

# Využití odpadního skla pro částečnou náhradu cementu v cementovém kompozitu podle ČSN EN 196-1

**Aleš PALIČKA, Zdeněk PROŠEK**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29  
Praha 6, Česká republika,  
e-mail: [ales.palicka@fsv.cvut.cz](mailto:ales.palicka@fsv.cvut.cz)

## Souhrn

*Příspěvek se zabývá experimentálním hodnocením využitelnosti jemně mletého odpadního skla jako druhotné suroviny pro částečnou náhradu portlandského cementu v cementových kompozitech. Cílem studie bylo posoudit vliv různých dávek odpadní skleněné moučky (OSM) na mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, dynamický modul pružnosti) a vybrané mikrostrukturní charakteristiky. Byly připraveny zkušební směsi normových cementových past, v nichž byl cement nahrazen OSM v rozsahu 10 – 50 hm. %, a výsledky byly porovnány s referenční směsí bez náhrady. Zkoušky prokázaly pokles pevností i dynamického modulu pružnosti se zvyšující se dávkou OSM, přičemž nejvýraznější změny se projeví již při nižších úrovních náhrady. Mikroskopická analýza (SEM/EDS) doložila dobrou mechanickou integraci skleněných částic do cementové matrice. Výsledky poskytují experimentální podklady pro optimalizaci návrhu směsí s OSM (např. úpravou jemnosti či kombinací s dalšími reaktivními přísadami) a přispívají k rozvoji materiálového využití odpadního skla v rámci cirkulární ekonomiky ve stavebnictví.*

**Klíčová slova:** odpadní materiály, odpadní sklo, recyklace, mechanické vlastnosti, cement.

## Úvod

Udržitelné stavebnictví představuje jeden z klíčových nástrojů pro snižování environmentálních dopadů spojených s výrobou a užíváním stavebních materiálů ve stavebnictví. Podle dostupných údajů Českého statistického úřadu se celková produkce odpadů od roku 2014 do roku 2017 průměrně pohybovala okolo 40 milionů tun odpadu ročně. Mezi roky 2018 až 2022 se produkce snížila a stabilizovala na úroveň 39 milionů tun odpadu ročně v České republice. Z hlediska materiálového složení odpadů je vhodné analyzovat také vývoj produkce skleněného odpadu v České republice během poslední dekády. Skleněný odpad spadá do nekovových odpadů, které v roce 2022 představovaly 7 % z celkové hmotnostní produkce odpadů. Skleněný odpad činil 11,2 % z nekovových odpadů, což odpovídá přibližně 306 tisícům tun ročně. Objem produkce skleněného odpadu zůstává dlouhodobě stabilní, avšak stále představuje významnou materiálovou rezervu pro recyklaci<sup>1,2,3</sup>.

Obalové sklo je obecně velmi dobře recyklovatelné, zpět do sklářského kmene, kde může být opakovaně využito při výrobě nových skleněných výrobků. Problém však představují zejména jemné, směsné, kontaminované nebo speciální frakce skla, které již nejsou pro recyklaci technologicky vhodné. Právě tyto obtížné recyklovatelné frakce je nutné materiálně využít jiným způsobem jako náhradu části cementu nebo kameniva v cementových kompozitech<sup>4</sup>.

Akumulace skleněného odpadu má závažné environmentální dopady, včetně znečištění půdy a zvýšené produkce prachových částic. Jednou z možností, jak tento problém řešit, je efektivní recyklace odpadního skla do cementového kompozitu. Alternativa přináší nejen environmentální přínosy ve formě snížení spotřeby přírodních zdrojů, ale i efektivní využití díky pucolánové aktivitě OSM<sup>5,6</sup>.

Historicky byly prováděny pokusy o využití skla ve stavebních materiálech, které však narážely na problémy spojené s alkalickou křemičitou reakcí (ASR) a vznikem trhlin v betonu, což vede k narušení strukturální stability. V současnosti se však klade důraz na minimalizaci těchto rizik a na optimalizaci složení směsí. Moderní přístupy se zaměřují na snížení emisí, CO<sub>2</sub>, efektivní recyklaci odpadu a

náhradu přírodních zdrojů ve stavebnictví. Výzkumy o zpracovatelnosti cementových směsí obsahujících odpadní sklo přinesly různé závěry. Některé studie upozorňují na snížení zpracovatelnosti s rostoucím obsahem skleněné příměsí<sup>7,8,9</sup>, zatímco jiné naopak uvádějí zlepšení zpracovatelnosti v důsledku hladkému povrchu skleněných částic a nízké schopnosti vázat vodu<sup>10</sup>.

Studie vlivu odpadního skla na mechanické vlastnosti betonu často uvádějí snížení pevnosti v tlaku. Jev je připisován zejména ostrým hranám a hladkému povrchu skleněných částic, to vede k oslabení adheze mezi cementovou maticí a skleněnými částicemi v přechodové zóně (ITZ). Nízká absorpční schopnost skla a jeho omezená schopnost vázat vodu přispívají ke vzniku mikrotrhlin, které dále oslabují ITZ a dochází ke vzniku ASR, které dále rozvíjí mikrotrhliny. ASR vzniká v důsledku působení hydroxidových iontů  $\text{OH}^-$  silanolové  $\text{Si-OH}$  a siloxanové  $\text{Si-O-Si}$ , vazba tvořící amorfni křemičitou strukturu skla. Uvedeným procesem dochází k postupnému rozpouštění skleněných částí a vzniku expanzivního alkalického křemičitého gelu, který může narušovat mikrostrukturu cementového kompozitu. Výsledkem je snížení mechanické pevnosti, zvýšení propustnosti a v krajním případě objemová expanze, která může způsobit viditelné porušení konstrukce<sup>11</sup>. Další výzkumy poukazují na omezení rizika ASR při použití dostatečně jemného skla. Při velikosti pod  $75\text{ }\mu\text{m}$  se expanze ASR gelu významně redukuje a OSM vykazuje pucolánovou aktivitu s pozitivním vlivem na mikrostrukturu kompozitu<sup>12</sup>.

Podobné trendy byly pozorovány u pevnosti v tahu za ohybu. Většina výzkumů uvádí pokles pevnosti s rostoucím podílem skla, avšak část zaznamenala mírné zvýšení pevnosti v tahu za ohybu (o 1 % až 5 %), což svědčí o možnosti optimalizace složení směsí. Rozdíly lze přičíst typu, velikosti, původu skleněného odpadu a formě zpracování.

Literatura uvádí, že jemné frakce skleněného odpadu  $< 300\text{ }\mu\text{m}$  mohou při částečné náhradě přírodního písku vést pouze k mírnému snížení pevností, zejména při nízkých hmotnostních podílech náhrady do 20 hm. %. Naopak hrubší frakce v řádu milimetrů jsou považovány za rizikové, neboť mohou iniciovat ASR a způsobovat výraznější pokles mechanických vlastností<sup>13</sup>.

Článek se zaměřuje na vliv mikromletého odpadního skla na mechanické vlastnosti normových cementových past a na vyhodnocení jeho potenciálu jako alternativní příměsí pro částečnou náhradu cementu, s cílem přinést nové poznatky, které mohou přispět k efektivnímu využití odpadního skla.

## Experimentální část

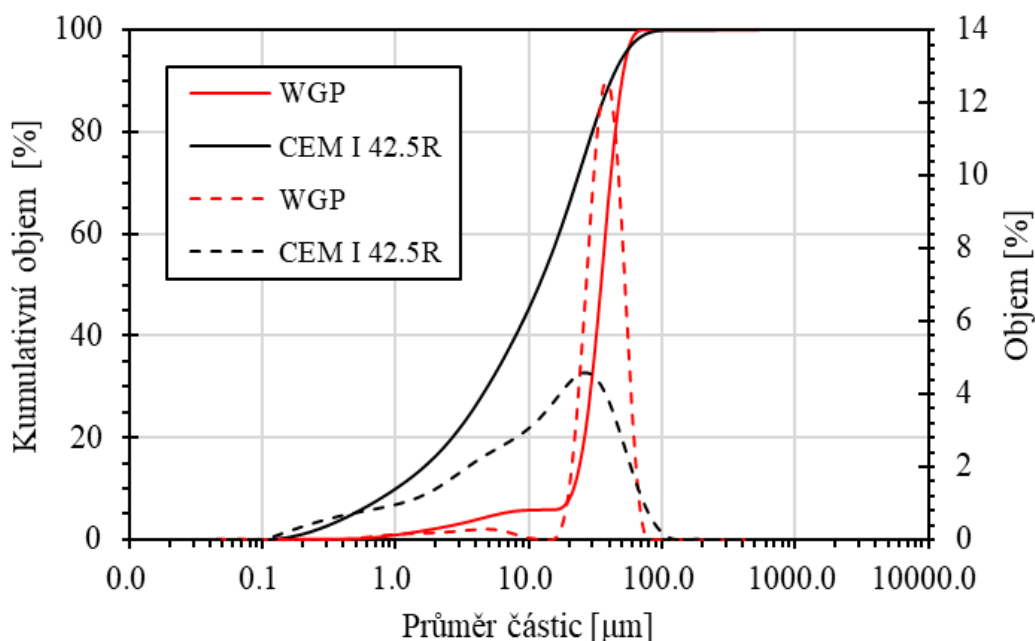
### Vstupní materiály a vzorky

Zkušební vzorky byly vytvořeny z cementu, odpadního skla a normového písku. Pojivo tvořil portlandský cement CEM I 42,5 R vyráběný v závodě Radotín společnosti Heidelberg Materials CZ, splňující požadavky ČSN EN 197-1<sup>14</sup>. Jedná se o rychlovazný cement, který zajišťuje rychlý počátek hydratace a vývoj pevnosti v raném stádiu. Normový písek byl použit dle specifikace normy ČSN EN 196-1<sup>15</sup> jako standardní křemičitý písek frakce 0,08 – 2,00 mm. Písek dodala společnost Strojírny Prostějov, s.r.o., certifikovaný dodavatel CEN standardního písku pro laboratorní zkoušky cementových malt. Normový písek zajišťuje opakovatelnost výsledků a slouží jako referenční plnivo při hodnocení různých pojivových systémů. Alternativní příměs pojiva byla připravena z odpadního obalového skla dodaného společností Recifa, a.s. (Česká republika), specializující se na recyklaci skleněného odpadu. Vstupní materiál tvořil převážně sodnovápenaté sklo, které bylo po mechanickém třídění a odstranění příměsí (kovy, keramika, porcelán, organické látky) jemně mleto v kulovém mlýně na odpadní skleněnou moučku (OSM).

Granulometrická analýza byla provedena na přístroji Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus (rozsah 0,08 – 1800  $\mu\text{m}$ , ultrazvuková disperze, Fraunhoferův model difrakce). Granulometrická charakterizace OSM je zásadní pro posouzení vhodnosti jako alternativní složky v cementových kompozitech. Byla provedena detailní analýza distribuce velikostí částic OSM, které představují klíčový parametr ovlivňující mechanické, chemické a zpracovatelské vlastnosti cementových směsí. Střední průměr částic, měřený metodou Fraunhoferovy difrakce, dosahoval hodnoty 35,9  $\mu\text{m}$ . Uvedená jemnost mletí (obrázek 1) zajišťuje dosažení pucolánové aktivity, klíčové pro zlepšení dlouhodobých mechanických vlastností směsí<sup>16,17,18</sup>. Výsledky granulometrické analýzy potvrzují, že OSM s danou distribucí částic je vhodné

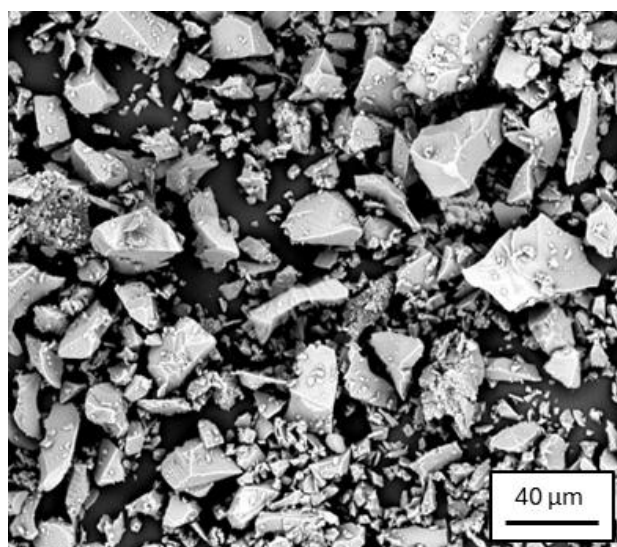
pro použití jako částečná náhrada cementu v cementových směsích. Jemná granulometrie a vysoký obsah oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) zajišťují nejen chemickou reaktivitu, ale také dostatečnou zpracovatelnost směsi. Vlastnosti předurčují odpadní sklo namletou na OSM jako slibnou surovinu pro ekologicky udržitelná řešení ve stavebním průmyslu<sup>19,20</sup>.

Pro ověření jemnosti byl dále stanoven měrný povrch Blaineovou metodou podle ČSN EN 196-6. Naměřené hodnoty činily CEM I 42,5 R: 365  $\text{m}^2/\text{kg}$  a OSM: 290  $\text{m}^2/\text{kg}$ . OSM tedy vykazuje přibližně o 20 % nižší měrný povrch než cement.



**Obrázek 1: Granulometrická charakterizace odpadní skleněné moučky (OSM).**

Morfologie a tvar částic byly hodnoceny pomocí SEM Phenom XL (ThermoFisher Scientific) se zpětně odraženými elektrony (BSE). Na obrázku 2 lze vidět jednotlivá zrna OSM. Částice mají nepravidelný a ostrohranný tvar s výraznými lomovými plochami, což je typické pro mechanicky mletý skleněný odpad. Tvarová charakteristika naznačuje vysoký specifický povrch, který může být výhodný z hlediska reaktivity s okolním prostředím.



**Obrázek 2: SEM snímek OSM, detektor zpětně odražených elektronů, zvětšeno 1 000×.**

Chemické složení cementu, OSM a normového písku bylo stanoveno pomocí rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF) na přístroji Spectro Xepos (50 W/60 kV). Výsledky analýzy jsou uvedeny v Tabulce 1. Z výsledků rentgenové fluorescenční analýzy (tabulka 1) vyplývá, že portlandský cement CEM I 42,5 R vykazuje vysoký obsah oxidu vápenatého ( $\text{CaO} \approx 65\%$ ) a odpovídající podíl oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2 = 20\%$ ), což potvrzuje převahu alitové fáze (C3S) odpovědné za rychlý nárůst pevnosti. Naproti tomu OSM je tvořena převážně oxidem křemičitým ( $\text{SiO}_2 > 80\%$ ) a vyšším obsahem alkalických oxidů, zejména  $\text{Na}_2\text{O} = 14\%$ . Chemické složení odpovídá běžnému sodnovápenatému obalovému sklu, jehož vysoký obsah  $\text{SiO}_2$  podporuje pucolánovou aktivitu, zatímco zvýšený obsah alkalických složek může zvyšovat riziko ASR při vyšších podílech náhrady.

**Tabulka 1: Chemické složení vstupních materiálů (XRF, hm. %).**

| Složka                  | CEM I 42,5 R | OSM  | Normový písek |
|-------------------------|--------------|------|---------------|
| CaO                     | 64,8         | 2,6  | –             |
| $\text{SiO}_2$          | 20,1         | 81,2 | 99,1          |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 2,5          | –    | 0,1           |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | –            | 14,4 | –             |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 4,0          | –    | 0,2           |
| $\text{SO}_3$           | 3,0          | –    | –             |
| Ostatní                 | 2,3          | 0,1  | 0,1           |
| Ztráta žíháním (LOI)    | 3,0          | 2,0  | 0,5           |

Složení jednotlivých testovaných směsí je uvedeno v tabulce 2. Vodní součinitel vyjadřuje poměr vody k celkové hmotnosti pojiva tedy cementu a OSM, který pojivo nahrazuje. Vodní součinitel byl navržen tak, aby byla hodnota konstantní 0,45. Během výroby byla kontrolována zpracovatelnost čerstvé směsi pomocí zkoušky rozlití kužele podle ČSN EN 1015-3. Čerstvá směs byla naplněna do ocelové formy ve tvaru komolého kužele umístěné na hladkém povrchu desky stolu a zhutněna předepsaným způsobem. Následně byla forma plynule nadzvednuta ve vertikálním směru a zkušební stolek podroben 20 rázům. Po ustálení směsi byl změřen průměr rozlivu ve dvou navzájem kolmých směrech a z jejich aritmetického průměru byla stanovena výsledná hodnota konzistence. U všech testovaných směsí byly hodnoty rozlivu v rozmezí 167 – 181 mm, jak je uvedeno v tabulce 2.

Vzorky cementové pasty byly v laboratorním prostředí po jednom dni odformovány a následně uloženy do vodní lázně při teplotě  $20 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ . Zkoušení mechanických vlastností probíhalo na 6 vzorcích o rozměrech  $40 \times 40 \times 160\text{ mm}$  při stáří 7, 28 a 365 dnů.

**Tabulka 2: Složení testovaných směsí obsahující odpadní skleněnou moučku.**

| Označení | Cement CEM I 42,5R [g] | Normativní křemičitý písek [g] | OSM [g] | Vodní součinitel [-] | Zpracovatelnost [mm] |
|----------|------------------------|--------------------------------|---------|----------------------|----------------------|
| Ref      | 900                    | 2700                           | 0       | 0,45                 | 171±5                |
| S10      | 810                    | 2700                           | 90      | 0,45                 | 168±5                |
| S20      | 720                    | 2700                           | 180     | 0,45                 | 175±10               |
| S30      | 630                    | 2700                           | 270     | 0,45                 | 181±1                |
| S40      | 540                    | 2700                           | 360     | 0,45                 | 170±1                |
| S50      | 450                    | 2700                           | 450     | 0,45                 | 167±5                |

## Experimentální metody

Destruktivní mechanické zkoušky ztvrdlých vzorků byly prováděny na zkušebním lisu FP100 Heckert. Pevnost v tahu za ohybu byla vyhodnocena pomocí tříbodového ohybového testu, kde vzdálenost mezi podpěrami činila 100 mm a rychlost zatěžování byla stanovena konstantním posunem 0,1 mm/s. Pevnost v tlaku byla měřena na polovinách zlomených těles vzniklých po ohybové zkoušce se zatěžovací plochou 40 × 40 mm. Rychlost zatěžování při tlakové zkoušce odpovídala posunu 0,3 mm/s.

Pro doplnění destruktivního hodnocení byla na vybraných vzorcích aplikována také nedestruktivní rezonanční metoda pomocí analyzátoru Brüel & Kjær 3560-B-120, která umožňuje stanovení dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu na základě měření vlastních frekvencí kmitání. Metoda poskytla doplňující informace o vnitřní homogenitě materiálu bez porušení zkušebního tělesa a byla využita k ověření a podpoře výsledků získaných destruktivními testy.

Pro zhodnocení mikrostruktury byly po ukončení mechanických zkoušek zbytkové fragmenty vzorků zalaty do epoxidové pryskyřice a připraveny ve formě leštěných vzorků, které byly následně pozorovány pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Před analýzou byly vzorky vysušeny a pokoveny tenkou vrstvou zlata za účelem zajištění elektrické vodivosti povrchu. Pozorování bylo provedeno pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu ZEISS Merlin při urychlovacím napětí 15 kV a zvětšení 1000×. Pro analýzu byly vybrány oblasti s rovnoměrně rozloženou maticí a dobře patrnými fázemi. Cílem bylo identifikovat morfologii vstupních surovin, interakci jednotlivých složek v cementové matici a případné známky pucolánových reakcí. Zvláštní pozornost byla věnována části mikromleté OSM a jejich zapojení do hydratační struktury kompozitu<sup>20,21</sup>.

## Výsledky a diskuse

### Mechanické vlastnosti

Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku cementových past s různým podílem OSM jsou zobrazeny na Obrázku 3 a 4. Pevnost v tahu za ohybu cementových past s 10% a 20% hmotnostním podílem OSM (S10 a S20) vykazují mírný pokles pevností v tlaku oproti referenčnímu vzorku (REF). S rostoucím podílem OSM v cementových pastách (S30, S40, S50) dochází k výraznějšímu poklesu pevnosti. Nejnižší pevnosti bylo dosaženo u směsi s 50% hmotnostním podílem OSM (S50), kde pevnost v tahu za ohybu klesla o 33 % ve srovnání s referenčním vzorkem po 365 dnech. Pokles je důsledkem narušení mikrostruktury, omezené hydratace, a především nedostatečné reaktivity OSM. OSM díky přítomnosti amorfního oxidu křemičitého SiO<sub>2</sub> vykazuje potenciální pucolánovou aktivitu, literatura uvádí, že tato aktivita probíhá pouze při velmi jemné frakci (< 75 µm) a dostatečném množství Ca(OH)<sub>2</sub> uvolněném během hydratace cementu<sup>21,22</sup>.

Pevnost v tlaku cementových past vykazuje obdobný trend jako pevnost v tahu za ohybu. Referenční vzorek (REF) dosahuje nejvyšších hodnot, zatímco pevnost v tlaku u vzorků s vyšším podílem OSM výrazně klesá. U vzorku S50 došlo ke snížení pevnosti v tlaku o 58 % oproti referenčnímu vzorku po 365 dnech. Nárůst podílu OSM ve směsích vedl k postupnému a plynulému poklesu mechanických vlastností. Pokles nesouvisí s úplnou inertností OSM, ale s jeho omezenou reaktivitou. K poklesu pevností přispívá také narušení mikrostruktury, tvorba mikrotrhlin a omezená vazba mezi cementovou maticí a částicemi plniva, což vede ke zhoršenému přenosu napětí. Celkově výsledky ukazují, že i nižší úroveň náhrady cementu vedou k výraznému snížení pevností a s rostoucím podílem OSM se tento negativní trend dále prohlubuje, což omezuje možnost využití vyšších úrovní tohoto materiálu v cementových kompozitech.

Porovnáním dynamických modulů jednotlivých směsí (obrázek 5 a 6) lze vidět, že směsi s nižším obsahem OSM (10 hm. % a 20 hm. %) vykazují stabilní a rovnoměrný růst dynamického modulu pružnosti i pevností v čase. Jejich vývoj je podobný referenční směsi, což naznačuje, že při nízkém stupni náhrady nedochází k výraznému narušení mikrostruktury ani přenosových mechanismů v cementové matici. Směs s 30 hm. % OSM vykazuje pomalejší růst modulu než u S10 a S20, avšak výraznější než u S40 a S50. Stabilizace hodnot nastává později (po 178 dnech), což souvisí s kombinací omezené reaktivity OSM a postupným vývojem mikrostruktury. U směsí s vyšším podílem OSM

(40 hm. % a 50 hm. %) je růst dynamického modulu pružnosti pozvolnější, avšak nikoli stabilizovaný či klesající, i v pozdějších stádiích hydratace je patrný mírný nárůst hodnot, což odpovídá vývoji na obrázcích 5 a 6. Odpovídá charakter postupné tvorby hydratačních produktů při omezené reaktivitě OSM a současně pokles porozity, která zvyšuje výslednou tuhost materiálu. Porozita nebyla v rámci této studie stanovena rtuťovou porozimetrií, avšak pozorované trendy odpovídají literárním poznatkům o vztahu porozity a modulu pružnosti cementových kompozitů<sup>22</sup>.

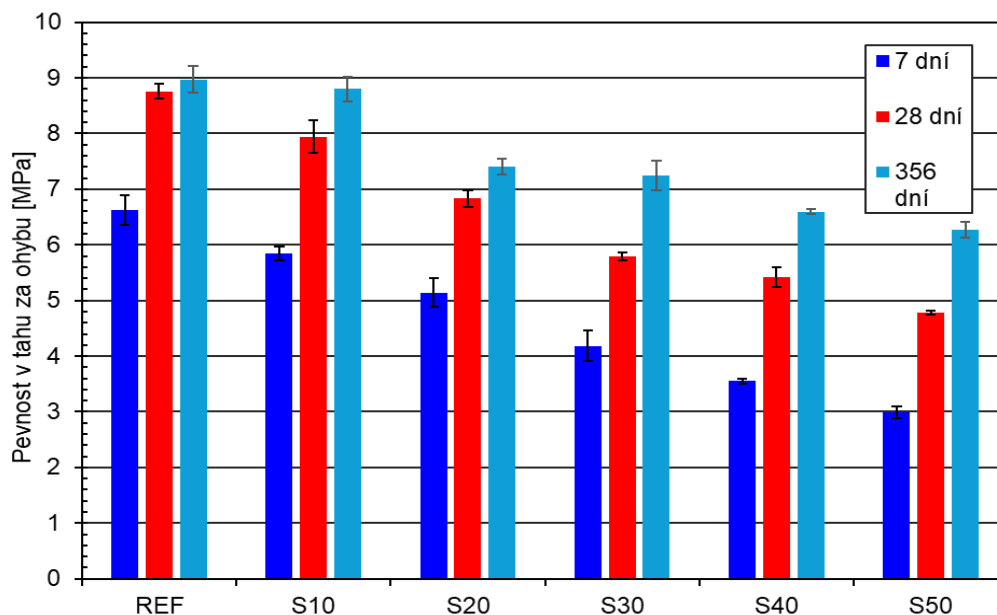
Výsledky prokázaly, že již nízké podíly náhrady cementu odpadní skleněnou moučkou 10 – 20 hm. % vedou k poklesu pevnosti, který je větší, než odpovídá samotnému snížení množství cementu. Přestože lze na základě mikrostruktury předpokládat určitou míru pucolánové aktivity OSM, její přínos není v mechanických vlastnostech dominantní. Výsledky ukazují, že použití OSM jako náhrady cementu je z hlediska pevnostních parametrů limitován a vyžaduje další optimalizaci, zejména v oblasti jemnosti mletí a posouzení skutečné reaktivity materiálu. Při vyšších úrovních náhrady se negativní vlivy dále prohlubují v důsledku nižší reaktivity skla a výrazného oslabení mikrostruktury kompozitu.

Pro komplexnější posouzení účinnosti OSM byla dále vyhodnocena nepřímá pevnostní aktivita pomocí indexu SAI (Strength Activity Index). SAI je definován jako poměr pevnosti v tlaku s OSM k pevnosti referenční pasty a představuje běžně používaný ukazatel výkonnosti druhotných surovin. Hodnoty SAI jsou uvedeny v tabulce č. 3.

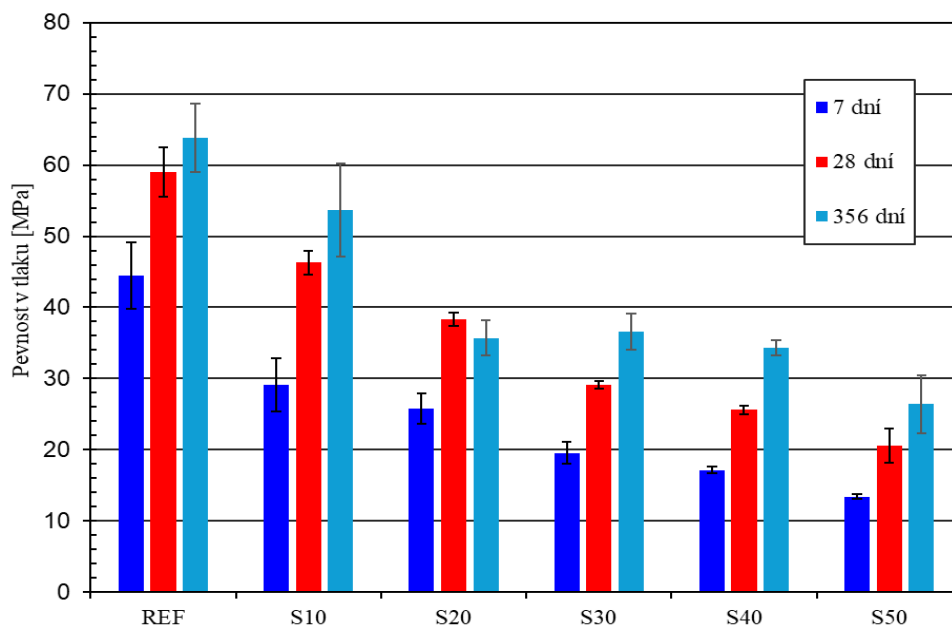
**Tabulka 3: Strength Activity Index (SAI) směsí s OSM vzhledem k referenci.**

| Označení | SAI 7 dní<br>[%] | SAI 28 dní<br>[%] | SAI 356 dní<br>[%] |
|----------|------------------|-------------------|--------------------|
| REF      | 100              | 100               | 100                |
| S10      | 65,5             | 78,4              | 84,2               |
| S20      | 57,9             | 65,0              | 56,0               |
| S30      | 43,9             | 49,3              | 57,4               |
| S40      | 38,5             | 43,4              | 53,8               |
| S50      | 30,2             | 34,9              | 41,4               |

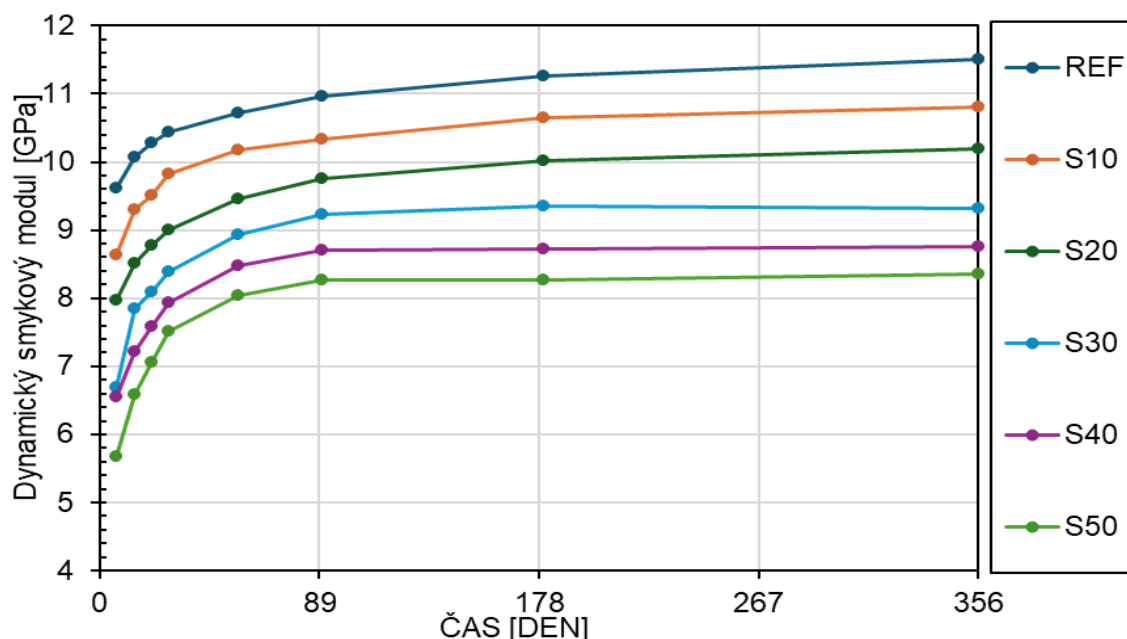
Z výsledků SAI je patrné, že všechny směsi s OSM vykazují nižší pevnost v tlaku než referenční směs. Již při 10 – 20 hm. % náhrady cementu dosahují hodnoty SAI po 28 dnech maximálně 65 – 78 %, přičemž při vyšších úrovních náhrady (30 – 50 hm. %) SAI klesá pod 60 %. Výsledky potvrzují, že OSM vykazuje pouze omezenou pucolánovou aktivitu a její pozitivní vliv na průběh hydratačních procesů není schopen kompenzovat pevnostní ztráty způsobené sníženým obsahem cementu a oslabením přechodové zóny.



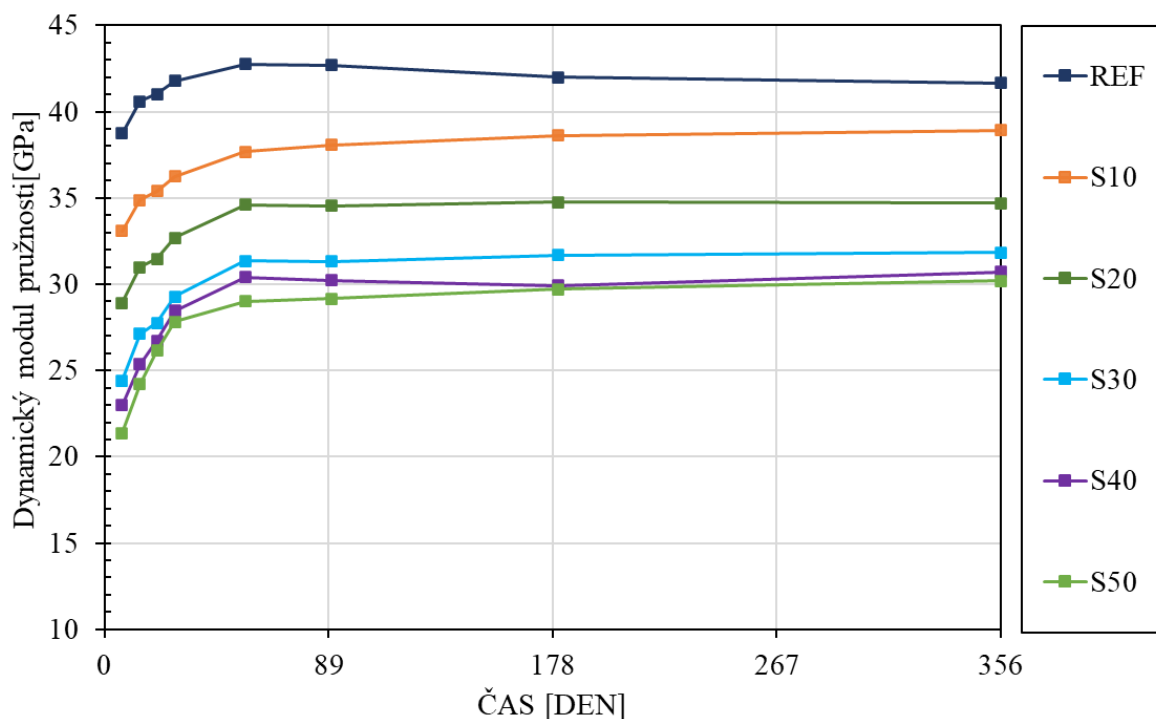
**Obrázek 3: Pevnost v tahu za ohybu cementových past s různým hmotnostním podílem OSM v závislosti na čase, s uvedenou směrodatnou odchylkou.**



**Obrázek 4: Pevnost v tlaku cementových past s různým hmotnostním podílem OSM v závislosti na čase, s uvedenou směrodatnou odchylkou.**



Obrázek 5: Dynamický smykový modul, max. směrodatná odchylka průměrných hodnot 5 %.

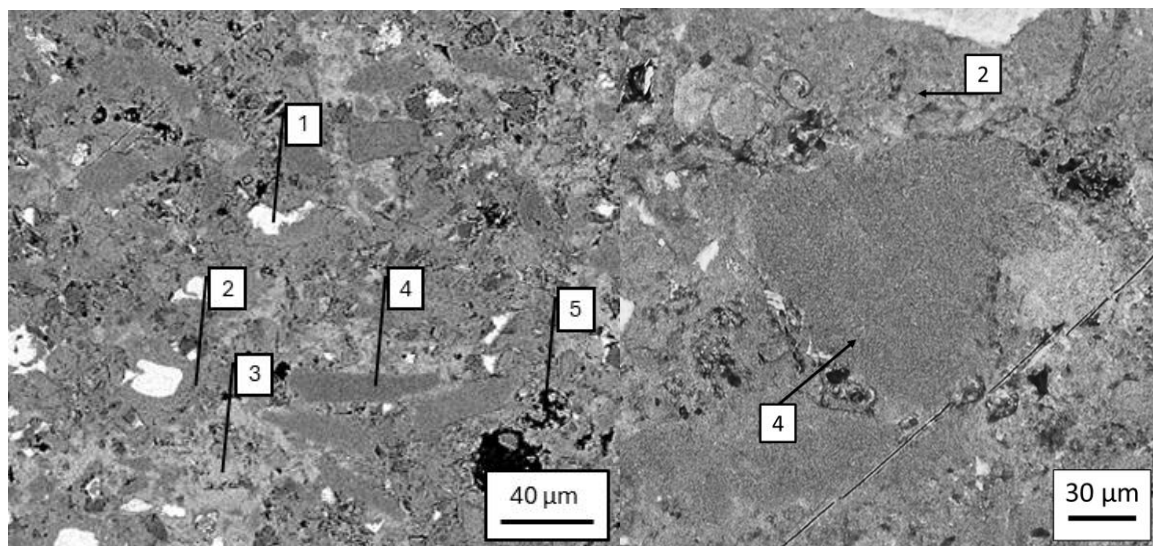


Obrázek 6: Dynamický modul pružnosti, max. směrodatná odchylka průměrných hodnot 5 %.

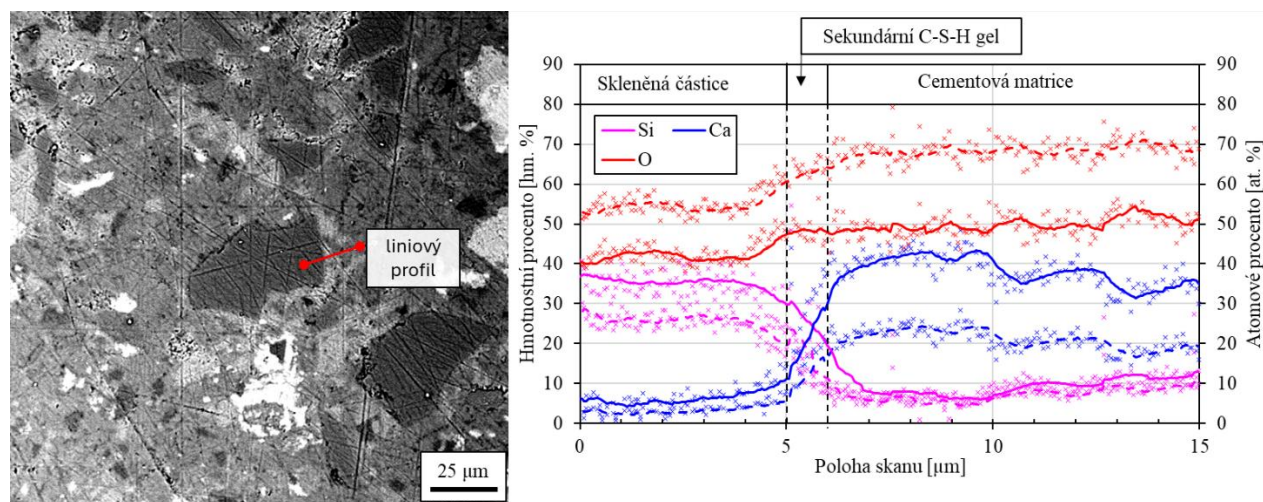
### Mikroskopická analýza

Na obrázku 7 je patrné, že skleněné částice (OSM) jsou v cementové matici rovnoměrně rozptýlené a na řadě míst si zachovávají původní kontury. Zároveň je na některých zrnech patrné lokální narušení povrchu, což může naznačovat jejich částečnou reaktivitu v alkalickém prostředí cementového tmelu. Ze samotných SEM snímků však nelze jednoznačně kvantifikovat rozsah pucolánových reakcí ani spolehlivě odlišit případný sekundární C-S-H gel od primárních hydratačních produktů. Ze snímků je možné především konstatovat, že zrna OSM jsou v kontaktu s hydratačními produkty a jsou v jejich okolí přítomny jak oblasti C-S-H gelu, tak portlandit, včetně zóny přiléhající k částicím OSM. Pozorované

dobré zakomponování částic bez zjevných separačních vrstev či výrazně pórovitých mezivrstev nicméně svědčí o dobré mechanické integraci OSM v matici. Na obrázku 8 je uveden EDS liniový sken vedený přes zrno OSM a přilehlou cementovou matici. Profil dokumentuje výraznou změnu elementárního složení na rozhraní částice a matrice. V úseku přibližně od 5 do 6  $\mu\text{m}$  je patrné zvýšené zastoupení křemíku (a odpovídající změna zastoupení ostatních prvků), což naznačuje možnou tvorbu sekundárního C-S-H gelu.



**Obrázek 7: SEM snímek mikrostruktury cementové pasty s 20 % náhradou cementu sklem po 3 měsících, detektor zpětně odražených elektronů, zvětšeno 1 000 $\times$ : Označené fáze: 1 – nezhydratovaný slínek, 2 – C-S-H gel, 3 – portlandit, 4 – sklo, 5 – pór (vlevo), SEM snímek cementové matrice s částečně zakomponovanou částicí odpadní skleněné moučky, zvětšení 2000 $\times$  (vpravo).**



**Obrázek 8: SEM snímek rozhraní mezi částicí odpadní skleněné moučky (OSM) a cementovou maticí s odpovídajícím EDS liniovým profilem prvků. Plné křivky znázorňují hmotnostní procenta (hm. %), čárkované křivky atomová procenta (at. %) prvků.**

Poznatky z mikroskopické analýzy jsou v souladu s publikovanými závěry o potenciální pucolánové aktivitě jemně mletého skla. Shi et al.<sup>19</sup> uvádí, že jemně mleté sklo může přispívat k tvorbě dodatečných hydratačních produktů typu C-S-H a ovlivňovat průběh hydratace. Matos a Sousa-Coutinho<sup>20</sup> popsali postupné rozpouštění skleněných částic v cementové matici a jeho souvislost s vyplňováním pórového

prostoru a zahušťováním hydratačních produktů, což se může příznivě projevit na mechanických vlastnostech. Shao et al.<sup>24</sup> zdůrazňují zásadní vliv jemnosti mletí na rychlost a rozsah případných pucolánových reakcí. Z uvedeného vyplývá, že OSM se v cementové matici nemusí chovat inertně a může se podílet na vývoji mikrostruktury<sup>24,25</sup>.

## Závěry

Výsledky této studie ukazují, že náhrada cementu odpadní skleněnou moučkou (OSM) v použité podobě a v rozsahu 10 – 50 hm. % vede k poklesu mechanických vlastností cementových past. Nejvýraznější snížení pevnosti v tlaku bylo pozorováno již při nižších náhradách 10 – 20 hm. %, zatímco při dalším zvyšování podílu OSM je trend poklesu pevnosti v tlaku méně strmý. Uvedený trend potvrzují jak hodnoty pevností v tlaku a v tahu za ohybu, tak i pevnostní index SAI. Na základě dostupných výsledků lze konstatovat, že samotná prostá substituce cementu OSM neposkytuje výsledné mechanické vlastnosti kompozitu srovnatelné s referenční směsí.

Současně však získaná data potvrzují, že OSM může představovat perspektivní surovinový zdroj pro cementové kompozity, zejména pokud bude její využití spojeno s cílenou optimalizací (např. úpravou jemnosti mletí, fyzikálně-chemickou aktivací). V praxi se tak otevírá prostor pro aplikace, kde je požadavek na udržitelnost a materiálové využití odpadu vyvažován specifickými nároky na mechanické vlastnosti (např. směsi s nižšími pevnostními požadavky). Získané výsledky tak poskytují důležitý experimentální základ pro navazující výzkum zaměřený na zvýšení efektivity využití OSM a na návrh směsí, které dokážou lépe kompenzovat pokles mechanických vlastností.

## Poděkování

Článek byl finančně podpořen výzkumným projektem GA ČR pod číslem GA23-05500S s názvem "Vliv povrchových úprav druhotných surovin na bázi křemíku na jejich působení v cementových kompozitech" a Českým vysokým učením technickým v Praze v rámci projektu SGS č. SGS25/035/OHK1/1T/11.

## Literatura

1. Česká spořitelna: *Recyklace skla v ČR: Co prozrazují aktuální data*. Česká spořitelna [online]. [cit. 27.11.2024]. Dostupné z: <https://www.csas.cz/cs/firmy/articles/24/recyklace-skla-v-cr-co-prozrazuji-aktualni-data>
2. Český statistický úřad: *Aktuální výsledky odpadové statistiky*. Statistika&My [online]. [cit. 27.11.2024]. Dostupné z: <https://statistikaamy.csu.gov.cz/aktualni-vysledky-odpadove-statistiky>
3. Český statistický úřad: *Zaměřeno na odpady*. Statistika&My, 27.03.2023 [online]. [cit. 01.11.2024]. Dostupné z: <https://statistikaamy.csu.gov.cz/zamereno-na-odpady>.
4. Dong, W., Li, W. a Tao, Z.: *Resources, Conservation and Recycling* 172, 105664 (2021).
5. Siddika A. et al.: *Polymers* 13(13) (2021).
6. Ramírez-Arellanes S. et al.: *Recycling*, 5(3), (2025).
7. Taha B., Nounu G.: *Constr. Build. Mater.* 22, 713 (2008).
8. Taha B., Nounu G.: *J. Mater. Civ. Eng.* 21, 709 (2009).
9. Ali E.E., Al-Tersawy S.H.: *Constr. Build. Mater.* 35, 785 (2012).
10. Al-Tayeb M.M., Abu Aisheh Y.I., Qaidi S.M.A., Tayeh B.A.: *Case Stud. Constr. Mater.* 17, 01324 (2022).
11. Jiao Y., Zhang Y., Guo M., Zhang L., Ning H., Liu S.: *J. Clean. Prod.* 277, 123501 (2020).
12. Bueno E.T. et al.: *Journal of Cleaner Production* 257, 120180 (2020).
13. Arabi N., Meftah H., Amara H., Kebaili O., Berredjem L.: *Constr. Build. Mater.* 209, 364 (2019).

14. ČSN EN 197-1: *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
15. ČSN EN 196-1: *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
16. Heidelberg Materials CZ: CEM I 42,5 R. Heidelberg Materials CZ [online]. [cit. 28.11.2024]. Dostupné z: <https://www.heidelbergmaterials.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>.
17. AMT Příbram: *Zpracování odpadů*. Recifa, a.s. [online]. [cit. 20.11.2024]. Dostupné z: <https://www.recifa.cz/amtpribram/>
18. Čimburek S.: *Recyklace skla v ČR*. Česká asociace odpadového hospodářství, 19.11.2018 [online]. [cit. 20.11.2024]. Dostupné z: <https://www.caoh.cz/aktuality/zeptali-jsme-se-stanislav-cimburek-recyklace-skla-v-cr.html>
19. Shi C., Ling T.-C., Liu Z.-Y.: *Cem. Concr. Res.* 130, 105965 (2020).
20. Matos A.M., Sousa-Coutinho J.: *Constr. Build. Mater.* 36, 205 (2012).
21. Schwarz, M., Camiletti, J., & Afshinnia, K. (2015). Waste glass as binder. *Construction and Building Materials*.
22. Jiang, Y., et al. : *Resources, Conservation & Recycling*, 141 (2019).
23. Lin, K. L., Lin, D. F.: *Cem. Concr. Res.* 28(9) (2006).
24. Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D.: *Cem. Concr. Res.* 30, 91 (2000).
25. Poudel S., Tamang S., Gautam S., Bhattarai P., Neupane K., Adhikari S.: *Buildings*, 15(6) (2025).

## Utilization of Waste Glass for Partial Replacement of Cement in Cementitious Composite According to ČSN EN 196-1

Aleš PALIČKA, Zdeněk PROŠEK

Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Thákurova 7, 166 29  
Prague 6, Czech Republic

### Summary

*This paper presents an experimental assessment of the potential use of finely ground waste glass as a secondary raw material for partial replacement of Portland cement in cement-based composites. The study aimed to evaluate the effect of different dosages of waste glass powder (WGP) on mechanical properties (compressive strength, flexural tensile strength, and dynamic modulus of elasticity) and selected microstructural characteristics. Standard cement paste mixtures were prepared in which cement was replaced by WGP at 10 – 50 wt.%, and the results were compared with a reference mixture without replacement. The tests showed a decrease in strengths and dynamic modulus of elasticity with increasing WGP content, with the most pronounced changes already observed at lower replacement levels. Microstructural analysis (SEM/EDS) confirmed good mechanical integration of glass particles within the cement matrix. The results provide experimental input for optimizing mixture design with WGP (e.g., by adjusting fineness or combining it with other reactive supplementary materials) and support the material valorization of waste glass within the framework of a circular economy in the construction sector.*

**Keywords:** Waste Materials, Waste Glass, Recycling, Mechanical Properties, Cement