

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

*Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering*

doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

**Betonářský kal – odpad nebo druhotná
surovina?**

*Concrete slurry waste – waste or secondary
raw material?*

Praha, 2025

Summary

Construction is one of the key sectors of industry, as it not only contributes directly to the economy but also encompasses a wide range of related fields. A particularly important role in this sector is played by the production of concrete, the most widely used construction material worldwide. Concrete is characterized by an excellent balance between energy input and performance, especially in terms of durability. However, its production is associated with high consumption of non-renewable resources and energy, as well as significant emissions of carbon dioxide. These negative impacts are currently the subject of intensive international research, which focuses primarily on the development of more sustainable technologies and the use of waste materials while maintaining or even improving the functional properties of concrete.

The main research directions aim at reducing the consumption of natural raw materials and lowering the demand for cement—the key component of concrete, whose production is also highly energy-intensive. This work presents selected findings on the potential use of concrete slurry waste, which arises as an undesirable by-product during concrete production. Its practical application in construction ideally combines the essential aspects of an ecological approach: reducing the extraction of non-renewable resources, decreasing energy demands, minimizing raw material transport, and eliminating waste that has so far remained largely unused. The text presents applications of various forms of concrete slurry waste and introduces a methodological concept for its direct incorporation into fresh concrete production, which could lead to a nearly waste-free production cycle.

The results of current research indicate that this is still a relatively overlooked topic, the successful resolution of which could bring substantial benefits not only for the economics of concrete production but also for the conservation of non-renewable resources and the protection of the environment. Mastering this issue therefore carries not only economic significance but also profound societal implications.

Souhrn

Stavebnictví patří mezi klíčová odvětví průmyslu, neboť vedle přímého přínosu pro ekonomiku zahrnuje také řadu navazujících oborů. Významnou roli v této oblasti hraje výroba betonu, který je celosvětově nejpoužívanějším stavebním materiálem. Beton se vyznačuje výborným poměrem mezi vloženou energií a dosaženými vlastnostmi, zejména trvanlivostí. Jeho výroba je však spojena s vysokou spotřebou neobnovitelných zdrojů, energií a s produkcí emisí oxidu uhličitého. Právě tyto negativní dopady jsou v současnosti předmětem intenzivního mezinárodního výzkumu, který se soustředí především na hledání ekologičtějších technologií a na využívání odpadních materiálů při zachování či zlepšení užitných vlastností betonu.

Hlavní směry výzkumu se zaměřují na snižování spotřeby přírodních surovin a úsporu cementu – klíčové složky betonu, jejíž výroba je zároveň energeticky mimořádně náročná. Tato práce představuje výběr výsledků zkoumání možností využití betonářského kalu, jenž vzniká při výrobě betonu jako nežádoucí odpad. Jeho praktické uplatnění ve stavebnictví ideálně spojuje zásadní aspekty ekologického přístupu: omezení spotřeby neobnovitelných zdrojů, snížení energetické náročnosti, redukci přepravy surovin i eliminaci vzniku odpadu, který je dosud převážně nevyužit. V textu jsou představeny aplikace pro různé formy betonářského kalu a je zpracován metodický koncept jeho přímého zapojení do výroby čerstvého betonu, což by mohlo vést k téměř bezodpadovému výrobnímu cyklu.

Výsledky dosavadního výzkumu ukazují, že jde o dosud poměrně opomíjené téma, jehož řešení může mít zásadní přínos nejen pro ekonomiku výroby betonu, ale i pro úsporu neobnovitelných zdrojů a ochranu životního prostředí. Úspěšné zvládnutí této problematiky tak má vedle významu ekonomického i hluboký společenský dopad.

Klíčová slova

Betonářský kal, hydratační produkty, pojivový systém, racionální návrh

Keywords

Concrete slurry waste, hydration products, binding system, rational design

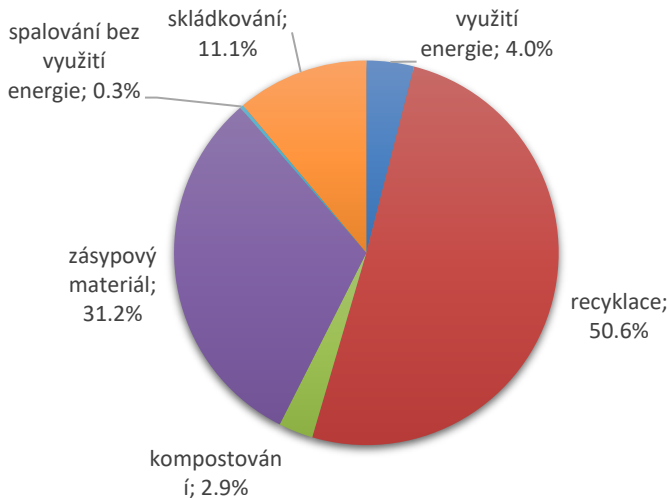
Obsah

1. Úvod.....	1
2. Betonářský kal	3
2.1 Charakterizace betonářského kalu.....	4
2.2 Vliv betonářského kalu na hydrataci cementu	11
2.3 Vliv betonářského kalu na mechanické vlastnosti cementových malt	13
2.4 Shrnutí hlavních vlastností betonářského kalu.....	14
3. Experimentální ověření možností využití betonářského kalu	15
3.1 Využití betonářského kalu raného stáří	15
3.2 Využití plně hydratovaného betonářského kalu	20
4. Závěr.....	26
Literatura.....	27
Poděkování.....	33
Životopis.....	34

1. Úvod

Beton je nejpoužívanějším stavebním materiálem současnosti a lze očekávat, že jeho spotřeba bude dále narůstat [1]. V České republice je každoročně vyrobeno 6,4 – 7,5 mil. m³ transport betonu, což představuje vysoká nároky na spotřebu základních surovin, které navíc představují neobnovitelné zdroje [2]. Vysoká spotřeba betonu jakožto stavebního materiálu je dána jeho výhodnými mechanickými a trvanlivostními vlastnostmi. Nicméně enormní množství energie a emisí oxidu uhličitého, se kterými je výroba betonu spojena, vede odbornou veřejnost k hledání efektivních cest pro snižování energetické náročnosti betonu a implementaci technologií a postupů vedoucí k vyšší ochraně životního prostředí a neobnovitelných zdrojů.

Vysoká uhlíková stopa betonu je způsobena primárně využíváním portlandského slínku, jež je klíčovou složkou tradičního cementu. Výroba portlandského slínku je založena na výpalu surovinové moučky v rotační peci, kde hlavní složkou je mletý vápenec, jehož kalcinací vzniká v závislosti na dalších faktorech 510 – 712 kg CO₂ na tunu portlandského slínku [3]. K těmto endogenním emisím oxidu uhličitého je nutné navíc přičíst i přidružené emise v souvislosti s nutností mletí, transportu apod. Tyto doprovodné procesy výrobu slínku zatěžují dalšími 304 – 490 kg CO₂ [3]. Celková hodnota emisí je silně závislá na typu použitého paliva a lokalitě výroby.



Obr. 1: Celkové odpadové hospodářství v roce 2021 [4]

Dalším nezanedbatelným aspektem z pohledu používání betonu je vznik odpadního materiálu v podobě stavebního odpadu v různých podobách. Velké množství odpadu je generováno demolicí budov, které dosáhly konce své životnosti. V této souvislosti je dnes intenzivně věnuje pozornost pečlivému třídění tohoto demoličního odpadu, aby jednotlivé složky bylo možné opětovně použít. Podle statistického úřadu vzniká v ČR přibližně 39 mil. tun odpadu, z nichž přibližně 50% je recyklováno a 11% je uloženo na skládkách bez dalšího využití. Z celkového objemu odpadu připadá na stavební odpad nejvyšší podíl – 17,9 mil. tun, což představuje přibližně 46% [4].

Z těchto důvodů je posledních letech věnována značná pozornost vývoji technologií a přístupů, které by redukovaly negativní dopady stavebnictví na okolní prostředí. V oblasti výroby cementu byla zavedena řada opatření pro zvýšení efektivity mletí a výpalu, aby se snížilo množství potřebné energie. Z materiálového hlediska se v této oblasti mnohem více uplatňují směsné portlandské cementy, u nichž je slínek nahrazen minerální příměsí. Nicméně s ohledem na nedostatek vhodných aktivních příměsí, jakými jsou např. vysokopeční granulované struska či popílek, je v tak preferována výroba a distribuce cementů s obsahem mletého vápence, který je při výrobě cementu dobře dostupný. Vedle toho je ve výrazně vyšším množství využíván demoliční odpad, ať už ve formě recyklovaného kameniva do betonu či jako dočasná úprava povrchu, násypů, apod., což umožňuje uspořit nezanedbatelné množství přírodního kameniva.

2. Betonářský kal

Betonářský kal (concrete slurry waste; CSW) je jedním z odpadních materiálů, který vzniká při výrobě čerstvého betonu. Primárním zdrojem betonářského kalu je odpadní čerstvý beton, který vzniká chybami při výrobě, vratkou nevyhovujícího čerstvého betonu ze stavby či betonu nevyužitého. Tento čerstvý beton je na většině betonáren zpracován recyklačním zařízením, Obr. 2, které systémem vmytí oddělí původní pojivové složky a kamenivo. Zatímco pojivové složky jsou rozptýleny ve vodní nádrži za vzniku kalové vody, vniklé tzv. regenerované kamenivo je opětovně použito pro výrobu betonu. Přestože lze část kalové vody použít při výrobě betonu, s ohledem na její přebytek je průběžně přečerpávána do sedimentačních jímek, Obr. 3, kde se kal postupně ukládá; po jejich naplnění je následně deponován na skládce. Alternativním řešením je využití systému filtrační separace, kdy dojde k oddělení pevných částic ve formě koláče s minimem vody. Takovouto vodu lze následně efektivně využít na oplach a další technologické operace.



Obr. 2: Recyklační linka

Dle Xuan *et. al* (2016) [5] se množství nevyužitého odpadu pohybuje v rozmezí 1- 4% výroby betonu, což koresponduje se zkušenostmi a daty získanými na území ČR. Celosvětově se tak objem odvodněného CSW pohybuje okolo 260 Mt. Absolutní většina tohoto odpadního materiálu je následně skládkována, což představuje nejen vysoké náklady, ale i značné environmentální riziko. CSW je primárně tvořen pojivovými složkami,

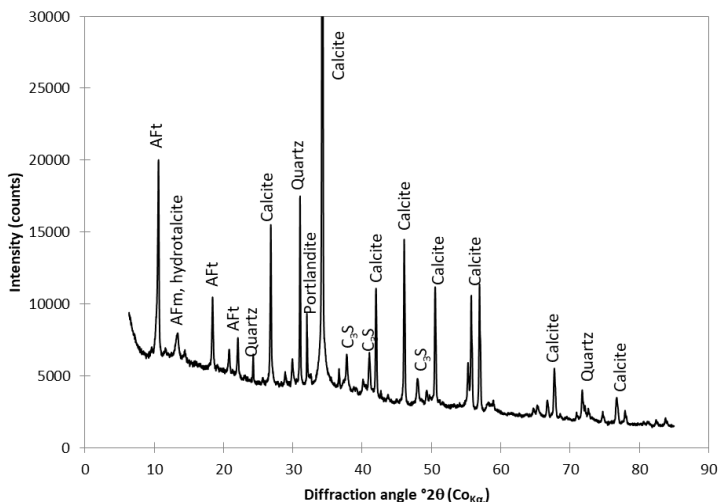
zejména cementem a jemnými podíly písku. Z tohoto důvodu obsahuje vysoké množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$, zcela nebo částečně zhydratované podíly cementu a hydratační produkty portlandského cementu jako jsou hydratované silikáty a alumináty a ettringit. Na základě čtených analýz bylo potvrzeno, že kaly vznikající na výrobních transportbetonu si jsou velice podobné. Oproti tomu kaly vznikající v prefa závodech obvykle vykazují nižší podíl aktivních fází, což je dáno harmonogramem výroby a používáním odlišných typů receptur. Tyto kaly tak obsahují zvýšený podíl interních filerů, což je často dáno i kombinací různých výrobních postupů, např. řezání či broušení hotových dílců. Na druhou stranu však lze v takovýchto provozech uplatnění odpadního kalu přesněji plánovat.



Obr. 3: Sedimentační jímka s profilem sedimentovaného kalu

2.1 Charakterizace betonářského kalu

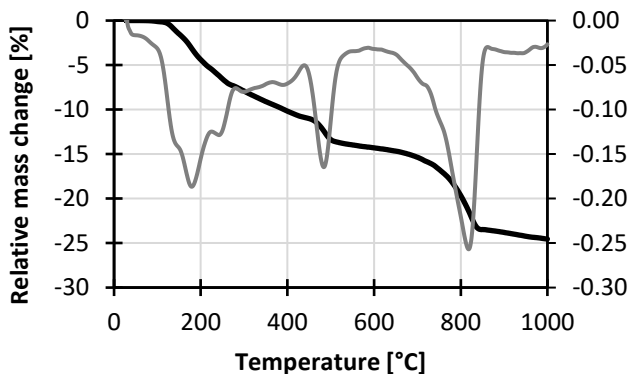
Charakterizace tohoto odpadního materiálu probíhala v úvodních etapách výzkumu [6]. Fázové složení CSW bylo studováno pomocí rentgenové práškové difrakce (Obr. 4, Tab. 1). Je zřejmé, že se jedná o velmi složitý materiál, a proto by výsledky Rietveldovy metody měly být považovány pouze za orientační. V CSW byly identifikovány tři skupiny minerálů. Zprvce, existují zbytky slinkových minerálů (alit, belit, brownmillerit); lze odhadnout, že CSW obsahuje asi 10 % nehydratovaného cementu. Hydráty C-S-H jako produkty hydratace alitu a belitu jsou nejhodnějšími hydratačními produkty [7]; protože tyto hydráty jsou obvykle rentgenově amorfní, jejich obsah byl nepřímo stanoven pomocí stanovení amorfního podílu (28 %). Další skupinou hydratačních produktů jsou hlinitanové fáze; Existují dva typy: fáze AFt – obecně $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2\text{X}_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ a fáze AFm $\text{Ca}_4[\text{Al}(\text{OH})_6]_2\text{X} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, kde X znamená CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , 2OH^- nebo 2Cl^- .



Obr. 4: Difraktogram studovaného CSW

Přítomnost malého množství hydrotalcitu naznačuje, že v závodě na výrobu transportbetonu byl použit cement obsahující strusku (CEM II/B-S 42,5 N je skutečně jedním z cementů používaných v závodě). Sloučeninou s nejvyšším zastoupením byl CaCO_3 ; jeho množství bylo stanoveno pomocí termogravimetrie (35,4 %) za předpokladu, že CaCO_3 je jediný uhličitán v systému (nízký obsah MgO a přítomnost hydrotalcitu naznačují, že MgCO_3 pravděpodobně nebyl přítomen nebo byl přítomen jen v malém množství). XRD ukazuje na přítomnost kalcitu, ale CaCO_3 může být přítomen v amorfní formě a – jak je uvedeno výše – výsledky Rietveldovy analýzy nejsou v tomto případě zcela důvěryhodné. Obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ byl 13,6 % (TG), Obr. 5.

Obsah portlanditu zjištěný XRD byl nižší, důvod je stejný jako v případě uhličitánu vápenatého/kalcitu. Hydroxid vápenatý je zjevně produktem hydratace OPC, který je kontinuálně karbonatován na uhličitán vápenatý. Přítomný $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reguluje pH čerstvého CSW na 12,5. Dalším zdrojem uhličitánu vápenatého (v tomto případě ve formě kalcitu) v CSW je vápencová moučka, která se používá v závodě na výrobu transportbetonu jako složka betonu. V CSW byla také přítomna nejjemnější frakce kameniva; skládá se z křemene a zejména slíd (muskovit a menší množství biotitu).

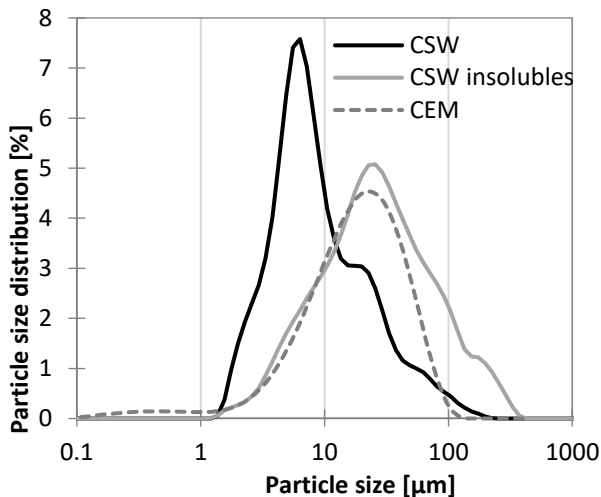


Obr. 4: Termogravimetrie betonářského kalu [6].

Tabulka 1: Složení čerstvého betonářského kalu a běžného portlandského cementu [6].

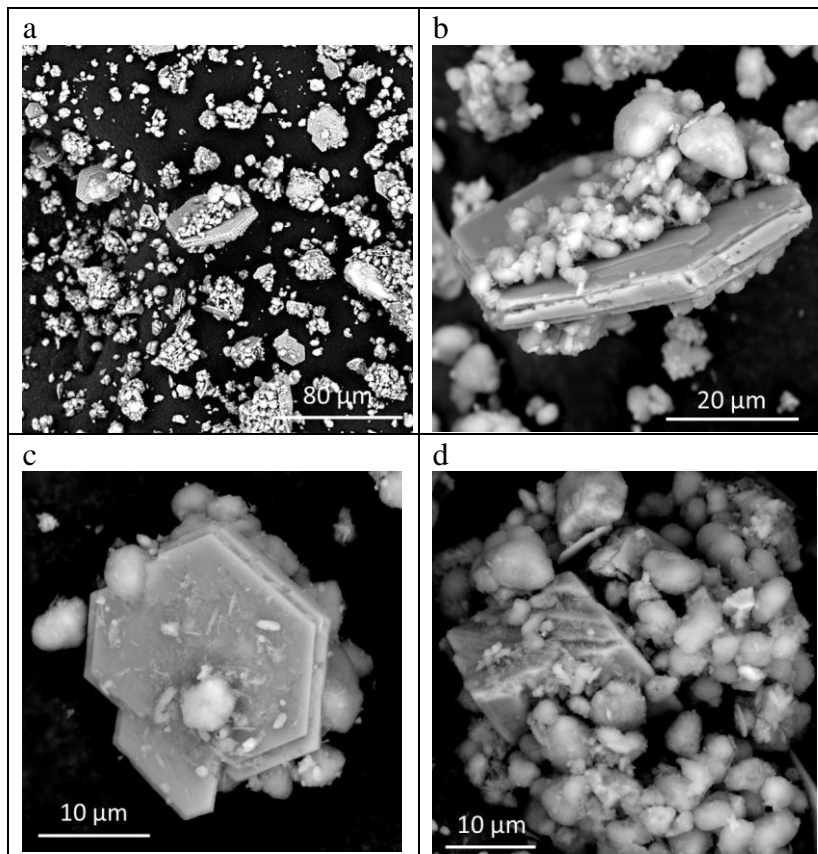
			CSW		OPC
			TG	XRD	XRD
	Amorfní podíl	-	-	28	-
Hydratační produkty	AFm fáze	$\text{Ca}_4[\text{Al}(\text{OH})_6]_2\text{X}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-	16	0
	AFt fáze	$\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2\text{X}_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$	-	9	0
	Hydrotalcite	$\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	-	3	0
Slínkové minerály	Alit	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	-	3	71
	Belit	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	-	7	10
	Aluminát	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	-	0	5
	Brownmillerit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	5	9
	Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	13,6	3	0
	Kalcit	CaCO_3	35,4	16	0
	Sádrovec	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	2	5
	Křemen	SiO_2	-	2	0
	Slída	-	-	6	0

Zbytek po rozpuštění v kyselině v CSW byl 11 %. Distribuce velikosti částic CSW je poměrně široká (2–200 μm) s d_{50} 7 μm (Obr. 5). CSW má bimodální křivku distribuce částic; frakce menších částic (do cca 10 μm) je dominantně tvořena hydratačními produkty a uhlíčanem vápenatým, zatímco hrubší částice pocházejí z jemných částic kameniva (křemen, slída). Toto zjištění bylo získáno porovnáním křivek distribuce částic kompletního CSW a zbytku nerozpustného v kyselině. d_{50} použitého portlandského cementu bylo 18 μm .



Obr. 5: Distribuce částic betonářského kalu [6].

SEM snímky CSW (Obr. 6) doplňují výše uvedené údaje o složení a distribuci velikosti částic. Je třeba poznamenat, že práškový vzorek při SEM analýze neobsahuje „hrubé“ částice (100-300 μm) křemene a slídy. Obr. 6a ukazuje vzhled (jemné částice) CSW – obsahuje širokou škálu částic a jejich shluků. Nejvýraznější jsou hexagonální vrstvy AFm [8] obklopené jehličkami AFt (obr. 4 c) a víceméně kulovitými částicemi. Kulovité částice o průměru 2-5 μm jsou hlavními složkami CSW, což je v souladu s výsledky PSD. Největší hranatou částicí na Obr. 6d je podle EDS portlandit. Je opět obklopen shlukujícími se částicemi; některé z nich jsou opět kulovité, jiné – hranatější – jsou shluky ještě menších krystalů. Elementární složení (podle EDS) sférických částic odpovídá C-S-H (typicky $\text{CaO/SiO}_2 \sim 1,2-1,4$ molů), zatímco hranatější shluky jsou převážně $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3$ ($\text{CaO} > 90\%$).



Obr. 6: SEM snímky CSW. a) celkový přehled; b) krystal AFm se shlukem sférických částic; c) krystal AFm s jehlami AFt; d) krystal portlanditu se shlukem částic [6].

Možné vyluhování těžkých kovů a dalších toxických prvků je důležitým aspektem při nakládání se všemi anorganickými odpady a druhotnými surovinami [9]. Z tohoto důvodu byly ve spolupráci s VŠCHT Praze testována série zkušebních malt s postupně se navyšujícím podílem CSW ve směsi, jakožto náhrada cementu [6]. Materiály na bázi cementu se široce používají v odpadovém hospodářství pro svou schopnost imobilizovat těžké kovy fyzikálním tuhnutím (zapouzdřením) a chemickou stabilizací díky vysokému pH a sorpční kapacitě [10]. Vysoké pH (12,5) je přirozenou vlastností čerstvého CSW kvůli obsahu portlanditu; vysoké pH je také jednou

z „nebezpečných vlastností“, což může být podle příslušné národní legislativy důvodem pro klasifikaci CSW jakožto nebezpečného odpadu. Vysoké pH však zajišťuje stabilizaci pouze prvků, které se v zásaditém prostředí (jako je čerstvý cement) srážejí v nerozpustné formě (např. jako hydroxidy) (např. Cu, Ni, Cd, Ba). Imobilizace amfoterních prvků, které v bazickém prostředí tvoří oxyanionty, jako je Cr (jako Cr^{VI}), Pb, As nebo V, není plně zajištěna vysokým pH cementové matrice a určitá rovnovážná koncentrace těchto prvků se nachází v pórovém roztoku cementových materiálů [11]. Výsledky vyluhování samotného CSW spadají do kategorie IIb „ostatní odpad“ dle třídění EN 12457-2 [12], Tab. 2, kvůli Cr a As (Tab. 3), které v bazickém prostředí tvoří oxyanionty.

Tabulka 2: Limitní koncentrace vyluhovatelnosti vybraných prvků (EN 12457-2); I inertní materiál, IIa a IIb ostatní odpad, III nebezpečný odpad.

Prvek	Třída vyluhovatelnosti/ limitní hodnota (mg L ⁻¹)			
	I	IIa	IIb	III
As	0,05	2,5	0,2	2,5
Cd	0,004	0,5	0,1	0,5
Cr (tot)	0,05	7	1	7
Ni	0,04	4	1	4
Pb	0,05	5	1	5
V	-	-	-	-

Vyluhování ostatních sledovaných prvků v CSW splňuje požadavky na „inertní odpad“. Koncentrace Cr ve výluhu z KCl byla výrazně vyšší než ve výluhu z deionizované vody, a to díky vyšší – a environmentálně realističtější – iontové síle takového roztoku. Kontrolní výluh z betonu bez použití CSW splňoval požadavky na „inertní odpad“ s výjimkou As; koncentrace As ve všech výluzech byla přibližně stejná.

Porovnáme-li tato data s daty získanými [13] pro několik vzorků CSW a malt z Nouvelle-Aquitaine (Francie), je vyluhování As uváděné v naší studii mnohem vyšší. Hlavním zdrojem As v cementu je uhlí [11]; arsen je v uhlí přítomen v různých minerálech a množství [14, 15], a proto lze předpokládat, že obsah As v cementu se liší závod od závodu. Přidání CSW do vzorků betonu nezpůsobilo žádné zvýšení koncentrace sledovaných prvků ve výluhu. Výsledky vyluhování Pb jsou rozptýlené, bez jasného trendu. Podobně

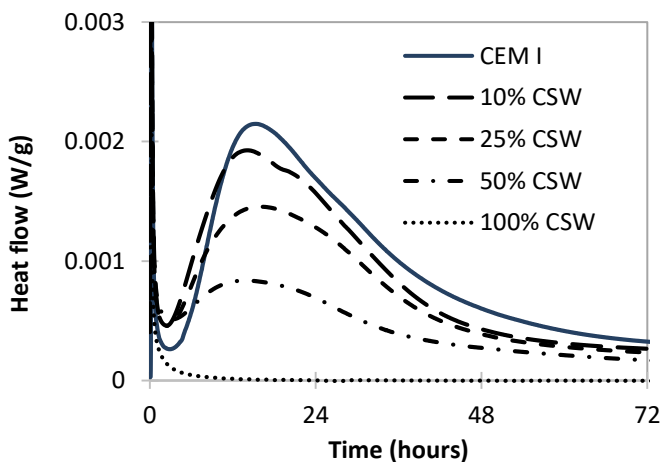
kolísavé chování obsahu olova v roztoku pórů bylo pozorováno u [11]. Je třeba zmínit, že použitý standardní postup vyluhování pracuje s drceným materiálem, zatímco vyluhování z monolitického materiálu – jakým je beton v jeho „užitné formě“ – je zjevně nižší [13].

Tabulka 3: Koncentrace (mg L⁻¹) vybraných prvků ve výluhu klasifikace materiálu dle EN 12457-2; I inertní materiál, IIa a IIb ostatní odpad, III nebezpečný odpad. H₂O – vyluhování v deionizované vodě; KCl – vyluhování v 0.1 M KCl.

Sample		As	Cd	Cr	Ni	Pb	V
CSW	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	0.2/IIb	<0.02/I	0.05/I	<0.4/-
	KCl	<0.3/IIb	<0.006/I	0.7/IIb	<0.02/I	0.05/I	<0.4/-
CR	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	~0.04/I	<0.2/-
	KCl	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	~0.04/I	<0.2/-
C10	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.15/IIb	<0.2/-
	KCl	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.05/I	<0.2/-
C20	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.05/I	<0.2/-
	KCl	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	≤0.04/I	<0.2/-
C30	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.09/IIb	<0.2/-
	KCl	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.05/I	<0.2/-
C40	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.06/I	<0.2/-
	KCl	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	≤0.04/I	<0.2/-
C50	H ₂ O	<0.3/IIb	<0.006/I	<0.05/I	<0.02/I	0.05/I	<0.2/-
	KCl	<0.3/IIb	~0.007/IIb	<0.05/I	<0.02/I	0.09/IIb	<0.2/-

2.2 Vliv betonářského kalu na hydrataci cementu

Z pohledu opětovného využití betonářského kalu (CSW) je logické zabývat se možnostmi jeho implementace zpět při výrobě betonu. Jelikož však je CSW tvořen z podstatné části produkty hydratace cementu v různých fázích hydratace, je nezbytné posoudit i dopad jeho použití na proces hydratace cementu. Tato oblast byla studována užitím izotermální kalorimetrie [16]. Kalorimetrie byla provedena za účelem sledování procesu hydratace cementových past obsahujících CSW. Za tímto účelem byly monitorovány směsi s 10, 25, 50 a 100% náhradou portlandského cementu CEM I 42.5 R CSW, který byl odebrán čerstvý ihned po jeho vzniku a dále filtrován za účelem snížení množství vody. Výsledný vzorek byl ošetřen isopropylalkoholem za účelem zastavení procesu hydratace. Pro dosažení suchého práškového stavu byl dále použit diethylether. Takto připravený prášek byl dále použit jako náhrada cementu. Pro monitoring množství uvolněného tepla byl použit izotermický kalorimetr KC 01. Vlastní měření se provádí na vzorku 2,5 g suché složky z každé směsi. Po jedné hodině usazování se k suché složce přidá voda o teplotě 25 °C. Množství přidané vody odpovídá poměru vody 0,5 pro všechny směsi. Obě složky se dále mísí po dobu 30 sekund. Měření byla prováděna po dobu potřebnou k usazení všech směsí, v našem případě po dobu 168 hodin. Množství tepla uvolněného každou směsí je znázorněno na Obr. 7 a v Tabulce 4.



Obr. 7: Vývoj hydratačního tepla u cementových past s přidavkem CSW [16].

Tabulka 4: Hodnoty uvolněného tepla cementových past s přidavkem CSW.

Směs	Časový interval			
	1 h	24 h	72 h	168 h
CEM I	4,5 J/g <i>100%</i>	125,5 J/g <i>100%</i>	253,6 J/g <i>100%</i>	313,1 J/g <i>100%</i>
10% CSW	9,0 J/g <i>198%</i>	130,1 J/g <i>104%</i>	234,5 J/g <i>92%</i>	294,2 J/g <i>94%</i>
25% CSW	7,9 J/g <i>174%</i>	103,0 J/g <i>82%</i>	193,8 J/g <i>76%</i>	244,9 J/g <i>78%</i>
50% CSW	8,3 J/g <i>184%</i>	68,6 J/g <i>55%</i>	123,9 J/g <i>49%</i>	159,1 J/g <i>51%</i>
100% CSW	6,9 J/g <i>152%</i>	9,9 J/g <i>8%</i>	9,9 J/g <i>4%</i>	9,9 J/g <i>3%</i>

Výsledky ukazují, že skutečný proces hydratace je úměrně ovlivněn dávkou CSW. Množství uvolněné energie klesá se zvyšujícím se podílem CSW, přičemž maxima je dosaženo u všech směsí přibližně po 14 hodinách. V prvních hodinách po smíchání však bylo pozorováno odlišné chování. Směsi obsahující CSW vykazovaly rychlejší nástup hydratace. V první hodině po smíchání bylo množství uvolněného tepla 9,0 J/g u směsi s 10% náhradou CSW, zatímco u referenční směsi bylo naměřeno pouze 4,5 J/g. Toto chování je pravděpodobně způsobeno zvýšenou koncentrací OH^- iontů a přítomností částečně hydratovaných částic cementu, které způsobují očkovací efekt, a proto je hydratace cementu s obsahem CSW v první fázi rychlejší. Tento efekt byl nejvýraznější u směsi s 10% CSW, protože bylo aktivováno více cementu. Snížení množství cementu v ostatních směsích také snížilo množství uvolněného tepla v první hodině.

Na základě těchto výsledků lze usoudit, že přidání CSW způsobuje zrychlení hydratace cementu v prvních hodinách. Nicméně z celkového hydratačního procesu cementových past s přidavkem CSW do 168 hodin stáří lze usoudit, že přidání CSW snižuje množství uvolněného tepla úměrně použité úrovni náhrady, tudíž další hydratace znovupoužitého CSW je minimální.

2.3 Vliv betonárenského kalu na mechanické vlastnosti cementových malt

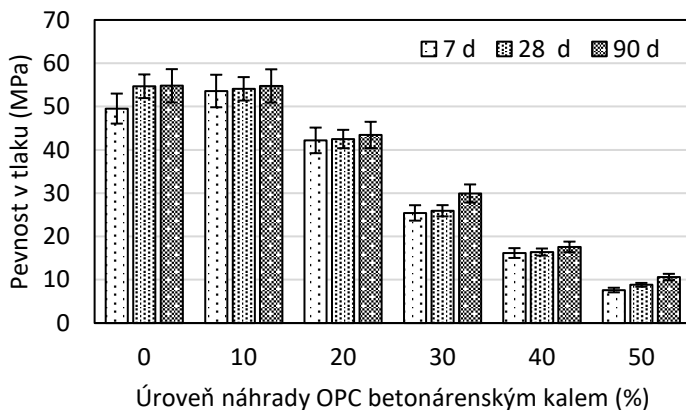
Na základě provedené charakterizace a klasifikace CSW je zřejmé, že jeho použití při výrobě betonu je efektivním řešením pro eliminaci vzniku tohoto odpadu, což bylo součástí provedeného výzkumu [6]. Na provozovně společnosti Skanska Transbeton s.r.o. byl odebrán vzorek kalu bezprostředně po recyklaci vráceného čerstvého betonu. Odebraný vzorek tak lze považovat za „čerstvou suspenzi“ pocházející z odlučovače kameniva před jeho sedimentací. Odebraný materiál byl odfiltrován a mokřý filtrační koláč byl použit jako složka jemnozrnného betonu (malty) jako materiál nahrazující běžný portlandský cement (OPC) (Tab. 5). Jako hlavní pojivo byl použit CEM I 42.5 R, jako kamenivo standardní písek CEN (směs křemenných písků 0,08–0,5 mm, 0,5–1 mm a 1–2 mm v poměru 1:1:1). Obsah vody v částečně odvodněném (filtrované, mokřé) CSW byl stanoven termogravimetricky (62 %) a započítán jako součást záměsové vody („voda v mokřém CSW“ v Tab. 5). Jako náhrada OPC byla započítána pouze suchá složka CSW. Konzistence připravených směsí byla 140 mm dle normy EN 1015-3 [17]; pro udržení této hodnoty bylo nutné přidat další množství vody, což způsobilo velmi vysoký poměr $w/(c + \text{suchá složka CSW})$. Pro stanovení mechanických vlastností byly vyrobeny standardní maltové hranoly (40×40×160 mm) byly skladovány ve vodě do doby testování.

Tabulka 5: Složení zkušebních malt s přidavkem CSW.

	CR	C10	C20	C30	C40	C50
OPC	1000	900	800	700	600	500
písek	3000	3000	3000	3000	3000	3000
čerstvý CSW	0	263	527	790	1052	1315
<i>sušina (CSW)</i>	<i>(0)</i>	<i>(100)</i>	<i>(200)</i>	<i>(300)</i>	<i>(400)</i>	<i>(500)</i>
<i>Voda v CSW</i>	<i>(0)</i>	<i>(163)</i>	<i>(327)</i>	<i>(490)</i>	<i>(652)</i>	<i>(815)</i>
Přidaná voda	450	296	203	114	154	172
Celková voda	450	459	530	603	806	987
$w/(c+\text{dry CSW})$	0.45	0.46	0.53	0.60	0.81	0.99

Pevnost v tlaku kontrolní sady (CR) byla po 7 dnech 49 MPa a později se v důsledku probíhající hydratace poněkud zvýšila (Obr. 8). Graf na Obr. 8 na první pohled vypadá stejně jako v případě jiné minerální příměsi např. [18] – pevnost klesá se zvyšujícím se obsahem příměsi. Nicméně 10% náhradní vzorek vykazuje zajímavé zlepšení pevnosti po 7 dnech ve srovnání s

kontrolním vzorkem. Z hlediska pevnosti je 10% náhrada OPC čerstvým CSW použitelná bez ztráty pevnosti. Pevnost kompozitních materiálů na bázi cementu je obvykle spojena s jejich pórovitostí (nebo objemovou hmotností) – vyšší pórovitost (nebo nižší objemová hmotnost) znamená nižší pevnost [19].



Obr. 8: Vývoj pevnosti v tlaku cementových malt s přidavkem CSW.

2.4 Shrnutí hlavních vlastností betonářského kalu

- CSW obsahuje převážně hydratační produkty a příbuzné látky (fáze C-S-H, AFt a AFm, portlandit, kalcit), doprovázené malým množstvím jemných částic kameniva a nehydratovaných minerálů slínku. Jeho d_{50} bylo 7 μm , zatímco d_{50} OPC bylo 18 μm .

- Čerstvý odvodněný CSW lze použít jako 10% náhradu OPC bez ztráty pevnosti, a tím přispět ke snížení dopadů výroby cementu na životní prostředí a také nákladů spojených se skládkováním CSW.

- kvůli obsahu hydratačních produktů cementu má CSW očkovací účinek při hydrataci cementu.

- Vysoká jemnost CSW vyžaduje zvýšenou dávku záměsové vody, což přispívá ke snížení pevnosti kompozity při vyšším dávkování.

- Vyluhování chromu a arsenu z CSW je zodpovědné za jeho klasifikaci jako „ostatní odpad“; přidání CSW do betonu snížilo vyluhování Cr. Vyluhování As bylo u všech materiálů stejné. Nicméně vlivem vysokého pH se jedná o nebezpečný odpad.

3. Experimentální ověření možností využití betonářského kalu

Na základě získaných zkušeností a detailní charakterizace betonářského kalu bylo provedeno experimentální ověření jeho využití ve stavebnictví. Jelikož je zcela evidentní, že se vlastnosti CSW se v čase mění, zejména po uložení do sedimentační jímky, bude v následujících kapitolách pozornost zaměřena na dva hlavní stavy CSW – využití kalu v jeho „čerstvé“ podobě, tedy ihned po recyklaci čerstvého betonu, a využití „odleželého“ vytěženého ze sedimentační jímky.

3.1 Využití betonářského kalu raného stáří

Jak již bylo uvedeno v úvodu, betonářský kal (CSW) vzniká primárně po recyklaci čerstvého betonu, ze kterého je recyklační linkou extrahováno kamenivo a jemné podíly písku a pojivo je rozplaveno v kalové jímce, Obr. 9. V této podobě dochází používáním pouze kalové vody k postupné akumulaci pevné fáze a vzniku odpadu kvůli vysokému přebytku vody. Za tímto účelem řada provozoven dnes instaluje zařízení filter-press (kalolis), které umožňuje rychlé odvodnění kalové vody za vzniku koláče s volitelným podílem vody, Obr. 10.



Obr. 9: Kalová jímka



Obr. 10: Zařízení filter-press a vzniklý koláč CSW

Pro návrh zkušebních směsí byl použit koncept racionálního návrhu, který byl úspěšně ověřen u použití alternativních minerálních příměsí [20]. Tato filozofie návrhu směsi byla představena v práci, kterou publikoval Keppert et al. (2017) [21] věnovanou výzkumu vápenných malt s příměsí cihelného prachu. V tomto výzkumu však byla inertní část cihelného prachu kompenzována snížením dávky písku.

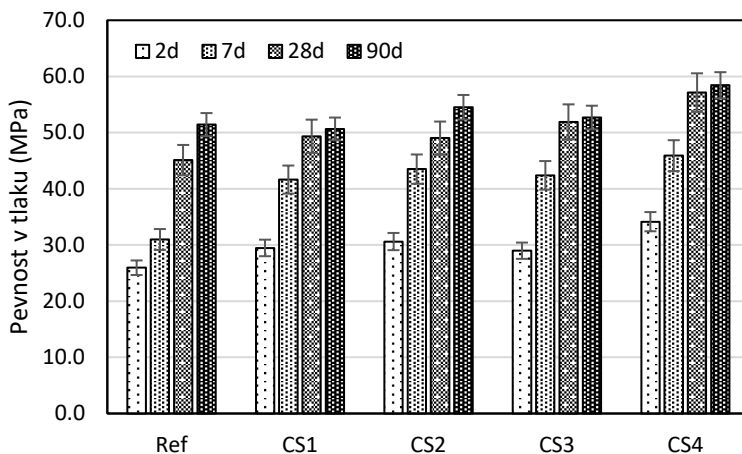
Tento nový přístup pro formulaci pojiva je založen na zohlednění fázového složení použité aktivní minerální příměsí. Betonárenský kal je složen principálně ze zbytků pojiva (aktivní i inertní podíly), písku a vody. Při vlastním návrhu směsi betonu s uplatněním CSW je tak cement nahrazován výhradně amorfními a aktivními částmi. Inertní původně pojivové složky obsažené v CSW jsou kompenzovány snížením dávky mletého vápence či jiné inertní příměsí. Podíly písku a vody v CSW jsou pak zohledněny redukcí dávky jemného kameniva a záměsové vody. Tento program byl testován na sérii zkušebních směsí samozhutnitelného betonu (SCC), kde byla ztráta konzistence vlivem použití CSW eliminována zvýšenou dávkou plastifikátoru. Složení zkušebních SCC směsí je uvedeno v Tab. 6. Použitý CSW obsahoval cca 10% písku, 12% aktivních složek, 43% složek inertních a 35% vody.

Tabulka 6: Složení zkušebních směsí betonu s uplatněním CSW

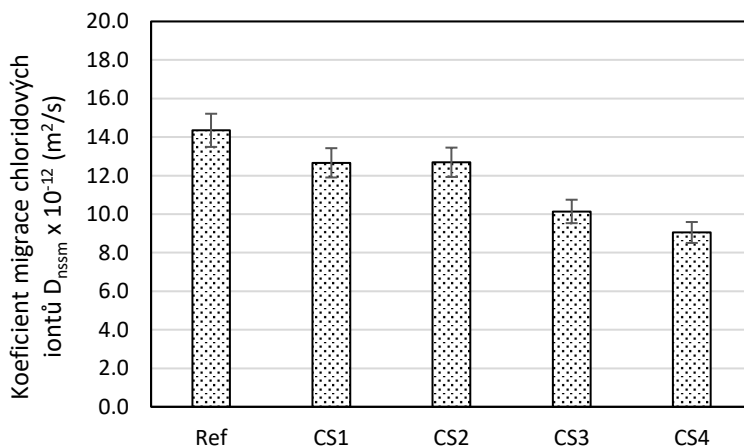
Složka	Ref	CS1	CS2	CS3	CS4	
CEM I 42,5 R (Mokrá)	360	358,1	356,1	354,2	352,3	
CSW celkem	0	16,1	32,2	48,3	64,4	
CSW	<i>Voda</i>	<i>0</i>	<i>5,7</i>	<i>11,4</i>	<i>17,1</i>	<i>22,8</i>
	<i>Písek</i>	<i>0</i>	<i>1,6</i>	<i>3,2</i>	<i>4,8</i>	<i>6,4</i>
	<i>Inertní podíl</i>	<i>0</i>	<i>6,9</i>	<i>13,8</i>	<i>20,7</i>	<i>27,6</i>
	<i>Aktivní podíl</i>	<i>0</i>	<i>1,9</i>	<i>3,8</i>	<i>5,7</i>	<i>7,6</i>
Mletý vápenc	135	128,1	121,2	114,3	107,4	
Písek 0-4 mm	760	758,4	756,8	755,2	753,6	
Těž. kam. 4-8 mm	550	550	550	550	550	
Těž. kam. 8-16 mm	280	280	280	280	280	
Voda	200	194,3	188,6	182,9	177,2	
plastifikátor	2,88	2,88	3,48	3,82	4,12	

U těchto směsí byl monitorován vývoj pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [22]. Důležitým aspektem při implementaci alternativních surovin při výrobě betonu je i posouzení jejich trvanlivosti, která předurčuje životnost celé konstrukce. Za tímto účelem byla zkušebních směsích provedena zrychlená zkouška migrace chloridových iontů dle metodiky NTBuilt 492 [23] a zrychlená zkouška karbonatace, na jejímž základě byl odhadnut postup karbonatační fronty v běžném prostředí [20].

Při výrobě zkušebních směsí bylo nutné s navyšující se dávkou CSW zvyšovat i dávku použité plastifikační přísady, aby byla zachována konzistence čerstvého betonu. Logickým důsledkem tak bylo mírné navýšení pevnosti v tlaku u směsí s přidávkou CSW, jak je patrné na Obr. 11. Nicméně lze konzervativně usuzovat, že při této koncepci je pevnost v tlaku zachována. Nepatrné zlepšení bylo dosaženo i u zkoušky na migraci chloridových iontů, Obr. 12. I zde je patrné zlepšení, tedy snížení permeability testovaných směsí. Nicméně u použití CSW, které obsahuje množství již zhydratovaných fází cementu je transport chloridových iontů složitější. Chloridové ionty vedou při kontaktu s AFm fázemi ke vzniku sekundárních produktů jako je Friedelova či Kuzelova sůl [24, 25], čímž dochází k jejich chemickému vázání ve ztvrdlém kompozitu. Jelikož použitý CSW AFm fáze obsahuje, je pravděpodobné, že k tomuto jevu dochází i při této zkoušce. Schopnost CSW vázat chloridové ionty byla potvrzena v předchozím výzkumu [6]. Tento aspekt je výhodný v případě koroze výtuzže, která je nedílnou součástí betonových konstrukcí.

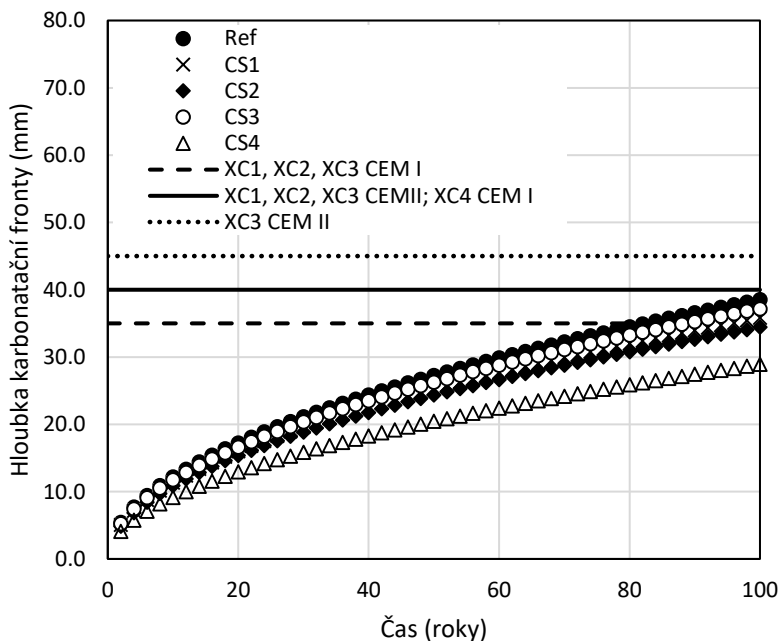


Obr. 11: Vývoj pevnosti v tlaku u zkušebních směsí betonu.



Obr. 12: Stanovení koeficientu migrace chloridových iontů (90 dní).

Pro komplexní posouzení trvanlivosti studovaných směsí byla zařazena i zkouška zrychlené karbonatace, z níž lze kvalifikovaně odhadnout postup karbonatační fronty v čase. Tento přístup umožňuje posoudit životnost celé konstrukce z pohledu náročnosti dané expozice. Souhrnné výsledky jsou uvedeny na Obr. 13, kde jsou rovněž zvýrazněny nominální hodnoty krytí pro dané stupně vlivu prostředí.



Obr. 13: Predikce postupu karbonatační fronty u směsi betonu s přísádkem CSW.

Z výsledků predikce postupu karbonatační fronty je zřejmé, že všechny sledované směsi, u nichž byl postupně navyšován podíl CSW, vykazovaly vyšší odolnost vůči karbonataci v porovnání s referenční směsí. Uvedené zlepšení trvanlivostních parametrů je možné přičíst zejména navýšení plastifikační přísady, která kompenzovala negativa plynoucí z použití tohoto odpadu. Nicméně je evidentní, že koncept racionálního návrhu je možné spolehlivě aplikovat nejen v oblasti pevnosti v tlaku, ale i trvanlivosti. Je nutné však připomenout i další opatření, jakým v tomto případě zachování konzistence čerstvé směsi.

Představený experimentální program dokumentoval přístup jak efektivně eliminovat vznik betonárenského kalu ihned po jeho vzniku a dosáhnout tak prakticky bezodpadového hospodářství v oblasti výroby betonu. Zároveň experimentální výsledky potvrdily, že tímto způsobem je možné zachovat či nepatrně vylepšit užité vlastnosti vyráběného betonu, což je klíčové kritérium při uplatňování všech alternativních materiálů.

3.2 Využití plně hydratovaného betonárenského kalu

Betonárenský kal dlouhodobě uložený v sedimentační jímce představuje stav, kdy veškeré dosud nezhydratované části použitého pojiva již vlivem přebytku vody prošly kompletní hydratací. Oproti „čerstvému“ kalu odebranému těsně po recyklaci čerstvého betonu, tak jeho fázové složení koresponduje s plně hydratovaným portlandským cementem. V této části experimentálního výzkumu, který byl již publikován [26], je pozornost věnována uplatnění betonárenského kalu v tomto stavu. Jelikož přibližně 25% objemu hydratačních produktů cementu je tvořeno portlanditem, nabízí se využití právě této formy vápna.

Vlastnosti méně vhodných zemin v geotechnické praxi se zlepšují přidáním stabilizační přísady [27], kdy proces stabilizace spočívá ve tvorbě nerozpustných zpevňujících fází. Nejčastěji používaným stabilizátorem je portlandský cement (OPC), jehož aplikace vede k tvorbě hydratačních produktů, o nichž se předpokládá, že hrají klíčovou roli ve stabilizaci zeminy [28, 29]. Podobným způsobem zlepšení půdy je použití vápna, zejména v případě jílovitých zemin, což vede k tvorbě tobermoritu a také hydratovaných křemičito-hlinitanů [30]. Charakter vzniklých hydrátů v zemině obsahující vápno je vysoce závislý na mineralogii dané zeminy [31]. Navzdory nízkým dávkám stabilizátoru, obvykle jen 1–7 %, je jeho celkové množství, vzhledem k celkové hmotnost vylepšené zeminy, obrovské [32]. Nahrazení OPC nebo vápna je proto velmi aktuálním tématem vzhledem k vysokým emisím oxidu uhličitého, které jsou přibližně 950 kg na tunu OPC, neboli 770 kg CO₂/tunu vápna [33]. Využití alternativního a ekologičtějšího materiálu pro zlepšení zeminy se proto stává velmi populárním [34]. Wu *et al.* (2016) [29] důkladně studovali zeminu stabilizovanou přidáním OPC v množství 6 a 8 hmot. % a metakaolinem (MK) až do 6 hmot. % použité zeminy. Došlo k významnému zlepšení mechanických vlastností společnou aplikací OPC modifikovaného metakaolinem. Optimální poměr PC a MK byl v rozmezí 1/3 až 1/2. Chenarbone *et al.* (2021) [28] studovali roli zeolitů, které byly smíchány s OPC až do 90 hmot. %. Konečné vyhodnocení účinnosti zlepšení použitých zeolitů stanovilo prahovou hodnotu na 30 hmot. % náhrady cementu, což dobře koresponduje se závěry Wu *et al.* (2016) [29]. Kongkajun *et al.* (2020) [35] vyvinuli nepálené cihly na bázi zeminy, která byla stabilizována stavebním odpadním kalem vznikajícím při řezání kompozitů na bázi cementu. Studovaný odpadní materiál vykazoval nízký reakční potenciál, proto jeho zapracování vedlo ke ztrátě mechanických vlastností. Koliass *et al.* (2005) [36] provedli rozsáhlou experimentální studii zaměřenou na různé typy jílovitých zemin stabilizovaných přidáním OPC, popílků s vysokým obsahem vápníku (HCFA) a Ca(OH)₂ za účelem kvantifikace vlivu

jednotlivých složek. Všechny tyto stabilizátory byly použitelné, nicméně kombinace HCFA a PC byla vyhodnocena jako optimální; dvojnásobná dávka HCFA s podobným obsahem PC (aplikováno 2 a 4 hmotnostní % zeminy) dosáhla proporcionálního zvýšení dlouhodobé pevnosti v tlaku. Využití betonového odpadu vznikajícího při výrobě betonu a následném zpracování je v současné době intenzivně studováno [37, 38]. Využití tohoto odpadu by mohlo přinést významné ekonomické a zejména environmentální úspory [39].

Pro experimentální ověření byl odebrán betonárenský kal na provozovně společnosti Skanska Transbeton s.r.o., který byl následně vysušen, namlet na kulovém mlýně a síťováním upraven na D_{\max} 0,50 mm. Takto vzniklý sypký materiál byl postupně použit jako alternativní pojivo pro úpravu vlastností zeminy. Detailní vlastnosti zeminy jsou uvedeny v Tab. 7.

Tabulka 7: Vlastnosti použité zeminy

vlastnost	hodnota
Specifická hmotnost (-)	2.56
Vlhkost na mezi tekutosti, LL (%)	37.6
Vlhkost na mezi plasticity, PL (%)	19.8
Index plasticity, PI (%)	17.8
Objemová hmotnost (kg/m^3)	1930
Optimální obsah vlhkosti, MOC (%)*	13.0

Před vlastním experimentálním programem byla provedena i XRD analýza použitých složek – zemina, CSW a OPC, jejíž výsledky jsou uvedeny v Tab. 8. Při porovnání složení čerstvého kalu (Tab. 1) a tohoto, je evidentní, že „odleželý“ CSW obsahuje nepatrné množství zbytků cementu ve formě nehydratovaných slíkových minerálů, nicméně jeho dominantní část tvoří produkty hydratace OPC a následné karbonatace. Tato zjištění odpovídají výsledkům Xuan et al. (2016), kteří identifikovali přítomnost $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}_{1.5}\text{Si}_{3.5}\cdot\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$, SiO_2 , CaCO_3 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ a $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se v průběhu času mění v důsledku postupné karbonatace CSW, když je vystavena vzdušným podmínkám; to je důvod přítomnosti kalcitu.

Tabulka 8: Výsledky XRD analýzy použitých složek

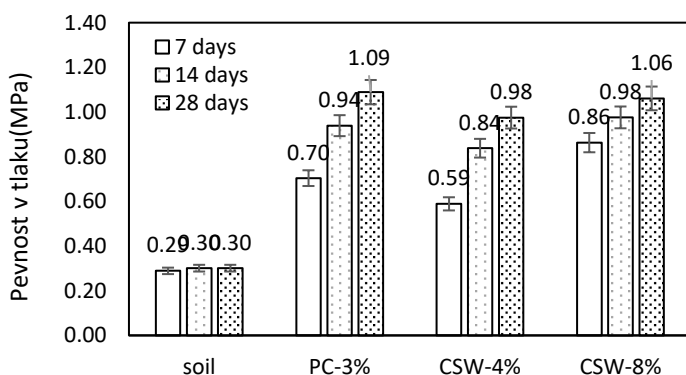
Složka	CSW	OPC	soil
Kalcit	13	1.0	3
Portlandit	5	-	-
C ₃ S	7	67.4	-
C ₂ S	5	10.4	-
C ₄ AF	-	13.7	-
C ₃ A Orthogonální	-	2.8	-
C ₃ A kubický	-	1.9	-
sádrovec	3	2.8	-
křemen	4	-	50
Muskovit	6	-	15
AFm	22	-	-
AFt	7	-	-
Albit	7	-	-
Amorní fáze	21	-	-
Smektit	-	-	6
Kaolinit	-	-	10
Microclín	-	-	6
Ortoklas	-	-	5

Vlastní experimentální program byl koncipován jako bench-mark test, tedy s cílem určení ekvivalentního výkonu CSW vůči tradičnímu cementu. Složení zkušebních směsí je uvedeno v Tab. 9.

Tabulka 9: Složení zkušebních směsí

	Ref	PC-3%	CSW-4%	CSW-8%
Použitá zemina	100	97	96	92
CEM I 42,5 R	0	3	0	0
CSW	0	0	4	8
Obsah vlhkosti	13.0	13.0	13.0	13.0

Dosažené mechanické vlastnosti studovaných zemin v čase jsou znázorněny na Obr. 13. Je jasné vidět, že směs s přídatkem 8 hm.% CSW dosáhla téměř podobných hodnot jako směs stabilizovaná 3 hm.% OPC, takže účinnost studovaného odpadního materiálu je pouze kolem 0,375 ve vztahu k OPC, který však vykazoval v průběhu času vyšší přírůstky v důsledku hydratace a s tím související spotřebou vody pro tvorbu fází C-S-H. Postupný nárůst pevnosti v tlaku směsí obsahujících CSW naznačuje tvorbu nových hydrátů ve směsi, pravděpodobně reakcí nehydratovaných částic cementu a tvorbou fází C-S-H v důsledku reakce jílových minerálů a $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který je přítomen v CSW a mohl by být také dodatečně tvořen hydratací zbytkových slídkových minerálů nalezených v CSW.



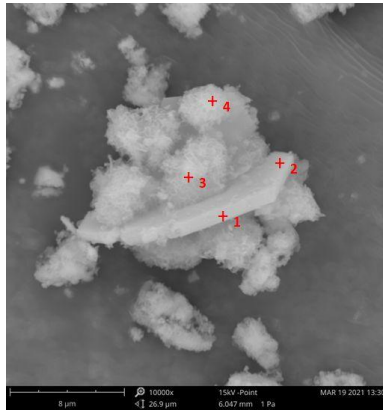
Obr. 13: Vývoj pevnosti v tlaku na upravených zeminách.

Tyto výsledky odpovídají práci Blayi *et al.* (2020) [40], kteří studovali stabilizační účinek odpadního skla. Uvedli dokonce mírné snížení pevnosti v tlaku v případě nejvyšší dávky mletého skla. Vliv stabilizačního aditiva tedy nelze považovat za zcela proporcionální. Účinky použití CSW byly pozorovány na vzorcích upravených zemin i pomocí elektronové mikroskopie (SEM).

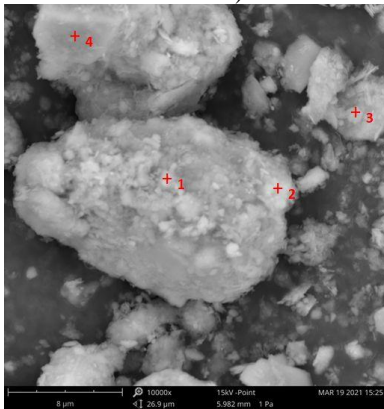
Provedená SEM analýza obecně vizuálně dokumentovala výskyt vláknitých shluků hydratovaného cementu a studovaného CSW. Povaha těchto nových konglomerátů byla podobná pro oba použité stabilizační systémy. Rovněž vizuální podobnost zemin stabilizovaných OPC a CSW poměrně dobře dokumentuje vliv použití CSW.



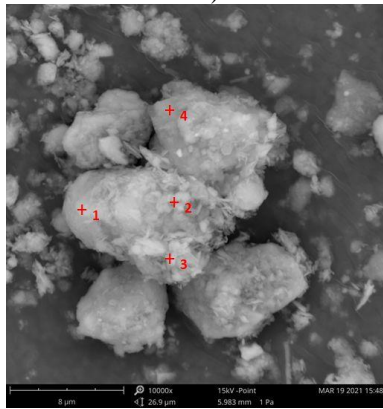
Obr. 14: Neupravená zemina
(body: 1 – jíł; 2 – jíł; 3 – živec;
4 – živec).



Obr. 15: Použitý CSW
(body: 1,2 – AFm; 3,4 – C-S-H
fáze).



Obr. 16: Směs PC-3% po 28 dnech
(body: 1 – jíł/živec; 2,3 –
hydráty/jíl; 4 – křemen).



Obr. 17: Směs CSW-8% po 28
dnech
(body: 1 – živec; 2,3 – hydráty;
4 – hydráty/jíl).

Stabilizace zemin se jeví jako velmi vhodná možnost pro využití různých odpadních materiálů k nahrazení konvenčně používaného cementu (OPC). Srovnání účinnosti různých materiálů s ohledem na OPC z hlediska pevnosti

v tlaku je uvedeno v Tab 10, která pouze porovná data získaná pro stabilizační činidlo bez přidání OPC. Účinnost studovaného CSW není vysoká (0,38), nicméně spotřeba stabilizačních pojiv v geotechnice je obrovská.

Tabulka 10: Porovnání účinnosti CSW jinými typy pojiv vůči cementu.

Typ pojiva	Equivalent k cementu	Zdroj
Přepálená vápencový prach	0,04	[41]
Popel z palmového oleje	0,05	[42]
Betonářenský kal	0,38	[26]
Vápenná kaše	0,51	[43]
Popílek ze spalování komunálního odpadu	0,50	[44]
Pecní prach z výroby cementu	0,63	[45]
Úletový popílek – vysoký obsah vápna	0,70	[46]
0.67 biouhel z čističky odpadních vod + 0.33 mletá vysokopecní granulovaná struska	0,75	[47]
vápno	0,78	[48]
Regenerovaný stavební materiál (RBM) (lime, fly ash, gypsum)	1,02	[49]

Provedený experimentální program byl zaměřen na vyhodnocení potenciálu „odleželého“ betonářenského kalu pro použití jako stabilizační příměs pro úpravu vlastností zemin. Dosažené výsledky potvrdily dobrý potenciál studovaného odpadního materiálu, protože jeho použití má podobný charakter jako běžně používaný stabilizátor ve formě cementu či vápna. Část stabilizačního účinku je dána tvorbou hydrátů, které byly identifikovány SEM analýzou, což je doprovázeno spotřebou volné vody a souvisejícím snížením plasticity. Vzhledem k povaze CSW je kinetika tuhnutí rychlejší v případě cementu, což bylo dokumentováno vývojem pevnosti v tlaku v čase. Jeden kilogram studovaného odpadního materiálu, pokud jde o pevnost v tlaku, má stabilizační účinek podobně jako 380 g OPC, což je dobře zdokumentovaný potenciál pro ekonomické a environmentální úspory.

4. Závěr

Na základě rozsáhlého souboru experimentálních výsledků lze konstatovat, že betonárenský kal představuje zajímavý a vědecky a technicky perspektivní materiál s širokými možnostmi využití. Jako efektivní využití tohoto odpadu, který je nedílnou součástí výroby betonu, je jeho opětná implementace do výroby betonu. Ověřený koncept racionálního návrhu potvrdil, že při výrobě betonu lze uplatnit výrazně vyšší podíl CSW, než který reálně při výrobě vzniká. Tímto způsobem lze prakticky eliminovat vznik tohoto odpadu při zachování užitných vlastností betonu i zajištění jeho trvanlivostních parametrů, což je v případě uplatnění alternativních surovin rozhodující parametr. Zároveň dochází nejen k omezení vzniku odpadu a s tím souvisejícími environmentálními riziky, ale i efektivní úspoře neobnovitelných zdrojů. Pro společnosti vyrábějící beton může být motivací k implementaci i evidentní ekonomický profit pramenící v úspoře materiálu i nákladů na dopravu.

Ačkoli prezentované výsledky potvrzují potenciál dosažení technologie výroby betonu s prakticky nulovou produkcí odpadu, oblast tohoto výzkumu nadále skýtá značné možnosti pro multidisciplinární přístup. Ten by měl zahrnovat nejen pokročilé materiálový výzkum, ale rovněž vývoj inovativních zařízení a metod umožňujících vyšší míru automatizace výrobních procesů.

Literatura

- [1] Aïtcin, P.-C. (2000). Cements of yesterday and today. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1349–1359. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00365-3)
- [2] European Transport Concrete organization. Online. ERMCO - European Transport Concrete Organisation. 2019.
- [3] Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041–4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- [4] Waste generation, recovery and disposal - 2021. Online. Czech Statistical Office. 2022. Available from: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-mgyqmwjyr8>. [cited 2025-09-12]
- [5] Xuan, D., Zhan, B., Poon, C. S., & Zheng, W. (2016). Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. *Journal of Hazardous Materials*, 312, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.036>
- [6] Keppert, M., Davidová, V., Doušová, B., Scheinherrová, L., & Reiterman, P. (2021). Recycling of fresh concrete slurry waste as supplementary cementing material: Characterization, application and leaching of selected elements. *Construction and Building Materials*, 300, 124061. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124061>
- [7] Saillio, M., Baroghel-Bouny, V., Bertin, M., Pradelle, S., & Vincent, J. (2019). Phase assemblage of cement pastes with SCM at different ages. *Construction and Building Materials*, 224, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.059>
- [8] Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The AFm phase in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.010>
- [9] Xuan, D., Tang, P., & Poon, C. S. (2018). Limitations and quality upgrading techniques for utilization of MSW incineration bottom ash in engineering applications – A review. *Construction and Building Materials*, 190, 1091–1102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.174>

- [10] Chen, Q. Y., Tyrer, M., Hills, C. D., Yang, X. M., & Carey, P. (2009). Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review. *Waste Management*, 29(1), 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.019>
- [11] Vollpracht, A., & Brameshuber, W. (2016). Binding and leaching of trace elements in Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 79, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.002>
- [12] EN 12457-2: Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 2: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 4 mm, 2003.
- [13] Audo, M., Mahieux, P.-Y., Turcry, Ph., Chateau, L., & Churlaud, C. (2018). Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 183, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.155>
- [14] Finkelman, R. B., Dai, S., & French, D. (2019). The importance of minerals in coal as the hosts of chemical elements: A review. *International Journal of Coal Geology*, 212, 103251. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103251>
- [15] Ketris, M. P., & Yudovich, Ya. E. (2009). Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
- [16] Reiterman, P., Davidová, V., David, T., & Keppert, M. (2023). The influence of the addition of concrete slurry waste on the hydration process of Portland cement. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2984, p. 020025). 24TH TOPICAL CONFERENCE ON RADIO-FREQUENCY POWER IN PLASMAS*. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0136910>
- [17] EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku), Čas, 2000.

- [18] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- [19] Li, D., Li, Z., Lv, C., Zhang, G., & Yin, Y. (2018). A predictive model of the effective tensile and compressive strengths of concrete considering porosity and pore size. *Construction and Building Materials*, 170, 520–526. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.028>
- [20] Reiterman, P., Jaskulski, R., Kubissa, W., Holčapek, O., & Keppert, M. (2020). Assessment of Rational Design of Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Limestone Powder in Terms of Long-Term Durability. *Materials*, 13(12), 2863. <https://doi.org/10.3390/ma13122863>
- [21] Keppert, M., Urbanová, M., Brus, J., Čáchová, M., Fořt, J., Trník, A., Scheinherrová, L., Záleská, M., & Černý, R. (2017). Rational design of cement composites containing pozzolanic additions. *Construction and Building Materials*, 148, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.032>
- [22] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Čas, 2020.
- [23] NTBuilt 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999.
- [24] WANG, Z., WANG, B., YANG, D., & HAN, J. (2020). Research progress on the chloride binding capability of cement-based composites. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 128(5), 238–253. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.19146>
- [25] Reiterman, P., & Keppert, M. (2020). Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 19(1), 51–64. <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.003>
- [26] Reiterman, P., Mondschein, P., Doušová, B., Davidová, V., & Keppert, M. (2022). Utilization of concrete slurry waste for soil stabilization. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00900. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00900>
- [27] Barbhuiya, G. H., & Hasan, S. D. (2021). Effect of nano-silica on physio-mechanical properties and microstructure of soil: A

comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.115>

- [28] Ahmadi Chenarboni, H., Hamid Lajevardi, S., MolaAbasi, H., & Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 272, 121630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630>
- [29] Wu, Z., Deng, Y., Liu, S., Liu, Q., Chen, Y., & Zha, F. (2016). Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin. *Applied Clay Science*, 127–128, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.040>
- [30] Garzón, E., Cano, M., O'Kelly, B. C., & Sánchez-Soto, P. J. (2016). Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123, 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.042>
- [31] S. Diamond, E.B. Kinter, *Highway Research Record*. 92 (1965) 83-102
- [32] Daraei, A., Sherwani, A. F. H., Faraj, R. H., Mohammad, S., Kurdo, S., Zare, S., & Mahmoodzadeh, A. (2019). Stabilization of problematic soil by utilizing cementitious materials. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0220-5>
- [33] G. Hammond, C. Jones, *Embodied Carbon, The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*, Edited by F. Lowrie and P. Tse, University of Bath, BSRIA BG, 2011, United Kingdom, 136 pages. <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>
- [34] Du, H., & Pang, S. D. (2018). Value-added utilization of marine clay as cement replacement for sustainable concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 198, 867–873. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.068>
- [35] Kongkajun, N., Laitila, E. A., Ineure, P., Prakaypan, W., Cherdhirunkorn, B., & Chakartnarodom, P. (2020). Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00448. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00448>

- [36] Koliass, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., & Karahalios, A. (2005). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 301–313. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019>
- [37] Yang, B., Zhang, Y., Cetin, B., & Ceylan, H. (2019). Concrete Grinding Residue: Management Practices and Reuse for Soil Stabilization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(11), 748–763. <https://doi.org/10.1177/0361198119854292>
- [38] Ho, H.-J., Iizuka, A., & Shibata, E. (2021). Chemical recycling and use of various types of concrete waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124785>
- [39] Hanafi, M., Ekinci, A., & Aydin, E. (2020). Triple-Binder-Stabilized Marine Deposit Clay for Better Sustainability. *Sustainability*, 12(11), 4633. <https://doi.org/10.3390/su12114633>
- [40] Blayi, R. A., Sherwani, A. F. H., Ibrahim, H. H., Faraj, R. H., & Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00427. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>
- [41] Xu, F., Wei, H., Qian, W., Chen, X., Xu, T., He, Y., & Wen, G. (2020). Experimental investigation on replacing cement by sintered limestone ash from the steelmaking industry for cement-stabilized soil: Engineering performances and micro-scale analysis. *Construction and Building Materials*, 235, 117425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117425>
- [42] Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B. B. K., & Fahsnihtoutalab, M. H. (2015). Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. *Transportation Geotechnics*, 3, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.01.002>
- [43] Phanikumar, B. R., & Ramanjaneya Raju, E. (2020). Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement. *Soils and Foundations*, 60(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.007>
- [44] Liang, S., Chen, J., Guo, M., Feng, D., Liu, L., & Qi, T. (2020). Utilization of pretreated municipal solid waste incineration fly ash

for cement-stabilized soil. *Waste Management*, 105, 425–432.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.017>

- [45] Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., & Moghadas Nejad, F. (2021). The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, 285, 122918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122918>
- [46] Jafer, H. M., Atherton, W., Sadique, M., Ruddock, F., & Loffill, E. (2018). Development of a new ternary blended cementitious binder produced from waste materials for use in soft soil stabilisation. *Journal of Cleaner Production*, 172, 516–528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.233>
- [47] Gonzalez, J., Sargent, P., & Ennis, C. (2021). Sewage treatment sludge biochar activated blast furnace slag as a low carbon binder for soft soil stabilisation. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127553. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127553>
- [48] Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., & Singh, T. N. (2018). Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.012>
- [49] Zhang, X., Li, W., Tang, Z., Wang, X., & Sheng, D. (2020). Sustainable regenerated binding materials (RBM) utilizing industrial solid wastes for soil and aggregate stabilization. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122991. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122991>

Poděkování

Poděkování patří kolegům z Experimentálního centra, Katedry materiálového inženýrství a chemie, Katedry silničních staveb a Katedry mechaniky za jejich spolupráci a pomoc. Poděkování patří také kolegům z VČHT v Praze, jmenovitě Báře Doušové, za spolupráci na projektu GAČR 19-11027S „Betónárenský kal - nebezpečný odpad nebo druhotná surovina?“, jehož výsledky jsou základem této přednášky. Poděkování bych rovněž věnoval i pracovníkům společnosti Skanska Transbeton s.r.o., kteří nad rámec svých každodenních povinností věnovali nemalé množství času a úsilí tomuto výzkumu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svým blízkým a přátelům za podporu nejen v profesním životě.

Životopis

doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

Datum narození: 23. 01. 1983

Kontakt: pavel.reiterman@fsv.cvut.cz

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- 2022 doc. v oboru Teorie stavebních materiálů a konstrukcí, FSv ČVUT v Praze. Habilitační práce na téma: Význam minerálních příměsí pro zajištění dlouhodobé trvanlivosti betonu v dopravní infrastruktuře
- 2008 - 2013 Ph.D. v oboru Fyzikální a materiálové inženýrství, FSv ČVUT v Praze, Disertační práce na téma: Vliv technologie na kvalitu povrchových vrstev pohledového betonu
- 2002 - 2008 Ing. v oboru Konstrukce pozemních staveb FSv ČVUT v Praze.

Zaměstnání:

- 2022 - dosud Docent, Experimentální centrum, FSv ČVUT v Praze
- 2013 - 2021 Odborný asistent, Experimentální centrum, FSv ČVUT v Praze
- 2013 – dosud vědecký pracovník, UCEEB ČVUT v Praze
- 2008 - 2013 Vědecký pracovník Experimentální centrum FSv ČVUT v Praze

Výzkumná činnost:

- Řízený návrh kompozitních materiálů na bázi cementu,
- Komplexní studium betonu s ohledem na účinky okolního prostředí,
- Uplatnění odpadních a alternativních surovin při výrobě betonu.

Pedagogické aktivity

2021 - současnost	garant předmětu Speciální betony 210YSB
2013 - současnost	Školitel 2 doktorandů, školitel specialista u 7 doktorandů, 5 doktorandi obhájení a 3 po SZZ
2008 - současnost	Diplomová práce - celkem vedeno a obhájeno 9 diplomové práce Bakalářská práce - celkem vedeno a obhájeno 5 bakalářských prací
2008 - současnost	Výuka na FSv ČVUT v Praze Cvičení předmětu Betonové konstrukce I, Přednášky předmětu Speciální betony, Přednášky v PhD studiu Materiálové inženýrství I,

Vědecko-výzkumné aktivity:

- řešitel projektu GA ČR a COST
- řešitel projektu TAČR (Doprava 2030+)
- řešitel 2 interních projektů ČVUT
- spoluřešitel 2 projektů TAČR (Trend)
- Člen týmu více než 30 projektů (GA ČR, MPO, MK, MV, NAKI)

Publikace:

Autor či spoluautor více než 50 článků v impaktovaných časopisech a více 100 konferenčních příspěvků. Dle databáze WoS 467 citací bez autocitací, H-index 12, dle databáze Scopus 711 citací s vyloučením autocitací, H-index 16.

Aplikační výstupy:

Spoluautor 7 užitečných vzorů, 8 ověřených technologií, 1 prototypu, 3 patentů

Další:

Odborný lektor kurzů Zkoušení vlastností betonu a jeho složek

Odborný lektor kurzů Desatero o betonu pro stavbyvedoucí a dozory na stavbách

Odborný lektor kurzů Vady a poruchy betonových konstrukcí

Člen výkonného výboru České betonářské společnosti (ČBS)

Výkonný místopředseda odborné společnosti WTA CZ

Člen redakční rady časopisu Beton TKS

Člen technické normalizační komise TNK 32

Organizace konference Moderní betony a kompozity

Člen odborných komisí RILEM/COST

Vybrané publikace:

1. Pavel Reiterman, Petr Mondschein, Barbora Doušová, Vendula Davidová, Martin Keppert, Utilization of concrete slurry waste for soil stabilization, Case Studies in Construction Materials, 16, 2022, ID e00900.

2. Pavel Reiterman, Roman Jaskulski, Wojciech Kubissa, Ondřej Holčápek, Martin Keppert, Assessment of Rational Design of Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Limestone Powder in Terms of Long-Term Durability, Materials, 13(12), 2020, Article No. 2863.

3. Martin Keppert, Vendula Davidová, Barbora Doušová, Lenka Scheiherrová, Pavel Reiterman, Recycling of fresh concrete slurry waste as supplementary cementing material: Characterization, application and leaching of selected elements, Construction and Building Materials, 300, 2021, ID 124061.

4. Pavel Reiterman, Ondřej Holčápek, Ondřej Zobal, Martin Keppert, Freeze-Thaw Resistance of Cement Screed with Various Supplementary Cementitious Materials, Reviews on Advanced Materials Science, 58(1), 2019, 66-74.

5. Pavel Reiterman, Influence of metakaolin additive and nanoparticle surface treatment on the durability of white cement based concrete, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 24(13), 2020, 2270-2283.

6. Pavel Reiterman, Ondřej Holčapek, Roman Jaskulski, Wojciech Kubissa, Long-term behaviour of ceramic powder containing concrete for pavement blocks, *International Journal of Pavement Engineering*, 22(14), 2021, 1813-1820, doi: 10.1080/10298436.2020.1725006
7. Pavel Reiterman, Martin Keppert, Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete, *Road and Bridges- Drogi i Mosty*, 19(1), 2020, 51-64.
8. Wojciech Kubissa, Roman Jaskulski, Pavel Reiterman, Ecological Concrete Based on Blast- Furnace Cement with Incorporated Coarse Recycled Concrete Aggregate and Fly Ash Addition. *Journal of Renewable Materials*. Volume 5, Supplement 1, January 2017 Pages: 53-61.
9. Barbora Doušová, Vladimír Machovič, Miloslav Lhotka, Pavel Reiterman, Eva Bedrnová, David Koloušek, Mechanism of chromate adsorption on Fe-modified concrete slurry waste, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 650, 2023, ID 129650.
10. P. Reiterman, M. Keppert, Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*. 2020, 19(1), 51-64. ISSN 1643-1618.