pro dlouhodobou strategii nakládání s odpady je plán odpadového hospodářství ČR pro období 2015 – 2024, který byl vyhlášen Nařízením vlády č. 352/2014 Sb. a schválen Usnesením vlády č. 1080 ze dne 22. 12. 2014.

Ministerstvo životního prostředí vydalo k návrhu koncepce plánu odpadového hospodářství ČR souhlasné stanovisko posouzení vlivu na životní prostředí (SEA - *Strategic Environmental Assessment*) dne 28. 8. 2014. Dokument byl schválen vládou ČR dne 27.10. 2014.

EIA znamená posouzení vlivu na životní prostředí před vybudováním stavby a SEA vyhodnocení vlivu na životní prostředí po výstavbě, jak působí třeba i na místní obyvatelé apod. [4]

2 NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

2.1 Zásady při nakládání s odpady

Hlavní strategické cíle při nakládání s odpady jsou předcházení vzniku odpadů prostřednictvím plnění „Programu předcházení vzniku odpadů“, opětovné použití výrobků s ukončenou životností, kvalitní recyklaci s maximálním využitím vhodných odpadů se přiblížit k evropské „recyklační společnosti“, zpracování odpadů ve spalovnách, tj. energetické využití, bezpečné odstranění při dodržení všech právních předpisů, zejména pro zajištění ochrany lidského zdraví a životního prostředí a snižování nebezpečných vlastností odpadů. Dále podporovat způsoby nakládání s odpady, které využívají odpady jako zdroje surovin a nahrazují tím primární přírodní suroviny, co nejvíce omezit ukládání odpadů na skládky a nepodporovat skládkování nebo spalování recyklovatelných materiálů. [1]

2.2 Zařazení odpadů podle kategorií

2.2.1 Nebezpečné odpady

Jsou odpady, které mají jednu nebo více nebezpečných vlastností, které jsou uvedeny v příloze č. 3, k vyhlášce č. 83/2016 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, seřazených v tabulce číslo 1. Jsou to především vyřazené anorganické a organické chemikálie, kyseliny, hydroxidy, organická rozpouštědla, promývací kapaliny a matečné louhy, odpadní barvy a laky, řezné oleje, vosky a tuky, nechlorované emulze, absorpční činidla, filtrační materiály, obaly od nebezpečných látek, zářivky a jiný odpad obsahující rtuť. Dále to jsou různé pevné látky obsahující nebezpečné látky, ropné látky a jejich produkty, textilie nebo papír znečištěné olejem, ředidlem nebo barvou, brusné materiály, kaly z neutralizačních stanic nebo čistíren zaolejovaných vod. [13]

2.2.2 Ostatní odpady

Jsou odpady, které prokazatelně nemají ani jednu nebezpečnou vlastnost, které jsou uvedeny v příloze č. 3, k vyhlášce č. 83/2016 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, seřazených v tabulce číslo 1. Jsou tím myšleny neznečištěné odpady z textilu, plasty, sklo, pryž, sklolaminát, odpad ze zeleně, zemina, stavební suť, komunální odpad atd.

Jsou to odpady různého chemického složení, které však nemají nebezpečné vlastnosti a při manipulaci s nimi není zapotřebí dbát zvýšené opatrnosti. [1]

2.2.3 Komunální odpady

Je veškerý odpad vznikající na území obce činností fyzických osob, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo osob oprávněných k podnikání. Komunálním odpadem se také rozumí odpad vznikající při čištění veřejných komunikací a prostranství, při údržbě veřejné zeleně včetně hřbitovů. Nežádoucí složkou komunálních odpadů jsou některé nebezpečné odpady, kterých je v komunálních odpadech přibližně 1 %. [1]

Tab. 1. Nebezpečné vlastnosti odpadů podle přílohy č. 3 k vyhlášce č. 83/2016 Sb.

Kód nebezpečné vlastnosti	Nebezpečná vlastnost odpadu
HP 1	Výbušné
HP 2	Oxidující
HP 3	Hořlavé
HP 4	Dráždivé – dráždivé pro kůži a pro oči
HP 5	Toxicita pro specifické cílové orgány. Toxicita při vdechnutí
HP 6	Akutní toxicita
HP 7	Karcinogenní
HP 8	Žíravé
HP 9	Infekční
HP 10	Toxické pro reprodukci
HP 11	Mutagenní
HP 12	Uvolňování akutně toxického plynu
HP 13	Senzibilizující
HP 14	Ekotoxický
HP 15	Odpad schopný vykazovat při nakládání s ním některou z výše uvedených nebezpečných vlastností

2.3 Skládování odpadů

Skládka odpadů je technické zařízení, kde se ukládají odpady. Tento způsob odstranění odpadů je stále často využíván, protože je z ekonomického hlediska nejlevnější. Výstavba zařízení na odstraňování odpadů musí být schválena dle zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivu na životní prostředí, tzv. EIA a zákonem č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a omezení znečištění.

Skládky nesmí být umístěny v pásmech hygienické ochrany vodních zdrojů, nebo léčivých pramenů, v pásmech ochrany hygienicky chráněných objektů, v národních přírodních rezervacích, v záplavových územích, v blízkosti ochranných pásem letišť a telekomunikačních sítí nebo na územích, kde by mohlo docházet k sesuvům půdy. Doporučená vzdálenost skládky odpadů od zastavěného území se doporučuje nejméně 500 m.

Odpady se ukládají takovým způsobem, aby nemohlo dojít k nežádoucím vzájemným reakcím za vzniku škodlivých látek, aby nedošlo k narušení těsnosti, nežádoucím deformacím nebo k narušení stability a konstrukce skládky. Odpady lze ukládat jen za určitých podmínek. Neupravené odpady jen tehdy, jedná-li se o odpady inertní, pro které je úprava technicky neproveditelná, a odpady, u nichž nelze žádnou úpravou dosáhnout snížení jejich objemu ani snížení či úplnému odstranění jejich nebezpečných vlastností. Jednou z metod takové úpravy odpadů je metoda stabilizace a solidifikace za použití anorganických nebo organických pojiv. Tato metoda se označuje jako S/S technologie.

Podle technického zabezpečení se skládky odpadů dělí na skládky inertního odpadu s označením S-IO, na nichž se ukládají např. stavební materiály, keramické výrobky, jílovitý materiál z výkopů, odpadní písky, ale také sklo. Dalším druhem skládky je skládka ostatního odpadu, označuje se S-OO. Mimo ostatního odpadu na nich může být skladován i nebezpečný odpad. Ten však být uložen ve speciálních, k tomuto účelu určených nádobách. Posledním typem je skládka nebezpečných odpadů s označením S-NO, na níž se skladují nebezpečné odpady, jako jsou oleje a jiné ropné produkty, barvy a rozpouštědla, různé chemikálie, odpadní chemické přípravky a směsi nebo vrtné kaly s obsahem nebezpečných látek. Pro účely ukládání odpadů na skládky jsou stanoveny třídy vyluhovatelnosti podle vyhlášky č. 294/2005 Sb., uvedené v následující tabulce 2.

- Skládka S-IO určená pro odpady inertní, výluhová třída I, která stanoví nejvyšší přípustné limity obsahu stanovených škodlivin ve výluhu odpadu, aby mohl být uložen na skládku inertního odpadu.

- Skládka S-OO určená pro odpady kategorie ostatní, výluhová třída IIa nebo IIb, která stanoví nejvyšší přípustné limity obsahu stanovených škodlivin ve výluhu odpadu, aby mohl být uložen na některou ze skládek ostatního odpadu.
- Skládka S-NO určená pro nebezpečné odpady, výluhová třída III, která stanoví nejvyšší přípustné limity obsahu stanovených škodlivin ve výluhu odpadu, aby mohl být uložen na skládku nebezpečného odpadu. [8]

Tab. 2. Nejvyšší přípustné hodnoty ukazatelů pro třídy vyluhovatelnosti podle vyhlášky č. 294/2005 Sb.

Ukazatel	Třídy vyluhovatelnosti			
	I	IIa	IIb	III
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
DOC (rozpuštěný organický uhlík)	50	80	80	100
Fenolový index	0,1			
Chloridy	80	1500	1500	2 500
Fluoridy	1	30	15	50
sírany	100	3000	2 000	5 000
As	0,05	2,5	0,2	2,5
Ba	2	30	10	30
Cd	0,004	0,5	0,1	0,5
Cr celkový	0,05	7	1	7
Cu	0,2	10	5	10
Hg	0,001	0,2	0,02	0,2
Ni	0,04	4	1	4
Pb	0,05	5	1	5
Sb	0,006	0,5	0,07	0,5
Se	0,01	0,7	0,05	0,7
Zn	0,4	20	5	20
Mo	0,05	3	1	3
RL (rozpuštěné látky)	400	8 000	6 000	10 000
pH		≥6	≥6	

3 VÝSKYT ZINKU

Zinek se vyskytuje v přírodě vázaný ve sloučeninách, z nichž nejznámější jsou minerál sfalerit, neboli blejno zinkové, což je sulfid zinečnatý (ZnS), smithsonit, čili kalamín, ve formě uhličitanu zinečnatého (ZnCO₃) a zinkit, oxid zinečnatý, tzv. červená ruda zinková (ZnO). Někdy je zinek obsažen jako příměs v železných rudách. Velmi vzácný je jeho výskyt v elementární formě jako kovový zinek. [25]

V zemské kůře je zastoupen o něco více jako měď. Největší těžba zinkových rud, hlavně sfaleritu a smithsonitu je v Číně, Peru, Austrálii a Indii, v Evropě má největší těžbu zinkových rud Irsko, Švédsko a také Polsko. V naší republice se vyskytují ložiska zinkové rudy na osmi místech, z nichž největší naleziště je v Křižanovicích v Železných horách. Do České republiky se většina surového zinku dováží.

Zinek se vyskytuje i v živých organizmech, jako součást enzymu, např. *Karboanhydráza*, *Alkoholdehydrogenáza* a *Karboxypentidáza*, které jsou v červených krvinkách savců. Je tedy biogenní prvek. V těle dospělého člověka je obsažen v malém množství, asi 2 gramů.

Dostatek zinku v potravinách je důležitý pro správnou činnost imunitního systému. Zinek podporuje hojení ran, tvorbu řady hormonů, léčbu zánětů a uchování inzulínu. Mezi důležité zdravotní účinky zinku patří ochrana organismu před nachlazením.

Zinek se vyskytuje v potravinách, které jsou bohaté na bílkoviny. Nejvíce je obsažen v mase, ale i ve fazolích, obilninách, sýrech a ořechách.

Nedostatek zinku v lidském organismu může zapříčinit chronická zánětlivá střevní onemocnění nebo cukrovku (diabetes). Nedostatečné množství zinku v potravě totiž způsobuje úbytek na váze, pomalé hojení ran, zhoršování paměti a smyslové poruchy hlavně zraku a čichu. Zinek je ve velkém množství obsažen ve spermatu, který je důležitý pro dokonalou funkci pohlavních orgánů u mužů.

Doporučená denní dávka v lidské potravě by se měla pohybovat mezi 10 – 20 mg na den. [29]

3.1 Vlastnosti zinku

Zinek je šedý, silně lesklý kovový prvek. Na vzduchu je stálý, protože se rychle oxiduje, při čemž se na povrchu vytvoří tenká vrstva oxidu zinečnatého (ZnO). Ta jej chrání proti

korozí. Dobře vede teplo a elektrický proud. Je kujný a tažný, v rozmezí teplot 100 až 150 °C, dá se válcovat na plech a vytahovat z něj drát. Při teplotách mimo toto rozmezí je značně křehký, zejména při teplotách nad 200 °C, kdy ho lze rozetřít až na prášek. Krystalovou strukturu má šesterečnou.

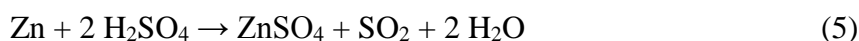
V periodické soustavě prvků zaujímá místo ve 4. periodě, skupiny II. B, jeho protonové číslo je 30, relativní atomová hmotnost 65,39. Tvoří množství různých sloučenin, ve kterých se vyskytuje pouze v oxidačním stupni II. Při teplotě 60 °C se zinek přímo slučuje s halogeny a při 130 °C reaguje se sírou (vzniká sulfid zinečnatý ZnS) a fosforem, za vzniku fosfidu zinečnatého Zn₃P₂.



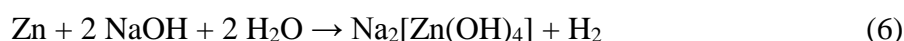
naopak se neslučuje s dusíkem, vodíkem a uhlíkem. Další důležitou vlastností zinku je, že je amfoterní, tzn., že reaguje jak kyselinami, tak s hydroxidy. V neoxidujících kyselinách se rozpouští za vývoje vodíku.



Při reakci zinku s koncentrovanými oxidujícími kyselinami jako jsou kyselina dusičná (HNO₃) a kyselina sírová (H₂SO₄), dochází k redukci kyselin a vzniká voda.



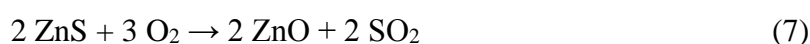
Zinek reaguje i s alkalickými hydroxidy za vzniku tetrahydroxozinečnanů.



Při zahřátí hoří modrozeleným plamenem, kdy vznikne bílý oxid zinečnatý (ZnO). S mnohými kovy je zinek neomezeně mísitelný, tvoří proto několik slitin, které jsou ale málo využitelné. [30]

3.2 Výroba zinku

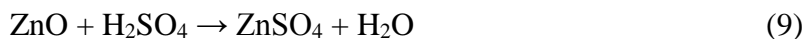
Zinek se vyrábí ze sulfidických rud, které se nejprve převedou na oxid zinečnatý ZnO a z vedlejšího produktu, oxidu siřičitého SO₂ se vyrábí kyselina sírová (H₂SO₄).



Zinek v elementární formě se z oxidu zinečnatého získává přímou redukcí tavením s koksem.



Při elektrolytickém způsobu se oxid zinečnatý rozpouští v kyselině sírové a vzniklý roztok síranu zinečnatého (ZnSO_4) se elektrolyzuje a zinek o čistotě až 99,95 % se vyloučí na hliníkové katodě. [22]



3.3 Využití zinku

Zinek má velké uplatnění jako antikorozi ochranný materiál zejména pro železo a jeho slitiny. Železné pozinkované plechy se vyrábí galvanickým pokovováním, postřikováním, napařováním a žárovým nanášením jemného zinkového povlaku.

Zinek se také dobře hodí pro výrobu různých odlitek, protože roztavený dokonale vyplňuje odlévací formu. Vznikají tak odlitky kovových součástek, které velmi dobře odolávají atmosférickým vlivům a nekorodují. Patří sem části motorových karburátorů, nejruznější kovové ozdoby, konve, vědra, střešní okapy, kliky oken a dveří. Zinek je také součástí obkladů nádrží, skříní nebo ledniček apod.

Zinek se velmi dobře mísí s mnoha kovy a vytváří s nimi slitiny. Nejvýznamnější je slitina s mědí, tzv. bílá a červená mosaz. Mosaz má dobré mechanické vlastnosti, jako je tvrdost, kujnost a tažnost. Je dobře odolná vůči vlivům okolního prostředí. Bílá mosaz se skládá z 85 % zinku, 5 % hliníku a 10 % mědi. Další významné slitiny zinku jsou druhy bronzu, které mají různé složení. Nejpoužívanější je bronz složený z 88 % zinku, 6 % hliníku a 6 % mědi a slitina zelco, která obsahuje 83 % zinku, 15 % hliníku a 2 % mědi.

Mnoho ze sloučenin zinku se využívá jako nátěrové barvy. K nejznámějším patří zinková běloba, což je jemný prášek oxidu zinečnatého. Další známá barva je jemně práškované zinkové blejno, což je sulfid zinečnatý ZnS , který se hlavně používá jako antikorozi nátěr na železné materiály, části strojů a mostních konstrukcí. [5]

3.4 Toxicita zinku

Je poměrně nízká. K předávkování zinkem dochází zcela výjimečně. Typickým příznakem akutní otravy zinkem je bolest v nadbříšku břišní krajiny, ležící mezi žebními oblouky. Otrava se projevuje průjemem, nevolností a zvracením. Při delším zvýšeném příjmu zinku dochází k poruchám trávicího traktu a ke snížení vstřebávání fosfátů, což

způsobuje anémii neboli chudokrevnost, kdy se sníží koncentrace hemoglobinu, naruší se tvorba červených krvinek a je snížena schopnost krve dodávat kyslík tkáním.

Otrava zinkem může být také vyvolána vdechnutím par nebo prachu kovového zinku, což se projevuje tzv. horečkou ze zinkových par, která se vyskytuje u pracovníků při slévání kovů, kdy se vytvoří zinečnatý komplex s bílkovinami v plicních sklípcích nebo krevní plazmě.

Pro člověka je toxická dávka zinku nad 170 mg za den. [6]

4 STABILIZACE/SOLIDIFIKACE ODPADŮ

4.1 Princip

Stabilizace/solidifikace je založena na smíchání odpadu s vhodným pojivem nebo několika pojivy, čímž dojde k úpravě jeho fyzikálních a chemických vlastností a odpad je převeden do pevné matrice. Vytvoří se stabilizovaný pevný blok, který má minimální vyluhovatelnost a může tak splňovat podmínky podle tabulky č. 2 pro uložení na skládku. Stabilizace/solidifikace se také provádí, je-li odpad kapalný, či při sedimentaci uvolňuje kapalnou fázi a jeho chemické složení je takové, že může negativně ovlivnit kvalitu průsakových vod. Dále se technologie S/S využívá, když je odpad ve formě prachu nebo zápachá a může tak významným způsobem ovlivnit stanovené emisní limity nebo když by uložení na skládku bez předchozí úpravy mohlo dojít k nežádoucím reakcím s materiály, které jsou již uloženy v aktivní vrstvě skládky. Proto se musí vypracovaný technologický postup stabilizace/solidifikace ověřit odborně způsobilou akreditovanou laboratoří a tento proces převést do praxe při zpracování vybraných odpadů.

Stabilizaci/solidifikaci odpadů nelze považovat za alternativu skládkování, ale jako úpravu odpadů před uložení na skládku. Jde o možné vyřešení otázky nakládání s odpady, kdy již byly vyčerpány možnosti jejich využití jako suroviny v jiných odvětvích, případně jejich chemického přepracování nebo zhodnocení některé ze složek odpadu. Je to způsob pro imobilizaci tzv. konečných odpadů zpravidla po značné redukci jejich původního objemu. Umožňuje bezpečnější uložení zbytkových odpadů po jejich zneškodnění tepelnými, biologickými nebo chemickými procesy, při sníženém riziku kontaminace vod a půdy škodlivými výluhy. Aplikace tohoto progresivního postupu může výrazně přispět k prodloužení životnosti současných skládek a ke zvýšení ochrany životního prostředí.

Odpady jsou zpracovávány různými technologiemi, které jsou ve většině případů zaměřeny ke snižování množství. Takovými metodami jsou např. spalování odpadů v různých typech spaloven, pyrolýza, což je vlastně termický rozklad organických látek bez přístupu kyslíku nebo chemická oxidace. Produkty těchto procesů jsou vlastně zase odpady, které ve svém objemu koncentrují kontaminanty a mohou tyto nebezpečné látky uvolňovat. Vhodnou stabilizací a solidifikací můžeme tomuto uvolnění do vody, půdy, případně do ovzduší úplně zabránit nebo alespoň významně omezit. [11; 31]

4.2 Způsoby stabilizačních/solidifikačních technologií

4.2.1 Cementace

Metoda, při které se odpad nebo vodná suspenze kalů nebo zahuštěného koncentrátu mísí ve vhodném poměru s cementem. Používá se zejména pro odpady a materiály anorganického původu jako je popílek ze spalovacích procesů nebo odvodněné kaly z čistíren. Provádí se za teploty okolí s použitím běžných typů zařízení. Jde o nejpoužívanější S/S technologii. Lze použít několik druhů cementů, nejčastěji se používají portlandský, struskoportlandský a struskový cement. Výhodou struskových a struskoportlandských cementů jsou jejich vysoké sorpční vlastnosti. Cementace probíhá i za normální teploty, odpadá tedy nutnost zahřívání směsi. [9]

4.2.2 Vitřifikace

Jde o technologický proces, kdy je nebezpečný odpad zataven do skla, čímž je zamezeno úniku nebezpečných látek do životního prostředí. Tímto způsobem se zpracovávají odpady těžkých kovů, chemikálií a radioaktivních látek. Vitřifikace probíhá při vysoké teplotě až 1200 °C a je založena na převedení anorganických odpadů, např. produktů spalování, na sklo. Vzniklý produkt se vyznačuje vysokou odolností proti působení vody a výrazně se zmenšuje objem odpadů. Je natolik inertní, že se z něj dá vyrábět stavební sklo, jako jsou dlaždice, obklady, potrubí, střešní krytiny atd.

První průmyslový podnik na vitřifikaci odpadů byl uveden do provozu v roce 1978 ve francouzském Marcoule, následovaly další vitřifikační provozy v Čeljabinsku v roce 1987 a v roce 1990 ve Velké Británii ve Windscale. [9]

4.2.3 Bitumenace

Spočívá ve smísení odpadu s roztavenou hmotou, jako je např. bitumenová (asfaltová) živice, kamenouhelný dehet, síra apod. Bitumenace je vhodná pro fixaci kalů nebo kapalných koncentrátů. Provádí se za zvýšených teplot a ve srovnání s cementací má vzniklý produkt menší objem a nižší vyluhovatelnost vodou. Bitumenace vyžaduje předchozí odvodnění zpracovávaných odpadů, např. na filmových rotorových odparkách, na kterých se odpaří přebytečná voda a odpad se pak promíchá s bitumenem, což je asfaltová nebo dehtová živice. Takto upravený odpad lze využít pro přípravu podkla-

dových šterkových koberců, vozovek nebo jako izolačních vrstev. Pro stabilizaci/solidifikaci vlhkých odpadů se využívá asfaltových emulzí, kdy není nutné použít vyšší teplotu. [9]

4.3 Pojiva používaná při stabilizaci/solidifikaci odpadů

Termínem pojiva se označují látky, které lze upravit do tekuté nebo kašovitě formy a které pak z této formy relativně snadno přecházejí do formy pevné. V důsledku tohoto procesu mají pojiva schopnost spojit nesoudržná zrna a kusy různých látek v soudržnou, kompaktní hmotu. Proces zpevňování lze rozdělit na dvě na sebe navazující stadia, tj. tuhnutí a tvrdnutí. Ve fázi tuhnutí ztrácí tekutá nebo kašovitá hmota svoji původní zpracovatelnost a postupně nabývá charakteru pevné látky. Ve fázi tvrdnutí pak vzniká pevná látka postupně získává vyšší pevnost, která je potřebná při praktickém použití pojiva v konkrétní stavební aplikaci. Jde o materiály mající schopnost vázat odpad, který upravujeme do pevné matrice. Kontaminanty obsažené v odpadech jsou tak fixovány a nepřechází do jiných složek životního prostředí.

Při solidifikačních procesech se používají anorganická i organická pojiva, případně jejich kombinace. [2; 9]

4.3.1 Anorganická pojiva

Anorganická pojiva se rozdělují na hydraulická a nehydraulická pojiva. Hydraulická pojiva po smíchání s vodou samovolně tuhnou na vzduchu i pod vodou. Patří sem zejména látky na bázi cementu, jako jsou portlandské a struskoportlandské cementy nebo struskové cementy, které mají vysoké sorpční vlastnosti. Cement je klasický stavební materiál, zařízení pro míchání směsi s odpadem je dostupné a vlastní proces solidifikace je ve srovnání s jinými způsoby zneškodňování odpadů, např. spalování, z ekonomického hlediska levnější. Nevýhodou je citlivost na přítomnost nečistot a hlavně nárůst objemu odpadu v důsledku přídavku pojiva. Pevná matrice vzniká v důsledku hydratace hlavních krystalických složek cementu. Voda, která je pro tvorbu solidifikační směsi potřebná je obsažená přímo v samotném odpadu nebo se přidává. Při tuhnutí, které začíná po kontaktu cementu s vodou, se zvyšuje pH, zmenšuje měrný povrch a mění se některé další chemické vlastnosti směsi.

Z nehydraulických pojiv, která tuhnou pouze na vzduchu, se nejčastěji používá jemné bílé vápno a bílý vápenný hydrát. Hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$, přítomný ve vznikající tuhé látce po homogenizaci odpadu s uvedeným materiálem, je působením oxidu uhličitého (CO_2) převeden na málo rozpustný uhličitán vápenatý (CaCO_3).

Mezi anorganická pojiva patří i puzzolanová pojiva s vysokým obsahem sklotvorného materiálu (oxid křemičitý SiO_2 , někdy ve směsi s oxidem hlinitým Al_2O_3). Ta netuhnou samovolně, ale pouze s přidavkem dalších látek, např. cementu nebo sádry (síran vápenatý CaSO_4), se kterými tvoří tuhnoucí hydrokřemičitany a hydrohlinitokřemičitany vápenaté.

Pro zlepšení vlastností vznikajících produktů se k pojivu přidávají různé typy aditiv. Přidavkem bentonitu s obsahem sodíku se docílí adsorpce organických kontaminantů a těžkých kovů a přidavek křemičitého prachu zase zvyšuje pevnost v tlaku vzniklého solidifikátu a snižuje jeho propustnost. Vyluhovatelnost je pak mnohem nižší než při použití samotného portlandského cementu. Dalším poměrně často používaným aditivem je hydroxid hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$. Pro zneškodňování vod ze zpracování uranové rudy je vhodné míchat cement kromě s popílkem nebo kalem také např. s oxidem, síranem nebo uhličitánem vápenatým. [9; 32]

4.3.1.1 *Cementy*

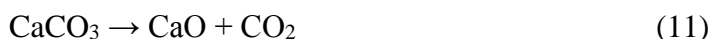
Hlavní složkou **portlandského cementu** je křemičitý slínek s přísadou sádrovce. Vyznačuje se vysokou pevností v tahu a rychlým nástupem tuhnutí. Beton z portlandského cementu má ze všech betonů nejvyšší pevnost v tlaku a lze ho zpracovávat i při nižších teplotách, kolem 5 °C. Je nejvíce používaným druhem cementu při výrobě betonu a malty. Obsahuje směs oxidů kovů alkalických zemin, hlavně vápníku, dále pak oxidy křemíku a hliníku. Portlandský cement a podobné materiály jsou vyráběny pálením vápence (jako zdroje vápníku) s jílem nebo s pískem, čímž vzniká slínek, ke kterému se v procesu mletí přidá sádrovec, jako regulátor tuhnutí. Výsledný prášek po smísení s vodou začne hydratovat a tím tuhne, patří mezi hydraulická pojiva. Portlandský cement byl poprvé vyroben ve Velké Británii na počátku 19. století.

Další druhy cementů jsou **struskoportlandský**, který se vyrábí semletím křemičitého slínku, sádrovce a až 35 % vysokopecní granulované strusky. Čím více strusky, tím je cement odolnější proti agresivním vodám. Dále **vysokopecní**, jež se skládá z portland-

ského slínku, sádrovce a 80 % vysokopecní strusky. Má použití v mírně agresivním prostředí. **Pucolánový cement** se vyrábí spojením portlandského slínku a pucolánu, což je sopečná vyvřelina. Má velmi dobré hydraulické vlastnosti, podobné jako vysokopecní cement, je odolný vůči mořské vodě. Poslední ze základních druhů cementu je **směsný**, který vzniká z portlandského slínku a až 80 % popílku, jako hydratující látky. Odolává horké vodě a mírně agresivnímu prostředí. Používá se při stavbách chladících věží, nádrží na vodu a na cementové potěry podlah. [32]

4.3.1.2 Vápno

Hašené vápno nebo **vápenný hydrát**, je v podstatě anorganická sloučenina hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Vápno je krystalická látka bílé barvy, bílý jemný prášek. Vyrábí se z oxidu vápenatého (CaO), známého jako pálené vápno, smícháním s vodou. Tento proces se nazývá hašení vápna. Vápno lze také připravit srážením při směšování vodného roztoku sloučeniny chloridu vápenatého (CaCl_2) s vodným roztokem sloučeniny hydroxidu sodného (NaOH). **Vzdušné vápno** je typickým představitelem vzdušných pojiv a zároveň patří k nejdéle používaným pojivům vůbec. Technicky je vápno oxid vápenatý (CaO) s různým podílem oxidu hořečnatého (MgO), vyráběný pálením čistých nebo dolomitických vápenců pod mez slinutí, což je při teplotě 1000 – 1250 °C. Jde vlastně o dekarbonizaci vápence (uhličitanu vápenatého, CaCO_3) podle chemické rovnice:



Dekarbonizace uhličitanu vápenatého začíná již od 600 °C. Vyšší teplota používaná ve výrobních zařízeních zajišťuje, že výrobní proces probíhá dostatečně rychle.

Druhou částí výroby vápna je hašení vápna. Hašením se pálené vápno převádí na hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Proces hašení probíhá za silného vývinu tepla a je provázen nabýváním vápna na objemu. Hašení je možno provádět za sucha nebo za mokra. Špatným vyhašením lze i velmi kvalitní pálené vápno znehodnotit. Proces hašení se dá vyjádřit chemickou rovnicí:



Při hydrataci se přebytečná voda účinkem tepla odpaří a výsledným produktem je práškovitý vápenný hydrát neboli hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Hydraulické vápno je pojivo připravené buď pálením vápenců, dolomitických vápenců nebo vápnatých slínů a slínovců (hornin s přírodním obsahem hydraulických součástí) pod mez slinutí, tedy na maximální teplotu 1250 °C nebo společným semletím vzdušného vápna s vhodnými přísadami, obsahujícími hydraulické oxidy.

Hydraulické vápno musí obsahovat minimálně 10 % hydraulických složek tj. oxid křemičitý SiO_2 , oxid hlinitý Al_2O_3 , a oxid železitý Fe_2O_3 . [32]

4.3.1.3 Sádra

Sádra je anorganické vápenosíranové práškové pojivo, které vzniká dehydratací sádrovce, tedy síranu vápenatého ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Je hygroskopická, to znamená, že má schopnost pohlcovat vlhkost a tím snadno tuhne. Patří mezi nejdéle používaná pojiva. [32]

4.3.2 Organická pojiva

Aplikace organických pojiv je obvykle omezena na speciální typy odpadů, které se obtížně zneškodňují chemicky nebo na solidifikaci odpadů radioaktivních. Mezi nejčastěji používaná pojiva patří bitumenové (asfaltové) živice, kamenouhelné dehty, polyestery, polyolefiny, epoxidy a některé další termoplasty. Výhodou je možnost chemické fixace, nízký stupeň permeability, vysoká hydrolytická stabilita, odolnost vůči biodegradaci, změnám teploty a počasí, necitlivost ke změnám pH a vynikající mechanické a strukturální vlastnosti vzniklého produktu. Jako kombinace anorganických a organických pojiv se nejčastěji používají polyuretan s cementem, polymerní gely s křemičitany, vápnem a cementem a křemelina s cementem a polystyrenem. [9]

4.4 Výhody stabilizace/solidifikace odpadů

- Odpady jsou po přidání vhodného pojiva převedeny na méně rozpustnou formu.
- Takto upravený odpad je možno poměrně bezpečně uložit na skládku.
- S upravenými odpady je snadnější manipulace.
- Nakládání se stabilizovanými a solidifikovanými odpady je finančně méně náročná.
- Odpad je někdy upraven až do podoby certifikovaného materiálu.

- Má větší možnost dalšího využití v technologických procesech.
- Dochází ke snížení nebo k úplnému odstranění nebezpečných vlastností odpadů.
- Použití stabilizovaných a solidifikovaných odpadů při těsnění konstrukcí budovaných skládek odpadů.
- Využití solidifikovaných odpadů jako výplňového a sanačního materiálu. [9]

4.5 Využití statistických metod při stabilizaci/solidifikaci odpadů

Anova je metoda, která umožňuje porovnání střední hodnoty více než dvou znaků. Může být jednofaktorová nebo vícefaktorová. Jednofaktorová analýza je nejjednodušší případ analýzy, kde analyzujeme účinek jednoho faktoru na závisle proměnnou. Vícefaktorová analýza sleduje vliv dvou a více faktorů působících na závisle proměnnou.

M. T. Montañés a kolektiv stanovovali změny obsahu cementu a nejlepší typ cementu pomocí statistické metody ANOVA. Byla použita jednofaktorová analýza s 95% spolehlivostí testu. Analýza byla provedena v Portlandském cementu, aby bylo zjištěno, zda má vliv na sledované veličiny jako jsou koncentrace chromu, toxicita ve výluhu, změna objemu a váhy. Dále byla provedena dvoufaktorová Anova, kde dva hlavní faktory byly typ a složení cementu. Byly použity tři typy cementu s následujícím obsahem:

- slínek s příměsí vápence
- příměs vápence a popílku
- přídavek pucolánu

Tato analýza byla provedena za účelem zjištění statistického rozdílu mezi obsahem a typem cementu. Statisticky stanovený nejvhodnější typ cementu byl vybrán a podroben analýze rozptylu s cílem zjistit, zda změny v obsahu vody byly statisticky důležité na zkoumané proměnné a zda ovlivňuje proces stabilizace/solidifikace. Z výsledků analýzy bylo zjištěno, že obsah vody má významný vliv na proces S/S. Další dostupné publikace, které by byly zaměřeny konkrétně na využití statistických metod při stabilizaci/solidifikaci odpadů se nalézt nepodařilo. [28]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 Charakteristika zkoušeného odpadu

Odpad vzniká při žárovém zinkování povrchů ocelových výrobků a pochází ze zahraniční firmy, která si nepřeje být jmenována. Byl odebrán vzorek odpadu o hmotnosti asi 5 kg, zhomogenizován a uchován v uzavřené nádobě. Vzorek odpadu byl sypký homogenní prášek s vysokým obsahem zinku. Vzorek odpadu byl podroben vyluhovacímu testu dle ČSN EN 12 457-4 (838005). Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4, stanovená sušina v tabulce 5.

5.2 Pojiva

5.2.1 Cement

Ke stabilizaci/solidifikaci odpadu s vysokým obsahem zinku byl jako základní pojivo použit portlandský struskový cement CEM II/B-S 32.5 R, výrobce Cement Hranice a.s. Výrobek obsahuje 65–79 % jemně mletého křemičitanového slínku a 21–35 % vysokopecní granulované strusky, která je v cementu přísadou regulující tuhnutí. Zbytek do max. 5 % tvoří doplňující přísady. Vzorek cementu byl podroben vyluhovacímu testu dle ČSN EN 12 457-4 (838005). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.

5.2.2 Popílek

Popílek pocházel ze spalování uhlí a byl odebrán v teplárně společnosti Teplárna Otrokovice a.s. Měl sypkou konzistenci šedou barvu. Výsledky vyluhovacího testu podle ČSN EN 12 457-4 (838005) jsou uvedeny v tabulce 3.

5.2.3 Fluidní produkt

Jedná se o vedlejší produkt fluidního spalování uhlí. Vzorek byl získán v teplárně společnosti Alpig Teplárna Zlín. Fluidní produkt byl sypký prášek světlešedé barvy. Výsledky vyluhovacího testu podle ČSN EN 12 457-4 (838005) jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3. Stanovené parametry vodného výluhu použitých pojiv

Parametr	pH [1]	Vodivost [S.m ⁻¹]	c _{Cl⁻} [g.l ⁻¹]	RL [g.l ⁻¹]	c _{Zn} [mg.l ⁻¹]
Portlandský struskový cement	12,15	1,24	0,892	3,53	0,329
Popílek	11,28	0,21	1,070	0,97	0,107
Fluidní produkt	12,14	1,07	1,427	5,18	0,064

5.3 Použité chemikálie

Při práci v laboratoři byly použity tyto chemikálie:

- **Destilovaná voda** (H₂O), připravena v laboratoři UTB Zlín
- **Chlorid sodný p.a.** (NaCl), výrobce Lachema a.s. Brno, o.z. Neratovice, ČR; molární hmot. 58,44 g/mol, hustota 2,16 g/cm³, (min. koncentrace 99 %).
- **Dusičnan stříbrný p.a.** (AgNO₃), výrobce Safina a.s., Vestec, ČR; molární hmot. 169,87 g/mol, hustota 4,35 g/cm³, (obsah Ag 63,5 %)
- **Chroman draselný p.a.** (K₂CrO₄), výrobce Lachner s.r.o., Neratovice, ČR; molární hmot. 161,47 g/mol, hustota 2,73 g/cm³
- **Heptahydrát síranu zinečnatého p.a.** (ZnSO₄·7H₂O), výrobce Lachema a.s. Brno, ČR; molární hmot. 287,54 g/mol, hustota 3,54 g/cm³
- **Hydrogenhličitan sodný p.a.** (NaHCO₃), výrobce Lachema a.s. Brno, o.z. Neratovice, ČR; molární hmot. 84,01 g/mol, hustota 2,21 g/cm³
- **Hydrogenhličitan amonný p.a.** (NH₄HCO₃), výrobce Lachema a.s. Brno, o.z. Neratovice, ČR; molární hmot. 79,06 g/mol, hustota 1,59 g/cm³

5.4 Přístroje a pomůcky

Při práci v laboratoři jsem používala tyto přístroje:

- Elektrické vrtulové míchadlo RZR 2020, Heidolph, (Německo)
- Plamenový AAS GBS 933-AA GBC, Scientific equipment PTY LTD, (Austrálie)
- Inolab pH 720, pH metr, Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, (Německo)
- Předvážky, Kern 440-33, Kern & Sohn GmbH, (Německo)

- Třepačka RS 10 Basic, IKA-Werke, GmbH and Co. KG, Staufen im Breisgau, (Německo)
- Vibrační stolek V – 95, Trystom, Olomouc, (ČR)
- Vestavná trouba Mora VT 4817, (ČR)
- Analytické váhy Scaltec SBC 32, (Německo)
- Konduktometr LF300, Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, Weilheim (Německo)

6 METODIKA

6.1 Příprava solidifikačních směsí a jejich výluhů

Byly připraveny tři sady po šestnácti vzorcích a jedna sada o 8 vzorcích do předem zvážených a popsanych plastových forem. U každé směsi bylo naváženo potřebné množství odpadu a přidáno pojivo a voda dle rozpisu v tabulkách číslo **6; 8; 10 a 12** (str. 40- 46). Směs byla promíchána pomocí vrtulového míchadla do kašovité podoby a nalita do plastových forem a opět zvážena. Formy byly uzavřeny víčkem po zvolenou dobu.

6.2 Příprava vodného výluhu solidifikovaného odpadu

Každá forma byla znovu zvážena a do skleněné láhve s širokým hrdlem bylo odebráno 50 g vzorku. Poté bylo přidáno 500 ml destilované vody a láhev se dala třepat na třepačku po dobu 24 hodin při frekvenci 150 kmitů za minutu. Pak byl výluh přefiltrován přes filtr ze skelných vláken o velikosti pórů 0,45 μm pomocí vodní vývěvy do 250 ml Erlenmeyerových baněk

6.3 Stanovení sušiny původního odpadu

Na Petriho misku bylo na analytických váhách naváženo 5 g odpadu, který se nechal vysušit do konstantní hmotnosti při teplotě 105 °C. Stanovení bylo provedeno vždy třikrát vedle sebe a následně byl vypočítána průměrná hodnota sušiny.

$$S = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$

m_0 hmotnost vysušené prázdné misky [g]

m_1 hmotnost misky + navážky odpadu [g]

m_2 hmotnost misky + sušiny [g]

S sušina [%]

6.4 Měření pH

Hodnota pH vodných výluhů byla měřena potenciometricky pomocí kombinované skleněné elektrody, když pH metr byl předem nakalibrován pomocí základních ústojných roztoků, tzv. pufrů o pH 4,0, 7,0 a 10,0.

6.5 Měření měrné elektrické vodivosti

Měrná elektrická vodivost neboli konduktivita (γ) byla měřena pomocí konduktometru s automatickou korekcí teploty na 25 °C.

6.6 Stanovení chloridů

Chloridy byly stanoveny argentometrickou metodou. Byl odebrán 1 ml výluhu a doplněn do odměrné baňky 50 ml destilovanou vodou. Každý výluh byl tedy zředěn 50 krát. Ze zředěného výluhu bylo odpipetováno 5 ml vzorku, přidána destilovaná voda a několik kapek 5 % chromanu draselného (K_2CrO_4) jako indikátoru. Titrovalo se odměrným roztokem $AgNO_3$ o koncentraci $0,05 \text{ mol.l}^{-1}$ do barevné změny ze žluté na hnědou. Standardizace $AgNO_3$ byla prováděna na odměrný roztok standardu $NaCl$.

$$c_{Cl^-} = \frac{M_{Cl} \cdot V_{AgNO_3} \cdot c_{Ag^+} \cdot f}{V_{vz}} \quad (14)$$

c_{Cl^-} koncentrace chloridů ve vzorku [mg.l^{-1}]

M_{Cl} molární hmotnost chloru [g.mol^{-1}]

V_{AgNO_3} ...průměrná spotřeba odměrného roztoku $AgNO_3$ při titraci vzorku [ml]

c_{Ag^+} koncentrace odměrného roztoku $AgNO_3$ [mol.l^{-1}]

f podílový faktor [$50\text{ml}/5\text{ml} = 10$]

V_{vz} pipetovaný objem původního neředěného výluhu [ml]

6.7 Stanovení rozpuštěných látek

Do předem vysušených a zvážených skleněných misek bylo odpipetováno 10 ml přefiltrovaného výluhu. Filtráty byly vysušeny do konstantní hmotnosti v sušárně při 105 °C a znovu zváženy.

$$RL_{105} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1\,000}{V_0} \quad (15)$$

RL_{105} ...hmotnostní koncentrace rozpuštěných látek [mg.l^{-1}]

m_1 hmotnost prázdné vysušené misky [g]

m_2 hmotnost misky s odparkem [g]

V_0 objem vzorku použitý pro stanovení [l]

6.8 Stanovení hustoty

Do 100ml odměrného válce bylo odměřeno 50 ml destilované vody. Z plastových forem bylo odebráno a na analytických vahách naváženo 5 g vzorku a nasypáno do tohoto odměrného válce s vodou a zjištěn zvýšený objem. Rozdíl změny hladin (objemů) ΔV byl použit pro výpočet.

$$\rho = \frac{m}{\Delta V} \quad (16)$$

m hmotnost volně naspaného materiálu [g]

ΔV rozdíl výšky hladin [cm^3]

ρ hustota vzorku [$\text{g}\cdot\text{cm}^3$]

6.9 Příprava kalibračních roztoků pro stanovení zinku metodou AAS

Bylo naváženo předem vypočítané množství $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ (heptahydrátu síranu zinečnatého), kvantitativně převedeno do 500 ml odměrné baňky a doplněno destilovanou vodou po rysku. Tak byly připraveny roztoky s koncentrací zinku $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$, $2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a $5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Dále byly ředěním roztoku o koncentraci $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ připraveny roztoky koncentrace $0,1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$; $0,2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$; $0,5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a $0,75 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$.

$$m = \frac{M_{\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} \cdot c \cdot V}{M_{\text{Zn}}} \quad (17)$$

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot c_1}{c_2} \quad (18)$$

$M_{\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}}$ molekulární hmotnost $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ [$287,54 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$]

c koncentrace kalibračních roztoků [$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]

V objem zásobního roztoku [0,5 l]

m vypočítaná navážka $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ [g]

M_{Zn} molekulární hmotnost Zn [$65,39 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$]

V_1 objem zásobního roztoku [ml]

V_2 vypočítaný objem, na který je nutno koncentrovanější roztok naředit [ml]

c_1 skutečná koncentrace zásobního roztoku [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]

c_2 koncentrace kalibračního standardu [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]

6.10 Stanovení koncentrace zinku metodou AAS

Nejprve byla nastavena vlnová délka 317 nm a doba měření na 3 krát 3 sekundy. Pak byl přístroj nakalibrován pomocí kalibračních roztoků a byla sestavena kalibrační křivka. Pro slepý pokus byla použita destilovaná voda a vzorky nebylo potřeba ředit. Stanovení bylo prováděno v plameni acetylen – vzduch, který je využíván pro analýzu většiny prvků.

6.11 Multifaktoriální analýza

Výsledky byly vyhodnocovány pomocí multifaktoriální statistické analýzy za použití programu Statgraph. Sledovaly se dva hlavní faktory. U první sady přídavek cementu a vody do směsi, u druhé sady přídavek popílku a vody do směsi, u třetí přídavek cementu a popílku do směsi a u poslední sady přídavek fluidního produktu a vody. Dále se sledovaly tři proměnné faktory, což byla koncentrace zinku, rozpuštěné látky a koncentrace chloridů. Multifaktoriální analýza vyhodnotila procentuální optimální koncentrace přísadků cementu, popílku nebo fluidního produktu a vody do směsi.



Obr. 1. Vzorky solidifikovaného odpadu

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUZE

7.1 Hodnocení původního odpadu

Původní vzorek odpadu byl podroben zkušebnímu vyluhovacímu testu v destilované vodě. Do tmavých lahví o objemu 1000 ml bylo nasypáno 50 gramů zkoušeného odpadu z pozinkování a doplnilo 500 ml destilované vody (poměr L/S = 10). Láhev se nechala po dobu 24 hodin třepat na třepačce při frekvenci 150 kmitů za minutu. Vzniklý výluh byl přefiltrován přes filtr ze skelných vláken o velikosti pórů 0,45 μm pomocí vodní vývěvy do 250 ml Erlenmeyerových baněk. Ve výluhu byla změřena konduktivita a pH a stanoveny další parametry, které jsou uvedeny tabulce číslo 4. Stanovení sušiny je zapísáno v tabulce číslo 5.

Tab. 4. Parametry vzorku odpadu a jeho vodného výluhu

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Hustota odpadu	ρ	1,43	[g.cm ⁻³]
Obsah vody v odpadu	H ₂ O	2,00	[%]
Sušina odpadu	S	98,00	[%]
Retence Zn v odpadu	R	83,00	[%]
Koncentrace Cl ⁻ ve výluhu	c _{Cl}	23,43	[g.l ⁻¹]
Hodnota pH výluhu	pH	6,54	[1]
Rozpuštěné látky ve výluhu	RL	50,40	[g.l ⁻¹]
Měrná vodivost výluhu	γ	9,74	[S.m ⁻¹]
Koncentrace Zn ve výluhu	c _{Zn}	4 630	[mg.l ⁻¹]

Odpad s obsahem zinku má podle katalogu odpadů uvedeném v příloze vyhlášky 93/2016 Sb. přiřazeno katalogové číslo **11 05 03** pevné odpady z čištění plynů při zárověm pozinkování.

Tab. 5. Stanovení sušiny původního vzorku

Číslo vzorku	Prázdne misky	Navážka vzorku	Miska + navážka	miska + sušina	Sušina	Voda
	m ₀ [g]	[g]	m ₁ [g]	m ₂ [g]		
1	11,8801	5,0234	16,9035	16,7842	97,63	2,37
2	12,2479	4,9975	17,2454	17,1557	98,20	1,80
3	15,5161	5,0370	20,5531	20,4625	98,20	1,80
Směrodatná odchylka					0,27	0,27
Průměrná hodnota					98,00	2,00

7.2 Hodnocení solidifikovaného odpadu po 28 dnech

7.2.1 První sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu

Tab. 6. Složení směsí první sady vzorků

označení vzorku	m_o	m_c	V_{vody}	$C_{suchá\ směs}$	$V_{mokrā\ směs}$
	[g]	[g]	[ml]	[%]	[%]
O1-19-10	145,8	16,2	38	10	19
O1-19-20	129,6	32,4	38	20	19
O1-19-30	113,4	48,6	38	30	19
O1-19-40	97,2	64,8	38	40	19
O1-24-10	136,8	15,2	48	10	24
O1-24-20	121,6	30,4	48	20	24
O1-24-30	106,4	45,6	48	30	24
O1-24-40	91,2	60,8	48	40	24
O1-29-10	127,8	14,2	58	10	29
O1-29-20	113,6	28,4	58	20	29
O1-29-30	99,4	42,6	58	30	29
O1-29-40	85,2	56,8	58	40	29
O1-34-10	118,8	13,2	68	10	34
O1-34-20	105,6	26,4	68	20	34
O1-34-30	92,4	39,6	68	30	34
O1-34-40	79,2	52,8	68	40	34

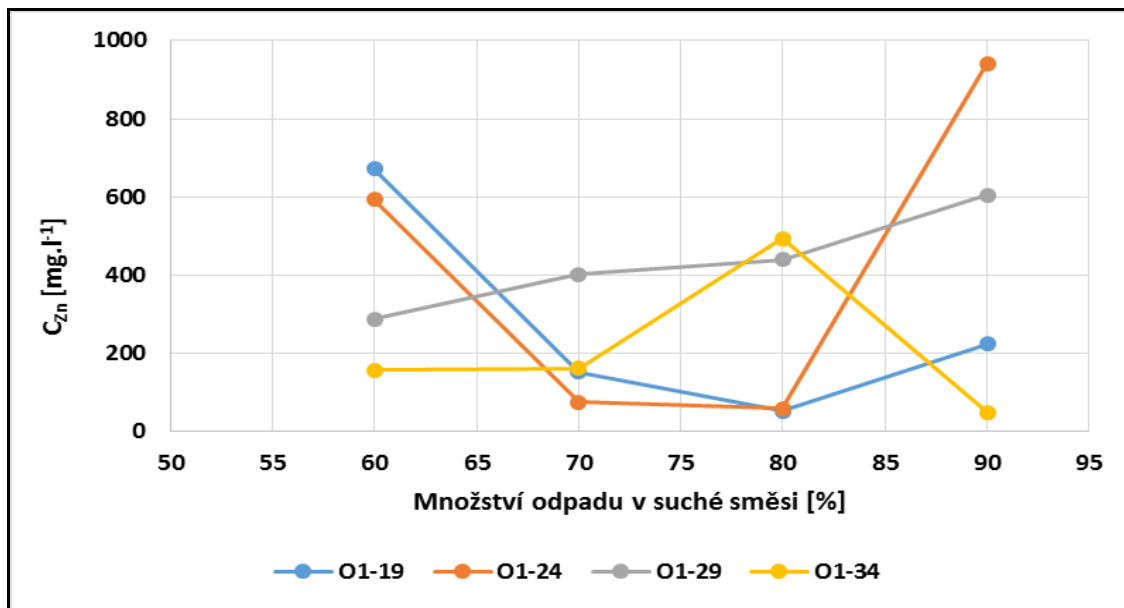
V první sérii bylo připraveno 16 vzorků, jejichž soupis je v tabulce číslo 8. V následující tabulce číslo 9 jsou pak zapsány všechny naměřené a vypočtené hodnoty. U každé z připravených směsí byla změřena hustota, změřen nárůst hmotnosti a objemu odpadu při solidifikaci a pak byl proveden vyluhovací test a stanovení koncentrace zinku, chloridů, rozpuštěných látek, retence a vodivost. Nejnížší pH měl vzorek O1-19-10, z první série, a to 7,0 a nejvyšší vzorek O1-24-40 o hodnotě pH 10,3. Koncentrace chloridů byla nejvyšší u vzorku O1-19-10 a to 27,4 g.l⁻¹, kde bylo nejvíce cementu a nejnížší u vzorku O1-29-40 a to 8,42 g.l⁻¹. Měrná vodivost se u vzorků pohybovala mezi 5 – 6 S.m⁻¹, což značí vysoké množství solí ve vzorku. Nejvyšší vodivost byla u vzorku O1-29-10, a to 6,57 S.m⁻¹ a nejméně bylo naměřeno u vzorku O1-34-40, a to 3,82 S.m⁻¹. Hustota solidifikovaných odpadů se pohybovala v rozmezí 1 – 2 g.cm⁻³. Nejnížší byla stanovena u

vzorku O1-29-40, a to $1,11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a nejvyšší měla hodnotu $1,93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ u vzorku O1-19-40. Koncentrace zinku byla nejvyšší u vzorku O1-24-10 a měla hodnotu $942 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a nejnižší $48 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ u vzorku O1-34-10. Vzorky měly hnědou barvu, a co se týče konzistence tak se rozpadaly. U několika vzorků se objevil bílý a rezavý povlak, což značí stopy chloridů a železa. Posledním stanoveným parametrem jsou rozpuštěné látky, které byly nejnižší u vzorku O1-34-40, a to $23,85 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a nejvyšší u vzorku O1-19-20, a to $37,28 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Barva výluhu byla nažloutlá. Při statistickém vyhodnocení byla snaha minimalizovat koncentraci zinku, chloridů, rozpuštěných látek a Δm a byla snaha najít složení směsi s nejnižšími hodnotami parametrů. Pro tuhle sadu byla vypočítána optimální koncentrace 34 % cementu a 40 % vody. Grafické znázornění závislosti množství odpadu na koncentraci zinku je na obr. 2.

Tab. 7. Naměřené a vypočítané parametry vzorků první sady po 28 dnech

označení vzorku	ρ	Δm	ΔV	c_{Zn}	γ	c_{Cl}	pH	RL	retence
	[$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	[%]	[%]	[$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	[S/m]	[$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	[1]	[$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	[%]
O1-19-10	1,51	36,5	29,3	224	6,15	27,34	7,03	36,16	98,68
O1-19-20	1,39	54,0	58,5	51*	6,22	24,70	8,81	37,28	99,66
O1-19-30	1,53	75,6	64,1	151	5,28	20,29	9,47	33,12	98,86
O1-19-40	1,93	104,1	51,3	671	4,36	14,64	9,97	30,96	94,08
O1-24-10	1,66	44,7	24,7	942	5,24	19,41	7,13	26,33	94,11
O1-24-20	1,66	61,3	39,0	59*	5,68	22,05	8,79	32,79	99,59
O1-24-30	1,53	87,9	75,6	75*	5,05	17,64	9,74	30,00	99,39
O1-24-40	1,52	114,2	101,5	594	4,23	15,00	10,26	29,39	94,50
O1-29-10	1,25	55,5	77,9	604	6,57	9,19	7,13	28,99	95,94
O1-29-20	1,25	77,8	103,4	440	5,85	8,81	8,05	27,28	96,62
O1-29-30	1,26	98,5	125,3	402	5,03	8,81	8,77	30,04	96,55
O1-29-40	1,11	133,5	200,8	288	4,35	8,42	9,19	25,17	97,10
O1-34-10	1,68	66,7	41,9	48*	5,68	19,41	7,17	28,96	99,66
O1-34-20	1,26	88,4	113,8	493	5,14	18,52	8,39	28,70	95,99
O1-34-30	1,25	114,7	145,7	161	4,31	15,88	9,14	24,45	98,51
O1-34-40	1,66	148,5	182,1	156	3,82	15,88	9,36	23,85	98,33

* Hodnota nižší než koncentrace nejnižšího kalibračního standardu ($< 100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$)



Obr. 2. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií první sady vzorků po 28 dnech

7.2.2 Druhá sada – odpad solidifikovaný pomocí popílku

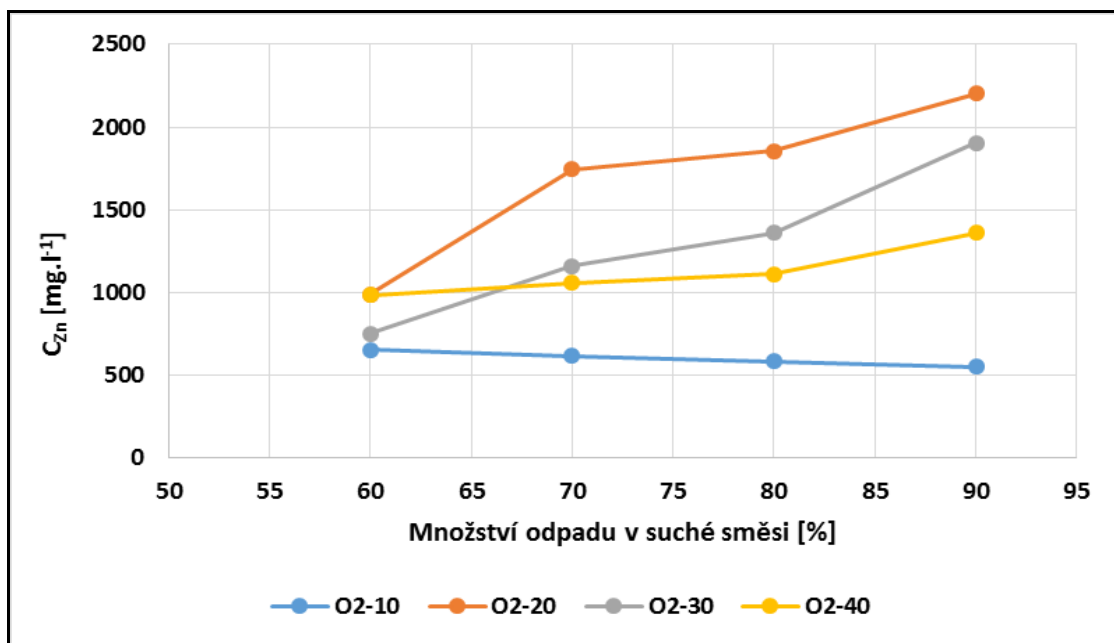
Tab. 8. Složení směsí druhé sady vzorků

označení vzorku	m_o	m_c	V_{vody}	$C_{suchá\ směs}$	$V_{mokrā\ směs}$
	[g]	[g]	[ml]	[%]	[%]
O2-10-10	162	18	20	10	10
O2-10-20	144	36	20	20	10
O2-10-30	126	54	20	30	10
O2-10-40	108	72	20	40	10
O2-20-10	144	16	40	10	20
O2-20-20	128	32	40	20	20
O2-20-30	112	48	40	30	20
O2-20-40	96	64	40	40	20
O2-30-10	126	14	60	10	30
O2-30-20	112	28	60	20	30
O2-30-30	98	42	60	30	30
O2-30-40	84	56	60	40	30
O2-40-10	108	12	80	10	40
O2-40-20	96	24	80	20	40
O2-40-30	84	36	80	30	40
O2-40-40	72	48	80	40	40

Tab. 9. Naměřené a vypočítané parametry vzorků druhé sady po 28 dnech

označení vzorku	ρ [g/cm ³]	Δm [%]	ΔV [%]	c_{Zn} [mg/l]	γ [S/m]	c_{Cl} [g/l]	pH [1]	RL [g/l]	retence [%]
O2-10-10	1,39	23,45	15,32	552	6,99	21,17	6,76	36,08	97,05
O2-10-20	1,26	38,77	29,57	584	7,01	20,29	6,80	35,23	96,50
O2-10-30	1,66	58,54	48,08	618	5,95	17,64	6,79	29,29	95,77
O2-10-40	1,38	84,61	72,21	653	5,33	24,70	7,01	22,66	94,79
O2-20-10	1,25	36,47	12,80	2203	7,61	22,05	7,02	37,36	87,01
O2-20-20	1,25	53,21	26,06	1857	6,74	20,29	7,03	29,36	87,71
O2-20-30	1,26	74,71	44,38	1746	5,57	15,00	7,02	26,07	86,82
O2-20-40	1,67	101,72	66,87	990	5,17	21,17	7,36	25,35	91,37
O2-30-10	1,25	54,32	10,55	1903	6,42	21,17	7,07	31,46	87,31
O2-30-20	1,25	73,85	24,27	1362	5,91	20,29	7,15	24,60	89,77
O2-30-30	1,25	98,81	42,54	1159	4,88	15,88	7,15	23,58	90,04
O2-30-40	1,51	129,31	62,48	753	4,67	20,29	7,41	22,02	92,54
O2-40-10	1,68	73,59	4,12	1362	5,81	22,05	7,06	27,89	89,79
O2-40-20	1,25	98,29	20,12	1113	5,15	20,29	7,11	26,68	90,47
O2-40-30	1,25	128,77	41,72	1056	3,98	15,00	7,18	15,51	89,56
O2-40-40	1,25	169,23	64,30	985	3,86	14,11	7,13	18,61	88,54

V druhé sérii bylo také 16 vzorků, jejichž složení je uvedeno v tabulce 8 a výsledné hodnoty jsou seřazeny v tabulce 9. Hodnota pH zde byla nejnižší u vzorku O2-10-10 a to 6,76 a nejvyšší 7,41 u vzorku O2-30-40. Nejvyšší množství chloridů měl vzorek O2-10-40, a to 24,70 g.l⁻¹ a nejnižší vzorek O2-40-40, a sice 14,11 g.l⁻¹. Vodivost ve srovnání s první sadou mírně vzrostla. Nejvyšší byla 7,61 S.m⁻¹ u vzorku O2-20-10 a nejmenší 3,86 S.m⁻¹ u vzorku O2-40-40. Nejvyšší hustotu měl vzorek O2-40-10, a to 1,68 g.cm⁻³ a nejnižší 1,25 g.cm⁻³ byla zjištěna u 8 vzorků. Pomocí AAS byla stanovena koncentrace Zn ve výluhu, nejvyšší u vzorku O2-20-10, a to 2203 mg.l⁻¹ a nejnižší u vzorku O2-10-10, a to 552 mg.l⁻¹. Vzorky druhé sady byly hodně měkké a opět se na povrchu objevily krystalky bílé a oranžové barvy, pravděpodobně chloridy. Tentokrát ale u více vzorků. Množství rozpuštěných látek bylo nejvyšší u vzorku O2-20-10, a to 37,36 g.l⁻¹ a nejnižší u vzorku O2-40-30 s hodnotou 15,51 g.l⁻¹. Pomocí statistické analýzy Anova programu Statgraph byla stanovena optimální koncentrace 40 % popílku a 21 % vody. S množstvím odpadu rostla i koncentrace zinku, jak je znázorněno na obr. 3.



Obr. 3. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií druhé sady vzorků po 28 dnech

7.2.3 Třetí sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu a popílku

Tab. 10. Složení směsí třetí sady vzorků

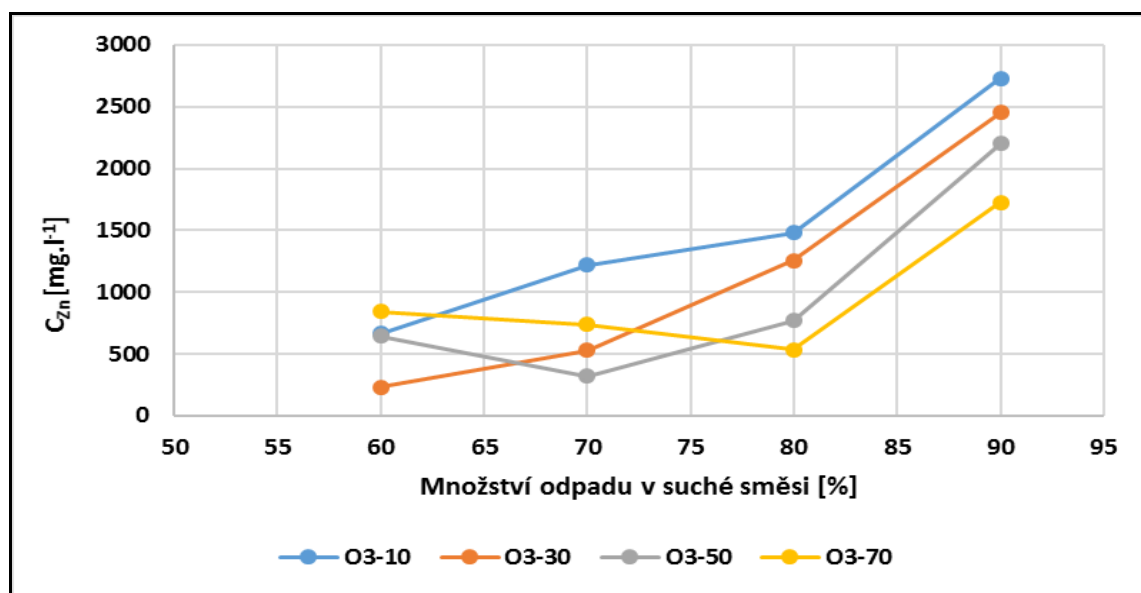
označení vzorku	m_o	m_c	m_p	V_{vody}	$C_{suchá\ směs}$	pop
	[g]	[g]	[g]	[ml]	[%]	[%]
O3-90-10	180	2	18	50	10	90
O3-90-30	180	6	14	25	30	70
O3-90-50	180	10	10	30	50	50
O3-90-70	180	14	6	40	70	30
O3-80-10	160	4	36	40	10	90
O3-80-30	160	12	28	40	30	70
O3-80-50	160	20	20	50	50	50
O3-80-70	160	28	18	55	70	30
O3-70-10	140	6	54	60	10	90
O3-70-30	140	18	42	68	30	70
O3-70-50	140	30	30	70	50	50
O3-70-70	140	42	18	70	70	30
O3-60-10	120	8	72	62	10	90
O3-60-30	120	24	56	64	30	70
O3-60-50	120	40	40	70	50	50
O3-60-70	120	56	24	80	70	30

Tab. 11. Naměřené a vypočítané parametry vzorků třetí sady po 28 dnech

označení vzorku	ρ	Δm	ΔV	c_{Zn}	γ	c_{Cl}	pH	RL	retence
	[g/cm ³]	[%]	[%]	[mg/l]	[S/m]	[g/l]	[1]	[g/l]	[%]
O3-90-10	1,68	34,52	-5,805	2732	6,30	20,29	6,78	17,14	86,94
O3-90-30	2,00	26,00	-20,684	2452	7,38	24,70	6,87	17,14	88,27
O3-90-50	1,67	24,98	-5,288	2204	6,89	24,70	6,86	17,18	89,45
O3-90-70	1,67	29,57	-5,849	1728	7,28	23,82	7,03	17,20	91,78
O3-80-10	1,99	49,43	-10,576	1481	6,00	20,29	7,02	33,40	92,04
O3-80-30	2,51	47,83	-28,964	1253	6,47	21,17	7,11	17,09	93,26
O3-80-50	1,99	52,83	-10,495	772	5,22	20,29	7,27	17,06	95,85
O3-80-70	1,44	59,62	23,495	536	4,18	17,64	7,33	17,04	97,13
O3-70-10	2,00	76,94	1,567	1221	4,61	17,64	7,11	22,94	92,51
O3-70-30	2,02	91,96	0,254	528	4,77	15,88	7,46	21,32	96,76
O3-70-50	1,66	87,01	22,226	320	4,85	16,76	8,01	24,74	98,04
O3-70-70	1,67	87,14	21,657	736	4,90	17,64	8,61	26,39	95,48
O3-60-10	1,99	111,17	19,162	664	4,35	15,88	7,25	19,45	95,24
O3-60-30	1,68	114,62	41,129	230	4,49	16,76	8,08	23,56	98,35
O3-60-50	1,99	116,23	19,373	645	4,43	16,76	8,76	21,16	95,37
O3-60-70	1,67	123,53	42,104	844	3,91	15,88	9,00	21,01	93,95

Ve třetí sérii bylo znovu připraveno 16 vzorků. Jejich soupis je v tabulce číslo 10 a výsledky uvedeny v tabulce číslo 11. Zde bylo pH nejnižší u vzorku O3-90-10 a mělo hodnotu 6,78 a nejvyšší u vzorku O3-60-70, s hodnotou 9,00. Koncentrace chloridů byla nejvyšší u vzorků O3-90-30 a O3-90-50 a měla hodnotu 24,70 g.l⁻¹ a nejnižší také u dvou vzorků O3-60-10 a O3-60-70 s hodnotou 15,88 g.l⁻¹. Vodivost byla naměřena nejvyšší 7,38 S.m⁻¹ u vzorku O3-90-30 a nejnižší 3,91 S.m⁻¹ u vzorku O3-60-70. Hustota byla nejvyšší u vzorku O3-80-30, a to 2,51 g.cm⁻³ a nejnižší měla hodnotu 1,44 g.cm⁻³ u vzorku O3-80-70. Koncentrace zinku ve výluhu byla stanovena pomocí AAS. Nejvyšší byla u vzorku O3-90-10, a to 2732 mg.l⁻¹ a nejnižší u vzorku O3-60-30, a to 230 mg.l⁻¹. Rozpuštěných látek bylo nejméně ve vzorku O3-80-70 o hodnotě 17,04 g.l⁻¹ a nejvíce ve vzorku O3-80-10, a to 33,40 g.l⁻¹. Vzorky této sady byly tvrdé a tuhé a u většiny vzorků se objevovaly pravděpodobně opět stopy chloridů. Pro třetí sadu byla vypočítaná optimální koncentrace 49 % popílku a 36 % cementu, pomocí statistické analýzy Anova

programu Statgraph. Grafické znázornění závislosti množství odpadu na koncentraci zinku je na obr. 4. S vyšším množstvím odpadu roste koncentrace zinku.



Obr. 4. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií třetí sady vzorků po 28 dnech

7.2.4 Čtvrtá sada – odpad solidifikovaný pomocí fluidního produktu

Tab. 12. Složení směsí čtvrté sady vzorků

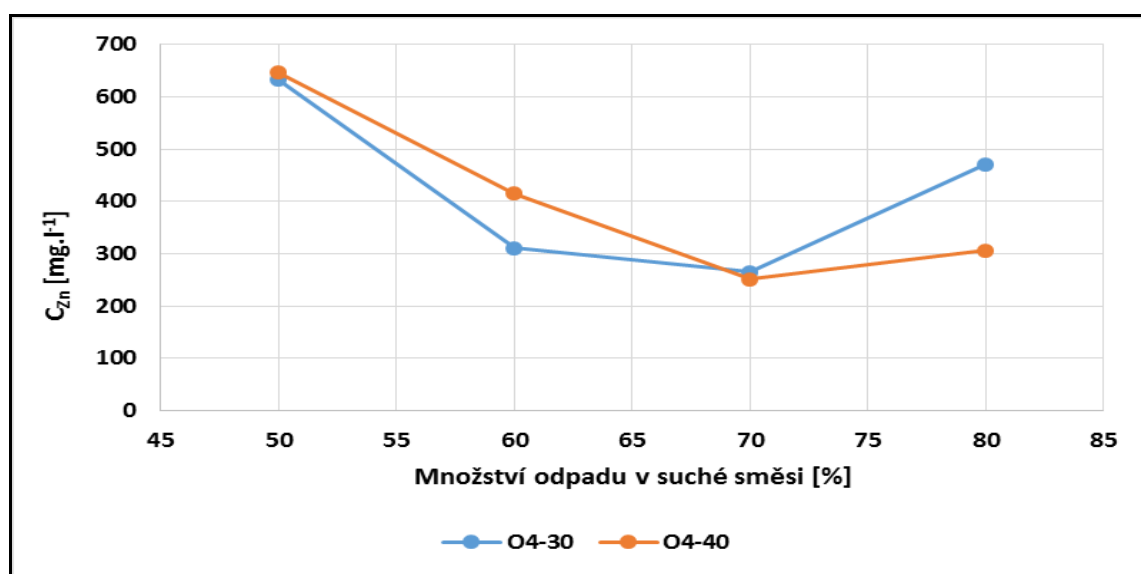
označení vzorku	m_o	m_{fluid}	V_{vody}	$f_{produkt}$	$V_{mokr\acute{a}\ sm\acute{e}š}$
	[g]	[g]	[ml]	[%]	[%]
O4-30-20	56	14	30	20	30
O4-30-30	49	21	30	30	30
O4-30-40	42	28	30	40	30
O4-30-50	35	35	30	50	30
O4-40-20	48	12	40	20	40
O4-40-30	42	18	40	30	40
O4-40-40	36	24	40	40	40
O4-40-50	30	30	40	50	40

Ve čtvrté sérii bylo zkoušeno 8 vzorků, které jsou uvedeny v tabulce číslo 12 a výsledky sestaveny do tabulky číslo 13. Nejvyšší hodnota pH 9,14 byla u vzorku O4-40-50 a nejnižší 7,20 u vzorku O4-40-20. Koncentrace chloridů byla nejvyšší u prvního vzorku, tedy O4-30-20, a to 23,81 g.l⁻¹ a nejnižší 14,11 g.l⁻¹ u vzorku O4-30-50. Vodivost byla nejnižší u vzorku O4-40-50 a měla hodnotu 3,18 S.m⁻¹ a nejvyšší u vzorku O4-30-20 s

hodnotou $5,25 \text{ S.m}^{-1}$. Pomocí přístroje AAS byla zjištěna nejnižší koncentrace zinku 251 mg.l^{-1} ve vzorku O4-40-30 a nejvyšší u vzorku O4-40-50, a to 646 mg.l^{-1} . Rozpuštěné látky byly nejvyšší u vzorku O4-30-30, a to $26,30 \text{ g.l}^{-1}$ a nejnižší $12,74 \text{ g.l}^{-1}$ u vzorku O4-30-20. Hustota byla nejvyšší u vzorku O4-30-50, a to $1,70 \text{ g.cm}^{-3}$ a nejnižší u vzorku O4-30-30 o hodnotě $1,26 \text{ g.cm}^{-3}$. Tahle sada byla jako „plastelína“, spíše měkká a na povrchu jsou bílé a oranžové krystalky, pravděpodobně opět stopy po chloridech. Pomocí statistické analýzy Anova, programu Statgraph vychází u této sady množství fluidního produktu 24 % a vody 40 %. Znázornění závislosti množství odpadu na koncentraci zinku je na obr. 5.

Tab. 13. Naměřené a vypočítané parametry vzorků čtvrté sady po 28 dnech

označení vzorku	ρ [g/cm ³]	Δm [%]	ΔV [%]	c_{Zn} [mg/l]	γ [S/m]	c_{Cl} [g/l]	pH [1]	RL [g/l]	retence [%]
O4-30-20	1,68	68,49	43,710	471	5,25	23,81	7,60	12,74	96,57
O4-30-30	1,26	93,49	122,619	265	4,99	17,64	8,08	26,30	97,76
O4-30-40	1,27	124,38	153,651	311	4,34	14,99	8,58	17,45	96,99
O4-30-50	1,70	171,16	128,550	633	3,56	14,11	9,12	21,28	92,59
O4-40-20	1,69	94,63	65,073	306	5,02	17,64	7,20	23,34	97,43
O4-40-30	1,65	120,17	90,826	251	4,25	14,99	8,08	22,20	97,61
O4-40-40	1,65	161,12	125,897	415	3,76	20,29	8,64	15,96	95,32
O4-40-50	1,68	216,13	169,728	646	3,18	15,88	9,14	21,90	91,18



Obr. 5. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn dvou sérií čtvrté sady vzorků po 28 dnech

7.3 Hodnocení solidifikovaného odpadu po 56 dnech

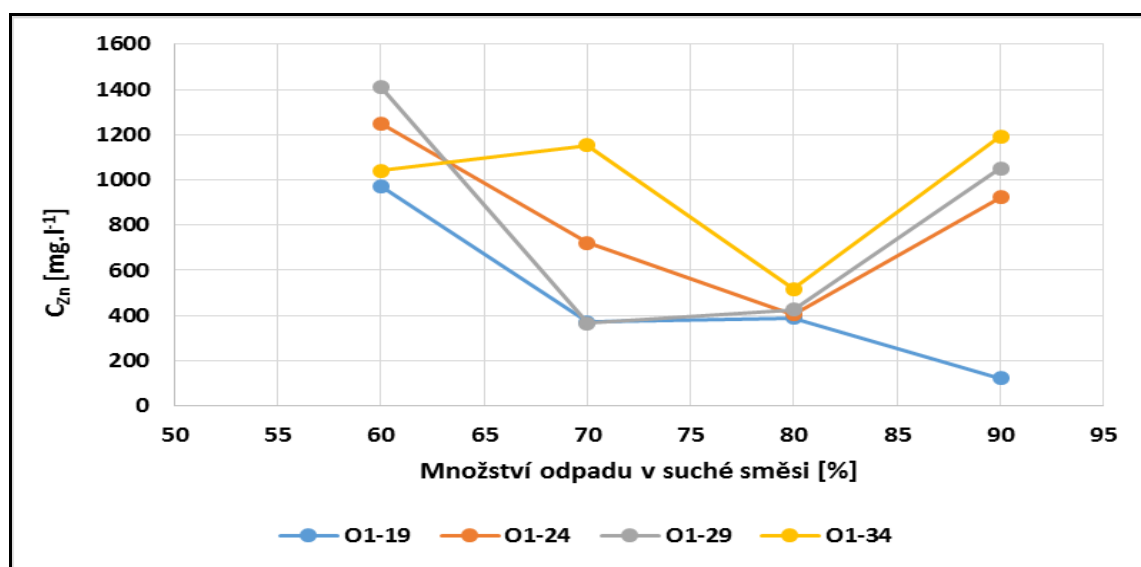
7.3.1 První sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu

Tab. 14. Naměřené a vypočítané parametry vzorků první sady po 56 dnech

označení vzorku	pH	γ	cCl	RL	cZn	ρ
	[1]	[S/m]	[g/l]	[g/l]	[mg/l]	[g/cm ³]
O1-19-10	7,00	6,44	24,70	28,18	122	2,48
O1-19-20	7,88	6,87	26,46	33,18	389	2,51
O1-19-30	7,92	6,11	22,05	37,35	371	2,51
O1-19-40	8,81	5,13	22,05	29,03	972	2,54
O1-24-10	7,24	7,28	28,23	32,14	922	2,48
O1-24-20	7,76	6,98	29,11	38,24	405	3,98
O1-24-30	8,40	5,77	20,29	40,27	722	1,67
O1-24-40	9,18	4,84	21,17	35,84	1250	1,69
O1-29-10	7,10	7,77	29,11	43,57	1050	2,51
O1-29-20	7,76	7,33	27,34	36,62	425	1,66
O1-29-30	7,93	6,24	28,23	34,38	366	2,48
O1-29-40	8,70	6,45	24,70	38,93	1412	1,65
O1-34-10	7,14	7,46	28,23	36,88	1193	1,65
O1-34-20	8,28	5,31	30,87	29,17	517	2,50
O1-34-30	8,67	5,46	28,23	31,17	1154	2,53
O1-34-40	9,15	4,27	17,64	46,45	1040	1,66

Vzorky solidifikovaného odpadu byly po 28 dnech tuhnutí v uzavřených formách otevřeny a ponechány volně na vzduchu schnout dalších 28 dní a poté byly znovu podrobeny vyluhovacím testům. V sérii bylo 16 vzorků, a výsledky měření jsou sestaveny do tabulky 14. Nejnižší pH měl vzorek O1-19-10, což bylo 7,0 a nejvyšší hodnotu pH vzorek O1-24-40, a to 9,18. Nejmenší množství chloridů (Cl⁻) bylo ve vzorku O1-34-40 s hodnotou 17,64 g.l⁻¹ a největší pak 30,87 g.l⁻¹ u vzorku O1-34-20. Vodivost byla nejmenší u vzorku O1-34-40, a to 4,27 S.m⁻¹ a nejvyšší hodnota 7,77 S.m⁻¹ byla u vzorku O1-19-10. Nejnižší hustota 1,65 g.cm⁻³ byla vypočítána u dvou vzorků O1-29-40 a O1-34-10 a nejvyšší 3,98 g.cm⁻³ u vzorku O1-24-20. Hustota oproti prvnímu měření podstatně vzrostla. Nejnižší koncentrace zinku byla naměřena u vzorku O1-19-10 a měla hodnotu 122 mg.l⁻¹ a nejvyšší u vzorku O1-24-40, a to 1 250 mg.l⁻¹. Koncentrace zinku

zůstala zhruba na stejné úrovni jako u prvního měření po 28 dnech. Rozpuštěné látky měly nejnižší hodnotu u vzorku O1-19-10, a to 28,18 g.l⁻¹ a nejvyšší u vzorku O1-34-40 s hodnotou 46,45 g.l⁻¹. Oproti prvnímu měření množství rozpuštěných látek mírně vzrostlo. Pro tuhle sadu byla vypočítána optimální koncentrace cementu 23 % a vody 19 %. Graf znázornění závislosti množství odpadu na koncentraci Zn je na obr. 6.



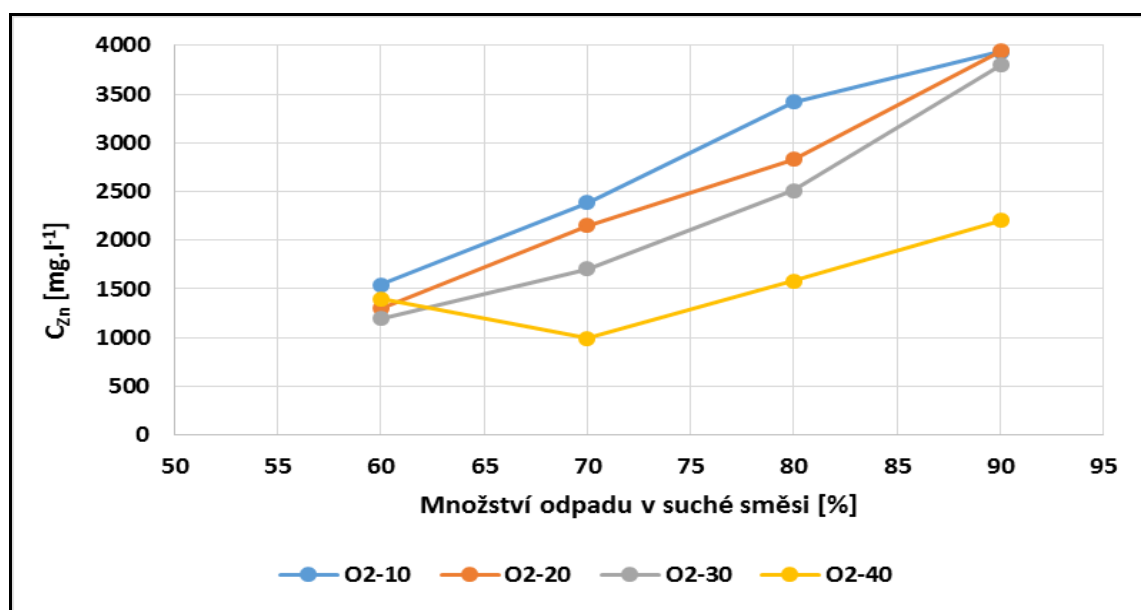
Obr. 6. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií první sady vzorků po 56 dnech

7.3.2 Druhá sada – odpad solidifikovaný pomocí popílku

V této sérii bylo 16 vzorků, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 15. Nejnižší hodnota pH byla naměřena u vzorku O2-30-10, a to 6,52 a nejvyšší hodnotu 7,12 měl vzorek O2-40-40. Hodnota pH klesla oproti prvnímu měření. Nejnižší množství chloridů bylo u vzorku O2-10-20 a byla to hodnota 20,29 g.l⁻¹ a nejvyšší 32,64 g.l⁻¹ u vzorku O2-40-20. Nejnižší vodivost byla naměřena u vzorku O2-10-40, a to 5,76 S.m⁻¹ a nejvyšší u vzorku O2-30-10 o hodnotě 8,74 S.m⁻¹. Nejnižší hustota byla vypočítána u dvou vzorků O2-10-10 a O2-10-20 a měla hodnotu 1,6 g.cm⁻³ a nejvyšší u vzorku O2-30-10 a to 2,54 g.cm⁻³. Hustota oproti prvnímu měření vzrostla. Nejvyšší koncentrace zinku byla 3 945 mg.l⁻¹ u vzorku O2-20-10 a nejnižší 993 mg.l⁻¹ u vzorku O2-40-30. Rozpuštěné látky proti prvnímu měření mírně vzrostly, nejnižší hodnota byla 22,74 g.l⁻¹ u vzorku O2-40-40 a nejvyšší 41,09 g.l⁻¹ u vzorku O2-20-10. Optimální koncentrace 40 % popílku a 40 % vody byla vypočítána pomocí statistické analýzy Anova programu Statgraph. Koncentrace zinku roste s množstvím odpadu, jak je znázorněno na obr. 7.

Tab. 15. Naměřené a vypočítané parametry vzorků druhé sady po 56 dnech

Označení vzorku	pH	γ	cCl	RL	cZn	ρ
	[1]	[S/m]	[g/l]	[g/l]	[mg/l]	[g/cm ³]
O2-10-10	6,73	7,09	28,23	37,13	3937	1,60
O2-10-20	6,71	5,99	20,29	29,89	3423	1,60
O2-10-30	6,84	6,03	22,05	27,69	2386	2,52
O2-10-40	6,93	5,76	21,17	27,29	1543	1,69
O2-20-10	6,78	7,85	29,99	41,09	3945	1,67
O2-20-20	6,79	7,27	27,34	35,14	2828	1,68
O2-20-30	6,86	6,94	24,70	33,36	2151	2,49
O2-20-40	7,01	5,96	22,93	26,52	1297	2,50
O2-30-10	6,52	8,74	24,70	30,20	3802	2,54
O2-30-20	6,90	7,63	27,34	32,20	2509	2,49
O2-30-30	6,78	6,77	26,46	33,64	1707	1,66
O2-30-40	6,94	6,00	22,05	35,65	1197	2,50
O2-40-10	6,77	8,40	28,23	40,68	2200	1,63
O2-40-20	6,87	7,51	32,64	24,53	1579	2,51
O2-40-30	7,06	6,07	22,93	23,33	993	2,52
O2-40-40	7,12	6,07	22,05	22,74	1395	1,65



Obr. 7. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií druhé sady vzorků po 56 dnech

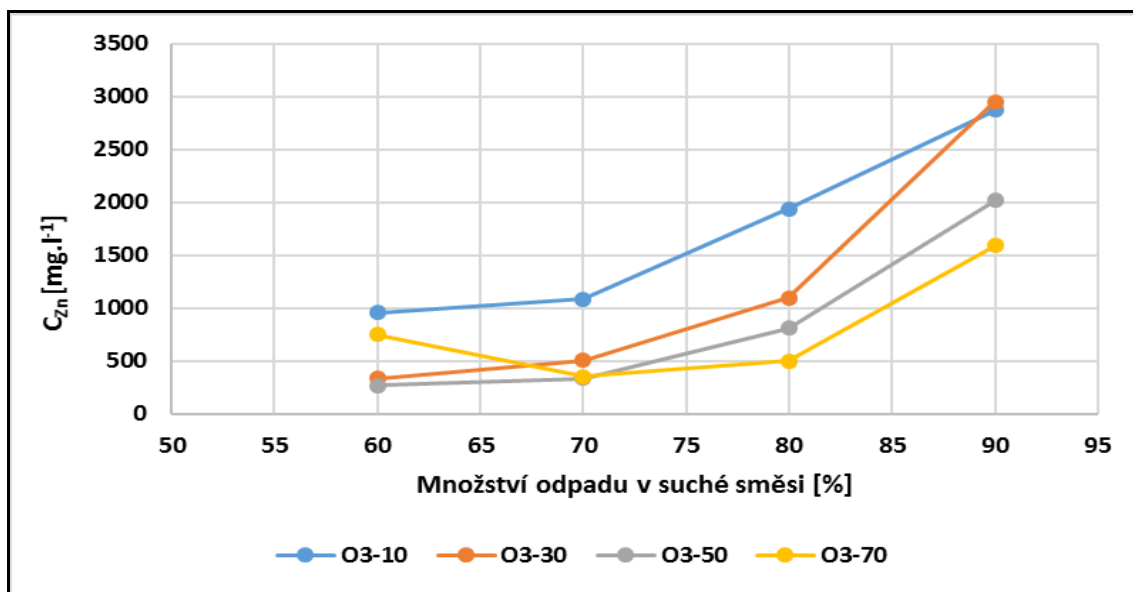
7.3.3 Třetí sada – odpad solidifikovaný pomocí cementu a popílku

Tab. 16. Naměřené a vypočítané parametry vzorků třetí sady po 56 dnech

Označení vzorku	pH [1]	γ [S/m]	cCl [g/l]	RL [g/l]	cZn [mg/l]	ρ [g/cm ³]
O3-90-10	6,82	7,95	29,11	39,21	2872	1,66
O3-90-30	6,60	7,56	28,23	38,52	2953	1,65
O3-90-50	6,95	6,80	26,46	35,22	2020	1,67
O3-90-70	6,80	6,89	23,81	34,55	1596	2,00
O3-80-10	6,95	7,11	27,34	35,00	1938	1,66
O3-80-30	6,97	6,97	28,23	34,21	1101	2,48
O3-80-50	7,11	6,89	26,46	35,60	812	2,51
O3-80-70	7,27	5,90	22,93	31,76	503	2,54
O3-70-10	7,15	6,71	25,58	36,04	1087	2,49
O3-70-30	7,28	6,38	23,81	34,40	510	1,45
O3-70-50	7,82	6,36	22,05	33,46	334	1,69
O3-70-70	7,87	6,11	22,93	43,22	352	1,66
O3-60-10	7,24	5,59	23,81	27,15	956	1,66
O3-60-30	8,04	5,08	21,17	28,93	336	1,66
O3-60-50	7,92	5,09	18,52	37,21	268	1,66
O3-60-70	8,75	5,03	21,17	30,46	749	1,66

V této sérii bylo 16 vzorků, jejichž soupis je uveden v tabulce 16. U třetí sady bylo nejnižší pH 6,60 naměřeno u vzorku O3-90-30 a nejvyšší hodnotu 8,75 u vzorku O3-60-70. Hodnoty pH mírně klesly oproti prvnímu měření. Nejnižší množství chloridů bylo 18,52 g.l⁻¹ u vzorku O3-60-50 a nejvyšší 29,11 g.l⁻¹ u vzorku O3-90-10. Nejnižší vodivost o hodnotě 5,03 S.m⁻¹ byla u vzorku O3-60-70 a nejvyšší 7,95 S.m⁻¹ u vzorku O3-90-10. Nejnižší hustota byla u vzorku O3-70-30, a to 1,45 g.cm⁻³ a nejvyšší 2,54 g.cm⁻³ u vzorku O3-80-70. Hustota vzorků oproti prvnímu měření klesla. Nejnižší koncentraci zinku 334 mg.l⁻¹ vykázal vzorek O3-70-50 a nejvyšší 2 953 mg.l⁻¹ vzorek O3-90-30. Koncentrace zinku zůstala podobná jako při prvním měření. Nejnižší hodnota rozpuštěných látek byla u vzorku O3-60-10 a měla hodnotu 27,15 g.l⁻¹ a nejvyšší u vzorku O3-70-70 s hodnotou 43,22 g.l⁻¹. Množství rozpuštěných látek se výrazně zvýšilo. Pro třetí sadu byla vypočítaná optimální koncentrace 60 % odpadu a 30 % cementu v pojivu, pomocí

statistické analýzy Anova programu Statgraph. Graf znázornění závislosti množství odpadu na koncentraci Zn je na obr. 8. Se zvyšujícím se množstvím odpadu ve vzorku směsi roste i koncentrace zinku.



Obr. 8. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií třetí sady vzorků po 56 dnech

7.3.4 Čtvrtá sada – odpad solidifikovaný pomocí fluidního produktu

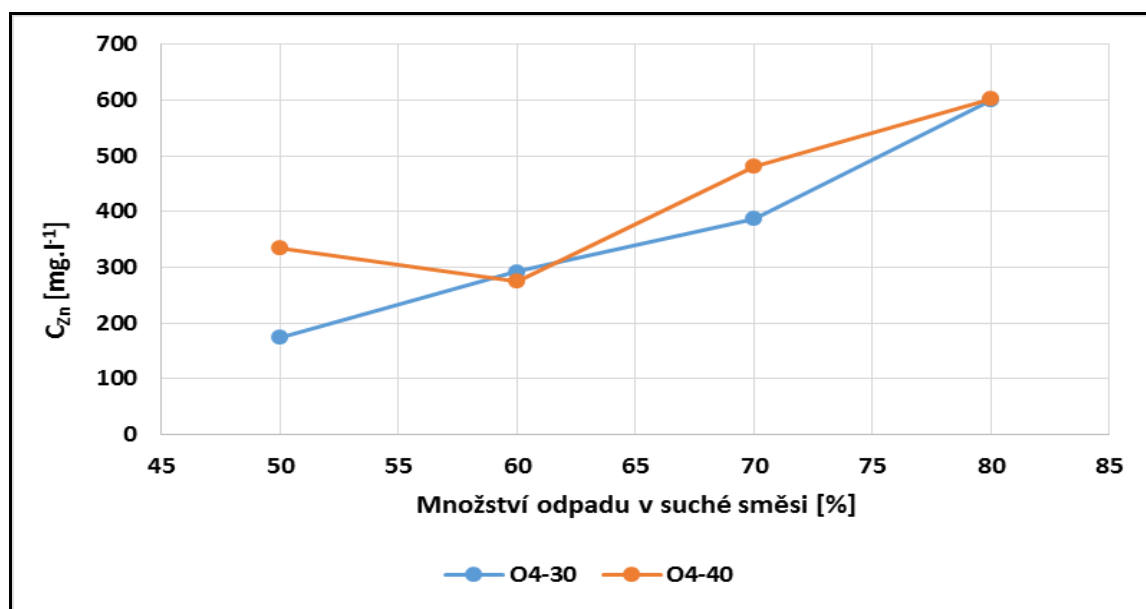
Tab. 17. Naměřené a vypočítané parametry vzorků čtvrté sady po 56 dnech

Označení vzorku	pH	γ	c_{Cl}	RL	c_{Zn}	ρ
	[1]	[S/m]	[g/l]	[g/l]	[mg/l]	[g/cm ³]
O4-30-20	7,36	7,52	26,46	32,13	601	2,49
O4-30-30	7,71	6,88	18,52	35,37	388	1,67
O4-30-40	7,75	6,01	28,23	35,65	293	1,68
O4-30-50	7,92	4,91	18,52	29,23	175	2,01
O4-40-20	7,32	7,48	28,23	21,53	603	1,25
O4-40-30	7,69	6,67	25,58	36,68	482	1,67
O4-40-40	7,82	5,81	27,34	35,44	276	1,42
O4-40-50	8,79	3,83	14,99	21,84	335	2,51

V této sérii bylo 8 vzorků, jejichž soupis je uveden v tabulce 17. Nejnižší hodnota pH byla naměřena u vzorku O4-40-20, a to 7,32 a nejvyšší hodnotu mělo pH vzorku O4-40-

50, a to 8,79. Hodnoty pH se výrazně snížily. Nejnižší množství chloridů bylo naměřeno u vzorku O4-40-50 a mělo hodnotu $14,99 \text{ g.l}^{-1}$ a nejvyšší u dvou vzorků O4-30-40 a O4-40-20 s hodnotou $28,23 \text{ g.l}^{-1}$. Nejnižší vodivost byla naměřena u vzorku O4-40-50 a měla hodnotu $3,83 \text{ S.m}^{-1}$ a nejvyšší hodnota byla u vzorku O4-30-20 s hodnotou $7,52 \text{ S.m}^{-1}$. Vodivost mírně vzrostla oproti prvnímu měření. Nejnižší hustota byla $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ u vzorku O4-40-20 a nejvyšší $2,51 \text{ g.cm}^{-3}$ u vzorku O4-40-50. Hustota u vzorků čtvrté sady oproti prvnímu měření lehce vzrostla. Koncentrace zinku byla nejnižší u vzorku O4-30-50 a měla hodnotu 175 mg.l^{-1} a nejvyšší u vzorku O4-40-20 a měla hodnotu 603 mg.l^{-1} . Koncentrace zinku jsou stejné jako u prvního měření. Nejméně rozpuštěných látek bylo u vzorku O4-40-20, a to $21,53 \text{ g.l}^{-1}$ a nejvíce $36,68 \text{ g.l}^{-1}$ u vzorku O4-40-30. Množství rozpuštěných látek oproti prvnímu měření (po 28 dnech) vzrostlo. U této sady vychází množství fluidního produktu 50 % a vody 34 %. Tyto hodnoty byly zjištěny programem Statgraph, pomocí statistické analýzy Anova.

Grafické znázornění závislosti množství odpadu na koncentraci zinku je na obr. 9. Se zvyšujícím se množstvím odpadu ve vzorku směsi roste i koncentrace zinku ve vodném výluhu.



Obr. 9. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn obou sérií čtvrté sady po 56 dnech

7.4 Hodnocení odpadu solidifikovaného pomocí cementu a NaHCO_3

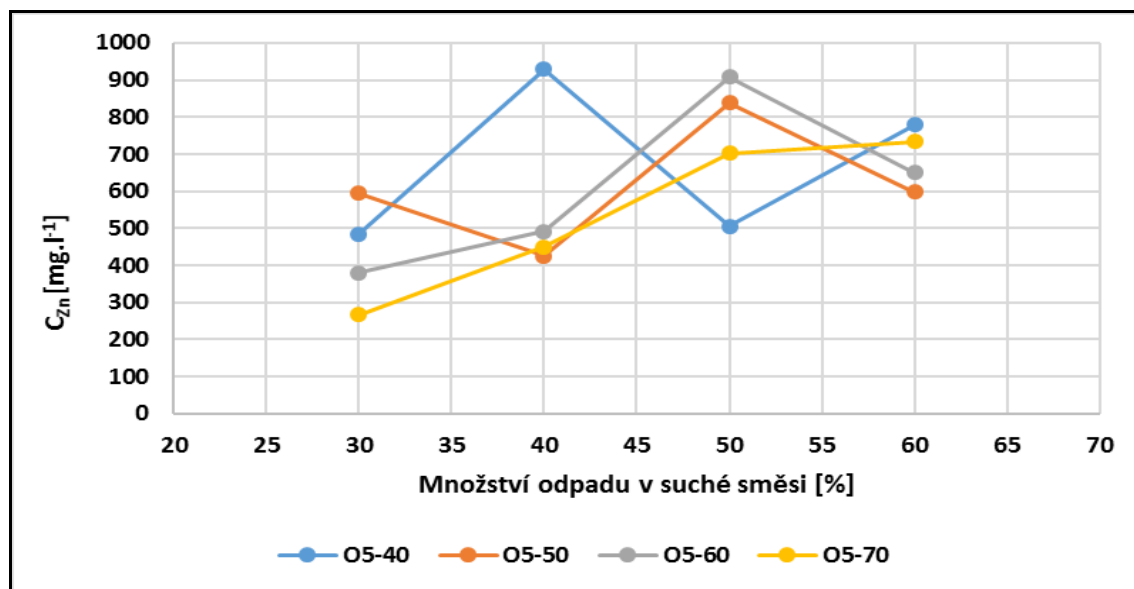
Bylo namícháno 16 vzorků. Jejich soupis je uveden v tab. 18. U těchto směsí byl proveden po 28 dnech tuhnutí vyluhovací test a byla stanovena koncentrace chloridů, rozpuštěných látek, zinku a změřeno pH a měrná elektrická vodivost. Hodnoty jsou zapsány v tab. 19. Všechny vzorky vykazovaly pH v zásadité oblasti. Nejnižší pH měl vzorek O5-50-50, a to 8,29 a nejvyšší 9,01 vzorek O5-50-50 ze třetí série. Dále byla změřena měrná elektrická vodivost s nejnižší hodnotou $3,96 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ u vzorku O5-60-40 ze 4 série a nejvyšší měl vzorek O5-60-40, a sice $5,53 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ z první série. Dále bylo stanoveno množství chloridů ve vyluhu. Koncentrace chloridů byla nejvyšší u vzorku O5-40-60 o hodnotě $34,95 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a nejnižší $23,54 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ u vzorku O5-30-70. Dalším stanoveným parametrem byly rozpuštěné látky, které byly nejnižší u vzorku O5-60-40, a to $16,17 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a nejvyšší u vzorku O5-60-40, a to $31,47 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Posledním parametrem bylo stanovení koncentrace Zn, která byla nejnižší u vzorku O5-30-70, a to $267 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a nejvyšší hodnota $929 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ byla u vzorku O5-60-40. Závislost množství odpadu na koncentraci Zn je znázorněna na obr. 10.

Tab. 18. Složení směsí vzorků s přidavkem NaHCO_3 po 28 dnech

označení vzorku	m_o [g]	m_c [g]	m_{NaHCO_3} [g]	Csuchá směs [%]	Umokrá směs [%]
O5-60-40	35	9,0	6,0	60	40
O5-50-50	35	7,5	7,5	50	50
O5-40-60	35	6,0	9,0	40	60
O5-30-70	35	4,5	10,5	30	70
O5-60-40	30	12,0	8,0	60	40
O5-50-50	30	10,0	10,0	50	50
O5-40-60	30	8,0	12,0	40	60
O5-30-70	30	6,0	14,0	30	70
O5-60-40	25	15,0	10,0	60	40
O5-50-50	25	12,5	12,5	50	50
O5-40-60	25	10,0	15,0	40	60
O5-30-70	25	7,5	17,5	30	70
O5-60-40	20	18,0	12,0	60	40
O5-50-50	20	15,0	15,0	50	50
O5-40-60	20	12,0	18,0	40	60
O5-30-70	20	9,0	21,0	30	70

Tab. 19. Naměřené a vypočítané parametry vzorků s přidavkem NaHCO_3

označení vzorku	pH	γ	c_{Cl}	RL	c_{Zn}
	[1]	[S/m]	[g/l]	[g/l]	[mg/l]
O5-60-40	8,38	5,53	34,06	31,47	780
O5-50-50	8,29	5,44	33,88	29,00	598
O5-40-60	8,42	5,33	32,99	29,28	650
O5-30-70	8,53	5,13	33,35	26,47	734
O5-60-40	8,45	4,90	29,25	25,19	505
O5-50-50	8,59	5,13	33,17	27,73	838
O5-40-60	8,71	5,46	34,95	29,09	909
O5-30-70	8,70	5,34	32,99	27,69	702
O5-60-40	8,82	4,30	27,28	23,77	929
O5-50-50	8,81	4,22	25,14	17,19	426
O5-40-60	8,80	4,65	28,71	18,57	492
O5-30-70	8,71	5,20	28,71	21,56	450
O5-60-40	8,98	3,96	24,61	16,17	485
O5-50-50	9,01	4,40	26,21	20,09	594
O5-40-60	8,84	4,56	24,79	20,45	381
O5-30-70	8,68	4,58	23,54	20,87	267

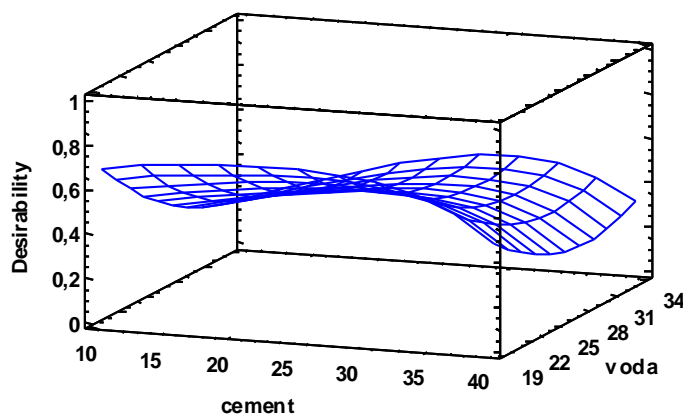
Obr. 10. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn vzorků všech čtyř sérií sady s pojivem cementu a přidavkem NaHCO_3 po 28 dnech

7.5 Multifaktoriální analýza

Multifaktoriální analýzou byly stanoveny nejlepší solidifikační poměry. Byly zvoleny vždy dva hlavní faktory, což byl obsah vody ve směsi a obsah pojiva v suché směsi a tři vedlejších faktory jako koncentrace zinku, chloridů a množství rozpuštěných látek ve výluhu, které jsou zapsány v tabulkách č. 15; 16; 17 a 18. Do programu Statgraph byly zadány naměřené a vypočtené hodnoty a ten následně graficky vyhodnotil optimální poměry pojiva a vody.

7.5.1 Statistické vyhodnocení první sady po 56 dnech

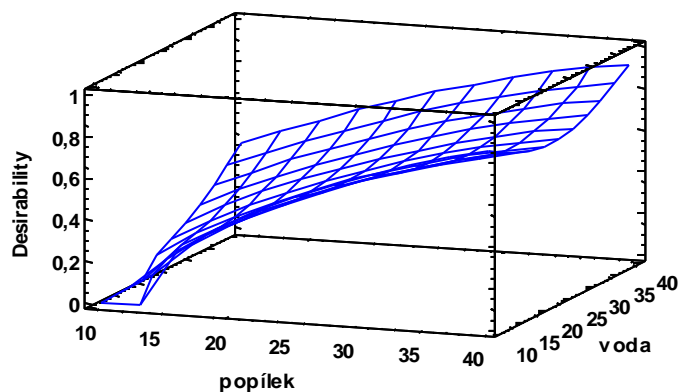
Nejlepší poměr dle statistického optima je 23 % cementu a 19 % vody. Z hlediska získaných dat byla optimální koncentrace zinku 168 mg.l^{-1} , rozpuštěných látek $31,02 \text{ g.l}^{-1}$ a koncentrace chloridů $12,56 \text{ g.l}^{-1}$ (obr.11.).



Obr. 11. Prostorový graf statistického vyhodnocení první sady po 56 dnech

7.5.2 Statistické vyhodnocení druhé sady po 56 dnech

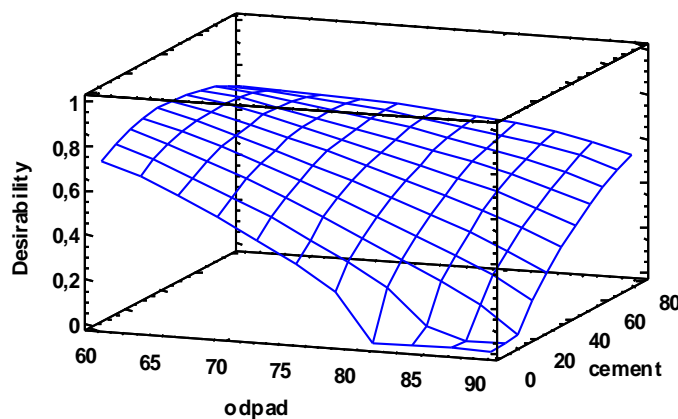
Nejlepší poměr dle statistického optima je 40 % popílku a 40 % vody. Z hlediska získaných dat byla optimální koncentrace zinku 962 mg.l^{-1} , rozpuštěných látek $24,49 \text{ g.l}^{-1}$ a koncentrace chloridů $11,29 \text{ g.l}^{-1}$ (obr. 12.).



Obr. 12. Prostorový graf statistického vyhodnocení druhé sady po 56 dnech

7.5.3 Statistické vyhodnocení třetí sady po 56 dnech

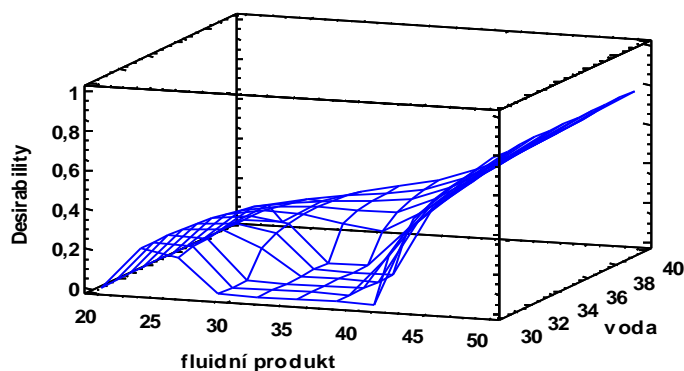
Nejlepší poměr dle statistického optima je 60 % odpadu a 38 % cementu. Ze získaných dat byla optimální koncentrace zinku 468 mg.l^{-1} , rozpuštěných látek $31,35 \text{ g.l}^{-1}$ a koncentrace chloridů $10,52 \text{ g.l}^{-1}$ (obr. 13.).



Obr. 13. Prostorový graf statistického vyhodnocení třetí sady po 56 dnech

7.5.4 Statistické vyhodnocení čtvrté sady po 56 dnech

Nejlepší poměr dle statistického optima je 50 % fluidního produktu a 34 % vody. Z hlediska získaných dat byla optimální koncentrace zinku 241 mg.l^{-1} , rozpuštěných látek $25,77 \text{ g.l}^{-1}$ a koncentrace chloridů $9,17 \text{ g.l}^{-1}$ (obr. 14.).



Obr. 14. Prostorový graf statistického vyhodnocení čtvrté sady po 56 dnech

7.6 Ověření účinnosti S/S pro nalezenou optimální recepturu

Tab. 20. Optimální poměry směsí a jejich parametry dle statistické analýzy

Optimální složení směsi (pojivo + voda)	c _{Zn}	pH	RL	γ	c _{Cl}
	[mg/l]	[1]	[g.l ⁻¹]	[S/m]	[g.l ⁻¹]
Cement 23 % Voda 19 %	379	7,78	31,85	6,52	25,15
Fluidní popílek 50 % Voda 34 %	196	7,89	25,82	4,93	18,31

Z výsledků statistické analýzy byly určeny ideální poměry pojidla a vody ve směších. Byly připraveny dva vzorky směsí. První obsahovala 23 % cementu a 19 % vody (kapitola 7.5.1 a obr. 11.) a druhá směs byla složena z 50 % fluidního produktu spalování a 34 % vody (kapitola 7.5.4 a obr. 14.). Změřené parametry uvedené v tabulce 20. neodpovídají hodnotám zjištěným statistickou analýzou.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo pomocí vícefaktorové regresní analýzy navrhnout vhodnou recepturu stabilizace/solidifikace odpadu s vysokým obsahem zinku. Postupně byla použita pojiva cement, popílek, cement + popílek, produkt fluidního spalování a cement s přísadkou aditiva hydrogenuhličitanu sodného.

Z výsledků statistické analýzy byly zjištěny ideální poměry pojiva a vody. Podle nich byly připraveny dva vzorky směsí a podrobeny vodnému výluhu s výsledky, které jsou v tabulce 20. Výsledky ale neodpovídaly hodnotám zjištěným statistickou analýzou.

U všech použitých pojiv bylo dosaženo vzhledem k vysokému obsahu zinku v původním odpadu podstatného snížení množství zinku v konečném vodném výluhu.

Retence, čili zadržený zinek, v původním odpadu byl vypočítán na hodnotu 83,16 %. U všech směsí byla retence vyšší, u první sady v rozmezí 94,08 – 99,66 %; u druhé 87,01 – 97,05 %; u třetí sady 86,94 – 98,35 % a u čtvrté 91,18 – 97,76 %. To znamená, že při provedené solidifikaci došlo i ke stabilizaci odpadu a do určité míry i k fixaci zinku.

Koncentrace zinku v konečném výluhu byla u čtyř nejlepších vzorků nejnižší u čtvrté sady s pojivem fluidního produktu spalování v hodnotě 270 mg.l^{-1} a u první sady s pojivem cementu 312 mg.l^{-1} . Bereme-li v úvahu, že vodný výluh původního vzorku odpadu obsahoval obrovské množství zinku, tj. $4\,630 \text{ mg.l}^{-1}$, je zůstatek ve vodném výluhu po stabilizaci/solidifikaci 5,83 – 6,74 % zinku, což znamená 93,26 – 94,17 procentní úspěšnost zvoleného technologického postupu.

Co se týká ekonomického hlediska, popílek a produkt fluidního spalování můžeme použít v podstatě zadarmo, menší náklady by vznikly pouze při přepravě materiálu. Nejdražší z použitých pojiv je cement, jehož cena je asi 2 590,- Kč za tunu. Při poslední sadě pojiva cementu s aditivem hydrogenuhličitanu sodného nebylo dosaženo lepších výsledků, proto o tomto způsobu stabilizace/solidifikace neuvažujeme.

U nejlepší varianty S/S při použití cementu, tj. 0,88 kg odpadu a 0,14 kg cementu, by náklady na zpracování 1 tuny odpadu činily přibližně 414,- Kč.

Pomocí optimalizačního výpočtu se nejlépe hodí solidifikační receptura za použití produktu fluidního spalování. Tato technologie bude i finančně nejméně náročná.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zákon 185/2001 Sb., odpadech, ve znění pozdějších předpisů, novela 223/2015 Sb., o odpadech [online]. [cit.2016-2-16]. Dostupné na <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [2] Kafka Z., Punčochářová J. Pojiva a aditiva pro chemickou stabilizaci nebezpečných odpadů. *Chemické listy*. 2002, 96, stránky 800 - 804
- [3] Zákon 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí (EIA *Environmental Impact Assessment*) [online]. [cit.2016-2-20]. Dostupné na <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-100>
- [4] Nařízení vlády 352/2014 Sb., o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 ze dne 22. prosince 2014 [online]. [cit.2016-2-20]. Dostupné na <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-352>
- [5] Zinek [online]. [cit.2016-2-20]. Dostupné na <http://www.prvky.com/30.html>
- [6] Toxicita zinku [online]. [cit.2016-2-20]. Dostupné na <http://www.krevnicentrum.cz/laboratorni-prirucka/HVEZDAAADL.htm>
- [7] Směrnice EU 98/2008/ES ze dne 19. 11. 2008, o odpadech
- [8] Vyhláška 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb. a 83/2016 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady
- [9] Kafka Z., Vošický J. Chemická stabilizace nebezpečných složek v průmyslových odpadech. [online].[cit.2016-3-20] *Chemické listy*. 1998, 92, stránky 789 – 793, http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1998_10_789-793.pdf
- [10] ČSN EN 12457-4 (838041) Charakterizace odpadů – Zkouška vyluhovatelnosti-Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů.
- [11] Slavík H., Solidifikace odpadů. Ostrava: VŠB, Technická univerzita Ostrava, 2009
- [12] Vyhláška 93/2016 Sb., Ministerstva životního prostředí, o Katalogu odpadů
- [13] Vyhláška 94/2016 Sb., Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zdravotnictví o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů.

- [14] Kuraš M. *Technologie zpracování odpadů*. Praha: VŠCHT Praha, 1993.
- [15] Způsoby využívání a odstraňování odpadů [online]. [cit.2016-3-10]. Dostupné na <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/odpady/odpady3.htm>
- [16] Fyzikálně - chemické procesy úpravy odpadů [online]. [cit.2016-3-10]. Dostupné na http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=fyzikalne_chemicke_procesy_upravy_odpadu&site=odpady
- [17] Bednařík V., Vondruška M., <http://odpady-online.cz/stabilizacesolidifikace-nebezpecnych-odpadu-pomoci-popilku/>, odpady, 2002, č.12, ISSN 1210 - 4922, str. 24
- [18] Bednařík V., Slavík R., Vondruška M. Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady, <http://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/geopolymery-a-jejich-pouziti-pro-nakladani-s-odpady> , odpady 4/2006, str. 19 – 20.
- [19] Radka Novotná, Jiří Hendrych, Jiří Kroužek, Daniel Randula, Ověření možnosti platnění metody stabilizace/solidifikace pro odpad ze zpracování skládkového výluhu. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav chemie ochrany prostředí, Dostupné na <http://www.odpadoveforum.cz/DVD/dokumenty/prispevky/216.pdf>
- [20] KAMENÍČEK, Jiří. *Anorganická chemie*. 4. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-2387-6, str. 303-307
- [21] LEŠKO, Juraj, Jan TRŽIL a Roman ŠTARHA. *Anorganická chemie*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2398-0.
- [22] TOUŽÍN, Jiří. *Stručný přehled chemie prvků*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2001. ISBN 80-210-2635-9, str. 212-215.
- [23] KIZLINK, Juraj. *Nakládání s odpady*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2007. ISBN 978-80-214-3348-9.
- [24] FRIEDRICH, Václav. *Statistika 1: vysokoškolská učebnice pro distanční studium*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-913-3, str. 285-286
- [25] GREENWOOD, N, František JURŠÍK a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-85427-38-9, str:1490-1517
- [26] VOHLÍDAL, JIŘÍ; ŠTULÍK, KAREL; JULÁK, ALOIS. *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-855-5.

- [27] Lung Kwang Pan at al.: Optimization for solidification of low-level- radioactive resin using Taguchi analysis, *Waste Management* 21 (2001) 767772.
- [28] M. T. Montañés, M.S Roux et al.: The effectiveness of the stabilization/solidification process on the leachability and toxicity of the tannery sludge chromium. *Journal of Environmental Management*, 2014 p. 71-79
- [29] On-line databáze složení potravin ČR, verze 4.13. In: *Centrum pro databázi složení potravin ČR. Ústav zemědělské ekonomiky a informací a Výzkumný ústav potravinářský Praha* [online]. 2013 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.nutridatabaze.cz/>
- [30] HOUSECROFT, Catherine E. a A. G. SHARPE. *Anorganická chemie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014. ISBN 978-80-7080-872-6, str. 754-756
- [31] KURAŠ, Mečislav. *Odpadové hospodářství*. Chrudim: Ekomonitor, 2008. ISBN 978-80-86832-34-0, str. 117-122
- [32] Anorganická pojiva [online]. [cit.2016-3-20]. Dostupné na http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

UTB	Univerzita Tomáše Bati
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
S/S	Stabilizace a solidifikace
pH	Kyselost a zásaditost roztoků
AAS	Atomová absorpční spektroskopie
EIA	Environmental Impact Assesment
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
ES	Evropské společenství
SEA	Strategic Environmental Assesment
NO	Nebezpečný odpad
S-IO	Skládka inertního odpadu
S-OO	Skládka ostatního odpadu
S-NO	Skládka nebezpečného odpadu
DOC	Rozpuštěný organický uhlík
RL	Rozpuštěné látky
ČSN EN	Česká technická norma
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
L/S	Poměr voda / pevná fáze

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Vzorky solidifikovaného odpadu	37
Obr. 2. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií první sady vzorků po 28 dnech	41
Obr. 3. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií druhé sady vzorků po 28 dnech	43
Obr. 4. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií třetí sady vzorků po 28 dnech	45
Obr. 5. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn obou sérií čtvrté sady vzorků po 28 dnech	46
Obr. 6. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií první sady vzorků po 56 dnech	48
Obr. 7. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií druhé sady vzorků po 56 dnech	49
Obr. 8. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn všech čtyř sérií třetí sady vzorků po 56 dnech	51
Obr. 9. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn obou sérií čtvrté sady vzorků po 56 dnech	52
Obr. 10. Porovnání závislosti množství odpadu na koncentraci Zn vzorků všech čtyř sérií sady s pojivem cementu a přísadkou NaHCO_3 po 28 dnech	54
Obr. 11. Prostorový graf statistického vyhodnocení první sady po 56 dnech	55
Obr. 12. Prostorový graf statistického vyhodnocení druhé sady po 56 dnech	56
Obr. 13. Prostorový graf statistického vyhodnocení třetí sady po 56 dnech	56
Obr. 14. Prostorový graf statistického vyhodnocení čtvrté sady po 56 dnech	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Nebezpečné vlastnosti odpadů podle přílohy č. 3 k vyhlášce č. 83/2016 Sb. ...	16
Tab. 2. Nejvyšší přípustné hodnoty ukazatelů pro třídy vyluhovatelnosti	18
Tab. 3. Stanovené parametry vodného výluhu požitých pojiv.	32
Tab. 4. Parametry vzorku odpadu a jeho vodného výluhu	38
Tab. 5. Stanovení sušiny původního vzorku	38
Tab. 6. Složení směsí první sady vzorků	39
Tab. 7. Naměřené a vypočítané parametry vzorků první sady po 28 dnech	40
Tab. 8. Složení směsí druhé sady vzorků	41
Tab. 9. Naměřené a vypočítané parametry vzorků druhé sady po 28 dnech	42
Tab. 10. Složení směsí třetí sady vzorků	43
Tab. 11. Naměřené a vypočítané parametry vzorků třetí sady po 28 dnech	44
Tab. 12. Složení směsí čtvrté sady vzorků	45
Tab. 13. Naměřené a vypočítané parametry vzorků čtvrté sady po 28 dnech	46
Tab. 14. Naměřené a vypočítané parametry vzorků první sady po 56 dnech	47
Tab. 15. Naměřené a vypočítané parametry vzorků druhé sady po 56 dnech	49
Tab. 16. Naměřené a vypočítané parametry vzorků třetí sady po 56 dnech	50
Tab. 17. Naměřené a vypočítané parametry vzorků čtvrté sady po 56 dnech	51
Tab. 18. Složení směsí vzorků s přídavkem NaHCO_3 po 28 dnech	53
Tab. 19. Naměřené a vypočítané parametry vzorků s přídavkem NaHCO_3	54
Tab. 20. Optimální poměry směsí a jejich parametry dle statistické analýzy	57