

Ověřování mleté teplárenské strusky jako příměsi do betonu

Ing. Ivana Chromková¹, Ing. Jindřich Sedlák²,

Ing. Pavel Stupárek³, Ing. Jaroslav Bačovský³

¹ Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., ² Prefa Brno a.s., ³ Strojírny Olšovec s.r.o.

e-mail: chromkova@vush.cz

Souhrn

Příspěvek přináší informace o výsledcích ověřování využitelnosti jemně mleté teplárenské strusky z haldy Oslavany do vybraných receptur betonu používaných při výrobě prefabrikovaných betonových dílců ve firmě Prefa Brno a.s. Jemně mletá struska se osvědčila v recepturách betonu jako náhrada jemně mletého vápence.

***Klíčová slova:** teplárenská struska, příměs do betonu, jemnost mletí*

Úvod

Teplárenská struska z haldy v Oslavanech je materiál, který vznikl jako odpad po spalování černého uhlí v elektrárně Oslavany. Činnost této elektrárny probíhala v letech 1913-1993. V současné době je halda majetkem firmy Prefa Brno a.s., která již dlouhodobě vyvíjí snahu o materiálové využití teplárenské strusky do receptur svého výrobního sortimentu.

Projekt, ve kterém je ověřována možnost využití mleté teplárenské strusky jako příměsi do betonu či betonového prefabrikovaného zboží, navazuje na výsledky dříve řešeného projektu. V něm byla ověřována možnost využití teplárenské strusky frakce 2/8 jako náhrada přírodního kameniva do betonu. Výsledky tohoto ověřování byly prezentovány i na konferenci TVIP. Po ukončení projektu byly provedeny úpravy míchacího centra a teplárenská struska je jako náhrada přírodního kameniva v některých recepturách výrobních závodů firmy Prefa Brno a.s. běžně užívána.

Množství teplárenské strusky na haldě v Oslavanech je velké. S ohledem na zvyšující se tlak na používání alternativních zdrojů surovin a rostoucí ceny složek betonu bylo rozhodnuto, že je vhodné ověřit další možnosti využití tohoto materiálu. Vhodným se jeví způsob využití jako příměs do betonu.

Příměsi do betonu jsou práškovité látky, které se mohou přidávat do betonu za účelem zlepšení některých vlastností čerstvého nebo vyzrálého betonu. Používány jsou běžně např. křemičité úlety, které zvyšují pevnost betonu, nebo popílek, který zlepšuje čerpatelnost a kvalitu povrchu betonu.

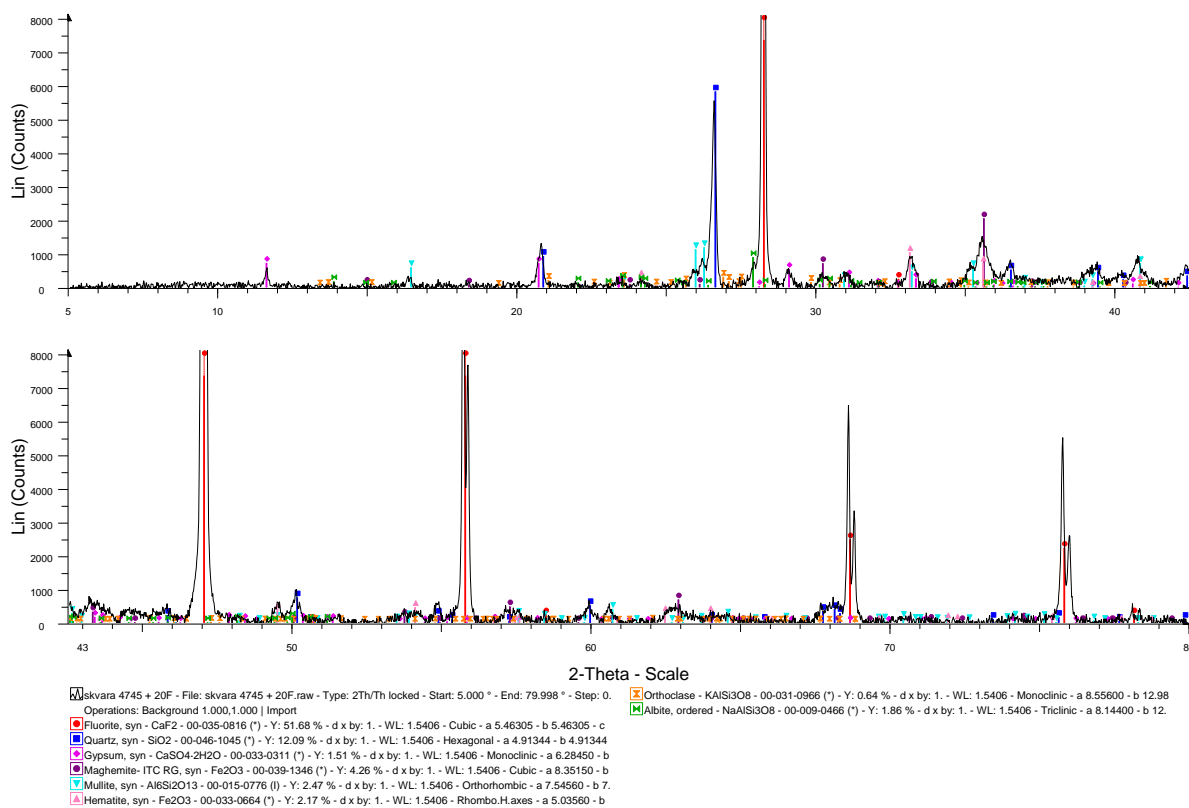
Charakterizace vlastností teplárenské strusky

Svémi chemickými a fyzikálně-chemickými parametry je teplárenská struska do značné míry srovnatelná s křemičitými úlety či s křemičitým popílkem.

Teplárenská struska je po chemické stránce tvořena z 48 – 53 % SiO₂, 20 – 23 % Al₂O₃, 10 – 12 % Fe₂O₃, 3 – 5 % CaO, 3 – 4 % K₂O, v rozmezí 1,5 – 2 % se pohybuje obsah Na₂O a MgO, dále obsahuje TiO₂, MnO v množství menším než 1 %. Pro použití do betonu je hodnoceno dále množství síranů a chloridů. Teplárenská struska splňuje požadavky na limitní hodnoty pro popílek do betonu dle ČSN EN 196-2, která v případě síranů činí hodnotu max. 3 % a v případě chloridů hodnotu max. 0,1 %.

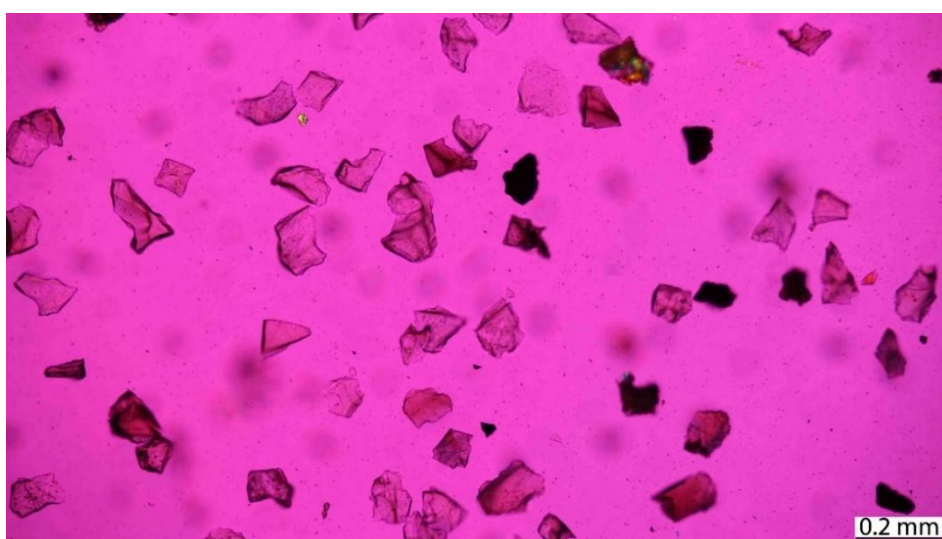
Zkoušky ekologické vhodnosti, kterými bylo stanovení obsahu nebezpečných látek v sušině a ve výluhu, zkouška ekotoxicity, stanovení obsahu přírodních radionuklidů aj., potvrdily, že teplárenská struska nepřesahuje limitní hodnoty pro odpadní či druhotné suroviny používané pro výrobu stavebních hmot.

Na aparatuře Bruker D8 Advance s Cu anodou bylo RTG difrakční analýzou stanoveno fázové složení teplárenské strusky. Z této zkoušky vyplývá, že teplárenská struska obsahuje křemen, sádrovec, mullit, hematit, maghemit a živce (albit a ortoklas). Významné je zastoupení amorfni fáze, která se pohybuje v rozmezí 75 – 85 %.



Obr. 1: Difraktogram vzorku teplárenské strusky – detail

Na jemně pomletém vzorku teplárenské strusky o zrnitosti 0,063 - 0,090 mm byla stanovena polarizačním mikroskopem sklovitost. Vlastní kvantitativní vyhodnocení je prováděno metodou mikroskopické bodové integrace. Na obrázku 2 je patrné zastoupení amorfni fáze. Ta se jeví jako růžová průhledná hmota. Krystalický podíl tvoří pestrobarevná a černá zrna.



Obr. 2 : Sklovitost teplárenské strusky

Z výsledků provedených analýz je možno konstatovat, že je teplárenská struska vhodným materiálem pro využití při výrobě stavebních hmot. Významná je informace o vysokém zastoupení amorfni fáze. Suroviny s obsahem SiO_2 v amorfni podobě použité při výrobě cementových kompozitů, přispívají k jejich trvanlivosti.

Zdrobňovací proces

Důležitým aspektem využití teplárenské strusky jako příměsi do betonu je úprava zrnitého materiálu frakce 0/2, resp. 0/16 mm, který je těžen z haldy. V průběhu řešení projektu je tedy nutno stanovit nejefektivnější způsob jejího třídění, zdrobňování a mletí. Zdrobňování nerostných surovin je proces, při kterém se působením vnějších sil překonávají vnitřní mezimolekulární síly soudržnosti a dochází tak k rozrušení zrn. Při jejich rozpadu vzniká soubor menších zrn a současně vzrůstá celkový povrch.

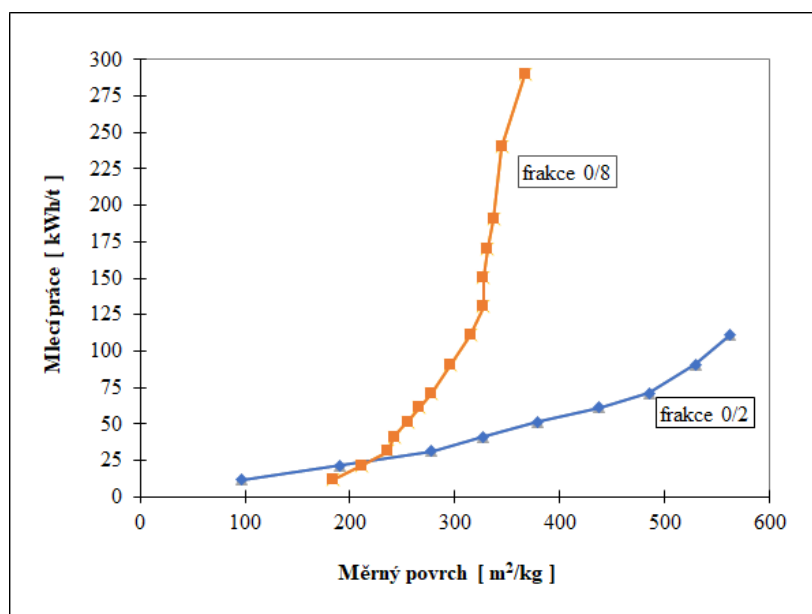
Při zdrobňování se jednotlivá zrna rozpadají vždy v místech se zmenšenou pevností. Při pokračujícím dalším zdrobňování se počet takových míst postupně zmenšuje. Přestože se mohou vlivem sil působících na zdrobňovaná zrna tvořit současně nové trhlinky a jiná slabá místa, dochází zpravidla k snížení počtu míst a menší odolnosti vůči rozrušení. Při postupujícím drcení a mletí se odpor hornin a jiných materiálů vůči zdrobňování zvětšuje. Tento odpor se označuje obvykle jako drtitelnost nebo melitelnost. Jeho hodnota není nikdy stálá. Při zmenšující se zrnitosti získávaných produktů roste měrná spotřeba energie. To je právě jednou z příčin mimořádně vysoké spotřeby energie v oblasti jemného a velmi jemného mletí.

Zkouška melitelnosti

Teplárenská struska byla mleta ve zkušebním mlýně s 8 koulemi, které melou materiál rotací. Po mletí je měřen měrný povrch pomocí Blaina a vzorek je přesítován a podsítný podíl 0,125 mm je odstraněn a zvážen. Ke vzorku se přidá stejné množství čerstvého materiálu, jako je hmotnost odebraného podsítného podílu. Zkouška je ukončena, až je poměr namletého a počet rotací stejný po třech následujících krocích.

Výsledkem tohoto testu je množství specifické energie v $\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$, které musí být vynaloženo na dosažení specifické úrovně jemnosti pomocí Blaina.

V následujícím grafu je znázorněna mlecí práce potřebná k dosažení určitého stupně jemnosti mletí teplárenské strusky.



Obr. 3 : Melitelnost teplárenské strusky Oslavy

Z grafu je patrné, že různé frakce teplárenské strusky vykazují odlišnou melitelnost. V hrubších frakcích teplárenské strusky je obsaženo velké množství sklovitých zrn. Tento fakt bylo nutno zohlednit při návrhu strojního zařízení na mletí teplárenské strusky.

Vývoj efektivního zařízení pro jemné mletí teplárenské strusky

Zařízení na jemné mletí vzniká ve firmě Strojírny Olšovec s.r.o. Po rozsáhlé rešeršní a přípravné etapě, byly provedeny prvotní testy jemného mletí teplárenské strusky na různých typech laboratorních a poloprovozních mlýnů. Na základě výsledků těchto testů byl zvolen jako nejefektivnější zařízení kolíkový mlýn. Toto řešení bylo zvoleno i přesto, že v minulosti s tímto typem zařízení neuspěla společnost Přerovských strojírny a.s. i když v zahraničí se obdobná zařízení běžně využívají. Jedná se ovšem o dokonalejší konstrukční provedení pracovních ploch s použitím vyhovujících moderních materiálů. Proto se i společnost Strojírny Olšovec s.r.o. snažila co možná nejvíce využít odborných poznatků ze zahraničí a konzultací s pracovníky VUT Brno. Opakovanými experimentálními zkouškami mlecího zařízení spojených s nutnými technickými úpravami byly zajištěny podmínky pro pokračování v řešení zadaného úkolu projektu. Rozšířené (experimentální) zkoušky mletí pak probíhaly na zařízení nové konstrukce mlýna určeného výhradně pro mechanickou úpravu teplárenské strusky. Pro funkční plochy byl zvolen materiál proti vysokému opotřebením. Důvodem bylo zjištění, že teplárenská struska z Oslavan má tvrdost zrn v rozmezí od 6 do 7,5 stupně Mohsovy stupnice. Z toho parametru je patrné, že při mechanické úpravě teplárenské strusky může docházet k vysokému brusnému opotřebením způsobenému přítomností křemičitých až sklovitých částic obsažených v teplárenské strusce.

Po provedených dílčích zkouškách mletí byly vyhodnocovány výsledky účinnosti mletí a na jejich základě docházelo k následným úpravám mlecího zařízení. Na obrázku 4 je uvedena jedna z variant úprav zkušebního zařízení, které sestávalo v nastavování šěrbin násypky i místa výsypu, úpravy jejich umístění apod.



Obr. 4 : Zařízení pro jemné mletí teplárenské strusky (vlevo), detail mlecí komory s mletou struskou (vpravo)

Ověřování využitelnosti mleté teplárenské strusky jako částečné náhrady cementu

Teplárenská struska byla pro účely vstupního testování namleta na jemnost 250, 300 a 350 m²/kg (zkouška jemnosti mletí dle Blaina). Dále s těmito vzorky byly provedeny základní normové zkoušky částečné náhrady cementu.

Jednalo se o zkoušky:

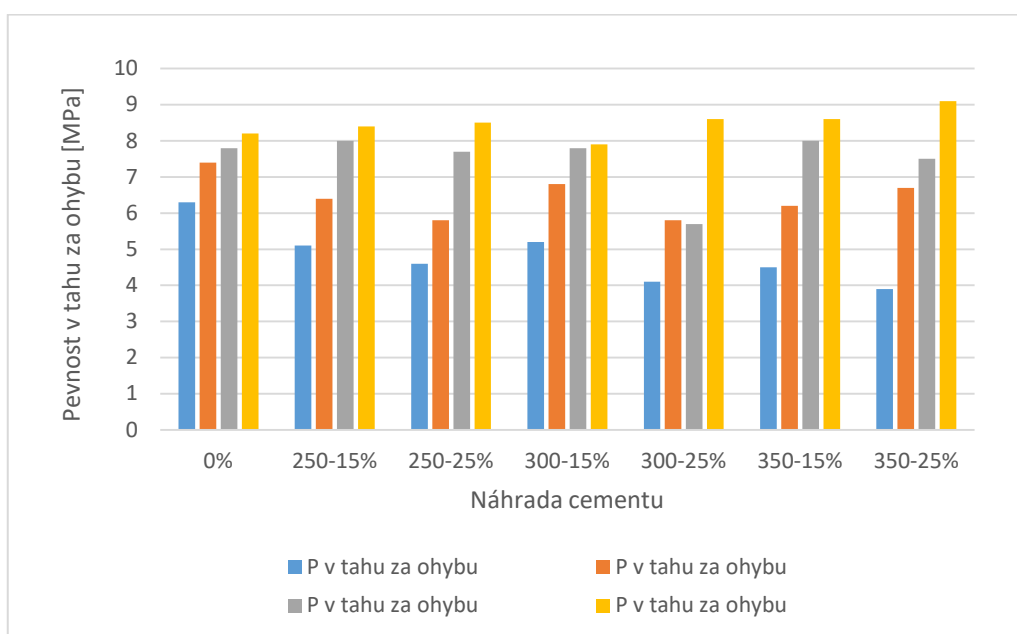
Počátek a celková doba tuhnutí – u připravených směsí s náhradou cementu mletou teplárenskou struskou byly splněny požadavky na počátek tuhnutí a celkovou dobu tuhnutí uvedené v ČSN EN 197-1.

Objemová stálost dle Le Chateliera – objemová stálost (roztažnost) se stanoví na cementové kaši zhotovené z 30 % popílku a 70 % referenčního cementu podle ČSN EN 196–3 a nesmí být větší než 10 mm. Všechny ověřované vzorky splnily požadavky na objemovou stálost.

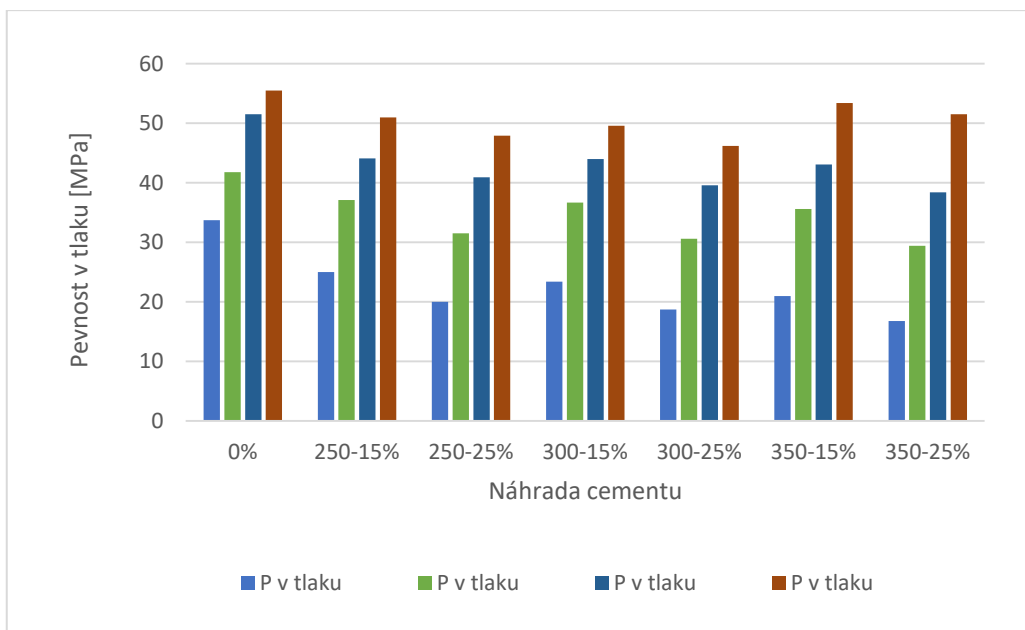
Množství vody potřebné k dosažení optimální konzistence – provádí se dle ČSN EN 450-1 (příloha B) a hodnotí se rozdíly rozlití kontrolní a zkušební záměsi. Množství vody k dosažení optimální konzistence směsi s částečnou náhradou cementu mletou teplárenskou struskou bylo srovnatelné nebo mírně nižší než v případě 100% cementové pasty.

Index účinnosti – mletá teplárenská struska výše uvedených jemností byla ověřena jako náhrada části cementu v připravované směsi. Běžně se tato zkouška provádí dle ČSN EN 450-1 na směsi v poměru 25 % teplárenská struska : 75 % cement. Pro potřeby prvotního vymezení optimální náhrady cementu jemně mletou teplárenskou struskou byl proveden též experiment, ve kterém bylo nahrazeno pouze 15 % cementu, tj. poměr 15 % teplárenská struska : 85 % cement.

Výsledky zkoušky pevnostních charakteristik hmoty s náhradou cementu mletou teplárenskou struskou po 2, 7, 28 a 90 dnech zrání jsou uvedeny v grafech (Obr. 5 a Obr. 6).



Obr. 5: Pevnost v tahu za ohybu – náhrada cementu 15 a 25 % teplárenskou struskou namletou na jemnost 250, 300 a 350 m²/kg



Obr. 6: Pevnost v tlaku – náhrada cementu 15 a 25 % teplárenskou struskou namletou na jemnost 250, 300 a 350 m²/kg

Z obrázků 5 a 6 je patrné, že částečná náhrada cementu jemně mletou teplárenskou struskou způsobila ve směsi pomalejší vývoj počátečních pevností v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku. Po 28 dnech zrání byly již pevnosti v tahu za ohybu srovnatelné se standardní recepturou a pevnosti po 90 dnech i vyšší. Hodnoty pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech zrání byly o cca 5 až 10 MPa nižší, než bylo dosaženo u standardní receptury, která obsahovala jako pojivo pouze cement.

Na základě výsledků indexu účinnosti bylo rozhodnuto dále ověřovat využití mleté teplárenské strusky jako náhrady jemně mletého vápence, který je v recepturách pro výrobu prefabrikovaných betonových dílců v závodech Prefa Brno a.s. používán jako příměs do betonu.

Laboratorní a poloprovozní ověřování mleté teplárenské strusky jako příměsi do betonu

Testování bylo provedeno na recepturách litých betonů pro výrobu plotových desek a recepturách samozhutnitelného betonu. Receptury byly dále upraveny ve smyslu náhrady standardní příměsi (mikromletého vápence) mletou teplárenskou struskou. U všech zkoušených receptur byly sledovány pevnostní charakteristiky v závislosti na čase a porovnávány se standardními recepturami.

K ověřování bylo připraveno cca 80 kg teplárenské strusky mletím na jemnost odpovídající měrnému povrchu 225 m²/kg. Měrná hmotnost takto připravené strusky byla 2635 kg/m³. Měrná hmotnost cementu CEM I 42,5R, který byl používán ke zkouškám jako cement referenční, byla 3095 kg/m³.

Lité betony

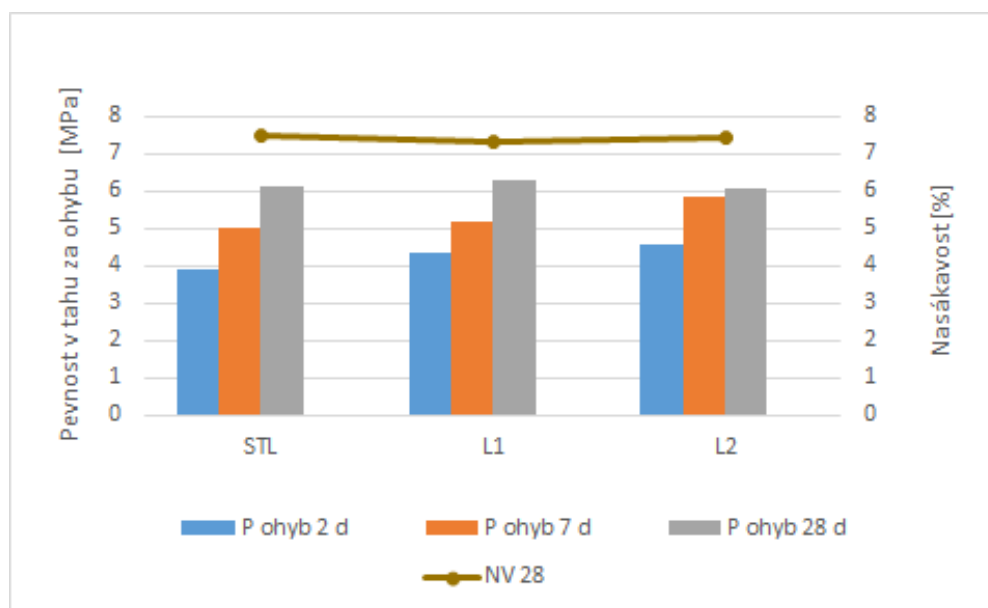
Byly ověřovány receptury litých betonů, které jsou ve výrobním programu firmy Prefa Brno a.s. používány pro výrobu betonových výrobků řady DEKOR (z prostého betonu či betonu mírně vyztuženého), které odpovídají třídě betonu C35/45 se stupněm odolnosti vlivu prostředí XC4, případně XD2 a XA1.

V rámci laboratorních a poloprovozních ověřování byly porovnávány vlastnosti betonové hmoty, která byla vyrobena dle standardní receptury (označení STL) a obsahovala plnou dávku příměsi ve formě jemně mletého vápence (JMV 8). Dále byl vyroben beton s označením L1, ve kterém dávku příměsi tvořil

v poměru 1:1 jemně mletý vápenec a jemně mletá teplárenská struska. Ve třetí receptuře betonu s označením L2 byl jemně mletý vápenec plně nahrazen jemně mletou teplárenskou struskou.

Na čerstvé betonové směsi byla stanovena konzistence zkouškou rozlitím na setřásacím stolku. Všechny receptury splňovaly konzistenci F5, což odpovídá rozlití 560-620 mm. Ze směsi betonu byla připravena zkušební tělesa – trámce o rozměrech 40×40×160 mm a krychle o hraně 100 a 150 mm (jednalo se o sady zkušebních vzorků jejichž množství bylo závislé na typu zkoušky dané vlastnosti).

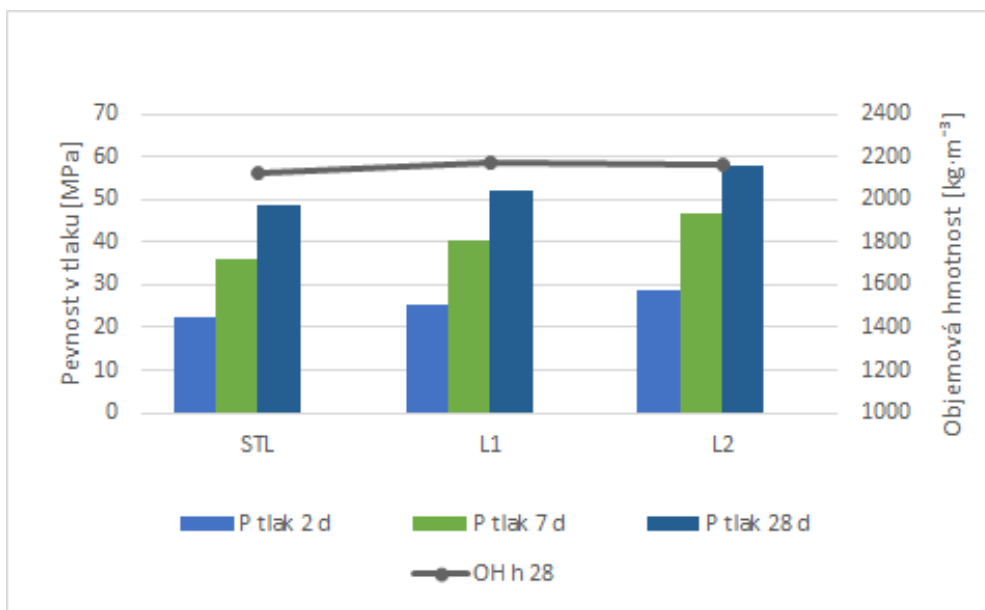
Výsledky zkoušek připravených betonových těles jsou uvedeny v následujících grafech. Z obrázku 7 je patrný pozitivní vliv náhrady jemně mletého vápence mletou struskou. U obou receptur L1 i L2 došlo k nárůstu počátečních pevností (2 dny zrání) a u receptury L2, ve které byl mletý vápenec plně nahrazen mletou teplárenskou struskou, byl pozorován výrazný nárůst pevností v tahu za ohybu po 7 dnech zrání. Po 28 dnech zrání byly zjištěny u všech receptur srovnatelné hodnoty pevností v tahu za ohybu. Nasákavost receptur byla také srovnatelná.



Obr. 7: Pevnost v tahu za ohybu litých betonů – vliv obsahu mleté teplárenské strusky na výsledné nasákavosti betonu

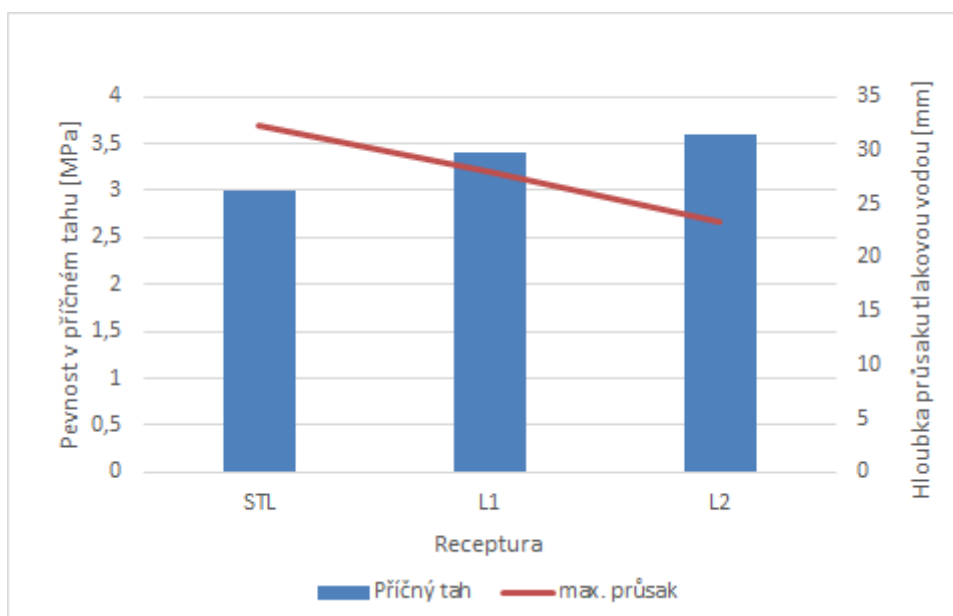
Pevnosti v tlaku ověřovaných receptur (viz obrázek 8) vykazovaly obdobný průběh. U receptur s obsahem jemně mleté teplárenské strusky ve srovnání se standardní recepturou byl patrný nárůst pevnosti ve všech sledovaných termínech zrání betonu. U receptury L2 byla pevnost po 28 dnech zrání vyšší cca o 10 MPa.

Objemová hmotnost betonů s obsahem mleté teplárenské strusky byla o 50 až 100 kg·m⁻³ vyšší než u standardní receptury.



Obr. 8: Pevnost v tlaku litých betonů – vliv obsahu mleté teplárenské strusky na výsledné objemové hmotnosti betonu

Jedním z důležitých parametrů sledovaných u finálního výrobku je vedle pevnosti v tlaku betonu také hloubka průsaku tlakovou vodou. Proto byla provedena i tato zkouška dle ČSN EN 12390-8. V grafu (obr. 9) je znázorněn pozitivní vliv náhrady jemně mletého vápence mletou struskou v betonové směsi. U receptur L1 a L2 došlo ke snížení hloubky průsaku tlakovou vodou a zároveň i zvýšení pevnosti v příčném tahu.



Obr. 9: Hloubka průsaku tlakovou vodou a pevnost v příčném tahu litých betonů

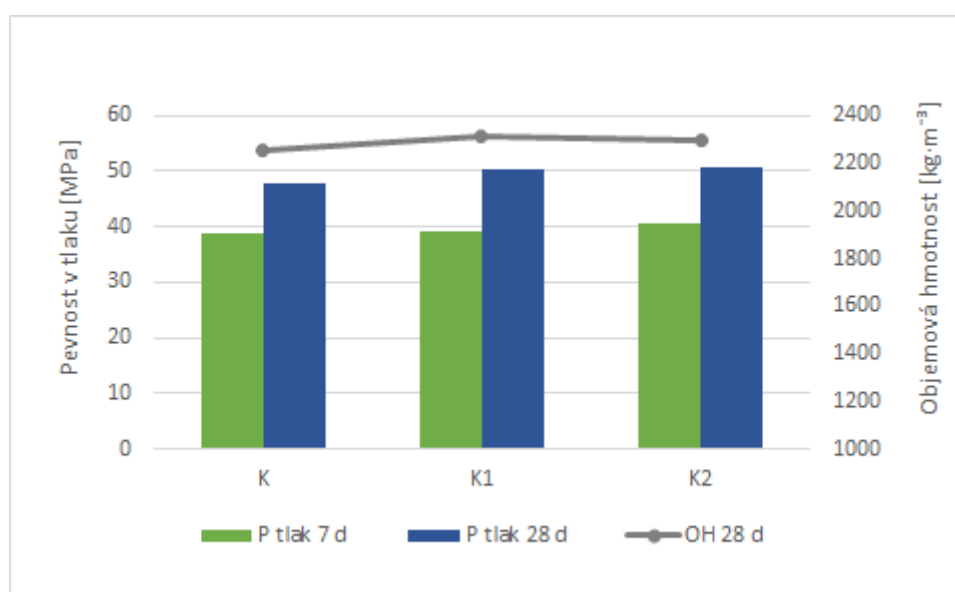
Samozhutnitelné betony

Samozhutnitelné betony (SCC) jsou v závodech Prefa Brno a.s. používány k výrobě prefabrikovaných betonových dílců pro pozemní stavby. Pro samozhutnitelné betony je nejpodstatnějším hodnotícím parametrem pevnost v tlaku vyzrálého betonu. Dle rozměrů a účelu použití betonového dílce v konstrukci je dán požadavek na pevnost, kterou má beton pro výrobu betonových dílců dosahovat. Např. pro stropní desky i panely je používán vyztužený beton pevnostní třídy C25/30, C30/37 (popř. C35/45) v závislosti na délce panelů a požadavkům projektanta na užité zatížení.

Při laboratorním a poloprovozním ověřování receptur samozhutnitelného betonu byly připraveny (obdobně jako u receptur litých betonů) tři varianty příměsí použité do betonu. Receptura s označením K byla standardní recepturou, ve které byl obsažen jako příměs jemně mletý vápenec. Dále byly připraveny receptury K1, v níž byl mletý vápenec obsažen v poměru 1:1 s jemně mletou teplárenskou struskou. V receptuře K2 byl jemně mletý vápenec 100% nahrazen mletou teplárenskou struskou.

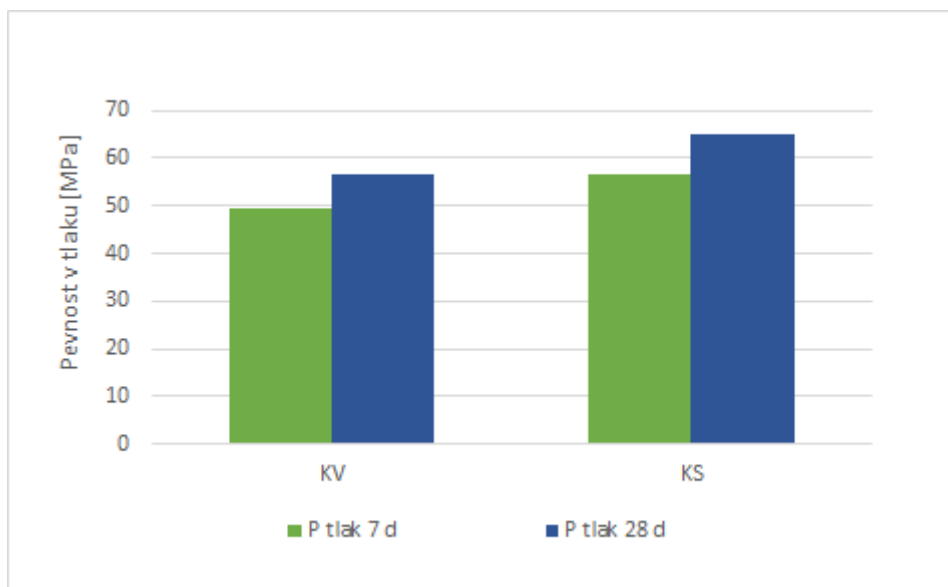
Při výrobě betonových směsí byl použit stejný vodní součinitel. Konzistence samozhutnitelných betonů byla stanovena rozlitím betonu z obráceného Abramsova kuželu. Hodnota rozlití 660 – 750 mm odpovídala konzistenci SF2. Ze směsi betonu byla připravena zkušební tělesa – trámce o rozměrech 40×40×160 mm a krychle o hraně 100 a 150 mm.

Výsledné pevnosti stanovené na zkušebních tělesech, krychlích o hraně 100 mm, při laboratorním testování jsou znázorněny na obrázku 10. Z něj je patrné, že nebyly mezi jednotlivými recepturami zaznamenány výraznější odchylky v hodnotě pevnosti v tlaku. Objemové hmotnosti receptur SCC s obsahem jemně mleté teplárenské strusky byly o cca 50 kg·m⁻³ vyšší než u standardní receptury.



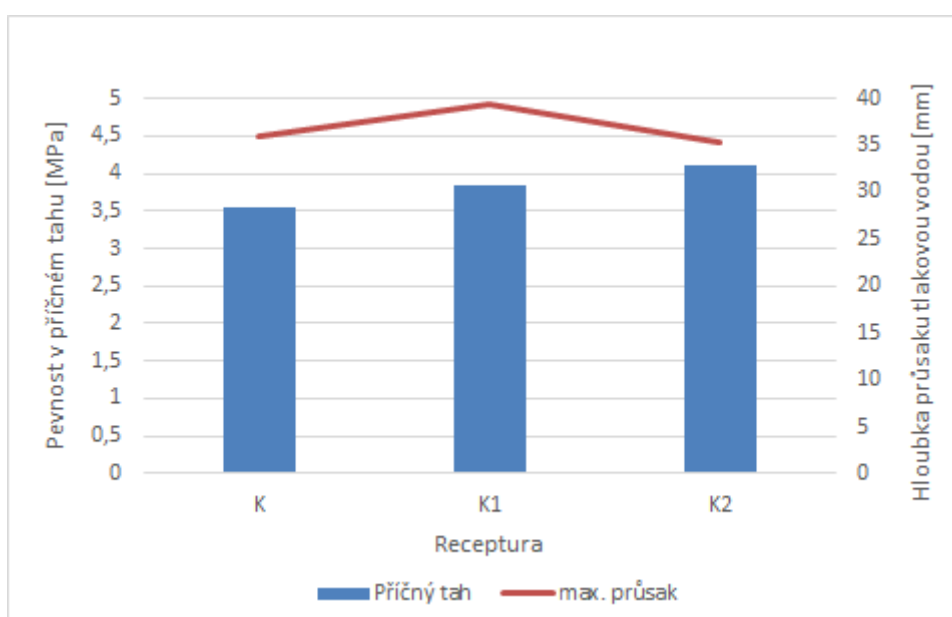
Obr. 10: Pevnost v tlaku SCC – laboratorní ověřování

Výraznějšího rozdílu pevnosti v tlaku bylo dosaženo při poloprovozní výrobě betonů v závodě firmy Prefa Brno a.s. Zde byly ověřovány dvě receptury. Receptura standardní (označená jako KV) a receptura, v níž byl plně nahrazen jemně mletý vápenec mletou teplárenskou struskou (KS). Zkouška pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech zrání byla provedena na zkušebních tělesech, krychlích, o velikosti hrany 150 mm. Na grafu (obr.11) je zřejmý nárůst pevnosti v tlaku receptury s náhradou jemně mletého vápence mletou teplárenskou struskou, a to po 7 i 28 dnech zrání. Nárůst pevnosti činí až 10 MPa.



Obr. 11: Pevnost v tlaku SCC – poloprovozní ověřování

V následujícím grafu (obr. 12) je znázorněn výsledek testování hloubky průsaku tlakovou vodou a hodnota pevnosti v příčném tahu samozhutnitelných betonů. Je patrný pozitivní vliv náhrady jemně mletého vápence mletou teplárenskou struskou v betonové směsi. U receptur K1 a K2 došlo ke zvýšení pevnosti v příčném tahu. Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou byly u všech tří receptur srovnatelné.



Obr. 12: Hloubka průsaku tlakovou vodou a pevnost v příčném tahu SCC

Závěr

Na základě předložených výsledků je možno konstatovat, že se mletá teplárenská struska v recepturách vybraných betonů osvědčila jako náhrada jemně mletého vápence.

Cena jemně mletého vápence se neustále zvyšuje, jeho dostupnost je omezená. Náhrada mletou teplárenskou struskou by mohla představovat environmentální přínos, ve smyslu úspory přírodních zdrojů.

Poděkování

*Tento článek byl vytvořen za finanční podpory TAČR v rámci řešení projektu TREND – FW 03010359
Využití mleté teplárenské strusky jako příměsi do betonu.*