



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ



FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

PROVĚŘENÍ MOŽNOSTI TRANSFORMACE NEBEZPEČNÉHO ODPADU V NOVÝ MATERIÁL

VERIFICATION OF THE POSSIBILITY OF HAZARDOUS WASTE TRANSFORMATION INTO NEW
MATERIAL

Diplomová práce

MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ BÍNA

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. TOMÁŠ BÍNA
Název	Prověření možnosti transformace nebezpečného odpadu v nový materiál
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

KAFKA, Z., PUNČOCHÁŘOVÁ, J., Využití procesu solidifikace/stabilizace při zneškodňování nebezpečných složek v průmyslových odpadech, Vysoká škola chemicko-technologická Praha, Ústav chemie ochrany prostředí, 2000.

STEGEMANN, J.A., ZHOU, Q., Screening tests for assessing treatability of inorganic industrial wastes by stabilisation/solidification with cement. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161 (1).

Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. v platném znění, příslušné technické normy, články v odborných časopisech a sbornících, jiná odborná literatura.

Zásady pro vypracování

Tato práce se zabývá využitím technologie solidifikace pro zneškodnění nebezpečných odpadů se záměrem dosáhnout materiálového využití nebezpečného odpadů, které je samotným zákonem o odpadech upřednostňováno před jiným způsobem využití odpadu. Cílem této práce tedy je nalezení a prověření nové solidifikační cesty, která umožní účinnou transformaci nebezpečného odpadu v nový materiál a jeho další využití ve stavebnictví.

1. V teoretické části souhrnně zpracujte doposud získané poznatky z oblasti solidifikace nebezpečných odpadů a využití produktů solidifikace ve stavebnictví v ČR i v zahraničí.
2. Proveďte výběr nejvhodnějších nebezpečných odpadů včetně určení jejich vhodných aktivních průmyslových zdrojů. Proveďte identifikaci vlastností vybraných nebezpečných odpadů. Vzhledem k charakteru vybraných nebezpečných odpadů zvolte nejvhodnější solidifikační činidla a identifikujte jejich vlastnosti.
3. Z vybraných vstupních surovin navrhnete progresivní solidifikační receptury a v případě potřeby navrhnete také vhodné způsoby předúpravy vstupních surovin.
4. Na základě volby optimální možnosti budoucího využití progresivního solidifikátu ve stavebnictví vytvořte metodiku experimentálního zkoušení solidifikátu.
5. Dle vytvořené metodiky laboratorně prověřte účinnost solidifikačních receptur. Vyhodnoťte výsledky laboratorního prověření vzhledem k vybraným způsobům jeho budoucího využití a v případě potřeby solidifikační receptury modifikujte.
6. Proveďte poloprovozní prověření možnosti transformace nebezpečného odpadu v nový materiál prostřednictvím poloprovozní solidifikace. Porovnejte výsledky laboratorního a poloprovozního prověření a celkově zhodnoťte úspěšnost nalezených solidifikačních cest.

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT V ČESKÉM A ANGLICKÉM JAZYCE

Tato práce se zabývá využitím technologie solidifikace pro zneškodnění nebezpečných odpadů se záměrem na materiálové využití odpadů. Cílem této práce je tedy nalezení a prověření nové solidifikační cesty, která umožní účinnou transformaci nebezpečného odpadu v nový materiál a jeho další využití ve stavebnictví.

This work deals with the use of solidification technology for the disposal of hazardous waste with the aim of its material recovery. The goal of this Master's Thesis is to find and verify a new solidification way that will allow efficient transformation of hazardous waste into new material and its further use in civil engineering.

KLÍČOVÁ SLOVA V ČESKÉM A ANGLICKÉM JAZYCE

SOLIDIFIKACE – SOLIDIFICATION

ODPAD - WASTE

NEBEZPEČNÝ ODPAD – HAZARDOUS WASTE

ÚPRAVA ODPADU – WASTE TREATMENT

VYUŽITÍ ODPADU – WASTE RECOVERY

ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ – WASTE MANAGEMENT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

BÍNA Tomáš; *Prověření možnosti transformace nebezpečného odpadu v nový materiál.* BRNO, 2013. Počet stran 99. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce: prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně 10.11.2012

.....
Bína Tomáš

Poděkování za rady a odborné vedení této diplomové práce prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc.

Tato práce vznikla jako součást projektu: FR-TI2/341 „Vývoj progresivní solidifikační technologie pro transformaci nebezpečných odpadů v nové materiály“.

Obsah

1. Úvod	3
2. Teoretická část	4
2.1. Legislativa o odpadech	4
2.2. Solidifikace odpadů	9
2.2.1 Solidifikace	9
2.2.2. Rozdělení solidifikace dle místa provádění	11
2.2.3. Rozdělení solidifikace dle použitých pojiv	13
2.3. Specifikace prováděných zkoušek	18
3. Cíl práce	22
4. Metodika práce	23
5. Experimentální Část	26
5.1. ETAPA I - Volba vstupních surovin	26
5.1.1. Výběr a identifikace vlastností NO	26
5.1.2. Výběr a identifikace S/S pojiv	30
5.2. ETAPA II - Návrh solidifikačních receptur	38
5.2.1. Základní solidifikační receptury	38
5.2.2. Neutralizační solidifikační receptury	39
5.2.3. Závěr ETAPY II	41
5.3. ETAPA III - Návrh metodiky zkoušení solidifikátu	42
5.3.1. Základní posouzení úspěšnosti S/S receptur	43
5.3.2. Výběr neúčinnějších solidifikačních receptur	43
5.3.3. Zkoušení dle n.v. č. 163/2002 Sb.	44
5.3.4 Závěr ETAPY III	47
5.4. ETAPA IV Prověření S/S receptur	48
5.4.1. Příprava zkušebních těles	48

5.4.2. Základní prověření S/S receptur	51
5.4.3. Výběr nejméně úspěšných solidifikačních receptur	64
5.4.4. Zkoušení dle nařízení vlády č. 163/2002 Sb.....	70
5.4.5. Zkoušení dle vyhlášky 294/2005 Sb.....	79
5.4.6. Poloprovozní ověření.....	82
5.4.7. Závěr ETAPY IV	84
6. Závěr	87
7. Přílohy	91
8. Citovaná literatura	93
9. Seznamy.....	95
9.1. Seznam zkratk.....	95
9.2. Seznam tabulek.....	96
9.3. Seznam grafů	97
9.4. Seznam obrázků.....	98
9.5. Seznam rovnic	99

1. Úvod

Využívání odpadů je v současné době velmi aktuálním tématem, jelikož obrovské množství vyprodukovaného odpadu neúměrně zatěžuje životní prostředí. V případě odpadů produkovaných průmyslovými podniky je nejlepší cestou předcházení jejich vzniku využíváním ekologicky šetrných, bezodpadových výrobních technologií. V mnoha průmyslových odvětvích však není použití takových technologií možné. Proto je třeba hledat stále nové možnosti využívání odpadů, zvláště takové, u kterých se nejedná pouze o přímé získání energie, ale o materiálové využití odpadů v rámci zákona 185/2001 Sb.

Současný stav životního prostředí je významně ovlivněn vznikem řady odpadních látek s nebezpečnými vlastnostmi, které mohou být škodlivé zejména pro biotické složky ekosystému. Proto se efektivní způsoby zneškodňování stávají prioritní otázkou ekonomickou a ekologickou. Používané technologie patří k nejdynamičtější se rozvíjejícím odvětvím národního hospodářství a výzkum v této oblasti je stimulován zejména stále se zvyšujícími požadavky v oblasti ochrany životního prostředí. Celosvětový vývoj směřuje k procesům minimalizace jejich vzniku, maximalizace jejich možného využití a tam kde to není možné k fyzikálně-chemickým úpravám tak, aby byly svých nebezpečných vlastností zbaveny. Jednou z progresivních metod této úpravy je jejich stabilizace, při které dochází k izolaci přítomných škodlivin od všech složek životního prostředí. [1]

Úprava odpadů má v současném procesu nakládání s odpady v České republice své nezastupitelné místo. Řada státních i soukromých odborných pracovišť se v uplynulém desetiletí zabývala a stále zabývá vývojem a ověřováním různých metod a technik úpravy odpadů a bez využití některých solidifikačních, stabilizačních a zejména biodegradačních technologií si již odstraňování odpadů v praxi nelze představit. [2]

2. Teoretická část

2.1. Legislativa o odpadech

Odpadové hospodářství v rámci EU upravuje Směrnice Evropského parlamentu ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech, jejímž základním účelem je ochrana lidského zdraví a životního prostředí před škodlivými vlivy sběru, přepravy, zpracování, skladování a skládkování odpadů. Dalším důležitým bodem této směrnice je sjednocení nakládání s odpady, terminologie a definic odpadů v rámci celého Společenství. V České republice vymezuje podmínky pro nakládání s odpady zákon č.185/2001 Sb. o odpadech, který byl nejenom v důsledku změn evropských směrnic v posledních deseti letech několikrát změněn, naposled v roce 2010.

Základní terminologie dle zákona č.185/2001 Sb. o odpadech

Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č.1 k tomuto zákonu.

Komunální odpad - veškerý odpad vznikající na území obce a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických nebo fyzických osob oprávněných k podnikání.

Odpad podobný komunálnímu odpadu - veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti právnických nebo fyzických osob oprávněných k podnikání a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů.

Nebezpečný odpad - každý odpad, který vykazuje jednu nebo více nebezpečných vlastností, uvedených v příloze č. 2 dle zákona č.185/2001 Sb.

Odpadové hospodářství - činnost zaměřená na předcházení vzniku odpadů, na nakládání s odpady a na následnou péči o místo, kde jsou odpady trvale uloženy, a kontrola těchto činností.

Skladování odpadů - přechodné umístění odpadů, které byly soustředěny (shromážděny, sesbírány, vykoupeny) do zařízení k tomu určeného a jejich ponechání v něm.

Skládka odpadů - je technické zařízení určené k odstraňování odpadů jejich trvalým a řízeným uložením na zemi nebo do země.

Úprava odpadů - každá činnost, která vede ke změně chemických, biologických nebo fyzikálních vlastností odpadů (včetně jejich třídění) za účelem umožnění nebo usnadnění jejich dopravy, využití, odstraňování nebo za účelem snížení jejich objemu, případně snížení jejich nebezpečných vlastností.

Využití odpadů - činnost, jejímž výsledkem je, že odpad slouží užitečnému účelu tím, že nahradí materiály používané ke konkrétnímu účelu, a to i v zařízení neurčeném k využití odpadů.

Odstranění odpadů - činnost, která není využitím odpadů, a to i v případě, že tato činnost má jako druhotný důsledek znovuzískání látek nebo energie

Původcem odpadů - právnická osoba nebo fyzická osoba oprávněná k podnikání, při jejichž činnosti vznikají odpady, nebo právnická osoba nebo fyzická osoba oprávněná k podnikání, které provádějí úpravu odpadů nebo jiné činnosti, jejichž výsledkem je změna povahy nebo složení odpadů, a dále obec od okamžiku, kdy nepodnikající fyzická osoba odpad odloží na místě k tomu určeném; obec se současně stane vlastníkem tohoto odpadu.

Uvedení výrobku na trh v České republice (dále jen „uvedení na trh“) - první úplatné nebo bezúplatné předání výrobku jiné osobě v České republice jeho výrobcem nebo osobou, která jej nabyla z jiné členské země Evropské unie. Za uvedení na trh se považuje též dovoz výrobku.

Materiálové využití odpadů - náhrada prvotních surovin látkami získanými z odpadů, které lze považovat za druhotné suroviny, nebo využití látkových vlastností odpadů k původnímu účelu nebo k jiným účelům, s výjimkou bezprostředního získání energie. [3]

Způsoby využívání a odstraňování odpadů

Tabulka 1- Způsoby využívání odpadů [zákon č.185/2001 Sb.]

Kód	Způsob využívání odpadů
R1	Využití odpadu způsobem obdobným jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie
R2	Získání/regenerace rozpouštědel
R3	Získání/regenerace organických látek, které se nepožívají jako rozpouštědla (včetně kompostování a dalších biologických procesů)
R4	Recyklace/znovuzískání kovů a kovových sloučenin
R5	Recyklace/znovuzískání ostatních anorganických materiálů
R6	Regenerace kyselin a zásad
R7	Obnova látek používaných ke snížení znečištění
R8	Získání složek katalyzátorů
R9	Rafinace použitých olejů na jiný způsob opětovného použití olejů
R10	Aplikace do půdy, která je přínosem pro zemědělství nebo zlepšuje ekologii
R11	Využití odpadů, které vznikly aplikací některého z postupů uvedených pod označením R1 až R10
R12	Úprava odpadů k aplikaci některého z postupů uvedených pod označením R1 až R11
R13	Skladování materiálů před aplikací některého z postupů uvedených pod označením R1 až R12 (s výjimkou dočasného skladování na místě vzniku před sběrem)

Tabulka 2- Způsoby odstraňování odpadů [zákon č.185/2001 Sb]

Kód	Způsob odstraňování odpadů
D1	Ukládání v úrovni nebo pod úrovní terénu (např. skládkování apod.)
D2	Úprava půdními procesy (např. biologický rozklad kapalných odpadů či kalů v půdě apod.)
D3	Hlubinná injektáž (např. injektáž čerpatelných kapalných odpadů do vrtů, solných komor nebo prostor přírodního původu apod.)
D4	Ukládání do povrchových nádrží (např. vypouštění kapalných odpadů nebo kalů do prohlubní, vodních nádrží, lagun apod.)
D5	Ukládání do speciálně technicky provedených skládek (např. ukládání do oddělených, utěsněných, zavřených prostor izolovaných navzájem i od okolního prostředí apod.)
D6	Vypouštění do vodních těles, kromě moří a oceánů
D7	Vypouštění do moří a oceánů včetně ukládání na mořské dno
D8	Biologická úprava jinde v této příloze nespecifikovaná, jejímž konečným produktem jsou sloučeniny nebo směsi, které se odstraňují některým z uvedených postupů pod označením D1 až D12
D9	Fyzikálně-chemická úprava jinde v této příloze nespecifikovaná, jejímž konečným produktem jsou sloučeniny nebo směsi, které se odstraňují některým z postupů uvedených pod označením D1 až D12 (např. odpařování, sušení kalcinace)
D10	Spalování na pevnině
D11	Spalování na moři
D12	Konečné či trvalé uložení (např. ukládání v kontejnerech do dolů)
D13	Úprava složení nebo smíšení odpadů před jejich odstraněním některým z postupů uvedených pod označením D1 až D12
D14	Úprava jiných vlastností (kromě úpravy zahrnuté do D13) před jejich odstraněním některým z postupů uvedených pod označením D1 až D13
D15	Skládkování odpadů před jejich odstraněním některým z postupů uvedených pod označením D1 až D14 (s výjimkou dočasného skladování na místě vzniku odpadu před shromážděním potřebného množství)

Vyhláška 294/2005 Sb.

Důležitým legislativním předpisem, zvláště pro účely této diplomové práce, je vyhláška 294/2005 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady a jejich využívání na povrchu terénu. Tato vyhlášky, mimo jiné, určuje podmínky, za kterých je odpad, případně upravený odpad možno využít na povrchu terénu popř. uložit na skládky odpadů.

Dále specifikuje podmínky pro stanovení obsahu látek ve vodném výluhu. Hodnoty koncentrace látek ve vodném výluhu jsou určující pro přijetí odpadu na skládku. Jednotlivá analytická stanovení se provádějí dle technických norem uvedených v této vyhlášce v příloze č. 12.

Základní požadované zkoušky pro využití odpadu na povrchu terénu (výjimku tvoří odpady využívané k úpravě skládek) jsou testy akutní a letální toxicity a obsah škodlivin v sušině. Limitní hodnoty ekotoxicity a obsahu škodlivin v sušině jsou uvedeny příloze č. 10 této vyhlášky. Jednotlivá stanovení se provádějí dle technických norem, které jsou uvedeny v příloze č. 12 této vyhlášky. V některých případech jsou stanoveny i další požadavky, které závisí především na charakteru odpadu a na konkrétní lokalitě využití odpadu.

Základní terminologie dle vyhlášky 294/2005 Sb.

a) výluhovou třídou - množina nejvýše přípustných hodnot koncentrací ukazatele vybraných škodlivin v prvním vodném výluhu odpadu připraveného podle ČSN EN 12457-4 (83 8005)

b) vodným výluhem - roztok, který byl připraven ze vzorku odpadu podle ČSN EN 12457-4 (83 8005) [4]

Nebezpečný odpad

Nebezpečného odpadu vzniká v porovnání s celkovou produkcí pouze asi 5%, přesto si zaslouží zvýšenou pozornost, jelikož škodliviny obsažené v NO mohou mít katastrofální dopady jak na životní prostředí, tak v důsledku i na lidské zdraví. Nakládání s NO se věnují i orgány EU. V roce 1991 byla vydána Směrnice Rady o nebezpečných

odpadech (91/689/EHS). Předmětem této směrnice je sblížení právních předpisů členských států v oblasti řízeného nakládání s odpady. V ČR vymezuje pravidla pro nakládání s NO zákon č.185/2001 Sb. o odpadech. O hodnocení a zařídění nebezpečných odpadů rozhoduje osoba pověřená MŽP nebo MZ ČR. Nebezpečné odpady jsou v Katalogu odpadů označovány “*”, metodický návod o zařídění odpadů je stanoven vyhláškou 381/2001 Sb. Zvláštní požadavky jsou kladeny na balení, označování (identifikační list nebezpečného odpadu), dopravu (vnitro i mezistátní), úpravu, odstraňování případně i jeho uložení na skládce nebezpečného odpadu. Pokrokem posledních let je předání správy dat o hospodaření s odpady České agentuře životního prostředí (CENIA) a zpřístupnění veřejnosti na internetových stránkách Informačního systému odpadového hospodářství (ISOH), kde je možné dle příslušného kódu z Katalogu odpadů nalézt produkci tohoto odpadu v určité oblasti ČR a hlavně jak s tímto odpadem bylo naloženo, což je to nejdůležitější, jelikož kontrola pohybu NO je tím nejdůležitějším předpokladem pro dodržování příslušných právních předpisů. [5]

2.2. Solidifikace odpadů

2.2.1 Solidifikace

Velmi podstatnou fází nakládání s odpady je tzv. úprava odpadů. Tento pojem označuje cílenou změnu vlastností určitého odpadu (fyzikálních, chemických, biologických) před dalšími fázemi nakládání s ním. Cílem úpravy odpadů je zmenšit jeho objem například lisováním ve sběrném voze, odvodnění odpadu (sušení kalů na kalových polích, zahušťování kalů), eliminace biologické aktivity odpadu (sterilizace kalů z ČOV), separace a rozřídění jednotlivých složek nebo v případě radioaktivního odpadu vhodné uložení do speciálních kontejnerů. Účelem úpravy odpadů rovněž může být dosažení specifických vlastností, které umožní jeho přímé technické využití jako surovinu nebo materiál. Mezi způsoby úpravy, kterým je v posledních letech věnována velká pozornost, patří úprava odpadů tzv. solidifikací. [1]

Solidifikace patří do skupiny fyzikálně chemických úprav nebezpečných odpadů. Často se setkáváme s pojmy podobnými: fixace, chemická fixace, imobilizace. Pojem solidifikace –

stabilizace dnes začíná být preferován, jelikož nejlépe vystihuje velkou rozmanitost mechanismů, které se u této metody uplatňují. O stabilizaci však mluvíme pouze tehdy, pokud dojde k převedení polutantů na méně rozpustné, popř. méně toxické formy. Vlastní solidifikace umožňuje převést odpad kapalný, kašovitý i prachový do stabilní podoby. Jde o vyvolání fyzikálních, chemických a fyzikálně-chemických změn odpadu, které mají za následek fixaci (imobilizaci) složek odpadu. Může se tak stát stabilizací mobilních složek odpadu na rozpustné nebo málo rozpustné, pevnou vazbou (sorbce) složek na pojivovou matici, nebo pouhým uzavřením do inertního média. [1]

Při solidifikaci využíváme organická i anorganická pojiva, případně jejich kombinace. Mezi takto využívaná anorganická pojiva patří portlandské i směsné cementy, dnes také popílký, zvláště z fluidního spalování a v neposlední řadě vápno nebo vápenný hydrát. Mezi organická pojiva, která se využívají zvláště při úpravě radioaktivních nebo organických polutantů patří bitumenová živice, polyestery nebo epoxidové pryskyřice. Tato technologie využívá relativně jednoduchá a levná zařízení pro manipulaci, míchání, popř. hnětení velkých objemů materiálů, kalů a suspenzí. Produktem solidifikace je stabilní pevný materiál, většinou ve formě brikety nebo bloku, s malou vyluhovatelností a velkou únosností v tlaku, což umožňuje jeho bezproblémovou manipulaci a uložení na skládkách nebezpečných odpadů i ve více vrstvách. [1]

Využití solidifikátu z nebezpečných odpadů v dnešním stavebnictví teprve hledá své místo, ale dá se předpokládat, že vzhledem k ubývání přírodních zdrojů a stále se zvyšující celosvětové produkci stavebních hmot se brzy stane jeho nedílnou součástí. Dnes pokud chceme mluvit o využití solidifikace ve stavební výrobě, pak se jedná především o různé rekultivace a zpevňování půd znehodnocených průmyslovou činností. [6]

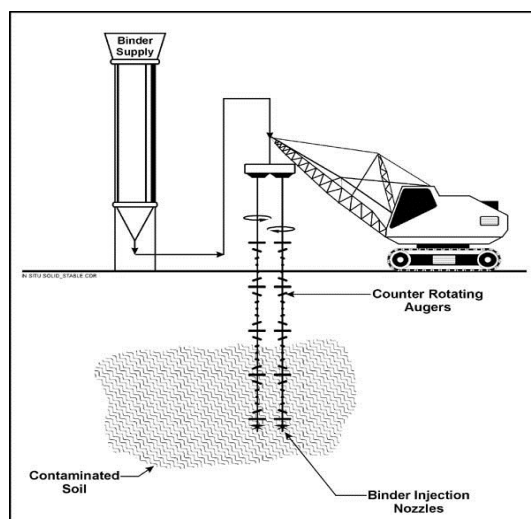
Hodnocení solidifikace se provádí různými analytickými metodami. Mechanická odolnost je charakterizována pevností v tlaku. Odolnost proti klimatickým jevům – zmrazování a rozmrazování, nasákavosti, navlhavosti a vysychavosti. Důležitou součástí hodnocení je stabilita solidifikátu v loužicím médiu tzv. vyluhovatelnost. Ta se stanoví jako obsah vyluhovaných látek v loužicím médiu za určitý časový úsek. Nejčastěji se používá voda (destilovaná, deionizovaná), vodné roztoky kyseliny dusičné a sírové, které simulují působení kyselého deště a vodný roztok kyseliny octové, která vzniká na skládkách. V ČR zabezpečuje jednotné provádění vyluhovacích testů vyhláška MŽP 294/2005 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady. V zahraničí se nejvíce používá Toxicity Characteristic

Leaching Procedure (TCLP), který patří mezi extrakční testy a je využíván k hodnocení odpadů, popř. solidifikátů agenturou EPA. [7]

2.2.2. Rozdělení solidifikace dle místa provádění

A) technologie in situ

Provádí se na přímo v místě výskytu odpadu nebo k rekultivaci půdy bez jejího vytěžení. Nejčastěji se používá se k solidifikaci půdy. Ve spojených státech jsou takto postižená území označována jako tzv. brownfields, jedná se o půdy se zvýšeným obsahem těžkých kovů, organických polutantů i radioaktivních izotopů. Principem této metody je mechanické rozrušování zeminy za současného vmíchávání pojiva: cement, vápno, vápenný hydrát s nadbytkem vody. Po zatvrdnutí se takto upravená půda zaveze štěrkem. Dále je možné zavést ornici a osázet trávou i větší vegetací, což zabraňuje erozi. [1]



Obrázek 1-Schéma metody in situ, [NAVFAC]



Obrázek 2- Solidifikovaná zemina, [EPA]

B) technologie ex situ

Kromě technologie in situ se většina solidifikačních úprav odpadů provádí pomocí solidifikačních linek. Jedná se ve většině případů o poměrně jednoduchá zařízení sloužící k dopravě a homogenizaci odpadu s pojivem. Před vstupem na linku je nutné odpad upravit, aby vyhovoval parametrům konkrétní linky. Jedná se o homogenizaci s aditivem, vytřídění velkých frakcí apod. Tímto způsobem lze zpracovat široké spektrum odpadů od kalových suspenzí až k pevným odpadům, je však třeba laboratorně ověřit vlastnosti odpadu a solidifikátu pro každou recepturu a odpad zvlášť. Solidifikační linky je možno rozdělit dle umístění na stabilní a mobilní, nebo dle způsobu výroby na kontinuální a cyklické. Stabilní linky používáme v případě zajištění trvalého přísunu odpadu, jelikož jejich výkon může být i více než 15 t/hod, linky mobilní jsou naopak konstruovány i s výkonem menším než 1 t/hod. [7]



Obrázek 3 - Solidifikační linka MSL-15 [IVM, spol. s.r.o.]

Typ MSL-15 je mobilní solidifikační jednotka s výkonem až 15 t/hod, zpracovává odpady tuhé se zrnitostí max. 20 mm (stavební drtě, struska, popílky, hlušiny), odpady rypatelné (vlhkost max. 25 %) nebo čerpatelné (vlhkost max. 50 %). Mezi odpady s volnou tekutou fází patří např. neutralizační kaly.



Obrázek 4 - Stabilní solidifikační linka [SITA]

2.2.3. Rozdělení solidifikace dle použitých pojiv

Cementace

Cement je velmi často používaným pojivem pro solidifikaci/stabilizaci (dále jen „S/S“) radioaktivního odpadu, nebezpečného odpadu nebo směsného odpadu. Portlandský cement je a byl v minulosti používán k S/S mnoha odpadů. Pozdější výzkumy však ukázaly jeho vhodnost především k S/S kovů a to Cd, Cr, Cu, Pb, Ni a Zn. [8]

Zcela nevhodné je využití cementových pojiv k imobilizaci organických polutantů, protože některé z nich způsobují zpomalení hydratačních reakcí a tím tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi. [7]

S/S polutantů pomocí portlandského cementu probíhá ve třech krocích: (a) chemická fixace – chemická interakce mezi hydratačními produkty cementu a kontaminanty; (b) fyzikální adsorpce kontaminantů na povrch hydratačních produktů cementu; (c) uzavření kontaminantů v cementové matraci (nízká propustnost a vysoká tvrdost zatvrdlé směsi).

První dva kroky závisí na povaze hydratačních produktů a kontaminantů. Třetí krok je úzce spojen s pevností, houževnatostí a fyzikální strukturou výsledné cementové matrice. [8]

Mezi hlavní přednosti portlandského cementu jako solidifikačního pojiva patří jeho široká dostupnost, přijatelná cena a nízká technologická náročnost. V současné době bývá za účelem snížení ceny, popřípadě zlepšení vlastností část portlandské cementu nahrazená příměsí. Ze stejného důvodu bývá nahrazená část portlandského slínku i při S/S odpadů. Jedná se především o využití strusky, popílku, mikrosiliky nebo přírodních pucolánů. Může se jednat jak o přídavek příměsí do záměsí nebo přímo o směsné cementy. [8]

Hlavní stavební část cementového tmelu tvoří C-S-H fáze. Zodpovídá za pevnost trvanlivost a houževnatost zatvrdlého cementového tmelu. Hrají také důležitou roli při S/S kontaminantů. Komarneri a spol. zjistili, že málo krystalizovaná forma C-S-H fáze formovaná při teplotě nižší než 100°C má schopnost výměny iontů s okolním prostředím a také absorpce těchto iontů. Jeho výzkum také prokázal, že menší poměr CaO/SiO₂ umožňuje absorpci většího počtu iontů do struktury C-S-H a tím přímo umožní snížení vyluhovatelnosti těchto prvků Bhattý navrhl několik obecných mechanismů, které by měly umožnit úspěšnou imobilizaci kovových iontů pomocí portlandského cementu:

1. Kontrolovat pH při neutralizaci
2. Rozbití komplexních kovových sloučenin
3. Kontrola oxidačního stupně
4. Přeměna nerozpustných látek
5. Uzavření polutantů do matrice

V mnoha případech je pro úspěšnou S/S nebezpečných odpadů dostačující proběhnutí mechanismů 1,4 a 5. [8]

Byly zde zmíněny některé výhody, které cement má oproti ostatním pojivům používaným při solidifikaci, zvláště některých kovů. Je tedy třeba uvést také některé problémy, které mohou při S/S pomocí portlandského cementu nastat. Jedním z hlavních problémů je výsledné pH solidifikátu. Rozpustnost amfoterních kovů jako jsou Cd, Cr, Cu, Pb, Ni a Zn se mění v závislosti na pH. Optimální pH pro srážení amfoterních kovů z roztoku je okolo 10. Výzkum prokázal, že je možné toho docílit vhodně zvoleným poměrem CaO/SiO₂ v C-

S-H fázi. Zjištěna závislost mezi poměrem CaO/SiO_2 a hodnotou pH upraveného odpadu. V ideálním případě by měl být tento poměr v rozmezí 0,05-0,6, ale v žádném případě by tato hodnota neměla být více než 1. Z výsledků výzkumu tedy vyplývá, že k dosažení optimálního výsledné pH zatvrdlé směsi, tedy hodnoty okolo 10, je třeba udržet poměr CaO/SiO_2 pod hodnotou 1. [8]

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že při výběru vhodného druhu cementu popř. příměsí je třeba zvážit tyto faktory, založené především na charakteru odpadu: 1) kompatibilita cementu a odpadu; 2) chemická fixace kontaminantů; 3) fyzikální uzavření polutantů v cementové matici; 4) pevnost a trvanlivost výsledného solidifikátu; 5) vyluhovatelnost solidifikátu; 6) ekonomická efektivnost. [8]

Vitrifikace

Patří mezi nejúčinnější způsoby fixace nebezpečných odpadů. Typickým příkladem takových odpadů jsou sklářské brusné kaly z výroby olovnatého křišťálu, popely ze spaloven komunálních odpadů s obsahem těžkých kovů, prachové úlety z filtrů nebo radioaktivní odpady. [9]

Ve většině případů se používá sklářská technologie a většinou i klasická sklářská pec s pracovní teplotou 1000 - 1600°C, pouze v případech zpracování radioaktivních odpadů je třeba speciální elektrický žhavicí agregát. Do výrobní směsi je možné dát 40 – 85 % odpadu, zbytek jsou běžné sklářské suroviny, které slouží k úpravě chemického složení. Zahřátím na teplotu tání vytvoříme skelnou fázi. Tato fáze pevně váže toxické látky uvnitř a po chlazení a zatuhnutí snižuje nebo zcela likviduje toxicitu. Takto vytvořené sklo je v některých případech použitelné k výrobě komerčně zajímavých výrobků např. pro stavební účely. Skvělé mechanické vlastnosti mají skelně krystalické hmoty připravené z popílků z tepelných elektráren nebo některých strusek. Po přidavku doplňkových surovin je lze tavit a tvarovat běžnými sklářskými postupy a při následném tepelném zpracování vznikají řízenou krystalizací skelně krystalické hmoty, které lze využít k produkci stavebních hmot. Nejběžnějším tvarem jsou dlaždice, lze však vyrábět také trouby a tvarovky. V USA se tato metoda hojně využívá k fixaci odpadu z jaderných elektráren. Hlavní výhodou této metody je téměř dokonalá fixace škodlivin, ale velkou nevýhodou je přítomnost tavicího procesu a s tím spojená zvýšená ekonomická a ekologická zátěž. [9]

Vápenná stabilizace

Vápno nebo vápenný hydrát mají ve zneškodňování odpadů velkou tradici. Už před mnoha staletími se používalo k zneškodňování biologických odpadů. V současnosti patří vápno k nejčastěji využívaným médiím v odpadovém hospodářství. Běžně se používá při čištění odpadních vod, zneškodňování kapalných odpadů, sterilizaci kalů z ČOV, odsiřování emisí apod. V 90. letech se pálené vápno stalo i jedním z nejpoužívanějších prostředků v oboru stabilizace průmyslových odpadů. Výhodou využití bezvodého oxidu vápenatého je samovolný vývin teploty, který vzniká hydratací vápna tzv. hašením. Teplota hašení závisí na přídavku vody, čím méně vody tím vyšší teplota. U solidifikace použitím CaO je maximální teplota reakce většinou v rozmezí 160 – 200 °C. Po doběhnutí hydratace následuje zrání stabilizátu, které obvykle trvá 2 až 3 týdny, kde dochází ke karbonizaci, reakce hydroxidu vápenatého a dalších hydroxidů ve směsi se vzdušným oxidem uhličitým za vzniku uhličitánů, to vše je doprovázeno enkapsulačním procesem. Stabilizaci pomocí vzdušného vápna lze s úspěchem využít k úpravě půd kontaminovaných ropnými látkami, stabilizaci brusných kalů, kalů s vysokým obsahem vody, olejů a těžkých kovů, k úpravě organických tekutých odpadů z výroby rostlinných tuků. [7]

Organická pojiva

Aplikace organických pojiv je obvykle omezena na speciální typy odpadů, které se obtížně zneškodňují chemicky nebo na stabilizaci odpadů radioaktivních. Mezi nejčastěji používaná pojiva patří bitumenové (asfaltové živice), kamenouhelné dehty, polyestery a v některých speciálních případech je možné využití epoxidové pryskyřice. Bitumenace neboli solidifikace asfaltovými emulzemi. Bitumenace není vhodná pro solidifikaci zrnitých nebo kusových odpadů, ale je velmi vhodná pro popeloviny, filtrové prachy, fixaci kalů a kapalných koncentrátů. Vzniklý produkt lze použít pro přípravu podkladních vrstev pro vozovky nebo jako izolační vrstvy apod. Nevýhodou této metody je nutnost zahřívání asfaltu a tím i odpadu, což je finančně náročné a navíc může dojít k úniku těkavých látek z odpadu. [1]

Geopolymery

Geopolymerní materiály syntetizované alkalickou aktivací aluminium silikátových látek představují nový typ materiálu. Jsou to látky, které jsou na rozhraní mezi klasickými anorganickými pojivy, skelnými a keramickými materiály. Suroviny pro přípravu geopolymerů mohou být látky převážně odpadního charakteru, jako jsou elektrárenské popílký, strusky z metalurgických procesů a jiné anorganické odpady nebo přírodní látky např. odpadní jíly s obsahem železitých oxidů větším než 2,5 %, které znemožňují jeho využití konvenčním způsobem výroby tedy výpalem. Metoda studených anorganických syntéz vychází z alkalických reakcí aktivovaných alumino-silikátů, které probíhají za laboratorní teploty a tlaku. Geopolymery jsou tedy sloučeniny hliníku a křemíku, které vytváří vazbu –Si-O-Al-O. [10]

2.3. Specifikace prováděných zkoušek

Poměr únosnosti CBR¹

Kalifornský index únosnosti se stanovuje podle ČSN EN 13286-47. Hutnění směsi se provádí pomocí Proctorovy hutnicí práce dle ČSN EN 13286-2 v Proctorově hmoždíři typu A (100,00±1,00 a 120,00±1,00 mm).

Každá hodnota síly se vynese do grafu na osu Y a příslušná penetrace trnu na osu X. Těmito body se proloží křivka. Z křivky odečteme sílu odpovídající penetraci 2,5 a 5 mm a dle rce. 1 vypočteme hodnotu CBR v %, kde p je odečtená síla odpovídající penetraci 2,5 respektive 5 mm a p_s je standartní síla při stejné hloubce penetrace. Větší z vypočtených hodnot je hledaná hodnota CBR. [11]

$$CBR = \frac{p}{p_s} \times 100 [\%] \text{ (Rovnice 1)}$$

Kde

p je zjištěná síla při penetraci [kN];

CBR je California bearing ratio [%]

p_s je standartní síla při stejné hloubce penetrace [kN].

Pevnost v prostém tlaku

Pro stanovení funkčních charakteristik použijeme zkoušku pevnosti v tlaku prováděnou dle ČSN EN 13286-41.

Pevnost v tlaku R_c je dána vztahem:

$$R_c = \frac{F}{A_c} [MPa] \text{ (Rovnice 2)}$$

kde R_c je pevnost v tlaku zkušebního tělesa směsi stmelená hydraulickým pojivem [MPa];

¹ CBR- Kalifornský index únosnosti

F je maximální síla při porušení zkušební tělesa [N];

A_c je plocha zkušební tělesa [mm].

Odolnost proti mrazu a vodě

Zkoušení odolnosti proti mrazu a vodě se provádí dle ČSN EN 14227-3, NA.

Tabulka 3- Teploty zmrazování a počet cyklů [ČSN EN 14227-3,NA]

Vrstva vozovky	Teplota zmrazování [°C]	Počet cyklů dle navrhovaného indexu mrazu dané oblasti (°C x den)		
		do 350	350 – 600	více než 600
horní podkladní vrstva	-20 ±2	10	13	16
spodní podkladní vrstva	-15 ±2	7	10	13
ochranná vrstva	-10 ±2	5	7	10

Objemová hmotnost max.

Maximální objemová hmotnost se zjišťuje provedením zkoušky Proctor STANDARD dle ČSN EN 13286-2. Z následujících vztahů lze potom vypočítat objemovou hmotnost vlhké směsi, pokud známe obsah vlhkosti tak i objemovou hmotnost suché směsi. Pomocí zkoušky Proctor standart lze zjistit i optimální vlhkost směsi. Hodnoty objemové vlhkosti suché směsi, získané sérií stanovení, se vynesou na osu y a odpovídající vlhkosti na osu x. Vynesenými body se proloží spojitá křivka a zjistí se poloha maxima na této křivce. Odečtou se hodnoty maximální objemové hmotnosti suché směsi a vlhkosti odpovídající tomuto bodu. Odečtená hodnota vlhkosti je optimální pro danou směs. [12]

$$\rho = (m_2 - m_1) * \frac{1000}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ (Rovnice 3)}$$

Kde

ρ je objemová hmotnost vlhké směsi [kg/m³];

m_2 je hmotnost moždíře, podkladní desky a zhutněné směsi [g];

m_1 je hmotnost moždíře, podkladní desky [g];

V objem moždíře [l].

$$\rho_d = (100 * \rho) - (100 + w) \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ (Rovnice 4)}$$

Kde

ρ_d je objemová hmotnost vlhké směsi [kg/m³];

ρ je objemová hmotnost vlhké směsi [kg/m³];

w je vlhkost směsi [%].

Ekotoxikologické testy

Vyhlášky o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu definuje v příloze č. 11 požadavky na využívání odpadů na povrchu terénu. Jsou zde definovány požadavky pro různé druhy odpadů na výsledky ekologických testů a to buď dle sloupce I nebo II. Testy ekotoxicity se provádí na čtyřech druzích organismů, které reprezentují obratlovce, bezobratlé, vyšší i nižší rostliny.

Zkouška se provádí dle:

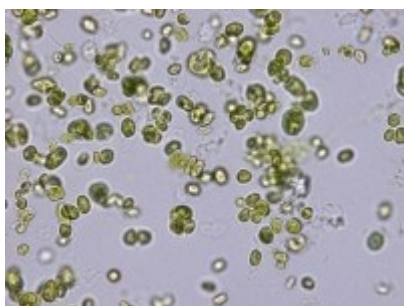
- ČSN EN ISO 7346-2 – Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby
- ČSN EN ISO 6341 – Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus
- ČSN EN ISO 8692 – Zkouška inhibice růstu sladkovodních zelených řas
- Věstníku MŽP č. 4/2007 Test inhibice růstu kořene hořčice bíle [4]



Obrázek 5-Brachydanio rerio
Hamilton-Buchanan, testovaný organismus
dle ČSN EN ISO 7346-2 [zdroj: VUSTAH]



Obrázek 6 - Daphnia magna Straus,
testovaný organismus dle ČSN EN ISO 6341
[zdroj: VUSTAH]



Obrázek 7- Scenedesmus subspicatus,
testovaný organismus ČSN EN ISO 8692
[zdroj: VUSTAH]



Obrázek 8- Sinapsis Alba, testovaný
organismus dle Věstníku MŽP č. 4/2007
[zdroj: VUSTAH]

Pevnost pórovitého kameniva ve válci

Zkouška se provede v souladu s dříve používanou normou ČSN 72 1175. Podstatou zkoušky je zjištění zatížení potřebného k předepsanému stlačení kameniva pístem ve válci o průměru 150mm a výšce 100mm. [13]

Pevnost v tlaku R_c je dána vztahem:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \text{ [MPa]} \text{ (Rovnice 5)}$$

kde R_c je pevnost v tlaku zkušebního tělesa směsi stmelená hydraulickým pojivem [MPa];

F je maximální síla při porušení zkušebního tělesa [N];

A_c je plocha zkušebního tělesa [mm].

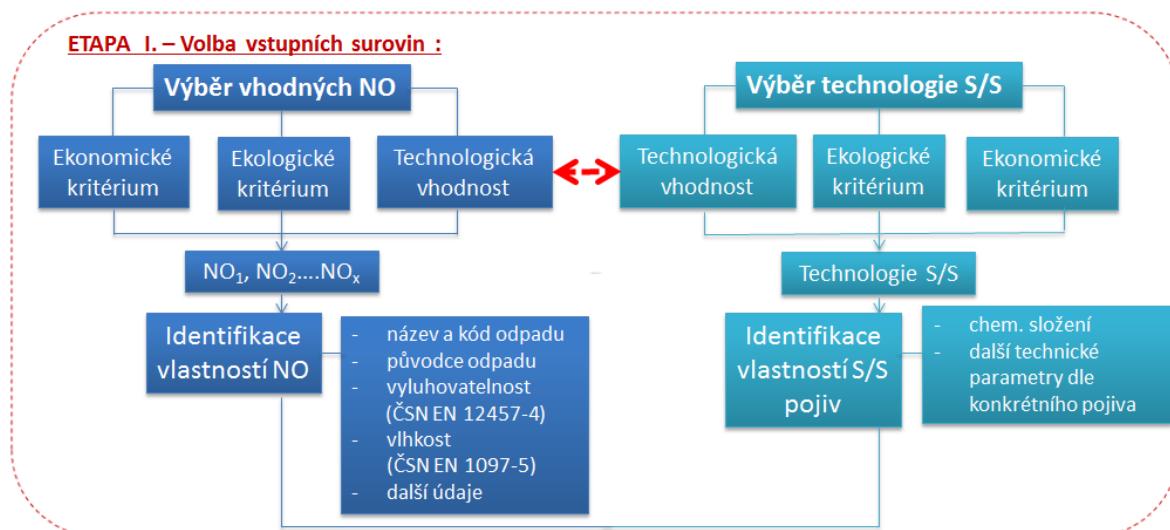
3. Cíl práce

Tato práce se zabývá využitím technologie solidifikace pro zneškodnění nebezpečných odpadů se záměrem na materiálové využití odpadů, které je samotným zákonem 185/2001 Sb. o odpadech upřednostňováno před jiným způsobem využití odpadu. Cílem této práce je tedy nalezení a prověření zcela nové solidifikační cesty, která umožní účinnou transformaci nebezpečného odpadu v nový materiál a jeho další využití ve stavebnictví.

Pro nalezení takové cesty bude důležité využití poznatků získaných v teoretické části, která bude věnována studiu různých technologií solidifikace/stabilizace, legislativy spojené s odpady a jejich možným využitím na povrchu terénu. Cílem praktické části je tedy s využitím těchto znalostí nalézt optimální technologii solidifikace/stabilizace, prověřit a zhodnotit její účinnost. Dalším krokem bude prověření této technologie v rámci poloprovozního ověření, jehož cílem je především ověřit použitelnost této technologie v praxi.

4. Metodika práce

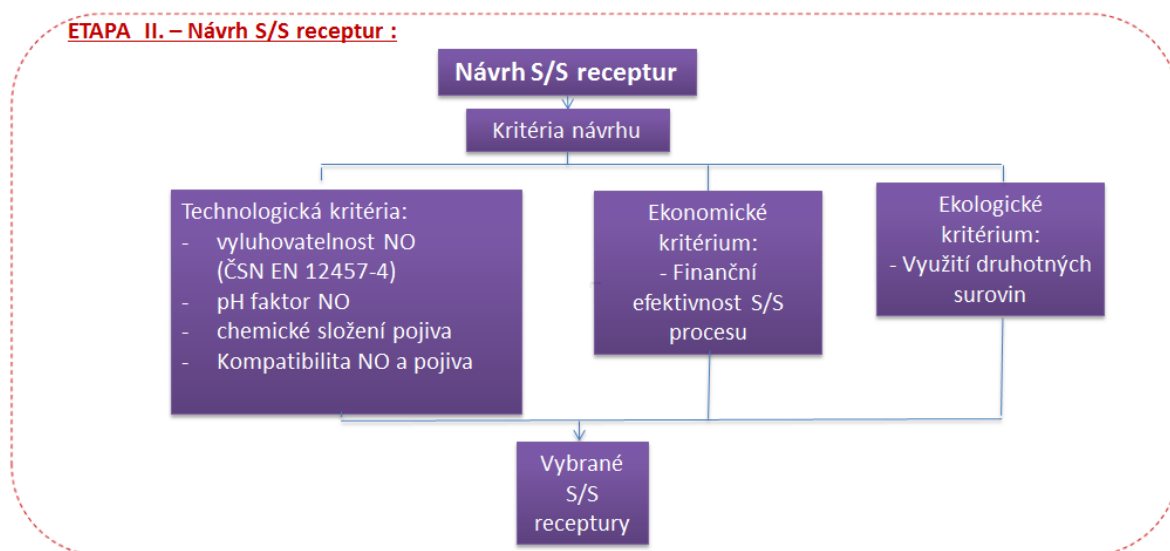
ETAPA I. - Volba vstupních surovin



Obrázek 9- ETAPA I - Volba vstupních surovin

První etapa se bude zabývat výběrem vhodné technologie solidifikace/stabilizace. Součástí výběru technologie S/S² bude i výběr nebezpečných odpadů, jelikož hlavním předpokladem úspěšné S/S je kompatibilita solidifikačních pojiv a vybraného nebezpečného odpadu. Všechny vybrané vstupní suroviny budou podrobeny identifikaci důležitých vlastností, které mohou ovlivnit úspěšnost solidifikačního procesu.

² solidifikace/stabilizace

ETAPA II. – Návrh S/S receptur

Obrázek 10- ETAPA II – Návrh S/S receptur

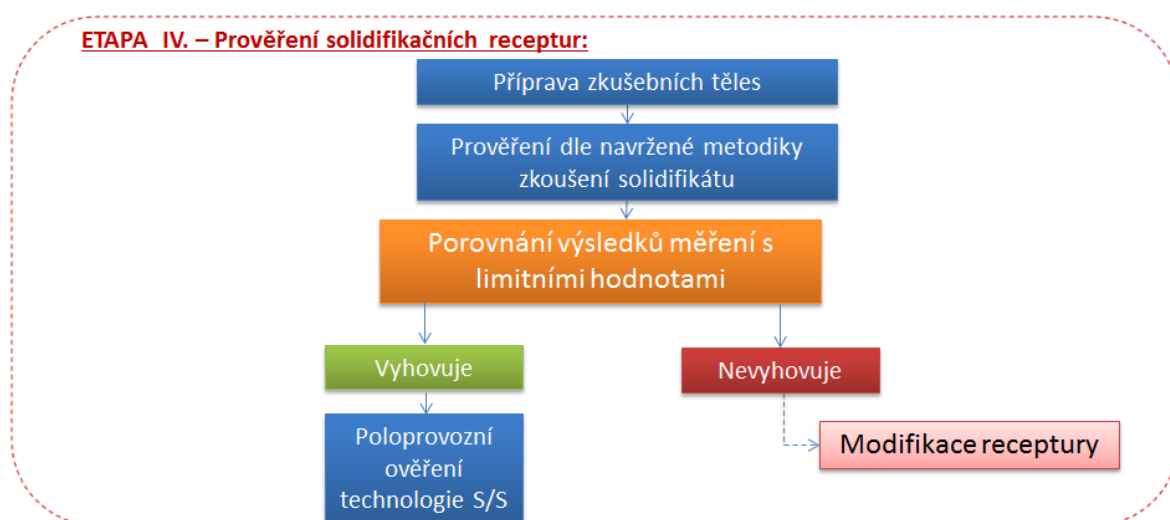
Cílem této etapy je navrhnout solidifikační/stabilizační receptury ze vstupních surovin, které byly vybrány v předchozí kapitole. Při návrhu receptur budou zohledněna především technologická kritéria jako je vyluhovatelnost a pH nebezpečného odpadu. Pro stanovení vhodného poměru složek bude třeba vzít také v úvahu chemické složení použitých vstupních surovin a v neposlední řadě také ekonomickou efektivnost S/S procesu.

ETAPA III. – Návrh metodiky zkoušení solidifikátu

Obrázek 11- ETAPA III - Návrh metodiky zkoušení solidifikátu

Cílem této etapy je vytvoření metodiky zkoušení solidifikátu, která má prověřit úspěšnost solidifikačních receptur vzhledem k jejich budoucímu využití. Solidifikační receptury budou podrobeny zkoušení z hlediska ekologických požadavků stanovených vyhláškou 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na povrchu terénu. Zároveň budou také prověřeny fyzikálně mechanické vlastnosti solidifikátu, které budou zkoušeny v rámci technických požadavků, které stanovuje nařízení vlády 163/2005 Sb. na vybrané stavební výrobky.

ETAPA IV. – Prověření solidifikačních receptur



Obrázek 12-ETAPA IV- prověření solidifikačních receptur

V této etapě bude postupováno v souladu s metodikou vytvořenou v etapě předchozí. Cílem této etapy je prověřit účinnost jednotlivých S/S receptur. Výsledky zkoušek budou porovnány s limitními hodnotami stanovenými příslušnou legislativou, jsou-li stanoveny. Na základě výsledků provedených zkoušek budou vybrány nejúčinnější receptury, jejichž použitelnost v praxi bude dále poloprovozně ověřena.

5. Experimentální Část

5.1. ETAPA I - Volba vstupních surovin

Důležitým předpokladem úspěšné solidifikace je volba vhodných surovin, které vstupují do solidifikačního procesu. Jedná se především o vlastní nebezpečný odpad a samozřejmě také o pojiva. Výběr nebezpečného odpadu úzce souvisí s výběrem vhodné technologie S/S.

Cílem této práce je prozkoumat možnosti transformace NO^3 v nové materiály, které mají najít využití ve stavebnictví, z tohoto důvodu má být zvolená S/S technologie především dostupná, levná, technologicky jednoduchá a použitelná na širší spektrum průmyslově hojně produkovaných odpadů. Na základě poznatků získaných v teoretické části bylo zjištěno, že těmto kritériím nejlépe vyhovuje využití technologie cementace s částečným nahrazením cementu VEP⁴ či druhotnými surovinami nebo jinými pojivy za účelem zlepšení vlastností či snížení nákladů na výrobu solidifikátu.

Na základě zvolené technologie S/S bude proveden výběr vhodných NO. Budou posouzena jak kritéria technologické vhodnosti k S/S pomocí cementu jako solidifikačního pojiva, tak kritéria ekonomická jako je dostupnost a roční produkce NO.

5.1.1. Výběr a identifikace vlastností NO

Cílem bylo vybrat ty nebezpečné odpady, které mají nejen vhodné vlastnosti k solidifikaci, ale zároveň jejich solidifikace bude také žádoucí z hlediska ekonomického. Ekonomické kritérium reprezentuje min. roční produkce NO, která je stanovena na 10 t, jelikož S/S menšího objemu odpadu není ekonomicky rentabilní. Další podmínkou volby NO je, aby původce NO měl sídlo v Královehradeckém kraji a to hlavně z důvodů snížení nákladů na dopravu, jelikož řešitel projektu je firma Hradecký písek sídlící v Hradci Králové. Na základě výběru cementu jako solidifikačního pojiva budou jako původci NO vyhledávány především společnosti zabývající se finálními úpravami kovů, jelikož S/S NO vznikajících v metalurgickém průmyslu pomocí cementu se jeví jako technologicky možná.

³ nebezpečný odpad

⁴ vedlejší energetický produkt

Shrnutí kritérií výběru NO:

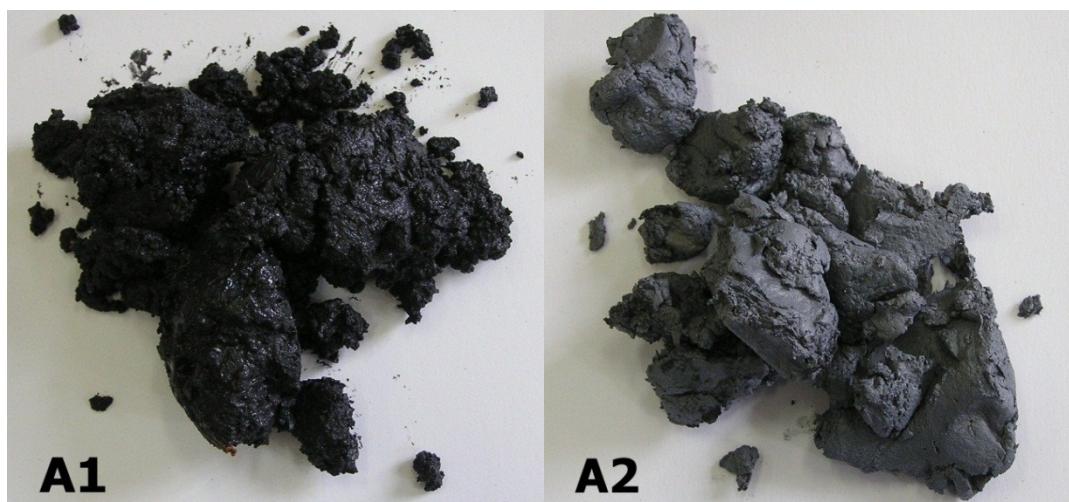
- Produkce NO minimálně 10 t/rok
- Producent se sídlem v Královéhradeckém kraji
- Teoretický předpoklad vhodnosti NO k solidifikaci pomocí cementu
- Ochota původců odpadů ke spolupráci a poskytnutí vzorků NO

Tabulka 4- Vybrané nebezpečné odpady od ESAB VAMBERK, s.r.o.

Kód odpadu	Označení odpadu	Název odpadu	Bližší specifikace	Produkce [t]
160303	A1	Anorganické odpady obsahující nebezpečné látky	Kal z procesu tažení drátu (trubička)	5
160303	A2		Kal z procesu tažení drátu (nerezy)	
120114	B1	Kaly z obrábění obsahující nebezpečné látky	Kaly z obrábění (tažné linky)	12
120114	B2		Kaly z obrábění (neutralizace)	500

Tabulka 5- Vybrané nebezpečné odpady od Karsit Holding, s.r.o.

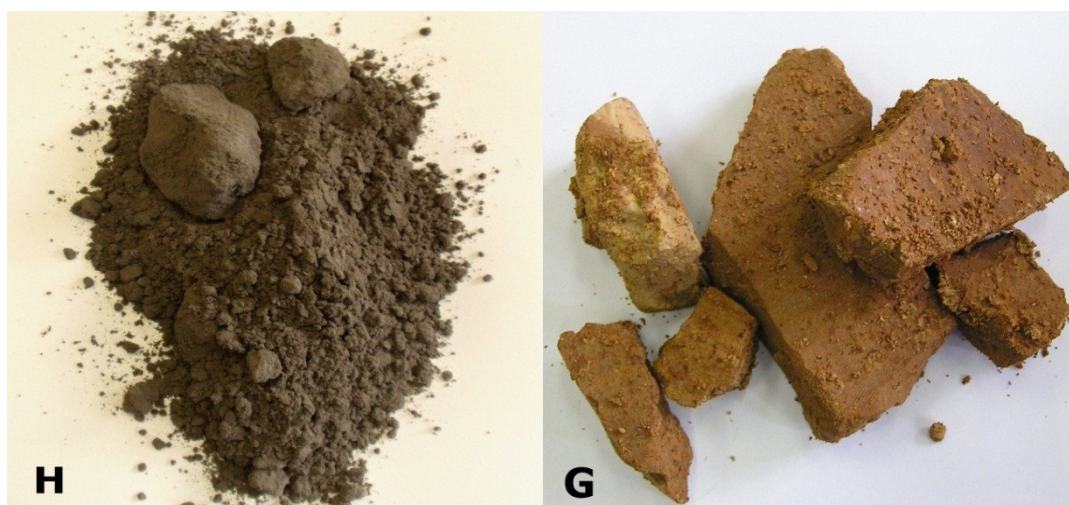
Kód odpadu	Označení odpadu	Název odpadu	Bližší specifikace	Produkce [t]
110108	G	Kaly z fosfátování		25-30
110109	H	Kaly a filtrační koláče obsahující nebezpečné látky		10



Obrázek 13- Vybrané nebezpečné odpady A1, A2- ESAB VAMBERK, s.r.o.



Obrázek 14- Vybrané nebezpečné odpady B1, B2- ESAB VAMBERK, s.r.o.



Obrázek 15- Vybrané nebezpečné odpady H,G od Karsit holding, s.r.o.

Výsledky vyluhovatelnosti vybraných nebezpečných odpadů jsou uvedeny v tabulce č. 7. Ve vodném výluhu vybraných nebezpečných odpadů, který byl proveden dle vyhlášky 294/2005 Sb., byla zjištěna zvýšená koncentrace některých kovů (Cd, Ni, Zn, Cu, Cr), polokovů (As, Sb), solí halogenvodíkových kyselin dále také rozpuštěného organického uhlíku a síranů. Zvýšené koncentrace těchto polutantů ve vodném výluhu budou zohledněny při výběru solidifikačních pojiv.

Tabulka 6- Třídy vyluhovatelnosti [vyhláška 294/2005 Sb.]

Ukazatel		Třída vyluhovatelnosti			
		I	IIa	IIb	III
pH (25°C)		-	≥6	≥6	-
Rozpuštěné látky	mg/l	400	8000	6000	10000
Chloridy	mg/l	80	1500	1500	2500
Fluoridy	mg/l	1	30	15	50
Sírany	mg/l	100	3000	2000	5000
Fenoly	mg/l	0,1	-	-	-
Arsen	mg/l	0,05	2,5	0,2	2,5
Baryum	mg/l	2	30	10	30
Kadmium	mg/l	0,004	0,5	0,1	0,5
Chrom	mg/l	0,05	7	1	7
Měď	mg/l	0,2	10	5	10
Nikl	mg/l	0,04	4	1	4
Olova	mg/l	0,05	5	1	5
Molybden	mg/l	0,05	3	1	3
Antimon	mg/l	0,006	0,5	0,07	0,5
Selen	mg/l	0,01	0,7	0,05	0,7
Zinek	mg/l	0,4	20	5	20
Rtuť	mg/l	0,001	0,2	0,02	0,2
DOC	mg/l	50	80	80	100

Tabulka 7- Vyluhovatelnost vybraných odpadů [Labtech s.r.o.]

Ukazatel	Jednotka	A1	A2	B1	B2	G	H
Zráta sušením 105°C	%	45,27	54,19	42,84	59,06	43,28	29,72
pH (25°C)		6,75	1,44	4,73	7,07	6,66	8,3
Rozpuštěné látky	mg/l	7310	4540	4220	2830	1990	1430
Chloridy	mg/l	26,3	70,2	111	76,2	1,7	408
Fluoridy	mg/l	3,84	1,19	1,23	0,47	0,04	1,44
Sírany	mg/l	692	3170	2400	1550	10	274
Fenoly	mg/l	0,53	0,01	0,005	0,005	0,19	0,05
Arsen	mg/l	0,148	0,032	0,02	0,001	0,001	0,001
Baryum	mg/l	0,02	0,1	0,042	0,01	0,045	0,049
Kadmium	mg/l	0,155	0,0053	0,0027	0,00024	0,0001	0,00233
Chrom	mg/l	0,08	4,86	0,08	0,03	0,03	0,03
Měď	mg/l	0,119	0,381	0,807	0,289	0,009	0,139
Nikl	mg/l	0,11	3,73	2,5	0,12	0,02	1,17
Olova	mg/l	0,01	0,0063	0,0031	0,001	0,001	0,001
Molybden	mg/l	192	6,19	0,17	0,011	0,0056	1,14
Antimon	mg/l	0,028	0,013	0,019	0,001	0,001	0,0013
Selen	mg/l	0,0016	0,0017	0,001	0,001	0,001	0,001
Zinek	mg/l	0,96	1,16	3,67	0,05	0,02	0,114
Rtuť	mg/l	0,0002	0,0002	0,0003	0,0001	0,0002	0,0001
DOC	mg/l	2370	1260	179	540	1030	78,8

5.1.2. Výběr a identifikace S/S pojiv

V této kapitole byl proveden výběr a identifikace vlastností S/S pojiv. Pojiva byla vybrána na základě zvolené technologie solidifikace s ohledem na charakter solidifikovaných nebezpečných odpadů a na obsah polutantů v jejich vodném výluhu dle vyhlášky 294/2005 Sb. Vybraná pojiva a látky purolánově aktivní byly podrobeny identifikaci jejich nejdůležitějších vlastností jako chemické a mineralogické složení. Na závěr kapitoly byla u všech vybraných vstupních surovin stanovena koncentrace škodlivin v jejich vodném výluhu, který byl připraven dle ČSN EN 12457-4 (charakterizace odpadů – vyluhování).

Cement

Z rešerše provedené v teoretické části této práce o použití cementu jako S/S pojiva vyplývá, že při výběru vhodného druhu cementu popř. příměsí je třeba zvážit tyto faktory, založené především na charakteru solidifikovaného odpadu: (1) kompatibilita cementu a odpadu; (2) chemická fixace kontaminantů; (3) fyzikální uzavření polutantů v cementové matici; (4) pevnost a trvanlivost výsledného solidifikátu; (5) vyluhovatelnost solidifikátu; (6) ekonomická efektivnost. Tyto požadavky splňuje směsný cement s označením CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, kde je 21 až 35 procent slínku nahrazeno vysokopecní struskou a vápencem. Hodnota poměru CaO/SiO_2 doporučená pro S/S odpadů obsahujících těžké a amfoterní kovy by měla být menší než jedna. [8] U tohoto cementu je hodnota tohoto indexu několikanásobně vyšší a to 3,21. Celkový poměr CaO/SiO_2 u jednotlivých receptur bude však vždy nižší než 1, jelikož značná část cementu bude nahrazena popílkem, který obsahuje velké množství amorfního i krystalického SiO_2 . Vybraný směsný cement je také snadno dostupný jak pytlovaný tak volně ložený a jeho cena je nižší než cementů typů CEM I.

Výrobce:.....Českomoravský cement

závod Mokrá

Název:.....CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Portlandský směsný cement (struska – vápenec)

Tabulka 8- Chemické složení [technický list výrobce]

Chem. složení [%]	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O
	61	19	4	3	2	2,5	0,064	0,73	0,017

Tabulka 9- Vybrané technické parametry [technický list výrobce]

CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	m.j.	průměrná hodnota
pevnost v tlaku 28 dní	MPa	48
pevnost v tlaku 90 dní	MPa	57
normální konzistence	%	29,5
počátek tuhnutí	Min	206
konec tuhnutí	Min	269
měrný povrch	m ² .kg ⁻¹	529
měrná hmotnost	kg.m ⁻³	3020

Vápno

U solidifikace použitím CaO je maximální teplota reakce většinou v rozmezí 160 – 200 °C. Po doběhnutí hydratace následuje zrání stabilizátu, které obvykle trvá 2 až 3 týdny, kde dochází ke karbonizaci, reakce hydroxidu vápenatého a dalších hydroxidů ve směsi se vzdušným oxidem uhličitým za vzniku uhličitánů, to vše je doprovázeno enkapsulačním procesem. Stabilizaci pomocí vzdušného vápna lze s úspěchem využít k úpravě půd kontaminovaných ropnými látkami, stabilizaci brusných kalů, kalů s vysokým obsahem vody, olejů a těžkých kovů, k úpravě organických tekutých odpadů z výroby rostlinných tuků. [1]

Vzdušné vápno neboli oxid vápenatý částečně nahradí cement v několika solidifikačních recepturách. Hlavním důvodem přidavku vápna je jeho schopnost stabilizace organických polutantů, které jsou ve vybraných NO zastoupeny v podobě rozpuštěného organického uhlíku a také velká neutralizační kapacita CaO.

Výrobce:.....CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o.

závod Vápenka Mokrá

Název:..... Bílé vápno EN 459-1 CL 90-Q

Vápno jemně mleté, nehašené, bez úpravy sypných vlastností

Tabulka 10- Vybrané technické parametry [technický list výrobce]

Bílé vápno CL 90-Q	m.j.	hodnoty
CaO + MgO	%	91,0 - 95,0
z toho MgO	%	0,2 - 0,6
CO ₂	%	1,5 - 4,0
R ₂ O ₃	%	0,5 - 1,5
SiO ₂	%	0,5 - 1,5
SO ₃	%	0,1 - 0,5
Vydatnost	dm ³ /10 kg	26 - 31
reaktivita T max.	°C	70 - 76
reaktivita t 60	min.	0:45 - 2:00
reaktivita t max	min.	3 - 8
zbytek na síť 0,2 mm	%	4,0 - 8,0
objemová stalost	-	vyhovuje

Sádra

Sádra jako solidifikační pojivo se dosud používá v menší míře než pojiva typu cementu nebo vápna. Důvodem je především nižší odolnost sádry vůči působení povětrnostních vlivů. Na druhou stranu přídavek sádry v menší míře má za následek zvýšenou tvorbu etringitu, který zajišťuje počáteční pevnost a stabilitu. Toto tvrzení je také podporováno faktem, že sádra byla dřív zmiňována jako hlavní pojivový materiál u některých stabilizátů a je také známo, že přídavek sádry do 5 % zlepšuje jak proces tuhnutí, tak vývoj pevností u pucolánových směsí. Tento poznatek je dále podporován experimentálním důkazem provedeným Hillem a Pollardem. [14] [15]

Výrobce:..... Gypstrend s.r.o.

závod Koberice

Název:..... Bílá sádra

Tabulka 11- Vybrané technické parametry [technický list výrobce]

Bílá sádra	m.j.	průměrná hodnota
zbytek na síť 0,2 mm	%	0,2 – 1,5
počátek tuhnutí	min.	6
konec tuhnutí	min.	12
objemová hmotnost	kg.m ⁻³	690 – 840
vodní koeficient	l/kg	0,84 – 0,98
pevnost po 2 hodinách	MPa	3,0 – 5,0
CaSO ₄ . 1/2H ₂ O + CaSO ₄	%	95 – 99
MgO – rozpustný ve vodě	%	0,0013
Na ₂ O – rozpustný ve vodě	%	0,01
Cl – rozpustné ve vodě	%	0,0029

Klasický popílek

Elektrárenské popílky z vysokoteplotního spalování jsou minerální zbytky po spalování tuhých paliv. Zrna vznikla utužením taveniny, obsahující amorfni SiO₂, krystalickou fází tvoří mullit a křemen.

Po chemické stránce má tedy klasický popílek největší obsah oxidu křemičitého. Vybraný popílek z elektrárny Chvaletice má celkový obsah SiO₂ 56%. Tento popílek bude částečně nahrazovat cement ve všech recepturách. Popílek z vysokoteplotního spalování bude přidáván zejména pro své pucolánové vlastnosti. Amorfni oxid křemičitý je schopen reagovat za běžných teplot s hydroxidem vápenatým za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých. Dalším důvodem náhrady cementu popílkem bude výrazné snížení ceny výsledného produktu.

Původ:..... Elektrárna Chvaletice

Spalované palivo: Hnědé uhlí prachové

Mineralogické složení: β křemen, mullit, hematit

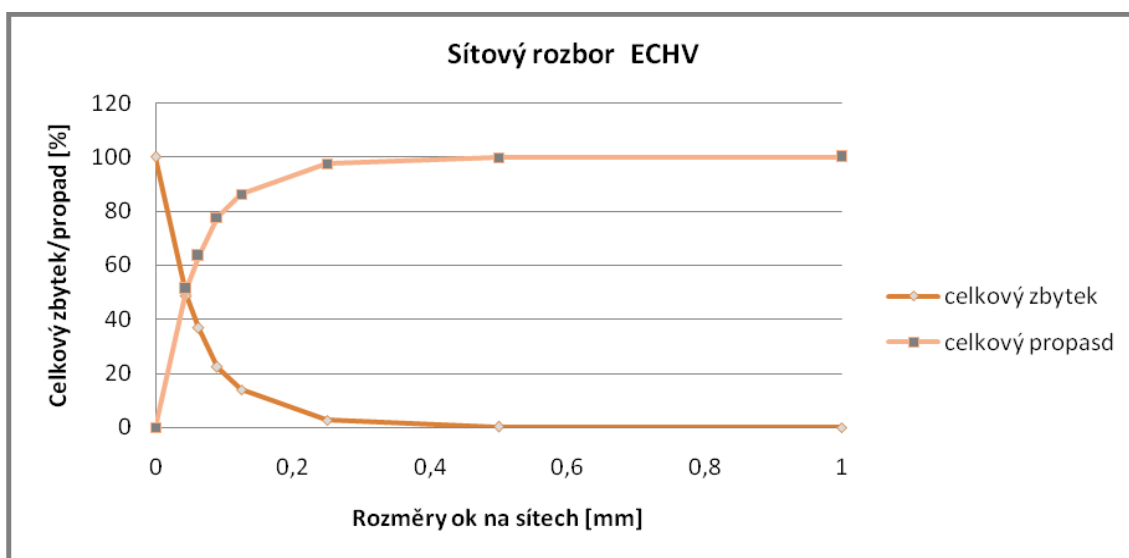
Měrná hmotnost:..... 2040 kg.m⁻³

Tabulka 12- Chemické složení klasického popílku [ECHV]

Chem. složení [%]	CaO	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Sírany	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	ZZ
	1,79	0,03	28,93	6,08	0,2	56,82	0,32	1,31	1,79	2,02	0,74

Tabulka 13- Sítový rozbor [ECHV]

Kontrolní síto [mm]	Zbytek na síti [g]	Zbytek na síti [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
1	0	0	0	100
0,5	0,42	0,21	0,21	99,79
0,25	4,82	2,41	2,62	97,38
0,125	22,47	11,23	13,85	86,15
0,09	16,92	8,46	22,31	77,69
0,063	28,74	14,37	36,68	63,32
0,045	24,22	12,11	48,79	51,21
< 0,045	102,41	51,21	100	0
Σ	200	100		



Graf 1- Sítový rozbor [ECHV]

Fluidní popílek

Fluidní popely a fluidní popílky – tj. tuhé zbytky fluidního spalování uhlí, směsi minerálního podílu uhlí a produktů odsíření vzniklých reakcí sorbetu (např. vápenec, dolomit) s oxidem siřičitým.

Popílek z fluidního spalování uhlí, vykazuje několik unikátních vlastností, které činí z tohoto odpadu materiál potenciálně využitelný v řadě aplikací, a mimo jiné i pro zneškodňování jiných odpadů pomocí technologie stabilizace/solidifikace (S/S). Zmiňovanými unikátními vlastnostmi FP je schopnost vázat značná množství vody, významná neutralizační kapacita a schopnost po smíchání s vodou samovolně tuhnout a tvrdnout, a to i bez přídavku dalších činidel, jedná se stejně jako u klasického popílku o pucolán. Úletová frakce fluidního popílku je tvořena prachovými částicemi s velkým specifickým povrchem, což je nutným předpokladem pro reakci se zneškodňovaným odpadem. [16]

Původ:.....Elektrárna Poříčí

Spalované palivo:.....Černé uhlí prachové

Mineralogické složení:.....Kalcit, anhydrit, β - křemen, volné vápno, hematit, ortoklas

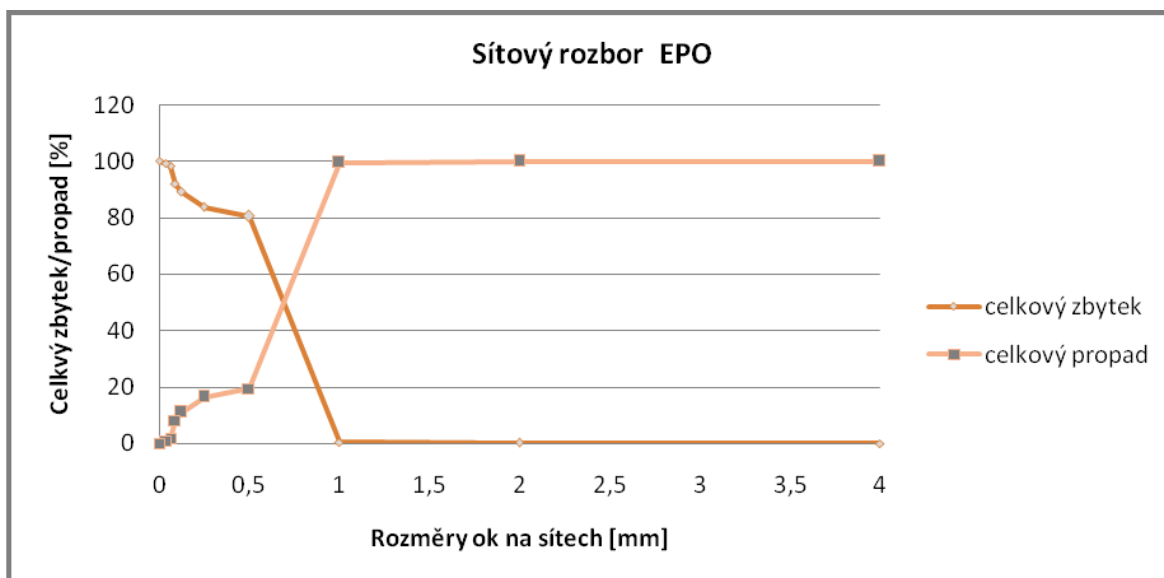
Měrná hmotnost:.....2510 kg.m⁻³

Tabulka 14- Chemické složení fluidního popílku [EPO]

Chem. složení [%]	CaO	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	FeO	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	ZZ
	21,11	0,01	18,79	4,54	9,09	0,66	38,28	0,18	0,81	1,03	1,23	4,05

Tabulka 15- Sítový rozbor [EPO]

Kontrolní síto [mm]	Zbytek na síti [g]	Zbytek na síti [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
4	0	0	0	100
2	0,2	0,1	0,1	99,9
1	0,5	0,25	0,35	99,55
0,5	160,38	80,19	80,54	19,46
0,25	6,16	3,13	83,67	16,33
0,125	10,8	5,4	89,07	10,93
0,09	5,6	2,8	91,87	8,13
0,063	12,8	6,4	98,27	1,73
0,04	1,86	0,93	99,2	0,8
<0,04	1,6	0,8	100	0
Σ	200	100		



Graf 2- Křivka zrnitosti [EPO]

Tabulka 16- Vyluhovatelnost použitých pojiv [Labtech s.r.o.]

Ukazatel		CaO	Popílek- Kl	CEM II/B-M	Popílek-FL	Sádra
Ztráta sušením 105°C	%	0,06	0,16	0,73	0,33	9,33
pH (25°C)		9,53	8,49	12,4	12,4	9,15
Rozpuštěné látky	mg/l	20	650	3520	4670	2330
Chloridy	mg/l	2,1	1	58,6	29,9	53,8
Fluoridy	mg/l	0,23	3,99	0,4	2,78	0,17
Síraný	mg/l	11,5	360	466	1390	1410
Fenoly	mg/l	0,02	0,01	0,02	0,75	1
Arsen	mg/l	0,001	0,155	0,0022	0,0068	0,001
Baryum	mg/l	0,038	0,035	0,961	0,904	0,021
Kadmium	mg/l	0,0001	0,00016	0,0001	0,00027	0,00012
Chrom	mg/l	0,03	0,03	0,468	0,089	0,03
Měď	mg/l	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Nikl	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Olova	mg/l	0,001	0,001	0,017	0,0019	0,001
Molybden	mg/l	0,037	0,102	0,0374	0,163	0,089
Antimon	mg/l	0,001	0,0054	0,001	0,001	0,001
Selen	mg/l	0,001	0,025	0,0084	0,05	0,001
Zinek	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Rtuť	mg/l	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
DOC	mg/l	10	10	10	10	10
Třídy vyluhovatelnosti						
I	IIb	IIa	III	Nelze zařadit		

Všechny složky vstupující do solidifikačního procesu byly podrobeny stanovení obsahu kontaminantů v jejich vodném výluhu. Vodný výluh byl připraven dle ČSN EN 12457-4 (charakterizace odpadů – vyluhování). Následně byly výsledné hodnoty zařazeny do

výluhové třídy dle vyhlášky č. 294/2005 Sb.. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 16.

5.1.3. Závěr ETAPY I

Na základě poznatků o solidifikaci odpadů z teoretické části byla v této etapě vybrána technologie cementace s částečným nahrazením cementu VEP popř. druhotnými surovinami za účelem zlepšení finálních vlastností solidifikátu či snížení nákladů na jeho výrobu. V závislosti na výběru technologie solidifikace a na základě dalších technologických, ekonomických a ekologických kritérií bylo vybráno šest různých druhů nebezpečných odpadů. Původcem těchto odpadů jsou společnosti Karsit Holding, s.r.o. a ESAB Vamberk, s.r.o. Jedná se o různé druhy kalů a filtračních koláčů vznikajících v různých fázích procesu pokovování a jiných technologických úprav kovů.

V další části této etapy byl proveden výběr S/S pojiv. Pojiva byla vybrána na základě zvolené technologie solidifikace s ohledem na charakter solidifikovaných nebezpečných odpadů a na obsah polutantů v jejich vodném výluhu dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. Vybraná pojiva a látky pucolánově aktivní byly podrobeny identifikaci jejich nejdůležitějších vlastností jako chemické a mineralogické složení. Na závěr kapitoly byla u všech vybraných vstupních surovin stanovena koncentrace škodlivin v jejich vodném výluhu, který byl připraven dle ČSN EN 12457-4 (charakterizace odpadů – vyluhování).

5.2. ETAPA II - Návrh solidifikačních receptur

Při vytváření solidifikačních receptur bylo třeba vzít v úvahu především charakter nebezpečného odpadu, který bude touto recepturou solidifikován. To znamená přizpůsobit složení receptur obsahu polutantů ve vodném výluhu, konzistenci NO a dále nesmíme opomenout také pH faktor vybraných nebezpečných odpadů, jelikož příliš nízké pH má za následek zpomalení nebo úplné zastavení hydratačních reakcí, což téměř znemožňuje úspěšnou solidifikaci. Vytvořené receptury lze rozdělit do dvou skupin a to na základní receptury určené pro odpady s pH vyšším než 5 a na receptury neutralizační se zvýšeným obsahem vápna určené pro odpady s nízkým pH.

Ve všech navržených recepturách tvoří základní pojivovou složku směsný cement. Dávkování cementu se pohybuje mezi 5 a 20 %. V několika základních solidifikačních recepturách bude část cementu nahrazena vzdušným vápnem a sádrou jejichž přídavek se bude pohybovat mezi 5 a 15 %. Pro své příznivé vlastnosti, mezi které patří: vysoký obsah SiO_2 , pucolánové vlastnosti a nízká cena, bude součástí všech receptur klasický popílek Chvaletice a fluidní popílek Poříčí.

U všech receptur je cílem dosáhnout pH faktoru okolo 10. Tato hodnota byla stanovena jako optimální. Při této hodnotě pH výsledného solidifikátu byly prokázány nejnižší hodnoty vyluhovatelnosti Cd, Cr, Cu, Pb, Ni a Zn. Byla také prokázána souvislost mezi hodnotou poměru CaO/SiO_2 vstupních surovin a pH výsledného solidifikátu. Jako doporučení pro dosažení hodnoty pH 10 se uvádí rozpětí hodnoty tohoto poměru 0,05-0,6. V každém případě by tato hodnota měla být menší než 1. [8]

Pro návrh solidifikačních receptur byly použity vstupní suroviny vybrané v Etapě 1 „Volba vstupních surovin“.

5.2.1. Základní solidifikační receptury

Solidifikační receptury uvedené v tabulkách níže budou použity k solidifikaci nebezpečných odpadů A1, B2, G a H. S každým jednotlivým nebezpečným odpadem tedy bude vytvořeno dle navržených receptur devět různých solidifikátů.

Tabulka 17- Základní solidifikační receptury

A		B		C	
NO ⁶	30%	NO	30%	NO	30%
KP ⁷	30%	KP	30%	KP	30%
FP ⁸	30%	FP	25%	FP	20%
CEM⁹	10%	CEM	15%	CEM	20%
D		E		F	
NO	30%	NO	30%	NO	30%
KP	30%	KP	30%	KP	30%
FP	20%	FP	20%	FP	20%
CEM	5%	CEM	10%	CEM	15%
CaO	15%	CaO	10%	CaO	5%
G		H		I	
NO	30%	NO	30%	NO	30%
KP	30%	KP	30%	KP	30%
FP	20%	FP	20%	FP	20%
CEM	5%	CEM	10%	CEM	15%
Sádra	15%	Sádra	10%	Sádra	5%

Jelikož NO 110108 (G) má pevný charakter, bude nutné navrhnout vhodnou metodu předúpravy, která umožní jeho rozdužení. Mýdlová konzistence odpadu znemožňuje použití technologie mletí nebo drcení, proto se jeví jako nejvhodnější metoda dlouhodobé vystavení tohoto NO působení vody jako rozdužovacího média, které má vést k narušení pevné struktury odpadu. O použité množství vody bude snížen přídavek vody záměsově.

5.2.2. Neutralizační solidifikační receptury

Při vytváření neutralizačních solidifikačních receptur bylo nejdříve třeba experimentálně určit množství vzdušného vápna potřebného ke zvýšení pH kyselých nebezpečných odpadů. Jedná se o nebezpečné odpady s označením A2, B1. Bylo použito množství vápna odpovídající 3% hmotnostního podílu jedné záměsi. Vápno bylo postupně zhomogenizováno s 30% hmotnostního podílu nebezpečného odpadu a pomocí digitálního pH-metru, určeného k měření pH zemin, bylo měřeno pH takto vzniklé směsi v čase. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce číslo 18 níže.

⁶ Nebezpečný odpad

⁷ Klasický popílek Chvaletice

⁸ Fluidní popílek Poříčí

⁹ CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Tabulka 18- pH po přidavku 3% CaO v čase

	120114 - B1, pH původního NO = 4,73 [-]	160303 - A2, pH původního NO = 1,44 [-]
čas [h]	pH po přidavku 3% CaO [-]	pH po přidavku 3% CaO [-]
0	11,8	11,6
0,5	11,8	11,6
1	11,8	11,6
2	11,8	11,6
3	11,7	11,6
4	11,8	11,5
24	11,7	11,5

Z tabulky č. 18 vyplývá, že 3% přírdek vápna měl za následek dostatečné zvýšení pH, které by mělo umožnit bezproblémový průběh hydratačních reakcí. Na základě určení minimálního množství vápna byly vytvořeny solidifikační receptury uvedené v tabulce 19.

Tabulka 19- Neutralizační solidifikační receptury

J		K		L	
NO	30%	NO	30%	NO	30%
KP	30%	KP	30%	KP	30%
FP	20%	FP	20%	FP	20%
CEM	15%	CEM	10%	CEM	5%
CaO	5%	CaO	10%	CaO	15%
D		E		F	
NO	30%	NO	30%	NO	30%
KP	30%	KP	30%	KP	30%
FP	20%	FP	20%	FP	20%
CEM	15%	CEM	10%	CEM	5%
CaO	5%	CaO	10%	CaO	15%

U všech navržených receptur byla splněna podmínka $\text{CaO/SiO}_2 < 1$. Hodnoty tohoto poměru pro jednotlivé receptury jsou uvedeny v tabulce č. 20.

Tabulka 20- Hodnoty poměru CaO/SiO₂ jednotlivých receptur

	CEM [%]	FP [%]	KP [%]	CaO [%]	Sádra [%]	Σ Cao [%]	Σ SiO ₂ [%]	CaO/SiO ₂ [%]
A	0,1	0,3	0,3			0,13	0,304	0,43
B	0,15	0,25	0,3			0,15	0,2945	0,51
C	0,2	0,2	0,3			0,17	0,285	0,60
D	0,15	0,2	0,3	0,05		0,186	0,276	0,67
E	0,1	0,2	0,3	0,1		0,202	0,267	0,76
F	0,05	0,2	0,3	0,15		0,218	0,258	0,84
G	0,15	0,2	0,3		0,05	0,1545	0,2815	0,55
H	0,1	0,2	0,3		0,1	0,139	0,278	0,50
I	0,05	0,2	0,3		0,15	0,1235	0,2745	0,45
J	0,2	0,17	0,3	0,03		0,1916	0,2739	0,70
K	0,15	0,22	0,3	0,03		0,1716	0,2834	0,61
L	0,1	0,27	0,3	0,03		0,1516	0,2929	0,52

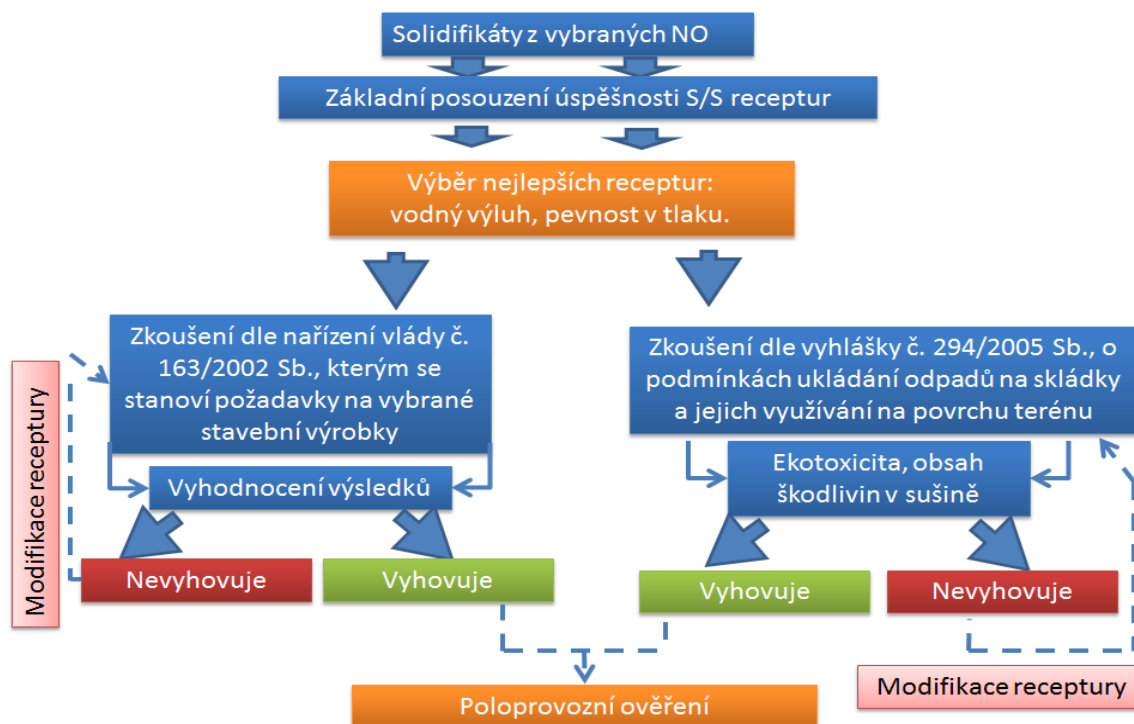
5.2.3. Závěr ETAPY II

V této etapě byly z vybraných vstupních surovin sestaveny solidifikační receptury. Receptury lze rozdělit na základní a na receptury neutralizační, které byly použity k solidifikaci odpadů s nízkým pH. Receptury byly navrženy především s ohledem na pH vybraných nebezpečných a na obsahu polutantů v jejich vodném výluhu který byl připraven dle ČSN EN 12457-4 (charakterizace odpadů – vyluhování).

5.3. ETAPA III - Návrh metodiky zkoušení solidifikátu

Cílem této etapy je vytvoření metodiky zkoušení solidifikátu, která má prověřit úspěšnost solidifikačních receptur. Dle navržených solidifikačních receptur bylo vytvořeno 39 solidifikátů, proto je třeba navrhnout takový systém zkoušení, který bude především směřodatný a také časově a ekonomicky proveditelný. Byly vybrány dvě zkoušky, které budou určující pro výběr nejlepších solidifikačních receptur a to vodný výluh a pevnost v prostém tlaku. Vyluhovatelnost patří k základním zkouškám, které slouží k posuzování vlivu upravených odpadů na životní prostředí. Pevnost v prostém tlaku vypovídá o úspěšnosti S/S procesu, celkové mechanické odolnosti a trvanlivosti upravených odpadů.

Dalším krokem bude vytvoření optimalizačních kritérií, které budou sloužit k výběru nejlepších S/S receptur, kde hlavními kritérii pro výběr budou výsledky pevností v tlaku a vyluhovatelnosti jednotlivých solidifikátů. Takto vybrané solidifikáty budou následně zkoušeny na základě volby optimální aplikace solidifikátu ve stavebnictví dle nařízení vlády č. 163/2002 Sb. Zároveň bude zjišťován vliv vybraných solidifikátů na životní prostředí a to provedením zkoušek pro posouzení jejich ekotoxicity a stanovení obsahu škodlivin v sušině. Metodický postup můžete vidět na obrázku č. 16 níže.



Obrázek 16- Metodika zkoušení solidifikátu

5.3.1. Základní posouzení úspěšnosti S/S receptur

Jako určující zkouška pro posouzení S/S receptur byla vybrána vyluhovatelnost. Porovnání obsahu prvků ve vodném výluhu původního a upraveného NO je určující pro posouzení úspěšnosti solidifikačních receptur. Jako další kritérium byla vybrána pevnost v tlaku, která vypovídá o mechanických vlastnostech, trvanlivosti a celkové houževnatosti upravených odpadů.

Pevnost v tlaku prostém

Vyzrálá zkušební tělesa budou podrobena zkoušce pevnosti v tlaku prostém. Tělesa budou podrobena zkoušení tlakových pevností po 28 a 60 dnech zrání solidifikátu. Zkoušení pevností upravených odpadů v tlaku i po 60 dnech bude prováděno z důvodu pomalého náběhu pevností u solidifikátů, způsobeného zejména nízkým pH vybraných NO. Výsledná pevnost v tlaku prostém je průměrná hodnota ze tří hodnot a to jedné pevnosti na zkušebním tělese ve tvaru krychle o hraně 100 mm. A dvou pevností na trámci 40*40*160 mm. Jedná se tedy o hodnoty pouze orientační, které budou sloužit pouze k výběru nejlepší solidifikační receptury.

Vodný výluh

Po dokončení zkoušení pevností v tlaku prostém po 28 dnech bude odebrán vzorek solidifikátu o hmotnosti 200 g. Vzorky budou odeslány do externí laboratoře Labtech s.r.o. se sídlem v Brně, kde budou podrobny zkoušení vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 294/2005 Sb.. Vodný výluh bude připraven dle ČSN EN 12457-4 (charakterizace odpadů – vyluhování). Výsledné hodnoty vyluhovatelnosti budou zařazeny do příslušné třídy vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 294/2005 Sb..

5.3.2. Výběr nejúčinnějších solidifikačních receptur

Nejprve je třeba stanovit kritéria, dle kterých budou jednotlivé solidifikační receptury posuzovány. Z hlediska účinnosti solidifikačních receptur se jedná především o hodnotu pevnosti v prostém tlaku a o obsah polutantů ve vodném výluhu. Pro výběr optimální

receptury je třeba dále zohlednit ekonomické parametry jako je cena vstupních surovin a množství nebezpečného odpadu, které bude solidifikací zneškodněno. Vybraná kritéria, včetně jejich hodnocení jsou uvedena v tabulce 21 níže. Na základě těchto parametrů bude sestaven optimalizační výpočet. Tímto způsobem budou vybrány nejvhodnější solidifikační receptury.

Tabulka 21- Kritéria optimalizačního výpočtu

Č.	Kritérium	Jednotka	Optimum
1	Výluhová třída (bez DOC)	[-]	MIN
2	Pevnost v prostém tlaku po 60 dnech	[MPa]	MAX
3	Cena vstupních surovin	[kč/t]	MIN
4	Produkce NO za rok	[t/rok]	MAX

5.3.3. Zkoušení dle n.v. č. 163/2002 Sb.

U stavebního výrobku z odpadu budou posuzovány takové vlastnosti, které jsou požadovány pro udělení stavebně technického osvědčení. Tyto požadavky jsou jasně definované v technických návodech příslušejících jednotlivým vybraným aplikacím solidifikátu. Technické návody jsou technickým dokumentem vypracovaným pro stavební výrobky uvedené v příloze č. 2 nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky.

Byly vybrány takové aplikace solidifikátu a jim příslušející technické návody, v nichž jsou stanoveny takové požadavky pro udělení STO¹⁰, které může budoucí výrobek z odpadu teoreticky splnit. V tabulkách níže jsou uvedeny požadavky jednotlivých technických návodů na vlastnosti posuzovaných stavebních výrobků a jim příslušející technické předpisy.

¹⁰ Stavebně technické osvědčení

Tabulka 22- Vybrané budoucí aplikace solidifikátu [TZÚS]

Název výrobní skupiny	Číslo technického návodu
Zpevněný zásypový materiál – ZZM	09.13.01
Granulát pro kolejové lože a obslužné komunikace báňských provozů	09.14.01
Granulát a aditivovaný granulát do výsypek povrchových dolů pro násypy a zásypy při zahlazování důlní činnosti	09.14.02

09.13.01 – Zpevněný zásypový materiál

Tabulka 23- Základní požadavky a vymezení posuzovaných vlastností [TZÚS]

Požadavek:	Vymezení sledovaných vlastností:
Bez požadavků	Bez požadavků

Tabulka 24- Podklady pro zpracování STO [TZÚS]

Požadavek:	Vymezení sledovaných vlastností:
Pevnost v prostém tlaku	ČSN EN 14227-3, čl. 7.2.
Propustnost – filtrační koeficient	Konkrétní plán (projekt) likvidace
Zpracovatelnost, konzistence	ČSN EN 14227-3, čl. 6.1.3 a NA.
Vlhkost	ČSN EN 14227-3, čl. 6.1.2
Objemová hmotnost ztvrdlého betonu	Konkrétní plán (projekt) likvidace
Pevnost v tlaku – krychelná	Konkrétní plán (projekt) likvidace
Nasákavost	Konkrétní plán (projekt) likvidace

09.14.01 - Granulát pro kolejové lože a obslužné komunikace báňských provozů

Tabulka 25- Základní požadavky a vymezení posuzovaných vlastností [TZÚS]

Požadavek:	Vymezení sledovaných vlastností:
Poměr únosnosti CBR	ČSN 73 6133 (čl. 4.5.1.3)

Tabulka 26- Podklady pro zpracování STO [TZÚS]

Požadavek:	Vymezení sledovaných vlastností:
Objemová hmotnost max.	ČSN 73 6133, čl. 4
Propustnost – filtrační koeficient	ČSN 73 6133, čl. 4
Ztráta žiháním	ČSN EN 14227-4 čl. 4.2.2
Oxid siřový	ČSN EN 14227-4 čl. 4.2.3

09.14.02 - Granulát a aditivovaný granulát do výsypek povrchových dolů pro násypy a zásypy při zahlazování důlní činnosti

Tabulka 27- Základní požadavky a vymezení posuzovaných vlastností [TZÚS]

Požadavek:	Vymezení sledovaných vlastností:
Bez požadavků	Bez požadavků

Tabulka 28- Podklady pro zpracování STO [TZÚS]

Požadavek:	Vymezení sledovaných vlastností:
Smyková pevnost	ČSN 75 2410
Objemová hmotnost max	ČSN 73 6133, čl. 4
Zrnitost	ČSN EN 14227-3 , čl. 6.3.2
Vlhkost	ČSN EN 14227-3 , čl. 6.1.2
Propustnost - koeficient filtrace	ČSN 75 2410

V důsledku velkého počtu zkoušek potřebných pro udělení stavebně technického osvědčení budou přednostně prováděny takové zkoušky, u kterých jsou v příslušných technických návodech specifikovány technické předpisy, které vyžadují splnění limitů pro udělení STO. Zkoušky a jim náležející technické předpisy jsou uvedeny v tabulce č. 29. Po provedení zkoušek, budou naměřené hodnoty porovnány s limitními hodnotami, které jsou uvedeny v příslušných technických předpisech. Na závěr bude provedena kontrola výsledků a v případě, že nebudou splněny požadavky pro žádnou vybranou aplikaci solidifikátu, bude nutné receptury modifikovat.

Tabulka 29- Zkoušky, u kterých je vymezení sledovaných vlastností specifikováno

Požadavek	Vymezení sledovaných vlastností:
Poměr únosnosti CBR	ČSN 73 6133 (čl. 4.5.1.3)
Vodný výluh	ČSN 73 6133 (čl. 4.5.1.2)
Pevnost v prostém tlaku	ČSN EN 14227-3, čl. 7
Propustnost – filtrační koeficient	ČSN 73 6133, čl. 4, ČSN 75 2410
Vlhkost	ČSN EN 14227-3 , čl. 6.1.2
Objemová hmotnost max.	ČSN 73 6133, čl. 4
Smyková pevnost	ČSN 75 2410
Ztráta žiháním	ČSN EN 14227-4 čl. 4.2.2
Oxid sirový	ČSN EN 14227-4 čl. 4.2.3

5.3.4 Závěr ETAPY III

Etapa III byla věnována návrhu metodiky zkoušení úspěšnosti solidifikačních receptur. Vytvořená metodika se skládá z několika částí. Dle navržené metodiky budou nejprve solidifikáty podrobeny základnímu zkoušení úspěšnosti solidifikačních receptur, v rámci kterého budou zjišťovány pevnosti v tlaku prostém a obsahu polutantů ve vodném výluhu solidifikátu, který bude proveden v souladu s vyhláškou č. 294/2005 Sb. V dalším kroku, na základě výsledků těchto zkoušek a dalších vybraných kritérií, budou pomocí optimalizačního výpočtu vybrány nejúspěšnější solidifikační receptury. Tyto vybrané receptury budou dále podrobeny testům ekotoxicity dle vyhlášky 294/2005 Sb. Zároveň budou prověřeny také vybrané fyzikálně mechanické vlastnosti dle vybraných technických návodů, příslušející vybraným budoucí aplikacím solidifikátu. Byly vybrány takové budoucí aplikace solidifikátu, u kterých je splnění limitních hodnot, které stanovují příslušné technické návody, teoreticky možné. Jedná se využití solidifikátu jako zpevněný zásypový materiál, granulát pro kolejové lože a obslužné komunikace báňských provozů, granulát a aditivovaný granulát do výsypek povrchových dolů pro násypy a zásypy při zahlazování důlní činnosti.

5.4. ETAPA IV Prověření S/S receptur

V této etapě bylo využito poznatků z etapy předchozí 5.3., kde byla navržena metodika zkoušení solidifikátu. Na základě této metodiky bylo provedeno zkoušení solidifikátů v souladu s vyhláškou č. 294/2005 Sb. a s nařízením vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví požadavky na vybrané stavební výrobky.

5.4.1. Příprava zkušebních těles

Výroba zkušebních těles probíhala v laboratořích na ústavu THD FAST VUT v Brně. S vybranými nebezpečnými odpady bylo dle navržených receptur vytvořeno 39 různých směsí solidifikátů. Přídavek vody byl volen co nejnižší s ohledem na dobrou zpracovatelnost směsi, která umožňovala zhutnění vzorků pomocí vibračního stolu. Přídavek vody a ztráta sušením vytvořených solidifikátů jsou uvedeny v příloze této práce. Homogenizace směsi byla provedena pomocí míchadla HITACHI UM16VST. Míchání probíhalo v nádobě o velikosti 10 l a to nejdříve rychlostí 150 otáček/min. po dobu jedné minuty. Následně byla rychlost zvýšena na 650 otáček/min. a míchání probíhalo další dvě minuty. Poté byla vytvořena zkušební tělesa a to dvě tělesa ve tvaru krychle o hraně 100 mm a dva trámce o velikosti 40*40*160 mm z každé záměsi. Zkušební tělesa byla odformována po 48 hodinách a uložena při laboratorní vlhkosti a teplotě.



Obrázek 17- Solidifikát z NO A1



Obrázek 18- Solidifikát z NO B2



Obrázek 19- Solidifikát z NO A2



Obrázek 20- Solidifikát z NO B1



Obrázek 21- Solidifikát z NO B1 po porušení



Obrázek 22- Ukázky solidifikátů z různých NO

Při odformování solidifikátů z NO 110109 (H) bylo zjištěno, že tyto vzorky nemají dostatečnou manipulační pevnost pro ani po 7 dnech od homogenizace směsi. Na první pohled se tento odpad svou konzistencí nejvíce podobá fluidnímu popílku. Z důvodu práškovitého charakteru NO 110109 (H) si homogenizace tohoto NO vyžádala větší přídavek vody. Právě vyšší vodní součinitel byl příčinou velmi pomalého tuhnutí. Z tohoto důvodu byl k navrženým recepturám, určeným k S/S NO 110109 (H), přidán plastifikátor Stacheplast 110. Jedná se o plastifikátor na bázi lignosulfonátů, který je běžně používán jako přísada do transportbetonů. Tento plastifikátor byl zvolen z především z důvodu jeho nízké ceny. Dávkování plastifikátoru bylo určeno na 0,6 % z hmotnosti celé směsi. Je to hodnota na spodní hranici dávkování doporučené výrobcem. Přídavkem plastifikátoru bylo možné snížit přídavek vody o 10 až 15 % při zachování konzistence umožňující hutnění na vibračním stole. Snížení vodního součinitele výrazně urychlilo tuhnutí takto vytvořených solidifikátů. Tyto solidifikáty z NO 110109 (H) bylo možné odformovat již po 48 hodinách. Nedostatečná pevnost a křehkost solidifikátů z NO 110109 (H) bez přídavku plastifikátoru je vidět pouhým okem viz obrázek 23.



Obrázek 23- Solidifikát z NO 110109 (H) bez přídavku plastifikátoru

Pro S/S NO 110108 (G) byla při návrhu solidifikačních receptur zjištěna nutnost předúpravy tohoto NO, jelikož tento NO má pevnou konzistenci. Tento tuhý NO byl vystaven dlouhodobému působení vody. Laboratorním ověřením bylo zjištěno, že ani po 14 dnech, kdy byl odpad ponořen ve vodě, nedošlo k narušení struktury odpadu v takové míře, která by umožňovalo dostatečné rozdužení tohoto odpadu pro homogenizaci směsi. Z tohoto důvodu byl tento NO 110108 (G) dodatečně vyloučen z vybraných NO určených k S/S v rámci této práce, jelikož další metody rozdužení jako je mletí nebo drcení jsou pro předúpravu NO nevhodné z důvodu vysokých finančních nákladů a mýdlové konzistence NO.

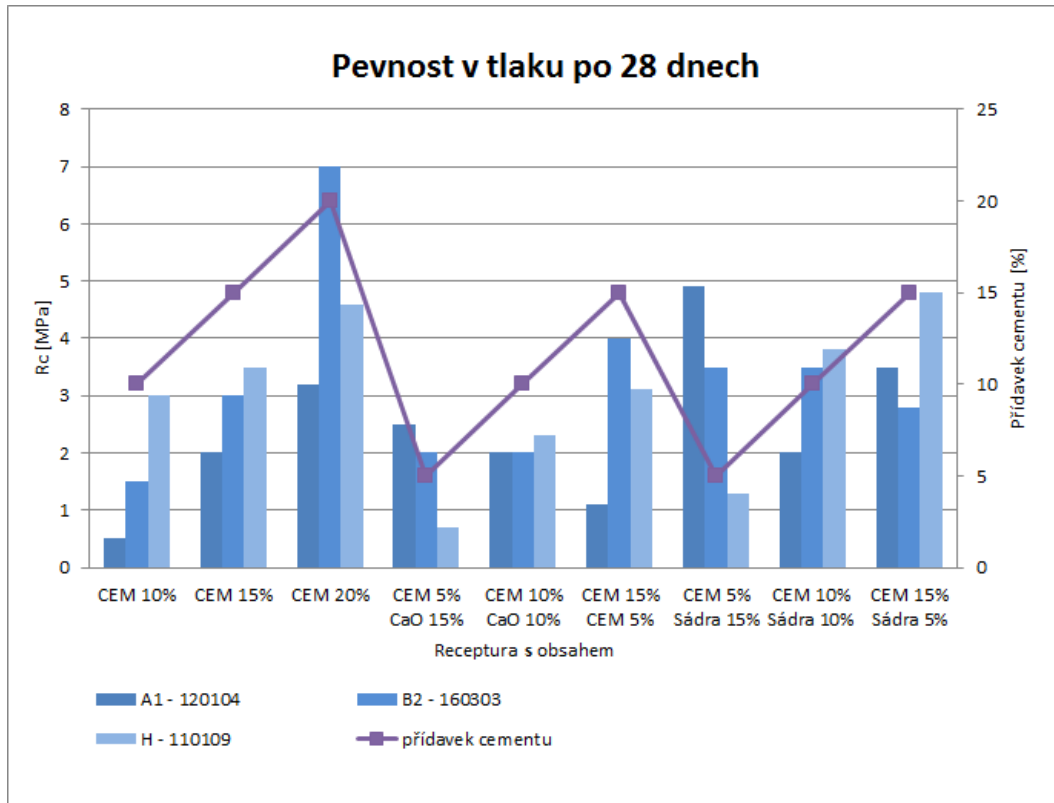
5.4.2. Základní prověření S/S receptur

Základní posouzení úspěšnosti S/S receptur proběhlo v souladu s metodikou vytvořenou v kapitole 5.3.1.. Jako určující pro posouzení úspěšnosti S/S procesu byla v předchozí kapitole vybrána vyluhovatelnost (ČSN EN 12457-4). Druhou vybranou zkouškou, vypovídající o fyzikálně-mechanických vlastnostech solidifikátu, je pevnost v prostém tlaku, která byla prováděna dle ČSN EN 13286-41. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulkách níže. Následuje slovní zhodnocení, grafické vyjádření výsledků a závěrečné zhodnocení a diskuse.

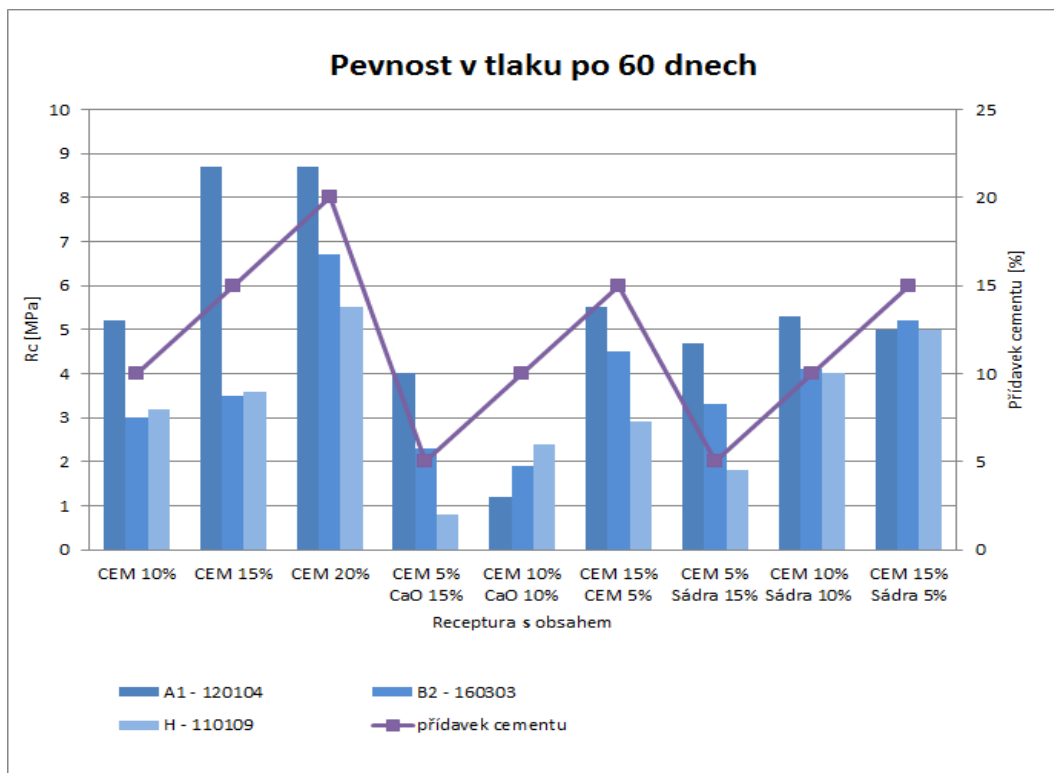
Pevnost v tlaku základních S/S receptur

Tabulka 30- Pevnost v tlaku základních receptur

Označení Receptury	Pojiva	A1 - 160303		B2 - 120104		H - 110109	
		R _c 28dní [MPa]	R _c 60dní [MPa]	R _c 28dní [MPa]	R _c 60dní [MPa]	R _c 28dní [MPa]	R _c 60dní [MPa]
A	CEM 10%	0,5	5,2	1,5	3	3	3,2
B	CEM 15%	2	8,7	3	3,5	3,5	3,6
C	CEM 20%	3,2	8,7	7	6,7	4,6	5,5
F	CEM 5% CaO 15%	2,5	4	2	2,3	0,7	0,8
E	CEM 10% CaO 10%	2	1,2	2	1,9	2,3	2,4
D	CEM 15% CEM 5%	1,1	5,5	4	4,5	3,1	2,9
I	CEM 5% Sádra 15%	4,9	4,7	3,5	3,3	1,3	1,8
H	CEM 10% Sádra 10%	2	5,3	3,5	4,1	3,8	4
G	CEM 15% Sádra 5%	3,5	5	2,8	5,2	4,8	5



Graf 3- Pevnost v tlaku základních receptur po 28 dnech



Graf 4- Pevnost v tlaku základních receptur po 60 dnech

Pevnost v prostém tlaku u S/S nebezpečných odpadů vypovídá o mechanických vlastnostech solidifikátů jako je houževnatost, odolnost a trvanlivost. Nízké hodnoty tlakových pevností také mohou předznamenávat vyšší koncentrace škodlivin ve vodném výluhu, jelikož nedílnou součástí úspěšné solidifikace je mechanická stabilizace polutantů v matici. [8]

Pevnosti zkoušených solidifikátů se nacházejí v širokém rozptylu hodnot od nejnižší hodnoty po 28 dnech 0,7 MPa až po maximum po 60 dnech 8,7 MPa. Obecně lze říci, že pevnost v tlaku zde koresponduje s množstvím přidaného cementu viz graf 3 a 4. Receptury s vyšším přídatkem cementu vykazují vyšší tlakové pevnosti než receptury, kde je cement nahrazen větším množstvím sádry nebo vápna. Přídavek vápna měl u většiny receptur opačný efekt než přídavek cementu. Se zvyšujícím se podílem vápna se pevnosti solidifikátů snižovaly. Nahrazení části cementu sádrkou nemělo na pevnost v tlaku výrazný vliv. Receptury se sádrkou obecně vykazovaly vyšší pevnosti než receptury s vápnem, ale nižší v porovnání s recepturami, které obsahovaly pouze cement.

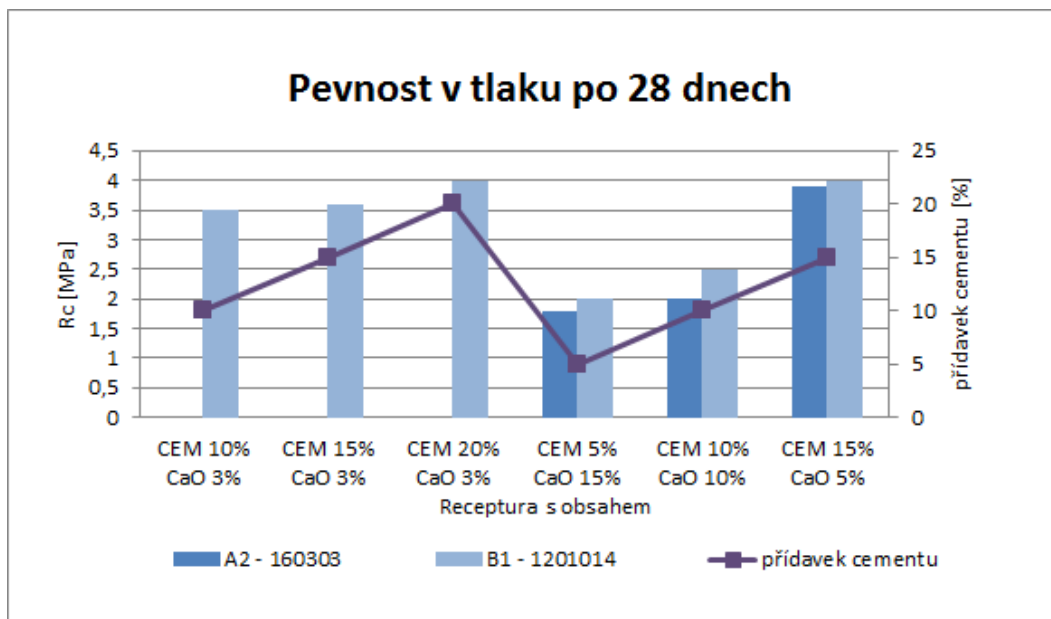
Pevnost v tlaku neutralizačních S/S receptur

Tabulka 31- Pevnost v tlaku neutralizačních receptur

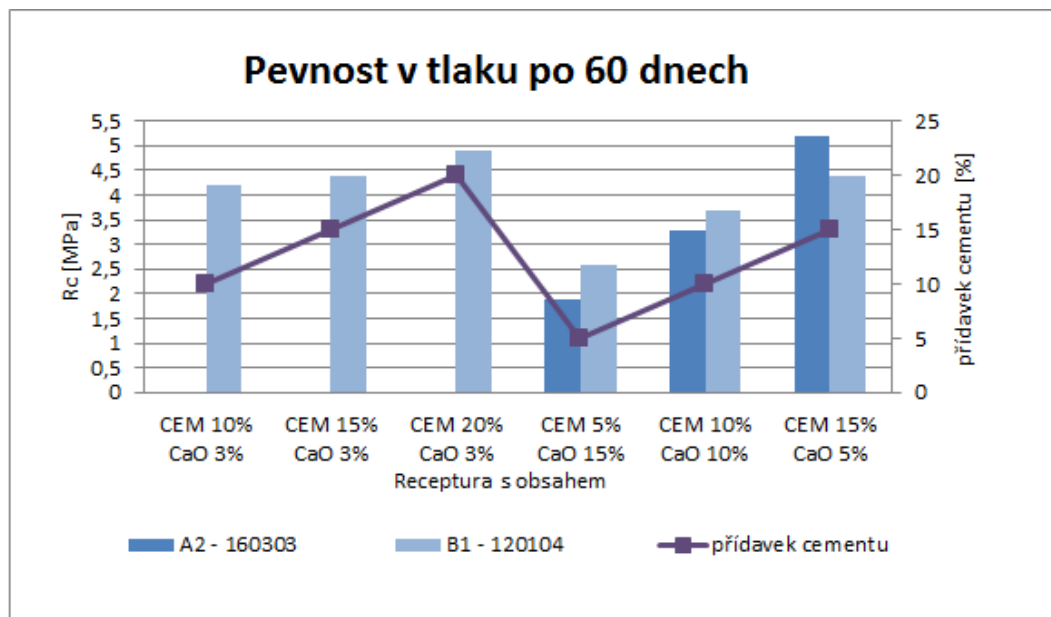
Označení Receptury	Pojiva	A2 - 160303		B1 - 120104	
		R _c 28dní [MPa]	R _c 60dní [MPa]	R _c 28dní [MPa]	R _c 60dní [MPa]
L	CEM 10% CaO 3%	0	0	3,5	4,2
K	CEM 15% CaO 3%	0	0	3,6	4,4
J	CEM 20% CaO 3%	0	0	4	4,9
F	CEM 5% CaO 15%	1,8	1,9	2	2,6
E	CEM 10% CaO 10%	2	3,3	2,5	3,7
D	CEM 15% CaO 5%	3,9	5,2	4	4,4

V případě neutralizačních receptur nebylo dosaženo tak vysokých pevností jako u receptur základních. Můžeme zde však pozorovat stejnou závislost mezi množstvím přidaného

cementu a pevností v tlaku jako u receptur základních viz graf 5 a 6. Receptury s označením J, K a L nedosáhly při S/S odpadu 160303 (A2) ani po sedmi dnech uložení ve formě takové pevnosti, která by umožnila jejich odformování. Z tohoto důvodu nebudou tyto tři solidifikáty dále zkoušeny na vyluhovatelnost (ČSN EN 12457-4).



Graf 5- Pevnost v tlaku neutralizačních receptur po 28 dnech



Graf 6- Pevnost v tlaku neutralizačních receptur po 60 dnech

Vyluhovatelnost solidifikátů – NO 160303 (A1)

Tabulka 32- Vyluhovatelnost solidifikátů - NO 160303 (A1) [Labtech s.r.o.]

Ukazatel	m.j.	NO A1 160303	Označení receptury								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
pH (25°C)		6,75	11,5	11,4	11,5	11,3	11,1	10,4	10,1	11,2	10,5
Rozpuštěné látky	mg/l	7310	1450	1120	1010	1110	1150	1370	3270	2690	3010
Chloridy	mg/l	26,3	27,2	46,7	19,2	22,6	30	48,3	36	36	40,4
Fluoridy	mg/l	3,84	0,7	0,53	0,47	0,56	0,46	0,2	0,15	0,26	0,28
Sírany	mg/l	692	480	152	115	240	379	514	2400	1830	1880
Fenoly	mg/l	0,53	0,04	0,1	0,04	0,08	0,11	0,17	0,07	0,11	0,11
Arsen	mg/l	0,148	0,0032	0,0029	0,0024	0,0029	0,0071	0,0099	0,0104	0,0035	0,0112
Baryum	mg/l	0,02	0,141	0,053	0,078	0,07	0,055	0,056	0,096	0,118	0,105
Kadmium	mg/l	0,155	0,00014	0,00041	0,00078	0,00029	0,00059	0,0002	0,0015	0,00018	0,00015
Chrom	mg/l	0,08	0,055	0,049	0,074	0,064	0,055	0,031	0,033	0,167	0,115
Měď	mg/l	0,119	0,192	0,145	0,161	0,146	0,142	0,148	0,128	0,168	0,171
Nikl	mg/l	0,11	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Olovo	mg/l	0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Molybden	mg/l	192	0,077	0,233	0,392	0,191	0,425	0,138	1,14	0,125	1,11
Antimon	mg/l	0,028	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0011	0,001	0,001	0,001
Selen	mg/l	0,0016	0,0068	0,0054	0,006	0,0052	0,0081	0,0114	0,0076	0,0076	0,0111
Zinek	mg/l	0,96	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Rtuť	mg/l	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
DOC	mg/l	2370	191	188	211	173	196	265	214	256	315
Třídy vyluhovatelnosti											
I		IIb			IIa			III		Nelze zařadit	

Zhodnocení výsledku vyluhovatelnosti solidifikace NO 160303(A1):

a) **Rozpuštěné látky** – z grafu č. 7 vyplývá, že obsah rozpuštěných látek je nepřímě úměrný množství cementu, které jednotlivé solidifikáty obsahují. Lze tedy říci, že se zvyšujícím přídatkem cementu došlo ke snížení obsahu rozpuštěných látek. Graf č. 5 dále ukazuje, že receptury obsahující sádro mají obecně dvakrát až třikrát větší vyluhovatelnost rozpuštěných látek než ostatní solidifikační receptury.

b) **Fluoridy** – S/S fluoridů pomocí navržených receptur lze označit za úspěšnou, jelikož u všech vytvořených solidifikátů došlo k výraznému, řádově desetinásobnému, snížení koncentrace fluoridů v porovnání s původním NO.

c) **Sírany** – u všech solidifikátů z NO 160303 (A1) došlo k nepatrnému snížení koncentrace síranů ve vodném výluhu, výjimku tvoří receptury obsahující sádro, kde došlo k několikanásobnému zvýšení koncentrace oproti původnímu NO.

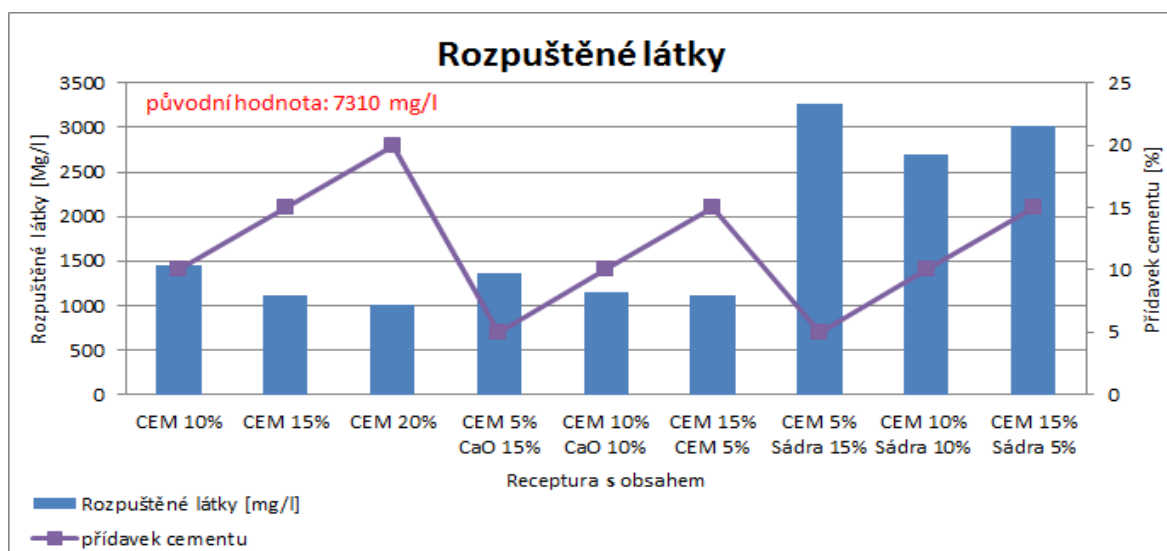
d) **Fenoly** - S/S fenolů pomocí navržených receptur lze označit za úspěšnou, jelikož u všech vytvořených solidifikátů došlo k výraznému, řádově pěti až desetinásobnému, snížení koncentrace fenolů oproti vyluhovatelnosti původního nebezpečného odpadu.

e) **Kovy (Cd, Ni, Zn)** - S/S těchto kovových prvků byla velmi úspěšná, došlo k výraznému snížení koncentrace těchto prvků ve vodném výluhu oproti původnímu NO v některých případech až tisícinásobně.

f) **Kovy (Cr, Mo)** – v případě těchto dvou kovů došlo také k výraznému snížení koncentrace na rozdíl od předchozí skupiny kovů, ale nebyly splněny limity pro zařazení do první výluhové třídy. Hlavní příčinou je, že všechny vstupní suroviny, kromě vápna, obsahují zvýšené množství Mo. Cr se vyskytuje ve větší míře v cementu a ve fluidním popílku.

g) **Polokovy (As, Sb)** – tyto dva polokovy byly S/S úspěšně. Byly splněny podmínky pro zařazení do první výluhové třídy

h) **Doc¹¹** – Koncentrace rozpuštěného organické uhlíku u původního NO dosahovala hodnoty 2370 mg/l. Pomocí solidifikačních receptur se tuto hodnotu podařilo snížit u všech S/S receptur na desetinu. Nicméně ani jeden ze solidifikátů nelze zařadit do výluhové třídy, jelikož maximální požadovaná hodnota pro zařazení do třetí výluhové třídy je 100 mg/l. viz tabulka 32.



Graf 7- Rozpuštěné látky NO 160303 (A1)

¹¹ Rozpuštěný organický uhlík

Vyluhovatelnost solidifikátů – NO 120114 (B2)

Tabulka 33- Vyluhovatelnost solidifikátů – NO 120114 (B2) [Labtech s.r.o.]

Ukazatel	m.j.	NO B2 120114	Označení receptury								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
pH (25°C)		7,07	10,6	10,3	11,3	10,9	10,6	10,3	9,91	10,4	9,53
Rozpuštěné látky	mg/l	2830	2090	984	2250	1250	2070	2010	3990	3340	3950
Chloridy	mg/l	76,2	11,8	32,6	17,3	55,4	32,5	27,5	28,9	16,9	27,2
Fluoridy	mg/l	0,47	0,26	0,04	0,33	0,26	0,18	0,23	0,18	0,14	0,39
Sírany	mg/l	1550	456	337	34,6	454	355	461	1730	1240	1730
Fenoly	mg/l	0,005	0,06	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04
Arsen	mg/l	0,001	0,0173	0,0056	0,0019	0,0084	0,0143	0,024	0,0276	0,0131	0,0714
Baryum	mg/l	0,01	0,086	0,144	0,29	0,118	0,103	0,072	0,096	0,139	0,082
Kadmium	mg/l	0,00024	0,00011	0,00011	0,0001	0,0001	0,00011	0,00022	0,00013	0,00021	0,00023
Chrom	mg/l	0,03	0,03	0,055	0,049	0,058	0,051	0,03	0,03	0,03	0,03
Měď	mg/l	0,289	0,318	0,207	0,246	0,209	0,173	0,164	0,123	0,118	0,156
Nikl	mg/l	0,12	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Olova	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Molybden	mg/l	0,011	0,05	0,942	0,061	0,162	0,086	0,137	0,126	0,118	0,164
Antimon	mg/l	0,001	0,0016	0,0017	0,0013	0,0024	0,0026	0,0035	0,0027	0,001	0,0054
Selen	mg/l	0,001	0,006	0,005	0,0047	0,0059	0,0071	0,0074	0,007	0,0067	0,0129
Zinek	mg/l	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Rtuť	mg/l	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
DOC	mg/l	540	754	211	1570	178	1010	713	762	1080	908
Třídy vyluhovatelnosti											
I	IIb			IIa			III			Nelze zařadit	

Zhodnocení výsledku vyluhovatelnosti solidifikace NO 120114(B2):

a) **Rozpuštěné látky** – u receptur obsahujících pouze cement nebo vápno došlo k nevýraznému snížení koncentrace RL¹². U receptur obsahujících sádro došlo dokonce ke zvýšení koncentrace RL oproti původnímu NO.

b) **Sírany** – kromě receptur obsahujících sádro došlo k několikanásobnému snížení koncentrace síranů ve vodném výluhu. Receptura s označením C jako jediná splnila podmínky pro zařazení do první vyluhové třídy viz tabulka č. 33. Naopak receptury obsahující sádro vykazaly ve dvou případech ze tří zvýšení koncentrace síranů ve vodném výluhu v porovnání s původním NO.

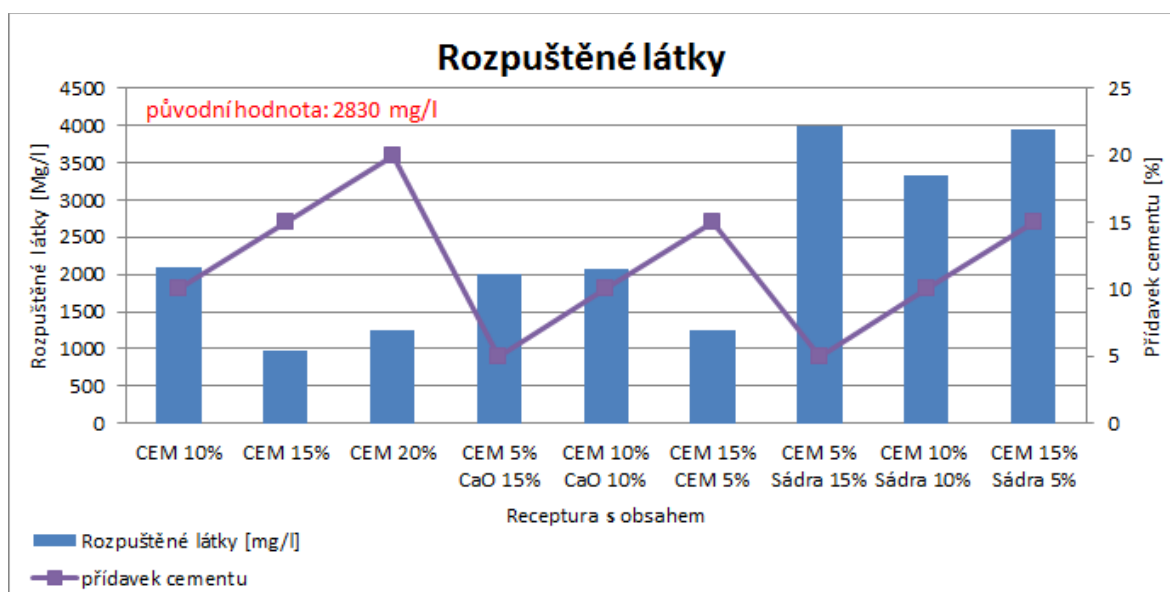
c) **Kovy (Mo, Cr)** – u původního odpadu 120114 (B2) byly splněny podmínky pro zařazení do první vyluhové třídy. V případě molybdenu u všech S/S receptur došlo k mírnému zvýšení koncentrace Mo ve vodném výluhu oproti původnímu NO. Cr byl

¹² Rozpuštěné látky

zjištěn ve zvýšené míře oproti původnímu NO u třech z devíti S/S receptur. Je to dáno především zvýšeným obsahem Mo a Cr ve vstupních surovinách.

d) Kovy (Cu, Ni) – S/S niklu proběhla úspěšně. Došlo k několikanásobnému snížení koncentrace niklu, které umožňuje zařazení do první výluhové třídy. Koncentrace mědi byla nepatrně snížena u většiny S/S receptur. U pěti receptur to umožnilo zařazení do první výluhové třídy.

e) DOC – U solidifikátů vytvořených z NO 120114 (B2) mají hodnoty koncentrace DOC velmi široký rozptyl. Nejnižší koncentrace, které bylo dosaženo je 178 mg/l a nejvyšší 1570 mg/l, přičemž koncentrace u původní NO dosahovala hodnoty pouze 540 mg/l. Ani jeden z vytvořených solidifikátů nelze řadit do výluhové třídy dle vyhlášky 294/2005 Sb.



Graf 8- Rozpuštěné látky NO 120114 (B2)

Vyluhovatelnost solidifikátů – NO 110109 (H)

Tabulka 34- Vyluhovatelnost solidifikátů - NO 110109 (H) [Labtech s.r.o.]

Ukazatel	m.j.	NO H 110109	Označení receptury								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
pH (25°C)		8,3	10,2	10,8	11	10,7	10,3	9,82	10,2	10,5	10,2
Rozpuštěné látky	mg/l	1430	2630	2310	2300	2650	2730	3510	3560	3610	3680
Chloridy	mg/l	408	22,6	21,7	19	19	17,6	20,5	17,6	16,9	16,8
Fluoridy	mg/l	1,44	0,62	0,41	0,38	0,43	0,37	0,67	0,22	0,22	0,22
Sírany	mg/l	274	610	311	264	432	592	942	1390	1320	1300
Fenoly	mg/l	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Arsen	mg/l	0,001	0,0305	0,011	0,0068	0,011	0,022	0,051	0,03	0,017	0,03
Baryum	mg/l	0,049	0,067	0,091	0,105	0,093	0,065	0,075	0,08	0,105	0,08
Kadmium	mg/l	0,00233	0,00012	0,0001	0,0001	0,00011	0,00013	0,00019	0,00014	0,00012	0,0001
Chrom	mg/l	0,03	0,03	0,03	0,033	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Měď	mg/l	0,139	0,154	0,158	0,174	0,246	0,202	0,174	0,124	0,143	0,124
Nikl	mg/l	1,17	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Olova	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Molybden	mg/l	1,14	0,051	0,048	0,043	0,05	0,055	0,09	0,064	0,047	0,064
Antimon	mg/l	0,0013	0,0019	0,0015	0,0017	0,00225	0,0034	0,0045	0,001	0,001	0,001
Selen	mg/l	0,001	0,008	0,0047	0,0052	0,0067	0,0085	0,0145	0,006	0,0055	0,006
Zinek	mg/l	0,114	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Rtuť	mg/l	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
DOC	mg/l	78,8	1240	1380	1480	1720	1520	1570	1190	1270	1190
Třídy vyluhovatelnosti											
I	IIb		IIa			III		Nelze zařadit			

Zhodnocení výsledku vyluhovatelnosti solidifikace NO 110109(H):

a) **Rozpuštěné látky** – u všech S/S došlo k významnému zvýšení koncentrace rozpuštěných látek ve vodném výluhu oproti původnímu NO. Bylo to pravděpodobně způsobeno nízkým obsahem rozpuštěných látek původního odpadu a nedostatečným vytvrnutím solidifikátů.

b) **Chloridy** – z tabulky č. 34 vyplývá, že S/S NO 110109 (H), pomocí navržených receptur, způsobila mnohonásobné snížení koncentrace chloridů u všech vytvořených solidifikátů.

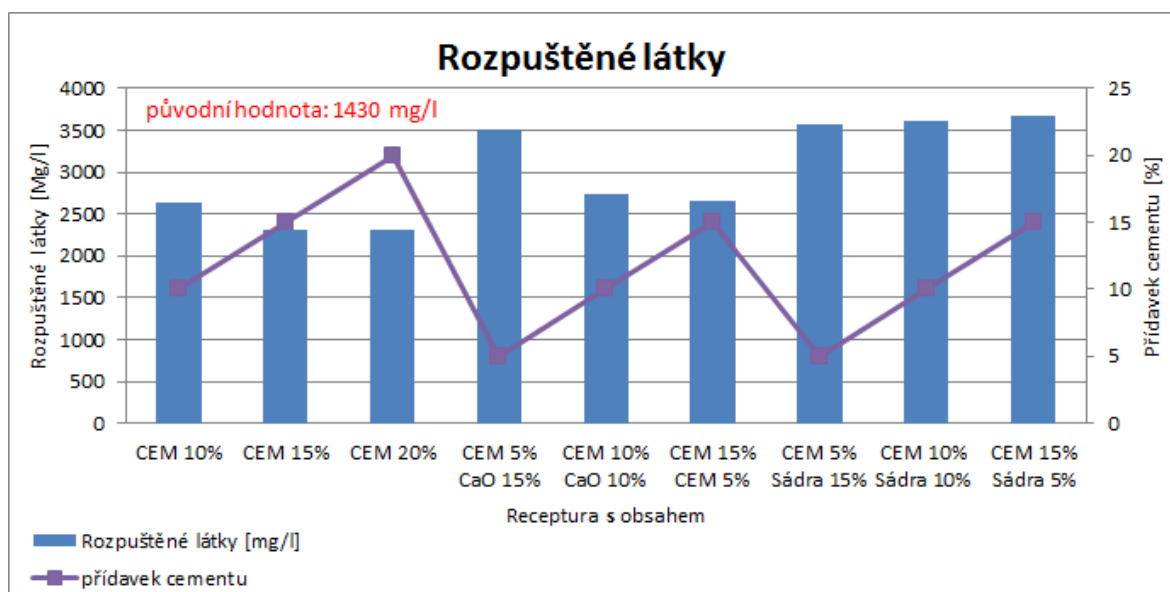
c) **Fluoridy** – podobně jako u chloridů i v případě fluoridů došlo k výraznému snížení koncentrace ve vodném výluhu u všech solidifikátů.

d) **Sírany** – všechny solidifikační receptury vykázaly vyšší koncentraci síranů ve vodném výluhu než původní NO. Je to dáno především faktem, že všechny vstupní suroviny, kromě vápna, mají vyšší obsah síranu ve vodném výluhu než původní odpad.

e) **Nikl** – u všech S/S receptur došlo k několikanásobnému snížení koncentrace niklu, které umožnilo zařazení do první výluhové třídy.

f) **Molybden** – koncentrace molybdenu byla snížena v případě všech solidifikačních receptur. U třech solidifikačních receptur bylo možné zařazení do první výluhové třídy.

g) **DOC** – rozpuštěný organický uhlík se stejně jako u S/S předchozího NO jeví jako obtížně solidifikovatelný prvek. V tomto případě hodnoty ukazatele DOC nemají tak velký rozptyl jako tomu bylo u solidifikátů z NO 120114(B2), ale všechny receptury vykázaly výrazné zvýšení tohoto ukazatele, v některých případech až dvacetinásobné oproti původnímu NO.



Graf 9- Rozpuštěné látky NO 110109 (H)

Vyluhovatelnost solidifikátů – NO 120114 (B1) a 160303 (A2)

Tabulka 35- Vyluhovatelnost solidifikátů - NO 120114 (B1); NO 160303 (A2) [Labtech s.r.o.]

Ukazatel	m.j.	NO B1 120104	Označení receptury						NO A2 160303	Označení receptury		
			J	K	L	D	E	F		J	K	L
pH (25°C)		4,73	10,9	11,3	11,4	11,4	11,9	12,2	1,44	11,1	11,4	11,9
Rozpuštěné látky		4220	966	980	942	846	1850	2680	4540	1640	1530	2770
Chloridy	mg/l	111	19,2	17,1	12,7	10,8	9,5	10,4	70,2	20,4	17,4	15,1
Fluoridy	mg/l	1,23	0,52	0,61	0,65	0,58	0,5	0,6	1,19	0,04	0,13	0,2
Sírany	mg/l	2400	255	125	84	63	21	10	3170	233	549	242
Fenoly	mg/l	0,005	0,06	0,05	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
Arsen	mg/l	0,02	0,013	0,0079	0,0022	0,0015	0,0013	0,0011	0,032	0,0037	0,0021	0,0014
Baryum	mg/l	0,042	0,018	0,014	0,027	0,039	0,262	0,874	0,1	0,039	0,036	0,059
Kadmium	mg/l	0,0027	0,00034	0,00047	0,00056	0,00028	0,00034	0,00046	0,0053	0,00027	0,00033	0,00028
Chrom	mg/l	0,08	0,035	0,047	0,03	0,03	0,03	0,03	4,86	0,089	0,067	0,039
Měď	mg/l	0,807	0,099	0,135	0,067	0,058	0,089	0,116	0,381	0,02	0,013	0,01
Nikl	mg/l	2,5	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	3,73	0,02	0,02	0,02
Olovo	mg/l	0,0031	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0011	0,047	0,0063	0,001	0,001	0,001
Molybden	mg/l	0,17	0,171	0,236	0,168	0,15	0,156	0,21	6,19	0,128	0,163	0,133
Antimon	mg/l	0,019	0,0067	0,0062	0,005	0,0046	0,003	0,001	0,013	0,001	0,001	0,001
Selen	mg/l	0,001	0,0043	0,0038	0,0025	0,0023	0,0013	0,0013	0,0017	0,0062	0,0058	0,0036
Zinek	mg/l	3,67	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	1,16	0,02	0,02	0,02
Rtuť	mg/l	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
DOC	mg/l	179	174	166	136	132	127	115	1260	117	118	123
Třídy vyluhovatelnosti												
I	IIb			IIa			III			Nelze zařadit		

Zhodnocení výsledku vyluhovatelnosti solidifikace NO 120114(B1):

a) **Rozpuštěné látky** – v případě všech vytvořených solidifikátů došlo ke snížení koncentrace RL ve vodném výluhu. Z grafu č. 10 vyplývá nepřímá závislost mezi přídatkem cementu a obsahem rozpuštěných látek ve vodném výluhu.

b) **Chloridy** - z tabulky č. 35 vyplývá, že S/S NO 120114 (B1), pomocí navržených receptur, způsobila mnohonásobné snížení koncentrace chloridů u všech vytvořených solidifikátů.

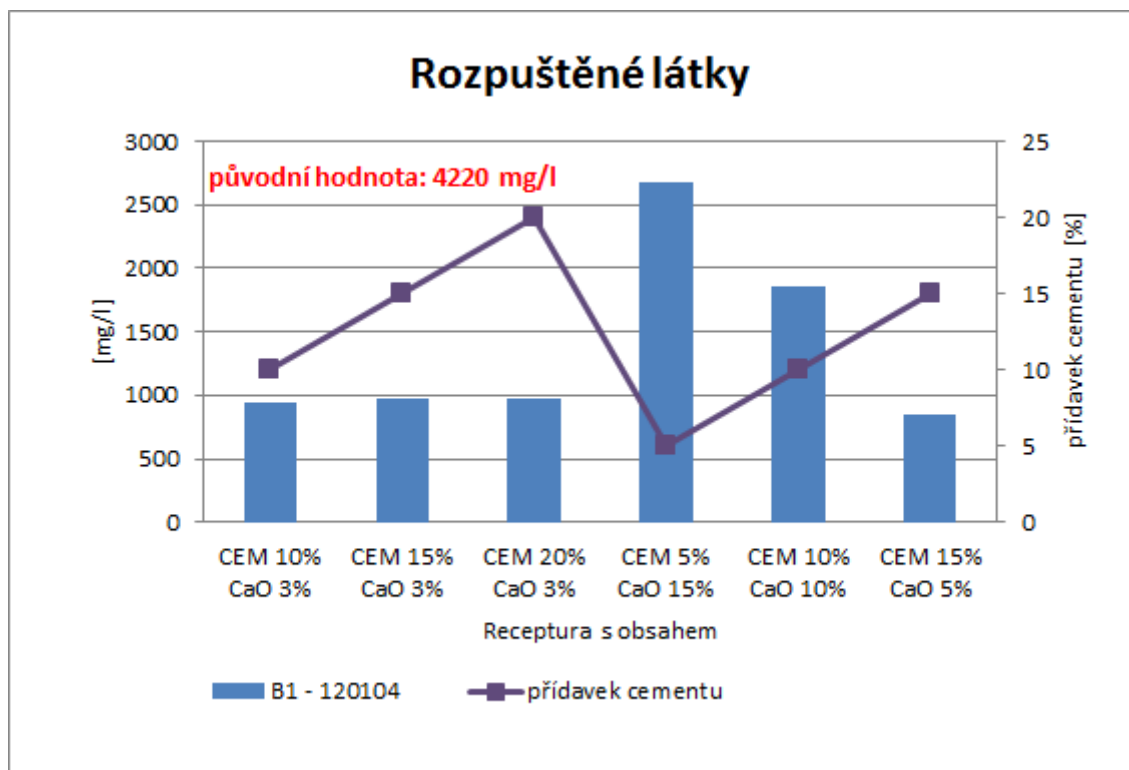
c) **Fluoridy** – podobně jako u chloridů i v případě fluoridů došlo k výraznému snížení koncentrace ve vodném výluhu u všech solidifikátů.

d) **Sírany** – u všech solidifikovaných receptur došlo k velmi výraznému snížení koncentrace síranů. Čtyři ze šesti S/S receptur je možno zařadit do první vyluhové třídy.

e) **Kovy (Cr, Cu, Ni, Zn)** – S/S těchto kovů proběhla velmi úspěšně. Všechny solidifikáty je možné zařadit do první vyluhové třídy. Zvláště zajímavé je snížení koncentrace Cr pod

hranici 0,05 mg/l, což je mezní hodnota pro zařídění do první výluhové třídy. U většiny solidifikátů vytvořených z jiných odpadů se tento prvek jevil jako problémový.

f) **DOC** – ani u jedné solidifikační receptury nedošlo k výraznému snížení ukazatele DOC oproti původnímu NO viz tabulka 35.



Graf 10- Rozpuštěné látky NO 120114 (B1)

Zhodnocení výsledku vyluhovatelnosti solidifikace NO 160303(A2):

a) **Rozpuštěné látky** - u všech S/S došlo k významnému snížení koncentrace rozpuštěných látek ve vodném výluhu oproti původnímu NO.

b) **Fluoridy** - z tabulky č. 35 vyplývá, že S/S NO 160303 (A2) pomocí navržených receptur způsobila mnohonásobné snížení koncentrace fluoridů u všech vytvořených solidifikátů.

c) **Kovy (Cd, Cu, Ni, Zn)** – S/S těchto kovových prvků lze považovat za úspěšnou. U všech vytvořených solidifikátů je možno pozorovat i více než stonásobné snížení koncentrací těchto prvků ve vodném výluhu.

d) Sírany – v případě síranů došlo u všech solidifikačních receptur k výraznému poklesu koncentrace síranů ve vodném výluhu oproti původnímu NO. Ve dvou případech ze tří byl pokles více než desetinásobný.

e) Kovy (Mo, Cr) – podobně jako u většiny výše hodnocených solidifikačních receptur došlo v případě Mo a Cr k výraznému snížení koncentrace těchto dvou kovových prvků.

f) DOC – podobně jako v předchozím případě u solidifikátů z NO 120114 (B1) ani u jedné solidifikační receptury nedošlo k výraznému snížení ukazatele DOC oproti původnímu NO viz tabulka 35.

Závěrečné zhodnocení výsledků:

Z výše uvedených výsledků pevností v tlaku lze říci, že byla zjištěna závislost mezi množstvím přidaného cementu a hodnotou pevnosti v tlaku. Z grafů pevnosti v tlaku vyplývá, že se zvyšujícím se množstvím cementu roste i pevnost v tlaku jednotlivých solidifikátů. Přídavek cementu měl vliv i na celkový obsah rozpuštěných látek ve vodném výluhu solidifikátů. Vyšší podíl cementu způsobil, u většiny zkoušených solidifikátů, pokles koncentrace RL ve vodném výluhu. Vyšší pevnost solidifikátů má za následek menší vyluhovatelnost RL, jelikož velká část škodlivin je stabilizována v matici enkapsulací.

Nahrazení části cementu sádrou nebo vápnem, způsobilo snížení pevností v tlaku u většiny solidifikátů. Použití sádry v S/S recepturách se ukázalo jako zcela nevhodné, jelikož přídavek sádry způsobil markantní nárůst koncentrace RL a síranů ve vodném výluhu solidifikátů. Receptury obsahující sádrou lze tedy označit za neúspěšné, jelikož nezpůsobily výrazný pokles koncentrace škodlivin ve vodném výluhu, naopak došlo ke zvýšení koncentrace RL a síranů oproti recepturám, které obsahovaly pouze cement nebo vápno.

Použitá technologie S/S se ukázala jako velmi vhodná k S/S kovů (Cd, Cu, Ni, Zn, Mo, Cr). Koncentrace těchto kovových prvků ve vodném výluhu byla snížena u všech receptur, v některých případech i na tisícinové hodnoty oproti původnímu NO. Ve většině případů byly splněny hodnoty pro zařazení do první vyluhové třídy dle vyhlášky 294/2005 Sb.

Velmi dobře proběhla také S/S polokovů As a Sb. Většina solidifikátů splnila limitní hodnoty stanovené pro koncentraci As a Sb ve vodném výluhu, které stanovuje vyhláška, pro zařazení do první výluhové třídy.

Všechny receptury úspěšně solidifikovaly/stabilizovaly chloridy, fluoridy. Všechny solidifikáty splnily limitní hodnoty stanovené pro koncentraci chloridů a fluoridů ve vodném výluhu, které stanovuje vyhláška, pro zařazení do první výluhové třídy. Navržené solidifikační receptury lze tedy doporučit pro solidifikaci NO, které mají zvýšenou koncentraci těchto dvou solí.

Velmi obtížně solidifikovatelný/stabilizovatelný se ukázal rozpuštěný organický uhlík. Hodnoty ukazatele DOC se nepodařilo snížit ani u jednoho solidifikátu pod hodnotu 100 mg/l, kterou stanovuje vyhláška pro zařazení do třetí výluhové třídy.

Výsledky tlakových pevností a obsahu prvků ve vodném výluhu budou sloužit v následující kapitole jako hlavní kritéria výběru nejúspěšnějších solidifikačních receptur.

5.4.3. Výběr nejúspěšnějších solidifikačních receptur

Výběr nejúspěšnějších solidifikačních receptur byl proveden na základě metodiky vytvořené v předchozí kapitole. Byla zvolena taková kritéria výběru, která nejlépe zhodnotí úspěšnost S/S procesu. Jednotlivé solidifikáty byly hodnoceny zvlášť, tzn., že receptury byly posuzovány v kombinaci s konkrétním NO, jelikož stejná receptura může u různých nebezpečných odpadů vykazovat jiné vlastnosti. Vybraná kritéria jsou uvedena v tabulce 36. Tyto kritéria byla navržena v předchozí kapitole a zohledňují celkovou vhodnost S/S receptur v kombinaci s NO pro vytvoření nového výrobku z odpadu. Pro vlastní výběr byla využita metoda multikriteriálního výběru pomocí Saatyho matice.

Vztahy potřebné pro výpočet:

$$R_i = \frac{S_{ti}}{n} \quad (\text{Rovnice 6})$$

$$f_i = \frac{R_i}{\sum R_i} \quad (\text{Rovnice 7})$$

$$MAXb_{ij} = \frac{a_{ij} - MINa_{ij}}{MAXa_{ij} - MINa_{ij}} \quad (\text{Rovnice 8})$$

$$MINb_{ij} = \frac{MAXa_{ij} - a_{ij}}{MAXa_{ij} - MINa_{ij}} \quad (\text{Rovnice 9})$$

Tabulka 36- Zvolená kritéria

Č.	Kritérium	Jednotka	Optimum
1	Výuhová třída (bez DOC)	[-]	MIN
2	Pevnost v prostém tlaku po 60 dnech	[MPa]	MAX
3	Cena vstupních surovin	[kč/t]	MIN
4	Produkce NO za rok	[t/rok]	MAX

Tabulka 37- Saatyho matice

číslo i/j	1	2	3	4	Si	Ri	Fi
1	1	2	2	3	12	3	0,760117
2	1/2	1	1/2	3	0,75	0,1875	0,047507
3	1/2	2	1	3	3	0,75	0,190029
4	1/3	1/3	1/3	1	0,037033	0,009258	0,002346
					Σ	3,946758	1

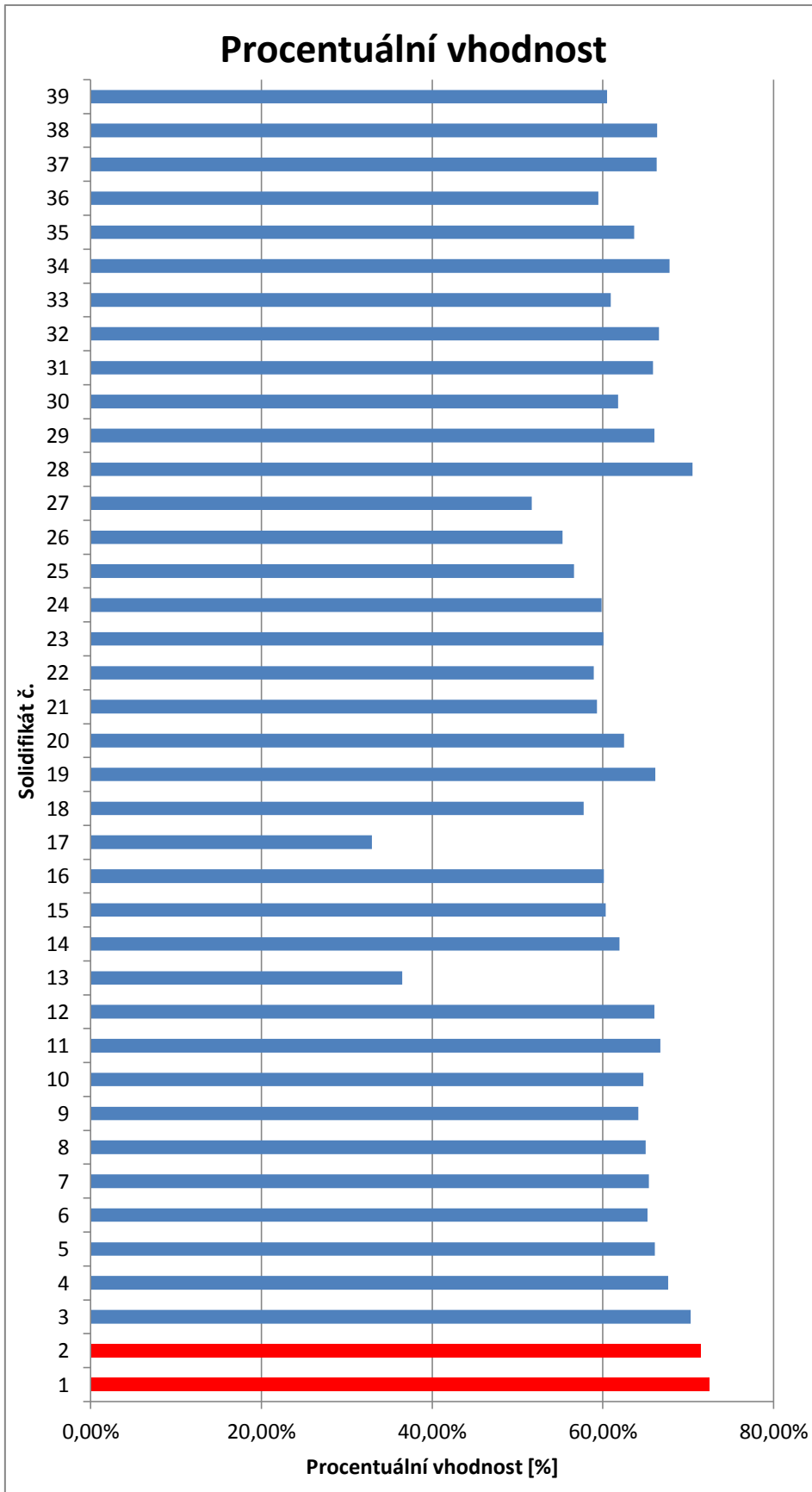
Tabulka 38-Vstupní hodnoty pro optimalizační výpočet

Solidifikát č.	NO	Receptura	Výluhová třída bez DOC	Produkce NO [t/rok]	Cena záměsi [kč/t]*	σ 60-denní [MPa]
1	A1	A	IIb	2,5	259,25	5,2
2	B2	A	IIb	500	259,25	3
3	A1	B	IIb	2,5	372,6	8,7
4	B2	B	IIb	500	372,6	3,5
5	A1	C	IIb	2,5	486	8,7
6	B2	C	IIb	500	486	6,7
7	A1	D	IIb	2,5	457,1	5,5
8	B2	D	IIb	500	457,1	4,3
9	A1	E	IIb	2,5	428,2	1,2
10	B2	E	IIb	500	428,2	1,9
11	A1	F	IIb	2,5	399,3	4
12	B2	F	IIb	500	399,3	2,3
13	A1	G	IIa	2,5	537	4,3
14	B2	G	IIb	500	537	4,1
15	A1	H	IIb	2,5	587,9	5
16	B2	H	IIb	500	587,9	4,2
17	A1	I	IIa	2,5	638,9	4,7
18	B2	I	IIb	500	638,9	3,3
19	H	A + Plast.	IIb	10	397,25	2,8
20	H	B + Plast.	IIb	10	510,6	3,7
21	H	C + Plast.	IIb	10	624	5,5
22	H	D + Plast.	IIb	10	595,1	2,9
23	H	E + Plast.	IIb	10	566,2	3
24	H	F + Plast.	IIb	10	537,3	0,7
25	H	G + Plast.	IIb	10	675	4
26	H	H + Plast.	IIb	10	725,9	5
27	H	I + Plast.	IIb	10	776,9	1,8
28	B1	J	IIb	12	309,9	4,9
29	B1	K	IIb	12	423,3	4,4
30	B1	L	IIb	12	536,7	4,2
31	B1	D	IIb	12	428,2	4,4
32	B1	E	IIb	12	399,3	3,7
33	B1	F	IIb	12	537	2,6
34	A2	J	IIb	2,5	309,9	0
35	A2	K	IIb	2,5	423,3	0
36	A2	L	IIb	2,5	536,7	0
37	A2	D	IIb	2,5	428,2	5,22
38	A2	E	IIb	2,5	399,3	3,3
39	A2	F	IIb	2,5	537	1,9

* Kalkulace byla provedena na základě ceny vstupních surovin uvedených výrobcem platné k 08.08.12, cena nebezpečného odpadu byla počítána jako nulová.

Tabulka 39- Výstup optimalizačního výpočtu

Solidifikát č.	Kritérium				Procentuální vhodnost [%]
	1	2	3	4	
	MIN	MAX	MIN	MAX	
1	0,506745	0,028395	0,190029	0	73%
2	0,506745	0,016382	0,190029	0,002346	72%
3	0,506745	0,047507	0,148419	0	70%
4	0,506745	0,019112	0,148419	0,002346	68%
5	0,506745	0,047507	0,106789	0	66%
6	0,506745	0,036586	0,106789	0,002346	65%
7	0,506745	0,030033	0,117399	0	65%
8	0,506745	0,023481	0,117399	0,002346	65%
9	0,506745	0,006553	0,128008	0	64%
10	0,506745	0,010375	0,128008	0,002346	65%
11	0,506745	0,021842	0,138617	0	67%
12	0,506745	0,012559	0,138617	0,002346	66%
13	0,253372	0,023481	0,088067	0	36%
14	0,506745	0,022389	0,088067	0,002346	62%
15	0,506745	0,027303	0,069382	0	60%
16	0,506745	0,022935	0,069382	0,002346	60%
17	0,253372	0,025665	0,05066	0	33%
18	0,506745	0,01802	0,05066	0,002346	58%
19	0,506745	0,01529	0,13937	3,54E-05	66%
20	0,506745	0,020204	0,097759	3,54E-05	62%
21	0,506745	0,030033	0,05613	3,54E-05	59%
22	0,506745	0,015836	0,066739	3,54E-05	59%
23	0,506745	0,016382	0,077348	3,54E-05	60%
24	0,506745	0,003822	0,087957	3,54E-05	60%
25	0,506745	0,021842	0,037408	3,54E-05	57%
26	0,506745	0,027303	0,018722	3,54E-05	55%
27	0,506745	0,009829	0	3,54E-05	52%
28	0,506745	0,026757	0,171436	4,48E-05	70%
29	0,506745	0,024027	0,129807	4,48E-05	66%
30	0,506745	0,022935	0,088177	4,48E-05	62%
31	0,506745	0,024027	0,128008	4,48E-05	66%
32	0,506745	0,020204	0,138617	4,48E-05	67%
33	0,506745	0,014198	0,088067	4,48E-05	61%
34	0,506745	0	0,171436	0	68%
35	0,506745	0	0,129807	0	64%
36	0,506745	0	0,088177	0	59%
37	0,506745	0,028504	0,128008	0	66%
38	0,506745	0,01802	0,138617	0	66%
39	0,506745	0,010375	0,088067	0	61%



Graf 11- Procentuální vhodnost jednotlivých solidifikátů

Tabulka 40- Nejúspěšnější solidifikáty

	Solidifikát č. 1 (160303 - A1)	Solidifikát č. 2 (120114 - B2)
NO	30%	30%
FP	30%	30%
KP	30%	30%
CEM II B-M SLL	10%	10%

Na základě zvolených kritérií byly pomocí optimalizačního výpočtu vybrány solidifikáty s označení 1 a 2. Jedná se o solidifikáty ze dvou různých nebezpečných odpadů. Poměr vstupních surovin je u obou vzorků stejný. Při výrobě těchto dvou vzorků byla použita receptura A. Poměr složek vstupujících do solidifikačního procesu je uveden v tabulce 40. Vybrané S/S receptury v kombinaci s vybranými NO budou dále zkoušeny dle platné legislativy. Cílem tohoto zkoušení je splnění technických a ekologických kritérií, které jsou stanoveny technickými návody dle vybraných optimálních aplikací solidifikátu pro udělení STO.

5.4.4. Zkoušení dle nařízení vlády č. 163/2002 Sb

V rámci zkoušení dle nařízení vlády č. 163/2002 Sb. o požadavcích na vybrané stavební výrobky budou zkoušeny solidifikáty, které byly vybrány v předchozí kapitole. Složení receptur těchto dvou vybraných solidifikátů je uvedeno v tabulce 40.

V důsledku velkého počtu zkoušek potřebných pro udělení stavebně technického osvědčení budou přednostně prováděny takové zkoušky, u kterých jsou v příslušných technických návodech specifikovány technické předpisy, které vyžadují splnění limitů pro udělení STO. Zkoušky a jim náležející technické předpisy jsou uvedeny v tabulce č. 29. Výsledky zkoušek budou porovnány s limitními hodnotami, které jsou uvedeny v příslušných technických předpisech. Na závěr bude provedena kontrola výsledků a v případě, že nebudou splněny požadavky pro žádnou vybranou aplikaci solidifikátu, bude nutné receptury modifikovat.

Objemová hmotnost max. ČSN EN 13286-2

ČSN 736133 uvádí maximální objemovou hmotnost zhutněné suché směsi $\rho_d \text{ max.} < 1500 \text{ kg/m}^3$ (násyp); $\rho_d \text{ max.} < 1600 \text{ kg/m}^3$ (aktivní zóna).

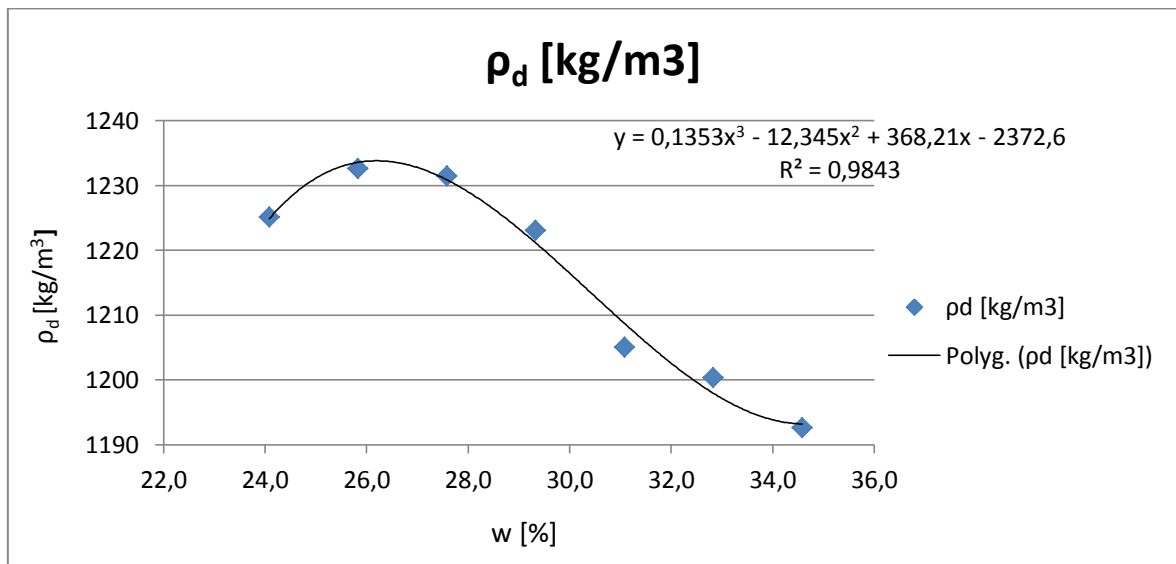
Zkouška byla provedena dle ČSN EN 13286-2. V rámci této zkoušky bylo nutné určit také celkovou vlhkost směsi, která byla zjištěna výpočtově na základě znalosti ztráty sušením použitých NO a množství přidané vody. Ztráta sušením při 105°C byla stanovena akreditovanou zkušební laboratoří Labtech s.r.o. zkušebním postupem dle ČSN 720102. Hodnoty ztráty sušením při 105°C jsou uvedeny v tabulce 7- Vyluhovatelnost původních NO.

Tabulka 41- Solidifikát č. 1 (NO 160303)

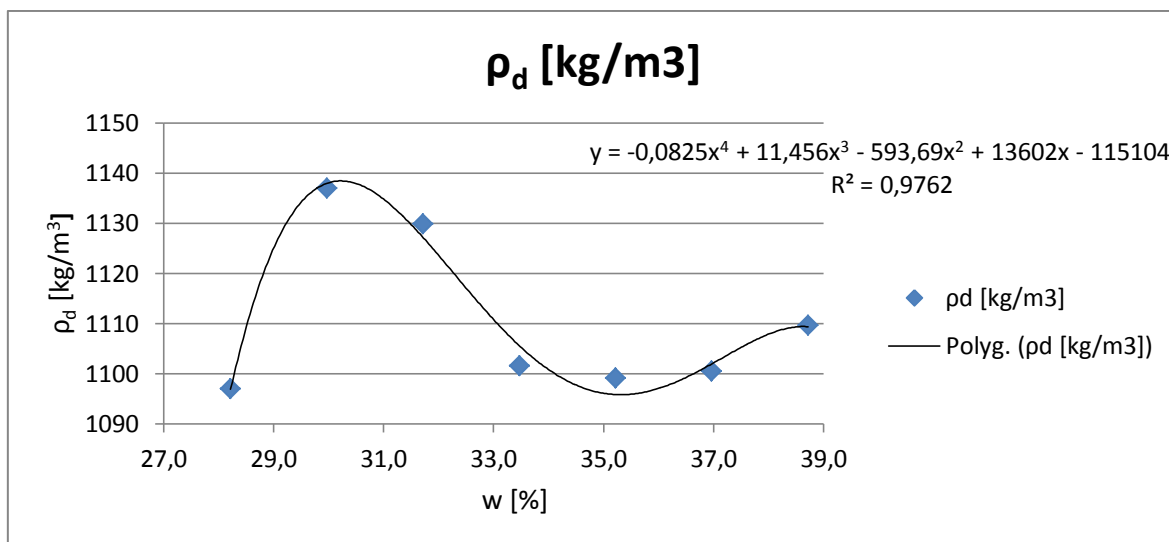
Přídavek vody [%]	m[kg]	w [%]	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]
30	1,512	34,6	1605	1193
27,5	1,502	32,8	1594	1200
25	1,488	31,1	1580	1205
22,5	1,49	29,3	1582	1223
20	1,48	27,6	1571	1231
17,5	1,461	25,8	1551	1233
15	1,432	24,1	1520	1225

Tabulka 42- Solidifikát č. 2 (NO 120114)

Přídavek vody [%]	m[kg]	w [%]	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]
30	1,45	38,7	1539	1110
27,5	1,42	37,0	1507	1101
25	1,4	35,2	1486	1099
22,5	1,385	33,5	1470	1102
20	1,402	31,7	1488	1130
17,5	1,392	30,0	1478	1137
15	1,325	28,2	1407	1097



Graf 12- Suchá objemová hmotnost- solidifikát č. 1(NO 160303)



Graf 13-Suchá objemová hmotnost- solidifikát č. 2(NO 120114)

Maximální suchá objemová hmotnost je maximum na spojitě křivce viz graf 12 a 13. K výpočtu maxima na daných intervalech vlhkosti byl použit řešitel, standartní doplněk aplikace excel. Výsledky maximální suché objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce níže. Vlhkost směsi odpovídající maximu na dané křivce označujeme pro danou směs jako optimální. Výsledky jsou zaokrouhleny v souladu s ČSN EN 13286-2. V případě obou solidifikátů byly splněny podmínky stanovené vyhláškou ČSN 736133 pro použití popílků stmelených hydraulickými pojivy při stavbě zemního tělesa silničních komunikací a jsou uvedeny v tabulce 43.



Obrázek 24- Použitý Proctorův moždír a pěk, oba typu A

Tabulka 43- Maximální suchá objemová hmotnost.

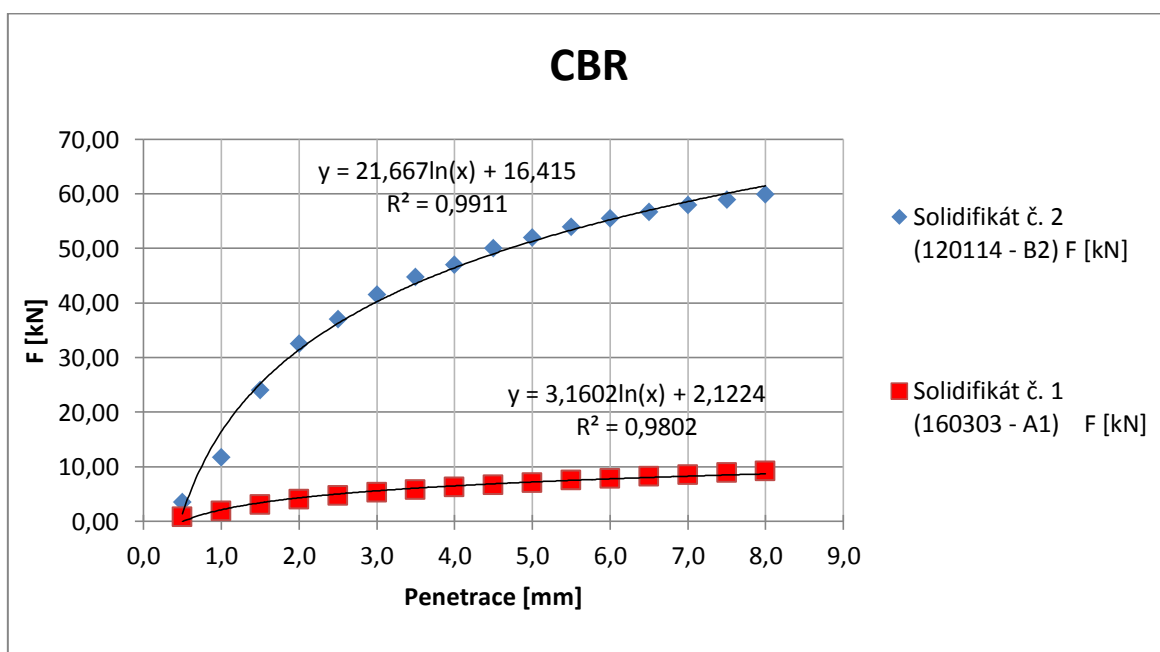
	ρ_d Max [kg/m ³]	ρ_d Max [kg/m ³]	w _{opt.} [%]	w _{opt.} [%]
Solidifikát č. 1 (160303 - A1)	1235,56	1240	26,28	26
Solidifikát č. 2 (120114 - B2)	1122,102	1120	30,11	30

Poměr únosnosti CBR ČSN EN 13286-47

Kalifornský index únosnosti je index užívaný pro stanovení únosnosti směsi ihned po ztuhnutí nebo po době zrání. [11]

ČSN 736133 vyžaduje pro neupravený a pojivem upravený popílek určený do zásypu ztuhnutý při optimální vlhkosti po 4denním uložení na vzduchu při zamezení odpařování min CBR 10 %.

Stanovení CBR bylo provedeno v laboratoři PKO¹³ na FAST VUT v Brně v souladu s ČSN EN 13286-47.



Graf 14- Stanovení CBR

¹³ PKO- Ústav pozemních komunikací

Tabulka 44- Odečtené síly při daných penetracích

Penetrace [mm]	Solidifikát č. 1 (160303 - A1) F [kN]	Solidifikát č. 2 (120114 - B2) F [kN]
0,0	0,00	0,00
0,5	0,83	3,50
1,0	1,90	11,70
1,5	3,08	24,00
2,0	4,03	32,50
2,5	4,70	37,00
3,0	5,30	41,53
3,5	5,81	44,80
4,0	6,27	47,00
4,5	6,70	50,00
5,0	7,09	52,00
5,5	7,50	53,90
6,0	7,85	55,47
6,5	8,19	56,70
7,0	8,55	57,93
7,5	8,86	58,94
8,0	9,18	59,95

Po vynesení hodnot do grafu byly hodnoty proloženy spojitou křivkou, pro stanovení CBR je nutné určit maximum na této křivce při hloubce penetrace 2,5 a 5mm. Síla p byla stanovena z rovnice křivky viz graf 12. Vlastní výpočet CBR byl proveden dle rovnice 1. Výsledné hodnoty CBR zaokrouhlené v souladu s ČSN EN 13286-47 jsou uvedeny v tabulce 45. Oba dva solidifikáty splnily podmínky stanovené ČSN 736133. Tato norma stanovuje minimální únosnost CBR 10%.

Tabulka 45- Výpočet a výsledky CBR

	Penetrace [mm]	Síla- p [kN]	Standartní síla p_s [kN]	Poměr CBR	CBR [%]
Solidifikát č. 1 (160303 - A1) F [kN]	2,5	5	13,2	0,38	40
	5,0	7,2	20,0	0,36	
Solidifikát č. 2 (120114 - B2) F [kN]	2,5	36,3	13,2	2,75	275
	5,0	51,3	20,0	2,57	

Pevnost v prostém tlaku ČSN EN 13286-41

Pevnost v prostém tlaku byla zkoušena na tělesech tvaru válce s průměrem podstavy 100mm a výškou 120mm. Pevnost v prostém tlaku byla prováděna dle ČSN EN 13286-41. Specifikace prováděných zkoušek. Zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní. Polovina byla uložena za laboratorních podmínek, polovina za zvýšené relativní vlhkosti vzduchu $\geq 95\%$. Po dokončení zrání byla tělesa změřena, zvážena a následně rovnoměrně zatěžována až do porušení vzorku. Pro stanovení pevnosti v tlaku byly použity určené rozměry tělesa tj. rozměry formy v souladu s ČSN EN 14227-3. Pro výrobu zkušebních těles byl použit Proctorův hmoždír typu A o rozměrech $120\pm 0,5$ a $100\pm 0,5$ mm.

Tabulka 46- Pevnost v tlaku

	R_c - uložení za laboratorního tlaku a teploty [MPa]	R_c - vlhké uložení $\phi \geq 95\%$ [MPa]	R_c - zaokrouhleno dle ČSN EN 14227-3 [Mpa]
Solidifikát č. 1 (NO 160303) $w_{opt}=26\%$	0,8	3,7	3,7
Solidifikát č. 2 (NO 120114) $w_{opt}=30\%$	4,2	5,3	5



Obrázek 25- Zkušební tělesa pro pevnost v tlaku

Dosažené pevnosti v tlaku prostém obou solidifikátů odpovídají přibližně třídě pevnosti v tlaku prostém pro směsi smíšené popílkem $C_{3/4}$ dle ČSN EN 14227-3. Minimální hodnota pevnosti v tlaku není příslušným technickým návodem stanovena, uvádí se pouze

nutnost provedení zkoušky. Pro srovnání TP 93 ministerstva dopravy vyžaduje minimální třídu pevnosti v tlaku $C_{1,5/2}$ pro využití popílkových stabilizátů pro aktivní zóny, obsypy a zásypy objektů, přechodové oblasti mostů, spodní podkladní/ochranné vrstvy minimální třídu pevnosti v tlaku [17]

Odolnost proti mrazu a vodě ČSN EN 14227-3, NA

Na stanovení odolnosti proti mrazu a vodě byla vyrobena stejná zkušební tělesa jako pro stanovení pevnosti v prostém tlaku. Zkušební tělesa byla vystavena působení deseti zmrazovacích cyklů viz tabulka 47. Zmrazování, rozmrazování vzorků a následná zkouška pevnosti v tlaku prostém probíhaly v souladu s postupem uvedeným ČSN EN 14227-3, NA.

Tabulka 47- Teplota zmrazování a počet cyklů [ČSN EN 14227-3, NA]

Vrstva vozovky	Teplota zmrazování [°C]	Počet cyklů dle navrhovaného indexu mrazu dané oblasti (°C x den)		
		do 350	350 – 600	více než 600
horní podkladní vrstva	-20 ±2	10	13	16
spodní podkladní vrstva	-15 ±2	7	10	13
ochranná vrstva	-10 ±2	5	7	10

Tabulka 48- R_c po ukončení zmrazovacích cyklů

	R_c [MPa]	R_c - po zmrazovacích cyklech [MPa]
Solidifikát č. 1 (NO 160303) $w_{opt}=26\%$	3,7	2,1*
Solidifikát č. 2 (NO 120114) $w_{opt}=30\%$	5,3	3,0

* Průměrná hodnota byla stanovena pouze ze dvou měření, u třetího vzorku došlo působením mrazu a vody k příliš velkému narušení struktury.

Po ukončení cyklování bylo zjištěno poškození zkušebních těles působením mrazu a vody. V jednom případě došlo k narušení struktury zkušební tělesa v celém objemu viz

obrázek 26. Ostatní zkušební tělesa vykazovala pouze menší poškození v místě styku zkušební tělesa s plstěnou podložkou viz obrázek 27. Tato tělesa byla podrobena zkoušení pevnosti v tlaku, výsledky pevnosti v tlaku jsou však v důsledku jejich poškození pouze orientační.

Dosažené pevnosti v tlaku prostém obou solidifikátů odpovídají přibližně třídě pevnosti v tlaku prostém pro směsi stmelené popílkem $C_{1,5/2}$ dle ČSN EN 14227-3. Minimální hodnota pevnosti v tlaku pro stanovení odolnosti proti mrazu a vodě není příslušným technickým návodem stanovena, uvádí se pouze nutnost provedení zkoušky. Pro srovnání TP 93 ministerstva dopravy vyžaduje minimální třídu pevnosti v tlaku při zkoušení odolnosti proti mrazu a vodě $C_{0,8/1}$. Tato pevnostní třída je stanovena jako minimální pro využití popílkových stabilizátů pro aktivní zóny, obsypy a zásypy objektů, přechodové oblasti mostů, spodní podkladní/ochranné vrstvy [17]



Obrázek 26- Zkušební těleso poškozené mrazem a vodou v celém objemu



Obrázek 27- Zkušební těleso poškozené pouze ve styku s plstěnou podložkou

Vodný výluh ČSN EN 12457-4

Vodný výluh z popílku stabilizovaného nebo nestabilizovaného nesmí překročit limitní hodnoty uvedené v ČSN 73 6133 (cl. 4.5.1.2). Pro zkoušku vyluhovatelnosti bylo odebráno 200 g solidifikátu. Vzorky byly odeslány do externí laboratoře Labtech s.r.o. se sídlem v Brně, kde byly podrobeny zkoušení vyluhovatelnosti. Vodný výluh byl připraven dle ČSN EN 12457-4 (charakterizace odpadů – vyluhování). Výsledky v tomto případě nebyly zařazeny do třídy vyluhovatelnosti, ale byly přímo porovnány s limitními hodnotami, které jsou stanoveny v ČSN 73 6133. Výsledky vodného výluhu obou solidifikátů, včetně limitních hodnot, jsou uvedeny v tabulce pod tímto odstavcem.

Tabulka 49- Vyluhovatelnost solidifikátů [Labtech s.r.o.]

Prvek	Koncentrace	Limitní hodnota [ČSN 731633]	Solidifikát č. 1 (160303 - A1)	V/N*	Solidifikát č. 2 (120114 - B2)	V/N*
As	mg/l	0,1	0,032	V	0,0056	V
Ba	mg/l	1	0,141	V	0,086	V
Be	mg/l	0,005	<0,005	V	<0,005	V
Pb	mg/l	0,1	0,001	V	0,001	V
Cd	mg/l	0,005	0,00014	V	0,00011	V
Cr	mg/l	0,1	0,055	V	0,03	V
Co	mg/l	0,1	<0,03	V	<0,03	V
Cu	mg/l	1	0,192	V	0,318	V
Ni	mg/l	0,1	<0,02	V	<0,02	V
Hg	mg/l	0,005	0,0001	V	0,0001	V
Se	mg/l	0,05	0,0068	V	0,006	V
Ag	mg/l	0,1	<0,01	V	<0,01	V
V	mg/l	0,2	0,086	V	<0,01	V
Zn	mg/l	3	<0,02	V	<0,02	V

*V/N- Vyhovuje/Nevyhovuje

V tabulce 49 byly porovnány koncentrace prvků ve vodném výluhu solidifikátů s limitními hodnotami, které stanovuje ČSN 73 6133 pro použití popílků pro stavbu zemního tělesa silničních komunikací. V případě obou solidifikátů došlo ke splnění limitních hodnot koncentrace prvků ve vodném výluhu, provedeného v souladu s ČSN EN 12457-4, které jsou požadovány ČSN 73 6133.

Oxid sírový ČSN EN 196-2

Obsah oxidu sírového se musí stanovit podle EN 196-2 a jeho obsah musí být menší než 4%. [18] Fluidní popílek Poříčí tomuto požadavku nevyhovuje. Obsah oxidu sírového u tohoto popílku je 9,09 % viz tabulka 14. Obsah tohoto popílku znemožňuje použití solidifikátu v rámci technického návodu 09.14.01 - Granulát pro kolejové lože a obslužné komunikace báňských provozů.

Zrnitost ČSN EN 933-1

Zrnitost směsi, stanovená podle EN 933-1, musí splňovat požadavky uvedené v tabulce dvě pro zrnitost směsí stmelých popílkem. [19] Na základě porovnání křivek zrnitosti, které uvádí producenti popílků elektrárny Chvaletice a Poříčí a požadavků uvedených v ČSN EN 14227-3 bylo zjištěno, že popílků používané v této diplomové práci nevyhovují požadavkům této technické normy pro žádnou kategorii zrnitosti. Z tohoto důvodu není možné použití solidifikátů v rámci technického návodu 09.14.02 - Granulát a aditivovaný granulát do výsypek povrchových dolů pro násypy a zásypy při zahlazování důlní činnosti.

5.4.5. Zkoušení dle vyhlášky 294/2005 Sb.

Ekotoxikologické testy

Ekotoxicita – vlastnost odpadu, představující akutní či pozdní nebezpečí pro jednu nebo více složek životního prostředí. Jde o ukazatel využívaný k hodnocení odpadů z hlediska možnosti jejich využití na povrchu terénu dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. a k hodnocení nebezpečné vlastnosti odpadu H14 Ekotoxicita podle vyhlášky č. 376/2001 Sb. [20]

Ekotoxikologické testy provedla akreditovaná zkušební laboratoř Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s. (VUSTAH) v souladu s vyhláškou č. 294/2005 Sb. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulce 50, následuje porovnání s limity stanovenými vyhláškou č. 294/2005 Sb. v tabulce 51.

Tabulka 50- Výsledky ekotoxikologických testů [VUSTAH]

Test ekotoxicity	Parametr	Výsledky ověřovacích testů	
		Solidifikát č. 1 (160303 - A1)	Solidifikát č. 2 (120114 - B2)
Test inhibice růstu sladkovodní řasy	průměrná inhibice/stimulace růstu řasy	16,8%	6,2%
Test inhibice růstu kořene hořčice bílé	průměrná inhibice/stimulace růstu kořene	18,1%	17%
Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby	mortalita ryb za 96 hod	0%	0%
Zkouška inhibice pohyblivosti Daphnia magna Straus	mortalita perlooček za 48 hod	10%	40%

Tabulka 51- Porovnání s požadavkem vyhlášky 294/2005 Sb.

Test ekotoxicity	Požadavek vyhlášky 294/2005 Sb., Tab. 10.2		Solidifikát č. 1 (160303 - A1)	Solidifikát č. 2 (120114 - B2)
	I.	II.		
Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby	nesmí uhynout ani jedna ryba	nesmí uhynout ani jedna ryba	vyhovuje pro sloupec I i II	vyhovuje pro sloupec I i II
Zkouška inhibice pohyblivosti Daphnia magna Straus	procento mortality perlooček MAX 30 %	procento mortality perlooček MAX 30 %	vyhovuje pro sloupec I i II	nevyhovuje pro sloupec I ani II
Test inhibice růstu sladkovodní řasy	inhibice růstu řasy MAX 30 %	inhibice nebo stimulace růstu řasy MAX 30 %	vyhovuje pro sloupec I i II	vyhovuje pro sloupec I i II
Test inhibice růstu kořene hořčice bílé	inhibice růstu kořene semene MAX 30 %	inhibice nebo stimulace růstu kořene semene MAX 30 %	vyhovuje pro sloupec I i II	vyhovuje pro sloupec I i II

Solidifikát z NO 160303 vyhověl požadavkům na výsledky ekotoxikologických testů, které jsou stanoveny vyhláškou 294/2005 Sb. v příloze č. 10. V případě druhého solidifikátu, který obsahuje NO 120114 došlo k překročení limitů stanovených vyhláškou u jednoho ze čtyř ekotoxikologických testů. Jedná se o test inhibice pohyblivosti perlooček, vyhláška stanovuje jako limitní hodnotu mortality perlooček max. 30%. V ověřovacím testu tohoto solidifikátu byla zjištěna mortalita perlooček 40%. Tento solidifikát, překročil mezní hodnotu stanovenou vyhláškou pro výsledky tohoto ekotoxikologického testu o 10%.

Zhodnocení provedených zkoušek

Z výše uvedených výsledků zkoušek vyplývá, že obě solidifikační receptury splnily limitní hodnoty pro využití solidifikátudle technického návodu 09.13.01 – Zpevněný zásypový materiál. Využití v rámci zbylých dvou technických návodů není možné z důvodu nesplnění některých limitních hodnot, které jsou stanoveny po použití popílků v rámci těchto technických návodů. Jedná se o vysoký obsah oxidu sírového ve fluidním popílku a nevhodné granulometrii popílků, která není v souladu s požadavkem na zrnitost popílků dle ČSN EN 14227-3 čl. 6.3.2. Výsledky provedených zkoušek nám dále podávají užitečné informace o fyzikálně mechanických vlastnostech a trvanlivosti solidifikátů, které bude nutné vzít v úvahu při případném výběru konkrétní lokality využití solidifikátů ať už v rámci technického návodu 09.13.01 – Zpevněný zásypový materiál nebo pro jiné využití odpadu na povrchu terénu.

Dalším krokem bylo provedení testů ekotoxicity, kde u výsledků testu u jednoho ze čtyř testovacích organismů u solidifikátu č. 2 došlo k překročení limitních hodnot daných vyhláškou č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Jedná se o test inhibice pohyblivosti perlooček, vyhláška stanovuje jako limitní hodnotu mortality perlooček max. 30%. V případě solidifikátu č. 2 byla zjištěna v ověřovacím testu mortalita perlooček 40%. Tento solidifikát, překročil mezní hodnotu stanovenou vyhláškou pro výsledky tohoto ekotoxikologického testu o 10%. Druhý solidifikát vyhověl limitům stanoveným vyhláškou na výsledky ekotoxicity ve všech stanoveních a splnil tedy jednu ze základních podmínek stanovenou vyhláškou č. 294/2005 Sb. pro využití odpadu na povrchu terénu.

5.4.6. Poloprovozní ověření

Na základě výsledků vyluhovatelnosti, pevnosti v tlaku prostém, produkce NO a ceny receptur byly vybrány dva solidifikáty jejichž receptury jsou uvedeny v tabulce 40. tyto solidifikáty byly zkoušeny v rámci nařízení vlády 163/2002 Sb, následně byly podrobeny testům ekotoxicity v souladu s vyhláškou 294/2005 Sb.. V této kapitole budou vybrané solidifikáty podrobeny poloprovoznímu ověření.

Cílem této etapy je zjistit možná úskalí homogenizace směsi ve větším objemu a prověřit možnost finální úpravy solidifikátu granulací na sbalkovacím talíři. Takto vytvořené umělé kamenivo by mohlo najít využití jako lehké kamenivo do betonu. Na vyrobeném umělém kamenivu bude provedena zkouška pevnosti v tlaku ve válci jako alternativa k pevnosti v tlaku prostém pro kamenivo.



Obrázek 28- Schéma výrobního cyklu

Míchání probíhalo pomocí míchačky s nuceným oběhem, která prokázala dostatečný výkon pro homogenizaci směsi. Vlhkost směsi byl volena s ohledem na možnost granulace. s využitím praktických zkušeností personálu byl přídavek vody zvolen 18% pro solidifikát č. 1 a 20% pro solidifikát č. 2. Jedná se o podíl hmotnosti vody a hmotnosti všech složek s výjimkou NO vyjádřený v procentech. V případě potřeby je možno dopočítat celkový obsah vlhkosti směsi z hodnot ztráty sušením při 105 °C nebezpečného odpadu viz tabulka 8. Část vody byla dávkována do míchačky, část byla přidávána přímo na sbalkovací talíř z důvodu lepší tvorby sbalků. Po dokončení sbalkování byla vytříděna frakce kameniva zrna 8 – 16 mm. Kamenivo zráló 28 dní za laboratorních podmínek.



Obrázek 29- Sbalky NO 160303



Obrázek 30- Sbalky NO 120114

Pro zkoušku pevnosti v tlaku byla vytříděna úzká frakce kameniva 8-16 mm. Zkoušení pevnosti v tlaku probíhalo v souladu se zkušebním postupem uvedeným v kapitole 2.3. Specifikace prováděných zkoušek. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 52.



Obrázek 31- Přípravek pro zkoušení pevnosti v tlaku ve válci



Obrázek 32- Vzorek kameniva připravený pro zkoušku

Tabulka 52- Pevnost v tlaku ve válci

	R_c [MPa]	Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m ³]*
Solidifikát č. 1 (NO 160303) kamenivo frakce 8-16mm	0,61	750
Solidifikát č. 2 (NO 120114) kamenivo frakce 8-16mm	2,21	720
* Orientační hodnota stanovená na vysušeném kamenivu při 105°C v nádobě o objemu 1,5 l. Výsledek je průměr ze tří měření zaokrouhlený na desítky.		

V rámci poloprovozního ověření bylo zjištěno, že homogenizace směsi ve větším objemu pomocí lopatkového mísiče s nuceným oběhem je možná. Došlo k dostatečné homogenizaci směsi a k homogennímu rozpětelní NO v celém objemu. Finální úprava solidifikátu sbalkováním se také prokázala jako úspěšná viz obrázek 29 a 30. Výsledky pevnosti v tlaku ve válci charakterizují základní mechanické vlastnosti vytvořeného umělého kameniva. Použití takto vytvořeného umělého kameniva do betonu mají však svá úskalí, mezi které patří zejména vysoký obsah oxidu sírového, který obsahuje použitý fluidní popílek. Z tohoto důvodu se jeví jako lepší varianta využití solidifikátu bez použití finální úpravy sbalkováním jako zpevněný zásypový materiál.

5.4.7. Závěr ETAPY IV

V této etapě bylo provedeno vlastní prověření účinnosti solidifikačních receptur. Zkoušení proběhlo v souladu s metodikou vytvořenou v Etapě III- Metodika zkoušení solidifikátu.

V závěrečné etapě byly dle navržené metodiky zkoušení solidifikáty nejdříve podrobeny zkoušení pevnosti v tlaku prostém a stanovení obsahu kontaminantů ve vodném výluhu, což byly zkoušky spadající do základní fáze ověření účinnosti navržených solidifikačních surovin. Z důvodů pomalejšího nárůstu pevností solidifikátů byla pevnost v tlaku prostém zkoušena nejen po 28 ale i po 60 dnech, kdy bylo zjištěno, že pevnost solidifikátu ještě

rostla. Na základě výsledků provedených zkoušek bylo zjištěno, že pevnost v tlaku prostém korespondovala s množstvím přidaného cementu. Se zvyšujícím se podílem cementu rostla i tlaková pevnost u většiny vytvořených solidifikátů. Výsledky vyluhovatelnosti prokázaly, že navržené solidifikační receptury projevily vysokou účinnost při solidifikaci sledovaných kontaminantů Cd, Ni, Zn, Cu, Cr a Mo. Koncentrace těchto kovů ve vodném výluhu byla snížena až na tisícínové hodnoty oproti vyluhovatelnosti původního NO. Stejně tak je tomu v případě polokovů As, Sb a solí halogen-vodíkových kyselin. Naopak v případě síranů a rozpuštěného organického uhlíku nedošlo k dostatečnému snížení koncentrace, které by umožnilo zařazení do první výluhové třídy. Zjištěná koncentrace rozpuštěného organického uhlíku ve vodném výluhu nedovolila zařazení ani do třetí výluhové třídy dle vyhlášky 294/2005 Sb.

Pomocí optimalizačního výpočtu dle zvolených kritérií byly následně vybrány dvě nejlepší solidifikační receptury. Na těchto vybraných solidifikátech byla zkoušena ekotoxická v souladu s vyhláškou 294/2005 Sb.. Solidifikát č. 1 (NO 160303) splnil všechny podmínky stanovené vyhláškou na výsledky všech ekotoxikologických testů. U solidifikátu č. 2 došlo k překročení limitních hodnot oproti vyhlášce 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Jedná se o test inhibice pohyblivosti perlooček, vyhláška stanovuje jako limitní hodnotu mortality perlooček max. 30%. V případě solidifikátu č. 2 byla zjištěna v ověřovacím testu mortalita perlooček 40%. Tento solidifikát překročil mezní hodnotu stanovenou vyhláškou pro výsledky tohoto ekotoxikologického testu o 10%. Z výše uvedeného vyplývá, že solidifikát č. 1 splnil limity stanovené vyhláškou 294/2005 Sb. na výsledky testů ekotoxicity pro použití odpadu na povrchu terénu. U výsledků druhého solidifikátu došlo k překročení limitních hodnot a není ho tedy možné, bez případné modifikace receptury a opětovného provedení testů ekotoxicity, použít na povrchu terénu.

U vybraných solidifikátů byly také zkoušeny některé fyzikálně mechanické vlastnosti v rámci vybraných technických návodů. Oba vybrané solidifikáty splnily limitní hodnoty stanovené technickým návodem 09.13.01 – Zpevněný zásypový materiál. Využití v rámci zbylých dvou technických návodů není možné z důvodu nesplnění některých limitních hodnot, které jsou stanoveny po použití popílků v rámci těchto technických návodů. Jedná se o vysoký obsah oxidu sírového ve fluidním popílku a nevhodné granulometrii popílků, která není v souladu s požadavkem na zrnitost popílků dle ČSN EN 14227-3 čl. 6.3.2.

V posledním kroku ověřování účinnosti solidifikačních surovin vzhledem k jejich budoucímu využití byly solidifikáty podrobeny poloprovoznímu prověření. Pomocí poloprovozního ověření bylo zjištěno, že homogenizace většího objemu směsi pomocí lopatkového mísiče se jeví jako možná a výhodná. Došlo k dostatečné homogenizaci směsi a k homogennímu rozpýtliví NO v celém objemu. V rámci této etapy byla také zkoušena možná finální úprava solidifikátu sbalkováním. Takto vytvořené umělé kamenivo by mohlo najít využití jako lehké kamenivo do betonu. Mechanické vlastnosti sbalků byly ověřeny provedením zkoušky pevnosti v tlaku ve válci po 28 denním zrání. V případě solidifikátu č. 2 (120114) byla zjištěna hodnota pevnosti v tlaku 2,21 MPa což odpovídá přibližně pevnosti ve válci keramzitu se sypanou hmotností 300-350 kg/m³. Použití takto vytvořeného umělého kameniva do betonu má však svá úskalí, mezi která patří zejména vysoký obsah oxidu sírového, který obsahuje použitý fluidní popílek. Z tohoto důvodu se jeví jako lepší varianta využití solidifikátu bez použití finální úpravy sbalkováním jako zpevněný zásypový materiál.

6. Závěr

Tato práce má prozkoumat možnosti transformace NO v nové materiály, které mají najít využití ve stavebnictví, proto měla být použita technologie S/S především dostupná, levná, technologicky jednoduchá a použitelná na širší spektrum průmyslově hojně produkovaných odpadů. Cílem první etapy proto bylo vybrat takovou technologii solidifikace, která nejlépe vyhovuje těmto kritériím. Na základě poznatků o solidifikaci odpadů z teoretické části byla v této etapě vybrána technologie cementace s částečným nahrazením cementu VEP popř. druhotnými surovinami za účelem zlepšení finálních vlastností solidifikátu či snížení nákladů na jeho výrobu. V závislosti na výběru technologie solidifikace a na základě dalších technologických, ekonomických a ekologických kritérií bylo vybráno šest různých druhů nebezpečných odpadů. Původcem těchto odpadů jsou společnosti Karsit Holding, s.r.o. a ESAB Vamberk, s.r.o. Jedná se o různé druhy kalů a filtračních koláčů vznikajících v různých fázích procesu pokovování a jiných technologických úprav kovů. Vybrané vstupní suroviny byly v druhé části této etapy podrobeny identifikaci důležitých vlastností jako je vyluhovatelnost dle vyhlášky č. 294/2005 Sb., chemické či mineralogické složení atd.

V druhé etapě byly z vybraných vstupních surovin sestaveny solidifikační receptury. Navržené receptury je možné rozdělit na základní receptury a na receptury neutralizační, které byly použity k solidifikaci odpadů s velmi nízkým pH. Celkem bylo vytvořeno 39 solidifikačních receptur.

Následující etapa byla věnována návrhu metodiky zkoušení účinnosti navržených solidifikačních receptur. Vytvořená metodika se skládá z několika stupňů prověření solidifikátů. Nejdříve byly solidifikáty podrobeny základnímu zkoušení úspěšnosti solidifikačních receptur, v rámci kterého byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku prostém a stanovení obsahu polutantů ve vodném výluhu, který byl proveden v souladu s vyhláškou č. 294/2005 Sb. V dalším kroku, na základě výsledků těchto zkoušek a dalších vybraných kritérií, byly pomocí optimalizačního výpočtu vybrány nejúspěšnější solidifikační receptury. Tyto vybrané receptury byly dále podrobeny testům ekotoxicity dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. Zároveň byly prověřeny také vybrané fyzikálně mechanické vlastnosti dle vybraných technických návodů, příslušející vybraným budoucím aplikacím solidifikátu. Byly

vybrány takové budoucí aplikace solidifikátu, u kterých je splnění limitních hodnot, jež stanovují příslušné technické návody, teoreticky možné. Jedná se o využití solidifikátu jako zpevněného zásypového materiálu, granulátu pro kolejové lože a obslužné komunikace báňských provozů, granulátu a aditivovaného granulátu do výsypek povrchových dolů pro násypy a zásypy při zahlazování důlní činnosti.

V závěrečné etapě byly dle navržené metodiky zkoušení solidifikáty nejdříve podrobeny zkoušení pevnosti v tlaku prostém a obsahu kontaminantů ve vodném výluhu, což byly zkoušky spadající do základní fáze ověření účinnosti navržených solidifikačních surovin. Z důvodů pomalejšího nárůstu pevností solidifikátů byla pevnost v tlaku prostém zkoušena nejen po 28 ale i po 60 dnech. Na základě výsledků provedených zkoušek bylo zjištěno, že pevnost v tlaku prostém korespondovala s množstvím přidaného cementu. Se zvyšujícím se podílem cementu rostla i tlaková pevnost u většiny vytvořených solidifikátů. Výsledky vyluhovatelnosti prokázaly, že navržené solidifikační receptury projevíly vysokou účinnost při solidifikaci sledovaných kontaminantů Cd, Ni, Zn, Cu, Cr a Mo. Koncentrace těchto kovů ve vodném výluhu byla snížena až na tisícinové hodnoty oproti vyluhovatelnosti původního NO. Stejně tak je tomu v případě polokovů As, Sb a solí halogen-vodíkových kyselin. Naopak v případě síranů a rozpuštěného organického uhlíku nedošlo k dostatečnému snížení koncentrace, které by umožnilo zařazení do první vyluhové třídy. Zjištěná koncentrace rozpuštěného organického uhlíku ve vodném výluhu nedovolila zařazení ani do třetí vyluhové třídy dle vyhlášky č. 294/2005 Sb.

Pomocí optimalizačního výpočtu dle zvolených kritérií byly následně vybrány dvě nejlepší solidifikační receptury. Na těchto vybraných solidifikátech byla zkoušena ekotoxicita v souladu s vyhláškou č. 294/2005 Sb.. Solidifikát č. 1 (NO 160303) splnil všechny podmínky stanovené vyhláškou na výsledky všech ekotoxikologických testů. U solidifikátu č. 2 došlo k překročení limitních hodnot oproti vyhlášce č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Jedná se o test inhibice pohyblivosti perlooček, vyhláška stanovuje jako limitní hodnotu mortality perlooček max. 30%. V případě solidifikátu č. 2 byla zjištěna v ověřovacím testu mortalita perlooček 40%. Tento solidifikát překročil mezní hodnotu stanovenou vyhláškou pro výsledky tohoto ekotoxikologického testu o 10%. Z výše uvedeného vyplývá, že solidifikát č. 1 splnil limity stanovené vyhláškou č. 294/2005 Sb. na výsledky testů ekotoxicity pro použití odpadu na povrchu terénu. U výsledků druhého solidifikátu došlo k překročení limitních a

není ho tedy možné, bez případné modifikace receptury a opětovného provedení testů ekotoxicity, použít na povrchu terénu.

U vybraných solidifikátů byly také zkoušeny některé fyzikálně mechanické vlastnosti v rámci vybraných technických návodů. Oba vybrané solidifikáty splnily limitní hodnoty stanovené technickým návodem 09.13.01 – Zpevněný zásypový materiál. Využití v rámci zbylých dvou technických návodů není možné z důvodu nesplnění některých limitních hodnot, které jsou stanoveny po použití popílků v rámci těchto technických návodů. Jedná se o vysoký obsah oxidu sírového ve fluidním popílků a nevhodné granulometrii popílků, která není v souladu s požadavkem na zrnitost popílků dle ČSN EN 14227-3 čl. 6.3.2.

V poslední etapě ověřování účinnosti solidifikačních surovin vzhledem k jejich budoucímu využití byly solidifikáty podrobeny poloprovoznímu prověření. Pomocí poloprovozního ověření bylo zjištěno, že homogenizace většího objemu směsi pomocí lopatkového míšiče se jeví možná. Došlo k dostatečné homogenizaci směsi a k homogennímu rozpytlí NO v celém objemu. V rámci této kapitoly byla také zkoušena možná finální úprava solidifikátu sbalkováním. Takto vytvořené umělé kamenivo by mohlo najít využití jako lehké kamenivo do betonu. Mechanické vlastnosti sbalků byly ověřeny provedením zkoušky pevnosti v tlaku ve válci po 28 denním zrání. V případě solidifikátu č. 2 (120114) byla zjištěna hodnota pevnosti v tlaku 2,21 MPa což odpovídá přibližně pevnosti ve válci keramzitu se sypanou hmotností 300-350 kg/m³. Použití takto vytvořeného umělého kameniva do betonu má však své problémy, mezi které patří zejména vysoký obsah oxidu sírového, který obsahuje použitý fluidní popílek. Z tohoto důvodu se jeví jako lepší varianta využití solidifikátu bez použití finální úpravy sbalkováním jako zpevněný zásypový materiál.

Závěrem lze říci, že oba solidifikáty vyhověly podmínkám stanoveným technickým návodem 09.13.01 – Zpevněný zásypový materiál. Solidifikát č. 1 (160303) také splnil podmínky na výsledky ekotoxikologických testů, které stanovuje vyhláška č. 294/2005 Sb. Splnil tedy jednu z hlavních podmínek pro využití na povrchu terénu. Aby bylo možné solidifikát č. 1, který obsahuje NO 160303 opravdu využít na povrchu terénu jako zásypový materiál, je nutné splnění limitních hodnot pro obsah škodlivin v sušině, které stanovuje vyhláška č. 294/2005 Sb. Z časových důvodu bude stanovení obsahu škodlivin v sušině provedeno v rámci řešení projektu FR-TI2/341 „Vývoj progresivní solidifikační

technologie pro transformaci nebezpečných odpadů v nové materiály“, v jehož součinnosti tato diplomová práce vznikla, až v roce 2013. .

7. Přílohy

Obsah vody všech solidifikátů vytvořených pro základní zkoušení

Označení	Složení [%]		A1 - 160303		B2 - 120104		H - 110109	
			Vodní součinitel* [%]	Vlhkost po 60 dnech** [%]	Vodní součinitel* [%]	Vlhkost po 60 dnech** [%]	Vodní součinitel* [%]	Vlhkost po 60 dnech** [%]
A	NO	30	46	24	47	23	41	20
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	10						
B	NO	30	46	30	46	29	41	21
	KP	30						
	FP	25						
	CEM	15						
C	NO	30	47	28	47	28	41	19
	KP	30						
	FP	20						
	CEM	20						
F	NO	30	47	21	41	28	41	15
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	5						
	CaO	15						
E	NO	30	47	24	41	28	41	15
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	15						
	CaO	5						
D	NO	30	43	31	41	30	41	18
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	10						
	CaO	5						
I	NO	30	46	33	41	32	41	20
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	5						
	Sádra	15						
G	NO	30	44	30	48	29	41	21
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	10						
	Sádra	10						
H	NO	30	44	28	48	28	41	16
	KP	30						
	FP	30						
	CEM	15						
	Sádra	5						

* podíl hmotnosti přidané vody/hmotnost všech složek kromě NO v %

** ztráta sušením při 105 °C v %, stanovená po 60 dnech zrání za laboratorního tlaku a teploty

Označení	Složení [%]		A2 - 160303		B1 - 120104	
			Vodní součinitel* [%]	Vlhkost po 60 dnech** [%]	Vodní součinitel* [%]	Vlhkost po 60 dnech** [%]
L	NO	30	46	21	41	28
	KP	30				
	FP	27				
	CEM	10				
	CaO	3				
K	NO	30	46	24	41	28
	KP	30				
	FP	22				
	CEM	15				
	CaO	3				
J	NO	30	46	27	41	28
	KP	30				
	FP	17				
	CEM	20				
	CaO	3				
F	NO	30	46	31	41	28
	KP	30				
	FP	20				
	CEM	5				
	CaO	15				
E	NO	30	46	34	41	28
	KP	30				
	FP	20				
	CEM	10				
	CaO	10				
D	NO	30	46	37	41	28
	KP	30				
	FP	20				
	CEM	15				
	CaO	5				
* podíl hmotnosti přidané vody/hmotnost všech složek kromě NO v %						
** ztráta sušením při 105 °C v %, stanovená po 60 dnech zrání za laboratorního tlaku a teploty						

8. Citovaná literatura

1. **Kafka Z., Punčochářová J.** *Využití procesu solidifikace/stabilizace při zneškodňování nebezpečných složek v průmyslových odpadech.* Praha : VŠCHT, 2000.
2. **Čížek Z.** *Nebezpečné odpady. Problematika jejich úpravy.* Odpadové fórum č. 10 (2003), str. 24 – 26. [Online - Citováno: 31. 12 2012.], Dostupné na internetu: <http://bozpinfo.cz/knihovna-bozpcitarna/clanky/zivotni_prostredi/odpady_nebezpecne031030.html>
3. *Zákon o odpadech 185/2001 Sb.*
4. *Vyhláška 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu.*
5. *Rozšířené teze rozvoje odpadového hospodářství v ČR.* Ministerstvo životního prostředí ČR 2010.
6. **Bína T.** *Vývoj nového progresivního solidifikátu z nebezpečného odpadu.* Bakalářská práce, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2010.
7. **Slavík H.** *Solidifikace odpadů.* Ostrava : VŠB, Technická univerzita Ostrava, 2009.
8. **Roger D. Spence, Caijun Shi.** *Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed waste.* Boca Raton, FL 33431 : CRC PRESS, 2005. 1-56670-444-8.
9. **Exnar P.** *Vitrifikace.* [Online - Citováno: 30. 9 2012.] Glassrevue 6/2001, Dostupné na internetu: <<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=178&cid=6.html>>
10. Česká rozvojová agentura o.p.s.. *Chemická podstata hmoty.* [Online – Citováno: 30.9.12], Dostupné na internetu : <<http://www.claypolymers.com/cz/clay-polymer/podstata-hmoty.html>>
11. ČSN EN 13286-47 - *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání.* 2007.

-
12. ČSN EN 13286-2 - *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška*. 2011.
13. **Cikrle, Ambrosová, Havlíková.** *Zkoušení stavebních Materiálů. Laboratorní cvičení*. VUT v Brně : AN CERM, 1997.
14. **Cranell, B.S., Eighmy, T., Ktrzanowski, J.E., Eusdem, J.D., Shaw, E.L., Francis, C.A.** *Heavy metal stabilization in municipal solid waste combustion bottom ash using soluble phosphate*, *Waste Manage.* 20 (2000), str. 135–148.
15. **Hills, C.D., Pollard, S.J.T.** , *Influence of interferences effect on the mechanical, microstructural and fixation characteristics of cement-solidified hazardous waste forms*. *J. Hazard. Mater.* 52 (1997), str. 171–191.
16. **Bednařík V., Vondruška M.** *Stabilizace/solidifikace nebezpečných odpadů pomocí popílku z fluidního spalování*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně : Fakulta technologická, 2002.
17. TP 93 MDS ČR - *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popelů a popílků*. 2011.
18. ČSN EN 14227-4 - *Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 4: Popílky pro směsi stmelené hydraulickými pojivy*. 2008.
19. ČSN EN 14227-3 - *Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 3: Směsi stmelené popílky*. 2008.
20. *Metodický pokyn odboru odpadů pro stanovení ekotoxicity*. 2/2007. Ministerstvo životního prostředí ČR 2007.
21. ČSN 73 6133 - *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. 2010.
22. ČSN EN 13286-50 - *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 50: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu*.
23. ČSN EN 196-2 - *Metody zkoušení cementu - část 2: Chemický rozbor cementu*. 2005.

9. Seznamy

9.1. Seznam zkratk

NAVFAC - Naval facilities engineering command

EPA - United states enviromental protection agency

S/S - solidifikace/stabilizace

NO - nebezpeční odpad

VEP - vedlejší energetický produkt

CBR - California bearing ratio

EPO - elektrárna Poříčí

ECHV - elektrárna Chvaletice

KP - klasický popílek Chvaletice

FP - fluidní popílek Poříčí

CEM - CEM II B-M (S-LL)

DOC - rozpuštěný organický uhlík

STO - stavebně technické osvědčení

TZÚS - Technický a zkušební ústav Praha

RL - rozpuštěné látky

PKO - Ústav pozemních komunikací

VUSTAH - Výzkumný ústav stavebních hmot

9.2. Seznam tabulek

Tabulka 1- Způsoby využívání odpadů [zákon č.185/2001 Sb.].....	6
Tabulka 2- Způsoby odstraňování odpadů [zákon č.185/2001 Sb].....	7
Tabulka 3- Teploty zmrazování a počet cyklů [ČSN EN 14227-3,NA]	19
Tabulka 4- Vybrané nebezpečné odpady od ESAB VAMBERK, s.r.o.	27
Tabulka 5- Vybrané nebezpečné odpady od Karsit Holding, s.r.o.....	27
Tabulka 6- Třídy vyluhovatelnosti [vyhláška 294/2005 Sb.].....	29
Tabulka 7- Vyluhovatelnost vybraných odpadů [Labtech s.r.o.]	29
Tabulka 8- Chemické složení [technický list výrobce]	31
Tabulka 9- Vybrané technické parametry [technický list výrobce]	31
Tabulka 10- Vybrané technické parametry [technický list výrobce]	32
Tabulka 11- Vybrané technické parametry [technický list výrobce]	33
Tabulka 12- Chemické složení klasického popílku [ECHV]	33
Tabulka 13- Sítový rozbor [ECHV]	34
Tabulka 14- Chemické složení fluidního popílku [EPO]	35
Tabulka 15- Sítový rozbor [EPO].....	35
Tabulka 16- Vyluhovatelnost použitých pojiv [Labtech s.r.o.].....	36
Tabulka 17- Základní solidifikační receptury	39
Tabulka 18- pH po přidavku 3% Cao v čase	40
Tabulka 19- Neutralizační solidifikační receptury	40
Tabulka 20- Hodnoty poměru CaO/SiO ₂ jednotlivých receptur	41
Tabulka 21- Kritéria optimalizačního výpočtu.....	44
Tabulka 22- Vybrané budoucí aplikace solidifikátu [TZÚS].....	45
Tabulka 23- Základní požadavky a vymezení posuzovaných vlastností [TZÚS]	45
Tabulka 24- Podklady pro zpracování STO [TZÚS].....	45
Tabulka 25- Základní požadavky a vymezení posuzovaných vlastností [TZÚS]	45
Tabulka 26- Podklady pro zpracování STO [TZÚS].....	45
Tabulka 27- Základní požadavky a vymezení posuzovaných vlastností [TZÚS]	46
Tabulka 28- Podklady pro zpracování STO [TZÚS].....	46
Tabulka 29- Zkoušky, u kterých je vymezení sledovaných vlastností specifikováno.....	46
Tabulka 30- Pevnost v tlaku základních receptur.....	51
Tabulka 31- Pevnost v tlaku neutralizačních receptur.....	53

Tabulka 32- Vyluhovatelnost solidifikátů - NO 160303 (A1) [Labtech s.r.o.].....	55
Tabulka 33- Vyluhovatelnost solidifikátů – NO 120114 (B2) [Labtech s.r.o.].....	57
Tabulka 34- Vyluhovatelnost solidifikátů - NO 110109 (H) [Labtech s.r.o.].....	59
Tabulka 35- Vyluhovatelnost solidifikátů - NO 120114 (B1); NO 160303 (A2) [Labtech s.r.o.].....	61
Tabulka 36- Zvolená kritéria	65
Tabulka 37- Saatyho matice	65
Tabulka 38-Vstupní hodnoty pro optimalizační výpočet	66
Tabulka 39- Výstup optimalizačního výpočtu.....	67
Tabulka 40- Nejúspěšnější solidifikáty	69
Tabulka 41- Solidifikát č. 1 (NO 160303).....	71
Tabulka 42- Solidifikát č. 2 (NO 120114).....	71
Tabulka 43- Maximální suchá objemová hmotnost.	73
Tabulka 44- Odečtené síly při daných penetracích	74
Tabulka 45- Výpočet a výsledky CBR.....	74
Tabulka 46- Pevnost v tlaku	75
Tabulka 47- Teplota zmrazování a počet cyklů [ČSN EN 14227-3, NA].....	76
Tabulka 48- R_c po ukončení zmrazovacích cyklů	76
Tabulka 49- Vyluhovatelnost solidifikátů [Labtech s.r.o.].....	78
Tabulka 50- Výsledky ekotoxikologických testů [VUSTAH]	80
Tabulka 51- Porovnání s požadavkem vyhlášky 294/2005 Sb.....	80
Tabulka 52- Pevnost v tlaku ve válci.....	84

9.3. Seznam grafů

Graf 1- Síťový rozbor [ECHV]	34
Graf 2- Křivka zrnitosti [EPO]	36
Graf 3- Pevnost v tlaku základních receptur po 28 dnech.....	52
Graf 4- Pevnost v tlaku základních receptur po 60 dnech.....	52
Graf 5- Pevnost v tlaku neutralizačních receptur po 28 dnech.....	54
Graf 6- Pevnost v tlaku neutralizačních receptur po 60 dnech.....	54
Graf 7- Rozpuštěné látky NO 160303 (A1).....	56
Graf 8- Rozpuštěné látky NO 120114 (B2).....	58
Graf 9- Rozpuštěné látky NO 110109 (H).....	60

Graf 10- Rozpuštěné láky NO 120114 (B1)	62
Graf 11- Procentuální vhodnost jednotlivých solidifikátů	68
Graf 12- Suchá objemová hmotnost- solidifikát č. 1(NO 160303)	71
Graf 13-Suchá objemová hmotnost- solidifikát č. 2(NO 120114)	72
Graf 14- Stanovení CBR.....	73

9.4. Seznam obrázků

Obrázek 1-Schéma metody in situ, [NAVFAC].....	11
Obrázek 2- Solidifikovaná zemina, [EPA]	12
Obrázek 3 - Solidifikační linka MSL-15 [IVM, spol. s.r.o.]	12
Obrázek 4 - Stabilní solidifikační linka [SITA]	13
Obrázek 5-Brachydanio rerio	21
Obrázek 6- Daphnia magna Straus	21
Obrázek 7- Scenedesmus subspicatus	21
Obrázek 8- Sinapsis Alba	21
Obrázek 9-ETAPA I - Volba vstupních surovin	23
Obrázek 10-ETAPA II – Návrh S/S receptur	24
Obrázek 11-ETAPA III – Návrh metodiky zkoušení solidifikátu	24
Obrázek 12-ETAPA IV- Prověření solidifikačních receptur	25
Obrázek 13- Vybrané nebezpečné odpady A1, A2- ESAB VAMBERK, s.r.o.	27
Obrázek 14- Vybrané nebezpečné odpady B1, B2- ESAB VAMBERK, s.r.o.	28
Obrázek 15- Vybrané nebezpečné odpady H,G od Karsit holding, s.r.o.	28
Obrázek 16- Metodika zkoušení solidifikátu.....	42
Obrázek 17- Solidifikát z NO A1	48
Obrázek 20- Solidifikát z NO B1	49
Obrázek 16- Metodika zkoušení solidifikátu.....	42
Obrázek 17- Solidifikát z NO A1	48
Obrázek 20- Solidifikát z NO B1	49
Obrázek 23- Solidifikát z NO 110109 (H) bez přídavku plastifikátoru	50
Obrázek 24- Použitý Proctorův moždír a pých, oba typu A.....	72
Obrázek 25- Zkušební tělesa pro pevnost v tlaku.....	75
Obrázek 26- Zkušební těleso poškozené mrazem v celém objemu.....	77
Obrázek 27- Zkušební těleso poškozené mrazem pouze ve styku s podložkou	77

Obrázek 28- Schéma výrobního cyklu	82
Obrázek 29- Sbalky NO 160303	83
Obrázek 30- Sbalky NO 120114	83
Obrázek 31- Přípravek pro zkoušení pevnosti v tlaku.....	83
Obrázek 32- Vzorek kameniva připravený pro zkoušku	83

9.5. Seznam rovnic

Rovnice 1- $CBR = \frac{p}{p_s} \times 100$ [%]	18
Rovnice 2- $R_c = \frac{F}{A_c}$ [MPa]	18
Rovnice 3- $\rho = (m_2 - m_1) * \frac{1000}{V}$ [kg/m ³]	189
Rovnice 4- $\rho_d = (100 * \rho) - (100 + w)$ [kg/m ³]	20
Rovnice 5- $R_c = \frac{F}{A_c}$ [MPa]	202
Rovnice 6- $R_i = \frac{S_{ti}}{n}$	64
Rovnice 7- $f_i = \frac{R_i}{\sum R_i}$	64
Rovnice 8- $MAXb_{ij} = \frac{a_{ij} - MINa_{ij}}{MAXa_{ij} - MINa_{ij}}$	64
Rovnice 9- $MINb_{ij} = \frac{MAXa_{ij} - a_{ij}}{MAXa_{ij} - MINa_{ij}}$	64