
V1.A.2.1 - Výzkumná zpráva o možnostech snížení nebezpečných látek ve stavebních materiálech

Zpracovali:

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc. MBA, dr.h.c.
Ing. Vít Černý, Ph.D.
Ing. Jakub Hodul, Ph.D.
Ing. Lenka Mészárosová, Ph.D.
Ing. Petr Figala

V Brně dne: 15.12.2022

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život.**

Obsah

1	Možnosti a kritéria pro využití odpadu ve stavebních materiálech	4
1.1	Náhrada přírodního kameniva.....	4
1.1.1	Kamenivo do betonu.....	4
1.1.2	Kamenivo do malt.....	6
1.1.3	Kamenivo pro stmelené směsi.....	7
1.1.4	Kamenivo pro nestmelené směsi.....	8
1.2	Náhrada přírodního kameniva – sypané hráze	9
1.2.1	Filtry	9
1.2.2	Těsnění.....	9
1.2.3	Stabilizační část.....	10
1.2.4	Vhodnost jednotlivých zemin pro vyhotovení jednotlivých zón hráze	10
1.3	Pórovitá kameniva	11
1.3.1	Spékané průmyslové odpady	11
1.3.2	Keramzit	11
1.4	Aktivní složky do cementových kompozitů.....	12
1.4.1	Popílek	12
1.4.2	Struska	12
1.5	Výroba cementu	13
1.5.1	Portlandský slínek	13
1.5.2	Struska do cementu	13
1.5.3	Popílek do cementu	13
1.5.4	Vápenec	14
1.6	Vápnó.....	14
1.7	Sádra a výrobky na bázi sádry	15
1.7.1	Sádra	15
1.8	Složky pórobetonu	16
1.8.1	Popílek do pórobetonu	16
1.8.2	Vápnó do pórobetonu	17
1.9	Suroviny pro přípravu keramiky.....	17
1.9.1	Cihlářské zeminy	17
1.9.2	Jílové zeminy	19
2	Experimentální ověření solidifikace nebezpečných odpadů	20

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

2.1	<i>Vhodné možnosti využití solidifikátu vyplývající z TN v ČR.....</i>	20
2.2	<i>Další možnosti využití solidifikátů v ČR</i>	22
2.2.1	Výplňový a rekultivační materiál při řešení starých ekologických zátěží	22
2.2.2	Technologický a rekultivační materiál na skládkách a odkalištích	22
2.2.3	Stavební materiál při běžných zemních pracích	22
2.3	<i>Výběr nejvhodnějšího využití solidifikátu na základě provedené rešerše a doposud získaných poznatků z oblasti S/S.....</i>	23
2.4	<i>Postupy zkoušení vlastností solidifikátu vyplývající z TN a rešerší.....</i>	23
2.5	<i>Volba a identifikace vhodných vstupních surovin a návrh vhodných poměrů jejich mísení</i>	25
2.5.1	Identifikace vstupních surovin pro přípravu solidifikátů	25
2.5.2	Identifikace vstupních (nebezpečných) odpadů	25
2.5.3	Identifikace použitých pojiv a přísad	30
2.5.4	Solidifikační přísady	31
2.6	<i>Návrh vhodného poměru mísení – základní receptury</i>	31
2.7	<i>Experimentální prověření optimálních mísících poměrů vybraných vstupních surovin</i>	33
2.7.1	Laboratorní příprava solidifikátů	33
2.7.2	Fyzikálně-mechanické požadavky	33
2.8	<i>Výběr vhodných receptur.....</i>	40
2.9	<i>Experimentální prověření vybraných a modifikovaných receptur</i>	41
2.9.1	Fyzikálně-mechanické požadavky	42
2.9.2	Ekologické požadavky	45
3	<i>Experimentální ověření využití popílků pro umělé kamenivo</i>	47
3.1	<i>Vlastnosti vstupních surovin</i>	47
3.2	<i>Laboratorní výpal zkušebních vzorků na bázi popílků</i>	50
3.3	<i>Vyluhovatelnost škodlivin.....</i>	53
4	<i>Experimentální ověření využití popílků pro injektaže</i>	56
4.1	<i>Směsi typu jíl – vysokoteplotní popílek</i>	56
4.2	<i>Směsi typu jíl - vysokoteplotní popílek - pojivo</i>	58
4.1	<i>Směsi typu jíl - fluidní popílek</i>	64
5	<i>Závěr</i>	68
6	<i>Literatura.....</i>	69

1 Možnosti a kritéria pro využití odpadu ve stavebních materiálech

1.1 Náhrada přírodního kameniva

1.1.1 Kamenivo do betonu

Dle ČSN EN 12620+A1 se **kamenivo do betonu** dělí na jemné, jehož zrna propadnou sítím 0,063 mm, na drobné kamenivo, „jehož zrna jsou menší nebo rovné 4 mm“, na hrubé kamenivo, „jehož zrna jsou větší nebo rovné 4 mm“. Dále norma uvádí **směs kameniva**, co je směsí hrubého a drobného kameniva s největším zrnem 45 mm. [1]

Filer je kamenivo, „jehož většina zrn propadne sítím 0,063 mm“ a přidává se do kompozitu pro docílení určitých vlastností. Jeho **propad** přes síto 2 mm musí být 100 %, propad přes síto 0,125 musí být větší než 85 mm a propad přes síto 0,063 musí být větší než 70 %. [1]

Tab. 1 Kategorie pro max. hodnoty obsahu jemných částic dle ČSN EN 12620+A1 [1]

Kamenivo	Síto 0,063 mm Propad v procentech hmotnosti	Kategorie f
Hrubé kamenivo	$\leq 1,5$	$f_{1,5}$
	≤ 4	f_4
	> 4	$f_{\text{deklarované}}$
	Bez požadavku	f_{NR}
Přírodní těžené kamenivo 0/8 mm	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	> 16	$f_{\text{deklarované}}$
	Bez požadavku	f_{NR}
Směs kameniva	≤ 3	f_3
	≤ 11	f_{11}
	> 11	f_{11}
	Bez požadavku	f_{NR}
Drobné kamenivo	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	$f_{\text{deklarované}}$
	Bez požadavku	f_{NR}

Dalšími důležitým kritériem pro ověření vhodnosti kameniva a fileru do betonu je **obsah chloridů a síranů**. Obsah **ve vodě rozpustných chloridů** a se stanoví dle ČSN EN 1744-1:1998 kapitola 7. Obsah **v kyselině rozpustných síranů** se stanoví dle ČSN EN 1744-1:1998 kapitola 12 a musí splňovat limity uvedené v tabulce 21 normy ČSN EN 1260+A1. Podle této tabulky se kamenivo zatřídí do příslušné kategorie $AS_{0,2}$; $AS_{0,8}$, kde číselný index udává maximální přípustnou ztrátu hmotnosti v procentech, $AS_{\text{deklarovaná}}$, kde ztráta hmotnosti je větší než 0,8 % a AS_{NR} – tato kategorie je bez požadavku. [1]

Vzduchem chlazená **vysokopecní struska** se podle této tabulky zatřídí do následujících skupin $AS_{1,0}$, kde **ztráta hmotnosti** je max. 1,0 % $AS_{\text{deklarovaná}}$, kde ztráta hmotnosti je větší než 0,8 % a AS_{NR} – tato kategorie je bez požadavku. [1]

Dále se může požadovat **obsah celkové síry obsažené v kamenivu** a ve fileru, který se stanoví dle ČSN EN 1744-1:1998 kapitola 11. Obsah celkové síry u vzduchem chlazené vysokopecní strusky nesmí překročit 2 % hm., a u ostatního kameniva nesmí překročit 1 % hm. Pokud je v kamenivu přítomen kyz železný, tak obsah celkové síry v kamenivu nesmí překročit 0,1 %. [1]

Humusovité látky ovlivňují průběh tuhnutí a tvrdnutí, a proto jejich obsah má být takový, aby neprodloužily tuhnutí víc než o 120 min. a nesnížily 28denní pevnost v tlaku o víc než 20 %. [1] Zkoušky se provádí dle ČSN EN 1744-1:1998.

Pokud se používá vysokopecní struska jako kamenivo, tak nesmí obsahovat **rozrušující křemičitan vápenatý** a rozrušující rozpad železa, jelikož hrozí rozpad strusky a tím se mohou ohrozit fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitu. [1]

Tab. 2 Kategorie složek hrubého recyklovaného kameniva dle ČSN EN 12620+A1 [1]

Složka	Obsah Procento hmotnosti	Kategorie
Rc	≥ 90	Rc ₉₀
	≥ 80	Rc ₈₀
	≥ 70	Rc ₇₀
	≥ 50	Rc ₅₀
	< 50	Rc deklarované
	Bez požadavku	Rc _{NR}
Rc + Ru	≥ 90	Rcu ₉₀
	≥ 80	Rcu ₈₀
	≥ 70	Rcu ₇₀
	≥ 50	Rcu ₅₀
	< 50	Rcu deklarované

Složka	Obsah Procento hmotnosti	Kategorie
	Bez požadavku	Rcu _{NR}
Rb	≤10	Rb ₁₀₋
	≤30	Rb ₃₀₋
	≤50	Rb ₅₀₋
	>50	Rb deklarované
	Bez požadavku	Rb _{NR}
Ra	≤1	XRg _{0,5-}
	≤5	XRg ₁₋
	≤10	XRg ₂₋
X + Rg	≤0,5	Ra ₁₋
	≤1	Ra ₅₋
	≤2	Ra ₁₀₋
	Obsah	
FL	≤0,2	FL _{0,2-}
	≤2	FL ₂₋
	≤5	FL ₅₋

U **recyklovaného kameniva** se stanovuje **obsah vodou rozpustných síranů** dle ČSN EN 1744-1. Pro kategorii SS_{0,2} nesmí překročit 0,2 % hm., pro kategorii SS_{NR} není stanoven požadavek. [1]

U recyklovaného kameniva se posuzuje **změna počátku tuhnutí** vlivem vodou rozpustných látek v ní obsažené. Podle toho se pak recyklované kamenivo zatřídí do následujících kategorií: A₁₀ pro změnu menší rovnou 10 min, A₄₀ pro změnu menší rovnou 40 min, A_{deklarovaná} pro změnu větší než 40 min, A_{NR} bez požadavku. [1]

1.1.2 Kamenivo do malt

Do malt mohou být **použité frakce** 0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm, 0/8 mm, 2/4 mm, 2/8 mm, avšak použití dalších frakcí není vyloučené. [2]

Do malt se může používat i **fíler**. Jeho **propad** přes síto 2 mm musí být 100 %, propad přes síto 0,125 musí být větší než 85 mm a propad přes síto 0,063 musí být větší než 70 %. [2]

Tab. 3 Meze pro obsah jemných částic dle ČSN EN 13139 [2]

Frakce kameniva mm	Maximální propad v procentech hmotnosti sítím 0,063 mm				
	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 5
0/1	3	5	8	30	>30
0/2	3	5	8	30	-
0/4; 2/4	3	5	8	30	-
0/8; 2/8	3	5	8	11	-

Kamenivo do malt musí splňovat následující podmínky: **obsah celkové síry** u vzduchem chlazené vysokopecní strusky nesmí překročit 2 % hm., a u ostatního kameniva nesmí překročit 1 % hm, **ztráta žiháním** u vzduchem chlazené vysokopecní strusky nesmí překročit 3 %hm., ztráta žiháním u práškového popílku nesmí překročit 5 %hm. [2]

1.1.3 Kamenivo pro stmelené směsi

Dle ČSN EN 14227-1 směsi stmelené hydraulickým pojivem jsou směsi, které tuhnou a tvrdnou pomocí hydraulické reakce, přičemž směs z kameniva stmelené cementem je definované, jako směs z kameniva hydraulicky stmelená pomocí cementu. Směsi z kameniva stmelené cementem jsou rozdělené do 5 typu. **Typ 1** je směs o **zrnitosti** 0/31,5 mm, 0/20 mm nebo 0/14 mm. Pro **typ 2** je důležitým vlastností **hutnost** – maximální hutnost směsi musí být 0,80 vypočítané dle přílohy A normy ČSN EN 14227-1. Pro **směs 5** se stanovuje **zrnitost** směsi jako minimální a maximální propad přes normovou sadu sít. [3]

Tab. 4 Zrnitost směsi z kameniva stmelené cementem – typ 5 dle ČSN EN 14227-1 [3]

Síto mm	Propad zrn v % hmotnosti	
	Minimum	Maximum
45	100	100
31,5	85	100
25	75	100
20	60	100
10	35	100
4	25	100
2	20	100
0,5	13	75
0,25	10	60
0,063	5	25

Další důležitou vlastností **směsi typu 5** je **vlhkost**, která se stanovuje Proctorovou zkouškou a musí vykazovat takové hodnoty, aby bylo umožněno hutnění směsi na stavbě, přičemž mají být dosaženy optimální mechanické vlastnosti směsi. [3]

Zrnitost vstupních materiálů pro vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy pro stavbu vozovek je dána v tabulce 3 pro pevnostní třídy $C_{1,5/2,0}$ a $C_{3/4}$ normy ČSN 73 6124-1. Obsah jemných částic je také uveden v téže tabulce, přičemž kvalita jemných částic musí splňovat kritérium pro **index plasticity** $I_p \leq 17$. **Zrnitost** pro směsi stmelené hydraulickými pojivy pro pevnostní třídy $C_{5/6}$, $C_{8/10}$ a vyšší jsou uvedené v tabulce 4 pro směsi 0/32 a 5 pro směsi 0/22 normy ČSN 73 6124-1. **Obsah jemných částic** je také uveden v téže tabulce, přičemž kvalita jemných částic musí splňovat následující kritéria: **index plasticity** I_p nesmí být menší než 4 a **mez tekutosti** w_L nesmí být větší než 25. Maximální hodnoty **obsahu jemných částic** pro směsi stmelené hydraulickým pojivem jsou uvedené v tabulce 8 normy ČSN EN 13242+A1, kde kameniva jsou rozdělena do jednotlivých kategorií dle maximálního propadu částic sítím 0,063 mm. Dále norma uvádí nutnost zdokumentování důkazu o vhodnosti použití pro drobné kamenivo, jestli obsah jemných částic překročí limitní 3 % hm. [5][4]

Maximální **obsah celkové síry** pro kamenivo by neměl překročit 1 %, pro vzduchem chlazenou vysokopecní strusku platí limitní požadavek 2%. Recyklované kamenivo se zařazuje do kategorie dle maximálního obsahu vodou rozpustných síranů: pro kategorie $SS_{0,2}$ je maximální obsah 0,2; pro kategorie $SS_{0,7}$ je maximální obsah 0,7; pro kategorie $SS_{1,3}$ je maximální obsah 1,3 a pro kategorii SS_{NR} není stanoven požadavek. [5]

Nasákavost kameniva je úzce spjatá s její mrazuvzdorností, což má vliv na **mrazuvzdornost** celé konstrukce. Pro kamenivo kromě vysokopecní strusky je potřebné stanovit její nasákavost a následně ji zařadit do příslušné kategorie: pro kategorii $WA_{24} 1$ je maximální nasákavost 1 % a pro kategorii $WA_{24} 2$ je 2 %. Kamenivo s nasákavostí ne větší než 0,5 % je odolné proti zmrazování a rozmrazování. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování je uvedena jako **ztráta hmotnosti** v procentech. Dle odolnosti proti zmrazování a rozmrazování je kamenivo zaříděno do následujících kategorií: F_1 při ztrátě hmotnosti ne větší jak 1 %, F_2 při ztrátě hmotnosti ne větší jak 2 %, F_4 při ztrátě hmotnosti ne větší jak 4 %, $F_{\text{deklarovaná}}$ při ztrátě hmotnosti větší než 4 % a kategorie F_{NR} je bez požadavku. [5]

1.1.4 Kamenivo pro nestmelené směsi

S požadavky na nestmelené směsi se zabývá norma ČSN EN 13285. Jednotlivé směsi jsou označeny jako 0/D, kde D je maximální zrno kameniva ve směsi. Použité mohou být směsi od 0/5,6 do 0/90. Dle maximálního **obsahu jemných částic** (částice do 0,063 mm) se nestmelené

směsi zařídují do následujících kategorií: UF 3, UF 5, UF 7, UF 9, UF 12 UF 15, kde číselná hodnota v označení kategorie udává maximální množství jemných podílů v hmotnostních procentech. Do kategorie UF_{deklarované} jsou zaříděné nestmelené směsi s maximálním obsahem jemných částic větší než 15 %. Kategorie UF NR j bez požadavků. [6]

1.2 Náhrada přírodního kameniva – sypané hráze

Požadavky na materiály pro stavbu hrází projednává norma ČSN 75 2410 – Malé vodné nádrže.

1.2.1 Filtry

Filtry mají za úkol zabránit vyplavování jemných částic chráněné zeminy a tím zabránit porušení hráze vlivem vnitřní eroze. **Tloušťka** vrstvy musí být navržena tak, aby bezpečně plnila svou funkci, avšak nesmí být menší než 25 cm. Z materiálového hlediska se může jednat o přírodní zeminy a o drcené kamenivo s **obsahem jemných podílů** pod 0,063 mm nepřekračujících 5 %. Doporučuje se použití takového materiálu, který není náchylný k segregaci. To může zajistit stejnoměrná granulometrie materiálu. Dále filtry mohou být vyhotoveny z umělých porézních hmot, které se navrhují podle stejných zásad, jak filtry z kameniva. [7]

Filtrační vrstva při zemním těsnění by měla být jemnozrná, písčité nebo ze štěrkopísku s maximální **velkosti zrn** do 13 mm až 19 mm, dále **obsah zrn do 5 mm** má být v rozmezí 55 % až 80 %. Filtr kolem otvorů a mezer (např. perforované drény) by měl splnit kritérium $D_{85} \geq 2d_o$, kde D_{85} je průměr zrna chráněného materiálu odpovídající na **čáře zrnitosti** 85 % celkové hmotnosti a d_o je průměr otvoru. Norma doporučuje, aby **součinitel propustnosti** materiálu použitý jak filtr, nepřekročil stonásobek propustnosti chráněné zeminy. [7] **Ulehlost** zhuštěného filtru musí být větší než 0,67 ale nesmí být větší než 0,8. [7]

1.2.2 Těsnění

Zeminy musí splňovat následující požadavky, aby mohly být použité pro vytvoření těsnící zářeze a/nebo těsnící koberce:

- **zrnitost zeminy** má ležet v oblasti 2 popř. oblasti 1 čáry zrnitosti dle obrázku 3 normy ČSN 75 2410,
- **obsah organických látek** nesmí překročit 5 % hm.,
- **mez tekutosti** zeminy nesmí překročit 50 %,
- největší ojediněle se vyskytující částice nesmí být větší než 100 mm,
- **index plasticity** zeminy pro třídy ML, CL, CS, MS nesmí překročit 8 %. [8]

1.2.3 Stabilizační část

Zeminy, který se použijí pro stabilizační část hráze, **nesmí obsahovat** organické látky a látky takové, které by po rozpouštění ve vodě působily výrazné zvýšení pórovitosti sypaniny nebo by mohly působit agresivně vůči konstrukci hráze. **Zrnitost** použité zeminy by měla ležet v oblasti zrnitosti 4 popř. 3 čáry zrnitosti dle obrázku 3 normy ČSN 75 2410. [8] Zeminy použité pro vytvoření tělesa hráze musí být **zhutněny** u jemnozrnných zemin na 95 % maximální objemové hmotnosti sušiny stanovenou Proctorovou zkouškou, přičemž **vlhkost** se nesmí výrazně lišit od Proctorové zkoušky stanovení optimální vlhkosti a u hrubozrnné zeminy, resp. kameniva na relativní ulehlost 0,8. [8]

1.2.4 Vhodnost jednotlivých zemin pro vyhotovení jednotlivých zón hráze

Tab. 5 Vhodnost zemin pro různé zóny hutnění hrází dle ČSN 75 2410 [8]

Název zeminy	Znak skupiny	Homogenní hráz	Těsnící část	Stabilizační část
Štěrk dobře zrněný	GW	nevhodná	nevhodná	výborná
Štěrk špatně zrněný	GP	nevhodná	nevhodná	výborná
Štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy	G-F	málo vhodná	nevhodná	velmi vhodná
Štěrk hlinitý	GM	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
Štěrk jílovitý	GC	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
Písek dobře zrněný	SW	nevhodná	nevhodná	vhodná
Písek špatně zrněný	SP	nevhodná	nevhodná	vhodná
Písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S-F	nevhodná	nevhodná	vhodná
Písek hlinitý	SM	vhodná	vhodná	málo vhodná
Písek jílovitý	SC	velmi vhodná	výborná	nevhodná
Hlína štěrkovitá	MG	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
Jíl štěrkovitý	CG	velmi vhodná	výborná	nevhodná
Hlína písčitá	MS	vhodná	vhodná	nevhodná
Jíl písčitý	CS	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
Hlína s nízkou plasticitou	ML	málo vhodná	vhodná	nevhodná
Hlína se střední plasticitou	MI	málo vhodná	vhodná	nevhodná
Jíl s nízkou plasticitou	CL	vhodná	velmi vhodná	nevhodná
Jíl se střední plasticitou	CI	vhodná	velmi vhodná	nevhodná
Hlína s vysokou plasticitou	MH	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
Hlína s velmi vysokou plasticitou	MV	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
Hlína s extrémně vysokou plasticitou	ME	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
Jíl s vysokou plasticitou	CH	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
Jíl s velmi vysokou plasticitou	CV	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
Jíl s extrémně vysokou plasticitou	CE	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná

Zeminy se zařídují dle tabulky 3 a obrázku 1 a 2 normy ČSN 75 2410 – Malé vodní nádrže do jednotlivých skupin dle obsahu **jemných částic, čísla nestejnorodosti, C_c a diagramu plasticity resp. dle obsahu jemných částic, poměru štěrkovité k písčité frakci, diagramu plasticity a w_L** následně v tabulce 5 udává vhodnost jednotlivých skupin pro různé zóny hutnění hrází. [8] V tabulce 4 normy jsou uvedené orientační fyzikálně mechanické vlastnosti zhutněných zemin.

1.3 Pórovitá kameniva

Dle ČSN EN 13055-1 pórovité kamenivo je sypký, anorganický materiál s **objemovou hmotností** nepřesahující 2000 kg/m^3 nebo se **sypnou objemovou hmotností** nepřesahující 1200 kg/m^3 . Dle původu se může jednat o přírodní kamenivo, např. tufy a pemzy, o kamenivo vyráběné z přírodních materiálů např. expandovaný perlit/vermikulit nebo keramzit, o kamenivo vyráběné z vedlejšího produktu při průmyslovém procesu, např. popílkový agloporit nebo zpěněná struska a o recyklované kamenivo např. cihelná drť nebo odpadní pórobeton. [9]

1.3.1 Spékané průmyslové odpady

Jedná se o druh uměle vyráběného pórovitého kameniva, který je vyráběn technologií sbalkování a následného slinutí pomocí krátkodobého výpalu. Slinování se většinou provádí na aglomeračních roštích samovýpalem. Samovýpal je takový druh výpalu, kde palivo pro hoření je obsaženo v surovině, ze kterého se vyhotoví výrobky a tím pádem po zapálení při prosévání vzduchu na roštích jsou schopny dále samy hořet a vypálit se. [10]

Suroviny mohou být nejrůznějšího charakteru, především se jedná o popílek z různých spalovacích procesů, různé druhy strusek, škvára, uhelnaté břidlice, odpady z uhelných prádel, hlušiny z uhelných dolů a další. Je výhodné, pokud surovina obsahuje uhelnaté (hořlavé) látky, aby se mohla vypálit samovýpalem. Jestli takové látky neobsahuje, záměrně se přidávají před sbalkováním. Minimální **obsah uhelnatých látek** je 5 %, přičemž maximální je 12,5 %, aby nenastal nežádoucí nadměrné slinování a tím i zvýšení objemové hmotnosti. [10]

1.3.2 Keramzit

Keramzit je druh uměle vyráběného kameniva. Je vyhotoven ze snadno tavitelných jíílů pomocí nadýmání v žáru, přičemž nadýmání nastává vlivem uvolnění plynů ze suroviny. Současně se vnitřek suroviny musí dostat do pyroplastického stavu, aby plyny mohly vytvořit póry v hmotě a povrch výrobků se musí slinout, aby plyny neunikly ze struktury. Nejvýhodnější oxidické složení pro to, aby se surovina při výpalu dostala do pyroplastického stavu, je následovná: **obsah SiO_2** 55 až 78 % hm., **obsah Al_2O_3** 12 až 25 %hm., **celkové množství taviv** 8 až 25 % hm.

Tavivý mohou být **oxidy železa**, které mají být obsaženo v surovině ve množství 3 až 6 % hm., dále **alkálie**, popř. CaO, MgO, přičemž obsah **CaO** by neměl překročit 5 %. [10]

1.4 Aktivní složky do cementových kompozitů

1.4.1 Popílek

Dle ČSN EN 450-1 jako latentně hydraulická složka do betonu mohou být používány jenom popílký zachytávané elektrostatickým nebo mechanickým způsobem odlučování z kouřových plynů při spalování práškového uhlí. „Popílek ze spaloven komunálního nebo průmyslového odpadu nevyhovuje definici“ popílku uvedené v normě ČSN EN 450-1. [11]

Popílek musí pozůstat minimálně ze 70 % hm. z **SiO₂**, **Al₂O₃** a **Fe₂O₃** přičemž dle normy ČSN EN 197-1 musí splnit minimální **obsah aktivního oxidu křemičitého**, což činí 25 % hm. [11]

Obsah jednotlivých škodlivin nesmí překročit následující limitní hodnoty: obsah **chloridů** 0,1 % hm., obsah **SO₃** 3,0 % hm., obsah **volního vápna** 1,5 % hm., obsah **aktivního vápna** 10,0 % hm., obsah **alkálie** 5,0 % hm., obsah **MgO** 4,0 % hm. A obsah **rozpuštěného fosforečnanu** 5,0 % hm. **Ztráta žíháním** nesmí překročit 5,0 % pro popílký kategorie A, 7,0 % pro kategorii B a 9,0 % pro kategorii C. [11]

Jemnost popílku se stanovuje proséváním za mokra dle ČSN EN 451-2 (referenční metoda) nebo proudem vzduchu dle ČSN EN 933-10 a nesmí překročit zůstatek na síti 0,045 mm: 40 % hm. pro kategorii N a 12 % hm. pro kategorii S. [11]

Index účinnosti je vyjádřen jako poměr pevnosti zkušební vzorku, kde část cementu byla nahrazen složkou s pucolánovou nebo latentně hydraulickou vlastností k referenčnímu vzorku. Index účinnosti popílku po 28 dnech musí být min. 75 % a po 90 dnech 85 %. [11]

Objemová stálost musí splnit požadavek max. 10 mm roztažení vůči referenčnímu vzorku. [11]

1.4.2 Struska

Jako latentně hydraulická složka do betonu může být použita jenom vysokopecní struska. Požadavky na chemické složení jsou uvedené v ČSN EN 15167-1. Podle tabulky 1 této normy obsah jednotlivých škodlivin nesmí překročit následující limitní hodnoty: obsah **MgO** 18 %, obsah **sulfidů** 2,0 %, obsah **síranů** 2,5 %, **ztráta žíháním** (opravená na oxidaci sulfidů) 3,0 %, obsah **chloridů** 0,10 %. Dále limituje se **vlhkost** strusky, a to na maximum 1,0 %. [12]

Měrný povrch nesmí být menší než 275 m²/kg. [12]

1.5 Výroba cementu

1.5.1 Portlandský slínek

Cement je hydraulické pojivo, který skládá se z oxidu křemičitého, oxidu vápenatého, oxidu hlinitého a oxidu železitého. „Celkový **obsah aktivního oxidu vápenatého a aktivního oxidu křemičitého** musí být v cementu nejméně 50 % hmotnosti.“ (ČSN EN 197-1) Z toho plyne, že vstupní suroviny pro výrobu cementu musí mít takové chemické složení, aby vypálený slínek byl nejméně ze dvou třetin hmotnosti tvořen trikalciúmsilikátem a dikalciúmsilikátem, přičemž podíl oxidu vápenatého k oxidu křemičitého nesmí být menší než 2,0 a obsah **oxidu hořečnatého** nesmí překročit limitní hodnotu 5 hm. %. (ČSN EN 197-1) [13]

Vstupní suroviny musí být takové kvality, nebo musí přejít takovou úpravou, aby finální výrobek splňoval následující limity na obsahu škodlivin: ztráta žíháním a **obsah nerozpustných zbytků** pro CEM I a CEM II nesmí překročit 5,0 %, největší přípustné množství **síranů** ve formě SO_3 je 3,5 % nebo 4,0 % podle druhu a pevnostní třídy cementu, obsah **chloridů** nesmí překročit 0,10 % u všech druhů cementu. [13]

Cement může kromě portlandského slínku a regulátoru tuhnutí obsahovat dle druhu i další hlavní složky: granulovanou vysokopecní strusku, vápenaté a křemičité popílků a vápenec.

1.5.2 Struska do cementu

Granulovaná vysokopecní struska se používá jako hlavní složka do CEM II/A-S, CEM II B-S, CEM III a CEM V. Je to vedlejší produkt vznikající rychlým chlazením struskotvorné taveniny při tavení železné rudy. Struska, která se může používat jako hlavní složka do cementu, musí být nejméně ze dvou třetin hmotnosti sklovitá a rovněž ze dvou třetin hmotnosti musí obsahovat následující oxidy: **CaO, MgO a SiO₂**, zbytek tvoří zejména Al_2O_3 , přičemž „hmotnostní podíl $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ musí být větší než 1,0“. (ČSN EN 197-1) [13]

1.5.3 Popílek do cementu

Popílek je jemný prášek vznikající při spalovacích procesů. Jako hlavní složka do cementu může být použitý jen popílek z vysokoteplotního spalování uhlí, kde samotný popílek je zachycený elektrostaticky nebo mechanicky z kouřových plynů. Může se jednat o křemičitý popílek, který má pucolánové vlastnosti, nebo o vápenaté, který má hydraulické. Pro obě typy popílků platí, že **ztráta žíháním** po dobu 1 hodinu má být v rozmezí 0 až 5,0 % hm. [13]

Popílek z fluidní spalování uhlí a popílek ze spalování jiných materiálů než uhlí nesmí být k tomuto účelu použitý dle ČSN EN 197-1. [13]

Křemičité popílký pozůstávají nejméně z 25,0 % z **aktivního oxidu křemičitého**, dále z **oxidu hlinitého** popřípadě oxidu železitého. Obsah **aktivní oxidu vápenatého** nesmí překročit 10,0 % a obsah volného vápna 1,0 %. Jestli je poukázána **objemová stálost** 10 mm, může se používat jako hlavní složka do cementu i popílek s obsahem **volného vápna** do 2,5 % hm. (ČSN EN 197-1) [13]

1.5.4 Vápenec

Minimální obsah **uhličitanu vápenatého** je 75 % hmotnosti. (ČSN EN 197-1) [13]

1.5.4.1 Doplnující složky

Do cementu se mohou přidávat doplňující složky nanejvýš do 5 % hmotnostních. Před použitím musí být zhomogenizované, vysušené a pomleté na zrnitost cementu. [13]

Doplňující složky musí být inertního charakteru, nesmí zhoršovat vlastnosti cementu a nesmí snižovat odolnost betonu a malt vyrobených z nich. Při zpracování nesmí ve větší míře zvyšovat potřebné množství vody. (ČSN EN 197-1) [13]

Požadavky na chemické složení jsou následovné: **ztráta žiháním** nesmí překročit 5,0 %, **nerozpuštěný zbytek** max. 5,0 %, obsah **síranů** ve formě SO_3 nesmí překročit 3,5 % nebo 4,0 % dle druhu a pevnostních tříd cementu, obsah **chloridů** nesmí překročit 0,1 %. [13]

1.6 Vápno

Požadavková norma: ČSN EN 459-1 Stavební vápno – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody

Tab. 6 Zatřídění bílého vápna chemického složení dle ČSN EN 459-1 [14]

Název	Značení	Obsah jednotlivých oxidů v %				
		CaO+MgO	MgO	CO ₂	SO ₂	volné CaO
Bílé vápno 90	CL 90	≥90	≤5	≤4	≤2	≥80
Bílé vápno 80	CL 80	≥80	≤5	≤7	≤2	≥65

Tab. 7 Reaktivita dle ČSN EN 459-1 [14]

Druh	Reaktivita				
	R5	R4	R3	R2	R _{sv}
CL 90	t ₆₀ <10	t ₅₀ <25	-	-	Jiná požadovaná hodnota nebo není požadováno
CL 80	t ₆₀ <10	t ₅₀ <25	t ₅₀ <25	-	
CL 70	-	-	-	t ₄₀ <25	

Tab. 8 Zrnitost dle ČSN EN 459-1 [14]

Síto	Zrnitost – propad sítem v hmotnostních %				
	P4	P3	P2	P1	P
10	100	-	-	-	Jiná požadovaná hodnota nebo není požadováno
5	≥95	100	100	-	
2	-	≥95	≥95	100	
0,2	-	-	≥70	≥95	
0,09	-	≥30	≥50	≥85	

Jemnost je vyjádřen pomocí zbytků na daných sít a musí splňovat následující limity, které jsou totožné pro vápna CL 90, CL 80 a CL 70: zbytek na síti 0,09 mm nesmí být víc než 7 hm. % a zároveň zbytek na síti 0,2 mm nesmí být víc než 2 hm. %. [14]

Obsah volné vody nesmí být víc než 2 %. [14]

1.7 Sádra a výrobky na bázi sádry

1.7.1 Sádra

Požadavková norma: ČSN EN 13279-1 Sádrová pojiva sádrové malty pro vnitřní omítky – Část 1: Definice a požadavky

Suroviny pro výrobu sádry musí být takové jakosti, aby z nich vyráběná sádrová pojiva, malty a omítky splnily požadavky uvedené v 5 kapitole normy. [15]

Sádrové pojiva a malty pro vnitřní omítky lze zařadit bez zkoušení do skupiny A.1-reakce na oheň, jestli obsah organického materiálu je menší než 1 %. [15]

Obsah **síranu vápenatého** v sádrových pojiv musí být nejméně 50 %. [15]

Vlastnosti sádrových pojiv, sádrových malt a sádrových malt pro speciální účely se stanoví dle normy ČSN EN 13279-2 Sádrová pojiva sádrové malty pro vnitřní omítky – Část 2: Zkušební metody.

1.8 Složky pórobetonu

1.8.1 Popílek do pórobetonu

Popílek je vhodný jako křemičitá surovina do pórobetonu, jestli splňuje následující požadavky na chemické složení, fyzikální vlastnosti a technické požadavky:

- ztráta žíháním pro černouhelný popílek je maximálně 7 % hm. a pro hnědouhelný popílek nebo směs černouhelného a hnědouhelného popílku 4 % hm.,
- obsah **SiO₂** minimálně 45 % hm.,
- obsah celkové **CaO** maximálně 5 % hm.,
- obsah **SO₃** maximálně 2 % hm.,
- obsah **Na₂O** maximálně 1,5 % hm.,
- **zbytek na síti 0,2 mm** po síťovém rozboru maximálně 8 % hm. a **zbytek na síti 0,063 mm** minimálně 25 % hm. přičemž tyto hodnoty jsou směrné,
- **sypaná hmotnost** ve volně sypaném stavu minimálně 500 a maximálně 1000 kg/m³, přičemž tyto hodnoty jsou směrné,
- **sypaná hmotnost** v setřeseném stavu minimálně 700 a maximálně 1200 kg/m³, přičemž tyto hodnoty jsou směrné,
- **měrná hmotnost** minimálně 2000 kg/cm³, přičemž tyto hodnota je směrná,
- **měrný povrch** minimálně 200 a maximálně 500 m²/kg, přičemž tyto hodnota je směrná,
- **pevnost v tlaku** minimálně 2,5 MPa,
- **vlhkost** minimálně 6±2 % (hodnota je směrodatná) a maximálně 10 % (hodnota je limitní),
- **objemová hmotnost** maximálně 600 kg/m³,
- **nasákavost** maximálně 70 g/dm³. [16]

Do pórobetonu je možné použít popílek z fluidní splovnosti i fluidní popel, jestliže splňují následující požadavky na chemické složení, fyzikální vlastnosti a technické požadavky:

- **ztráta žíháním** maximálně 4 % hm.,
- obsah **SiO₂** minimálně 40 % hm.,
- obsah volného **CaO** maximálně 5 % hm. (hodnota je směrná),
- obsah **MgO** maximálně 2 % hm.,
- obsah celkového **CaO** 15 % hm.,
- obsah celkové **SO₃** 10 % hm.,
- **pH** minimálně 7 maximálně 13

- obsah **alkálií** přepočteno na Na_2O maximálně 1,5 % hm.,
- **zbytek na síti 0,063 mm** minimálně 10 % a maximálně 50 %,
- **sypná hmotnost** ve volně sypaném stavu minimálně 500 kg/m^3 ,
- **sypná hmotnost** v setřeseném stavu minimálně 700 kg/m^3 ,
- **měrná hmotnost** minimálně 2000 kg/cm^3 ,
- **měrný povrch** maximálně $500 \text{ m}^2/\text{kg}$,
- **pevnost v tlaku** minimálně 2,5 MPa,
- **vlhkost** maximálně 10 %,
- **objemová hmotnost** minimálně 500 kg/m^3 (hodnota je směrná), maximálně 700 kg/m^3 (hodnota je limitní),
- **nasákavost** minimálně 70 % (hodnota je směrná) a maximálně 75 % (hodnota je limitní). [16]

1.8.2 Vápno do pórobetonu

Vápno je vhodnou složkou do pórobetonu jestli splňuje následující kritéria:

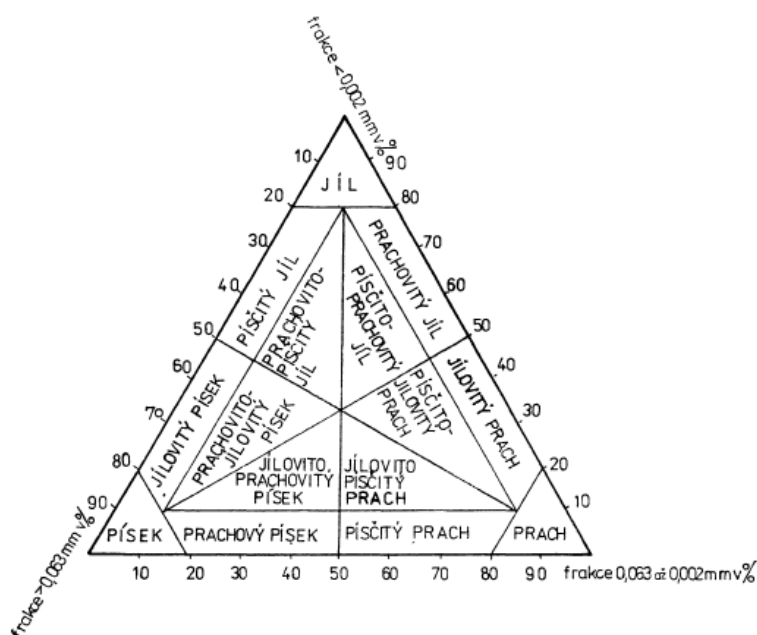
- **reaktivita:** $T_{60} = 4$ až 12 minut
- obsah **CaO** minimálně 90 %, obvykle v rozmezí 90 až 96 %,
- obsah **MgO** nejvýše 3 %,
- **ztráta žíháním** nejvýše 6 %, obvykle v rozmezí 3 až 6 %,
- obsah **síry** nesmí překročit 0,2 %. [14]

1.9 Suroviny pro přípravu keramiky

1.9.1 Cihlářské zeminy

Cihlářské zeminy dle ČSN 72 1564 se dělí do skupiny I (oblast zařazené zeminy A dle Winklerovho diagramu), II (oblast zařazené zeminy B Winklerovho diagramu), III (oblast zařazené zeminy C Winklerovho diagramu) a IV (oblast zařazené zeminy C pro krytiny a obklady Winklerovho diagramu). [17]

Zatřídí se podle zrnitosti dle trojúhelníkového diagramu uvedené na následujícím obrázku.



Obr. 1 Trojúhelníkový diagram [17]

Dle hlavního jílového minerálu se označuje následovně: písmenem K – kaolinové, písmenem M – montmorillonitové, písmenem I – jílové slídy. Smíšená struktura se označuje kombinací písmen v pořadí od nejvíc po nejméně obsažený jílový minerál. [17]

Dle **zrnitosti nad 2 mm** se označuje následovně: číslicí 1, když nadsítní podíl je nejvýše 2 %, číslicí 2, když nadsítní podíl je v rozmezí 2 až 5 %, číslicí 3, když nadsítní podíl je do 10 %, číslicí 4, když nadsítní podíl nad 10 %. [17]

Dle **obsahu uhličitánů** se označuje následovně: číslicí 1, když obsah je nejvýše 2 %, číslicí 2, když obsah je nejvýše 10 %, číslicí 3, když obsah je nejvýše 25 %, číslicí 4, když obsah je víc než 25 %. [17]

Dle **optimální vlhkosti** se označuje následovně: číslicí 1, když optimální vlhkost je nejvýše 20 %, číslicí 2, když optimální vlhkost je nejvýše 25 %, číslicí 3, když optimální vlhkost je nejvýše 30 %, číslicí 4, když optimální vlhkost je nad 30 %. [17]

1.9.2 Jílové zeminy

Jako **jílové suroviny** se označují „horniny, které obsahují užítkovatelné množství jílových částic“. [18] Jílové částice se vyznačují velikostí pod 0,004 mm a jsou tvořené jílovými minerály. Jako **jíl** se označuje nepevněná hornina s množstvím jílových částic nad 50 %. Jako hlína se označuje nepevněná hornina s množstvím jílových částic mezi 20 až 80 % obsahující prach a písek. [18]

Podle základních vlastností jílové suroviny dělíme na žárovzdorné, kameninové, pórovinové a slévárenské. [18]

U žáruvzdorných jílových surovin se sleduje obsah **Al_2O_3** , který je nositelem žáruvzdorných vlastností a obsah **Fe_2O_3** a sleduje se **vaznost**. [18]

Kameninové jílové suroviny se vyznačují **teplotou slinutí** do 1300 °C, důležitými vlastnostmi jsou **vaznost, smrštění při slinutí, odolnost proti kyselinám po výpalu a obsah písku**. Pórovinovou jílovou surovinou se rozumí jílová surovina mající nasákavost min. 2 % po výpalu na 1250 °C. Důležitá je barva, resp. bělost vzniklého střepu po výpalu. Tato vlastnost koresponduje zejména s **obsahem barvicích oxidů** (Fe_2O_3 a TiO_2). Dalším důležitým vlastností je **smrštění**. [18]

Slévárenské jílové suroviny musí vykazovat min. 0,4 MPa **pevnost v tlaku** po vysušení na 200 °C. Dalšími důležitými vlastnostmi jsou zrnitost, vaznost a teplota žárové deformace. [18]

2 Experimentální ověření solidifikace nebezpečných odpadů

2.1 Vhodné možnosti využití solidifikátu vyplývající z TN v ČR

Tab. 9 Možnosti použití solidifikátu (jako náhrada materiálů uvedených v TN)

Číslo TN	Výrobní skupina (možnost použití)
09.11.02	Popílky a směsi s popílkem pro konstrukční vrstvy vozovek a pro násypy a zásypy při stavbě pozemních komunikací , Popílek a směsi s popílkem pro násypy a zásypy při stavbě pozemních komunikací.
09.12.01	Popílky a směsi s popílkem pro zásypy a násypy pro stavby mimo pozemních komunikací , Popílek a směsi s popílkem pro sanaci a tvarování terénu pro budoucí rekultivaci území postižených antropogenní činností .
09.13.01	Zásypový materiál určený k likvidaci hlavních a starých důlních děl zasypáním , Zpevněný zásypový materiál – ZZM.
09.13.02	Zásypový materiál určený k likvidaci hlavních a starých důlních děl zasypáním , Nezpevněný zásypový materiál – NZM.
09.14.01	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 , Granulát pro rekultivaci báňských výsypek.

Tab. 10 Sledované vlastnosti vycházející z použití uvedených v Tab. 9

Sledované vlastnosti	Zkušební postup
Zrnitost	ČSN CEN ISO/TS 17892-4 ČSN EN 933-1
Zhutnitelnost (Proctor)	ČSN EN 13286-2
Vlhkost	ČSN CEN ISO/TS 17892-1
Poměr únosnosti CBR	ČSN EN 13286-47
Pevnost v prostém tlaku	ČSN EN 13286-41 ČSN CEN ISO/TS 17892-7 ČSN EN 1926 (721142)
Odolnost proti vodě a mrazu	ČSN EN 14227-3, NB
Propustnost – filtrační koeficient	ČSN CEN ISO/TS 17892-11
Smyková pevnost	ČSN CEN ISO/TS 17892-10
Hydrogeologický posudek	TP – optimalizovaný postup, kapitola 6
Ekotoxikologické testy	ČSN EN ISO 11348-2 OECD TG No. 201, OECD TG No. 202
Hmotnostní aktivita 226Ra Index hmotnostní aktivity	Doporučení SÚJB 2009
Pórovitost	ČSN EN 13286-47
Vodný výluh (Chemické prvky ve vodném výluhu)	ČSN EN 12457/1-4 Vyhláška MŽP č. 273/2021 Sb.
Zpracovatelnost, konzistence	ČSN EN 12350-5 (73 1301) ČSN EN 14227-3 (73 6156)
Objemová hmotnost ztvrdlého betonu	ČSN EN 12390-7 (73 1302)
Pevnost v tlaku – krychelná	ČSN EN 12390-3
Nasákavost	ČSN EN 1097-6 (72 1194)
Obsah organického uhlíku – spalitelné látky	ČSN 44 1355, ČSN ISO 625 (44 1363) ČSN ISO 609 (44 1354)
Objemová hmotnost vlhká	ČSN 72 1010, kap. C ČSN CEN ISO/TS 17892-2
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3 (72 1194)
Mezerovitost	ČSN EN 1097-3 (72 1194)
Trvanlivost	ČSN 72 1176, ČSN EN 1367-2 (72 1195)
Jemné částice	ČSN EN 933-1 (72 1183)
Ztráta žíháním	ČSN EN 196-2 (72 2100), čl. 7
Oxid sírový	ČSN EN 196-2 (72 2100), čl. 8

Tab. 9 uvádí aplikace uvedené v rámci jednotlivých vybraných technických návodů (TN), které mají nejbližší k možnému využití solidifikátu. Tab. 10 následně uvádí sledované vlastnosti vyplývající z uvedeného použití.

2.2 Další možnosti využití solidifikátů v ČR

2.2.1 Výplňový a rekultivační materiál při řešení starých ekologických zátěží

V ČR je přes 300 lokalit s nevyřešenou nebo částečně vyřešenou starou ekologickou zátěží. Část těchto lokalit je zatížena skládkami NK, část lokalit si vyžaduje zemní práce pro vymístění kontaminovaného materiálu a jeho nahrazení vhodným výplňovým materiálem. Pokud je sanováno přímo úložiště odpadů, nabízí se možnost aplikovat solidifikát jako výplňový/rekultivační materiál na původní místo za podmínky dodržení stanovených sanačních limitů. Tyto limity jsou v ekologicky exponovaných zónách mírnější než limity pro ukládání/využívání materiálu na povrchu terénu.

2.2.2 Technologický a rekultivační materiál na skládkách a odkalištích

Na skládky je možné přijímat jako technologický materiál odpady a materiály, které slouží k průběžnému překryvu odpadu a k bezpečné výstavbě tělesa skládky v souladu s projektovou dokumentací a zajišťují stabilitu tělesa skládky a umožňují stavbu provizorních nájezdových cest v tělese skládky.

Solidifikát lze použít jako technologický materiál, pokud:

- splňuje parametry ukládání na skládku,
- je schválen v provozním řádu skládky,
- má vhodné fyzikální, biologické a chemické vlastnosti,
- není v tekutém stavu.

Pro skládky musí výrobek plnit požadavky jako odpad (požadavky pro různé kategorie skládek – S-OO1, S-NO). Obsah škodlivin v sušině se u stabilizovaného/solidifikovaného odpadu za těchto podmínek nestanovuje.

2.2.3 Stavební materiál při běžných zemních pracích

V rámci této oblasti se jedná o využití na pozemcích bez ekologické zátěže – vyšší nároky na stálost vlastností materiálu a na ekologické a geotechnické parametry. Aplikace odpadů na povrch terénu je limitována splněním parametrů vyhlášky č. 273/2021 Sb. Obsah škodlivin v sušině solidifikátu je obtížné dosáhnout již z principu původu NK, které často obsahují těžké kovy a soli z neutralizovaných zbytků roztoků, používaných při povrchových úpravách kovových výrobků a při zpracování odpadů různého původu v čistírnách odpadních vod. Zde

dochází k nerovnoměrné produkci NK z hlediska stálosti jejich složení. Pro použití ve stavebnictví je důležitá neměnnost a dodržení vlastností výrobku-solidifikátu a pravidelnost dodávek. Z uvedených důvodů se jeví aplikace výrobku při běžné stavební činnosti méně reálná. Pokud by výrobek dosáhl parametrů pro uložení na povrch terénu, lze jej použít jako výplňový materiál při stavbách a rekultivacích. Známá je oblast poddolovaných oblastí na Ostravsku, oblast Severočeské a Sokolovské hnědouhelné pánve.

2.3 Výběr nejvhodnějšího využití solidifikátu na základě provedené rešerše a dosud získaných poznatků z oblasti S/S

Využití solidifikátu má mít hlavně ekologický přínos – ochrana ŽP. Nejvíce možných aplikací vyplývá z již zmiňovaných TN. Tyto TN byly vypracovány převážně pro výrokovou skupinu popílky a směsi s popílkem, přičemž vymezené využití, má nejbližší k vhodné aplikaci solidifikátu. Možnosti aplikace solidifikátu úzce souvisí s technologií jeho výroby.

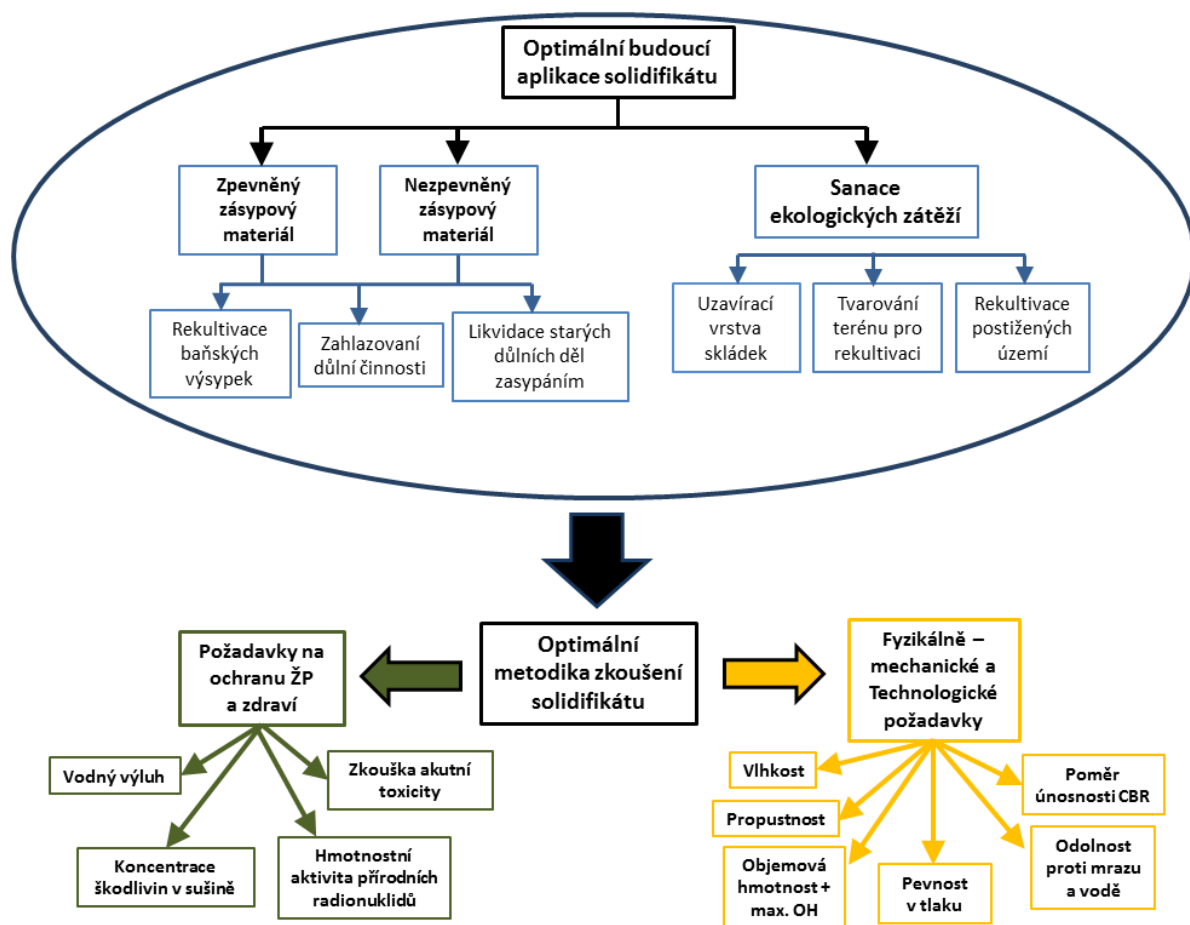
Solidifikát je na solidifikačních linkách většinou produkován ve formě granulátu, z čeho plyne hlavní možnost využití pro různé zasypy, násypy, podkladní vrstvy, a především jako náhrada materiálů využívaných v dnešní době při rekultivaci skládek a sanaci starých ekologických zátěží (SEZ). Využití solidifikátu jako stavebního materiálu při běžných zemních pracích je málo pravděpodobné v důsledku obvyklého vysokého obsahu škodlivin v sušině, což není povoleno příslušnými přísnými normami. Vhodné efektivní možnosti využití solidifikátu budou dále postupně optimalizovány v závislosti na finálních vlastnostech specifického druhu solidifikátu.

2.4 Postupy zkoušení vlastností solidifikátu vyplývající z TN a rešerší

Na základě možných způsobů využití solidifikátu je na obrázku níže proveden výběr zkoušek, dle kterých jsou v další etapě ověřeny vlastnosti solidifikátu. Navrhované zkoušky vyplývají především z požadavků uvedených v TN. Zkoušky lze následně rozdělit, jak znázorňuje obrázek níže, na fyzikálně-mechanické pro zjištění a vymezení technických vlastností výrobku a ekologické – zabývající se ochranou ŽP a zdraví osob a zvířat. Výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti ovlivňují i způsob technologie provádění budoucí vhodné aplikace solidifikátu. Požadavky na ochranu ŽP jsou uvedeny v příslušné legislativě (vyhláška č. 273/2021 Sb.), přičemž jsou sledovány parametry jako vyluhovatelnost, koncentrace škodlivin v sušině a ekotoxikita. V zahraničí se zabývají ochranou ŽP i na základě jiných typů zkoušek.

- Souhrn požadavků → zkoušky prověřující vlastnosti solidifikátu
- Optimální metodika zkoušení vlastností solidifikátu

Optimální metodika zkoušení solidifikátu vychází z nejpravděpodobnějších budoucích aplikací solidifikátu a je definována zkouškami. Jako nejvhodnější využití se jeví zpevněný/nezpevněný zásypový materiál využívaný při rekultivacích skládek. Vybrané zkoušky prověřují vlastnosti solidifikátu i v souvislosti s ochranou ŽP. Všem nadefinovaným zkouškám byly dle navržené metodiky zkoušení následně podrobeny připravené solidifikáty.



Obr. 2 Optimální metodika zkoušení solidifikátu vytvořena na základě optimální budoucí aplikace solidifikátu

Byly vybrány optimální aplikace solidifikátu, který má být připraven z nebezpečných odpadů – neutralizačních kalů. Na základě vybraných aplikací byla vytvořena metodika zkoušení solidifikátu, která vychází z požadavků uvedených v TN a poznatků získaných v rámci rešerše. Jako nejvhodnější využití solidifikátu se jeví Technologický a rekultivační materiál na skládkách, odkalištích a při sanaci ekologických zátěží. V klasickém oboru stavebnictví (např. dopravní stavitelství) není ještě dostatečně prokázána trvanlivost materiálu čili schopnost

vykazovat stálé vlastnosti v čase při působení různého, ve většině případů i agresivního prostředí.

2.5 Volba a identifikace vhodných vstupních surovin a návrh vhodných poměrů jejich mísení

2.5.1 Identifikace vstupních surovin pro přípravu solidifikátů

Vybranými vstupními odpady jsou neutralizační kaly (NK) s označením PROSTĚJOV, BOHUMÍN a OSTRAVA. Neutralizační kal (NK) lze charakterizovat jako odpad, vznikající po neutralizaci odpadních kyselin z různých průmyslových výroby, které obsahují nebezpečné látky. Identifikace NK probíhá především za účelem objasnění jejich negativního vlivu na ŽP. Z toho důvodu je u nich provedena zkouška vyluhovatelnosti, stanovení koncentrace škodlivin v sušině a také zjištění obsahu sušiny.

Mezi vhodná solidifikační činidla patří cement, popílek, odprašky z pánvové pece a karbidové vápno, přičemž výběr jejich konkrétních zdrojů proběhl s ohledem na ekonomické a ekologické hledisko a dopravní dostupnost. Jejich vhodnost je v následující etapě prověřena experimentálním zkoušením vlastností solidifikátů připravených dle navržených základních receptur.

2.5.2 Identifikace vstupních (nebezpečných) odpadů

Hodnocením vlivu upravených odpadů na ŽP se především zabývá vyhláška č. 273/2021 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu, proto identifikace vlastností vstupních odpadů bude provedena v souladu s touto vyhláškou. Mezi základní sledované vlastnosti, které uvedená vyhláška hodnotí, patří vyluhovatelnost, ekotoxikita a stanovení koncentrace škodlivin v sušině odpadu, přičemž ekotoxikitu a koncentraci škodlivin v sušině je zapotřebí hodnotit v případě odpadů využívaných na povrchu terénu. Při přípravě vodného výluhu se postupuje podle ČSN EN 12457-4 (83 8005), přičemž na základě výsledků – koncentrace škodlivin ve vodném výluhu odpadu (v mg/l), se odpad zatřídí do jednotlivých tříd vyluhovatelnosti. Příloha č. 10 k vyhlášce č. 273/2021 Sb. stanovuje nejvyšší přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů využívaných na povrchu terénu.

2.5.2.1 BOHUMÍN

Jedná se o odpadní kal zařazený mezi NO. Dle přílohy č. 1 vyhlášky MŽP č. 8/2021 Sb. (Katalog odpadů) se jedná o odpad zařazen do skupiny 19 02 05 (NO) Kaly z fyzikálně-chemického zpracování obsahující nebezpečné látky. NK BOHUMÍN vzniká při procesu výroby ocelových pozinkovaných drátů ve společnosti ŽDB GROUP, a.s.

Tab. 12 udává koncentraci škodlivin v sušině NK, přičemž obsah olova (Pb) několikanásobně překračuje limit pro využití odpadu na povrchu terénu (příloha č.10, vyhláška č.273/2021 Sb.). Tab. 11 udává mimo jiných parametrů množství rozpuštěných látek (RL) ve vodném výluhu odpadu, přičemž ze všech třech NK je tato hodnota nejvyšší. Velká koncentrace RL ve výluhu znamená poměrně vysokou rozpustnost některých látek obsažených v NK ve vodě. Jak vyplývá z následujících tabulek, bude se jednat převážně o ve vodě rozpustné chloridy v menší míře sírany a jiné ve vodě rozpustné anorganické a organické sloučeniny.

Tab. 11 Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti (NK BOHUMÍN)

Parametr	Jednotka	Výsledek	Limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa
pH (25 °C)	-	12	
DOC	mg/l	<10	80
chloridy	mg/l	1430	1500
fluoridy	mg/l	<0,04	30
sírany (SO ₄) ²⁻	mg/l	80	3000
RL sušené (105 °C)	mg/l	3910	8000
Hg	mg/l	<0,00010	0,2
As	mg/l	<0,001	2,5
Ba	mg/l	0,227	30
Cd	mg/l	<0,00010	0,5
Cr	mg/l	<0,00300	7
Cu	mg/l	0,045	10
Mo	mg/l	0,0097	3
Ni	mg/l	<0,0200	4
Pb	mg/l	0,0022	5
Sb	mg/l	<0,0010	0,5
Se	mg/l	<0,0010	0,7
Zn	mg/l	<0,020	20

Pozn.: Uvedené výsledky odpovídají NK BOHUMÍN použitého při lab. prověření základních receptur.

Tab. 12 Koncentrace škodlivin v sušině (NK BOHUMÍN)

Parametr	Jednotka	Výsledek	Limit pro využití odpadu na povrchu terénu (Příloha č.10, vyhl.273/2021 Sb.)
sušina (105 °C)	%	42,89	-
As	mg/kg sušiny	1,49	10
Cd	mg/kg sušiny	0,38	1
Cr celk.	mg/kg sušiny	159	200
Hg	mg/kg sušiny	0,009	0,8
Ni	mg/kg sušiny	77,8	80
Pb	mg/kg sušiny	1870	100
V	mg/kg sušiny	6,99	180
BTEX	mg/kg sušiny	<0,0005	0,4
PAU	mg/kg sušiny	0,052	6
EOX	mg/kg sušiny	<0,5	1
Uhlovodíky C ₁₀ – C ₄₀	mg/kg sušiny	23,1	300
PCB	mg/kg sušiny	0,0003	0,2

2.5.2.2 OSTRAVA

Odpadní NK s označením OSTRAVA, kdy se jedná o odpad z kalových polí staré neutralizační stanice, se vyskytoval především ve formě větších kusů. Producent uvádí tento odpad dle Katalogu odpadů do skupiny **19 02 06 (OO) Kaly z fyzikálně-chemického zpracování neuvedené pod číslem 19 02 05**. Na povrchu byl hnědé barvy a uvnitř sytě černé, co naznačuje rozdílné chemicko-mineralogické složení uvnitř a na povrchu odpadního kalu. Z výsledků zkoušky vyluhovatelnosti je patrná největší koncentrace síranů, ze všech NK, a to až 1960 mg/l. Mezi těžké kovy, nejvíce obsažené v sušině NK OSTRAVA patří chrom (Cr), nikl (Ni) a olovo (Pb) a z organických sloučenin se jedná především o uhlovodíky C₁₀-C₄₀.

Tab. 13 Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti (NK OSTRAVA)

Parametr	Jednotka	Výsledek	Limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa
pH (25 °C)	-	8,9	≥6
DOC	mg/l	46,3	80
chloridy	mg/l	458	1500
fluoridy	mg/l	0,52	30

sírany (SO ₄) ²⁻	mg/l	1960	3000
RL sušené (105 °C)	mg/l	3480	8000
Hg	mg/l	<0,00010	0,2
As	mg/l	<0,001	2,5
Ba	mg/l	0,048	30
Cd	mg/l	<0,00010	0,5
Cr	mg/l	<0,00300	7
Cu	mg/l	0,020	10
Mo	mg/l	0,0297	3
Ni	mg/l	<0,0200	4
Pb	mg/l	<0,0010	5
Sb	mg/l	<0,0010	0,5
Se	mg/l	0,0023	0,7
Zn	mg/l	<0,020	20

Tab. 14 Koncentrace škodlivin v sušině (NK OSTRAVA)

Parametr	Jednotka	Výsledek	Limit pro využití odpadu na povrchu terénu (Příloha č.10, vyhl.273/2021 Sb.)
sušina (105 °C)	%	44,11	-
As	mg/kg sušiny	6,41	10
Cd	mg/kg sušiny	0,15	1
Cr celk.	mg/kg sušiny	574	200
Hg	mg/kg sušiny	0,26	0,8
Ni	mg/kg sušiny	55,2	80
Pb	mg/kg sušiny	240	100
V	mg/kg sušiny	18,3	180
BTEX	mg/kg sušiny	0,0024	0,4
PAU	mg/kg sušiny	0,514	6
EOX	mg/kg sušiny	1,5	1
Uhlovodíky C ₁₀ – C ₄₀	mg/kg sušiny	2330	300
PCB	mg/kg sušiny	2,0	0,2

2.5.2.3 PROSTĚJOV

Jedná se o odpadní NK zařazený mezi NO (19 02 05 Kaly z fyzikálně-chemického zpracování obsahující nebezpečné látky) vznikající v průběhu výroby ve společnosti GALVA, s.r.o., jejíž sídlo se nachází v Prostějově. NK vzniká především jako vedlejší produkt při pozinkování železných materiálů. Na základě hodnoty pH výluhu můžeme usoudit stejně jako u ostatních dvou NK, že se ve všech třech případech jedná o zásaditý NO. Vodný výluh NK PROSTĚJOV obsahoval nejmenší koncentraci RL, avšak koncentrace rozpuštěného organického uhlíku (DOC) překročila limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa. Výsledky poukazují na vysokou koncentraci, kadmia (Cd), chromu (Cr), olova (Pb), chlorovaných alifatických uhlovodíků (EOX) a uhlovodíků C₁₀ – C₄₀ v sušině NK PROSTĚJOV.

Tab. 15 Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti (NK PROSTĚJOV)

Parametr	Jednotka	Výsledek	Limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa
pH (25 °C)	-	9,9	≥6
DOC	mg/l	91,2	80
chloridy	mg/l	935	1500
fluoridy	mg/l	6,32	30
sírany (SO ₄) ²⁻	mg/l	221	3000
RL sušené (105 °C)	mg/l	2810	8000
Hg	mg/l	<0,00010	0,2
As	mg/l	<0,001	2,5
Ba	mg/l	0,12	30
Cd	mg/l	0,00020	0,5
Cr	mg/l	0,162	7
Cu	mg/l	0,082	10
Mo	mg/l	0,0519	3
Ni	mg/l	<0,0200	4
Pb	mg/l	0,0013	5
Sb	mg/l	<0,0010	0,5
Se	mg/l	0,0083	0,7
Zn	mg/l	0,075	20

Tab. 16 Koncentrace škodlivin v sušině (NK PROSTĚJOV)

Parametr	Jednotka	Výsledek	Limit pro využití odpadu na povrchu terénu (Příloha č.10, vyhl.273/2021 Sb.)
sušina (105 °C)	%	24,19	-
As	mg/kg sušiny	3,14	10
Cd	mg/kg sušiny	146	1
Cr celk.	mg/kg sušiny	3990	200
Hg	mg/kg sušiny	0,135	0,8
Ni	mg/kg sušiny	30,5	80
Pb	mg/kg sušiny	108	100
V	mg/kg sušiny	5,38	180
BTEX	mg/kg sušiny	0,0040	0,4
PAU	mg/kg sušiny	0,971	6
EOX	mg/kg sušiny	18,2	1
Uhlovodíky C ₁₀ – C ₄₀	mg/kg sušiny	949	300
PCB	mg/kg sušiny	0,0053	0,2

2.5.3 Identifikace použitých pojiv a přísad

S ohledem na ekologické a ekonomické požadavky byl mezi vhodná solidifikační činidla vybrán především fluidní a vysokoteplotní popílek, jejichž úspěšnost při solidifikaci byla již v mnoha případech prokázána. V ČR se nachází několik tepelných elektráren produkujících jako vedlejší produkt vysokoteplotní a fluidní popílek, řadí se dnes již mezi druhotnou surovinu. Především na základě umístění solidifikační linky byl vybrán jako vhodný: fluidní popílek z elektrárny Hodonín (FP_{HOD}) a vysokoteplotní popílek z elektrárny Chvaletice (VP_{CHVAL}). Při laboratorním prověření solidifikátů bylo zjištěno, že FP_{HOD} může být nahrazen fluidním popínkem z elektrárny Tisová a VP_{CHVAL} lze nahradit vysokoteplotním popínkem z elektrárny Počerady, přičemž nedojde ke změně fyzikálně-mechanických vlastností solidifikátů.

2.5.3.1 Solidifikační Pojiva

- Vysokoteplotní popílek Chvaletice (VP_{CHVAL})
- Fluidní popílek Hodonín (FP_{HOD})
- Odprašky z pánvové pece – Ostrava
- Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Mokrý

Tab. 17 Mineralogické a chemické složení použitých popílků

Typ popílku	Mineralogické složení	Chemické složení			
		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
VP_{CHVAL}	β-křemen, mullit, hematit	52,2	1,8	29,6	8,4
FP_{HOD}	β-křemen, anhydrit, kalcit, sádrovec, hematit, volné CaO	42,3	20,8	19,4	5,8

Tab. 18 Vlastnosti výluhu VP_{CHVAL}

VP_{CHVAL}	pH (25°C)	Rozpuštěné látky (RL) [mg/l]	Sírany [mg/l]
	8,49	650	360

Tab. 19 Charakteristika výluhu použitého směsného portlandského cementu

CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	pH (25°C)	Rozpuštěné látky (RL) [mg/l]	Sírany [mg/l]
	12,4	3520	466

2.5.4 Solidifikační přísady

- Karbidové vápno – VAKA Brno
 - vzniká při výrobě acetyleny z karbidu vápníku
 - průměrná hustota: 1200 kg·m⁻³

2.6 Návrh vhodného poměru mísení – základní receptury

V rámci experimentálního laboratorního prověření solidifikátu bylo nejprve navrženo 12 různých receptur (pro každý NK), jejichž složení uvádí O. Každá receptura obsahovala 50% hm. množství NK. Při návrhu receptur byl kladen důraz na využití druhotných surovin, a to především dvou druhů popílků (FP, VP). Díky využití především druhotných surovin by tak mohlo docházet ke zbavování se velkého množství nebezpečného odpadu. Důležité je nejprve

všechny tyto receptury laboratorně prověřit a vybrat tu, která by vyhovovala stanoveným požadavkům.

Tab. 20 Přehled navržených receptur – zastoupení všech složek v [hm. %]

Ozn. receptury	FC	VFC1	VFC2	F	VF1	VF2	VFK1	VFK2	FO1	FO2	VO1	VO2
VP_{CHVAL}	-	10	20	-	10	20	15	5	-	-	40	30
FP_{HOD}	45	35	25	50	40	30	25	25	40	30	-	-
ODPR.	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	10	20
NK	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
KARB.V.	-	-	-	-	-	-	10	20	-	-	-	-
CEM	5	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VODA [%]	26–32						18	12	28–32		20–24	

Pozn.: Množství vody je udáváno v [hm. %] z celkové hmotnosti navážky.

Byla provedena identifikace vstupních NO – neutralizačních kalů a solidifikačních činidel. Identifikace NK probíhala především za účelem objasnění jejich negativního vlivu na ŽP. Z toho důvodu byla u nich provedena zkouška vyluhovatelnosti, stanovení koncentrace škodlivin v sušině a také stanovení sušiny. Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti a stanovení koncentrace škodlivin byly srovnány s limity uvedenými ve vyhlášce č. 273/2021 Sb. Limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa byl překročen u NK PROSTĚJOV (parametr DOC). NK OSTRAVA a NK BOHUMÍN splňují limity pro zařazení do výluhové třídy IIa.

Limit pro využití odpadu na povrchu terénu (Příloha č.10, vyhláška č.273/2021 Sb.) nesplnil žádný ze sledovaných NK. Z vybraných vstupních surovin byly navrženy základní receptury (návrh vhodného poměru jejich mísení), přičemž optimální poměr jejich mísení bude stanoven na základě experimentálního zkoušení vlastností solidifikátů v následující – třetí etapě.

2.7 Experimentální prověření optimálních mísících poměrů vybraných vstupních surovin

Tato část se zabývá experimentálním prověřením 12 různých receptur. Dle základních receptur byl připraven potřebný počet zkušebních vzorků (dle norem) tvaru krychle s hranou 100 mm.

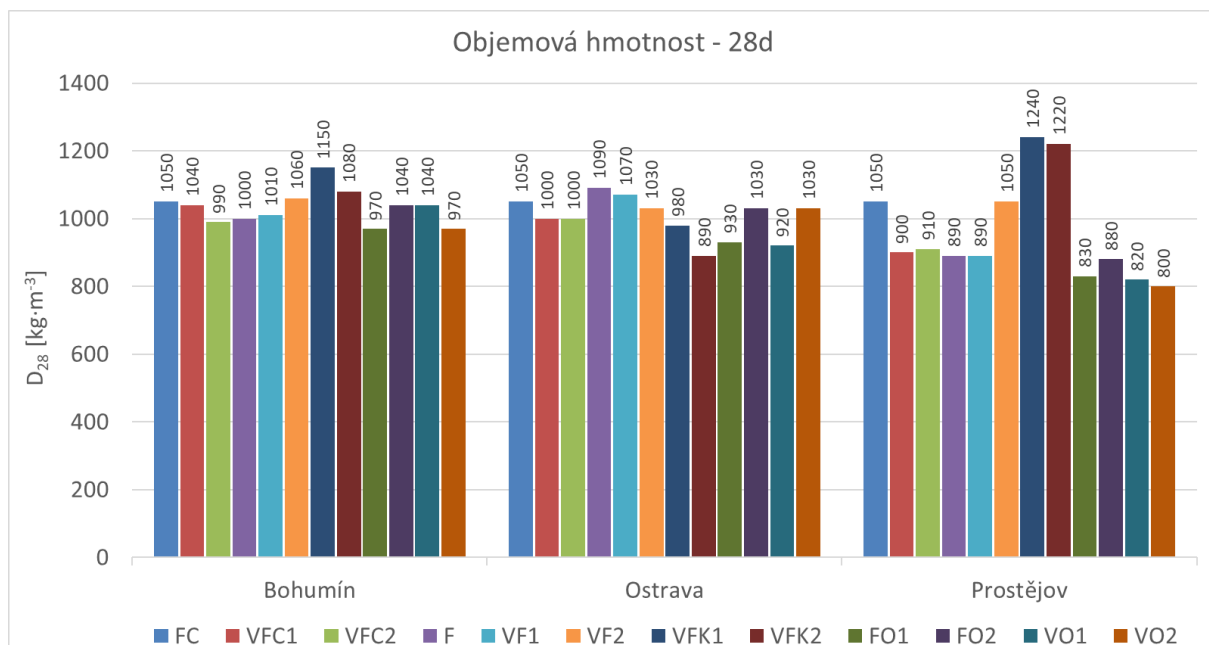
2.7.1 Laboratorní příprava soldifikátů

Homogenizace všech směsí byla provedena pomocí ručního míchadla, v nádobě o objemu přibližně 10 litrů. Z jednoho namíchaného objemu soldifikační směsi bylo možné připravit 4 zkušební vzorky (krychle o hraně 100 mm). U následně vybraných receptur se připravovalo více vzorků (i válcového tvaru). Dávkování všech složek jednotlivých receptur probíhalo hmotnostně s přesností na dvě desetinná místa. Solidifikační směs se po namíchání ručně plnila do kovových trojforem opatřených odformovacím prostředkem. Po dostatečném zatvrdnutí (2-5 dní) se vzorky odformovaly a uložily se do laboratorního prostředí až do jejich dalšího zkoušení. Vzorky obsahující určité množství cementu bylo možné odformovat už po 24 hod. Avšak vzorky, u kterých se při jejich přípravě použil pouze VP_{CHVAL}, dosáhly dostatečné manipulační pevnosti až po 7 dnech.

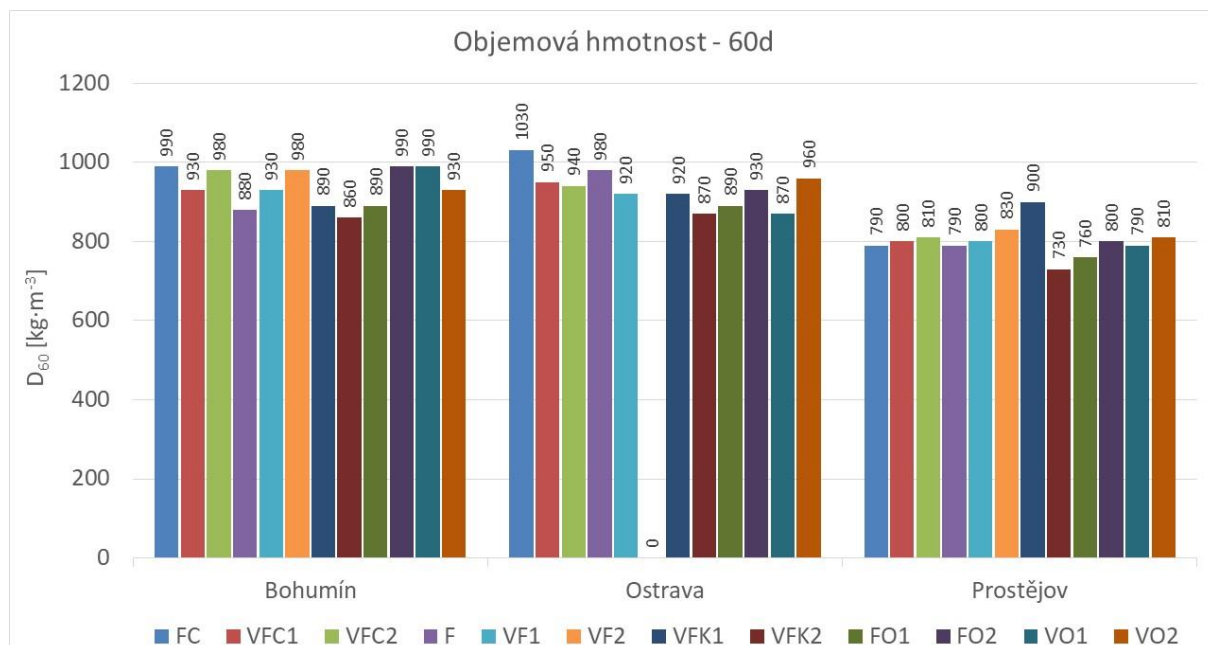
2.7.2 Fyzikálně-mechanické požadavky

2.7.2.1 Objemová hmotnost (ČSN EN 12390-7)

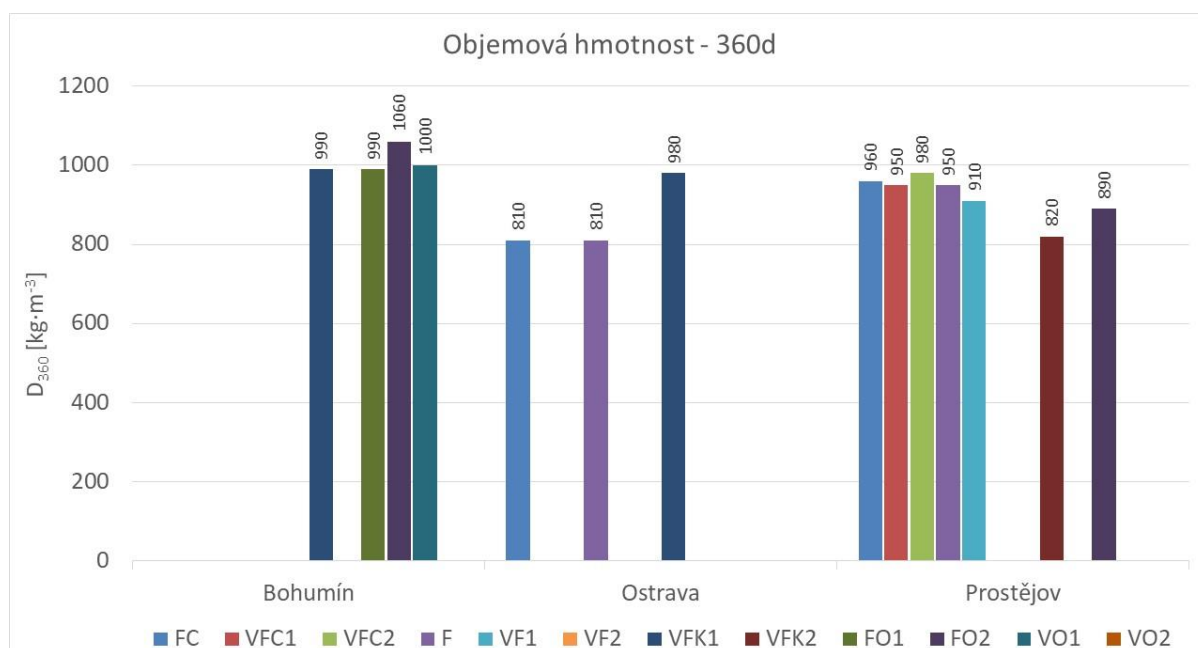
Pro stanovení objemové hmotnosti (OH) se použila stejná zkušební tělesa jako při zkoušce pevnosti v tlaku (krychle o rozměrech (100x100x100) mm). OH po 28 dnech zrání se pohybovala u všech receptur v rozmezí 800 až 1200 kg·m⁻³. Z výsledků je patrné, že hodnota OH má klesající tendenci v čase.



Obr. 3 Objemová hmotnost solidifikátů připravených dle základních receptur (28 d)
Výsledky OH solidifikátů o různém stáří uvádí Obr. 3, Obr. 4 a Obr. 5, přičemž OH po 360 dnech se ve druhém pololetí roku 2022 stanovila pouze u vzorků zachovávajících si svůj tvar.



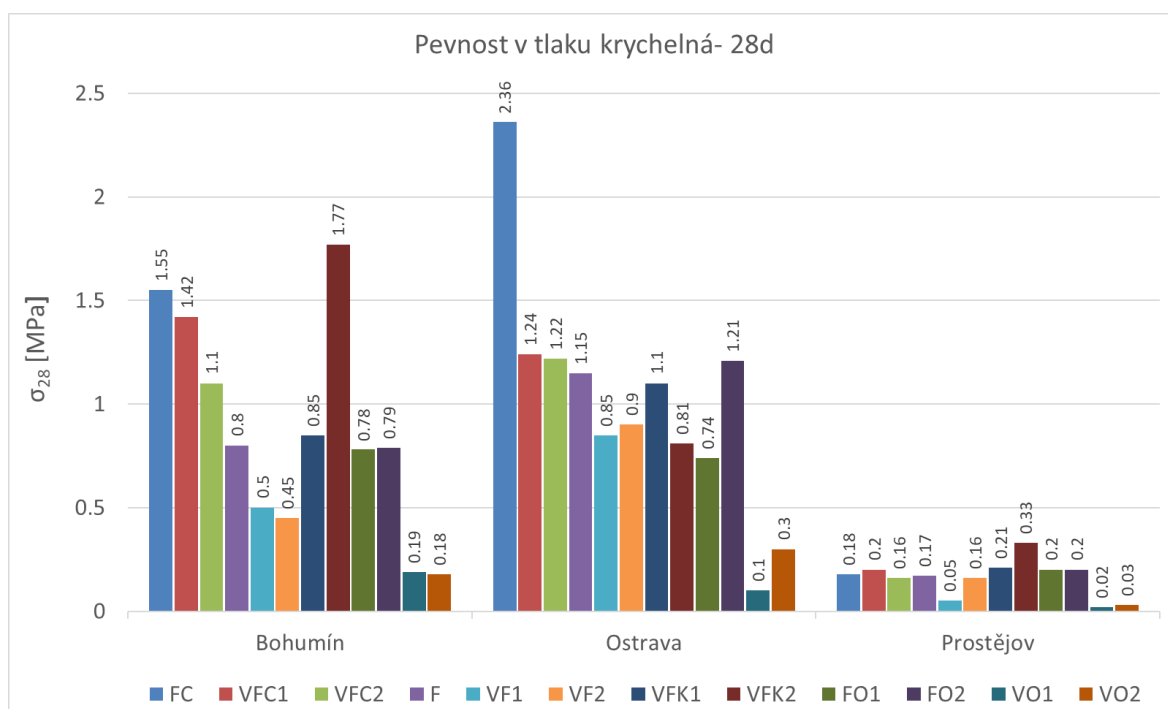
Obr. 4 Objemová hmotnost solidifikátů připravených dle základních receptur (60 d)



Obr. 5 Objemová hmotnost solidifikátů připravených dle základních receptur (360 d)

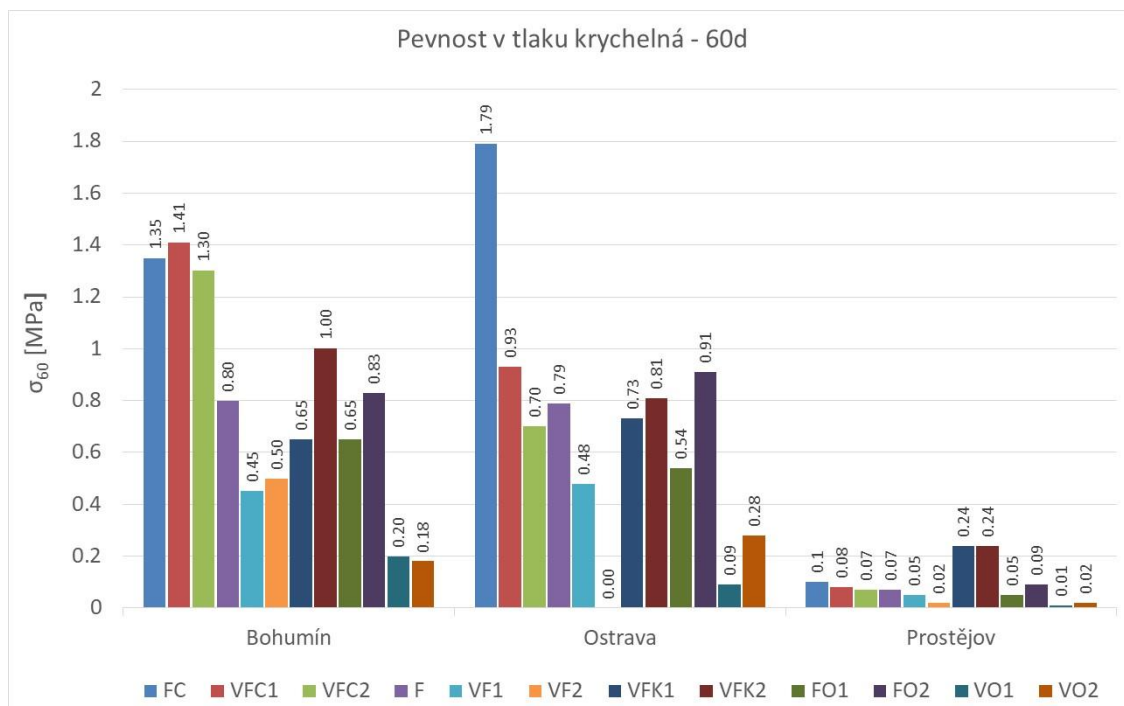
2.7.2.1 Pevnost v tlaku – krychelná (ČSN EN 12390-3)

Mechanické vlastnosti solidifikátů byly zkoušeny podle normy ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu – část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Zkušební tělesa, krychle o rozměrech (100x100x100) mm, byla zatěžována na zkušební lisu, který vyhovuje EN 12390-4. Maximální zatížení při rozdrčení tělesa se zaznamená a vypočte se pevnost betonu v tlaku. Příslušná legislativa nepožaduje zkoušení mechanických vlastností odpadů a jinak upravovaných odpadů (např. pro zatřídění odpadů na skládku), z čeho plyne absence požadavků na tyto vlastnosti. Nicméně nedosažení dostatečné pevnosti je indikátorem slabé mikrostruktury a nedokonalé hydratace solidifikátu, co může mít za následek zvýšenou vyluhovatelnost kontaminantů. Požadavky na pevnost v tlaku se liší v závislosti na konečném použití solidifikátů. Jednou z podmínek v USA, kterou musí odpad splňovat, aby mohl být uložen na skládku, je minimální hodnota pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání 0,35 MPa (US EPA). V Nizozemí a ve Francii tato hodnota činí 1 MPa. Odpady stabilizované cementem, které lze využít při provádění základových vrstev silnic ve Velké Británii, musí splňovat taky určité minimální 7denní pevnosti v tlaku.

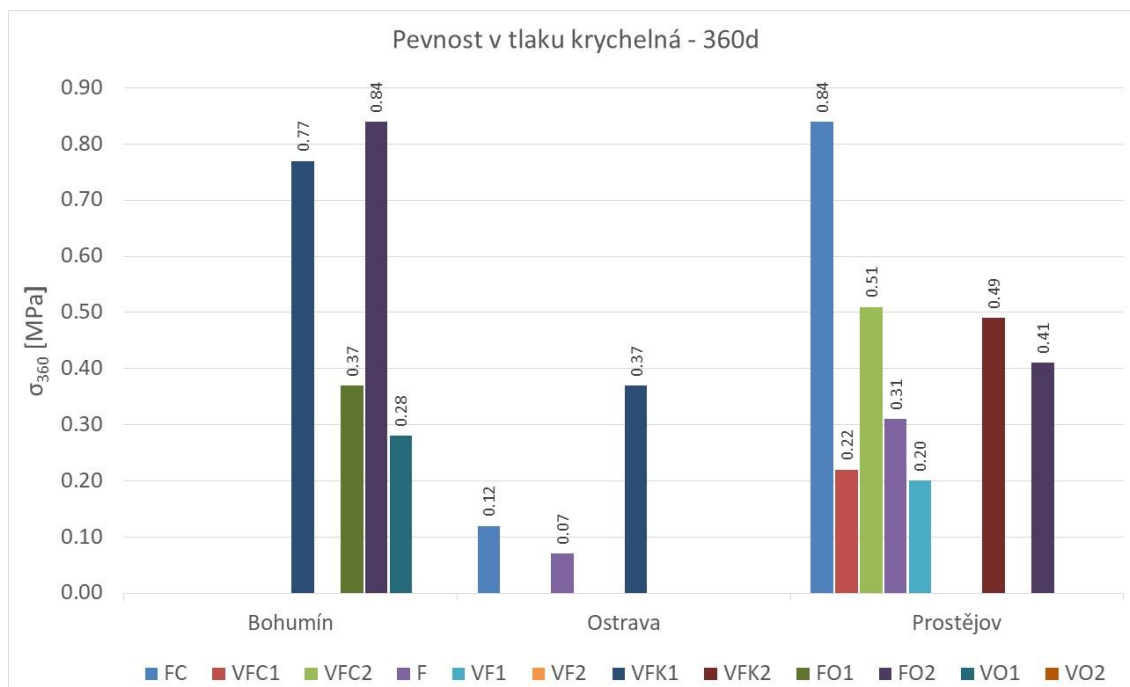


Obr. 6 Pevnost v tlaku solidifikátů připravených dle základních receptur (28 d)

Od každé receptury byly zkoušeny tři vzorky po 28 dnech zrání (Obr. 6) a ve druhém pololetí roku 2022 tři vzorky po 60 dnech zrání (Obr. 7), přičemž uvedená výsledná hodnota pevnosti je tedy průměrem výsledků třech měření. Všechny vzorky byly až do okamžiku jejich zkoušení uloženy v laboratorním prostředí. Vzorky solidifikátů, které si zachovaly svůj tvar a nedošlo k jejich rozpadu ani po 360 dnech, byly podrobeny také zkoušce pevnosti v tlaku (Obr. 8), především za účelem predikování mechanických vlastností solidifikátu v čase.



Obr. 7 Pevnost v tlaku solidifikátů připravených dle základních receptur (60 d)

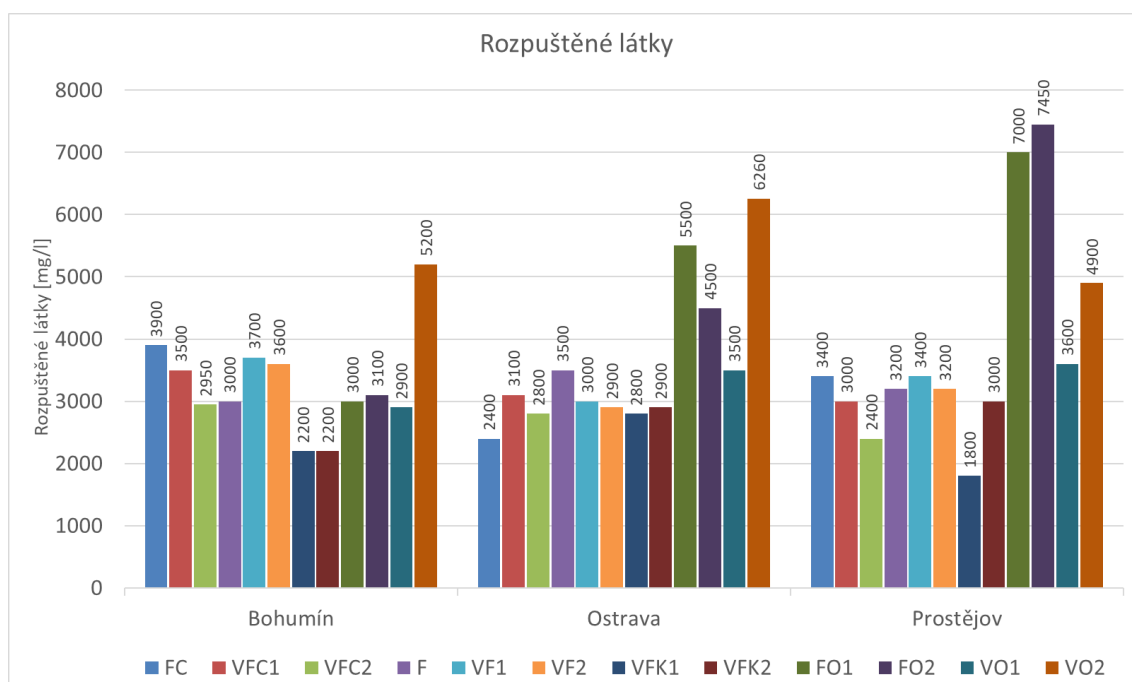


Obr. 8 Pevnost v tlaku solidifikátů připravených dle základních receptur (360 d)

2.7.2.2 Vyluhovatelnost (ČSN EN 12457-4)

Zkoušky vyluhovatelnosti jsou jedny ze základních testů, podle kterých si jednotlivé národní legislativy vytvářejí a vytvářejí kritéria pro další využitelnost průmyslových odpadů. Při překročení určitých legislativních kritérií už nelze s daným odpadem zacházet jako s druhotnou surovinou, ale jako s nebezpečným odpadem.

Českou a slovenskou legislativou je předepsána ČSN EN 12457-4 (838005) - Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 4: Tento typ zkoušky řadíme mezi statické (extrakční) testy vyluhovatelnosti, které stanovují množství loužícího media po předepsanou dobu v kontaktu se stanoveným množstvím odpadu, bez obnovování media. Následující obrázek uvádí množství RL ve vodních výluzích solidifikátů připravených dle základních receptur, přičemž nejvyšší množství RL ve svém výluhu vykazovaly solidifikáty připravené dle receptur F01, F02 a V01, kdy byla u některých NK překročena výluhová třída IIb. U žádné ze základních receptur nebyl překročen limit množství RL odpovídající třídě vyluhovatelnosti IIa.



Obr. 9 Grafické zobrazení množství RL [mg/l] ve vodních výluzích solidifikátů namíchaných dle základních receptur

2.7.2.3 Prvková analýza vodného výluhu

Analýza vodného výluhu solidifikátů byla posuzována i na základě limitů uvedených v TN 09.11.02. Receptury, jejichž výluhy překročily nejvyšší přípustné množství prvků. Receptury zde neuvedené nevykazovaly ve výluzích vyšší koncentraci stanovovaných prvků.

Tab. 21 Limitní hodnoty vodného výluhu uvedené v TN 09.11.02 (Tabulka 8a)

Prvek	Nejvyšší přípustné množství [mg/l]
Ag	0,1
As	0,1
Ba	1,0
Be	0,005
Pb	0,1
Cd	0,005
Cr celkový	0,1
Co	0,1
Cu	1,0
Ni	0,1
Hg	0,005
Se	0,05
V	0,2
Zn	3,0
Sn	1,0

Tab. 22 Receptury (NK BOHUMÍN), jejichž vodný výluh překračuje limity uvedené v TN

NK	BOHUMÍN						
Prvek/Receptura	FC	VFC1	F	VF1	VF2	FO2	VO2
As	0,116	0,13	-	0,11	-	-	-
Ni	-	0,108	-	-	-	-	-
Se	-	0,095	-	-	0,095	0,083	0,128
Hg	0,033	0,033	0,032	0,028	0,03	-	-

Tab. 23 Receptury (NK PROSTĚJOV, NK OSTRAVA), jejichž vodný výluh překračuje limity uvedené v TN

NK	PROSTĚJOV					OSTRAVA			
Prvek/Receptura	VFC1	VFK1	FO1	VO1	VO2	FO1	FO2	VO1	VO2
celkový Cr	0,282	0,177	0,16	0,24	0,466	-	-	-	0,168
Se	0,183	-	0,11	0,103	0,136	0,077	0,105	0,062	0,176

2.8 Výběr vhodných receptur

Při hodnocení receptur dle zkoušky vyluhovatelnosti dle limitů uvedených v příslušných TN byly zjištěny kritické hodnoty ukazatelů u solidifikátů různých NK rozdílné. U odpadu NK BOHUMÍN se jednalo o prvky Hg, Se, As, kdy u některých receptur byly překročeny povolené limitní hodnoty dle příslušných TN (TN 09.11.02). Jako bezproblémové se prokázaly receptury VFC2, VFK1, VFK2, F01, V01. U odpadního kalu PROSTĚJOV byli kritickými ukazateli Se a Cr, limitní hodnoty nebyly překročeny u žádných ukazatelů u receptur VF2 a VFK2. U odpadu NK OSTRAVA byly kritické ukazatele opět Cr a Se, jako bezproblémové se prokázaly receptury FC, VFC1, VFC2, F, VF1, VFK1, VFK2. Množství RL ve výluzích, u všech těchto receptur, nepřesáhlo hodnotu 5000 mg/l, lze je tedy zařadit do třídy vyluhovatelnosti IIb.

Z hlediska výsledků provedených laboratorních zkoušek se jako nejvhodnější neutralizační kal z aktivního zdroje pro další využití a vývoj tří funkčních vzorků v podobě tří certifikovaných výrobků jeví NK OSTRAVA a NK BOHUMÍN. Konkrétně pro odpad OSTRAVA se jako nejvhodnější prokázala receptura VFC2 a VFK1, kdy tyto receptury dosahovaly dostatečně vysokých pevností, v rámci zkoušky vyluhovatelnosti prokázaly dobré výsledky a nepřekročily limity stanovené vybranými technickými návody. Složení vybraných receptur je uvedeno v následující tabulce. U odpadního kalu BOHUMÍN prokázala nejlepší výsledky receptura VFC2, která dosahovala dostatečných hodnot pevností v tlaku, měla příznivé výsledky testu vyluhovatelnosti a vyhověla také zkoušce akutní toxicity.

Pomocí zkoušky vyluhovatelnosti a akutní toxicity byl sledován možný negativní vliv solidifikátů na ŽP. Avšak při výběru vhodných receptur se přihlíželo i na množství použitých druhotných surovin a na druh použitého NK v souvislosti s kumulativním zatěžováním ŽP v okolí aktivního zdroje.

Tab. 24 Složení vybraných receptur

Vybraný neutralizační kal	BOHUMÍN	OSTRAVA	
Složení [%] / Označení receptury	VFC2	VFC2	VFK1
Neutralizační kal	50	50	50
Vysokoteplotní popílek Chvaletice	20	20	15
Fluidní popílek Hodonín	25	25	25
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5R	5	5	-
Karbidové vápno	-	-	10

Tab. 25 Přehled vlastností solidifikátů připravených dle vybraných receptur

<i>Vybraný neutralizační kal</i>	BOHUMÍN	OSTRAVA	
Vlastnosti/ Označení receptury	VFC2	VFC2	VFK1
<i>Ztráta sušením [%]</i>	-	8,84	14,28
<i>pH (25°C)</i>	-	9,8	10,0
<i>El. konduktivita [mS/m]</i>	496	272	259
<i>Rozpuštěné látky [mg/l]</i>	2890	2670	2530
<i>Pevnost v tlaku 28d [MPa]</i>	1,1	1,2	1,1
<i>Objemová hmotnost 28d [kg/m³]</i>	990	1000	980

Odpadní NK PROSTĚJOV nebyl doporučen z následujících důvodů:

- velmi nízké hodnoty pevností v tlaku – docházelo k rozpadu některých vzorků již po 28 dnech zrání,
- špatné manipulační pevnosti vzhledem k možnosti dalšího využití solidifikátů,
- velké množství RL ve vodném výluhu → vysoká el. konduktivita,
- vysoké hodnoty ukazatelů Se, Cr ve vodném výluhu.

2.9 Experimentální prověření vybraných a modifikovaných receptur

V další části laboratorního ověření ve druhém pololetí roku 2022 byly tři vybrané receptury podrobněji laboratorně prověřeny. Provedené zkoušky byly vybírány především na základě požadavků souvisejících s certifikací solidifikátu dle NV č. 163/2002 Sb.

V rámci posouzení vlivu množství cementu na vlastnosti solidifikátů byly navrženy a následně připraveny dvě modifikované receptury. Jedná se o snížení množství NK a zvýšení množství cementu u vybrané receptury VFC2, přičemž složení receptur O, B zobrazuje Tab. 26. V důsledku vyšší dávky cementu bylo zapotřebí přidat více vody pro dosažení požadované konzistence solidifikační směsi. Výsledné vlastnosti solidifikátů připravených dle těchto receptur slouží pro srovnání s vlastnostmi solidifikátu namíchaných dle vybraných receptur. Nicméně, složení receptur O, B je ekonomicky i ekologicky méně přijatelné – vysoký obsah cementu.

Tab. 26 Složení modifikovaných receptur

<i>Vybraný neutralizační kal</i>	OSTRAVA	BOHUMÍN
<i>Složení [%] / Označení receptury</i>	O	B
NK	40	40
VP_{CHVAL}	20	20
FP_{HOD}	25	25
CEM	15	15
<i>Voda [% z mn. pojiva]</i>	54	56

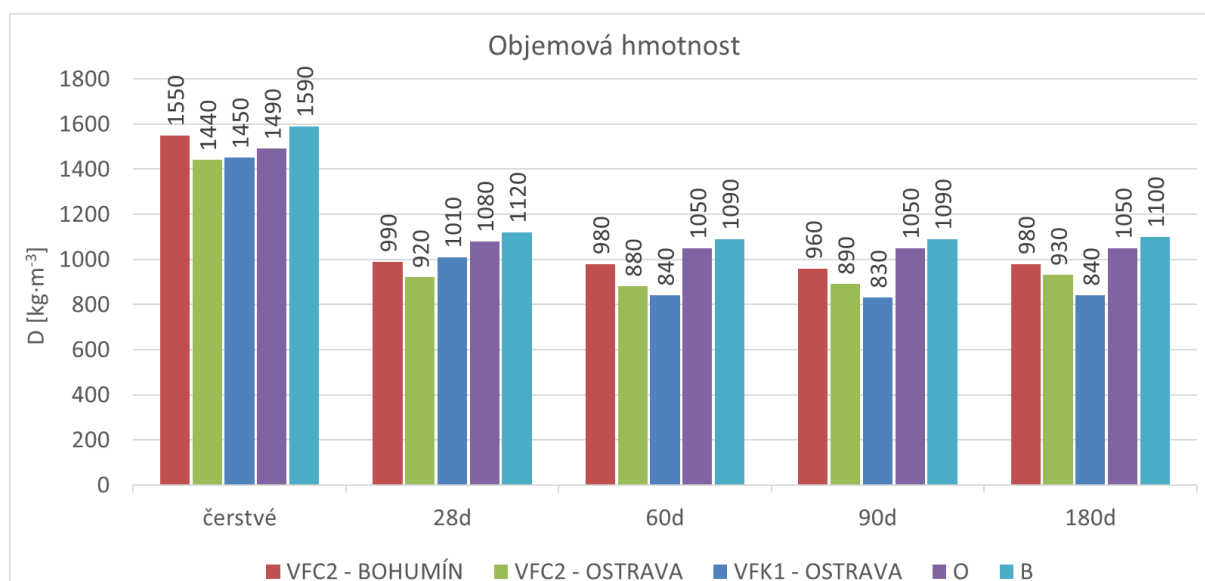
2.9.1 Fyzikálně-mechanické požadavky

Fyzikálně-mechanické požadavky na solidifikát vycházejí z jeho budoucího využití. Na základě výsledků zkoušek uvedených v diagramu níže se vymezí technologické vlastnosti výrobku – solidifikátu z NO. Především na základě výsledků zkoušek prověřujících fyzikálně-mechanické vlastnosti solidifikátu se určí jeho nejvhodnější využití. Mezi zkoušky, pomocí kterých se podrobně prověří fyzikálně-mechanické požadavky na solidifikát patří stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku, propustnosti, poměru únosnosti a maximální objemové hmotnosti pomocí Proctorovy zkoušky.

2.9.1.1 Objemová hmotnost (ČSN EN 12390-7)

Objemová hmotnost (OH) je druhým parametrem, vypovídajícím o fyzikálně-mechanických vlastnostech solidifikátů. Stanovení OH se provádělo na krychlích 100 x 100 x 100 mm. Z Obr. 10 je vidět, že solidifikáty s vyšším obsahem cementu (receptury O, B) mají vyšší OH než ostatní receptury. Nejvyšší OH vykazovaly solidifikáty po 28 dnech zrání, kdy ještě nebyla zcela odpařena fyzikálně vázaná voda a hydratační reakce ještě neproběhly úplně. Solidifikáty s obsahem NK BOHUMÍN se vyznačovaly o něco vyšší OH, v důsledku rozdílných fyzikálních a chemických vlastností vstupních odpadů. OH solidifikátů je srovnatelná s OH lehkého kameniva – keramzitu.

Obr. 10 zobrazuje OH solidifikátů i v čerstvém stavu (v okamžiku naplnění solidifikační směsí do kovové trojformy – “0 d”). Po 28 dnech zrání se OH snížila přibližně o 400 kg·m⁻³ především v důsledku odpaření volné vody. V dalším časovém horizontu (uložení v lab. prostředí) se OH příliš neměnila.

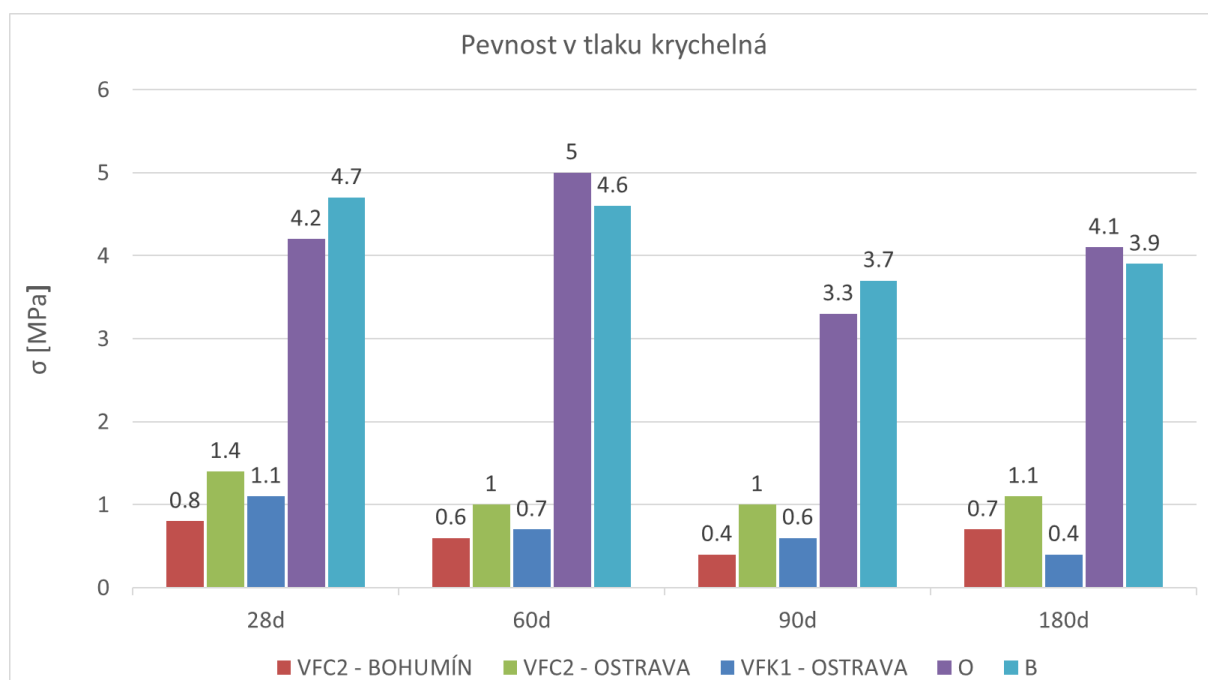


Obr. 10 Výsledky objemové hmotnosti solidifikátů o různém stáří

2.9.1.2 Pevnost v tlaku – krychelná (ČSN EN 12390-3)

Obr. 11 ukazuje výsledky pevnosti v tlaku – krychelné tří vybraných a dvou modifikovaných receptur v závislosti na době zrání solidifikátů. Každý ze vzorků (krychle 100 x 100 x 100 mm) byl až do okamžiku zatěžování na zkušebním lisu uložen v laboratorním prostředí. Solidifikáty obsahující ve své struktuře méně NK a více cementu vykazovaly lepší pevnosti, a to přibližně o 3 až 4 MPa. Více cementu v matrici solidifikátu zabezpečilo větší množství potřebných ve vodě nerozpustných hydratačních produktů a efektivnější inkorporaci kontaminantů. Téměř u všech receptur je zjevný nárůst pevnosti po 180 dnech zrání, pravděpodobně v důsledku obsahu popílků – pomalejší nárůst pevností než u cementu.

Obr. 11 zobrazuje závislost pevnosti v tlaku na množství cementu solidifikátů vycházejících z receptury VFC2 (OSTRAVA)



Obr. 11 Pevnosti v tlaku solidifikátů připravených dle tří vybraných a dvou modifikovaných receptur v různém stáří

2.9.1.3 Propustnost – filtrační koeficient (ČSN CEN ISO/TS 17892-11)

Propustnost byla stanovena na zkušebních tělesech tvaru válce ($\varnothing$ 120 mm, h=70 mm), přičemž jejich příprava probíhala stejně, jako tomu bylo u vzorků určených pro stanovení pevnosti v tlaku (krychelné) – solidifikační směs měla stejnou konzistenci. Rozdíl byl pouze v tom, že solidifikační směs se plnila do přesně nařezaných trub kruhového průřezu z HDPE (vnitřní $\varnothing$ 120 mm), které posloužily jako formy. Naplněné formy byly následně uloženy do vlhkého prostředí ($\phi=90\%$) a byly odformovány po 7 dnech zrání.

Propustnost se vyjadřuje jako koeficient permeability nebo hydraulická konduktivita, přičemž se stanovuje rychlost v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, při které je voda schopna protékat skrz propustný materiál. Tento parametr je měřítkem schopnosti materiálu propouštět tekutiny přes jeho strukturu. Solidifikáty na bázi cementu mají určitou schopnost zadržet vodu uvnitř své struktury a tím zabránit nadměrnému vyluhování. Stanovení propustnosti je důležité hlavně při provedení solidifikace kontaminovaných zemin, aby se vyloučilo uvolňování kontaminantů do podkladních vrstev a podzemní vody. Propustnost stabilizovaného/solidifikovaného odpadu je ovlivněna především distribucí velikosti částic, poměrem K/P, mírou zhutnění, produkty

hydratace, homogenitou materiálu a v případě soudržného monolitického materiálu množstvím a redistribucí trhlin.

S ohledem na budoucí využití solidifikátu je požadována co nejmenší propustnost.

Přirozená geologická bariéra u skupin skládek S-NO musí vykazovat koeficient filtrace $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s, u skupin skládek S-IO je tato hodnota požadována $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Z výsledků propustnosti uvedených v Tab. 27 plyne, že solidifikát by mohl nahradit zhuťné zeměiny používané jako geologická bariéra skládek odpadů, při použití vhodné konzistence (zpevněný zásyrový materiál) a vhodné technologie (dostatečné zhuťnění).

Tab. 27 Výsledky propustnosti solidifikátů

Ozn. receptury	VFC2 - OSTRAVA	VFC2 - BOHUMÍN	VFK1 - OSTRAVA	O	B
Filtr. koeficient k [m/s]	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$

Z výsledků je zjevná souvislost mezi pevností v tlaku a propustností solidifikátu. Solidifikáty s vyšším obsahem cementu (O, B) vykazovaly i v důsledku vyšší pevnosti lepší nepropustnost, jež je požadována u ve většiny možných aplikací solidifikátu.

2.9.2 Ekologické požadavky

Mezi ekologické požadavky se řadí požadavky na ŽP a s tím související požadavky na bezpečnost a ochranu zdraví osob a zvířat. Prověření vlastností solidifikátu z hlediska ekologických požadavků, uvedených v národní legislativě se provádí na základě stanovení obsahu radionuklidů, zkoušky vyluhovatelnosti, stanovení koncentrace škodlivin v sušině a zkoušky ekotoxicity.

2.9.2.1 Vyluhovatelnost (ČSN EN 12457-4)

Zkouška vyluhovatelnosti se prováděla stejně jako u experimentálního prověření základních receptur a při identifikaci vstupních NO. Stanovení vykonala akreditovaná zkušební laboratoř a výsledky (Tab. 28) byly srovnány s limity uvedenými v TN 09_11_02 (Tab. 8a) a ve vyhlášce č. 273/2021 Sb., příloze č. 2 (Třída vyluhovatelnosti IIb). Vzorky byly ve stáří 28 dní.

Tab. 28 Vyhodnocení zkoušky vyluhovatelnosti

Sledované parametry /Označení receptury	VFC2 - BOHUMÍN	VFC2 - OSTRAVA	VFK1 - OSTRAVA	O	B	limit dle tab. 8a (TN)	limit pro tř. vyluh. IIb
pH (25 °C)	11,3	9,8	9,7	11,6	11,5	-	≥6
Rozpuštěné látky (RL) [mg/l]	2450	2980	2990	866	1840	-	6000
Chloridy [mg/l]	904	45,9	27,8	46,1	598	-	1500
Fluoridy [mg/l]	0,44	0,5	0,38	0,45	0,51	-	15
Sírany [mg/l]	122	1760	1430	466	87,6	-	2000
Ag [mg/l]	<0,01	0,014	0,026	<0,01	<0,01	0,1	-
As [mg/l]	<0,001	0,0041	0,0067	0,0025	<0,001	0,1	0,2
Ba [mg/l]	0,152	0,127	0,081	0,0077	0,122	1,0	10
Be [mg/l]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	-
Cd [mg/l]	0,00017	0,00013	0,0105	<0,0001	0,0001	0,005	0,1
Co [mg/l]	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,1	-
Cr celkový [mg/l]	<0,03	<0,03	<0,03	0,1	<0,03	0,1	1
Cu [mg/l]	0,025	0,111	0,374	0,14	0,023	1,0	5
Ni [mg/l]	<0,02	<0,02	0,0167	<0,02	<0,02	0,1	1
Pb [mg/l]	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,1	1
Mo [mg/l]	0,0868	0,0601	0,0809	0,0313	0,0713	-	1
Sb [mg/l]	<0,001	0,0037	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,07
Se [mg/l]	0,0019	0,0067	0,0069	0,0038	<0,001	0,05	0,05
V [mg/l]	<0,01	0,015	<0,01	0,039	<0,01	0,2	-
Zn [mg/l]	<0,02	<0,02	0,0029	<0,02	<0,02	3,0	5
Hg [mg/l]	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0003	0,0001	0,005	0,02
DOC [mg/l]	23	54	65	33	16	-	80

V porovnání s výsledky zkoušky vyluhovatelnosti vstupních NO (NK BOHUMÍN, NK OSTRAVA) je u solidifikátů nižší koncentrace některých parametrů ve výluhu (sírany, rozpuštěné látky). Vodné výluhy solidifikátů O, B obsahovaly nejméně RL, síranů, As a Cu – vyšší množství cementu v matrici solidifikátů zabezpečilo vyšší pH a lepší inkorporaci a stabilitu potenciálně nebezpečných látek. Avšak vyšší množství cementu způsobuje i vyšší obsah celkového Cr ve výluhu. Na základě výsledků uvedených v Tab. 28 lze zhodnotit, že všech pět receptur splnilo limity dané TN 09_11_02 (Tab. 8a) a vyhláškou č. 273/2021 Sb. (příloha č. 10 (Třída vyluhovatelnosti IIb)).

3 Experimentální ověření využití popílků pro umělé kamenivo

3.1 Vlastnosti vstupních surovin

V této části zprávy budou uvedeny významné parametry zkoušených popílků, které mají hlavní vliv na výsledné vlastnosti popílkového střeptu.

Tab. 29 Výpis zkoušených druhů popílků

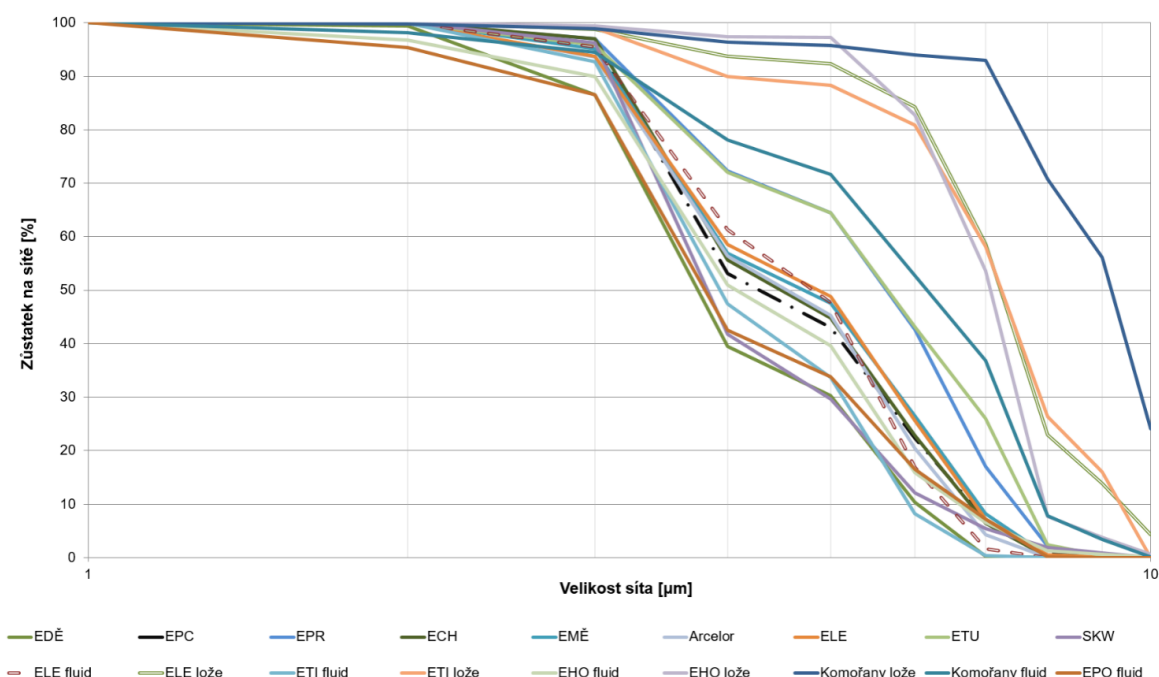
Označení	Závod	Typ popílku
EDĚ	elektrárna Dětmárovice	vysokoteplotní, černouhelný
EPC	elektrárna Počerady	vysokoteplotní, hnědouhelný
EPR	elektrárna Prunéřov	vysokoteplotní, hnědouhelný
ELE K3	elektrárna Ledvice	vysokoteplotní, hnědouhelný
ETU	elektrárna Tušimice	vysokoteplotní
SKW	elektrárna i teplárna Skawina (PL)	vysokoteplotní, černouhelný
NH	teplárna Arcelormittal (Nová Huť)	vysokoteplotní, černouhelný
ECH	elektrárna Chvaletice	vysokoteplotní, hnědouhelný
EOP	elektrárna Opatovice	vysokoteplotní, hnědouhelný
EMĚ	elektrárna Mělník	vysokoteplotní, hnědouhelný
ETI úletový	elektrárna Tisová	fluidní, hnědouhelný
ETI ložový	elektrárna Tisová	fluidní (lože), hnědouhelný
ELE K4 úletový	elektrárna Ledvice	fluidní, hnědouhelný
ELE K4 ložový	elektrárna Ledvice	fluidní (lože), hnědouhelný
EPO	elektrárna Poříčí	fluidní, hnědouhelný
EHO	elektrárna Hodonín	fluidní, hnědouhelný
Kladno	elektrárna Kladno	fluidní, hnědouhelný
Komořany	elektrárna Komořany	fluidní, hnědouhelný

Jako základní korekční složky byly testovány jíl, cement a pálené vápno pro zvýšení manipulačních pevností čerstvě namíchaných zkušebních vzorků, dále také černouhelný prach a popílek z Arcelormittal Ostrava. Černouhelný prach má zjevně jemnost srovnatelnou

s popílky nebo i vyšší, vzhledem ke své nízké objemové hmotnosti však není bezpečně měřitelná používanými metodami.

V následujících grafických přehledech jsou uvedeny hlavní parametry, kterými jsou granulometrie, ztráta sušením, ztráta žháním, sypná hmotnost a chemický rozbor.

Na následujícím obrázku je uvedena granulometrie zkoušených druhů popílků s tím, že čerchovaně jsou zvýrazněny jednotlivé typy popílků z elektrárny Tušimice II, čárkovane jednotlivé typy popílků z elektrárny Ledvice.



Obr. 12 Granulometrie různých druhů popílků

Z grafického porovnání je zřejmé, že mezi kvalitní jemné popílky patří vzorky z elektráren Dětmárovice a Skawina. Na druhé straně velmi hrubé jsou vzorky ložového popela z Ledvic. Velmi důležitým aspektem vhodnosti popílků pro technologii výroby umělého kameniva spékáním je chemické složení. Výsledky stanovení jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 30 Fyzikálně-mechanické parametry a chemické složení zkoušených popílků

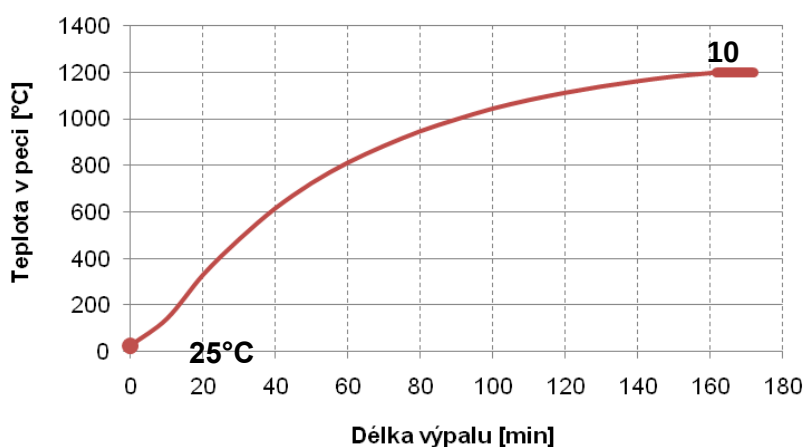
	Sypná hmotnost			Měrný povrch	Chemické složení [%]									
	ZŽ	volně sypaná	setřesená	[m².kg ⁻¹]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	
Vysokoteplotní popeloviny														
Dětmarovice	1.26	1070	1190	362	58.20	27.30	7.06	0.43	6.04	2.62	3.21	0.55	0.46	
Počerady	1.07	910	1110	299	54.60	29.50	5.46	0.08	1.81	0.96	1.34	0.25	0.11	
Prunéřov	1.07	870	940	224	47.60	25.00	12.70	0.54	2.29	1.37	1.35	0.33	1.23	
Ledvice	1.19	870	990	329	47.70	28.20	5.61	0.13	1.10	0.81	1.04	0.23	0.14	
Tušimice		940	1050	234	50.00	23.40	14.50	0.26	3.42	1.72	1.06	0.29	0.16	
Skawina	0.29	890	1020	227	49.60	23.10	6.36	0.63	4.19	2.69	2.85	1.17	0.44	
Arcelormittal	27.12	680	810	398	36.00	16.40	8.85	0.42	5.04	2.99	1.76	0.39	0.12	
Chvaletice	1.04	810	920	334	50.16	27.54	13.08	0.07	2.51	1.46	1.35	0.35	0.19	
Opatovice	2.01	850	940	312	52.50	26.50	6.05	0.05	1.38	0.94	1.69	0.32	0.12	
Mělník	1.07	830	930	242	53.71	30.94	6.00	0.05	2.08	1.28	1.67	0.28	0.24	
Fluidní popeloviny														
Tisová	2.04	580	640	361	27.60	17.50	5.63	7.57	30.40	0.84	0.46	0.33	0.25	
Tisová - ložový	0.44	1710	1800	24	34.05	16.40	8.89	7.18	22.55	1.01	0.34	0.38	0.17	
Ledvice	2.08	650	770	353	42.70	26.80	5.05	2.98	10.20	0.86	0.86	0.35	0.18	
Ledvice - ložový	4.23	970	1210	33	42.30	26.70	5.22	3.06	10.30	0.88	0.83	0.29	0.18	
Poříčí	0.67	520	640	347	39.12	19.92	5.63	7.05	19.41	1.08	1.44	0.34	0.27	
Hodonín	3.94	560	640	321	36.90	13.60	4.92	6.12	20.10	1.31	4.92	0.65	0.66	
Kladno	2.60	620	740	305	37.07	25.43	5.40	4.70	19.00	1.69	0.57	0.31	0.31	
Komořany	2.20	680	820	340	44.18	23.31	9.44	4.29	11.23	1.29	1.10	0.35	0.30	

Tab. 31 Vliv použitých druhů popílků na životní prostředí

Vzorek	Ztráta sušením 105 °C	Rozpuštěné látky	Chloridy	Sírany	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo	Rtuť
Jednotka	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Vysokoteplotní popeloviny										
EPR	0.29	794	2.1	501	< 0,001	0.016	< 0,03	0.227	< 0,05	0.0001
EPC	0.26	264	5.6	171	< 0,001	< 0,005	< 0,03	0.041	< 0,05	< 0,0001
ETU	0.25	268	< 1	398	< 0,0046	0.00076	< 0,03	0.082	< 0,001	< 0,0001
ELE	0.14	234	1.5	134	0.0029	0.0017	< 0,03	0.133	< 0,001	< 0,0001
ArcelorMittal	0.41	2110	5.9	229	0.0022	0.00037	0.081	< 0,02	0.0014	0.0001
ECH	0.20	247	2.0	160	0.0054	0.0022	< 0,03	0.09	< 0,001	< 0,0001
EDE	0.09	176	1.2	124	< 0,005	< 0,004	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,0005
EMĚ	0.17	205	1.6	110	0.0041	0.0031	< 0,03	0.103	< 0,001	< 0,0001
SKW	0.99	340	1.8	140	0.0067	0.0001	0.129	< 0,02	< 0,001	0.0001
Fluidní popeloviny										
ELE	2.61	3420	3.0	1340	0.002	0.00041	0.107	< 0,02	0.0017	0.0003
ELE L	0.37	5570	21.5	1780	< 0,001	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
ETI	0.16	4530	8.2	2030	0.0022	0.00036	0.075	< 0,02	0.0024	< 0,0001
ETI L	0.44	5750	17.5	2240	< 0,001	< 0,0001	< 0,03	< 0,02	< 0,001	< 0,0001
EHO	1.76	3981	4.6	2240	0.0065	< 0,0001	0.059	< 0,02	0.0069	< 0,0001

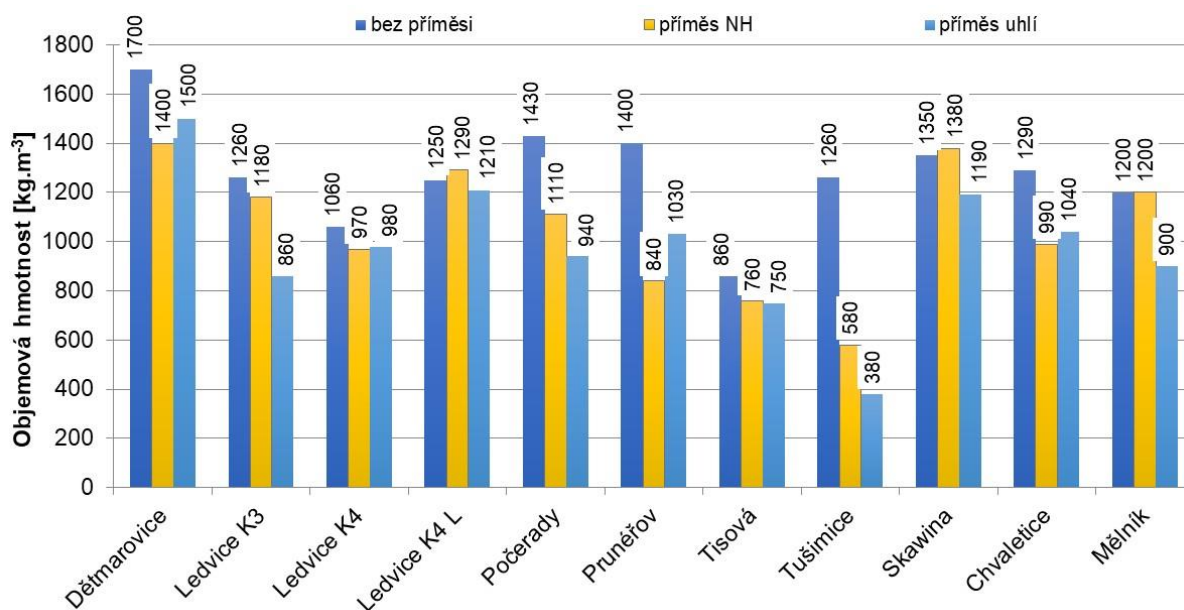
3.2 Laboratorní výpal zkušebních vzorků na bázi popílků

V předchozí části bylo hodnoceno předsušení zkušebních vzorků popílků. V této části bude ověřen vliv jak samotného popílku, tak i různých typů příměsí na fyzikálně-mechanické vlastnosti vypáleného střepu. Zkušební vzorky byly vypalovány v muflové peci s poměrně strmou teplotní křivkou výpalu. Doba výpalu je charakterizována počáteční teplotou 25 °C, maximální rychlostí výpalu, které je muflová pec schopna (cca 8,0 °C/min.) a izotermickou výdrží na teplotě 1150 °C po dobu 10 min, což dohromady stanovilo dobu výpalu na 160 min ±2 min. Tyto parametry výpalu byly zvoleny s ohledem na velmi vysokou rychlost výpalu na aglomeračním roštu a pro všechny navržené receptury jsou konstantní. Po výpalu a přirozeném vychladnutí se vzorky vyjmou z pece a umístí do exsikátoru. Po ustálení jejich teploty bude stanovena objemová hmotnost, pevnost v prostém tlaku a nasákavost.



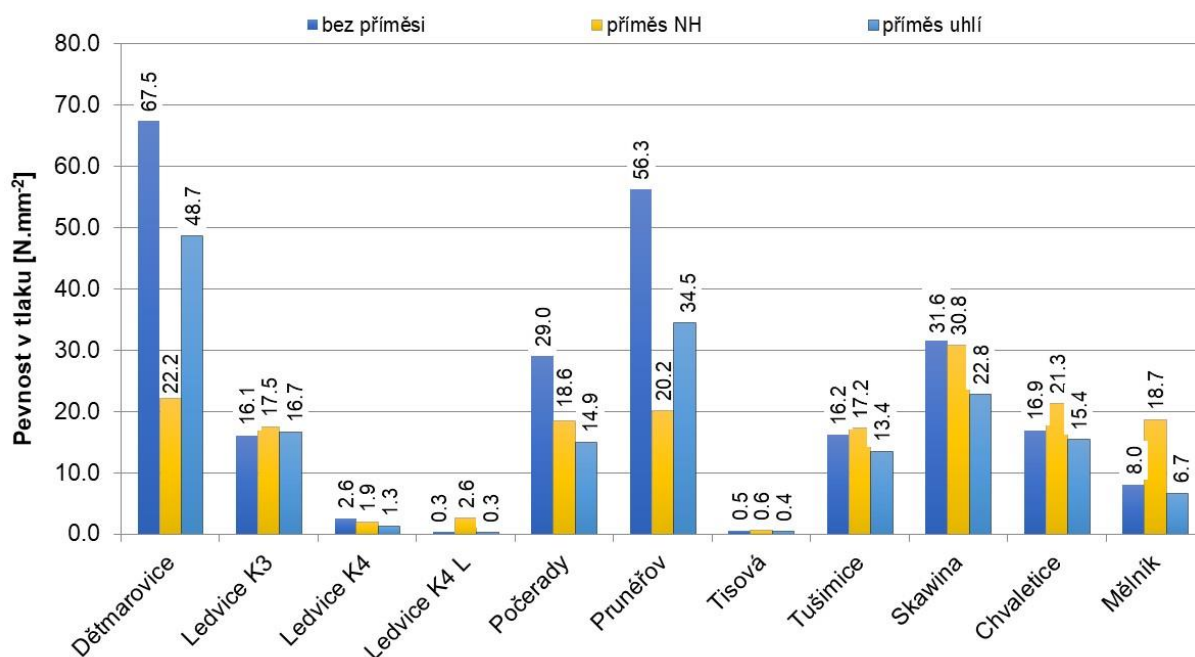
Obr. 13 Teplotní křivka výpalu popílkových směsí

Na následujícím obrázku jsou uvedeny výsledky stanovení objemové hmotnosti vzorků popílků s vybranými příměsemi.

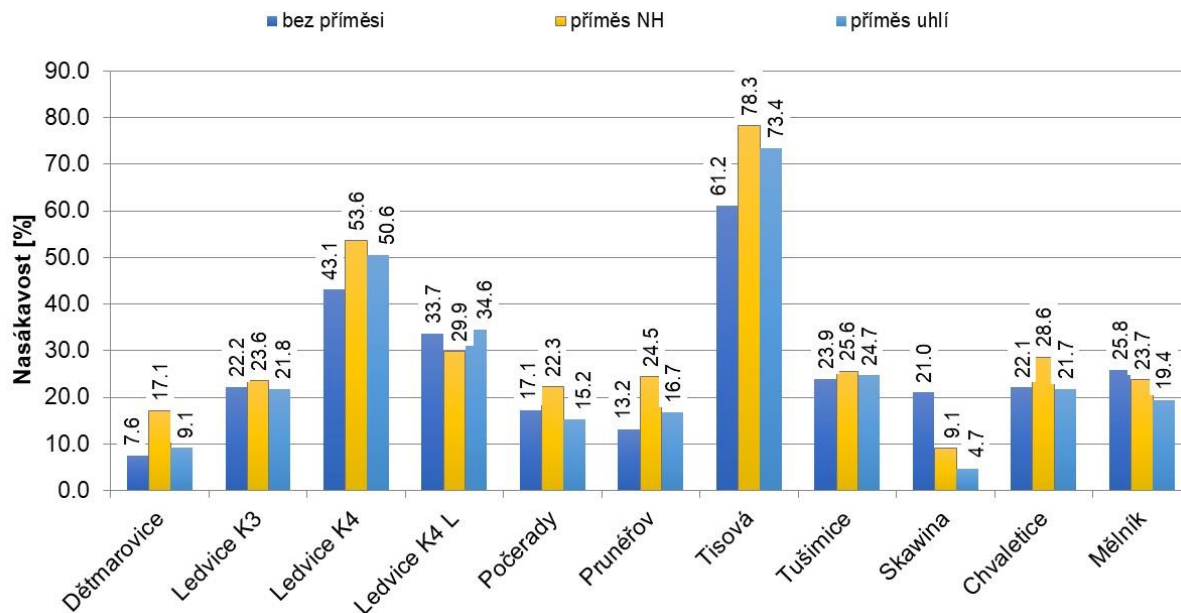


Obr. 14 Objemová hmotnost vypálených zkušebních vzorků

Z výsledků je zřejmé, že příměs jílů mírně zvyšuje objemovou hmotnost, zatímco příměs cementu a vápna spíše snižují tento parametr vlivem rozkladu hydratačních produktů. Vzorky z poměrně hrubých popelů z fluidního způsobu spalování nedosahovali po výpalu manipulační pevnosti. Jednalo se zejména o popílků z elektrárny Hodonín.



Obr. 15 Pevnost v tlaku vypálených zkušebních vzorků



Obr. 16 Nasákavost vypálených zkušebních vzorků

Z výsledků je zřejmé, že kvalitního střepu je dosaženo při použití kvalitních vysokoteplotních popílků, kterými jsou vzorky z elektrárny Dětmárovice, Ledvice, Prunéřov, Počerady a jemného popílku z druhého elektroodlučovače elektrárny Tušimice. Fluidní popílků dosahují z důvodu své neuspořádané struktury nesrovnatelně nižších pevností. Příměs jílu zvyšuje pevnosti vypálených vzorků popílků, příměs cementu nebo vápna tento parametr obvykle výrazně nesnižuje. Oslabuje však strukturu rozkladem hydratačních produktů, a kromě snížení pevnosti, zvyšuje i nasákavost. V případě vzorků na bázi fluidního popílku z elektrárny Tisová, Hodonín a Ledvice nebylo možné z důvodu snížení manipulační pevnosti při zkoušení nasákavosti, tento parametr měřit.

3.3 Vyluhovatelnost škodlivin

Na popílkovém střepu vyrobeném z vybraných popílků z různých tuzemských zdrojů byla provedena zkouška vyluhovatelnosti škodlivin. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následující tabulce, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Oranžová barva značí ostatní hodnoty, které všechny bezpečně splňují požadavky pro zařazení do IIa skupiny vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 273/2021 Sb.

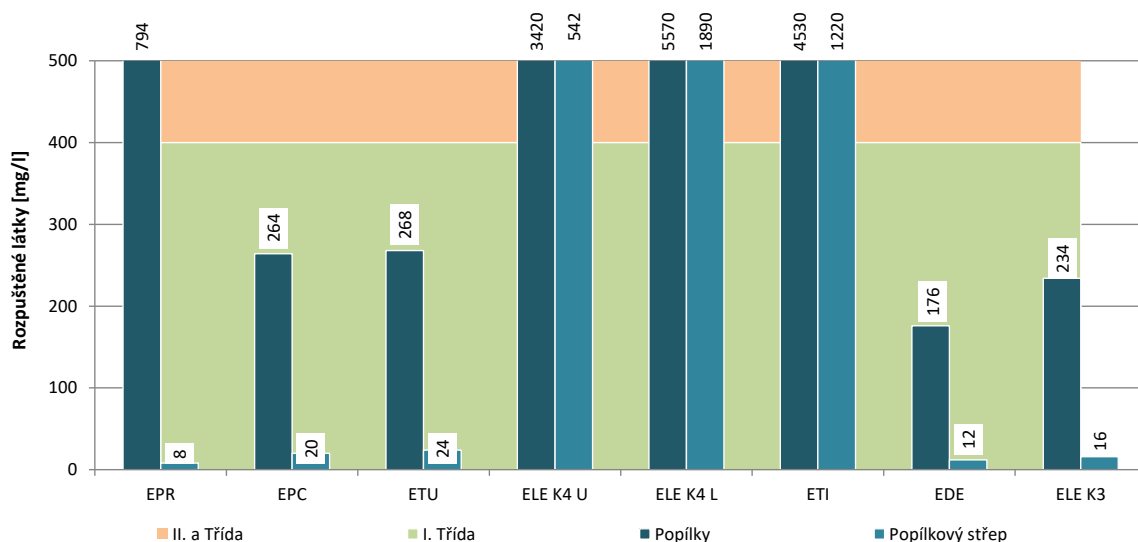
Tab. 32 Vyluhovatelnost škodlivin popílků a popílkového střepu

Vzorek	Rozpuštěné látky	Chloridy	Síraný	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo	Rtuť
Jednotka	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
vyhl. č. 273/2021 Sb.	400	80	100	0,05	0,004	0,05	0,04	0,05	0,001
EPR popílek	794	2.1	501	< 0,001	0.016	< 0,03	0.227	< 0,05	0.0001
EPR pop. střep	8	1.4	4	0.134	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
EPC popílek	264	5.6	171	< 0,001	< 0,005	< 0,03	0.041	< 0,05	< 0,0001
EPC pop. střep	20	1.1	3	0.024	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
ETU popílek	268	< 1	398	< 0,0046	0.00076	< 0,03	0.082	< 0,001	< 0,0001
ETU pop. střep	24	< 1	2	< 0,01	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
ELE K4 U popílek	3420	3	1340	0.002	0.00041	0.107	< 0,02	0.0017	0.0003
ELE K4 U pop. střep	542	< 1	372	< 0,01	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
ELE K4 L popílek	5570	21.5	1780	< 0,001	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
ELE K4 L pop. střep	1890	9.5	463	< 0,01	< 0,005	0.067	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
ETI popílek	4530	8.2	2030	0.0022	0.00036	0.075	< 0,02	0.0024	< 0,0001
ETI pop. střep	1220	4.6	761	< 0,01	< 0,005	0.062	< 0,02	< 0,05	< 0,0001
EDE popílek	176	1.2	124	< 0,005	< 0,004	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,0005
EDE pop. střep	12	< 1	6	< 0,005	< 0,004	< 0,04	< 0,04	< 0,004	< 0,0005
ELE K3 popílek	234	1.5	134	< 0,005	< 0,0002	< 0,04	< 0,04	< 0,004	< 0,001
ELE K3 pop. střep	16	< 1	4	< 0,005	< 0,0002	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,0005

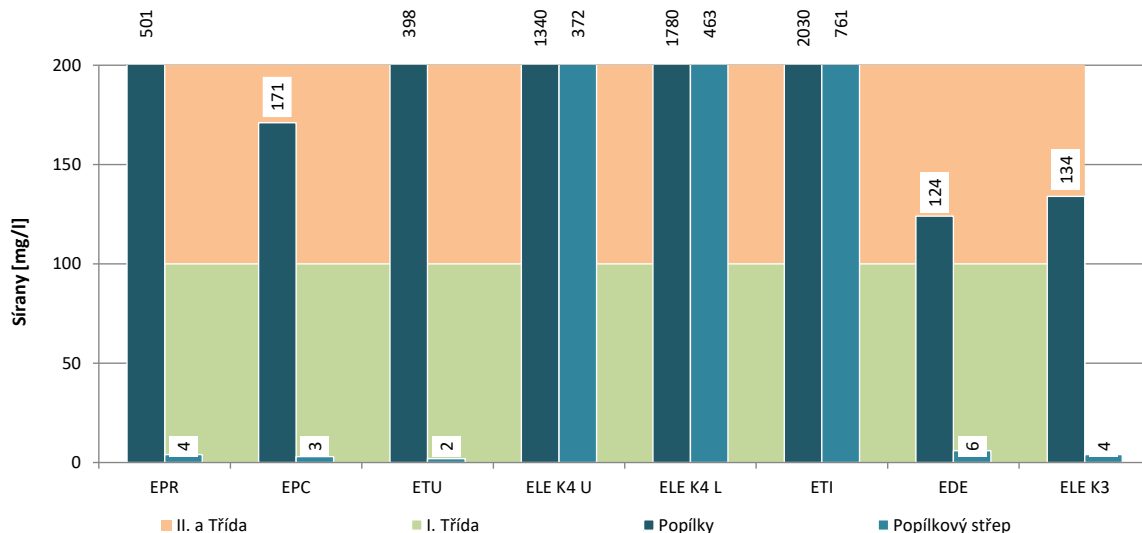
Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že většina vzorků nesplňuje požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 273/2021 Sb a to hlavně z důvodu vysoké vyluhovatelnosti síranů. Nejlepších výsledků dosáhl popílkový střep vyrobený z popílku z

elektrárny Počerady, který jako jediný popílkový střep ze zkoušených vzorků splňuje veškeré parametry pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Dobrých výsledků dosáhl také střep vyrobený z popílku z elektrárny Prunéřov, který měl pouze jeden parametr vyšší, než požaduje vyhláška pro první třídu. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u střepů vyrobených z popílků z elektráren Ledvice a Tisová.

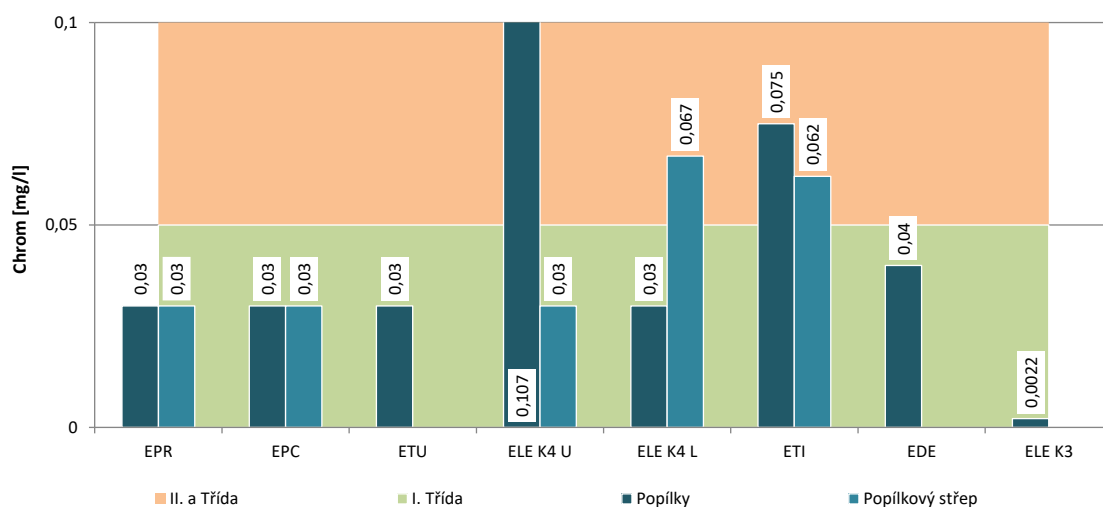
V následujících grafických přehledech je znázorněno porovnání hlavních parametrů vodných výluhů, které splňují II.a třídu dle vyhlášky č. 273/2021 Sb.



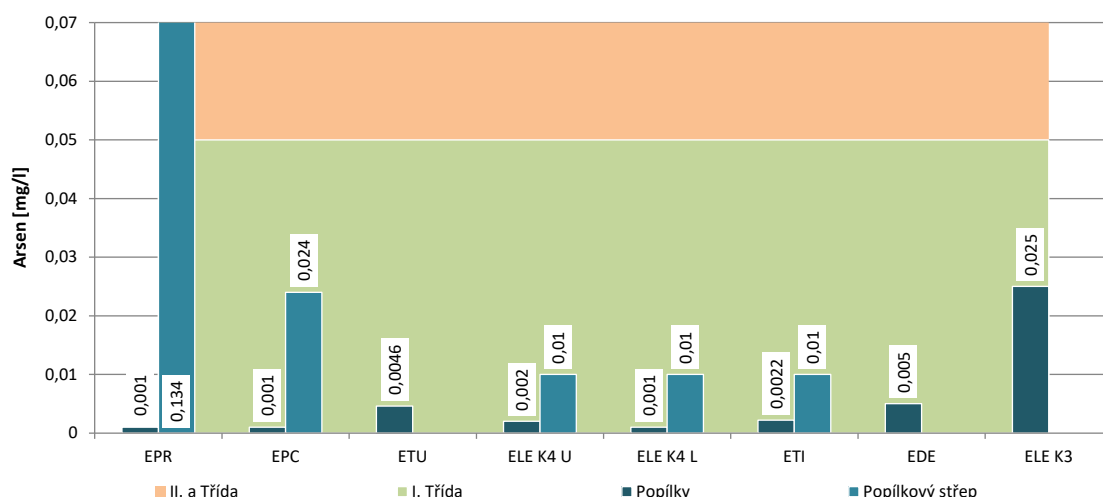
Obr. 17 množství rozpuštěných látek ve výluzích popílků a v popílkového střepe.



Obr. 18 Porovnání množství síranů ve výluzích popílků a v popílkového střepe



Obr. 19 Porovnání množství chromu ve výluzích popílků a v popílkového střepek



Obr. 20 Porovnání množství arsenu ve výluzích popílků a v popílkového střepek

Hlavním bodem řešení environmentálních parametrů byla vyluhovatelnost škodlivin. Byly sestaveny tabulky výsledků zkoušek, které graficky rozlišují vhodnost jednotlivých parametrů pro zařazení do jednotlivých tříd vyluhovatelnosti. Mezi nejlepší popílkové střepek patří popílkový střepek vyrobený z popílků z elektrárny Počerady, který jako jediný ze zkoušených vzorků splňuje všechny parametry pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti škodlivin. Za další kvalitní popílkový střepek můžeme považovat střepek vyrobený z popílků z elektrárny Pruněrov, u kterého byl pro zařazení do první třídy nadlimitní pouze obsah arsenu. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u popílkových střepeků z fluidních popílků z elektráren Ledvice a Tisová.

4 Experimentální ověření využití popílků pro injektáže

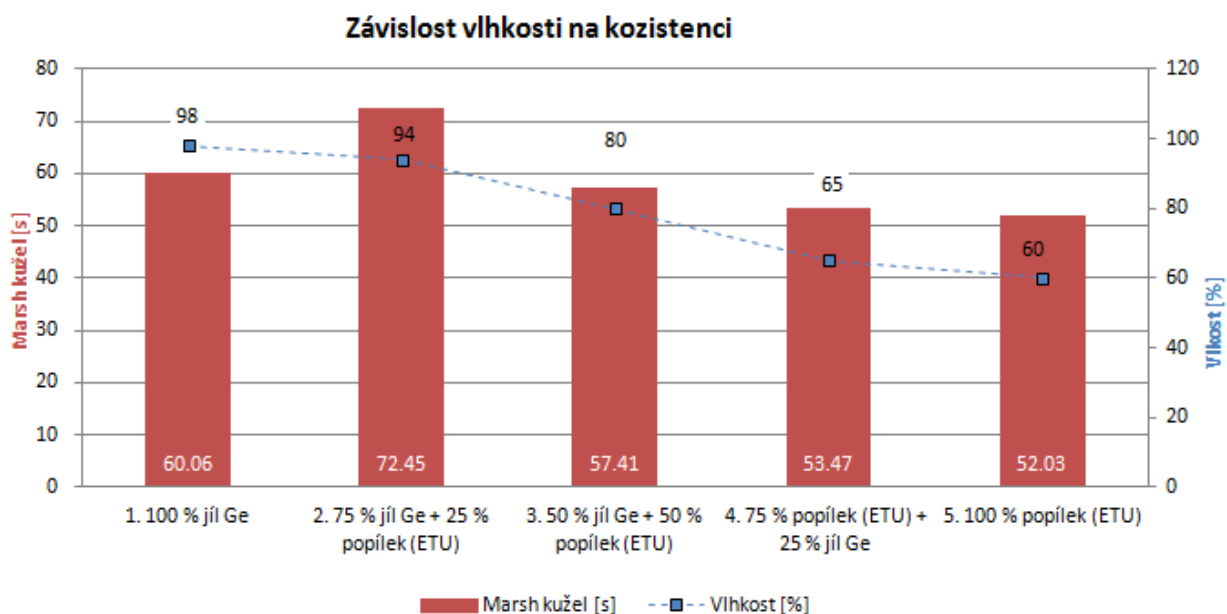
V rámci řešení se prováděla zkouška **objemové hmotnosti** v čerstvém a zatvrdlém stavu (při přirozené vlhkosti), **mez tekutosti dle Vasilieva** a stanovovala se **konzistence** pomocí **Marsh kužele** (čas nutný pro výtok směsi z kužele) a rozlití na střešacím stolku (průměr rozlití směsi). Na jednotlivých směsích se dále prováděly zkoušky **odstoje vody**. Jako rozhodující parametr byla zvolena reologie směsi, která rozhoduje o následné úspěšnosti sanace z pohledu vyplnění všech nespojitostí a kaveren injektovaným materiálem. Stanovení pevnostních parametrů je pro tento druh využití materiálu spíše doprovodné. Jedná se pouze o potřebu zachovat soudržnost a pevnosti injektované zeminy. Na následujícím grafu jsou uvedeny receptury, které názorně ukazují, jak se mění nutná příměs vody pro zachování konzistence dle Marshe v rozmezí 50 - 75 s.

Jako základní suroviny byly zvoleny jí Ge, vysokoteplotní popílek ze sila elektrárny Tušimice, pálené vápno CL 90 a portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.

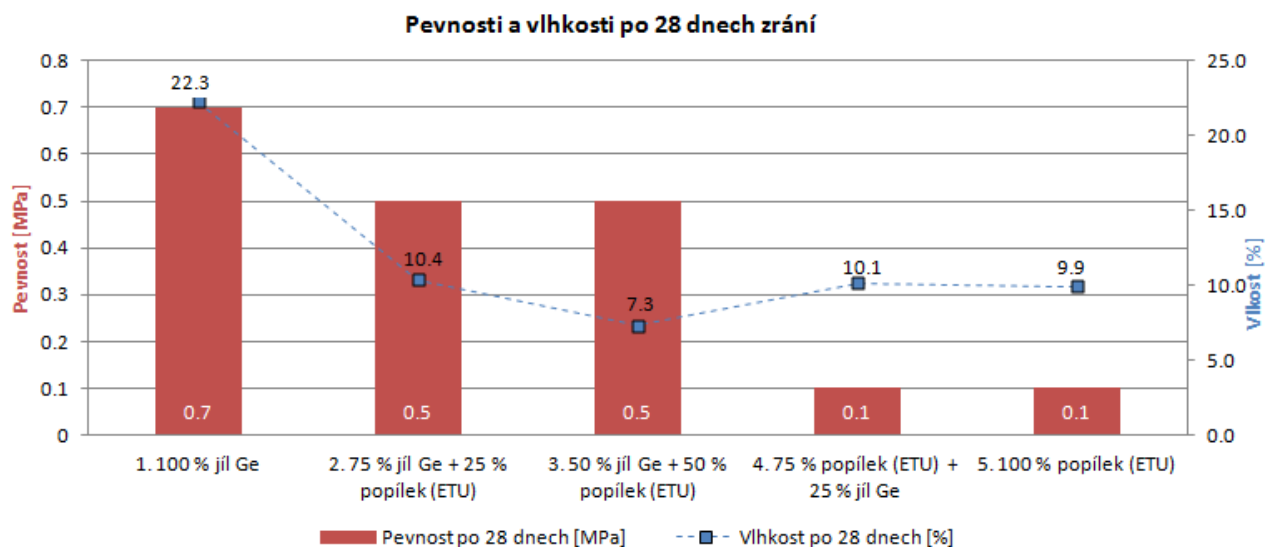
4.1 Směsi typu jíl – vysokoteplotní popílek

Jako základní surovina byla použita standardní kvalita jílu Ge (montmorilloniticko ilitický), který byl mísen s vysokoteplotním popílkem (25 %, 50 %, 75 % a 100 %), a následně stabilizován vápnem (2 %).

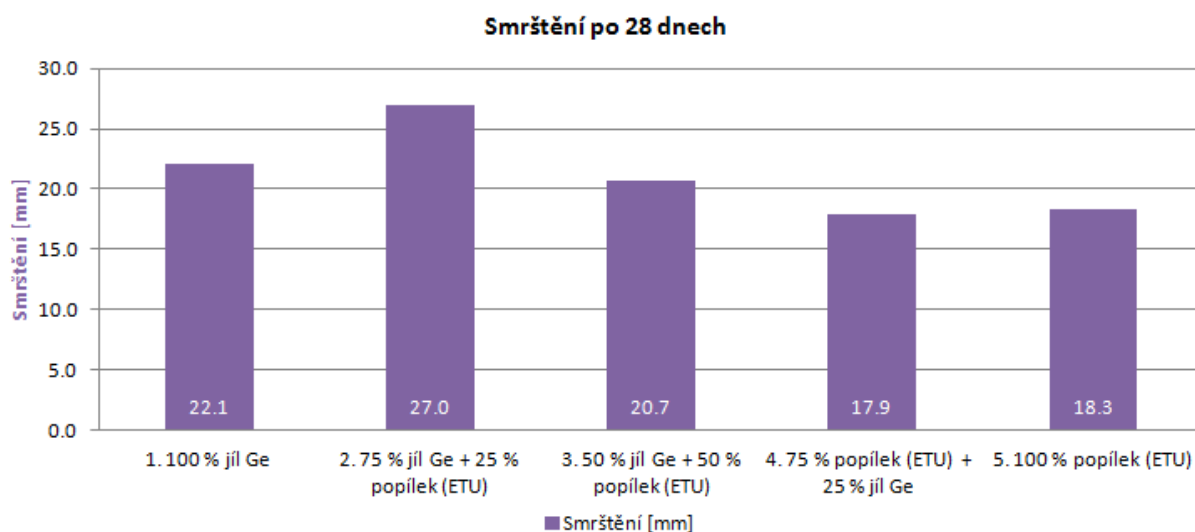
Na obrázcích jsou uvedeny závislosti výsledků stanovení viskozity Marsh kuželem na vlhkosti injektážní směsi. Optimální hodnota viskozity Marsh kuželem je dána dle zkušeností z obdobných injektážních prací rozmezím 45 – 75 s, což zkoušené injektážní směsi splňují. Dále jsou zde uvedeny stanovení pevnosti v tlaku a také smrštění vzorků, včetně jejich vlhkosti pro ilustraci chování jednotlivých směsí.



Obr. 21 Závislost viskozity na vlhkosti suspenzí na bázi jílu Ge



Obr. 22 Výsledky stanovení pevnosti v tlaku vzorků na bázi jílu Ge

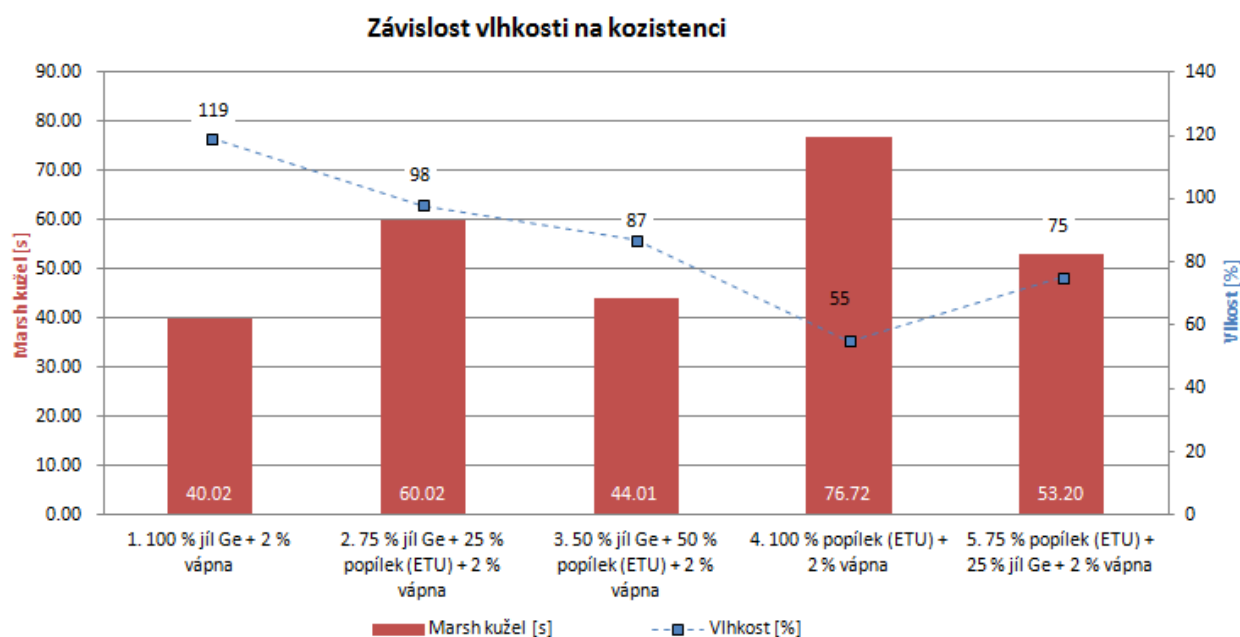


Obr. 23 Výsledky stanovení objemového smrštění vzorků na bázi jílu Ge

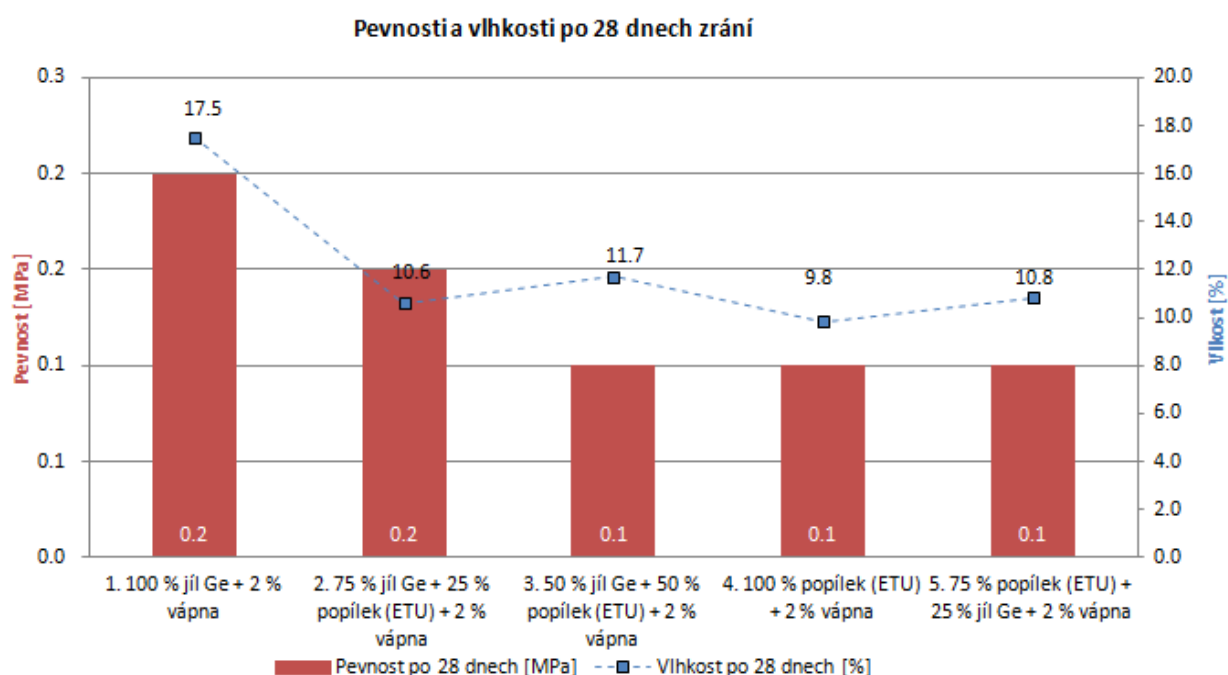
Z výsledků lze konstatovat, že s rostoucím množstvím alternativní suroviny – popílku docházelo ke snižování potřebného množství vody (vlhkosti). Vzhledem k méně pevným vazbám mezi popílkem a jílem dosahují vzorky s vyšším podílem popílku nižších pevností, i přes nižší vlhkost vzorků. U všech vzorků bylo zaznamenáno poměrně vysoké procento smrštění, které je nejvíce zřetelné u vzorků s vyšším podílem jílu.

4.2 Směsi typu jíl - vysokoteplotní popílek - pojivo

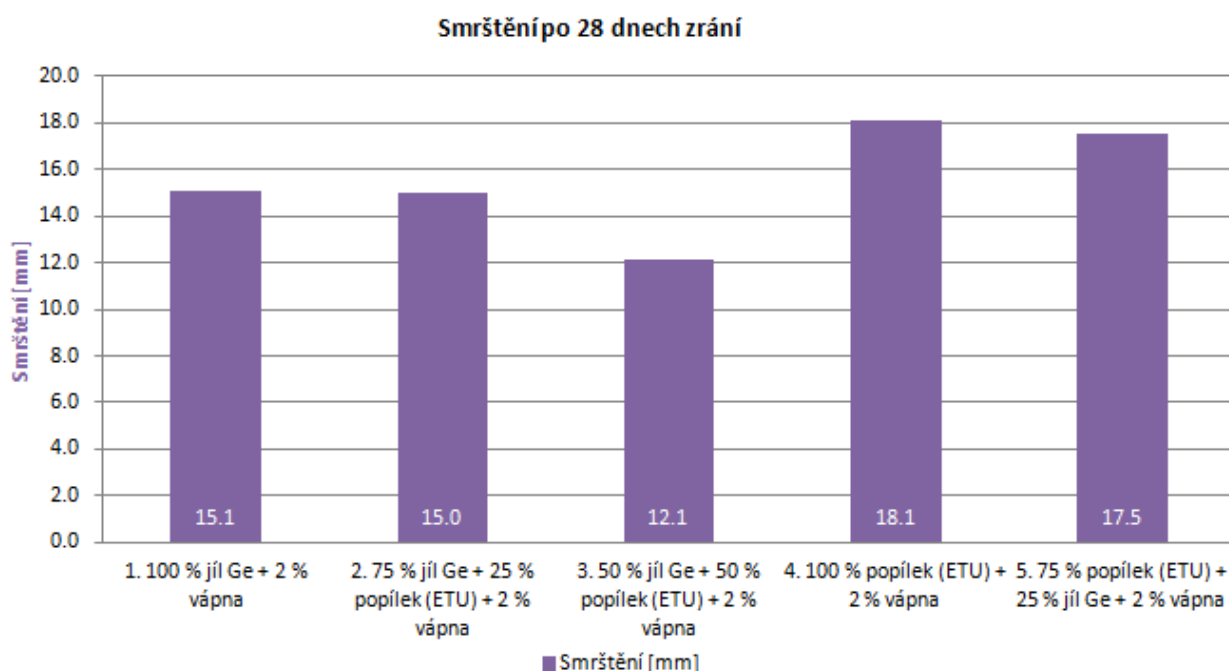
Následující část je věnována směsím s příměsí pojiva (vápna) a jeho vlivu na stabilitu suspenze, pevnost a smrštění vyzrálých vzorků.



Obr. 24 Závislost viskozity na vlhkosti suspenzí na bázi jílu Ge s příměsí vápna



Obr. 25 Výsledky stanovení pevnosti v tlaku vzorků na bázi jílu Ge s příměsí vápna



Obr. 26 Výsledky stanovení objemového smrštění vzorků na bázi jílu Ge s příměsí vápna

Výsledky zkoušení vzorků s příměsí vápna vykazují určité rozdíly oproti předchozím především v pevnostech a míry smrštění. Je to dáno zejména snížením aktivity jílu, kdy nedochází k tak výraznému smrštění. Tím dosahují vzorky i nižších pevností.

Pro stanovení koeficientu filtrace byly vybrány směsi, u kterých se předpokládá, vzhledem k vyššímu podílu popílku, dosažení limitních hodnot pro zatřídění mezi nepropustné zeminy.

Tab. 33 Výsledky koeficientu filtrace – 50% příměs popílku

Složení směsi	Koeficient filtrace k [m.s ⁻¹]
1) 50 % pop. + 50 % jíl Ge	$1,8 \cdot 10^{-9}$
2) 50 % pop. + 50 % jíl Ge + 2 % vápna	$5,1 \cdot 10^{-8}$
3) 50 % pop. + 50 % jíl Ge + 4 % cement	$1,9 \cdot 10^{-8}$
4) 50 % pop. + 50 % jíl Ge + 0,6 % pl. Hexah.	$9,4 \cdot 10^{-10}$

Tab. 34 Výsledky koeficientu filtrace – 75% příměs popílku

Složení směsi	Koeficient filtrace k [m.s ⁻¹]
1) 75 % pop. + 25 % jílu Ge	$1,7 \cdot 10^{-8}$
2) 75 % pop. + 25 % jílu Ge + 2 % vápna	$4,7 \cdot 10^{-7}$
3) 75 % pop. + 25 % jílu Ge + 4 % cement	$2,6 \cdot 10^{-7}$
4) 75 % pop. + 25 % jílu Ge + 0,6 % pl. Hexah.	$3,4 \cdot 10^{-9}$

Z tabulek je zřejmé, že z ohledu koeficientu propustnosti se opravdu jedná o nejméně příznivé směsi. Zvláště ty, které mají hodnotu koeficientu propustnosti menší než 10^{-8} . Tyto směsi ukazují, že 50 % příměsi popílku vyhovuje požadavkům pro nepropustné zeminy. Při přidavku 75 % příměsi popílku by směs vyhovovala požadavkům pro zatřídění zemin jako nepropustná, ovšem pouze v tom případě, že ve směsi nebude obsaženo pojivo. Směsi, které obsahují pojiva, zvyšují propustnost a stávají se pro návrh méně příznivými. Z hlediska přítomnosti plastifikační přísady je zřejmé, že zvyšují nejen stabilitu, ale také nepropustnost směsi.

V rámci řešení problematiky vlivu testovaných směsí na životní prostředí byla pozornost zaměřena na základní směsi jílu Ge a vysokoteplotního popílku (silo elektrárny Tušimice), směsi s příměsí páleného vápna (CL 90) a směsi s příměsí cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.

Vodné výluhy byly připraveny z vyzrálých vzorků injektážních směsí. Výsledky analýz jsou uvedeny v následujících tabulkách. Světle červeně jsou uvedeny hodnoty, které nevyhovují požadavkům TN 09.12.02 a sytě červeně ty, které nevyhovují ani I. třídě vyluhovatelnosti dle vyhl. č. 273/2021 Sb.

Tab. 35 Výsledky analýzy vodných výluhů směsí na bázi jíł-popílek

Parametr	Jednotka	Limit TN 09.12.02	Limit vyhl. č. 273/2021 Sb.	100% jíł Ge	75% jíł Ge + 25% popílek	50% jíł Ge + 50% popílek	75% popílek + 25% jíł Ge	100% popílek
pH (25 °C)	-	6-9	-	7,2	7,8	8,5	8,0	9,1
El. konduktivita (25 °C)	mS/m	125	-	117,4	102,1	85,3	83,6	73,1
Hliník (Al)	mg/l	0,2	-	<0,03	<0,03	0,041	0,081	0,132
Arsen (As)	mg/l	0,01	0,05	<0,001	<0,001	0,0071	0,0092	0,0054
Bor (B)	mg/l	0,3	-	0,06	0,08	0,18	0,47	1,52
Baryum (Ba)	mg/l	0,05	2	0,032	0,023	0,059	0,067	0,041
Kadmium (Cd)	mg/l	0,0005	0,004	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0022
Kobalt (Co)	mg/l	0,003	-	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Chrom (Cr)	mg/l	0,05	0,005	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Měď (Cu)	mg/l	0,014	0,3	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,006
Nikl (Ni)	mg/l	0,02	0,04	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,09
Olovo (Pb)	mg/l	0,005	0,05	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Molybden (Mo)	mg/l	0,005	0,05	0,004	0,009	0,038	0,025	0,013
Antimon (Sb)	mg/l	0,005	0,006	0,0044	0,0031	0,0036	0,0041	0,0037
Selen (Se)	mg/l	0,01	0,01	0,005	0,005	0,004	0,008	0,0034
Vanad (V)	mg/l	0,018	-	<0,01	<0,01	0,017	0,06	<0,01
Zinek (Zn)	mg/l	0,15	0,4	<0,02	0,041	<0,02	<0,02	0,079
Rtuť (Hg)	mg/l	0,0002	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
DOC	mg/l	0,01	50	<10	<10	<10	<10	<10

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Tab. 36 Výsledky analýzy vodných výluhů směsí na bázi jílu-popílek-vápno

Parametr	Jednotka	Limit TN 09.12.02	Limit vyhl. č. 273/2021 Sb.	100% jíl Ge + 2% vápno	75% jíl Ge + 25% popílek + 2% vápno	50% jíl Ge + 50% popílek + 2% vápno	75% popílek + 25% jíl Ge + 2% vápno	100% popílek + 2% vápno
pH (25 °C)	-	6-9	-	9,05	9,45	9,2	9,8	9,2
El. konduktivita (25 °C)	mS/m	125	-	122,7	117,1	118,7	103,8	96,6
Hliník (Al)	mg/l	0,2	-	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,086
Arsen (As)	mg/l	0,01	0,05	<0,001	<0,001	0,03	0,06	0,01
Bor (B)	mg/l	0,3	-	0,075	0,060	0,205	0,415	0,840
Baryum (Ba)	mg/l	0,05	2	0,036	0,034	0,067	0,048	0,061
Kadmium (Cd)	mg/l	0,0005	0,004	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Kobalt (Co)	mg/l	0,003	-	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Chrom (Cr)	mg/l	0,05	0,005	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Měď (Cu)	mg/l	0,014	0,3	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Nikl (Ni)	mg/l	0,02	0,04	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Olovo (Pb)	mg/l	0,005	0,05	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Molybden (Mo)	mg/l	0,005	0,05	0,007	0,010	0,036	0,033	0,028
Antimon (Sb)	mg/l	0,005	0,006	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003
Selen (Se)	mg/l	0,01	0,01	0,005	0,005	0,008	0,01	0,003
Vanad (V)	mg/l	0,018	-	<0,01	<0,01	<0,01	0,068	<0,01
Zinek (Zn)	mg/l	0,15	0,4	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Rtuť (Hg)	mg/l	0,0002	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
DOC	mg/l	0,01	50	<10	<10	<10	<10	<10

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

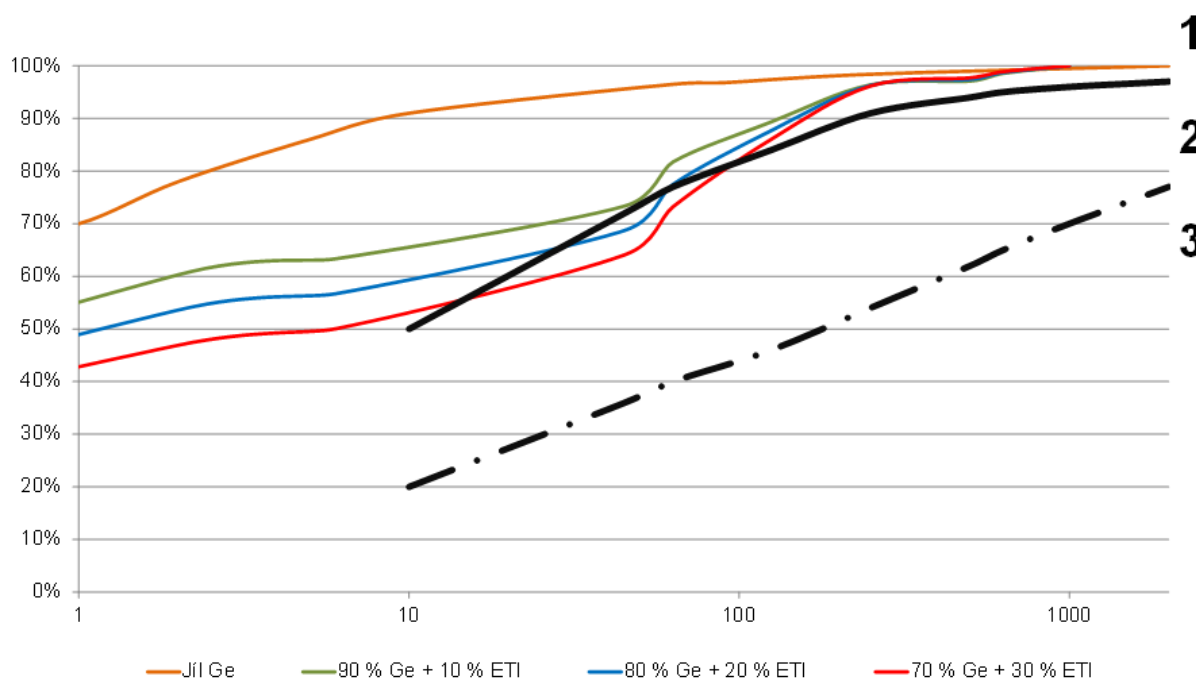
Výsledky analýz ukazují na časté problémy s pH výluhu injektážních směsí se splněním požadavků technického návodu č. 09.12.02, věnovanému Popílkům a směsím s popílkem pro zásypy a násypy pro stavby mimo pozemních komunikací - Popílek a směsi s popílkem pro území neuvedená v TN 09.12.01. Často také některé parametry (arsen, bor, baryum, vanad apod.) nevyhovují směsi s vyšším obsahem popílku. Při hodnocení plnění požadavků vyhl. č. 273/2021 Sb. Jsou splněny prakticky všechny parametry. Jedinými nadlimitními jsou arsen, nikl a v případě příměsi cementu i selen. Obecně lze konstatovat, že nejpříznivější jsou z pohledu vlivu na životní prostředí směsi s maximálním podílem popílku do 50 %, bez příměsi pojiva. Tyto jsou vhodné i z pohledu hodnocení fyzikálně-mechanických parametrů.

4.1 Směsi typu jíl - fluidní popílek

Jako základní báze byla pro řešení projektu ve druhém pololetí roku 2022 vybraná směs jílu Ge a fluidního popílku, konkrétně z elektrárny Tisová (ETI). Při návrhu směsi byl kladen důraz na její jemnozrnnost. Fluidní popílek je výrazně jemnější než popílek vysokoteplotní, proto byl vybrán jako částečná náhrada jílu Ge. V případě použití tohoto popílku v množství do 25 % bude zaručen předpoklad vyplnění všech nespojitostí a pórů v prosakující struktuře. Fluidní popílek má zvýšený obsah volného CaO (až 20 %), díky kterému dosahují směsi s jeho vyšším podílem vyšších pevností, a zároveň bylo zaznamenáno snížení dekantace.

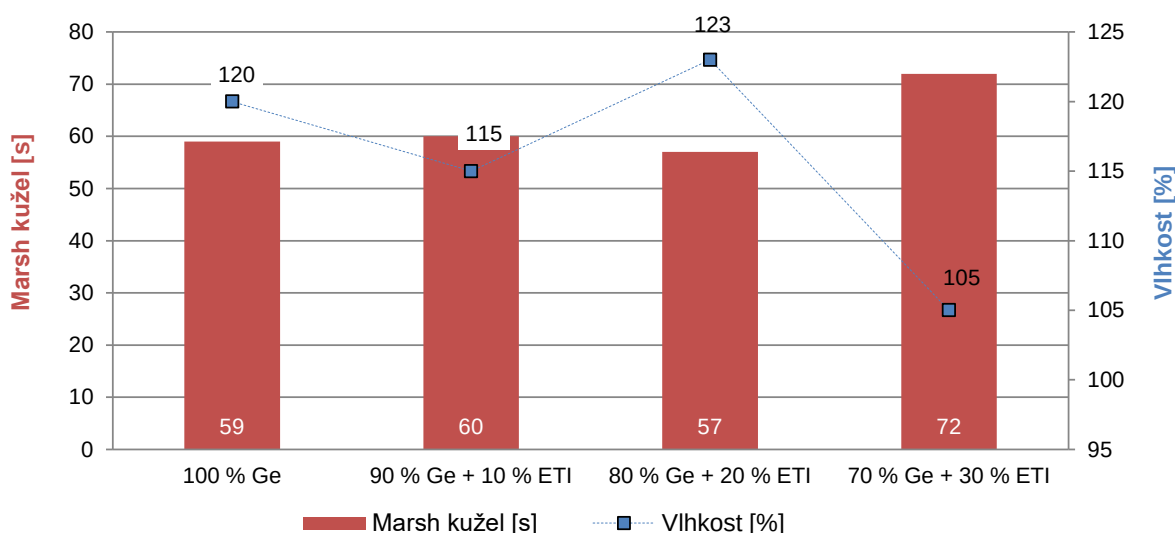
Pro laboratorní ověření byly vybrány tři procentuální podíly fluidního popílku ve směsi - 10, 20 a 30 %. Pro porovnání byla ověřena i receptura složená pouze z jílu Ge.

Na následujícím obrázku jsou uvedeny křivky zrnitosti jednotlivých směsí. Pro posouzení vhodnosti jsou zde uvedeny i hraniční křivky, rozdělující prostor na základní 3 oblasti dle ČSN 75 2410. Jako vhodné zeminy pro těsnící části hráze jsou označeny ty, jejichž čára zrnitosti leží v oblasti 2, popř. 1. Je tedy zřejmé, že všechny směsi budou mít vysoce těsnící účinek.



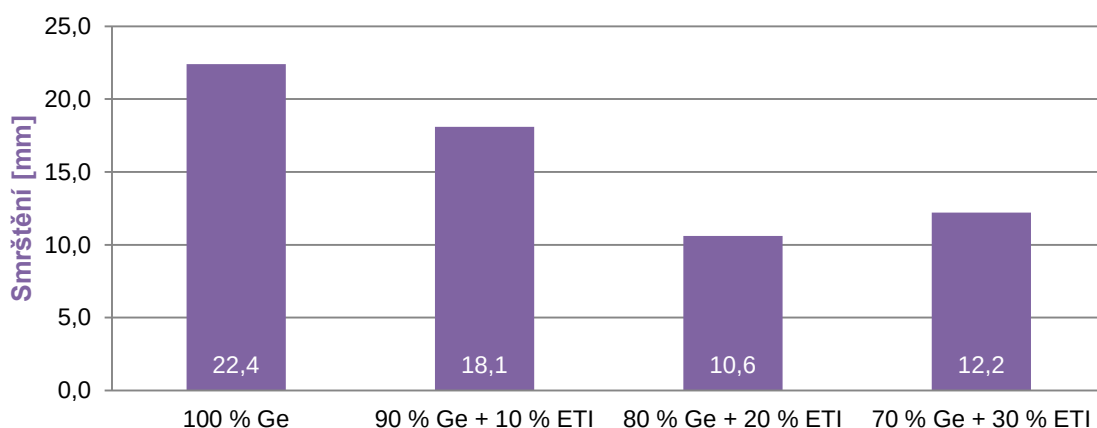
Obr. 27 Procentuální vyjádření zrnitosti jako propadu síty dané velikosti v [μm]

Při hodnocení dosažených výsledků byl na jednotlivých směsích pozorován účinek fluidního popílku ve směsi jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. V následujících obrázcích jsou zobrazeny a popsány jednotlivé parametry zpracovaných směsí.

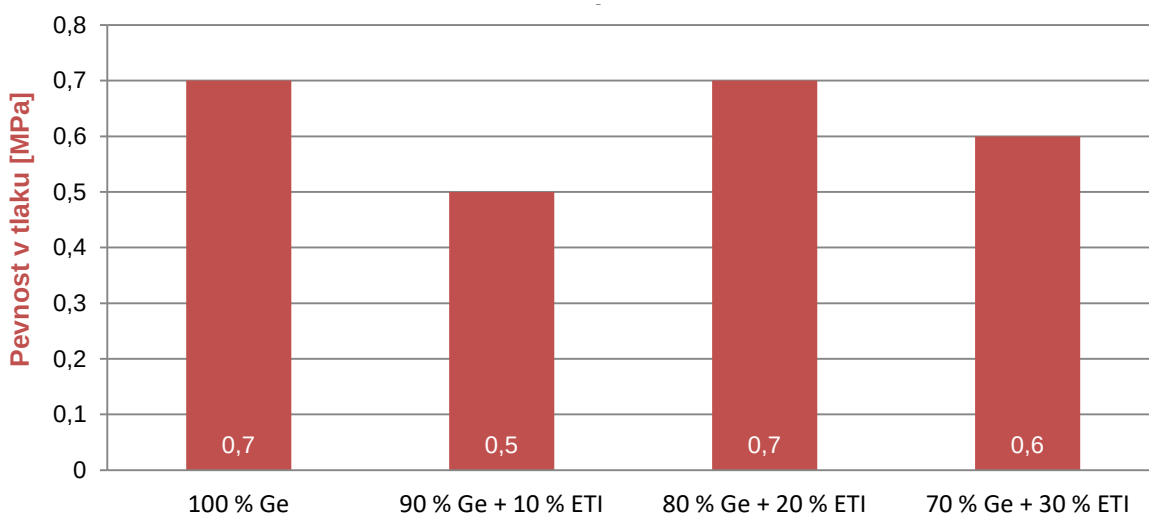


Obr. 28 Závislost konzistence na vlhkosti suspenzí na bázi jílu Ge a fluidního popílku

Výsledky ukazují, že 30% příměs popílku již znatelně ovlivňuje konzistenci a chování směsi v čerstvém stavu. Tyto poznatky potvrzují zkušenosti ze samotného laboratorního zkoušení směsí, kdy vyšší podíl vápenatého popílku zvyšoval viskozitu a zhoršoval zpracovatelnost.



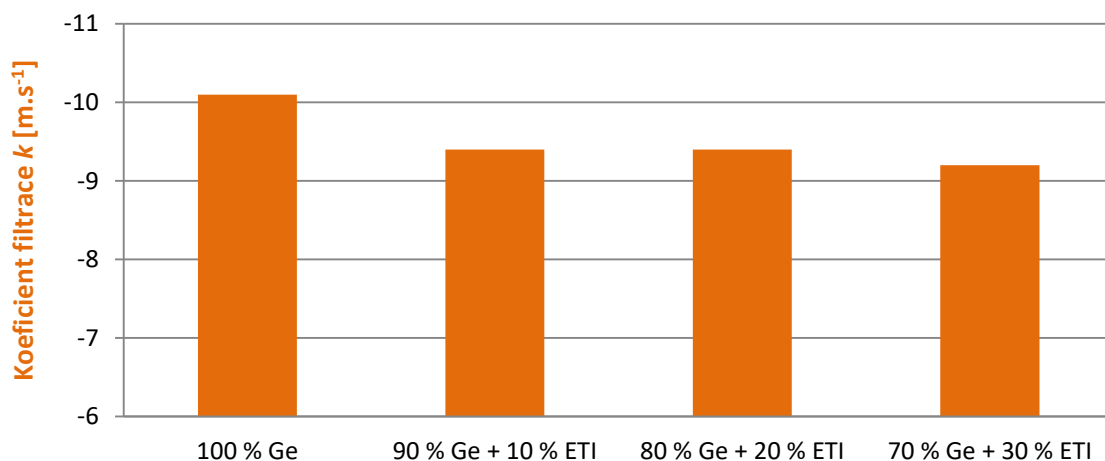
Obr. 29 Výsledky stanovení objemového smrštění vzorků na bázi jílu Ge a fluidního popílku



Obr. 30 Závislost pevnosti a vlhkosti po 28 dnech zrání směsí na bázi jílu Ge a fluidního popílku

Výsledky stanovení objemového smrštění a pevnosti v tlaku ukazují, že 20% příměs popílku již výrazně zvyšuje objemovou stálost směsi při tuhnutí. Smrštění opět mírně roste u vzorků

s 30 % popílku vlivem vyššího podílu CaO. Při porovnání pevností v tlaku a zohlednění míry smrštění opět dosahuje nejlepších výsledků směs s 20% příměsí popílku ETI.



Obr. 31 Výsledky stanovení koeficientu filtrace vzorků na bázi jílu Ge a fluidního popílku

Tab. 37 Přibližné rozdělení zemin dle propustnosti

Zemina dle ČSN 73 2310 relativní propustnost	Rozmezí filtračního součinitele k v m.s ⁻¹	Příklady zemin
Velmi nepropustné	$<10^{-10}$	Jíl s vysokou plasticitou
nepropustné	10^{-8} ----- 10^{-10}	Jíly středně plastické-písčité a hlinité
Málo propustné	10^{-6} ----- 10^{-8}	Písky hlinité a jílovité štěrky
Propustné	10^{-4} ----- 10^{-6}	Písky a štěrky se zeminou

Hodnocení výsledků stanovení koeficientu filtrace koresponduje s jemností použitých složek. Jíl Ge spadá do velmi nepropustných zemin a směsi s popínkem bezpečně splňují kritérium zařazení do kategorie nepropustných.

5 Závěr

V celé etapě „Snižování množství nebezpečných látek ve stavebních a konstrukčních materiálech“ byly jednoznačně ověřeny možnosti aplikací řady nebezpečných odpadů do nových stavebních hmot.

Experimentální činnosti v oblasti stabilizátu pro násypy a zásypy se zaměřili na ověření tří typů neutralizačních kalů ve směsi s fluidním anebo vysokoteplotním popílkem, případně také s cementem, karbidovým vápnem nebo odprašky z pánvové pece. Na základě dílčích výsledků potvrzeno, že snížení ekologické zátěže nebezpečných odpadů je možné. Pomocí vhodně zvolené kombinace pojiv a příměsí popílků lze dosáhnout požadované pevnosti v tlaku alespoň 1 MPa při splnění patřičných environmentálních limitů přílohy č. 10 k vyhlášce č. 273/2021 Sb. Vzhledem k tomu, že byl ve druhém pololetí roku 2022 u dlouhodobých pevností (60 dní a 360 dní) zaznamenán pokles pevnosti v tlaku doprovázený mírným snížením objemové hmotnosti, bylo rozhodnuto o navýšení dávky cementu na 15 % hm. Na základě výsledků této části řešení tak byly sestaveny optimalizované receptury. Ty byly založeny na 40% podílu nebezpečných odpadů, 20% dávce vysokoteplotního popílku, 25% příměsí fluidního popílku a 15% podílu cementu. Výsledné směsi dosahovaly krychelných pevností v tlaku po 28 dnech v průměru 4,4 MPa a po 180 dnech zrání přibližně 4,0 MPa. Parametry vodných výluhů byly plně v souladu s třídou vyluhovatelnosti IIb přílohy č. 10 vyhl. č. 273/2021 Sb.

Hodnocení využitelnosti vedlejších energetických produktů pro injektáže se zaměřilo na ověření možnosti injektování sypaných hrází směsí jílu a popílku (vysokoteplotního nebo fluidního). Provedené experimenty již nyní ukazují, že vzhledem k požadavku zajištění těsnící schopnosti injektážní směsi, jsou pro tento způsob využití vhodné buď vysokoteplotní popílký v maximálně 50% podílu k optimálně bobtnavému montmorilloniticko-illitickému jílu nebo také fluidní popílký ve 20% podílu k výše uvedenému jílu. Výslednou směs lze díky filtračnímu součiniteli v řádech 10^{-9} m.s⁻¹ zařadit jako nepropustnou a kromě fyzikálně-mechanických parametrů jsou splněna i environmentální kritéria.

V případě umělého kameniva se jedná o ověření využitelnosti různých druhů popílků (vysokoteplotních i fluidních) v kombinaci s vhodnými typy paliv (černé uhlí, popílek s vysokým nedopalem) v technologii výroby spékaného kameniva samovypalem. Dosavadní výsledky ukazují, že kvalitní jemné vysokoteplotní popílký jsou velmi vhodnou surovinou, schopnou vytvořit pevnou strukturu popílkového střeptu s nízkou nasákavostí. Fluidní popeloviny nejsou pro tuto technologii vhodné. Vyznačují se nízkou pevností a vysokou nasákavostí. Při hodnocení vlivu popílkového střeptu na životní prostředí, překračují fluidní popeloviny limitní hodnoty síranů. Vysokoteplotní popeloviny ve většině případů environmentálními limitům vyhovují.

6 Literatura

- [1] ČSN EN 12620+A1 *Kamenivo do betonu*, 2008.
- [2] ČSN EN 13139 *Kamenivo do malty*, 2004.
- [3] ČSN EN 14227-1 *Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem*, 2013.
- [4] ČSN 73 6124-1 *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody*, 2016.
- [5] ČSN EN 13242+A1 *Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace*, 2008.
- [6] ČSN EN 13285 ed. 2 *Nestmelené směsi – Specifikace*, 2019.
- [7] ČSN 75 2310 *Sypané hráze*, 2006.
- [8] ČSN 75 2410 *Malé vodní nádrže*, 2011.
- [9] ČSN EN 13055-1 *Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty*, 2004. Zrušen bez náhrady, datum zrušení: 2018-02-28.
- [10] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky, Předmět BJ10, Modul M01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [11] ČSN EN 450-1 *Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*, 2013.
- [12] ČSN EN 15167-1 *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*, 2006.
- [13] ČSN EN 197-1 ed. 2 *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, 2012.
- [14] ČSN EN 459-1 ed. 3 *Stavební vápno – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*, 2015.
- [15] ČSN EN 13279-1 *Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky – Část 1: Definice a požadavky*, 2009.
- [16] ČSN 72 2072-5 *Popílek pro stavební účely – Část 5: Popílek pro výrobu pórobetonu*, 2013.
- [17] ČSN 72 1564 *Cihlářské zeminy. Společná ustanovení*, 1986.
- [18] ČSN 72 1330 *Jílové suroviny. Základní technické požadavky*, 1992.
- [19] Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech – znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. AION CS 2010-2022 [cit. 22. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>
- [20] Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady – znění od 9. 4. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. AION CS 2010-2022 [cit. 22. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273>
- [21] Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování odpadů (Katalog odpadů) – znění od 27. 1. 2021. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. AION CS 2010-2022 [cit. 22. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-8>