

Mletá teplárenská struska a její využití pro výrobu betonových prefabrikátů

Ing. Ivana Chromková¹, Ing. Jindřich Sedlák², 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

Využití odpadních materiálů a VEP při výrobě stavebních hmot je vhodným a žádoucím způsobem úspory přírodních surovinových zdrojů. Náhradou přírodních zdrojů se zabývá i končící projekt, jehož cílem bylo ověřit využitelnost jemně mleté teplárenské strusky při výrobě betonu. Vybrané receptury používané pro výrobu betonových prefabrikátů byly modifikovány a ověřeny při laboratorních i poloprovozních zkouškách. Jemně mletá teplárenská struska se osvědčila jako náhrada jemně mletého vápence. Betony s jemně mletou teplárenskou struskou vykazovaly zlepšení sledovaných vlastností.

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

Teplárenská struska a její chemické parametry

Teplárenská struska je materiál, který vznikl jako odpad po spalování černého uhlí v elektrárně Oslavany. Po dobu fungování elektrárny byl ukládán na haldu, která je v současnosti majetkem firmy Prefa Brno a.s. Ta dlouhodobě vyvíjí snahu o materiálové využití teplárenské strusky do receptur svého výrobního sortimentu. Po úspěšném ověření využitelnosti teplárenské strusky jako částečné náhrady přírodního drobného kameniva, bylo přistoupeno k ověřování možnosti mletí teplárenské strusky a jejího použití jako příměsi do betonu.

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.

Chemické složení teplárenské strusky

Teplárenská struska je do značné míry svými vlastnostmi srovnatelná s křemičitými úlety či s křemičítým popílkem. Po chemické stránce je 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 %.

Mletí teplárenské strusky

V první etapě řešení projektu byla pro potřeby laboratorního ověřování teplárenská struska mleta v laboratorních kulových mlýnech. Při dalších etapách laboratorního i poloprovozního ověřování byla používána jako příměs do betonu mletá teplárenská struska, která byla mleta v zařízení na jemné mletí vyvíjeném ve firmě Strojírny Olšovec s.r.o.

Vývoj zařízení byl postupný. Po provedených dílčích zkouškách mletí byly vyhodnocovány výsledky účinnosti mletí a na jejich základě docházelo k následným úpravám mlecího zařízení. Pro funkční plochy byl zvolen materiál proti vysokému opotřebení. Teplárenská struska z Oslavan má tvrdost zrn v rozmezí od 6 do 7,5 stupně Mohsovy stupnice. Z toho vyplývá, že při mechanické úpravě teplárenské strusky

může docházet k vysokému brusnému opotřebení způsobenému přítomností křemičitých až sklovitých částic obsažených v teplárenské strusce.

Na základě úprav mlecího zařízení a postupném odstranění nedostatků vznikl prototyp mlecího zařízení.

Laboratorní a poloprovozní ověřování mleté teplárenské strusky jako příměsi do vybraných receptur 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 (jemně mletého vápence) mletou teplárenskou struskou. U všech zkoušených receptur byly sledovány pevnostní charakteristiky v závislosti na čase a porovnávány se standardními recepturami.

K ověřování byla teplárenska struska upravena mletím na jemnost odpovídající měrnému povrchu $225 \text{ m}^2/\text{kg}$. Měrná hmotnost takto připravené strusky byla 2635 kg/m^3 . Měrná hmotnost cementu CEM I 42,5R, který byl používán ke zkouškám jako cement referenční, byla 3095 kg/m^3 .

Sledování optimálního náhrady JMV mletou teplárenskou struskou

V roce 2022 proběhla série laboratorních i poloprovozních zkoušek, jejichž cílem bylo stanovit optimální množství mleté teplárenské strusky v recepturách vybraných betonových směsí. Ověřována byla poloviční a celková náhrada standardně používané příměsi JMV 8. Jednalo se konkrétně o testování a hodnocení směsí, které obsahovaly cement, kamenivo, ověřovanou příměs, vodu a plastifikátor. Jiné přísady použity nebyly.

Lité betony

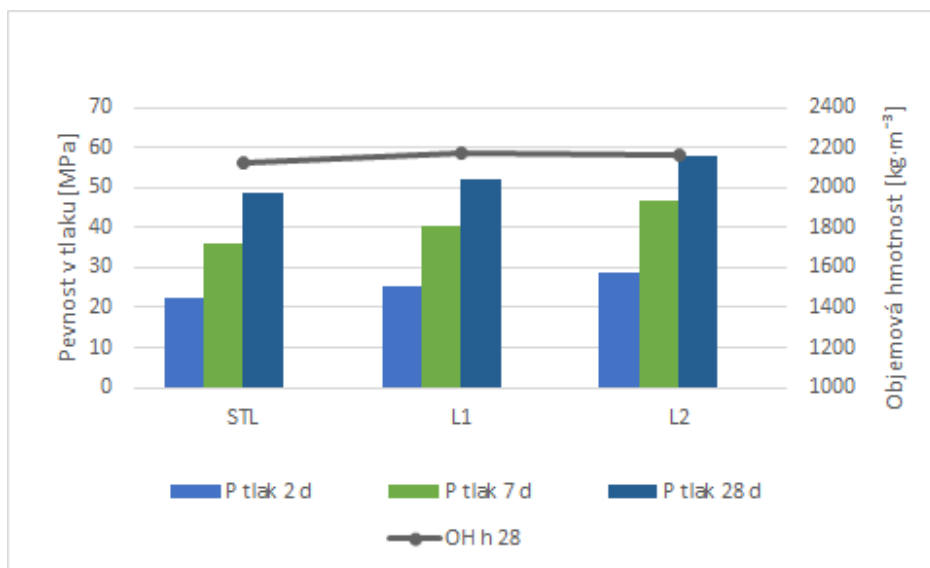
Byly ověřovány receptury litých betonů, které jsou ve výrobním programu firmy Prefa Brno a.s. používány pro výrobu betonových výrobků řady DEKOR (z prostého betonu či betonu mírně vyztuženého), které odpovídají třídě betonu C35/45 se stupněm odolnosti vlivu prostředí XC4, případně XD2 a XA1.

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 rozliti 560-620 mm. Ze směsi betonu byla připravena zkušební tělesa – trámce o rozměrech $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 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 směsí byly příznivé ve smyslu náhrady jemně mletého vápence mletou struskou. U obou receptur obsahujících mletou teplárenskou strusku (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. Pevnosti v tlaku ověřovaných receptur vykazovaly obdobný průběh (viz Obr. 1). U receptur s obsahem jemně mleté teplárenské strusky ve srovnání se standardní recepturou byl patrný nárůst pevností ve všech sledovaných termínech zrání betonu. U receptury L2 byla pevnost po 28 dnech zrání vyšší cca o 10 MPa.

Nasákavost receptur byla srovnatelná. Objemová hmotnost betonů s obsahem mleté teplárenské strusky byla o 50 až $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ vyšší než u standardní receptury.

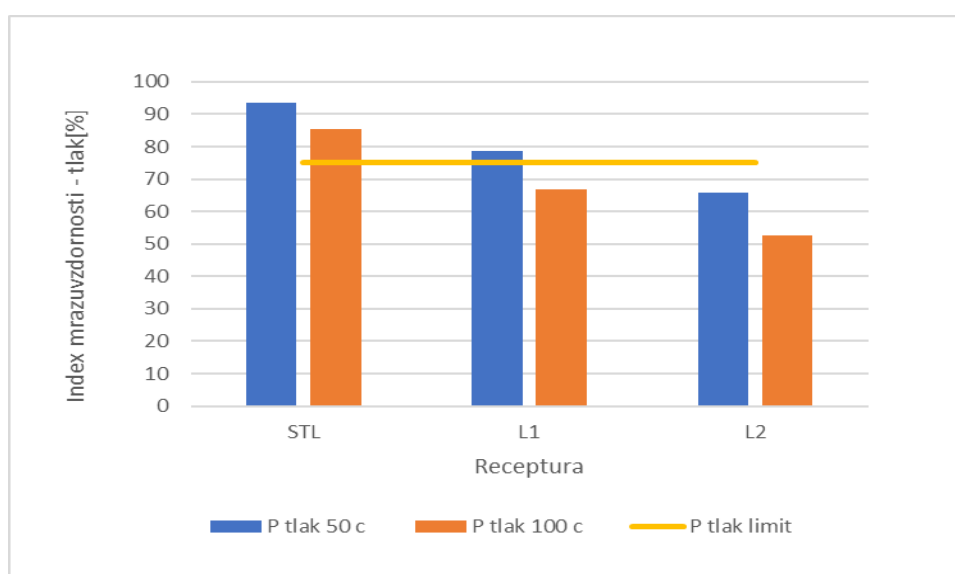


Obr. 1: Pevnost v tlaku litých betonů – vliv obsahu mleté teplárenské strusky na výsledné objemové hmotnosti betonu

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. Z provedených zkoušek vyplynul pozitivní vliv náhrady jemně mletého vápence mletou struskou v betonové směsi. Receptury L1 a L2 vykazovaly vyšší pevnosti v příčném tahu a současně snížení hloubky průsaku tlakovou vodou ve srovnání se standardní recepturou.

Po téměř ideálních výsledcích zjištěných u směsí litých betonů s náhradou vápence (receptury L1 a L2) při normových podmínkách zrání však byly zaznamenány nepříznivé výsledky zkoušek trvanlivostních – stanovení mrazuvzdornosti, odolnosti proti CHRL. V případě zkoušky CHRL došlo u receptur L1 a L2 k výraznějšímu odrolování povrchu, než tomu bylo u referenčního betonu – receptury STL.

Zkouškou mrazuvzdornosti bylo zjištěno, že receptury s obsahem mleté teplárenské strusky mají výrazně nižší odolnost proti střídavému působení mrazu ve srovnání se standardní recepturou, ve které byl jako příměs použit JMV 8. Na Obr. 2 je znázorněn pokles indexu mrazuvzdornosti pod požadovanou limitní hodnotu.



Obr. 2: Index mrazuvzdornosti litých betonů

Samozhutnitelné betony

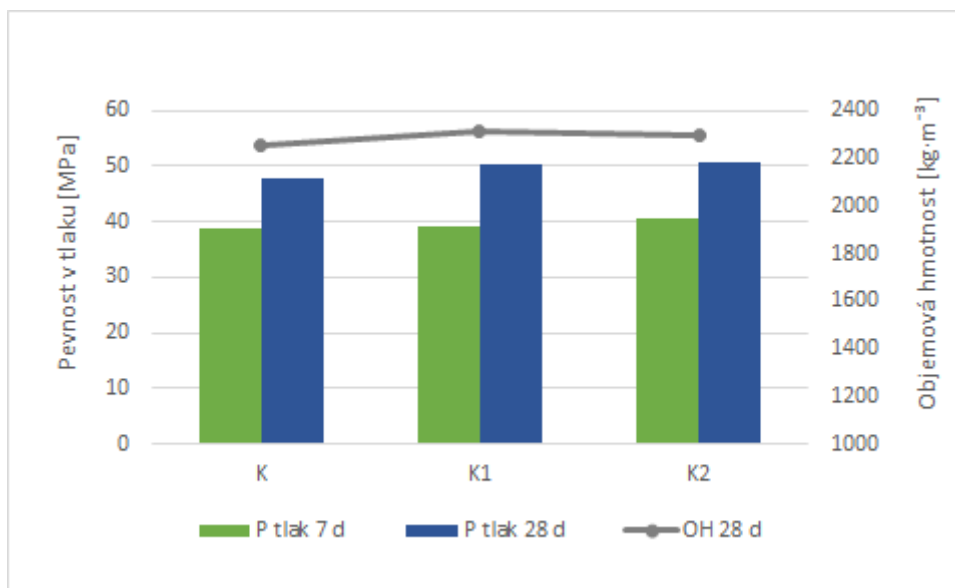
Samozhutnitelné betony (SCC) jsou v závodech Prefa Brno a.s. používány k výrobě prefabrikovaných betonových dílců pro pozemní stavby. Pro samozhutnitelné betony je nejpodstatnějším hodnotícím parametrem pevnost v tlaku vyzrálého betonu. Dle rozměrů a účelu použití betonového dílce v konstrukci je dán 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 rozlité 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.

Na základě zkoušek pevnosti v tlaku (viz Obr. 3) stanovených na zkušebních tělesech bylo možno konstatovat, že nebyly mezi jednotlivými recepturami zaznamenány výraznější odchylky. Objemové hmotnosti receptur SCC s obsahem jemně mleté teplárenské strusky byly o cca 50 kg $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vyšší než u standardní receptury.

Z provedených zkoušek pevnosti v příčném tahu byl patrný pozitivní vliv náhrady jemně mletého vápence mletou teplárenskou struskou v betonové směsi. Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou byly u všech tří receptur srovnatelné.

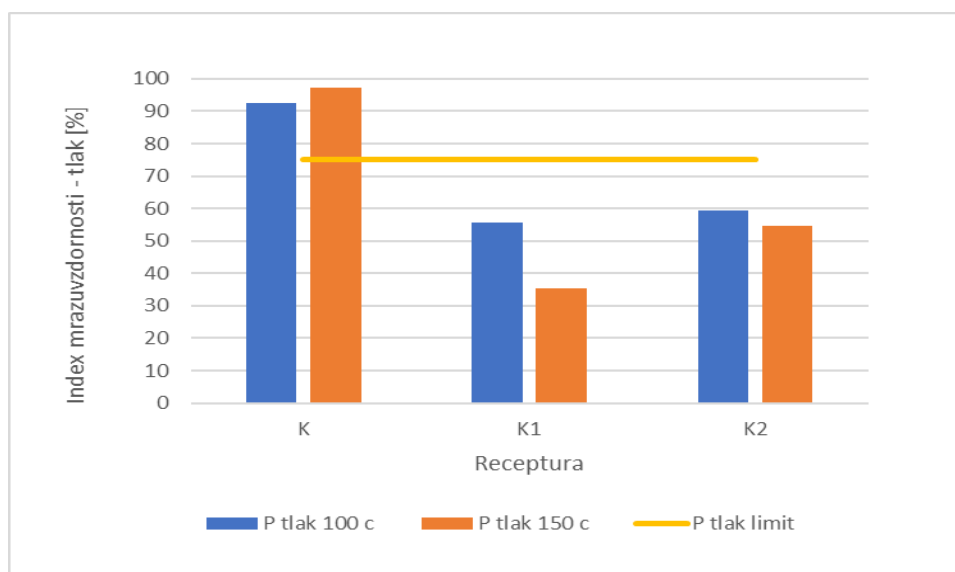


Obr. 3: Pevnost v tlaku SCC betonů – vliv obsahu mleté teplárenské strusky na výsledné objemové hmotnosti betonu

Stejně jako u testovaných litých betonů byly pozorovány rozdílné výsledky pevnostních charakteristik zkušebních těles uložených ve vlhkém prostředí (normové podmínky zrání) a výsledky zkoušek trvanlivosti, konkrétně mrazuvzdornosti a odolnosti proti působení CHRL.

Při zkoušce odolnosti proti působení CHRL byly zaznamenány vysoké hodnoty odrolení povrchové vrstvy zkušebních těles betonů s obsahem mleté teplárenské strusky. Také při zkoušce mrazuvzdornosti

bylo pozorováno snížení odolnosti proti střídavému působení mrazu. To dokládá graf (Obr. 4) indexu mrazuvzdornosti, na němž je znázorněn výrazný pokles pod limitní hodnoty obou receptury obsahujících mletou teplárenskou strusku.



Obr. 4: Index mrazuvzdornosti SCC betonů

Průběžné hodnocení

Z výsledků všech zkoušek první etapy vyplynulo, že použití mleté teplárenské strusky jako náhrady běžně používaného typu příměsi JMV8 je z pohledu fyzikálně-mechanických vlastností vhodné pro betonové směsi a výrobky, které nebudou namáhány působením střídavého mrazu a rozmrazování a nebudou vystaveny chemickým rozmrazovacím látkám.

Ověření vlivu provzdušnění směsi

Provzdušnění betonu

Pro získání betonů požadovaných vlastností se při výrobě betonu používá řada různých typů přísad. Provzdušněný beton se používá v mnoha stavebních konstrukcích. Používají se u betonů vystavených účinkům mrazu a CHRL (chemické rozmrazovací látky). K výrobě provzdušněného betonu se používají chemické přísady – provzdušňovače. Jsou to látky, které vytvářejí v čerstvém betonu velké množství uzavřených vzduchových pórů. Provzdušněním vytvořené vzduchové póry jsou prostorem pro zvětšující se objem krystalů ledu v mrazem namáhaných betonech. Póry snižují hydrostatický tlak v pórovité struktuře. Velikost pórů se pohybuje od 0,05 do 0,3 mm.

Dávkování provzdušňovačů závisí na požadovaném stupni provzdušnění. Obsah vzduchu závisí na dávce přísady, druhu a množství cementu, kamenivu, konzistenci, teplotě a době míchání.

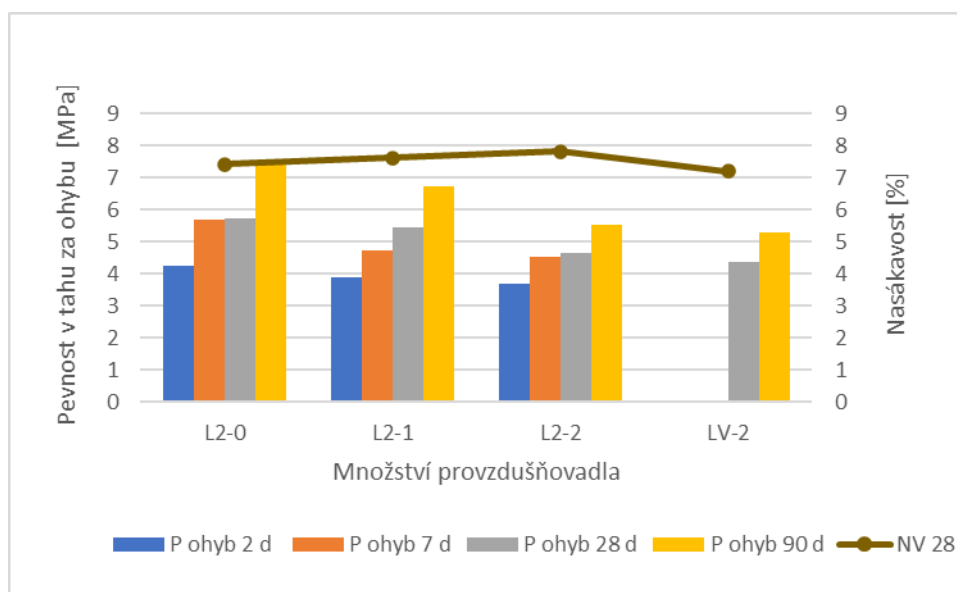
Optimalizace betonových směsí

Na základě výsledků laboratorních i poloprovozních zkoušek provedených v roce 2022 (a popsanych v předchozím textu) byly receptury litých i samozhutnitelných betonů upraveny. K dalšímu ověřování byly vybrány betonové směsi se 100% náhradou jemně mletého vápence mletou teplárenskou struskou. Šlo tedy o úpravu receptur L2 a K2. Stěžejní pro tento směr ověřování bylo posoudit vhodnost provzdušnění betonové směsi a stanovit optimální množství provzdušňovací přísady. Cílem bylo získat betonové směsi vhodných parametrů s ohledem na požadavky kladené na výsledné betonové výrobky.

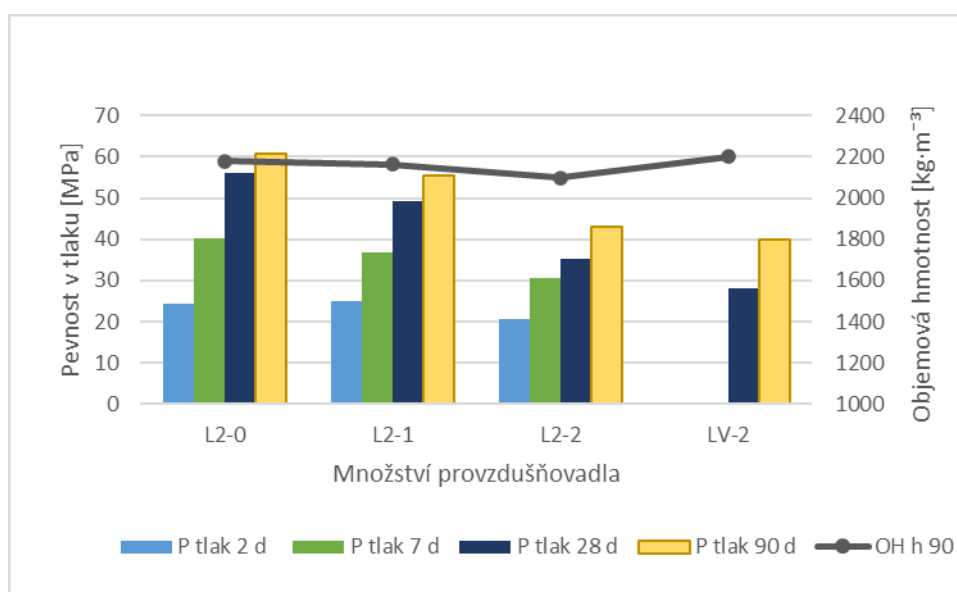
Lité betony

Do receptury L2 byla dávkována provzdušňovací přísada. Typ provzdušňovací přísady používaný pro výrobu litých betonů ve firmě Prefa Brno byl dle Technického listu dávkován na hmotnost cementu, resp. k celkové hmotnosti jemně mletých složek (cement + jemně mletá teplárenská struska). Doporučené dávkování výrobce je 2–15 g na 1 kg cementu. Dávkování bylo zvoleno 1 a 2 g. Jako srovnávací byla zvolena receptura L2 bez provzdušnění a současně receptura označená jako LV obsahující jako příměs vápenec (100 %), ve které byla použita provzdušňovací přísada 2 g na hmotnost jemných složek.

Při testování takto připravených betonových směsí bylo zjištěno, že se zvyšující se dávkou provzdušňující přísady došlo ke snížení pevnostních charakteristik ve srovnání s recepturou L2-0. Pevnosti v tahu za ohybu (Obr. 5) i pevnosti v tlaku (Obr.6) provzdušněných betonů s obsahem mleté teplárenské strusky byly i přes to vyšší než pevnosti betonu LV-2.



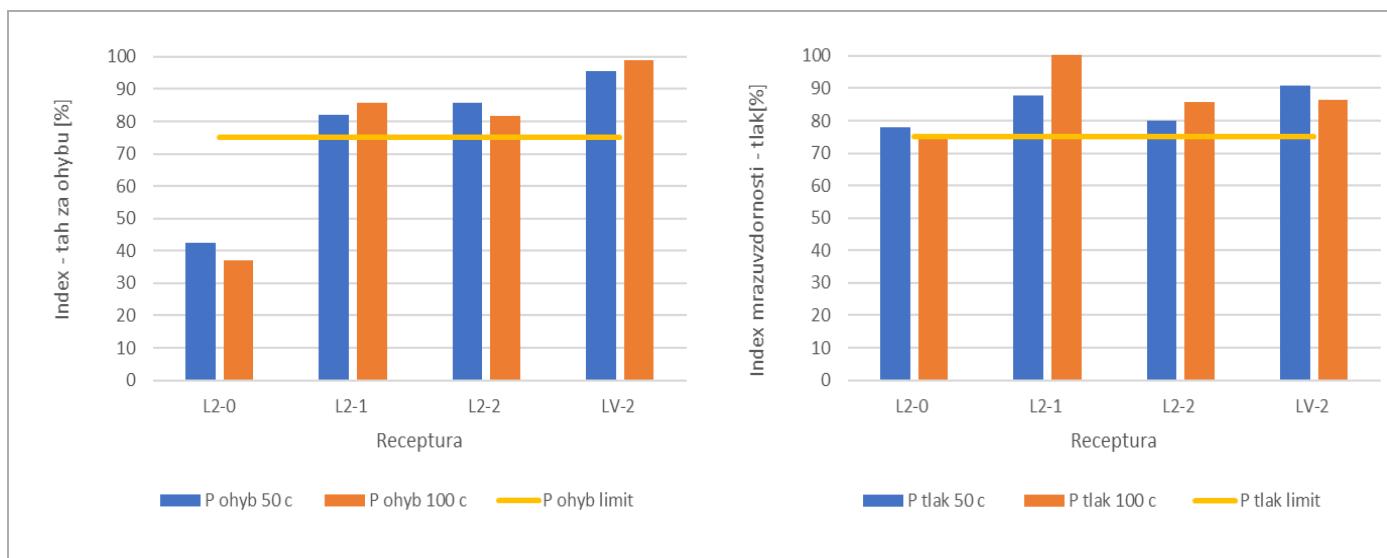
Obr. 5: Pevnost v tahu za ohybu litých betonů s provzdušňovací přísadou – vliv obsahu mleté teplárenské strusky na výsledné nasákavosti betonu



Obr. 6: Pevnost v tlaku litých betonů s provzdušňovací přísadou – vliv obsahu na výsledné objemové hmotnosti betonu

Přídavek provzdušňovací přísady měl pozitivní vliv na odolnost proti působení CHRL. Receptura litého betonu s mletou teplárenskou struskou bez provzdušňující přísady (L2-0) stejně jako v první etapě ověřování vykazovala výrazné odrolování povrchu, již po 75 cyklech byl odpad 30 g a po 100 cyklech už bylo možno hovořit o rozpadu zkušebního tělesa. Receptury L2-1 a L2-2 s provzdušňující přísadou měly po 150 cyklech působení CHRL odpad okolo 10 g.

Také výsledky zkoušky mrazuvzdornosti byly z pohledu uplatnitelnosti mleté teplárenské strusky jako náhrady jemně mletého vápence velice příznivé. Jak je patrné z grafů (Obr. 7) indexy mrazuvzdornosti provzdušněných betonů splňovaly požadované parametry.



Obr. 7: Index mrazuvzdornosti litých betonů - vliv míry provzdušnění

Poznámka: Na Obr. 7 jsou uvedeny grafy indexu mrazuvzdornosti, které zohledňují pevnosti v tahu za ohybu i pevnost v tlaku zkušebních těles (vlevo index mrazuvzdornosti vypočítaný z pevností v tahu za ohybu, vpravo index mrazuvzdornosti vypočítaný z pevností v tlaku)

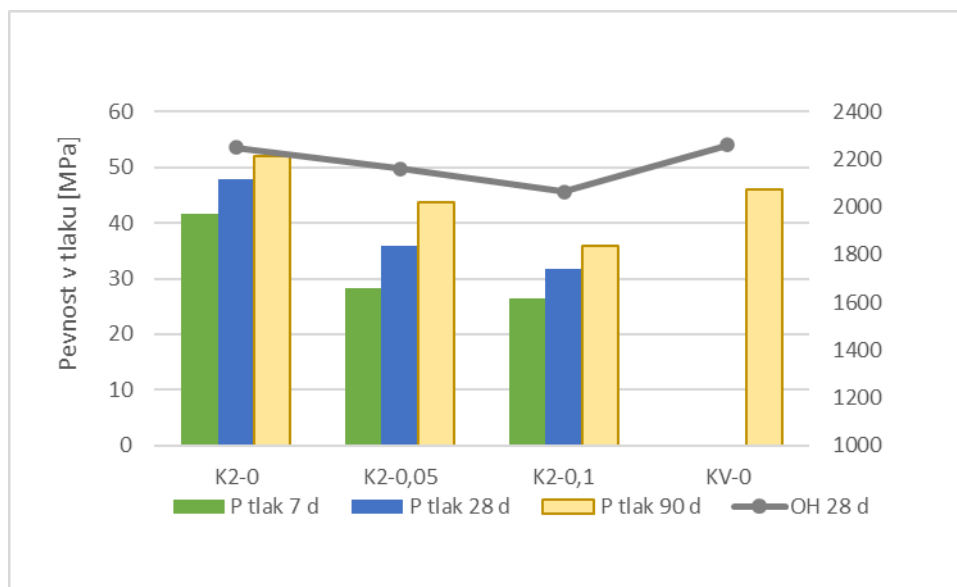
Porovnáním výsledků (Obr. 6) litých betonů s náhradou vápence jemně mletou teplárenskou struskou při normových podmínkách zrání a výsledků po zkoušce mrazuvzdornosti (Obr. 7) je patrné, že provzdušnění je vhodným způsobem zvýšení užitných vlastností litých betonových směsí. Z ekonomického hlediska se jako optimální jeví dávkování provzdušňovací přísady 1 g na 1 kg jemných složek betonu (cement + příměs).

Betony SCC

Pro přípravu SCC byla použita provzdušňující přísada, jejíž výchozí dávkování pro zkoušky se doporučuje 0,03 % z hmotnosti cementu. Pro ověřování jsme zvolili dávkování 0,05 a 0,1 % z hmotnosti cementu.

Jako srovnávací byla zvolena receptura K2 bez provzdušnění a současně receptura označená jako KV obsahující jako příměs vápenec (100 %), která také provzdušněna nebyla.

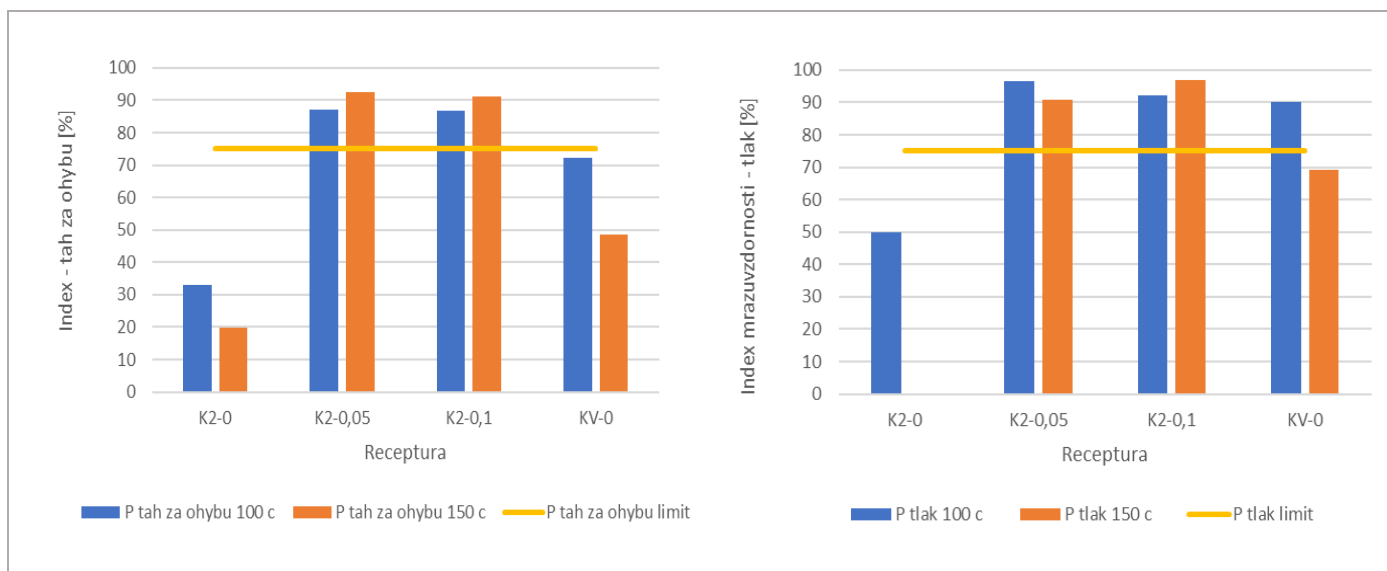
Testováním takto připravených betonových směsí byl, podobně jako u připravených litých betonů, pozorován pokles pevnosti u provzdušněných betonů (viz Obr. 8).



Obr. 8: Pevnost v tlaku SCC betonů s provzdušňovací přísadou – vliv obsahu na výsledné objemové hmotnosti betonu

Stejně jako u receptur litých betonů vykazoval provzdušněný SCC beton s obsahem mleté teplárenské strusky jako 100% náhrady jemně mletého vápence výbornou odolnost proti působení CHRL. Receptura K2 bez provzdušnění vykazovala již po 25 cyklech výraznější odrolování povrchu, konkrétně 12 g. Receptury SCC s provzdušňující přísadou odolaly až 150 cyklům, kdy vykazovaly odrolení max. 8 g.

Pozitivní vliv provzdušnění SCC betonu je patrný i z výsledků zkoušek mrazuvzdornosti (Obr.9).



Obr. 9: Index mrazuvzdornosti SCC betonů - vliv míry provzdušnění

Závěr

V průběhu řešení projektu byla prokázána možnost náhrady příměsí do betonu JMV8 jemně mletou teplárenskou struskou. Dále bylo ověřeno, že provzdušněním betonových směsí došlo ke zlepšení odolnosti betonů vůči mrazu i chemickým rozmrazovacím látkám. Lze tedy konstatovat, že je mletá teplárenská struska vhodná pro použití jako příměs do betonových směsí používaných pro výrobu prefabrikovaných výrobků v závodech firmy Prefa Brno a.s.