

Hodnocení environmentálních a technologických vlastností škváry z energetického využívání odpadů z pohledu její využitelnosti při výstavbě pozemních komunikací

Ing. Ivana Chromková¹, MVDr. Ilona Kukletová, Ph.D.¹

Ing. Jiří Grošek, Ph.D.², Ing. Tomáš Zavřel²

RNDr. Jana Suzová³, Ing. Jan Salnek³

¹ Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s.,

² Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.,

³ SAKO Brno a.s.

e-mail: chromkova@vush.cz

Souhrn

Článek prezentuje dílčí výsledky výzkumného projektu zaměřeného na využití škváry z energetického využívání odpadu v konstrukčních vrstvách pozemních komunikací (PK). Laboratorní ověření se zaměřilo na sledování klíčových environmentálních ukazatelů, technologickou vhodnost a objemovou stálost při splnění legislativních požadavků. Výsledky zkoušek definují podmínky, za kterých lze tento druhotný produkt využít v PK v souladu s principy cirkulární ekonomiky a s cílem úspory primárních surovin.

Klíčová slova: škvára z energetického využívání odpadu, chemické složení, obsah nebezpečných látek, ekotoxicita, objemové změny, náhrada kameniva, škvára v silničním stavitelství

Škvára ze ZEVO – úvod do problematiky

ZEVO – zařízení pro energetické využívání odpadů jsou specializovaná technologická zařízení určená k získávání energie z odpadů ve formě páry, horké vody a elektrické energie a díky jejich předání třetím osobám přispívají k energetické bezpečnosti a soběstačnosti, snižují jejich původní objem a hmotnost, zajišťují hygienizaci a inertizaci pevných zbytků po spalování odpadů a důsledné odloučení nebezpečných látek z přijatého komunálního odpadu. Odpady jsou v těchto zařízeních spalovány při teplotách mezi 850 a 1100 °C, přičemž spaliny prochází několika stupňovým systémem čištění spalin.

V EU-28, Švýcarsku a Norsku je k roku 2022 provozováno 498 ZEVO na spalování materiálů nevyužitelných pevných komunálních odpadů (WtE) a odpadů jim podobných z průmyslové sféry o celkové kapacitě 100 mil tun.

Hlavní pevný produkt po energetickém využití komunálních odpadů a jim podobných odpadů je škvára. Hlavní složkou její matrice je hliníkokřemičitan vápenatý a tato po odpovídající úpravě v souladu s platnou legislativou může nahrazovat přírodní zdroje. Její využití se stává významným z pohledu principů cirkulární ekonomiky, neboť škvára po procesu separace feromagnetických i neferomagnetických kovů, tvoří přibližně 20 % hmotnosti původního odpadu, což odpovídá cca 10 % jeho původního objemu [1,2].

Škvára je velmi heterogenní materiál, který se skládá z nepravidelně tvarovaných částic a širokého rozložení velikostí částic. Obvykle se skládá z produktů taveniny alkalických kovů, minerálů, kovových sloučenin, keramiky a skla. Průměrná sypaná hmotnost se pohybuje v rozmezí 950 –1800 kg/m³ [2,3].

Více než desetinu hmotnostního podílu škváry tvoří znovu využitelné kovy – od železa přes barevné a vzácné kovy. Nejmodernější technologické linky v závislosti na vstupním složení odpadu dokážou vyseparovat ze škváry až 80 kilogramů železa a 25 kilogramů neželezných kovů z tuny škváry [2,12].

Náhled na škváru jako na hmotnostně nejvýznamnější pevný odpadní produkt energetického využití komunálních odpadů se v poslední době změnil i díky snahám o naplnění cílů oběhového hospodářství o maximální zajištění využití odpadů jako náhrady primárních neobnovitelných zdrojů ve formě druhotných surovin, tj. získávání železných, barevných a vzácných kovů ze škváry a následné využití anorganického materiálu jako náhrady např. písků a štěrku [2,6].

Avšak téma reálného využívání škváry zenerg komunálního odpadu (WtE) je v EU řešeno různě. Kombinace přírodních podmínek, technických možností, legislativy, environmentálních rizik a ekonomických nákladů vede k tomu, že různé země volí odlišné přístupy.

Zatímco recyklace kovů je běžnou praxí ve všech zemích, minerální frakce je buď ukládána na skládky (jako technické zabezpečení skládek, případně přímé skládkování) nebo se využívá v inženýrském stavitelství jako druhotné suroviny [4,5]. Některé země využívají až 100 % hmot. škváry (po odstranění železných i neželezných kovů) v inženýrském stavitelství, jiné země odstraňují až 100 % hmot. škváry na skládkách [6].

Škváru ze zařízení na energetické využívání odpadů lze tedy po separaci kovů úspěšně využít jako náhradu primárních surovin v různých stavebních aplikacích [2,5,6,7,8,9,10,11]. V rámci EU je využití škváry mimo skládky povoleno v 16 z 22 sledovaných zemí, přičemž reálně se v praxi využívá přibližně v 11 z nich. V zemích EU, kde se využívá odpadní škvára, se míra využití pohybuje mezi 20 a 100 % z celkové produkované hmotnosti. Přibližně 54 % objemu veškeré vyprodukované škváry v EU, Norsku, Švýcarsku a dalších zemích bylo využito mimo skládky v období mezi lety 2015 a 2019 [1].

V dopravním stavitelství jako stavební materiál se využívá v řadě států Evropy, například v Německu, Francii, Dánsku, Nizozemí, Belgii, Španělsku (Katalánsku), Itálii, Velké Británii či Finsku.

Tabulka 1: Míra využívání škváry ve vybraných zemích EU ([1, tabulka č. 2] upraveno)

Země	Míra využití škváry	Hlavní způsob uplatnění
Dánsko, UK	Téměř 100 %	Podkladní vrstvy silnic (povoleno i pro vysoce zatížené cesty).
Nizozemsko	Téměř 100 %	Silniční stavitelství, násypy, protihlukové stěny.
Itálie	Vysoká (85 %)	Silniční stavitelství podkladní vrstvy vozovek a násypy. Po úpravě jako kamenivo do betonu.
Německo	Vysoká (80 - 90 %)	Certifikovaný stavební materiál pro silnice a parkoviště.
Francie	Vysoká (80 %)	Silniční stavby, plnivo do betonu (v omezené míře).
Belgie	Střední (35 %, ale 50 % export do okolních zemí)	Silniční stavby, plnivo do betonu (v omezené míře).

Švýcarsko, Norsko, Maďarsko, Švédsko, Litva, Slovensko aj.	Nízká (skládkování)	Klasifikováno jako reaktivní/nestabilní materiál, který nelze bez dalších úprav použít, proto se po separaci kovů většinou ukládá na skládky.
--	---------------------	---

Některé země EU v posledních letech zavedly legislativní změny, které využití škváry ze ZEVO do silničního stavitelství podporují (např. Finsko, Polsko, Litva) [13].

Poznámka: Jak uvádí literatura [14] opětovné použití škváry ze ZEVO jako stavebního materiálu převládá v několika oblastech světa, zejména v Evropě a Asii, avšak ve Spojených státech (USA) zaostává kvůli regulačním požadavkům na likvidaci.

Proces úpravy škváry

Škvára ze ZEVO není průmyslový produkt, ale vedlejší produkt spalování komunálních odpadů. Z tohoto důvodu je nemožné kontrolovat nebo ovlivňovat její vlastnosti během spalovacího procesu, ale až v následných krocích, tj. po výstupu ze spalovacího procesu.

Průmyslově využívané způsoby úpravy

V současné době je průmyslově rozvinutý způsob úpravy škváry technikami magnetické separace kovů, separace vířivými proudy (eddy current) nemagnetických kovů či odseparování nadrozměrných složek škváry na základě objemové hmotnosti/hustoty částic nebo pomocí bubnových separátorů [2].

V literatuře [2] je dále popisován způsob úpravy škváry imobilizací (stárnutím). Imobilizace je účinná a široce používaná technika ke snížení vyluhovatelnosti těžkých kovů. Jedná se o kombinovaný proces hydratace, karbonace a oxidace v čase. Jedná se o exotermický proces, který zvyšuje teplotu škváry na 70–80 °C [7]. Během zrání vznikají další minerály jako ettringit, hydrokalumit, C-S-H, karbonáty, sulfáty atd., které vážou těžké kovy a snižují pH škváry a tím zabraňují jejich vyluhování. Sulfátové minerály mají menší stabilitu ve srovnání s karbonáty a hydroxidy [8,9].

Způsoby úpravy ve fázi výzkumu

Řada výzkumných týmů pracuje na popsání vhodného a co nejvíce ekonomicky přijatelného způsobu úpravy škváry. Testováno je např. [2]: promývání alkáliemi, kyselinami, promývání odpadní vodou bohatou na sulfidy, karbonatace, fosfatace, hydrotermální úprava, stabilizace cementem aj. Tyto metody jsou ale pro průmyslové použití značně nevýhodné z hlediska vysoké spotřeby energie, nákladů na technologii, vzniku velkého objemu kontaminované vody, nízkou rychlost a malou účinnost ověřovaného procesu úpravy.

Situace využívání škváry ze ZEVO v ČR

V současné době se škvára po spalování komunálních a jim podobných odpadů v ČR používá jako technická vrstva pro zabezpečení komunálních skládek (příklad využití škváry ze spalovny SAKO Brno a.s.). V jiných případech může docházet pouze ke skládkování škváry ze ZEVO. Dle literatury [15] ročně jen v Praze – v ZEVO Malešice – vzniká cca 65-70 tisíc tun škváry. Ta momentálně putuje převážně na skládky, náklady na skládkování činí zhruba 40 milionů Kč ročně.

Z těchto informací jednoznačně vyplývá, že je vysoce žádoucí přistoupit k opatření, která umožní materiálové využívání škváry pro technické aplikace. Nejzajímavější směr aplikace v ČR se jeví její využití v silničním stavitelství, což bylo a je také předmětem mnoha výzkumů v ČR. Nejvýznamnější kroky ověřování v reálných podmínkách v současné době probíhají v rámci pilotní aplikace upravené spalovenské strusky v konstrukci dopravní stavby v areálu ZEVO Malešice v Praze [16,17].

Experimentální proces odležení škváry v areálu společnosti SAKO Brno

Jak bylo výše popsáno, podmínkou pro možné bezpečné využití škváry mimo skládky v souladu s platnou legislativou, musí škvára projít technologickým procesem úpravy a imobilizace, při kterém dochází k chemické stabilizaci jejich vlastností a omezení vyluhovatelnosti sledovaných škodlivin.

Jako nejvhodnější se jeví proces odležení neboli imobilizace. Jedná se o kombinovaný proces hydratace, karbonace a oxidace. Tento proces snižuje reaktivitu a vyluhovatelnost sledovaných škodlivých látek. V rámci námi řešeného projektu je cílem ověřit vhodný způsob/postup odležení škváry za běžných klimatických podmínek, tj. bez použití vysokých teplot nebo chemických úprav, jak je popsáno v literatuře [2,7].

Pro možnost uplatnění škváry v praxi byl v rámci řešeného projektu založen pokus simulující možná řešení v odležení škváry. Odležení spočívalo v uložení čerstvé škváry na volné vodohospodářsky zabezpečené ploše v areálu společnosti SAKO Brno do tří oddělených kójí (zakládek). V rámci výzkumu byly u jednotlivých zakládek zvoleny rozdílné způsoby odležení:

- 1. kóje: škvára byla ponechána bez jakékoli úpravy, pouze s působením přirozených klimatických vlivů,
- 2. kóje: škvára byla jednou týdně překopávána,
- 3. kóje: škvára byla jednou týdně překopávána a dvakrát týdně vlhčena vodou z vodovodního řadu.

V pravidelných intervalech se prováděly odběry s cílem stanovit, v jakém časovém horizontu budou u sledovaných vzorků škváry v průběhu procesu odležení (při konkrétním režimu úpravy) splněny požadované environmentální parametry vycházející z platné legislativy v ČR.

Sledování vlastností škváry

V souvislosti s ověřováním vhodného způsobu odležení škváry bylo nutné zajistit provedení souboru zkoušek a analýz čerstvé a vyzrálé škváry ze ZEVO SAKO, jehož cílem bylo zjistit informace o složení, environmentálních parametrech a technologických vlastnostech škváry s důrazem na její další použití do konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Bylo třeba ověřit, jak důležitý je proces odležení škváry pro její další materiálovou využitelnost (nejen do PK).

Ve škváře bylo sledováno celkové chemické složení, obsah sledovaných škodlivin v sušině a ve výluhu podle Vyhlášky č. 273/2021 Sb. z pohledu možnosti využití strusky k zasypávání (dle přílohy č. 6, tabulka 6.1 a 6.2) a hodnocení nebezpečných vlastností odpadů – výluhové zkoušky dle Vyhlášky č. 8/2021 Sb., přílohy č. 2, tabulky č. 2 pro hodnocení nebezpečné vlastnosti HP15 a dále stanovení ekotoxicity dle Vyhlášky č. 8/2021 Sb., přílohy č. 2, tabulky č.1.

Ze zakládek byly prováděny opakované odběry vzorků a laboratorní analýzy. Prokázalo se, že doba a způsob odležení mají významný vliv na výsledné parametry odležené škváry:

- Vzorky škváry odebrané cca 1 měsíc od založení nevyhověly požadavkům přílohy č. 6 Vyhlášky č. 273/2021 Sb. u žádné z testovaných způsobů odležení, což potvrdilo nutnost delší doby zrání a řízené úpravy škváry.
- Naopak vzorky odebrané cca 3 měsíce od zakládky prokázaly výrazný pozitivní efekt aktivní manipulace: překopávaná a vlhčená škvára vyhověla ve všech parametrech, zatímco překopávaná škvára bez vlhčení vyhověla ve všech parametrech s výjimkou pH (limit 9–11; zjištěno 11,6). Bez úpravy ponechaná škvára nevyhověla ve více ukazatelích (zejména pH a vybrané kovy).
- Trend se potvrdil i při odběru škváry cca 5 měsíců od zakládky: překopávaná a vlhčená škvára opět vyhověla ve všech parametrech, u překopávané škváry bez vlhčení bylo pH stále mírně nad limitem (zjištěno 11,2) a zakládka v kóji 1. (bez úpravy) zůstala nevyhovující v některých sledovaných parametrech.

Z pohledu provozovatele ZEVO Brno tyto výsledky jednoznačně ukazují, že pro dosažení stabilních a opakovatelných parametrů škváry vhodných k dalšímu materiálovému využití je rozhodující řízení procesu vyzrávání, a to zejména v kombinaci pravidelného překopávání a cíleného vlhčení, které podporují stabilizaci materiálu a zkracuje dobu pro její následné materiálové využití v předpokládaných stavebních aplikacích. K imobilizaci sledovaných znečišťujících látek dochází tím, že rychleji probíhají chemické reakce, při kterých aktivní $\text{Ca}(\text{OH})_2$ přijímá vzdušný oxid uhličitý CO_2 a zkoumaný materiál rychleji karbonatuje za vzniku CaCO_3 . Výsledkem je pokles pH škváry, při kterém amfoterní kovy přestávají být vyluhovatelné. V souvislosti s těmito procesy dochází i ke snižování vyluhovatelnosti dalších sledovaných znečišťujících látek.

Výsledky analýz čerstvé škváry a škváry po 5 měsících odležení jsou uvedeny v tabulce 1 až 4.

Tabulka 1: Celkový chemický rozbor vzorků škváry ze spalování KO

Označení složky	škvára čerstvá	škvára odleželá nepřekopaná	škvára odleželá překopaná	škvára odleželá překopaná vlhčená
	[% hmotnostní]	[% hmotnostní]	[% hmotnostní]	[% hmotnostní]
SiO_2	44,02	48,47	48,11	49,97
TiO_2	1,32	1,27	1,15	1,04
Al_2O_3	10,45	9,43	9,17	8,93
Fe_2O_3	6,53	7,37	6,42	6,58
P_2O_5	1,69	1,33	1,33	1,71
MnO	0,22	0,15	0,13	0,11
MgO	2,24	1,96	1,96	1,80
CaO	18,00	16,31	17,26	16,59
Na_2O	4,70	4,61	4,85	5,32
K_2O	1,85	1,59	1,46	1,38
SO_3 celk.	1,77	1,08	1,08	0,92
Ztráta sušením	1,68	1,26	1,27	1,47
Ztráta žháním (1100 °C)	6,78	6,22	5,50	4,46

Z těchto výsledků je patrný u vzorků odleželé škváry sestupný úbytek zastoupení TiO_2 , Al_2O_3 , MnO, MgO, K_2O a SO_3 , a to s ohledem ke způsobu manipulace se škvárou při procesu odležení. Nejvíce byl úbytek zastoupení těchto složek patrný u škváry překopávané a vlhčené.

Na stejných vzorcích škváry byl sledován obsah nebezpečných látek v sušině a ve vyluhu.

Tabulka 2: Obsah nebezpečných látek v sušině škváry dle Vyhlášky 273/2021 Sb., tab. 6.2

Ukazatel	Limitní hodnoty pro využívání vyzrálé strusky k zasypávání	škvára čerstvá	škvára odleželá nepřekopaná	škvára odleželá překopaná	škvára odleželá překopaná vlhčená
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
As	45	9,67	5,13	<4,90	<4,90
Cd	20	3,42	2,40	2,33	2,26
Cr celkový	200	152	235	119	126

Cu	7000	1141,2	1371,3	1200,2	838,42
Hg	1	0,097	0,0099	0,0068	0,0064
Ni	500	111	76,8	70,9	102
Pb	1000	183	150	139	175
Zn	10000	2190	2330	2160	1630
TOC	30000	1,32	<0,1	<0,1	0,24
PAU	1	0,279	0,204	0,266	0,395

Při hodnocení obsahu nebezpečných látek v sušině z pohledu limitních hodnot pro obsah škodlivin v sušině pro využívání vyzrálé strusky k zasypávání všechny vzorky škváry vyhověly. Pouze u vzorku nepřekopané škváry bylo zjištěno překročení limitní hodnoty v obsahu chromu.

Tabulka č. 3: Obsah nebezpečných látek ve výluhu dle Vyhlášky č. 273/2021 Sb., tab. 6.1

Ukazatel	Limitní hodnoty koncentrace škodlivin ve výluhu vyzrálé strusky	škvára čerstvá	škvára odleželá nepřekopaná	škvára odleželá překopaná	škvára odleželá překopaná vlhčená
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
As	0,03	<0,011	<0,011	<0,011	<0,011
Ba	3	0,133	0,111	0,089	0,088
Cd	0,005	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012
Cr celkový	0,2	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037
Cu	1	1,73	0,525	0,418	0,437
Hg	0,0008	<0,000420	<0,000420	<0,000420	<0,000420
Mn	0,3	<0,031	<0,031	<0,031	<0,031
Ni	0,03	0,0109	<0,0077	<0,0077	<0,0077
Mo	0,5	0,104	0,061	0,041	0,031
Pb	0,05	<0,022	<0,022	<0,022	<0,022
Sb	0,07	0,023	0,031	0,041	0,047
Se	0,1	<0,009	<0,009	<0,009	<0,009
V	0,3	<0,028	<0,028	<0,028	<0,028
Zn	0,6	<0,026	<0,026	<0,026	<0,026

Všechny vzorky škváry odleželé splňovaly kritéria koncentrace škodlivin ve výluhu vyzrálé strusky dané tabulkou 6.1 Vyhlášky č. 273/2021 Sb. pro využití strusky k zasypávání. Avšak u vzorku čerstvé škváry byla překročena limitní hodnota obsahu mědi.

Tabulka č. 4: Stanovení ekotoxicity dle Vyhlášky č. 8/2021 Sb., příloha č. 2, tabulka č. 1

Zkušební organismus	Doba působení	Požadavky na výsledky zkoušek ekotoxicity	škvára čerstvá	škvára odleželá nepřekopaná	škvára odleželá překopaná	škvára odleželá překopaná vlhčená
			[%]	[%]	[%]	[%]

Bakterie Aliivibrio fischeri	15 minut	neprokáže se ve zkoušce inhibice světelné emise bakterií větší než 50 % při expozici 15 minut ani při expozici 30 minut	61,7	32,3	31,7	21,0
	30 minut		66,0	40,0	41,7	29,7
Perloočka Daphnia magna Straus	48 hodin	procento imobilizace perlooček nesmí ve zkoušce přesáhnout 50 %	65,0	46,7	50,0	21,7
Řasa Desmodesmus subspicatus	72 hodin	neprokáže se ve zkoušce inhibice nebo stimulace růstu řas větší než 50 % ve srovnání s kontrolou	47,8	41,2	42,6	24,2
Salát Lactuca sativa	120 hodin	neprokáže se ve zkoušce inhibice nebo stimulace růstu kořene salátu větší než 50 % ve srovnání s kontrolou	96,9	21,4	11,2	21,7

Z pohledu zkoušky ekotoxicity je čerstvá škvára nevyhovujícím materiálem. Po odležení po dobu min. 3 měsíců již všechny vzorky z testovaných zakládek splňovaly požadavky Vyhlášky. č. 8/2021 Sb.

Z výsledků mnoha analýz ekologických parametrů vyplynulo, že se jako nejvhodnější režim úpravy jeví odležení škváry s překopáváním a vlhčením vodou 2x týdně. V takovém případě byly ekologické parametry bezpečně splněny po cca 3 měsících od založení pokusu odležení.

Sledování vlivu odležení škváry na její technologické vlastnosti

Vedle provádění analýz složení škváry a sledování jejich environmentálních parametrů byly v laboratořích VUSH prováděny technologické zkoušky vedoucí ke stanovení základních mechanických a fyzikálních vlastností škváry jakožto náhrady přírodního kameniva. Cílem projektu je ověřit použitelnost škváry jako náhrady přírodního kameniva v konstrukčních vrstvách pozemních komunikací, proto byly různé frakce škváry posuzovány dle norem ČSN a EN platných pro kamenivo.

U čerstvé škváry i škváry po různých způsobech odležení byl proveden síťový rozbor (dle ČSN EN 933-1), sledována vlhkost (dle ČSN EN 1097-5) a sypná hmotnost na vysušených vzorcích (ČSN EN 1097-6). Z hlediska granulometrie nedocházelo procesem odležení k zásadním změnám škváry. Procentuální zastoupení zrn ve sledovaných skupinách frakcí bylo srovnatelné. Rozdíly byly patrné z hlediska vlhkosti a sypné hmotnosti čerstvé a odleželé škváry.

Tabulka 5: Vlhkost a sypná hmotnost vzorků čerstvé a odleželé škváry

Vlastnost		Jednotka	škvára čerstvá	škvára odleželá nepřekopaná	škvára odleželá překopaná	škvára odleželá překopaná vlhčená
Vlhkost		%	22	13	12	14
Sypná hmotnost	Volně sypaná	kg·m ⁻³	851	919	1227	1166
	Setřesená	kg·m ⁻³	962	1041	1342	1254

Dále byly provedeny zkoušky škváry a hodnoceny z hlediska použitelnosti jako částečné náhrady přírodního kameniva. K těmto zkouškám již byly použity jen vzorky čerstvé škváry a škváry odleželé překopávané vlhčené. Vlastnosti vzorků škváry byly porovnány se vzorkem přírodního kameniva.

Sledována byla:

- Nasákavost dle ČSN EN 1097-6. Tento parametr není pro použití v jednotlivých technologiích stavby PK omezujícím kritériem. Vyšší nasákavost testovaných vzorků škváry tedy pro předpokládaný účel není limitující.
- Mrazuvzdornost dle ČSN EN 1367-7. S ohledem na hodnotu sypné hmotnosti škváry vycházející ze skutečnosti, že některá zrna jsou výrazně pórovitá, bylo provedeno stanovení mrazuvzdornosti dle normy pro pórovité kamenivo.
- Zkouška rozpadavosti kameniva v autoklávu dle TP 268, příloha 6. Tato zkouška slouží k posouzení objemové stability. V kontextu kameniva (např. strusky) používaným pro stavbu PK se tato metoda používá k určení, jak materiál reaguje na rychlé změny podmínek, čímž je možno zabránit poruchám PK způsobených rozpínáním kameniva. Při zkoušce byl vzorek škváry vystaven účinku páry a tlaku 2 Atm po dobu 2 hodin. Poté byl měřen hmotnostní úbytek. Vyšší úbytek značí horší odolnost. Je-li úbytek větší než 5 % je materiál rozpadavý a nevhodný pro použití pro stavbu PK.

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6: Nasákavost, mrazuvzdornost a rozpadavost škváry a přírodního kameniva

Vlastnost		Jednotka	škvára čerstvá	škvára odleželá překopaná vlhčená	kamenivo přírodní (lom Želešice)
Nasákavost	Frakce 4/8 mm	%	13,8	10,9	3,5
	Frakce 8/16 mm	%	8,0	5,8	2,4
Mrazuvzdornost	Frakce 4/8 mm	%	20,3	8,9	1,1
	Frakce 8/16 mm	%	6,5	5,1	0,9
Rozpadavost v autoklávu	Frakce 4/8 mm	%	8,6	1,3	0,0
	Frakce 8/16 mm	%	3,2	0,7	0,0

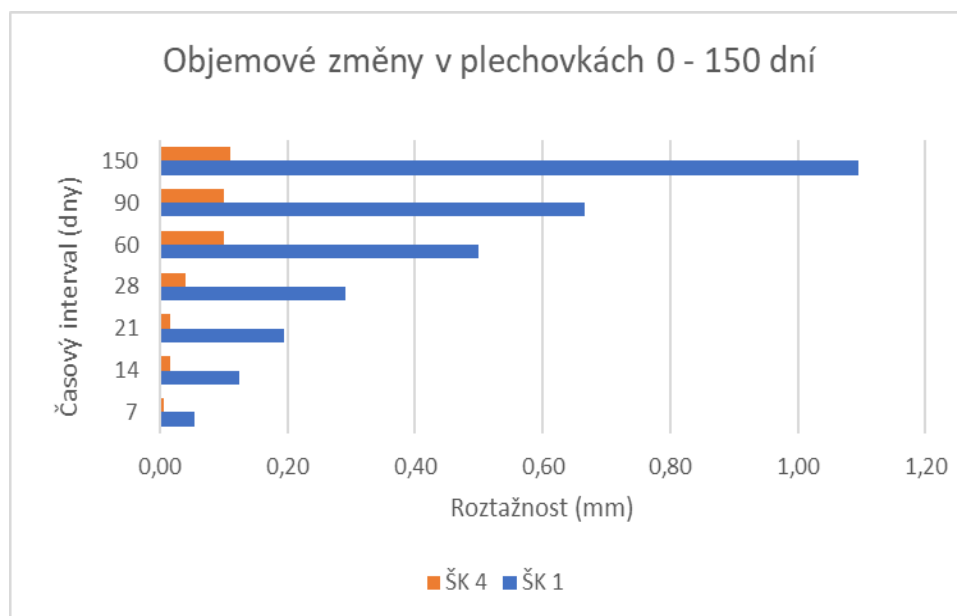
Z výsledků zkoušek uvedených v tabulce 6 je patrné, že všechny sledované parametry byly lepší u škváry odleželé vlhčené překopávané než u škváry čerstvé.

Sledování technologických parametrů škváry pro použití jako náhrada přírodního kameniva v PK s důrazem na objemovou stálost

Z hlediska využitelnosti škváry jako částečné náhrady přírodního kameniva v pozemních komunikacích bylo potřeba posoudit tento materiál z pohledu objemové stálosti. Za tímto účelem byly prováděny nenormové zkoušky, které měly zajistit co nejvíce relevantních informací o vlastnostech a chování škváry při různých podmínkách zrání, a to s důrazem na posouzení procesu odležení škváry a jeho vlivu na technologické vlastnosti. Zkoušky byly prováděny už jen se vzorky škváry čerstvé (označ. ŠK 1) a odleželé překopávané vlhčené (označ. ŠK 4).

Sledovány byly nejprve **objemové změny – roztažnost hutněné škváry v laboratorním prostředí**. Tato zkouška vychází z postupu zkoušky Stanovení rozpínavosti ocelářské strusky popsané v ČSN EN 1744-1. Škvára byla sledována v prostředí laboratoře, tj. za teploty 20 °C a vlhkosti vzduchu 40 %.

Vzorky škváry čerstvé (ŠK 1) a škváry odleželé překopané a vlhčené (ŠK 4) byly testovány v uzavřených kovových nádobách. Vzorky škváry byly nasypány do nádoby, hutněny dle metodiky Proctorovy standardní zkoušky a následně zatíženy roznášecí destičkou, na níž byl umístěn hrot úchytkoměru. Ve zvolených intervalech byl sledován proces objemových změn. Výsledky jsou uvedeny v grafu (Obr. 1), který potvrzuje předchozí závěry, že odležení škváry za jejího postupného překopávání a vlhčení má výrazný vliv na stabilitu a minimalizaci tímto postupem sledovaných objemových změn škváry ze ZEVO.



Obr. 1: Objemové změny v čase – škvára čerstvá ŠK1 a odleželá ŠK4 (prostředí laboratoře)

Dále bylo prováděno **testování kompakované škváry – s důrazem na posouzení objemové stálosti škváry**. Vzorky škváry, tj. škvára čerstvá ŠK 1 a škvára odleželá překopávaná vlhčená ŠK 4 (doba odležení min. 3 měsíce) byly použity pro výrobu zkušebních vzorků tvaru válečků o průměru 41 mm a výšce 32 mm. Válečky byly vyrobeny pouze ze škváry frakce 0/11 mm v kompakovacím zařízení při tlaku 20 kN. Vlhkost čerstvé škváry odebrané ve společnosti SAKO byla 22 %. Pro účely kompaktování byla stanovena optimální vlhkost 11–12 %. Škváru tedy bylo nutno vysušit a následně dovlhčit.

Kompaktovány byly tři varianty materiálu:

- 1) Bez použití pojiva – pouze škvára s ponechanou technologickou vlhkostí (u ŠK 4 dovlhčeno),
- 2) Bez použití pojiva – směs 50 % škváry frakce 0/11 mm s 50 % drceného cementobetonového krytu PK frakce 0/4 mm (dovlhčeno pro potřeby kompaktace),
- 3) S použitím pojiva – směs 90 % škváry 0/11 mm s 10 % pojiva CEM I 42,5 R (dovlhčeno).

Válečky byly ponechány 7 dní v podmínkách vlhkého uložení, tj. při teplotě 20 °C a vlhkosti 90 %, a byl sledován jejich stav (viz Obr. 2).



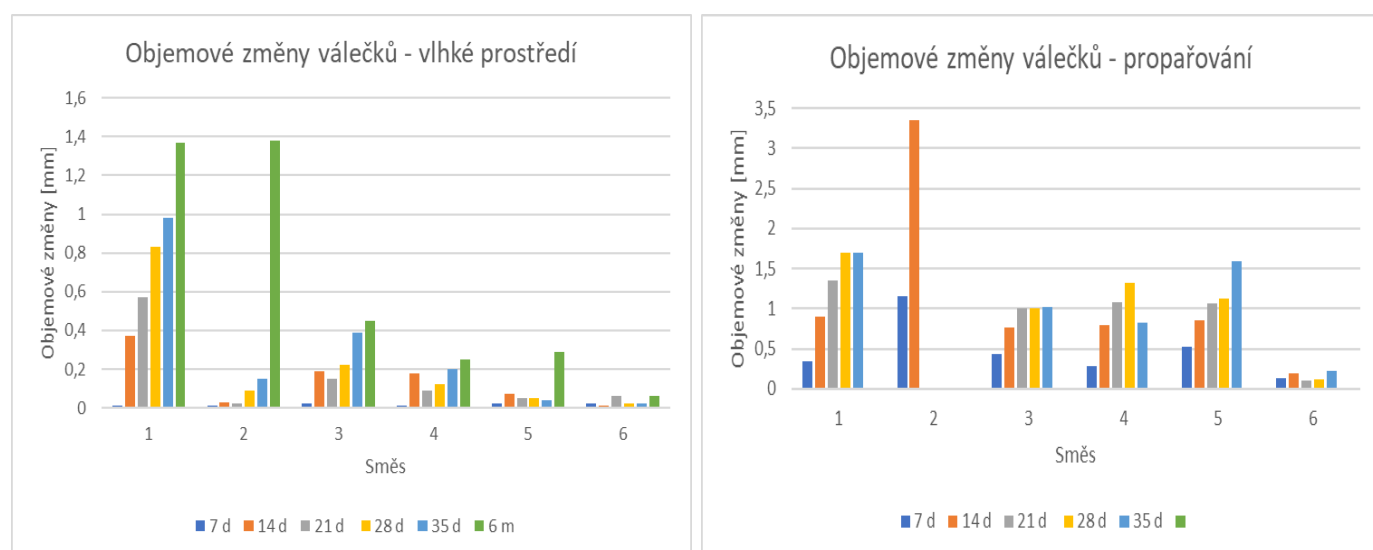
Obr. 2: Vzorová sada vzorků - válečky po 7 dnech zrání ve vlhkém prostředí

Po 7 dnech zrání byly sady válečků podrobeny testování ve čtyřech různých podmínkách zrání a v pravidelných intervalech sledovány (měřeny a vizuálně posuzovány) jejich objemové změny.

Podmínky uložení vzorků po 7 dnech zrání:

- laboratorní prostředí (teplota 20 °C, vlhkost 40 %),
- prostředí vlhkého uložení (teplota 20 °C, vlhkost 90 %),
- propařování (teplota 70 °C, vlhkost 100 %),
- vodní uložení.

V průběhu testování v různých prostředích byla zkušební tělesa pravidelně měřena. Objemové změny válečků uložených ve vlhkém prostředí a propařovaných jsou graficky znázorněny na Obr. 3. Tělesa uložená v suchém laboratorním prostředí vykazovala pouze minimální změny, tj. v rozpětí hodnot 0 až 0,2 mm.



Obr. 3: Objemové změny válečků v čase – vlhké prostředí (vlevo), propařování (vpravo) pro varianty viz Tabulka 7

Po 28 dnech a po 6 měsících působení zvolených typů prostředí byly válečky podrobeny testování pevnosti v tlaku (tabulka 7) a byla sledována objemová hmotnost těchto vzorků (tabulka 8). U vzorků po šesti měsících zrání bylo prokázáno, že nejvyšších užitečných vlastností bylo dosaženo u vzorků receptury s označením 6, tj. směs 90% škváry odleželé překopávané vlhčené s 10 % pojiva, a to ve všech testovaných prostředích zrání.

Tabulka 7: Pevnost v tlaku válečků po 6 měsících uložení v různých prostředích

Označení vzorku/složení	1	2	3	4	5	6
	ŠK1 (fr. 0/11 mm)	ŠK4 (fr. 0/11 mm)	ŠK1+ bet.rec (50% + 50%)	ŠK4+ bet.rec (50% + 50%)	ŠK1 + cem. (90% + 10%)	ŠK4 + cem. (90% + 10%)
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Laboratorní uložení	6,35	7,91	8,74	9,89	13,33	26,24
Vlhké uložení	0,88	2,94	7,34	10,05	17,9	24,22
Propařování	0*	0*	7,06	3,47	15,05	25,83
Vodní uložení	5,4	6,43	9,2	9,35	13,38	27,33

Poznámka: * významné porušení či rozpad těles (neměřeno)

Tabulka 8: Objemová hmotnost válečků po 6 měsících uložení v různých prostředích

Označení vzorku/složení	1	2	3	4	5	6
	ŠK1 (fr. 0/11 mm)	ŠK4 (fr. 0/11 mm)	ŠK1+ bet.rec (50% + 50%)	ŠK4+ bet.rec (50% + 50%)	ŠK1 + cem. (90% + 10%)	ŠK4 + cem. (90% + 10%)
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Laboratorní uložení	1755	1885	1920	1975	1850	2000
Vlhké uložení	1400	1675	1885	1970	1785	1965
Propařování	0*	0*	1840	1840	1795	1960
Vodní uložení	1670	1790	1905	1955	1835	1950

Poznámka: * významné porušení či rozpad těles (neměřeno)

Vizuální posouzení vlivu různých prostředí na stav těles

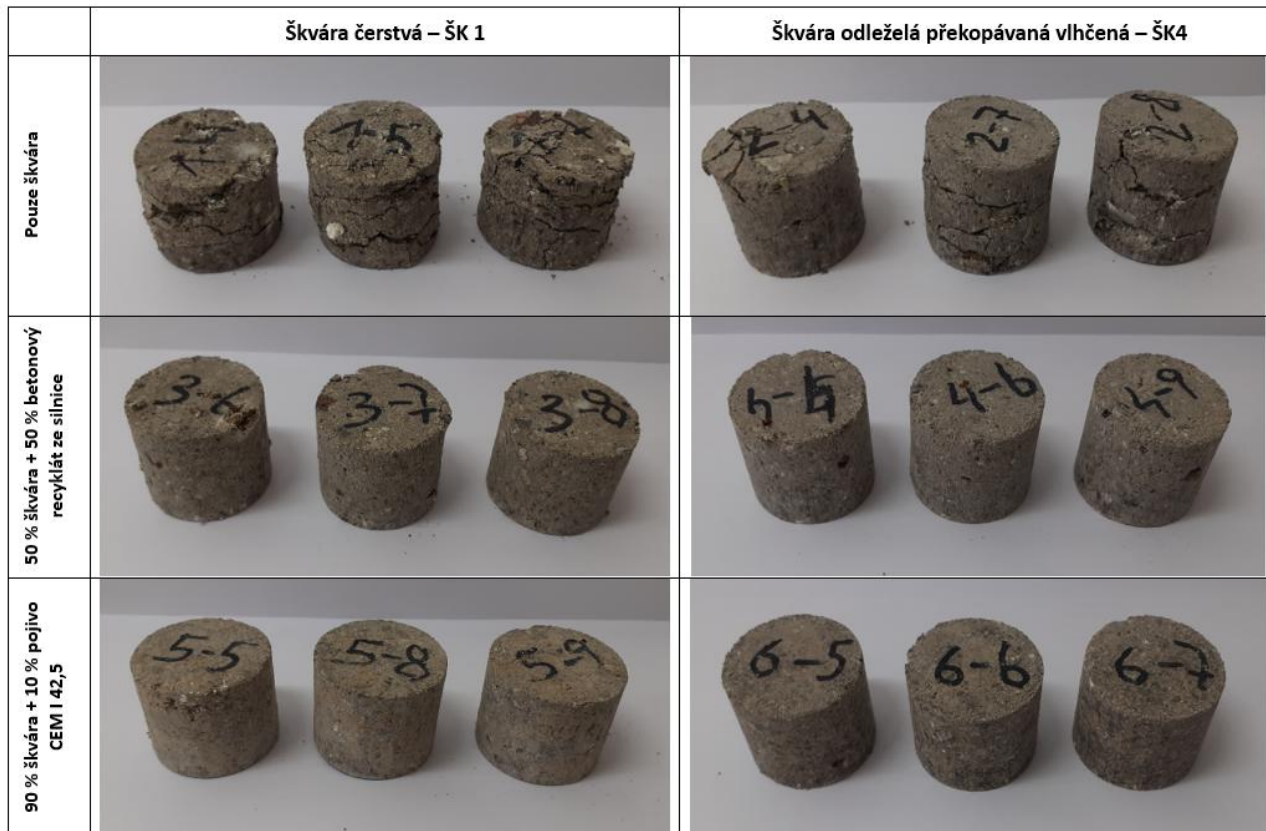
Z Obr. 4 je patrné, že stav zkušebních těles uložených v suchém prostředí laboratoře byl i po šesti měsících výborný. V suchém prostředí nedochází k významným reakcím složek škváry a tím ani k objemovým změnám.

Tělesa uložená po dobu 6 měsíců ve vodním prostředí vykazovala výborný stav, podobně jako tomu bylo u těles uložených v suchém prostředí laboratoře.

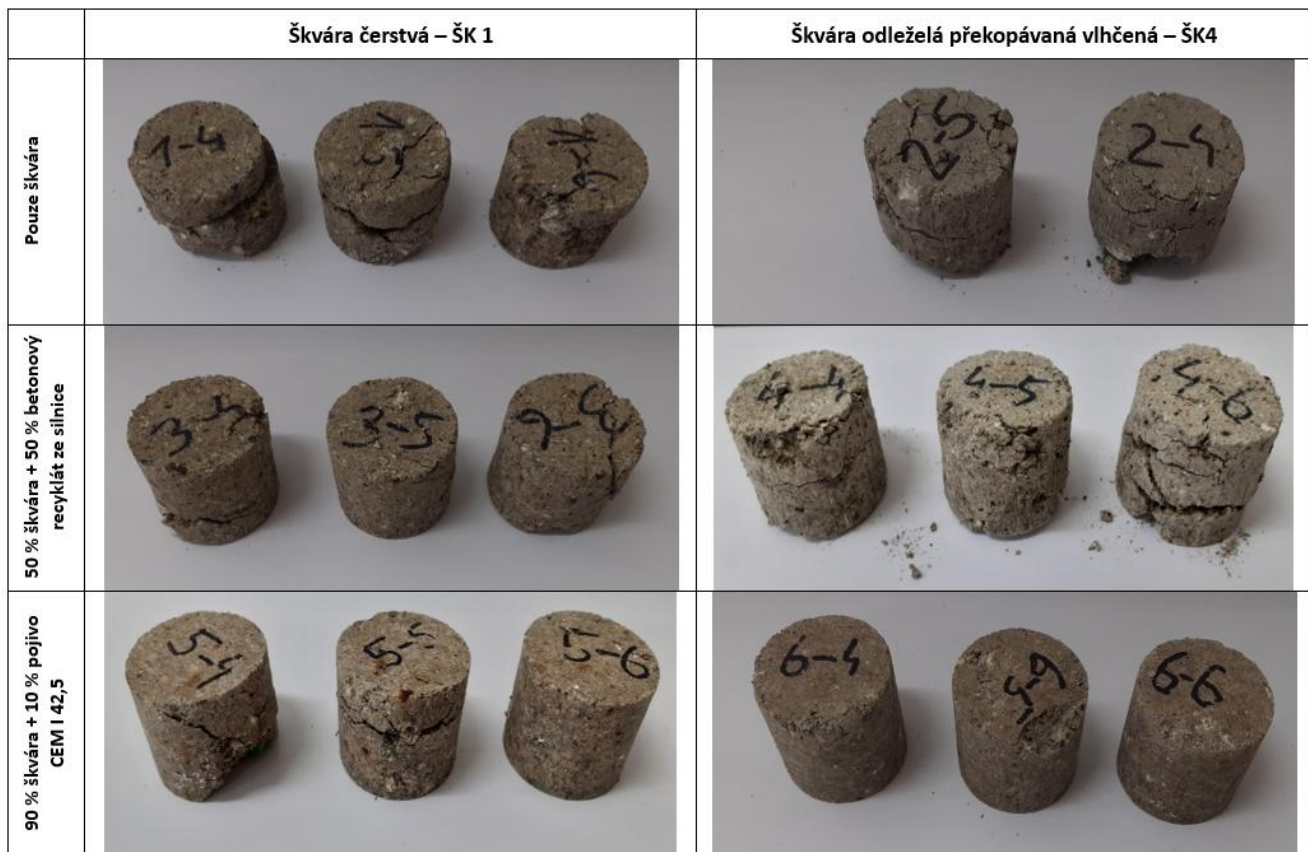
Na Obr. 5, který zaznamenává stav těles uložených ve vlhkém prostředí, je patrný rozpad těles vyrobených pouze ze škváry. Tělesa, ve kterých byla škvára použita v kombinaci s betonovým recyklátem nebo byla pojena cementem, vykazovala dobrý stav. Vizuálně lépe působila tělesa vyrobená z odleželé škváry ŠK4.



Obr. 4: Stav zkušebních těles po 6. měsících uložení v suchém prostředí



Obr. 5: Stav zkušebních těles po 6. měsících uložení ve vlhkém prostředí



Obr. 6: Stav zkušebních těles po propařování (5 týdnů)

Tělesa, která byla po 7 dnech zrání umístěna do propařovací komory (Obr. 6), vykazovala po pěti týdnech výrazné porušení. Proto byl tento pokus ukončen. Minimální objemové změny vykazovala tělesa vyrobená ze škváry odleželé překopávané vlhčené ŠK4 pojené cementem.

Poznámka: V případě těles vyrobených jen ze škváry ŠK1 a ŠK4 došlo k částečnému či úplnému rozpadu těles již po 3 týdnech.

Využitelnost škváry v konstrukčních vrstvách PK

Z laboratorního ověřování vyplývá, že pro použití škváry ze ZEVO do konstrukčních vrstev pozemních komunikací je nejvíce problematická objemová stálost škváry, a to vzhledem k významné heterogenitě složení i vlastností škváry i přes splnění environmentálních požadavků daných stávající legislativou. Problematickou vlastností škváry je také její objemová hmotnost a vysoká nasákavost, kde je zvýšené riziko trvalého zvodnění konstrukčních vrstev. To by mohlo způsobit nežádoucí plastické chování konstrukčních vrstev, pokud by byla škvára použita jako samostatná konstrukční vrstva anebo jako součást násypového tělesa, zejména v aktivní zóně zemního tělesa (podloží) PK. Současně s přihlédnutím k dosavadní úrovni znalostí z praxe v podmínkách ČR, která je pro použití škváry při výstavbě pozemních komunikací (PK) v podstatě minimální (viz např. TP 268 kap. 7.2) je vhodné považovat za technologicky a funkčně bezpečné v konstrukčních vrstvách nahrazení části přírodního kameniva škvárou vrstvy typu ŠD (šterkodrti) při aplikaci jako nestmelené konstrukční vrstvy. Dále je jedním z možných směrů využití škváry v doplnění křivky zrnitosti směsi recyklátu do vrstev typu RS (recyklované směsi) u technologie recyklace konstrukčních vrstev vozovky za studena na místě s využitím pojiv. Zásadním krokem pro uplatnění škváry ze ZEVO je vyjmutí tohoto materiálu z režimu odpadu po úpravě.

Využití směsi odleželé škváry se šterkodrtí ve vhodném poměru do spodní, případně horní podkladní vrstvy PK bude náplní ověřování v reálných podmínkách v prostorách areálu společnosti SAKO Brno,

a.s. při rekonstrukci vnitroareálové odstavné plochy, tzv. vodohospodářsky zabezpečené plochy. Ověřování technologie výroby směsi, pokládka, ošetřování a testování vlastností konstrukčních vrstev i podloží včetně sledování environmentálních dopadů, tj. případného vyluhování nebezpečných látek, bude dle plánu projektu realizováno v průběhu tohoto roku.

Závěr

Z dlouhodobých výzkumů i reálných aplikací v některých zemích EU vyplývá, že škvára ze ZEVO je vhodná k využití jako ochranná či podkladní nestmelená vrstva v konstrukci pozemních komunikací nebo jiných liniových staveb, kde nahrazuje tradiční vrstvy ze štěrkodrti.

Toto využití je možné při splnění přesně definovaných technických podmínek, jakými jsou např. tloušťka vrstvy, vzdálenost od hladiny spodních vod, omezení množství pronikajících srážek, vzdálenost od zdrojů pitné vody a environmentálních podmínek, tj. nepřekročení limitních hodnot nebezpečných látek v sušině a hodnoty vyluhovatelnosti. Při splnění uvedených podmínek bude využití škváry bezpečné z hlediska možných dopadů na životní prostředí.

V průběhu prvního roku řešení projektu bylo ověřeno, že pro využitelnost škváry do konstrukčních vrstev PK je důležitý proces odležení škváry. Byly realizovány zakládky čerstvé škváry a sledovány její environmentální ukazatele při různých způsobech procesu zrání. Z výsledků environmentálních ukazatelů ale také technologických parametrů vyplynulo, že pro využitelnost škváry je nutné provést odležení po dobu nejméně 3 měsíce, pro urychlení procesu je důležité zajistit správný způsob úpravy, tj. pravidelné vlhčení a překopávání škváry na vodohospodářsky zabezpečené ploše.

Takto upravená škvára vykazovala výborné vlastnosti ve směsi s betonovým recyklátem a silničním cementem z pohledu objemové stálosti zkoušené dle výše popsaného nenormového postupu.

Poděkování

Tento článek je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy ČR v rámci Programu DOPRAVA 2030, v rámci řešení projektu CL02000058 Ověření využitelnosti škváry ze spalování komunálních odpadů a podobných odpadů z průmyslu jako suroviny pro výstavbu konstrukčních vrstev pozemních komunikací.

Literatura

- [1] Blasenbauer, D.; Huber, F.; soudce Lederer; Quina, M.J.; Blanc-Biscarat, D.; Bogush, A.; Bontempi, E.; Blondeau, J.; Chimenos, J.M.; Dahlbo, H.; et al. et al. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe. Waste Management 2020, Volume 102, 868-883, ISSN 0956-053X, DOI: 10.1016/j.wasman.2019.11.031.
- [2] Joseph AM, Snellings R, Van den Heede P, Matthys S, De Belie N. The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View Materials (Basel). 2018 Jan 16; 11(1):141. DOI: 10.3390/MA11010141.
- [3] Lynn, C.J.; Ghataora, G.S.; Dhir OBE, R.K.; Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements. International Journal of Pavement Research and Technology 2017, 10, 185-201, DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.12.003.
- [4] Silva, R.V., de Brito, J., Lynn, C.J., Dhir, R.K., 2019. Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. Resour. Conserv. Recycl. 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>

- [5] Verbinnen, B., Billen, P., Van Caneghem, J., Vandecasteele, C., 2017. Recycling of MSWI Bottom Ash: A Review of Chemical Barriers, Engineering Applications and Treatment Technologies. *Waste Biomass Valorization* 8, 1453–1466. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9704-0>.
- [6] Dou, X., Ren, F., Nguyen, M.Q., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W.P., Chang, V.W.-C., 2017. Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.044>.
- [7] Bertolini, L.; Carsana, M.; Cassago, D.; Curzio, A.Q.; Collepardi, M. MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2004, 34, 1899–1906.
- [8] Piantone, P.; Bodéan, F.; Chatelet-Snidaro, L. Mineralogical study of secondary mineral phases from weathered MSWI bottom ash: Implications for the modelling and trapping of heavy metals. *Appl. Geochem.* 2004, 19, 1891–1904.
- [9] Bayuseno, A.P.; Schmahl, W.W. Understanding the chemical and mineralogical properties of the inorganic portion of MSWI bottom ash. *Waste Manag.* 2010, 30, 1509–1520.
- [10] Chen H., Wang S., Tang C. Reuse of incineration fly ashes and reaction ashes for manufacturing lightweight aggregate. *Construction and Building Materials.* 2010; 24:46–55. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.008.
- [11] Beatriz S. Bandarra, Joana L. Pereira, Rui C. Martins, Alex Maldonado-Alameda, Josep M. Chimenos and Margarida J. Quina. Opportunities and Barriers for Valorizing Waste Incineration Bottom Ash: Iberian Countries as a Case Study, *Appl. Sci.* 2021, 11(20), 9690; <https://doi.org/10.3390/app11209690>
- [12] Šyc M., Simon F. G., Hykš J. Braga R., Biganzoli L., Costa G., Funari V., Grosso M. Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 393, 2020, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122433>.
- [13] [Za jakých podmínek lze využívat škváru ze ZEVO | Průmyslová ekologie](#)
- [14] Weiksnar KD, Ferraro CC, Kari R, Mayer N, Townsend TG. Opportunities and challenges with implementing a recycling program for municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a construction aggregate: A programmatic review. *J Air Waste Manag Assoc.* 2024 Oct;74(10):699-713. doi: 10.1080/10962247.2024.2383651. Epub 2024 Sep 4. PMID: 39046185.
- [15] [Střední Čechy+3e15.cz+3energetika.tzb-info.cz+3.](#)
- [16] Komarnický Alexandr. Po(d)klad budoucnosti? Pražské služby testují využití škváry v praxi. *Pražské služby*, 7. 11. 2023
- [17] Valentin J., Baloch T., Šyc M., Ameer A. B. Odpadové fórum 2025, [Prezentace aplikace PowerPoint](#)