

BETON



JSME ČASOPIS O BETONU,

jediný v České republice
a na Slovensku.

Díky podpoře svazů si můžeme
dovolit být nezávislí.

Cementobetonový kryt na silnici mezi městy Rohožník a Malacký – aplikace CEM II/B-S (foto: archiv TSÚS Bratislava)

VYDÁVÁNÍ ČASOPISU PODPORUJÍ

**SVAZ VÝROBCŮ
CÉMENTU ČR**

Svaz výrobců cementu ČR
K Cementárně 1261, 153 00 Praha 5
tel.: 257 811 797
e-mail: svcement@svcement.cz
www.svcement.cz

**SVAZ VÝROBCŮ
BETONU ČR**

Svaz výrobců betonu ČR
K Cementárně 1261, 153 00 Praha 5
mob.: 602 281 066
e-mail: svb@svb.cz
www.svb.cz

CBS

Česká betonářská
společnost ČSSI
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4
mob.: 775 124 100
e-mail: cbsbeton@cbsbeton.eu
www.cbsbeton.eu

SSBK

Sdružení pro sanace
betonových konstrukcí
Veveří 331/95, 602 00 Brno
mob.: 604 158 023
e-mail: ssbk@email.cz
www.ssbk.eu

VYDAVATELSTVÍ ŘÍDÍ Ing. Vladimír Veselý **ŠÉFREDAKTORKA** Ing. Lucie Šimečková **REDAKTORKA** Mgr. Barbora Sedlářová
REDAKČNÍ RADA prof. György L. Balázs, Vesselin Barliev, prof. Peter J. M. Bartoš, prof. Ing. Zdeněk P. Bažant, Ph.D., dr. h. c.,
prof. Ing. Vladimír Benko, Ph.D., prof. Francesco Biasioli, prof. Ing. Juraj Bilčík, Ph.D., doc. Ing. Jiří Dohnálek, CSc., prof. Ing. Ludovít Fillo,
Ph.D., Ing. Jan Gemrich, prof. Ing. Petr Hájek, CSc. (předseda), prof. Ing. Leonard Hobst, CSc. (místopředseda), Ing. Adam Hubáček, Ph.D.,
Ing. arch. Jitka Jadrníčková, Ing. Milan Kalný, prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng., prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D., doc. Ing. arch. Patrik
Kotas, Ing. Milada Mazurová, prof. Ing. Martin Moravčík, Ph.D., doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D., Ing. Stanislava Rollová, Ing. arch. Jiří Šrámek,
Ing. Michal Števula, Ph.D., prof. Ing. RNDr. Petr Štěpánek, CSc., Ing. Vladimír Veselý, prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.



CO JE TO VLASTNĚ TA TECHNOLOGIE?

Podíváme-li se na stavebnictví jako proces od jeho začátku až po uvedení díla do provozu, najdeme v něm řadu činností plynule na sebe navazujících či v některých fázích se nezbytně prolínajících. V tomto procesu působí celá řada osob či subjektů, které celý stavební proces iniciují a realizují.

Na začátku je investor s prostředky, za které hodlá realizovat svoji vizi. Často se obrátí na architekta, který dá jeho vizi konkrétní vzhled či výraz. Následuje projektant, který dá ve spolupráci se statikem zamýšlenému dílu podobu konkrétního konstrukčního řešení. To samozřejmě musí konzultovat s investorem a architektem. Přitom je třeba často hledat kompromisní řešení, která umožní realizovat původní záměr tak, aby stavba byla nejen funkční a stabilní, ale i reálně proveditelná. Když je projekt hotov, zažádá investor o stavební povolení a vyhlásí výběrové řízení na dodavatele stavby. Proces povolování staveb je často provázen podmínkami prokázat dopad stavby či jejího provozu na životní prostředí, momentálně reprezentovaný např. výpočtem uhlíkové stopy použitých materiálů. Podmínky pro provedení stavby včetně environmentálních kritérií jsou samozřejmě součástí poptávky. Dodavatelé se snaží vypracovat cenovou nabídku na realizaci stavby alespoň tak, aby při jejím předání skončili s nějakým finančním profitem.

V této chvíli je vhodné, aby nastoupili technologové provádění staveb, kteří musí posoudit stavbu s ohledem na její proveditelnost, a to včetně environmentálních dopadů. Prostudují výkresy a výpočty včetně uhlíkových stop, posoudí možnosti staveniště a jeho okolí. Nezřídka se musí vracet zpět a projednávat možnosti potřebných úprav konstrukce s investory, architekty či projektanty. Následně vypracují plán postupu výstavby, z něhož se mnohdy zjistí, že vítězná nabídnutá cena stavby se může poněkud lišit od reálné. Je-li nalezena konečná shoda, mohou se všichni pustit do pilné práce. To je technologie? Ne tak úplně.

Je totiž ještě potřeba najít dodavatele materiálů s nejnižší cenou a minimálním dopadem na životní prostředí. V našem konkrétním případě jde o beton. A zde nastupují technologové materiálu, tedy technologové dodavatelů betonu. Ti v současné době řeší nejen vlastní složení betonu, ale složení betonu s nulovou nebo nepatrnou uhlíkovou stopou. Cest k výsledku je řada. Lze např. použít recyklované kamenivo, jehož dostupnost je však prozatím omezena jak kvalitativně, tak kvantitativně. Mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem jsou navíc ještě tak trochu záhadou s ohledem na požadavky standardů pro navrhování betonových konstrukcí. Další cestou je použití stávajících a nově zaváděných druhů směsných cementů, jejichž dostupnost je prozatím omezená a o následné trvanlivosti betonu z nich vyrobeného toho ještě mnoho nevíme. Nakonec se však za použití různých vybraných výpočetních metod a součinitelů podaří většinou spočítat složení betonu tak, aby se do něj dostalo co možná nejmenší množství uhlíku. Nyní si můžeme konečně odpovědět na úvodní otázku.

Technologie je nauka, dovednost či schopnost vědět, jak a z čeho se stavba postaví. Bez technologa, stejně jako bez investora, architekta, projektanta, statika, dodavatele a dalších by se stavby jen těžko realizovaly.

*Ing. Vladimír Veselý
Svaz výrobců betonu ČR*

ÚVODNÍK

- 1 CO JE TO VLASTNĚ TA TECHNOLOGIE? / Vladimír Veselý

MATERIÁLY A TECHNOLOGIE

UHPC

- 4 VYUŽITÍ UHPC PŘI REKONSTRUKCI BARRANDOVSKÉHO MOSTU V PRAZE / Lukáš Vráblík, Robert Coufal, Jan L. Víték

fib MODEL CODE 2020

- 10 PRINCIPY UDRŽITELNOSTI V NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ A JEJICH IMPLEMENTACE V fib MODEL CODE 2020 / Petr Hájek

KAMENIVO

- 14 OPĚTOVNÉ VYUŽITÍ STAVEBNÍHO A DEMOLIČNÍHO ODPADU JAKO RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU / Karel Hurtig, Milan Rydval, Jiří Kolísko
- 20 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM / Zdeněk Hlavsa
- 25 POKUSNÁ BETONÁŽ VRTANÝCH PILOT Z BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM / Zdeněk Hlavsa, Robert Coufal, Jan Kubr, Jan Šperger
- 28 MOŽNOSTI NÁHRADY PŘÍRODNÍHO DROBNÉHO TĚŽENÉHO KAMENIVA V BETONU RECYKLOVANÝM KAMENIVEM / Tereza Pavlů, Kristina Fořtová, Jan Pešta, Jakub Řepka, Tomáš Vlach

CEMENT

- 32 NOVÉ DRUHY SMĚSNÝCH CEMENTŮ A JEJICH IMPLEMENTACE DO NOREM PRO BETON / Jan Gemrich, Vladimír Veselý

BETONOVÉ VOZOVKY

- 38 ZKUŠENOSTI Z MODERNIZACE DÁLNIČNÍ D1 Z POHLEDU ŘEDITELSTVÍ SILNIC A DÁLNIC ČR / Jiří Hlavatý
- 42 WHITETOPPING A ULTRATENKÝ WHITETOPPING V ČR / Bohuslav Slánský, Ladislav Vysloužil
- 48 VÝSLEDKY SKÚMANIA VHODNOSTI ZMESNÝCH CEMENTOV NA POUŽITIE V CEMENTOBETÓNOVÝCH KRYTOCH / Michal Bačuvčík, Lukáš Húlek, Michal Cápaj, Ivan Janotka



- 53 ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ OMEZENÍM VLVIVU ALKALICKO-KŘEMIČITÉ REAKCE / Tomáš Táborský, Kateřina Jiroušková
- 58 RYCHLETVRDNOUČÍ BETON PRO SANACI CEMENTOBETONOVÝCH PLOCH / Dogaç Özsar, Felicia Nägele
- 62 VLVIV HYDRATACE A VYSYCHÁNÍ NA VZNIK TRHLIN V CEMENTOBETONOVÝCH KRYTECH / Vít Šmilauer, Jakub Veselý, Bohuslav Slánský

VĚDA A VÝZKUM

- 68 VLVIV ORGANICKÝCH VLÁKEN NA POŽÁRNÍ ODOLNOST BETONU / Jan Klobása, Martin Sedlmajer, Rudolf Hela

SANACE A REKONSTRUKCE

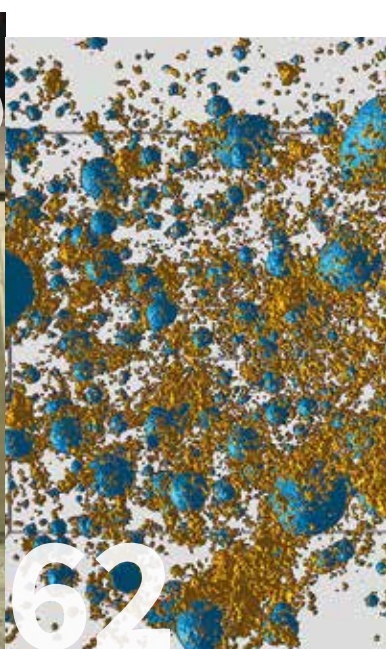
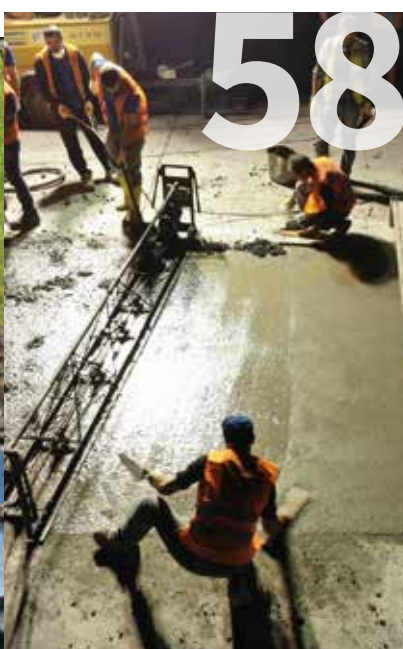
- 72 TVORBA REPLIKY ZÁBRADELNÍ VÝPLNĚ Z PŘEDSÁDKOVÉHO BETONU / Aleš Hvízdal, David Čítek, Vítězslav Vacek, Petr Tej
- 76 RESTAUROVÁNÍ DROBNÝCH DEFECTŮ NA POVRŠÍCH Z PŘEDSÁDKOVÉHO BETONU / Josef Červinka, Aleš Hvízdal, Petr Tej, Michael Gabriel

AKTUALITY

- 9 KONFERENCE TECHNOLOGIE A PROVÁDĚNÍ 2023 / Vladimír Veselý

INZERCE

- 19 Školení NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ PODLE NOVÉ GENERACE EUROKÓDŮ 31 Konference MODERNÍ BETONY A KOMPOZITY 36 Konference ICBMPT2023 37 KONEKO MARKETING 41 POHLCON 47 Školení BETON – POSTUP PŘI OZNAMOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH SMĚSÍ DLE NAŘÍZENÍ EP A RADY (ES) 1272/2008 CLP, PŘÍLOHA VIII 47 RECOC 52 REDROCK 57 Seminář VÁPNO, CEMENT, EKOLOGIE 67 eBETON.CZ 67 DOKA 71 BETON UNIVERSITY 75 NEULANDT / MOBILNÍ TOVÁRNA NA PREFABRIKOVANÉ DOMY POPRVÉ NASAZENA NA POBŘEŽÍ SLONOVINY / Radek Syka 80 BETOTECH 80 PERI 3. strana obálky VANDEX 4. strana obálky TBG METROSTAV



Časopis je zařazen na Seznam recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v České republice schválený Radou pro výzkum a vývoj. Vydávání povoleno Ministerstvem kultury ČR pod číslem MK ČR E-11157 ISSN 1213-3116. Podávání novinových zásilek povoleno Českou poštou, s. p., OZ Střední Čechy, Praha 1, čj. 704/2000 ze dne 23. 11. 2000. Autoři odpovídají za původnost příspěvků a jsou povinni respektovat autorská práva třetích stran. Označené příspěvky byly lektorovány.

FOTOGRAFIE NA TITULNÍ STRANĚ Betony s různými typy kameniv | betonový recyklát (foto: archiv Kloknerova ústavu ČVUT v Praze)

PHOTOGRAPH ON THE FRONT PAGE Concretes with different types of aggregates | recycled concrete aggregate (photo: archive of the Klokner Institute of CTU in Prague)



1

VYUŽITÍ UHPC PŘI REKONSTRUKCI BARRANDOVSKÉHO MOSTU V PRAZE

Lukáš Vráblík, Robert Coufal, Jan L. Vítek

Článek popisuje využití UHPC při rekonstrukci Barrandovského mostu v Praze. Jsou popsány základní aspekty celého procesu rekonstrukce této významné mostní konstrukce a detailně pak návrh a realizace vyrovnávací ztužující vrstvy UHPC. Na závěr je realizace této metody kriticky diskutována a jsou navrhovány úpravy pro její použití v dalších etapách rekonstrukce mostu.

APPLICATION OF UHPC IN RECONSTRUCTION OF THE BARRANDOV BRIDGE IN PRAGUE

The paper describes the application of UHPC in the reconstruction of the Barrandov Bridge in Prague. It describes the basic aspects of the entire reconstruction process of this important bridge structure and then details the design and implementation of the UHPC levelling stiffening layer. Finally, a critical discussion of this method is made and modifications of its application for the next stages of the bridge reconstruction are described.

V roce 2022 byla započata dlouhodobě připravovaná rekonstrukce dopravně nejvytíženějšího mostu v České republice. Po Barrandovském mostě projede denně více než 140 000 vozidel, je to nejvýznamnější dopravní tepna nejen v Praze, ale i v celé České republice. Most je v provozu od roku 1983, kdy byla spuštěna jeho jižní část, v roce 1988 pak byla otevřena část severní. Most byl dlouhou dobu součástí tranzitní komunikace plnící funkci základního dálničního průtahu Prahou a zároveň díky koncepci dálniční sítě v ČR i celorepublikového tranzitu. (obr. 1)

Za 40 let provozu mostu došlo samozřejmě k očekávanému opotřebení a vlivem extrémní dopravní zátěže

i k poškození některých částí mostní konstrukce. V roce 2018 bylo rozhodnuto o započítí přípravných projekčních a průzkumných prací, které finalizovaly dokončením zadávací dokumentace, na jejímž základě byl v roce 2022 vybrán generální dodavatel stavby.

Rekonstrukce mostu

Samotná rekonstrukce mostu byla rozdělena do dvou základních částí.

V první části, která byla realizována v období 2020 až 2021, byla provedena sanace mostních pilířů. Práce na rekonstrukci spodní stavby nevyvolaly žádná významná dopravní opatření a zůstaly tak veřejnosti z velké části skryty.

V druhé části (rozdělné do čtyř etap během čtyř let) je pak prováděna rekonstrukce a oprava samotné nosné konstrukce mostu. Postupuje se směrem od jihu k severu. Jako první se tak v roce 2022 realizovala oprava jižní části jižního mostu. Následovat bude v roce 2023 severní část jižního mostu, v roce 2024 severní část severního mostu a ve finále pak v roce 2025 jižní část severního mostu. (obr. 2)

Předmět rekonstrukce

Rozdělení do etap bylo vyvoláno zejména požadavkem na dostatečnou zbytkovou kapacitu převáděné komunikace při samotné stavbě. Opravuje se vždy polovina jednoho mostu, na

zbývající ploše opravovaného mostu a na druhé nosné konstrukci je provoz veden v režimu 3 + 3 jízdní pruhy, čímž je v maximální možné míře zaručena adekvátní průchodnost pro dopravu.

Vlastní oprava nosné konstrukce mostu se týká zejména kompletní výměny mostního svršku a vybavení mostu. V první etapě byla zdemolována a následně nově postavena zcela nová rampa z komunikace Strakonická.

Dodatečné externí předpětí nosné konstrukce

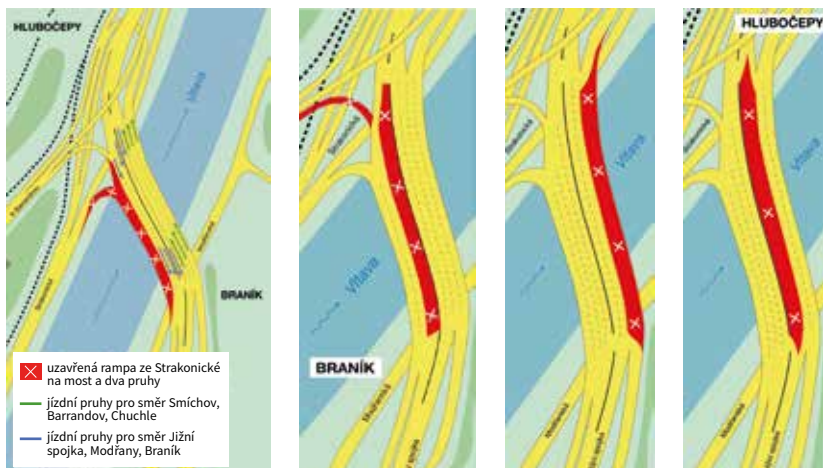
Samostatnou částí rekonstrukce nosné konstrukce je realizace jejího zesílení pomocí dodatečného volného předpětí vedeného uvnitř komor nosné konstrukce obou mostů (jižní a severní). Předpětí je do konstrukce doplněno s ohledem na výsledky provedeného diagnostického průzkumu, který detekoval relativně významné korozní oslabení původní předpínací výztuže.

Nově navržené vnější předpětí je vedeno přes nově realizované deviátory definující jeho trajektorii, která vychází z požadavků na celkové silové působení doplňkového externího předpětí, a hlavně skrze masivní původní příčnický. (obr. 3)

Povrchové a vyrovnávací vrstvy mostovky

Při realizaci první etapy rekonstrukce bylo zjištěno, že původní předpoklady ohledně tloušťky vozovkového souvrství nebyly přesné. Na mnoha místech byla zastižena výrazně větší tloušťka konstrukce vozovky (místa až 350 mm). Dle v současnosti platných norem a předpisů není možné takovou tloušťku realizovat jen pomocí asfaltového souvrství. Při požadavku na zachování nivelety převáděné komunikace tak bylo nutné najít konstrukční řešení pro vyrovnávací vrstvu.

S ohledem na nastavený harmonogram stavby a s cílem zaručit maximální trvanlivost vyrovnávacího souvrství byla zvolena vrstva UHPC, která kromě požadavku na minimalizaci času na provádění plní roli ochrany a ztužení stávajícího horního povrchu nosné konstrukce mostu. Ztužení bylo velmi efektivní v příčném směru nosné konstrukce mostu.



1 Celkový pohled na most 2 Schéma etapizace rekonstrukce mostu 3 Nově instalované externí předpětí uvnitř komory nosné konstrukce, deviátory pro definice geometrie

1 Overall view of the bridge 2 The scheme of the bridge reconstruction phases 3 Newly installed external prestressing inside the box girder of the superstructure, deviators for geometry definition

Konstrukce byla v příčném směru dle původního projektu využita na téměř 100 %, proto bylo dodatečné ztužení a zvýšení únosnosti horních desek komor a konzol vrstvou UHPC velmi přínosné.

Vlastnosti UHPC použitého pro vyrovnávací vrstvu

Návrh receptury

V době přípravy stavby ještě nebyla v platnosti TP ČBS 07. Výroba UHPC značky TopCrete byla tedy navržena dle kombinace norem ČSN EN 206+A2, ČSN P 73 2404 a podnikové normy TN TBG MTS 2019 UHPC. Na UHPC používaný pro nabetonávky (doplňkové vrstvy) mostovek jsou kladeny nad rámec běžných UHPC zejména následující požadavky:

- upravená tixotropie materiálu pro ukládku povrchu ve spádu,
- vysoký obsah drátků (minimálně 3 %) z důvodu omezení šířky trhlin od smršťování.

Základním požadavkem na recepturu UHPC v případě Barrandovského mostu byla možnost ukládky této vrstvy do výsledného spádu až 6 %. Běžný UHPC není možné kvůli vysokému obsahu superplastifikátoru do takto velkého spádu uložit. Úprava tixotropie a konzistence při zachování parametrů UHPC tak byla základním úkolem. Návrh vycházel z patentovaného řešení, které bylo výsledkem výzkumného projektu MPO. Finální navržená

receptura byla testována na vzorových spádových klínech, kde byla potvrzena správnost návrhu a zároveň byl ověřen způsob ukládky směsi a možnosti úpravy horního povrchu. (obr. 4)

Dalším zásadním parametrem byl vysoký obsah mikrodrátků. Při obsahu mikrodrátků přes 3 % objemově je tloušťka většiny trhlin zanedbatelná, pro oko jsou zcela neviditelné a pro



vodu neprůchozí. Toto se týká trhlin od dlouhodobého smršťování, ne však trhlin od plastického smršťování z důvodu nedostatečného ošetřování. Finálně tedy byla vyžadována receptura UHPC s minimálním obsahem drátků 3 % a s pevností v tahu za ohybu f_{R1} dle ČSN EN 14651 minimálně 20 MPa.

Pevnost v tlaku není pro sanační vrstvy tak důležitá, proto byla zvolena základní pevnostní třída C110 dle tabulky 12.2 normy ČSN P 73 2404. Pro tuto pevnostní třídu je určena minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ 110 MPa, měřená na válcích výšky 200 mm koncovaných broušením. Zkoušky na jiných tělesech (nejčastěji krychlích o hraně 100 mm) jsou prováděny pouze jako informativní, pro kontrolu shody nejsou relevantní. Vzhledem k tloušťkám vrstvy UHPC od 25 mm bylo zvoleno maximální zrno kameniva D_{max} 4 mm. Tato velikost maximálního zrna je vhodná i vzhledem k vysokému obsahu mikrodrátků.

Výroba a doprava UHPC

UHPC značky TopCrete byl vyráběn na betonárně TBG Metrostav v Praze-Libni. Maximální objem záměsi činil 1,25 m³, namíchání jedné záměsi trvalo po optimalizaci celého procesu 5 min. Maximální kapacita betonárny tak byla 15 m³/h. Tato kapacita však nikdy naplno využita nebyla, za den se na stavbu dodávalo maximálně cca 30 až 40 m³ materiálu dle postupujících prací přímo na mostě.

UHPC byl na stavbu dodáván běžnými autodomíchači, obvykle vezl autodomíchač na stavenišťe dávku 3,75 m³. Maximální dovezené množství na stavbu jedním autodomíchačem bylo 7,5 m³. Vzdálenost stavenišťe od betonárny je zhruba 13 km a za slabého provozu byla dopravní doba do 20 minut od namíchání, přičemž zpracovatelnost UHPC byla běžně 3 h od namíchání. Na stavbě byl vyčleněn prostor pro oplach autodomíchačů, aby se minimalizovalo zatvrdnutí zbytků UHPC uvnitř mixu.

Testování a výsledky zkoušek

UHPC TopCrete splnil veškeré specifikované parametry a požadavky na

mechanické vlastnosti v průběhu výstavby. Pevnost v tlaku se pro kontrolu shody kromě válců orientačně kontrolovala i na krychlích o hraně 100 mm, zkoušení bylo prováděno ve stáří betonu 7, 28 a 90 dní. Průměry z výsledků zkoušek jsou uvedeny v tab. 1.

Z výsledků je patrný důvod, proč jsou pro kontrolu shody používány jen vzorky ve tvaru válce. Poměr mezi válcovou a krychelnou pevností je totiž variabilní a nelze stanovit jeho přesnou hodnotu. Nejvíce záleží na množství drátků, resp. čím více drátků směs obsahuje, tím více se srovnává pevnost v tlaku naměřená na vzorcích ve tvaru válce a krychle. Při obsahu drátků 3 % se již pevnosti téměř vyrovnávají. Válcová pevnost je zároveň ta pevnost, která se využívá pro definování mechanických vlastností ve statických výpočtech a při posouzení konstrukce. Proto bylo rozhodnuto (v rámci tvorby TP ČBS 07), že se bude pro specifikaci a kontrolu shody využívat pouze válcová pevnost.

Průměrná pevnost v tahu za ohybu f_{R1} stanovená dle ČSN EN 14651 na trémčích délky 700 mm činila 22 MPa. (obr. 5)

Ukládání vrstvy UHPC

Vrstva UHPC v tomto případě sloužila především pro vyrovnání horní plochy mostovky s ohledem na zjištěnou extrémní tloušťku původního asfaltového vozovkového souvrství a pro zesílení horní desky komorového průřezu mostu (zejména zlepšení únosnosti v příčném směru konstrukce). I přes svůj potenciál zde nebyla vrstva UHPC využita pro účely hydroizolace, čímž se ukládka výrazně zjednodušila, protože nebylo nutné řešit vodotěsnost pracovních spár a detailů v okolí dilatačních závěřů a odvodňovačů. Ukládání vrstvy UHPC má však svá specifika a jde o technologicky velmi náročnou činnost. V případě Barrandovského mostu šlo o první velkou aplikaci u nás, která navíc byla vynucena okolnostmi a nebyl tak dostatek času na podrobnou přípravu celé technologie. Využil se materiál UHPC, který byl vyvinut právě pro účely rekonstrukce mostních konstrukcí v rámci výzkumného projektu podporovaného MPO ČR.

Ukládání UHPC na povrch stávající konstrukce vyžaduje pečlivou přípravu podkladu. Podklad má být hrubý, čistý a drsný. Zrna hrubého kameniva mají být obnažena a pevně zakotvena v původním betonu. Právě zrna hrubého kameniva zajišťují účinné spolupůsobení původního betonu s dobetonovanou vrstvou UHPC. Nerovnosti by měly být v řádu minimálně 3 až 5 mm. Snahou je maximalizovat měrný povrch styčné plochy mezi původní konstrukcí a vrstvou UHPC.

Potřebnou hrubost povrchu původního betonu lze dosáhnout otryskáním tlakovou vodou. Tlak vody se stanoví na základě povrchové pevnosti původního betonu v rozmezí cca 2 000 až 2 500 bar. Vodní paprsky s větším tlakem vody mohou vést k nadměrné destrukci původního betonu. V případě Barrandovského mostu se vyskytovaly dva druhy povrchu původní konstrukce. V oblasti krajních konzol byl původní povrch obnažen po odstranění izolace. Velkoformátové frézování nebylo možné, protože zatížení frézou by konzola komorového příčného řezu staticky neunesla. Kvalita horního povrchu nosné konstrukce po odstranění izolace byla v těchto místech značně proměnná. Některé části povrchu nebylo vůbec možné narušit definovaným tlakovým vodním paprskem, jiné části měly nižší kvalitu a vodní paprsek i s nižším tlakem silně narušoval strukturu betonu a vytvářel výrazné prohlubně (obr. 6a). V oblasti jízdních pruhů byl povrch původní betonové konstrukce strojně odfrézován. Zdánilivě příznivě vypadající povrch s pra-

Tab. 1 Průměrné pevnosti v tlaku v závislosti na typu tělesa a stáří UHPC

Tab. 1 Average compressive strengths versus sample type and age of UHPC

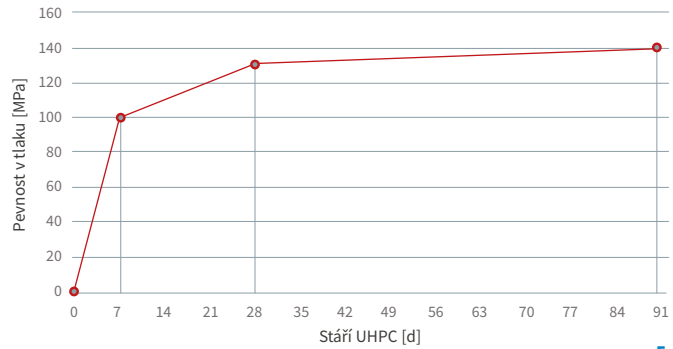
Těleso	Stáří vzorků [d]	Pevnost v tlaku [MPa]
krychle o hraně 100 mm	7	100
	28	130
	90	140
válec o výšce 200 mm	28	127

Literatura:

- [1] Technická pravidla ČBS 07. *Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2022.



4



5

4 Zkouška ukládky UHPC do spádu 5 Náběh tlakové krychelné pevnosti v čase (průměr za celou dobu dodávky směsi na stavbu)

4 The test of UHPC levelling with defined gradient 5 Compressive cube strength over time (average values over the entire time of delivery of the mix to the construction site)

videlnými vroubky od frézy se ukázal jako nepříliš vhodný, protože zrna hrubého kameniva byla taktéž odfrézována místo toho, aby vyčnívala z povrchu betonu. Nerovnosti se po zkušenosti s nedostatečnou soudržností ve finále ukázaly jako příliš malé (obr. 6b).

Před ukládkou UHPC musí být povrch původní konstrukce čistý, zbaven prachu a vlhký. Nesmí na něm však stát voda. Kvalita povrchu se zkouší (prokazuje) odtrhovými zkouškami, které definují tahovou pevnost povrchové vrstvy původní konstrukce. Dle TP ČBS 07 [1] se doporučuje minimální tahová pevnost 1,5 MPa. Naměřené hodnoty na horním povrchu rekonstruované první etapy Barrandovského mostu dosahovaly průměru 1,7 MPa, avšak zkoušky vykazovaly značný statistický rozptyl. Ukázalo se, že výsledky jsou příliš závislé na kvalitě přípravy podkladu a že rozhodně nejsou ideálním kritériem pro posuzování kvality podkladu.

Tloušťka ukládané vrstvy UHPC byla značně proměnná. Vycházela z definice požadavků na vyrovnání původního horního povrchu nosné konstrukce. Pohybovala se v rozmezí 25 až 250 mm (lokálně dokonce 300 mm). Dle zkušeností ze zahraničí a dle TP ČBS 07 byla navržena vrstva o tloušťce 25 až 40 mm bez prutové výztuže (nebylo by možné zajistit požadované krytí), tahová napětí byla přenášena pouze ocelovými vlákny. Větší tloušťky UHPC byly vyztuženy sítěmi.

Ukládání UHPC probíhalo v pásech o šířce 3 až 4,5 m vypouštěním UHPC přímo z autodomíchávače (obr. 7). Po uložení byl povrch srovnán latí a ihned opatřen nástřikem proti odpařování vody. Následně byl povrch zakryt PE fólií, která zajišťovala, aby odpařená voda na povrchu vrstvy UHPC (obr. 8).

Při ukládce UHPC na kvalitní podklad není třeba používat žádné speciální spřahovací prvky, protože soudrž-

nost mezi UHPC a původním betonem postačí na přenos smykových napětí vznikajících od objemových změn i od většiny zatížení. Během realizace vyrovnávací vrstvy UHPC v rámci první etapy rekonstrukce Barrandovského mostu se bohužel ukázalo, že ne vždy byla kvalita podkladu (obnažený horní povrch původní nosné konstrukce) dostatečná. Většina vybetonovaných bloků přilnula spolehlivě k podkladu a nevznikaly žádné problémy. V oblasti krajních konzol, kde se nepodařilo rovnoměrně otryskat povrch původního betonu, byly použity jednoduché kotvy při okrajích betonovaných částí. V místech jízdních pruhů došlo na okrajích některých bloků k delaminaci vrstvy UHPC od podkladu. Po podrobnějším zkoumání a pasportizaci se ukázalo, že odtržení od podkladu nastalo cca v 90 % zkoumaných vzorků v povrchové vrstvě původního betonu a nikoli na kontaktu původního betonu a dobetonávky z UHPC.

6 a) Původní povrch nosné konstrukce v oblasti konzol, b) odfrézovaný povrch původní konstrukce v místě vozovky

6 a) The original surface of the structure in the area of cantilevers, b) the milled surface of the original structure in the road area



6a



6b



7a

7 Ukládání UHPC přímo z automodifikáče
8 Nástřik a zakrytí povrchu vrstvy UHPC
7 UHPC levelling directly from concrete mixer truck 8 Spraying and covering the surface of the UHPC layer



7b

Důvody odtržení (delaminace) lze definovat v interakci několika zásadních okolností:

- povrch původního betonu zcela neodpovídal požadavkům TP ČBS 07. Odfrézování povrchu nezajistilo požadovanou hrubost povrchu. Vlivem nevhodného spádování mostu a vlhčení povrchu nebo deště před ukládkou došlo v některých případech k výskytu stojící vody, kterou nebylo možné včas odstranit,
- povrch původního betonu zcela neodpovídal požadavkům TP ČBS 07. Odfrézovaný původní povrch betonu nebyl dostatečně kvalitní. Velký rozptyl výsledků odtrhových zkoušek a rozdíly v odolnosti povrchu při otrýskávání toto tvrzení potvrzují,
- vysoké teplotní výkyvy (betonáž v červenci probíhala při teplotách přes 30 °C) při ukládání UHPC byly též příčinou velkého smykového namáhání kontaktních ploch,
- výztužné sítě nebyly uloženy vždy zcela přesně dle požadavků. Někdy ležely vlivem nedostatečného podložení dokonce přímo na podkladu. Výztužné sítě by obecně měly být uloženy spíše při horním povrchu dobetonované vrstvy. Při jejich snížené poloze (pod těžšířovou osou průřezu) neredukují účinky smršťování horního povrchu UHPC. Toto pak může vést k tendenci zvedání okrajů betonovaných bloků, k čemuž pravdě-

podobně v některých případech i reálně došlo.

Celkem byla realizována vyrovnávací vrstva UHPC celkové plochy cca 4 000 m². Vzniklé závady, které se projeví na cca 10 % plochy, byly odstraněny v některých případech injektáží a v minoritní části (140 m², tj. 3,5 % plochy vyrovnávky) pak kompletní výměnou dobetonované vrstvy. Aby se delaminace hran betonážních taktů vyloučila, byly po okrajích později betonovaných bloků použity kotevní prvky jako spolehlivé pojistné opatření. V žádné z betonovaných částí nevznikaly viditelné trhliny, což bylo zajištěno vysokým obsahem vláken. Malé trhliny byly pozorovatelné v pracovních spárách na kontaktu mezi jednotlivými betonážními takti. Toto

ale není nijak překvapivé, protože skrze pracovní spáru neprocházela žádná průběžná vlákna.

Závěr

Průběh první etapy rekonstrukce Barrandovského mostu ukázal, že je možné rekonstruovat most po částech a že i dopad na dopravu byl přiměřený a změna dopravní zátěže v celém systému predikovatelná. Nebyly pozorovány žádné větší dopravní problémy než při běžném provozu, kdy je most otevřen v celém rozsahu a kapacitě.

Splnění časových předpokladů harmonogramu stavby bylo negativně a zásadně ovlivněno složitostí provádění otvorů skrze nadpodporové příčnicki pro průchod dodatečného exter-



8

ního předpětí. Příčníky byly vyztuženy mnohem hustěji, než bylo uvedeno v původním projektu. Několikrát tak musel být upraven postup a celková geometrie vrtů, aby byly minimalizovány počty zasažených prutů betonářské výztuže.

Aplikace UHPC se ukázala i přes drobné nedostatky jako velmi úspěšná. Zpevněl se povrch horní desky, což přispělo zejména ke zvýšení odolnosti při lokálním zatížení horní desky komor a konzol v příčném směru, a byly získány zkušenosti pro další aplikace na mostních konstrukcích. Jako zásadní se ukázal význam kvality betonu původní konstrukce a jeho přípravy před aplikací vrstvy UHPC. Ověřila se vhodnost použitého materiálu i jeho ukládka do sklonu. V dalších etapách rekonstrukce Barrandovského mostu a na případných dalších stavbách je nutné klást zásadní důraz na pečlivé umístění výztužných sítí. Vzhledem ke zkušenostem se doporučuje navrhnout kotvení po obvodu betonovaných částí (pásů) pro vyloučení možnosti delaminace.

Při návrhu dalších etap rekonstrukce Barrandovského mostu budou využity dosavadní zkušenosti a dá se oprávněně předpokládat, že již k žádným problémům docházet nebude.

U jiných staveb se často předpokládá, že vrstva UHPC bude mít i funkci hydroizolační, což v případě Barrandovského mostu zatím využito nebylo, zejména z důvodu nedostatečných zkušeností s novou technologií. Stejně tak bývá často vrstva UHPC zásadněji využita i pro zvýšení únosnosti konstrukce, nejen pro lokální účinky zatížení.

Při rekonstrukci mostu byly využity výsledky grantového projektu MPO programu TRIO č. FV 20472.



doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
lukas.vrablik@fsv.cvut.cz



Ing. Robert Coufal, Ph.D.
TBG METROSTAV s.r.o.
robert.coufal@tbg-beton.cz



prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.
Metrostav a.s.
& Fakulta stavební ČVUT v Praze
jan.vitek@metrostav.cz

Konference Technologie a provádění 2023

Ve dnech 26. a 27. ledna 2023 se konala již 18. konference věnovaná technologii betonu a provádění betonových konstrukcí. Na organizaci se v letošním roce společně s Českou betonářskou společností podílel i Kloknerův ústav, hlavním tématem byl ultra vysokohodnotný beton (UHPC).



1



2



1 První den konference v hotelu Grandior v Praze 2 Lomové plochy trámečků z UHPC
3 Druhý den konference v Kloknerově ústavu ČVUT

3

Konference byla pojata jako dvou-denní, přičemž první den byl věnován prezentacím přihlášených odborných příspěvků a druhý den pak exkurzi s praktickými ukázkami.

První den konaný v konferenčním sále hotelu Grandior v Praze zahájil předseda vědeckého výboru konference Ing. Robert Coufal, Ph.D. Účastníci se pak ve čtyřech sekcích dozvěděli řadu zajímavých informací o realizacích mostů, lávek, výrobě prefabrikátů z UHPC a o jeho použití pro rekonstrukce a sanace stávajících betonových konstrukcí. V sekci věnované výzkumu a vývoji pak byl prezentován vývoj a použití UHPC pro spoje betonových prvků, spřažené dřevo-UHPC konstrukce, 3D tisk či testování deformačních bloků pro samostatné sjezdy podél komunikací. Dále byli účastníci seznámeni se směsnými cementy uváděnými v současnosti do výroby a na trh v souvislosti s plněním environmentálních cílů (více v článku na s. 32).

Na závěr prvního dne konference proběhlo vyhodnocení studentských soutěží za rok 2022, které ČBS již tradičně pořádá mnoho let. Do celostátního kola soutěže bylo přihláшено 35 bakalářských, diplomových a dize-

tačních prací v osmi soutěžních kategoriích. Porota udělila sedm titulů Vynikající práce a deseti soutěžícím udělila Cenu poroty. Ceny předával osobně předseda poroty prof. Ing. Vladimír Benko, Ph.D., předseda Slovenské komory stavebních inženýrů a uznávaný odborník a pedagog. (Pozn.: podrobný přehled oceněných studentských prací je uveden v novinkách na webu ebeton.cz.) Po vyhodnocení studentských soutěží následoval workshop, při kterém si přítomní vyměňovali řadu užitečných zkušeností z betonářské praxe.

Druhý den konference byl věnován exkurzi a praktickým ukázkám technologie UHPC a 3D tisku. Této části se po odborné a organizační stránce ujal Kloknerův ústav ČVUT v Praze, v jehož prostorách se akce odehrála. S historií a současností ústavu seznámil přítomné jeho ředitel prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D. Praktickou částí účastníky provázal Ing. David Čítek, Ph.D., se svými kolegy.

Z hojné účasti a z reakcí spokojených přítomných na konferenci je možno konstatovat, že se akce mimořádně vydařila.

Ing. Vladimír Veselý
Česká betonářská společnost ČBSI

PRINCIPY UDRŽITELNOSTI V NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ A JEJICH IMPLEMENTACE V *fib* MODEL CODE 2020

Petr Hájek

Mezinárodní federace pro konstrukční beton *fib* (International Federation for Structural Concrete) dokončuje nový Model Code pro navrhování betonových konstrukcí. Již od počátku práce bylo rozhodnuto zahrnout do něj širší aspekty udržitelnosti, které se staly zastřešujícím principem uplatňovaným v jednotlivých oblastech návrhu, provozu i rekonstrukce betonových staveb. Článek informuje o implementaci principů udržitelnosti do tohoto nového *fib* Model Code 2020 (MC2020).

SUSTAINABILITY PRINCIPLES IN DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES AND THEIR IMPLEMENTATION IN *fib* MODEL CODE MC2020

The International Federation for Structural Concrete (*fib*) is finalizing a new Model Code. From the very beginning of the work, it was decided to include broader aspects of sustainability, which became the overarching principle applied in the individual areas of design, operation and reconstruction of concrete buildings. The article informs about the implementation of sustainability principles into this new *fib* Model Code 2020 (MC2020).

Udržitelnost je globálním cílem udržitelného rozvoje zaměřeného na zajištění kvalitního života na Zemi pro stávající i budoucí generace. Budovy, infrastruktura a celé vystavěné prostředí by měly být lépe připraveny na nové podmínky – měly by být udržitelné a resilientní, tj. dlouhodobě odolné a přizpůsobivé novým situacím. Současný vývoj a změny v životním prostředí a v socioekonomické situaci vyžadují nová technická řešení pro výstavbu, rekonstrukce a modernizace staveb. Aktuálnost těchto přístupů se v poslední době umocňuje i s ohledem na válečnou situaci na Ukrajině a na zemětřesení v Turecku a Sýrii. Beton se z tohoto pohledu může stát stavebním materiálem s velkým potenciálem pro nová technická řešení splňující nové požadavky, vedoucí k potřebnému snížení dopadů na životní prostředí a současně ke zlepšení sociálních a ekonomických podmínek, včetně bezpečnosti a spolehlivosti v případech mimořádných situací.

Článek přináší informaci o implementaci principů udržitelnosti do nového *fib* Model Code 2020 (MC2020). Jde o iniciativu mezinárodní organizace *fib* (International Federation for Structural Concrete) k dosažení cílů udržitelného rozvoje (SDGs – sustainable development goals) stanovených Organizací spojených národů v roce 2015 jako akční plán do roku 2030.

Východiska

Svět čelí zvyšujícímu se počtu přírodních katastrof a narůstajícím hospodářským a sociálním problémům. Hlavními příčinami této situace jsou růst populace a globální oteplování v důsledku rychle rostoucího množství skleníkových plynů v atmosféře během posledních dvou set let.

V roce 2022 přesáhla světová populace 8 miliard lidí. To představuje 3,2násobný nárůst od roku 1950. Během stejného období se emise CO₂ zvýšily více než 6krát, světová průměrná teplota se zvýšila o 1 °C a počet zaznamenaných přírodních katastrof se zvýšil 15krát [1]. Celá společnost, resp. všechny národy, musí podniknout kroky ke zpomalení tohoto trendu a přizpůsobit se novým přírodním a sociálním podmínkám. K dosažení vytyčených cílů je zásadní zavést udržitelnost a odolnost jako nejdůležitější principy ve všech lidských činnostech.

V roce 1987 definovala Světová komise pro životní prostředí a rozvoj ve zprávě Naše společná budoucnost [2] princip udržitelného rozvoje jako „rozvoj, který uspokojuje potřeby současnosti, aniž by ohrozil schopnost budoucích generací uspokojovat své vlastní potřeby“. V roce 2015 přijala Organizace spojených národů rezoluci 70/1: Přeměna našeho světa: Agenda pro udržitelný rozvoj 2030 [3]. Tato agen-

da cílů udržitelného rozvoje (SDGs) je akčním plánem, jehož cílem je stanovit do roku 2030 opatření v oblastech kritického významu pro lidstvo a planetu. Jednou z priorit je udržitelný rozvoj měst, který je klíčovým aspektem ovlivňujícím kvalitu života lidí. Stavebnictví jako hlavní zainteresovaná strana odpovědná za využívání materiálových a energetických zdrojů hraje klíčovou roli při zavádění a provádění opatření SDGs v procesu navrhování, ve výstavbě, během provozu i při rekonstrukcích a modernizacích budov, silnic, mostů a všech dalších inženýrských staveb vytvářejících vystavěné prostředí.

Budovy, infrastruktura a celé vystavěné prostředí by měly umožňovat kvalitní život lidí, měly by co nejméně poškozovat životní prostředí a měly by být lépe připraveny na nové podmínky. To znamená, že by měly být udržitelné, odolné a přizpůsobivé novým situacím, což vyžaduje nová technická řešení.

Udržitelnost by se měla stát základním zastřešujícím konceptem pro efektivní a vysoce kvalitní návrh a provoz jakékoli stavby po celou dobu životního cyklu se zaměřením na všechny tři pilíře udržitelnosti – sociální, environmentální a ekonomický. (obr. 1)

Beton a betonové konstrukce

Beton je velmi starý materiál používaný po tisíceletí. Charakteristické

vlastnosti betonu, jako jsou pevnost a trvanlivost ve spojení s dostupností, variabilitou a relativně příznivou cenou, z něj zároveň učinily nejpoužívanější stavební materiál na světě. Důvodem je i to, že jde o silikátový kompozitní materiál, jehož složení a vlastnosti mohou být do určité míry přizpůsobeny konkrétním potřebám a dostupným zdrojům v daném regionu.

I v dnešní době může beton představovat stavební materiál s vysokým potenciálem pro nová technická řešení splňující aktuální požadavky, vedoucí k potřebnému snížení dopadů na životní prostředí a současnému zlepšení sociálních a ekonomických podmínek. Při srovnání negativních dopadů na životní prostředí, vztažených na jeden kg materiálu, vychází beton ve srovnání s jinými stavebními materiály velmi dobře. Na druhou stranu je však vzhledem k obrovskému objemu celosvětové výroby betonu jeho celkový environmentální negativní dopad spojený s výstavbou betonových konstrukcí v globálním měřítku značný. Emise CO₂ jen z výroby cementu se od roku 1950 zvýšily téměř 25krát [1]. Výsledkem je, že cementářský průmysl v současné době produkuje přibližně 7 až 8 % celosvětových emisí CO₂. S ohledem na výše uvedenou globální situaci je velmi důležité zaměřit se na zavádění nových technologií zejména v rozvíjejících se zemích a regionech s největší produkcí cementu a využitím betonu. Nesmíme také zapomínat, že objem výroby a využití betonu jsou v rámci celého životního cyklu spojeny i se značnými nároky na dopravu a na výrobní a demoliční procesy.

Betonové směsi, betonové výrobky a betonové konstrukce by proto mě-

ly být navrhovány tak, aby odpovídaly požadavkům udržitelnosti, což znamená minimalizovat jejich negativní dopady a zvýšit pozitivní vliv na společnost, životní prostředí a hospodářství. Toho by mohlo být dosaženo zvýšením kvality a trvanlivosti betonových konstrukcí v průběhu celého životního cyklu, a to:

- zlepšením metod návrhu,
- vývojem směsí betonu, kompozitních materiálů a způsobů vyztužení,
- modernizační technologie pro výrobu betonových prvků,
- rozvojem integrovaných konstrukčních přístupů,
- inovacemi v procesech údržby, oprav, demolic a recyklace.

S ohledem na množství vyráběného betonu představuje optimalizace betonových konstrukcí velký potenciál pro zvýšení komplexní kvality konstrukcí z hlediska udržitelného rozvoje. Výzkum a vývoj složení betonu, technologie výroby a vývoj betonových konstrukcí v posledních dvaceti letech vedly ke zlepšení technických parametrů a zároveň ke snížení dopadů na životní prostředí. Nové typy betonu tak mají díky optimalizaci směsi výrazně lepší vlastnosti z hlediska pevnosti, mechanické odolnosti, trvanlivosti a odolnosti vůči extrémnímu zatížení [4].

Význam hledání nových řešení reagujících na měnící se environmentální podmínky lze ukázat na případě výstavby letního rodinného domu na Floridě na Mexico Beach, v oblasti, kde je velké riziko výskytu hurikánů. Stavitel s architektem si dali za cíl postavit dům, který bude schopen přežít i silný hurikán. Ačkoliv tradiční výstavba je v této oblasti zpravidla na bázi dřevěných konstrukcí, použili z důvodů zajištění veliké odolnosti (resilience) železobetonovou konstrukci. V říjnu

2018 prošel touto oblastí velmi silný a destruktivní hurikán Michael 5. kategorie, který téměř celou oblast zdevastoval, nicméně tento dům zůstal neporušený [5]. Uvedený příklad dokládá výhody optimalizovaných železobetonových konstrukcí při extrémních zatíženích v případech přírodních katastrof a jejich potenciál při návrhu konstrukcí odolnějších v mimořádných situacích.

Současný vývoj vystavěného prostředí vede k potřebě nahrazení některých stávajících starých konstrukcí novými. V důsledku toho množství bouraných betonových konstrukcí postupně narůstá, což vytváří potřebu a potenciál pro nahrazení přírodního kameniva kamenivem recyklovaným. Použití recyklovaného betonu – jako kameniva pro nové betonové směsi – vede k úspoře přírodních zdrojů, pomáhá snižovat nároky na skládky a představuje tak příspěvek ke snižování environmentálních dopadů.

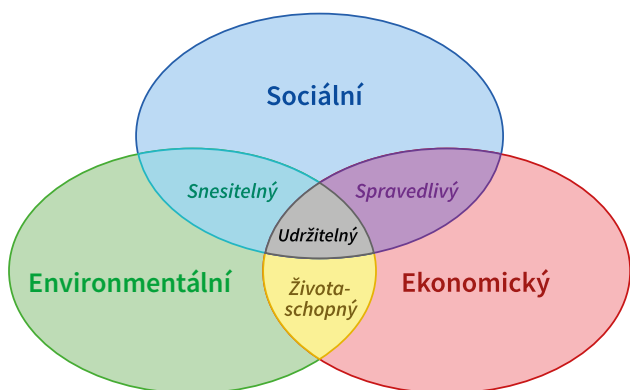
Implementace principů udržitelnosti v MC2020

Nový MC2020 se zabývá nejen tradičními požadavky na bezpečnost a provozuschopnost, ale udržitelnost je považována za prvořadý základní požadavek, který reaguje na širší otázky, jako je sociální odpovědnost, kvalita životního prostředí a ekonomická efektivita, a to v rámci celého životního cyklu konstrukce.

Příprava MC2020 byla zahájena v roce 2016. Udržitelnost byla od samého počátku považována za jeden z hlavních principů. Vedoucí pracovní skupiny 10.1 Model Code 2020 Stuart Matthews vyjádřil již v roce 2017 v úvodníku časopisu Structural Concrete [6] následující:

- MC2020 bude považovat udržitelnost za základní požadavek založený na holistickém zacházení se společenskými potřebami a dopady, náklady na životní cyklus a dopady na životní prostředí,
- MC2020 poskytuje důležitou příležitost k dalšímu rozvoji přístupu k udržitelnému návrhu, výstavbě a celoživotní péči o betonové konstrukce.

Model Code 2020 má sloužit jako východisko – základ pro tvorbu budoucích norem pro navrhování beto-



1 Pilíře udržitelného rozvoje – schéma (zdroj: Jirka DI / cs.wikipedia.org)

1 Sustainability pillars – scheme (source: Jirka DI / cs.wikipedia.org)

nových konstrukcí. Zatímco stávající návrhové normy jsou založené na tradičních znalostech a přístupech, MC2020 zohledňuje nový vývoj a poznatky týkající se betonových konstrukcí, konstrukčního materiálu (betonu) a inovativních přístupů s cílem dosáhnout optimálního chování konstrukcí v rámci celého životního cyklu – od realizace až po demolici a recyklaci.

Sociální aspekty

Konstrukce by měly být navrženy a postaveny tak, aby lidem umožňovaly kvalitní a bezpečný život. To znamená, že betonová konstrukce by měla zajistit kvalitní fungování objektu v průběhu celého životního cyklu a neměla by způsobovat nepříznivé dopady na společnost. Vysoká kvalita budov a infrastruktury může současně přispět i ke zdraví a pohodě lidí.

Sociální kvalita konstrukce zahrnuje:

- konstrukčně statické aspekty,
- další sociální aspekty.

Konstrukčně statické aspekty

Zajištění vysoké kvality konstrukčně statického chování je jedním z nejdůležitějších konstrukčních a inženýrských úkolů a zahrnuje aspekty, jako jsou:

- bezpečnost definovaná jako schopnost konstrukce nebo konstrukčního prvku zabránit překročení limitů mezních stavů,
- použitelnost definovaná jako schopnost konstrukce nebo konstrukčního prvku adekvátně fungovat pro běžné použití ve všech očekávaných situacích,
- trvanlivost definovaná jako schopnost konstrukce nebo konstrukčního prvku dlouhodobě splňovat s plánovanou údržbou požadavky na konstrukční působení,
- robustnost definovaná jako schopnost konstrukce odolávat nepříznivým a nepředvídaným událostem (jako je požár, výbuch, náraz) nebo následkům lidských chyb,
- resilience – odolnost konstrukce definovaná jako schopnost reagovat, absorbovat a přizpůsobovat se mimořádným událostem a zotavovat se z nich, přičemž se očekává, že konstrukce bude schopna odolat extrémní události s minimálními škodami a narušením funkčnosti

a po události by konstrukce měla být schopna rychle obnovit svou funkčnost na podobné nebo vyšší úrovni než před událostí.

Další sociální aspekty

Zatímco konstrukčně statické působení představuje základní sociální aspekt, je třeba, aby konstrukce splňovala i další sociální kritéria, mezi která patří mimo jiné:

- zdraví a kvalita zastavěného prostředí: akustická pohoda, tepelná pohoda, dostupnost, bezbariérový přístup,
- bezpečnost a ochrana zastavěného prostředí: bezpečnost pracovníků a externích osob, zabezpečení majetku,
- estetická hodnota a zachování kulturního dědictví,
- dopad na místní komunitu: neomezování sousedních vlastníků, nenarušování dopravy a dalších činností, pozitivní dopad na místní zaměstnanost atd.

Některé z těchto aspektů jsou důležité především pro budovy (např. tepelný a akustický komfort) a obvykle ne pro infrastrukturu.

Environmentální aspekty – vliv na životní prostředí

Každá konstrukce by měla být navržena, postavena a provozována tak, aby se minimalizovaly škodlivé dopady, příp. posilovaly pozitivní účinky konstrukce na životní prostředí.

Klíčovými aspekty, které by měly být zohledněny v rámci vlivu na životní prostředí, jsou:

- spotřeba přírodních zdrojů,
- využívání energie (především neobnovitelné z fosilních zdrojů),
- využívání půdy,
- produkce škodlivých emisí do ovzduší, vody a půdy,
- zatížení hlukem a vibracemi,
- produkce odpadu,
- vliv na biodiverzitu (ohrožení živočišných a rostlinných druhů a celých ekosystémů).

Ekonomická efektivita

Ekonomická efektivita betonových konstrukcí se netýká pouze nákladů na výstavbu, nýbrž zahrnuje i další ekonomické aspekty:

- náklady na výstavbu,
- provozní náklady,
- náklady na údržbu,
- náklady na renovaci,
- náklady na demolici,
- náklady na recyklaci,
- vyvolané náklady (externality),
- kapitálové náklady,
- podpora místní ekonomiky.

Demontovatelnost konstrukcí a recyklovatelnost prvků mohou mít významný vliv na ekonomickou efektivitu a zároveň i na environmentální kvalitu.

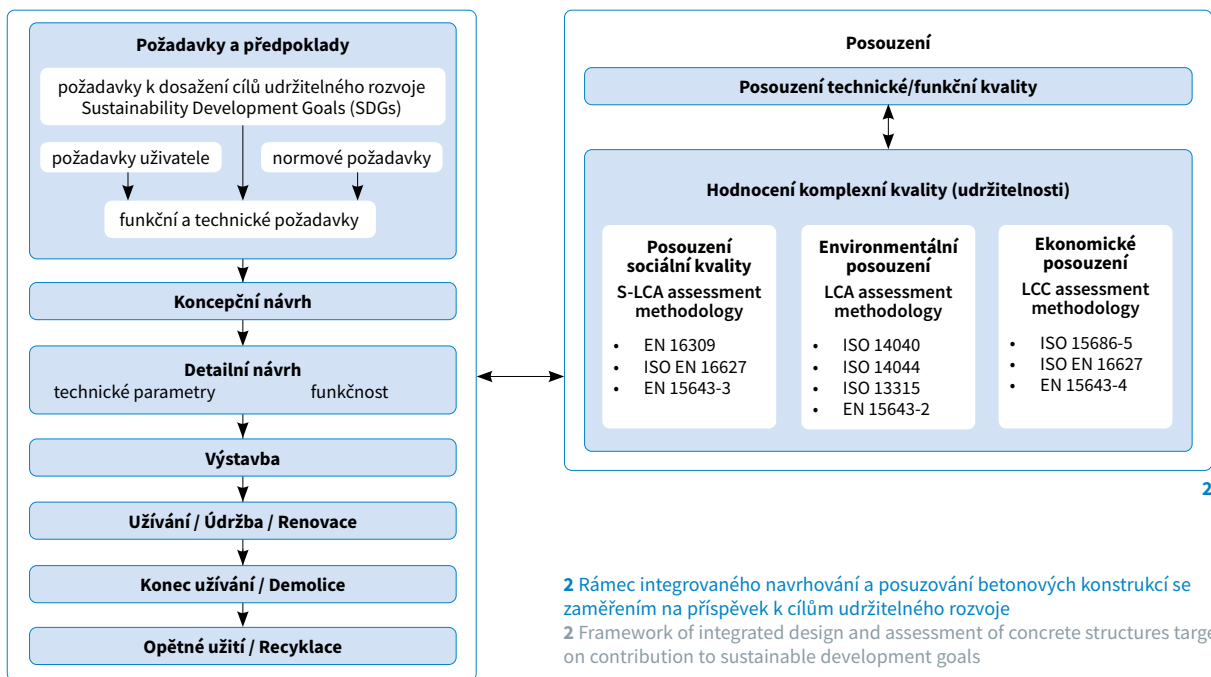
Hodnocení betonových konstrukcí z hlediska kritérií udržitelnosti

Posuzování komplexní kvality konstrukcí zahrnuje hodnocení tří pilířů udržitelnosti – sociálního, environmentálního a ekonomického – a to po celou dobu jejich životnosti od získání surovin, výroby, návrhu, výstavby, použití, demolice konstrukce až po recyklaci a likvidaci odpadních materiálů. Jde o složitý multikritériální systém, ve kterém každý z pilířů zahrnuje soubor kritérií, která mají různý charakter a nelze je přímo porovnávat bez nastavení vah a použití některé z metod multikritériálního hodnocení. Výběr kritérií je obvykle důležitější než relativní důležitost (váha) každého kritéria při srovnání, výběr kritérií je zároveň specifický pro každý typ konstrukce a pro různé oblasti. Je třeba respektovat regionální specifika.

Nastavení vah mezi hlavními třemi pilíři udržitelnosti je ovlivněno spíše politickými a zájmovými preferencemi.

Literatura:

- [1] *Our World in Data* [online]. Dostupné z: ourworldindata.org
- [2] *Our Common Future (Brundtland Report)*. Zpráva OSN, UN WCED, 1987.
- [3] *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. In: ROSA, W. ed. *A New Era in Global Health*. New York, NY: Springer Publishing Company, 2017. ISBN 978-0-8261-9011-6.
- [4] HAJEK, P. Concrete Structures for Sustainability in a Changing World. *Proceedia Engineering*, 2016, Vol. 171, pp. 207–214. Elsevier.
- [5] CARR, W., McDONALD, J., SHAPIRO, E. Mexico Beach home survives Hurricane Michael virtually untouched: "We intended to build it to survive". 16. 11. 2018. *abcNEWS*. Dostupné z: youtube.com/watch?v=_peXPtoQYQ&ab_channel=12NewsNow
- [6] MATTHEWS, S. *fib Model Code 2020—A new development in structural codes*. *Structural Concrete: Journal of the fib*, 2017, Vol. 18, Issue 5, pp. 651–652.
- [7] *fib Bulletin 71. Integrated Life Cycle Assessment of Concrete Structures: State-of-the-art report*. *fib*, 2013. ISBN 978-2-88394-111-3.
- [8] *fib Bulletin 28. Environmental design: State-of-the-art report*. *fib*, 2004. ISBN 2-88394-068-1.



Proto je možné a vhodné hodnocení udržitelnosti provést paralelně nezávislým vyhodnocením všech tří pilířů udržitelnosti a tím poskytnout holistickou informaci o celkové kvalitě chování konstrukce z hlediska sociálního, environmentálního i ekonomického.

Průběh integrovaného návrhu a posouzení betonových konstrukcí je znázorněn na obr. 2. V prvním kroku jsou definovány požadavky a předpoklady vycházející ze společnosti a potřeb klienta. V tomto kroku jsou specifikovány základní požadavky související s plněním cílů rozvoje udržitelnosti. Další kroky představují fáze životního cyklu od koncepčního návrhu přes realizaci, užívání až po demolici a recyklaci. Ve všech těchto fázích je třeba zajistit a posuzovat technickou a funkční kvalitu konstrukce, a to nejenom z konstrukčně statického hlediska, ale z pohledu komplexní kvality, tj. všech klíčových aspektů udržitelnosti konstrukce. Posuzování kvality v jednotlivých pilířích udržitelnosti probíhá v souladu s existujícími normami a předpisy. V případě sociální kvality je konstrukčně statické působení konstrukcí posuzováno běžnými předpisy pro navrhování betonových konstrukcí a ostatní sociální požadavky prostřednictvím příslušných technických norem a zastřešujících mezinárodních norem EN a ISO. Environmentální posouzení je prováděno

metodikou LCA (life cycle assessment) a ekonomické posouzení metodikou LCC (life cycle cost) podle příslušných mezinárodních norem ISO a EN. Je zřejmé, že je kladen důraz na posuzování celého životního cyklu.

Závěr

Svět se vždy měnil a měnila se i kvalita životního prostředí vhodného pro život lidí. Země vznikla již před 4,7 miliardami let; první lidé homo sapiens se datují před 300 000 lety, tzn. že lidé obývají Zemi pouhých 0,006 % její existence. A Země bude existovat další miliardy let – v období, kdy již podmínky na ní pro existenci lidí vhodné nebudou. Svět dnes čelí zvyšujícímu se počtu přírodních katastrof a narůstajícím hospodářským a sociálním problémům a výzvám. S ohledem na zrychlující se změny kvality životního prostředí se stává urgentním úkolem soustředit se na zajištění podmínek na Zemi pro existenci lidí co možná nejdéle. V současnosti jsme tak svědky intenzivní diskuse na nejvyšší mezinárodní úrovni, jak danou situaci řešit.

Stavebnictví významným způsobem ovlivňuje stav životního prostředí. Pro realizaci a provoz stavebních objektů spotřebovává značné množství surovinových a energetických zdrojů (z nichž převážná část je neobnovitelných) a produkuje rozhodující množství od-

padů a škodlivých emisí (CO_2 , SO_x , NO_x aj.). Vlastní stavební činnost nepříznivě ovlivňuje životní prostředí především hlukem, prachem, exhalacemi, znečištěním komunikací, zábořem přírodních ploch, poškozováním zeleně a odpady ze stavební činnosti. Zcela vyloučit všechny nepříznivé vlivy stavební činnosti na životní prostředí nelze, nutným požadavkem však musí být jejich omezení na nezbytně nutnou míru, odpovídající obecným globálním požadavkům trvale udržitelného rozvoje společnosti.

Mezinárodní federace pro konstrukční beton *fib* si je vědoma naléhavé potřeby ovlivnit betonářský průmysl a celý stavební sektor tak, aby přispěl k plnění cílů udržitelného rozvoje a pomohl rozvíjet udržitelné a odolné prostředí pro budoucí generace. Nový Model Code 2020 z těchto cílů vychází a specifikuje principy pro uplatnění při navrhování betonových konstrukcí. Tyto principy vycházejí z výsledků dlouhodobé činnosti komise *fib* COM7 Sustainability a předchozí komise *fib* COM3 Environmental aspects of concrete structures [7], [8]. Uvedené principy byly uplatněny v rámci přípravy MC2020 i v komisi *fib* COM10. Publikace Model Code 2020 se předpokládá v roce 2023.



prof. Ing. Petr Hájek, CSc.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
petr.hajek@fsv.cvut.cz

OPĚTOVNÉ VYUŽITÍ STAVEBNÍHO A DEMOLIČNÍHO ODPADU JAKO RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU

Karel Hurtig, Milan Rydval, Jiří Kolísko

Stavební a demoliční odpad lze po splnění patřičných kritérií použít jako recyklované kamenivo do betonu. Autoři shrnují současnou klasifikaci recyklovaného kameniva a jeho použití do betonu, které je dané normativně. V příspěvku je představen experimentální program laboratorní výroby a zkoušek, které proběhly na betonech s různým obsahem recyklovaného kameniva. Receptury betonu obsahovaly recyklát betonový, cihelný a směsný. V článku jsou předloženy a shrnuty výsledky jednotlivých zkoušek materiálových parametrů včetně jejich srovnání s betonem referenčním. Hlavním cílem provedeného výzkumu bylo především ověření kvality betonových recyklátů a též ověření použitelnosti recyklovaného kameniva pohybujícího se za hranicí pokrytou platnými normami.

REUSE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AS RECYCLED AGGREGATE FOR CONCRETE

Waste from construction and demolition can be used as recycled aggregate for concrete after meeting appropriate criteria. The authors summarise the classification of recycled aggregate and its use in concrete according to current standards. A programme of laboratory experiments in production is outlined together with results of tests that took place on concretes with different contents of recycled aggregate. The concrete mixes contained recycled concrete or a ceramic aggregate or a mix of both. The article summarises the results of individual tests for basic characteristics of the recycled aggregate concrete and their comparison with reference concrete. The main aim of the research was primarily the verification of the quality of the recycled concrete aggregate and of the applicability of recycled aggregate which had characteristics outside of the current limits set in the standards.

Již delší dobu je na poli stavebnictví upozorňováno na problémy udržitelnosti související s používáním betonu jako stavebního materiálu. Cementáři řeší problém environmentální a ekonomické náročnosti výroby portlandského cementu a nutnost používání směsných cementů, zároveň docházejí disponibilní zásoby ložisek stavebního kamene a šterkopísku [1]. Jednou z možností, jak snížit spotřebu přírodního kameniva, je použití kameniva recyklovaného, tj. podrceného stavebního odpadu, které splňuje patřičná kritéria pro použití k výrobě betonu. Problematikou betonu s recyklovaným kamenivem se již aktivně zabývá např. společnost Skanska s produktem Rebetong nebo společnost TBG Metrostav se svým produktem Ecocrete. Oba zmíněné produkty již byly v časopise Beton TKS představeny [2], [3].

Rozlišení složek recyklovaného kameniva

Dle normy ČSN EN 12620+A1 [4] zabývající se požadavky na kamenivo do betonu rozlišujeme několik složek recyklovaného kameniva. Pokud se skládá z betonu či malty, jde o složku s označením Rc. Jedná-li se o směs kameniva stmelového či nestmelového hydraulickými pojivy, jedná se o složku s označením Ru. Norma odráží skutečnost, že tyto dvě složky spolu budou často koexistovat, proto uvádí společnou složku Rc + Ru (obecně betonová složka – pozn. autorů). Pokud se složka skládá z pálených či vápenopískových zdicích prvků, jde o složku s označením Rb (obecně cihelná složka – pozn. autorů). Dále jsou v normě [4] zmíněny asfaltové materiály (Ra), sklo (Rg), plovoucí materiály (FL) a jiné (X), jako např. zemina, kovy, dřevo, plasty a sádrová omítka. [2]

Použitelnost recyklovaného kameniva

Norma ČSN EN 206+A2 [5] rozlišuje pouze dva typy recyklovaného kameniva – typ A a B. Typ A musí obsahovat mi-

nimálně 90 % betonové složky Rc, či 95 % složky Rcu a maximálně 10 % cihelné složky Rb. Typ B musí obsahovat minimálně 50 % betonové složky Rc, či 70 % složky Rcu a maximálně 30 % cihelné složky Rb. U obou typů je také uvedeno omezení na ostatní složky (Ra, Rg, FL a X). Ze zmíněných parametrů vyplývá významné omezení použití recyklovaného kameniva a zákaz použití recyklovaného kameniva s podílem cihelné složky větším než 30 %, což je v praxi velmi omezující. Maximální procento nahrazení hrubého kameniva shrnuje tab. 1, která je převzata z [5].

Z tabulky vyplývá, že maximální možná náhrada hrubého přírodního kameniva je 50 %, a to jen pro stupeň vlivu prostředí X0. Pro další stupně prostředí je maximální použitelné množství jen snižováno či zcela zakázáno. V normě je ale uvedeno doplňující kritérium, které uvádí, že se recyklované kamenivo typu A ze známého zdroje může použít pro stupeň vlivu prostředí, pro které byl navržen původní beton, a to maximálně s 30% nahrazením přírodního kameniva. Pro recyklované kamenivo typu B je též uveden zákaz použití do betonu pevnostní třídy vyšší než C30/37. [5]

Experimentální program výroby betonů s recyklovaným kamenivem

V rámci experimentálního programu byly použity čtyři zdroje (Z1 až Z4) betonového recyklovaného kameniva (Rcu), jeden zdroj (Z5) recyklátu cihelného (Rb) a jeden zdroj (Z6) recyklátu směsného ($Rcu \geq 50$, $Rb \leq 50$). Recyklované kamenivo bylo ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT v Praze roztříděno na jemné kamenivo (frakce 0–4 mm) a na hrubé kamenivo (frakce 4–8, 8–16 a > 16 mm). Jemné kamenivo bylo využito pro experimentální program v rámci Fakulty stavební ČVUT. Kamenivo se zrnem frakce > 16 mm, které není pro běžné konstrukce používáno, nebylo do ex-



1 a) Betonový recyklát ze zdroje Z1 frakce 4–8 mm, **b)** beton se 100% náhradou kameniva **2 a)** Betonový recyklát ze zdroje Z1 frakce 8–16 mm, **b)** beton se 100% náhradou kameniva **3 a)** Cihelný recyklát ze zdroje Z5 frakce 4–8 mm, **b)** beton s 30% náhradou kameniva, **c)** beton s 50% náhradou kameniva, **d)** beton se 100% náhradou kameniva **4 Referenční beton**
1 a) Recycled concrete aggregate, source Z1, size 4–8 mm, **b)** concrete with 100% replacement of aggregates size 4–8 mm **2 a)** Recycled concrete aggregate, source Z1, size 8–16 mm, **b)** concrete with 100% aggregate replacement size 8–16 mm **3 a)** Recycled crushed brick (ceramic) aggregate, source Z5, size 4–8 mm, **b)** concrete with 30% aggregate replacement, **c)** concrete with 50% aggregate replacement, **d)** concrete with 100% aggregate replacement **4** Reference concrete

perimentu zahrnuto. V laboratoři bylo připraveno několik receptur s výše uvedenými recyklovanými kamenivem a různou hmotnostní náhradou dané frakce hrubého kameniva. Výsledky základních mechanicko-fyzikálních vlastností byly porovnány s referenční recepturou betonu, která dle [5] odpovídá specifikaci C25/30 - XC2, XF2 - D_{max} 16 mm – S1.

Pro sledování vlivu náhrady přírodního kameniva kamenivem recyklovaným byla vyrobena série zkušebních těles (pět krychlí a tři válce) pro stanovení materiálových parametrů dle tab. 2.

Složení betonu s recyklovaným kamenivem

Nahrazení přírodního kameniva bylo rozděleno do dvou variant. Varianta A zahrnovala nahrazení recyklátem frakce 4–8 mm, a to v množství 30, 50 a 100 % hm. Varianta B zahrnovala nahrazení recyklátem frakce 8–16 mm, a to též v množství 30, 50 a 100 % hm. Primárním cílem tohoto rozdělení bylo sledovat vliv náhrady jednotlivých frakcí. Pokud bude pohlíženo na náhradu kameniva z hlediska celkové sumy hrubého kameniva, tak v případě varianty A jde o 13, 22 a 44 % a v případě varianty B jde o náhradu 17, 28 a 56 %. Z hlediska normy [5] je použití betonového recyklátu (Rcu) při nahrazení 56 % již nepřijatelné. Náhrada směsným či čistě cihelným recyklátem se pohybuje již mimo platné předpisy. Složení receptury referenčního betonu a betonů s nahrazením přírodního kameniva recyklátem je uvedeno v tab. 3.

Vodní součinitel byl uvažován 0,55 a nebyly použity žádné přísady ovlivňující konzistenci čerstvého betonu. Vzhledem k vyšší nasákavosti především cihelné složky recyklovaného kameniva byla hodnota vodního součinitele upravena tak, aby bylo možno vyrobit recepturu s odpovídající zpracovatelností třídy S1.

Tab. 1 Povolené množství náhrady přírodního kameniva [5]

Tab. 1 Permitted amount of natural aggregate which can be replaced [5]

Druh recyklovaného kameniva	Stupně vlivu prostředí			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	ostatní stupně
typ A	50 %	30 %	30 %	0 %
typ B	50 %	20 %	0 %	0 %

Tab. 2 Provedené zkoušky na betonu s recyklovaným kamenivem

Tab. 2 Tests carried out on concrete with recycled aggregate

Materiálový parametr	Předpis
objemová hmotnost	ČSN EN 12390-7
pevnost v tlaku	ČSN EN 12390-3
statický modul pružnosti betonu v tlaku	ČSN ISO 1920-10
hloubka průsaku tlakovou vodou	ČSN EN 12390-8
nasákavost	ČSN 73 1316
odolnost proti vodě a CHRL – metoda A	ČSN 73 1326

Pozn.: Z důvodů nedostatku recyklovaného kameniva nedošlo k výrobě betonu se 100% nahrazením u zdroje Z2 (frakce 4–8 mm ani 8–16 mm) a 100% nahrazením u zdroje Z5 (frakce 8–16 mm).

Tab. 3 Typické složení testovaných směsí

Tab. 3 Typical mixture composition

Surovina	Objemové zastoupení složek [kg/m ³]						
	REF	A/30	A/50	A/100	B/30	B/50	B/100
cement CEM I 42,5 R Mokrá	300	300	300	300	300	300	300
kamenivo 0–4 mm Nučnický	600	600	600	600	600	600	600
kamenivo 4–8 mm Zálezlice	500	350	250	0	500	500	500
kamenivo 8–16 mm Ledčice	630	630	630	630	441	315	0
recyklát 4–8 mm	0	150	250	500	0	0	0
recyklát 8–16 mm	0	0	0	0	189	315	630

Výsledky materiálových parametrů betonu s recyklovaným kamenivem – betonový recyklát

Parametry čerstvého betonu

Při výrobě čerstvého betonu byla měřena jeho teplota – pohybovala se v rozmezí 17 až 20,7 °C, což odpovídá běžným hodnotám při použití surovin (cement, kamenivo) uložených v laboratorním prostředí. Byla též stanovena konzistence čerstvého betonu sednutím kužele. Výsledky tříd konzistence jsou zaznamenány v tab. 4. U všech receptur obsahujících betonový recyklát byl stanoven vodní součinitel 0,55. Z naměřených hodnot sednutí vyplynulo snížení hodnoty sednutí kužele se zvětšující se dávkou recyklovaného kameniva. To bylo dáno zejména následkem vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva oproti kamenivu přírodnímu.

Tab. 4 Konzistence sednutím kužele

Tab. 4 Workability of fresh concrete measured by the slump test

Zdroj kameniva	Z1				Z2				Z3				Z4										
Beton	A/30	A/50	A/100	B/30	B/50	B/100	A/30	A/50	B/30	B/50	B/100	A/30	A/50	A/100	B/30	B/50	B/100	A/30	A/50	A/100	B/30	B/50	B/100
Konzistence	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S2	S2	S1	S1	S1	S2	S2	S1	S3	S2	S2	S2

Parametry ztvrdlého betonu

Nahrazením přírodního kameniva betonovým recyklátem došlo k následujícím změnám.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu je průměrem objemové hmotnosti stanovené na krychlich a válcích, které byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti ve stáří 28 dní. Graf na obr. 5 uvádí změny hodnot objemové hmotnosti, které odpovídají množství náhrady přírodního kameniva a objemové hmotnosti daného recyklátu.

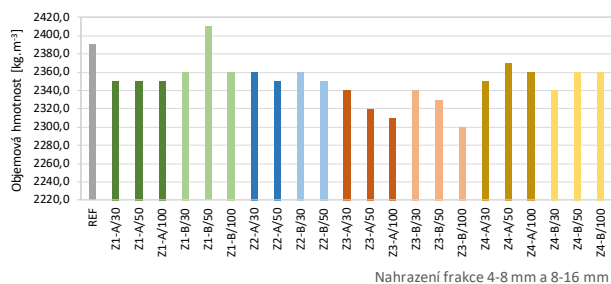
Pevnost v tlaku byla stanovena ve stáří betonu 28 dní. Graf na obr. 6 uvádí změny pevnosti v tlaku na krychlich (1. sloupec) a válcích (2. sloupec).

Statický modul pružnosti betonu v tlaku byl stanoven ve stáří betonu 28 dní, a to na válcích průměru 150 mm a výšce 300 mm. Graf na obr. 7 uvádí změny modulu pružnosti. Je zřejmé, že kvalita kameniva obsaženého v recyklátu ovlivňuje výsledný modul pružnosti betonu. Ve většině případů dochází ke snížení hodnoty modulu pružnosti vůči referenčnímu betonu, jsou ale případy, kdy došlo k jeho mírnému nárůstu. To přičítáme primárně kvalitě kameniva.

Hloubka průsaku tlakovou vodou byla stanovena ve stáří betonu 28 dní na krychlich o hraně 150 mm. Graf na obr. 8 uvádí změny hloubky průsaku tlakovou vodou.

Nasákavost betonu byla stanovena na polovinách krychlí o hraně 150 mm po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou. Graf na obr. 9 uvádí změny nasákavosti betonu. Červeně vyznačená je hodnota nasákavosti 6,5 %, která byla uvedena ve starších normách jakožto hodnota, nad kterou beton již není považován za mrazuvzdorný.

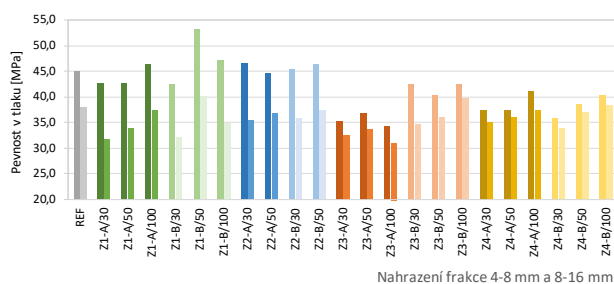
Odolnost povrchu betonu proti průsaku vody a CHRL byla stanovena dle metody A na krychlich o hraně 150 mm. Graf na obr. 10 uvádí hmotnostní odpady po daných zma-



Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm

5 Objemová hmotnost betonu v závislosti na původu a procentuální náhradě recyklátu

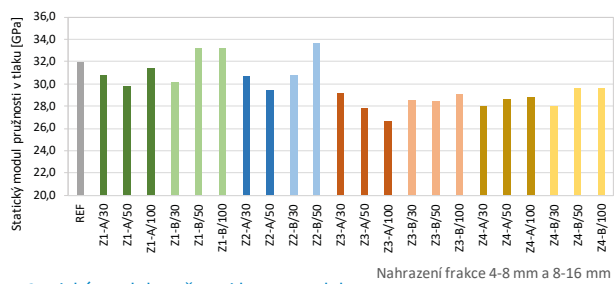
5 Bulk density of concrete depending on the origin and percentages of replacement of the recycled aggregate



Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm

6 Krychelná (1. sloupec) a válcová (2. sloupec) pevnost betonu v tlaku

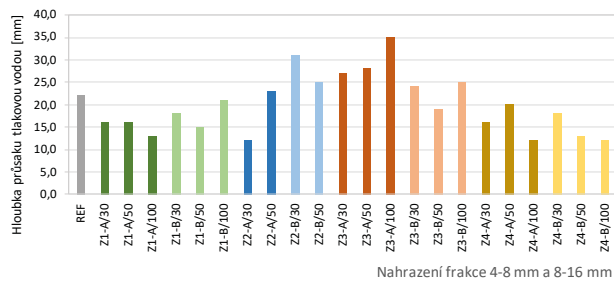
6 Cube (1st column) and cylinder (2nd column) compressive strength of concrete



Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm

7 Statický modul pružnosti betonu v tlaku

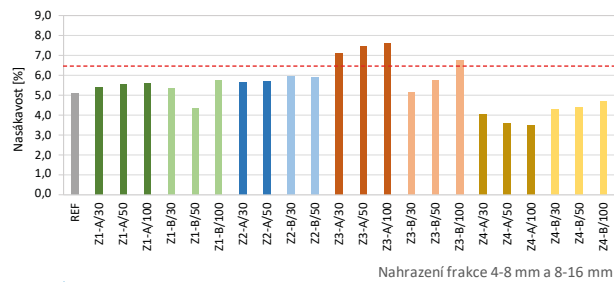
7 Static modulus of elasticity of the concrete in compression



Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm

8 Hloubka průsaku tlakovou vodou

8 Depth of penetration of water under pressure

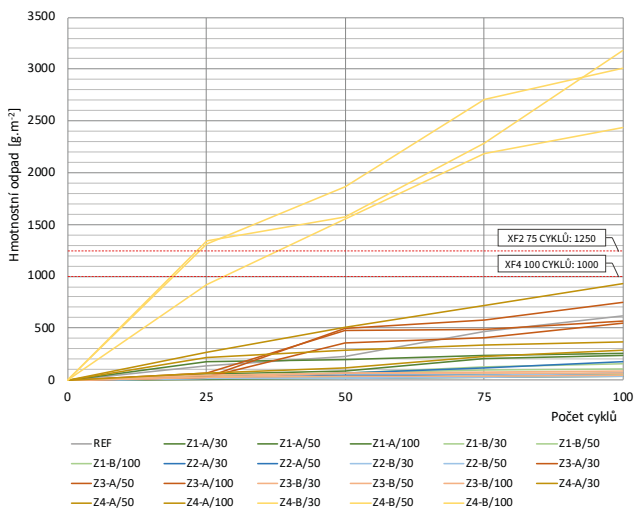


Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm

9 Nasákavost betonu

9 Water absorption of concrete

zovacích cyklech. Z grafu je patrné, že problematické jsou pouze betony receptury Z4 s náhradou frakce 8–16 mm. Červeně vyznačené jsou limity hodnoty odpadu pro daný stupeň prostředí.



10 Hmotnostní odpady po daných cyklech
10 Loss of the mass of concrete due to freeze-thaw cycles

Výsledky materiálových parametrů betonu s recyklovaným kamenivem – směsný a cihelný recyklát

Parametry čerstvého betonu

U čerstvého betonu s cihelným (Z5) a směsným (Z6) recyklátem byla též měřena jeho teplota – pohybovala se v rozmezí 17,1 až 19 °C, což opět odpovídá běžným hodnotám při použití surovin (cement, kamenivo) uložených v laboratorním prostředí. Byla též stanovena konzistence čerstvého betonu sednutím kužele. Dávka vody se u těchto receptur lišila v závislosti na nasákavosti recyklovaného kameniva. Cihelný a směsný recyklát se oproti betonovému recyklátu vyznačuje vyšší nasákavostí. Při míchání betonu pak recyklát nasaje záměšovou vodu a beton ztratí zpracovatelnost. Výsledky tříd konzistence a vodní součinitel dané receptury jsou zaznamenány v tab. 5.

Tab. 5 Konzistence sednutím kužele a vodní součinitel
Tab. 5 Workability of fresh concrete determined by the slump test and the water/cement ratio

Zdroj kameniva	Z5					Z6					
Beton	A/30	A/50	A/100	B/30	B/50	A/30	A/50	A/100	B/30	B/50	B/100
Konzistence	S2	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
Vodní součinitel	0,59	0,59	0,69	0,55	0,62	0,55	0,55	0,62	0,58	0,58	0,62

Parametry ztvrdlého betonu

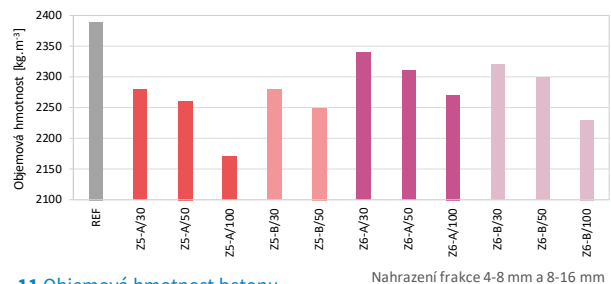
Nahrazením přírodního kameniva cihelným (Z5) a směsným (Z6) recyklátem došlo k následujícím změnám.

Graf na obr. 11 uvádí změny hodnot objemové hmotnosti. Změny objemové hmotnosti jsou patrnější se zvyšující se náhradou přírodního kameniva, jelikož objemová hmotnost cihelného recyklátu je mnohem nižší než přírodního kameniva či betonového recyklátu.

Graf na obr. 12 uvádí změny pevnosti v tlaku na krychlech (1. sloupec) a válcích (2. sloupec). Z výsledků je též zřejmý vztah mezi čistě cihelným a směsným recyklovaným kamenivem, kdy náhrada pouze cihelným recyklátem vede k výraznějšímu snížení pevnosti betonu v tlaku.

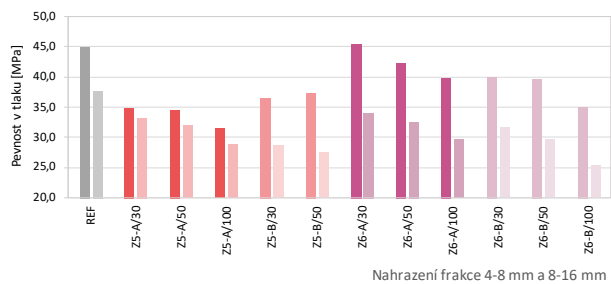
Graf na obr. 13 uvádí změny statického modulu pružnosti v tlaku. Výsledky dokládají jedno z hlavních negativ použití cihelného recyklátu jako náhrady přírodního kameniva a omezení jeho použití v betonech u konstrukcí, kde dochází k ohybovému namáhání. Modul pružnosti betonu výrazně klesá se zvyšující se dávkou náhrady a opět je změna výraznější u čistě cihelného recyklátu.

Graf na obr. 14 uvádí změny hloubky průsaku tlakovou vodou, kdy nedošlo k výraznému nárůstu oproti referenčnímu betonu.



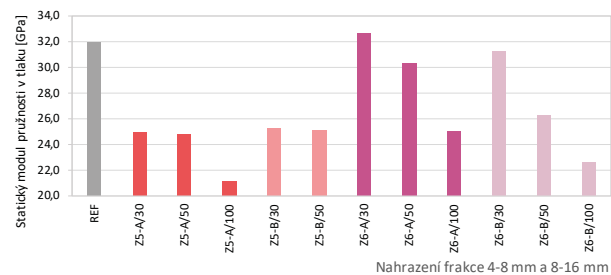
11 Objemová hmotnost betonu
11 Bulk density of concrete

Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm



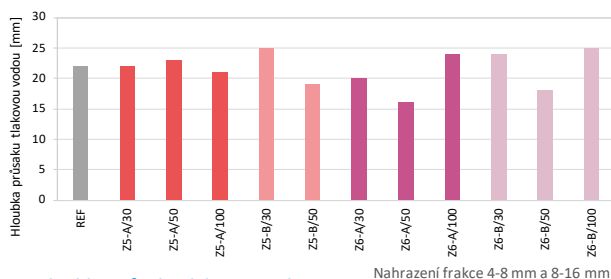
12 Krychelná (1. sloupec) a válcová (2. sloupec) pevnost betonu v tlaku
12 Cube (1st column) and cylinder (2nd column) compressive strength of concrete

Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm



13 Statický modul pružnosti betonu v tlaku
13 Static modulus of elasticity of the concrete in compression

Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm



14 Hloubka průsaku tlakovou vodou
14 Depth of penetration of water under pressure

Nahrazení frakce 4-8 mm a 8-16 mm

Graf na obr. 15 uvádí změny nasákavosti betonu. Červeně vyznačená je hodnota nasákavosti 6,5 %, která byla uvedena ve starších normách jakožto hodnota, nad kterou beton již není považován za mrazuvzdorný. S narůstajícím podílem recyklovaného kameniva roste též nasákavost betonu, za což je opět odpovědný převážně cihelný recyklát s vysokou nasákavostí.

Graf na obr. 16 uvádí hmotnostní odpady po daných zmrazovacích cyklech, kde byly překvapením výsledky odolnosti povrchu betonu vůči zmrazovacím cyklům. S vyšší nasákavostí betonu se očekávaly i nepříznivé výsledky této zkoušky. Z toho vyplývá, že na výsledek odolnosti povrchu mají větší vliv vlastnosti jemné frakce při povrchu betonu a kvalita provedení povrchu než přímo hrubé kamenivo se zrnem > 4 mm.

Souhrn

Betonový recyklát

Nahrazení přírodního kameniva betonovým recyklátem vedlo jak k výsledkům očekávaným, tak překvapivým z hlediska jejich trendu. Překvapivým se zdá pozitivní vliv podílu recyklovaného kameniva na pevnost v tlaku. Byl pozorován trend nárůstu pevnosti v tlaku se zvyšující se dávkou náhrady přírodního kameniva, přičemž ve většině těchto případů nedosahovala hodnota maximální pevnosti nad úroveň pevnosti referenčního betonu. Rozdíly jsou pak patrné mezi jednotlivými zdroji betonového recyklátu (Z1 až Z4).

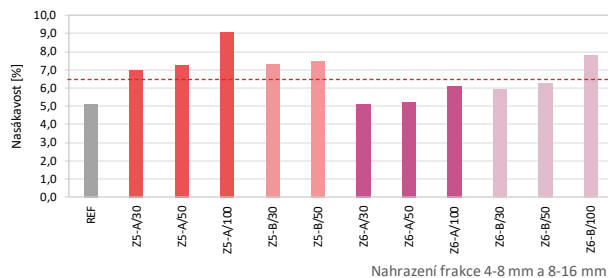
Nahrazením frakce 4–8 mm došlo ke změně pevnosti v tlaku v rozmezí 76 až 103 % hodnoty referenčního betonu a v případě frakce 8–16 mm ke změně pevnosti v tlaku v rozmezí 79 až 118 % hodnoty referenčního betonu. Tento pohled nám udává rozptýl hodnot, které lze při nahrazení jednotlivých frakcí očekávat.

Obdobně je to s výsledky statického modulu pružnosti. Nahrazením frakce 4–8 mm došlo ke změně jeho hodnoty v rozsahu 83 až 98 % hodnoty referenčního betonu a v případě frakce 8–16 mm pak ke změně v rozsahu 88 až 105 % hodnoty referenčního betonu.

Hodnoty nasákavosti betonu příhodně korespondují s hodnotou objemové hmotnosti a platí závislost že, čím je vyšší objemová hmotnost, tím je menší nasákavost. Problematické se z hlediska nasákavosti zdají být betony s obsahem recyklátu ze zdroje Z3, které přesahují hodnotu 6,5 % a mohou být nevhodné pro konstrukce namáhané mrazem.

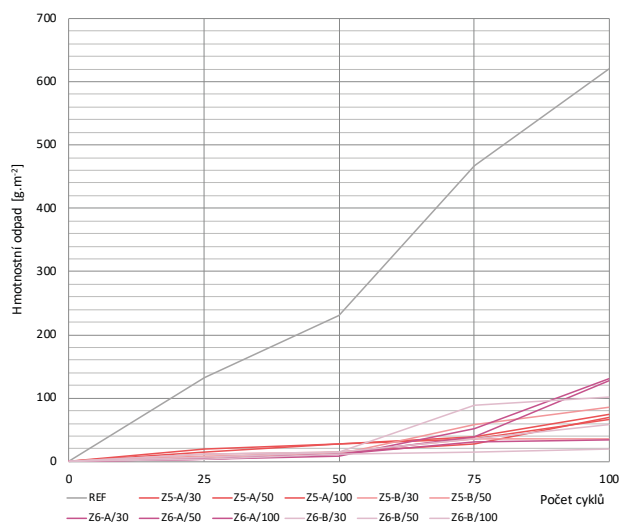
Hloubka průsaku tlakovou vodou je v porovnání s referenčním betonem vyšší u zdroje Z2 (varianty B) a Z3, kde též korelují hodnoty objemové hmotnosti betonu s hodnotami hloubky průsaku.

U zkoušky odolnosti povrchu betonu proti průsaku vody a CHRL byly u zdrojů recyklátu Z1 až Z3 (s výjimkou receptury Z3-A/30) naměřeny nižší hodnoty odpadu než u referenčního betonu. Nadlimitní hodnoty odpadu byly naměřeny u betonů s recyklátem zdroje Z4, kde ale zároveň beton oproti jiným zdrojům vykazoval vyšší stupeň konzistence. Toto bude předmětem další analýzy.



15 Nasákavost betonu

15 Water absorption of concrete



16 Hmotnostní odpady po daných cyklech

16 Loss of mass after the selected freeze-thaw cycles

Cihelný a směsný recyklát

Výsledky zkoušek betonů s náhradou přírodního kameniva recyklátem cihelným a směsným již ve smyslu trendu hodnot měřených veličin překvapením nebyly.

Pevnost betonu v tlaku s vyšší dávkou náhrady recyklátem klesá. U náhrady cihelným recyklátem frakce 4–8 mm došlo ke snížení až na 70 % pevnosti referenčního betonu. V tomto případě čistě cihelného recyklátu ovlivňuje pevnost betonu výrazněji náhrada drobnou frakcí než náhrada frakcí hrubou. Opačně je to u směsného recyklátu, kde pevnost betonu výrazněji ovlivňuje náhrada hrubou než jemnou frakcí. U náhrady směsným recyklátem došlo k největšímu snížení pevnosti v tlaku při 50% nahrazení frakce 8–16 mm, a to na 78 % pevnosti referenčního betonu.

Literatura:

- [1] GODÁNY, J. Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a šterkopísku v ČR. *Beton TKS*. 2021, roč. 21, č. 1, s. 15–21.
- [2] SLÁNSKÝ, B., ZELINKA, P., ČERMÁK, J. Beton z recyklovaného kameniva. *Beton TKS*. 2021, roč. 21, č. 1, s. 32–37.
- [3] HLAVSA, Z., COUFAL, R., VÍTEK, J. L. Použití recyklovaného kameniva do betonu. *Beton TKS*. 2022, roč. 22, č. 1, s. 46–49.
- [4] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Praha: ČNI, 2008.
- [5] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2021.

Modul pružnosti je závislý na kvalitě hrubého kameniva, tudíž při nahrazení cihelným a směsným recyklátem došlo k očekávanému poklesu jeho hodnoty. U cihelného recyklátu došlo k nejvýraznější změně při 100% nahrazení frakce 4–8 mm. Hodnota modulu pružnosti klesla na 66 % hodnoty referenčního betonu. U směsného recyklátu nedošlo v porovnání s cihelným recyklátem ke skokovému snížení modulu pružnosti při nahrazení 30 % přírodního kameniva. Poměrně uspokojivé jsou výsledky receptur Z6-A/50 a Z6-B/30, s 22%, resp. 17% nahrazením veškerého hrubého kameniva, u nichž byly hodnoty modulu pružnosti srovnatelné s betonem referenčním.

Jelikož je cihelný recyklát velice nasákový, i beton s jeho obsahem má zvýšené hodnoty nasákavosti. U všech receptur s cihelným recyklátem došlo k překročení hodnoty 6,5 %, u směsného recyklátu došlo k překročení pouze při 100% nahrazení frakce 8–16 mm.

Hloubka průsaku tlakovou vodou byla překvapivě méně problematická ve srovnání s betonem obsahujícím betonový recyklát. Maximální hodnoty u cihelného i směsného recyklátu dosahovaly 25 mm.

Obdobně je tomu i u odolnosti povrchu betonu vůči průsaku vody a CHRL, kde se odpady u všech receptur s cihelným i směsným recyklátem pohybovaly do maximálně 130 g/m², což bylo dokonce velmi nízko v porovnání s hodnotou odpadu referenčního betonu.

Závěr

Cílem práce bylo ověřit kvalitu betonového recyklátu, který je na trhu dostupný, a vyšetřit vliv nahrazení přírodního kameniva recyklátem cihelným a směsným. Ověření proběhlo pomocí porovnání s referenčním betonem během série základních zkoušek čerstvého a ztvrdlého betonu. Byly pozorovány i nepředpokládané trendy hodnot materiálových vlastností betonu s betonovým recyklátem. Platí, že na každý zdroj betonového recyklátu se musí pohlížet individuálně.

U cihelného recyklátu došlo k očekávanému výraznému snížení pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Zajímavým zjištěním byl výsledek u několika receptur se směsným recyklátem, jejichž mechanické parametry se dají srovnat s parametry betonu s recyklátem čistě betonovým.

Příspěvek vznikl v rámci programu TA ČR Prostředí pro život, resp. projektu č. SS03010302 s názvem Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití, u němž ČVUT v Praze spolupracuje s několika zpracovateli stavebního a demoličního odpadu.



Ing. Karel Hurtig
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
karel.hurtig@cvut.cz



Ing. Milan Rydval
Mott MacDonald CZ, spol. s r.o.
milan.rydval@mottmac.com



prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
jiri.kolisko@cvut.cz

inzerce

POZVÁNKA NA ŠKOLENÍ

CBS

Česká betonářská společnost ČSSI
www.cbsbeton.eu

ve spolupráci s



Českou komorou autorizovaných inženýrů a techniků
www.ckait.cz

a
Slovenskou komorou stavebních inženýrov
www.skisi.sk

ŠKOLENÍ JE ZAŘAZENO
DO AKREDITOVANÝCH VZDĚLÁVACÍCH
PROGRAMŮ V PROJEKTECH
CELOŽIVOTNÍHO VZDĚLÁVÁNÍ ČKAIT

CBS akademie

Školení systému ČBS AKADEMIE
**NAVRHOVÁNÍ
BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ
PODLE NOVÉ
GENERACE EUROKÓDŮ**



17. a 18. května 2023
Hotel Galant Mikulov, Mlýnská 2, 692 01 Mikulov na Moravě

AKUSTICKÉ VLASTNOSTI BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM

Zdeněk Hlavsa

S rozvojem využívání recyklovaného kameniva pro výrobu betonu je nutné vedle základních mechanických a přetvárných vlastností materiálu ověřovat i charakteristiky určující finální komfort obyvatel při užívání stavby. Jednou z těchto vlastností je i akustická neprůzvučnost. Předkládaný článek prezentuje výsledky experimentálního měření akustické neprůzvučnosti železobetonových stěn vyrobených s použitím přírodního i recyklovaného kameniva. Změřeny byly i fyzikální materiálové konstanty, které se používají pro určení akustických vlastností výpočtem. Výsledky zkoušek obsahují i základní mechanické vlastnosti materiálu.

ACOUSTIC PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

When a wider use of recycled aggregate for production of concrete is considered, it is necessary to verify its impact on the total comfort of inhabitants using the building, in addition to basic mechanical and formative properties of the materials. One of the additional properties is the airborne sound insulation of the structures. The article presents results of experimental measurements of the acoustic insulation of reinforced concrete walls made with natural and recycled aggregates. Physical parameters of the materials, which are used to determine the acoustic properties by calculation, were measured and the test results also include the basic mechanical properties of the material.

Dynamický vývoj v oblasti výzkumu výroby betonu s použitím recyklovaného kameniva jde ruku v ruce s rozšiřováním jeho uplatnění v konstrukcích na reálných stavbách. V současné době se beton s recyklovaným kamenivem uplatňuje spíše u doplňkových nenosných konstrukcí, jako jsou např. podkladní betony, výplňové nenosné konstrukce, příp. prefabrikované prvky z prostého betonu pro tížné dělicí opěrné stěny. Jedním z důvodů je nedostatečná normativní opora pro širší uplatnění recyklovaného kameniva při výrobě betonu i navrhování konstrukcí a s tím související nižší důvěra investorů a projektantů, kteří by tento materiál mohli do nových projektů navrhovat.

Zatímco mechanické parametry a trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem byly zkoumány v mnoha vědeckých pracích a např. vliv recyklovaného kameniva na pevnost betonu je již vcelku dobře známý, tak užitným vlastnostem, jako je např. zvuková izolace materiálu, už tolik prostoru věnováno nebylo. V bytových stavbách jsou jako mezibytové příčky často navrhovány železobetonové stěny, jelikož zároveň plní i ztužující funkci celého objektu. Vedle základních mechanických vlastností, které se u dělicích konstrukcí bytových staveb posuzují,

je jedním z hlavních parametrů také vzduchová neprůzvučnost konstrukce. Aktuálnost výzkumu této užitné vlastnosti materiálu dokládá i fakt, že nedostatečná zvuková izolace mezi sousedními byty je v dnešní době častým důvodem sporů mezi obyvateli novostaveb a developery.

Pro ověření, zda konstrukce mezi-bytové stěny z betonu s recyklovaným kamenivem vyhoví požadavkům ČSN 73 0532 [1] na zvukovou izolaci mezi dvěma obytnými místnostmi sousedních bytů, byl realizován praktický experiment. Spolu s laboratorním měřením akustické neprůzvučnosti byly testovány základní mechanické parametry betonu a stanoveny fyzikální materiálové konstanty popisující akustické vlastnosti materiálu.

Cíl a průběh experimentálních prací

Hlavním cílem experimentu bylo laboratorně zjistit akustickou neprůzvučnost železobetonových stěn vyrobených z betonu obsahujícího recyklované kamenivo a ověřit tak, zda je tento druh betonu vhodný do konstrukcí s přísnějšími požadavky na zvukovou izolaci, převážně pak do stěn mezi obytnými místnostmi. Pilířem experimentu byla výroba tří železobetonových stěn o rozměrech

3,57 × 0,2 × 3,73 m, které byly vyztuženy u obou povrchů vázanou výztuží Ø 10/100 mm v obou směrech. Beton pro výrobu stěn byl specifikován dle [2] a [3] jako C25/30 - XC2, stupeň konzistence S4. Je nutné zmínit, že takto specifikovaný beton nelze dle uvedených norem s použitím recyklovaného kameniva (v dávkách uvedených dále) vyrobit. V tuto chvíli je nutné pro výrobu takového betonu vydat stavebně technické osvědčení výrobku. Železobetonové stěny byly vyrobeny na jedné z betonáren společnosti TBG Metrostav, kde byly zároveň vhodné podmínky pro výrobu betonu i se 100% obsahem recyklovaného kameniva. Po přípravě formy bednění a vyvázání výztuže proběhla dne 21. června 2022 postupně betonáž všech tří stěn. Během betonáže byly odebrány vzorky pro zkoušky čerstvého betonu a byla vyrobena zkušební tělesa na zkoušky ztvrdlého betonu (více o těchto zkouškách je uvedeno dále). Laboratorní zkoušky akustické neprůzvučnosti proběhly dne 16. srpna 2022 v akreditované zkušební laboratoři TZÚS v Teplicích, kam byly vzorky převezeny v den konání zkoušek. Vzorky měly být původně vyzkoušeny ihned po vyzrání betonu (28 dní), nicméně z důvodu uzavření laboratoře v průběhu léta se zkoušky konaly s delším ča-

sovým odstupem. To však není na závadu, protože u reálné stavby nebude zvukoizolační schopnost stěn požadována dříve než při uvedení stavby do užívání, a to zpravidla nebývá dříve než za dva měsíce po betonáži konstrukcí.

Použité vstupní suroviny

Pro výrobu betonových stěn byly použity tři receptury s různým podílem recyklovaného kameniva v betonu. První receptura (NAC) obsahovala pouze přírodní těžené kamenivo a sloužila jako receptura referenční. V receptuře RAC-50 bylo hrubé přírodní kamenivo nahrazeno hrubým recyklovaným směsným kamenivem, drobné kamenivo bylo zachováno přírodní těžené. V poslední receptuře (RAC-100) bylo nahrazeno drobné i hrubé přírodní kamenivo recyklovaným směsným kamenivem. Základní parametry použitého kameniva jsou uvedeny v tab. 1. Recyklované kamenivo se oproti kamenivu přírodnímu vyznačuje násobně vyšší mírou nasákavosti. Drobné recyklované kamenivo frakce 0–8 mm má navíc vyšší podíl jemných odplavitelných částic, které zhoršují především pevnost betonu a mají dopad i na jeho zpracovatelnost.

Recyklované směsné kamenivo frakce 0–8 a 8–16 mm použité pro výrobu stěn je na obr. 1. Z fotografií je patrné znečištění hrubé složky recyklovaného kameniva dřevěnými částicemi, které mohou mít následně dopad na mechanické i užitné vlastnosti betonu. V tomto případě bylo znečištění způsobeno nedokonalým odstraněním dřevěných materiálů před zpracováním (drcením)



1a



1b

1 Recyklované směsné kamenivo: a) drobné, b) hrubé 1 Mixed recycled aggregate: a) fine, b) coarse

Tab. 1 Základní parametry přírodního a recyklovaného kameniva použitého v experimentu

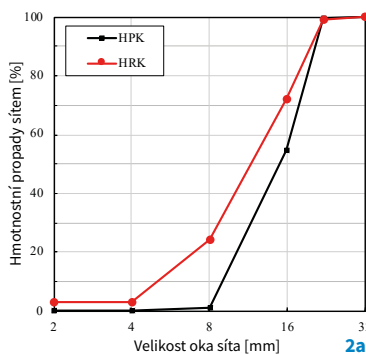
Tab. 1 Basic properties of natural and recycled aggregate used in the experiment

Typ kameniva	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]	Vlhkost kameniva [%]	Obsah jemných částic [%]
HPK 8–16 mm	2 640	0,4	0,6	0,3
HRK 8–16 mm	2 450	6,3	4,5	1,2
DPK 0–4 mm	2 610	1,2	3,8	0,9
DRK 0–8 mm	2 380	11,7	9,8	9,2

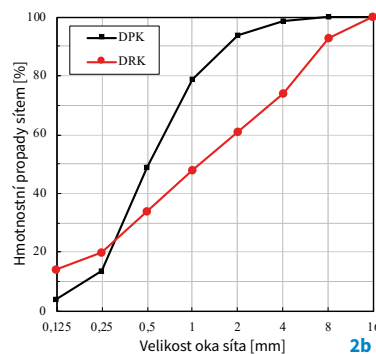
stavebního a demoličního odpadu na recyklované kamenivo do betonu. Při běžné výrobě betonu s recyklovaným kamenivem jsou dřevěné částice nežádoucí, nicméně v tomto experimentu lze horší kvalitu recyklovaného kameniva pojmout jako příklad podprůměrných podmínek pro výrobu betonu s potenciálem pro jejich zlepšení.

Grafy na obr. 2 zobrazují křivky zrnitosti drobné a hrubé složky přírodního i recyklovaného kameniva použitého v experimentu. Z křivek je opět patrný vyšší podíl odplavitelných částic v drobné frakci recyklovaného kameniva a vyšší podíl zrna o průměru 8 mm v hrubé frakci 8–16 mm.

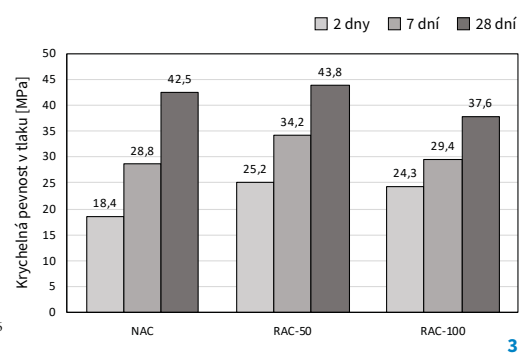
Ve všech uvedených recepturách byl použit portlandský směsný cement CEM II/B-S 32,5 R Radotín. Při použití recyklovaného kameniva dochází ke snížení pevnosti betonu, proto byla zvýšena dávka cementu. V recepturách byl v závislosti na dávce cementu použit také popílek. Ve všech recepturách byla použita stejná superplastifikační přísada na bázi PCE. Množství záměsové vody se upravovalo při samotném míchání pro docílení požadované konzistence. Vzhledem k vysoké nasákavosti recyklovaného kameniva byla potřeba vody u receptur RAC-50 a RAC-100 výrazně vyšší.



2a



2b



3

2 Křivky zrnitosti: a) drobné přírodní a recyklované kamenivo, b) hrubé přírodní a recyklovaného kameniva 3 Krychelná pevnost betonu v tlaku

2 a) Grading curves of the fine natural and recycled aggregate, b) grading curves of the coarse natural and recycled aggregate 3 Results of tests for compressive cube strength of concrete

Tab. 2 Vlastnosti čerstvého betonu **Tab. 2** Properties of fresh concrete

Parametr	Jednotka	NAC	RAC-50	RAC-100
sednutí kužele	[mm]	140	210	220
objemová hmotnost	[kg/m ³]	2 320	2 180	2 080
teplota čerstvého betonu	[°C]	22,3	21,5	22,1

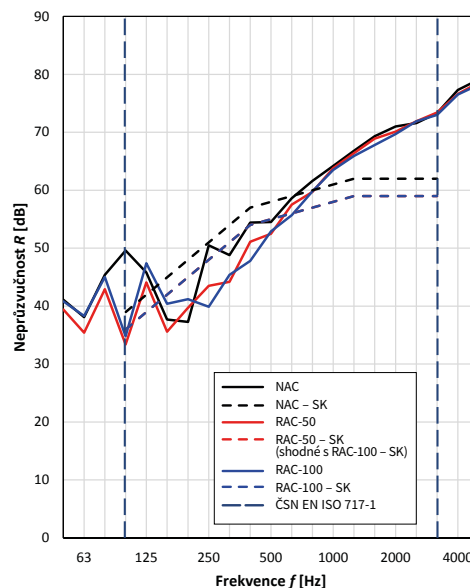
Tab. 3 Vlastnosti ztvrdlého betonu **Tab. 3** Properties of hardened concrete

Parametr	Jednotka	Stáří betonu	NAC	RAC-50	RAC-100
objemová hmotnost	[kg/m ³]	28 dní	2 330	2 210	2 100
hloubka průsaku	[mm]	28 dní	19	14	17
pevnost v tahu	[MPa]	28 dní	5,5	5,4	5,4
válcová pevnost v tlaku	[MPa]	28 dní	38,5	40	33,5
modul pružnosti	[GPa]	28 dní	31,1	25,5	18,9

Tab. 4 Akustická neprůzvučnost železobetonových stěn

Tab. 4 Measurement of the sound reduction index of the reinforced concrete walls

Parametr	Jednotka	NAC	RAC-50	RAC-100
vážená laboratorní neprůzvučnost R_w	[dB]	58	55	55
faktor přizpůsobení spektra C	[dB]	-3,4	-2,1	-1,9
faktor přizpůsobení spektra C_{tr}	[dB]	-7,9	-7,2	-6,4



4 Akustická neprůzvučnost dle [5] s posunutými směrnými křivkami dle [6]

4 Results of measurements of the airborne sound insulation according to [5] with the curve of reference values shifted according to [6]

Výsledky zkoušek

Zkoušky čerstvého betonu

U všech receptur byla provedena zkouška konzistence čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-2, stanovena objemová hmotnost dle ČSN EN 12350-6 a změřena teplota betonu. Výsledky těchto zkoušek jsou shrnuty v tab. 2.

Zkoušky ztvrdlého betonu

Z každé receptury byly odebrány vzorky pro výrobu zkušebních těles na zkoušky ztvrdlého betonu, resp. krychle o hraně 150 mm na zkoušku krychelné pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 a zkoušku hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8, trámce 400 × 100 × 100 mm na zkoušku pevnosti betonu v tahu dle ČSN EN 12390-5 a válce 150 × 300 mm na zkoušku statického modulu pružnosti dle ČSN ISO 1290-10. U každého tělesa byla též stanovena objemová hmotnost ztvrdlého be-

tonu dle ČSN EN 12390-7. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu byla stanovena na nevysušeném vzorku bez ocelové výztuže, tudíž se bude lišit od objemové hmotnosti železobetonových stěn, které byly podrobeny akustickým zkouškám. Krychelná pevnost betonu v tlaku byla zkoušena ve stáří betonu 2, 7 a 28 dní (tři tělesa), výsledky pevnosti v tlaku jsou znázorněny v grafu na obr. 3. Výsledky ostatních zkoušek jsou shrnuty v tab. 3.

Krychelná pevnost betonu v tlaku byla vzhledem ke stanovené pevnosti třídě betonu u všech tří receptur splněna s dostatečnou rezervou. U receptury RAC-100 byl zaznamenán pokles pevnosti o přibližně 5 MPa, a to i přes zvýšenou dávku cementu v receptuře. Objemová hmotnost betonu byla u receptur RAC-50 a RAC-100 nižší oproti referenční směsi s přírodním kamenivem, a to přibližně o 5, resp. 10 %. Vyšší pokles byl zaznamenán u statického modulu pružnosti, který

dosahoval 18 % u směsi RAC-50 a až 39 % u směsi RAC-100. Pokles objemové hmotnosti a modulu pružnosti betonu v závislosti na podílu recyklovaného kameniva v betonu odpovídá i dříve prezentovaným výsledkům [4]. Vliv recyklovaného kameniva na pevnost betonu v tahu a hloubku průsaku tlakovou vodou lze považovat za zanedbatelný a v případě průsaku splňuje i nejpřísnější požadavek 20 mm.

Zkoušky akustické neprůzvučnosti

Pro stanovení akustické neprůzvučnosti železobetonových stěn se postupovalo dle ČSN EN ISO 10140-2 [5]. Při měření neprůzvučnosti je zkoušený prvek nainstalován do otvoru mezi dvěma vertikálně oddělenými místnostmi (místností zdroje a místností příjmu). Přenos zvuku bočními cestami je při zkoušce zcela eliminován a stanovené hodnoty vyjadřují neprůzvučnost zkoušené konstrukce. V místnosti zdroje se během zkoušky

Tab. 5 Výsledky měření fyzikálních materiálových konstant

Tab. 5 Results of the measurement of physical characteristics of the material

Parametr	Jednotka	NAC	RAC-50	RAC-100
objemová hmotnost ρ	[kg/m ³]	2 391	2 165	2 109
dynamický modul pružnosti v tahu E	[GPa]	12,1	11,1	9,0
rychlost šíření podélných vln c_L	[m/s]	2 246	2 274	2 038
ztrátový číselník η	[-]	0,021	0,023	0,023

Tab. 6 Rychlost šíření podélných vln a ztrátový číselník

Tab. 6 Values of the speed of the propagation of a longitudinal wave and the loss factor as shown in literature

Parametr	Jednotka	ČSN EN ISO 12354-1 [7]	Skriptá ČVUT a VUT [8], [9]
objemová hmotnost ρ	[kg/m ³]	2 200	2 300 – 2 500
rychlost šíření podélných vln c_L	[m/s]	3 800	3 162 – 3 286
ztrátový číselník η	[-]	0,005	0,005

vytvoří difuzní zvukové pole. Následně se v místnostech zdroje i příjmu měří průměrné hladiny akustického tlaku v rozsahu středních kmitočtů pásem 1/3 oktávy od 100 do 5 000 Hz. Neprůzvučnost se posléze stanoví ze vztahu:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{S}{A}, \quad (1)$$

kde L_1 je průměrná hladina akustického tlaku v místnosti zdroje [dB], L_2 průměrná hladina akustického tlaku v místnosti příjmu [dB], S plocha zkoušené dělicí konstrukce [m^2] a A ekvivalentní pohltivá plocha místnosti příjmu [m^2]. Výsledkem zkoušky je vážená laboratorní neprůzvučnost R_w a faktory přizpůsobení spektru C a C_{tr} , které jsou shrnuty v tab. 4. Graf na obr. 4 zobrazuje naměřené výsledky akustické neprůzvučnosti v celém rozsahu zvukoizolačního pásma (plné čáry) s posunutými směrnými křivkami (čárkované čáry) dle [6], které v pásmu 500 Hz stanovují váženou laboratorní neprůzvučnost konstrukce R_w . Svislé čárkované čáry vyznačují zvukoizolační pásmo směrných křivek.

Pro stanovení vážené stavební neprůzvučnosti R'_w je nutné od vážené laboratorní neprůzvučnosti R_w odečíst korekci přenosu zvuku vedlejšími cestami k_1 , která se pro dělicí konstrukci z monolitického železobetonu s těžkými bočními konstrukcemi uvažuje dle ČSN 73 0532 [5] hodnotou 2. Z průběhu naměřených křivek vyplývá, že největší rozdíl mezi prvkem z betonu s přírodním kamenivem a prvky z betonu s recyklovaným kamenivem nastává v okolí pásma 100 a 250 Hz, kde je neprůzvučnost betonu s přírodním kamenivem vyšší o přibližně 15, resp. 10 dB. Ve zbytku pásem se hodnoty liší minimálně a průběh je víceméně totožný. Výsledná vážená laboratorní neprůzvučnost konstrukcí s recyklovaným kamenivem se liší od referenční konstrukce o 3 dB. Ačkoliv je objemová hmotnost konstrukce z betonu RAC-100 o dalších 110 kg/m^3 nižší než konstrukce z betonu RAC-50, tento rozdíl

se v naměřené akustické neprůzvučnosti významně neprojevil, a proto je průběh posunutých směrných křivek s výslednou hodnotou vážené laboratorní vzduchové neprůzvučnosti totožný. Všechny tři konstrukce tak splňují požadavek na váženou stavební neprůzvučnost dle ČSN 73 0532 mezi dvěma obytnými místnostmi sousedních bytů, kde je stanovena mezní hodnota 53 dB. Železobetonové stěny byly zkoušeny bez dalších přidavných vrstev. V případě mezibytových stěn lze předpokládat, že by na stěnu byla z obou stran aplikována vrstva omítky, která by stěnu ještě zesílila a zlepšila tak vzduchovou neprůzvučnost celé konstrukce.

Fyzikální materiálové konstanty

Spolu s akustickou neprůzvučností železobetonových stěn byly stanoveny i fyzikální materiálové konstanty všech tří betonových směsí použitých v experimentu. Stanoven byl dynamický modul pružnosti betonu v tahu, rychlost šíření podélných vln materiálem a také ztrátový činitel. Parametry byly stanoveny vždy na třech tělesech o rozměrech $100 \times 50 \times 600 \text{ mm}$ rezonanční metodou podle postupu uvedeného v měřicí metodice P 04 0013 – VÚPS 22/548/79. Výsledky měření jsou shrnuty v tab. 5. Je nutné vzít v potaz, že zkoušená tělesa nebyla vyztužena, a proto se reálné hodnoty železobetonových stěn mohou od těch naměřených lišit. Cílem měření bylo ověřit vliv recyklovaného kameniva na tyto parametry vzhledem k jeho odlišným vlastnostem oproti kamenivu přírodnímu, a to zejména kvůli výskytu částic z nežádoucích materiálů, jako je např. dřevo.

Z výsledků je opět patrný negativní vliv recyklovaného kameniva na dynamický modul pružnosti. Při náhradě hrubé frakce recyklovaným kamenivem u receptury RAC-50 poklesla hodnota modulu o přibližně 8 %. U receptury se 100% podílem recyklovaného kameniva byl oproti referenční receptuře pokles modulu při-



5



6



7



8

5 Betonáž železobetonových testovacích stěn 6 Ošetřování vybetonovaných stěn 7 Nakládání stěn k transportu do laboratoře 8 Manipulace s betonovými stěnami v laboratoři TZÚS Teplice

5 Placing of concrete in the production of the reinforced concrete test-walls 6 Curing of the completed concrete walls 7 Handling of the concrete walls ready for transport to the laboratory 8 Handling of the concrete walls in the laboratory of TZÚS Teplice



9



10



11

9 Umístění betonové stěny mezi testovací místnosti 10 Pohled do jedné z testovacích místností před zkouškou 11 Vzorky pro zkoušku dynamického modulu pružnosti betonu v tahu a ztrátového činitele
9 Position of the concrete wall between the testing chambers 10 View into one of the testing chambers before the test 11 Samples for the testing of dynamic modulus of elasticity of concrete in tension and the determination of the loss factor

blíže 25 %. V porovnání se statickým modulem pružnosti byl vliv recyklovaného kameniva na dynamický modul pružnosti nižší. Rychlost šíření podélných vln se mezi měřenými vzorky ztlačením lišila pouze u receptury RAC-100, a to přibližně o 200 m/s. Ztrátový činitel stoupl u směsí s recyklátem o přibližně 9 %.

Mnohem důležitější rozdíl však nastává při srovnání naměřených hodnot rychlosti šíření podélných vln a ztrátového činitele s hodnotami udávanými literaturou. Naměřené hodnoty rychlosti šíření podélných vln jsou přibližně o jednu třetinu nižší. Naopak hodnoty ztrátového činitele jsou více než čtyřnásobné oproti hodnotám uvedeným v literatuře, a to i v případě betonu s přírodním kamenivem. Hodnoty uvedené ve skriptech pocházejí z roku 1998 a je tedy otázkou, zda jsou výsledky srovnatelné nejen z hlediska použité měřicí metody, ale také z hlediska složení betonu, vezmeme-li v úvahu vývoj technologie betonu od té doby. Naměřené výsledky však mohly být ovlivněny i povahou zkoušky, u které se počítá s dokonalým vetknutím v místě úchytu vzorku do měřicího zařízení. Míra vetknutí je závislá na rovinatosti povrchu v místě úchytu, která byla u jednoho povrchu zkušebních těles problematická, a to převážně z důvodu rozměrů zkušebních těles a hrubozrnné povaze betonových směsí.

Závěr

Předložený článek prezentuje výsledky experimentálního ověření akustické neprůzvučnosti železobetonových stěn vyrobených z betonu s 0%, 50% a 100% podílem recyklovaného

směsného kameniva získaného zpracováním stavebního a demoličního odpadu. Spolu s neprůzvučností byly stanoveny i základní mechanické parametry betonu a fyzikální materiálové veličiny popisující jeho další akustické vlastnosti.

Ačkoliv bylo pro výrobu betonu použito recyklované kamenivo s vysokým podílem jemných částic u drobné frakce a znečištěním dřevěnými třískami u frakce hrubé, výsledné parametry byly pro zamýšlenou konstrukci nosné dělicí stěny bytového objektu vyhovující. Akustická neprůzvučnost se při použití recyklovaného kameniva snížila o 3 dB, a to při nahrazení přírodního kameniva z 50 i 100 % kamenivem recyklovaným. Ve všech případech byly při uvažovaných podmínkách splněny požadavky na zvukovou izolaci dle platných norem a lze očekávat i mírné zlepšení v případě aplikace návazných vrstev.

Změřené materiálové veličiny, rychlost šíření podélných vln a ztrátový činitel se neshodovaly s hodnotami uváděnými v literatuře. Rychlost šíření podélných vln byla u všech variant podhodnocena a ztrátový činitel naopak oproti literatuře nadhodnocený. Zkoušky by tak bylo vhodné v budoucnu zopakovat a ověřit, zda změřené výsledky stále odpovídají těm doporučeným.

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení Studentské grantové soutěže ČVUT pod projektem č. SGS22/032/OHK1/1T/11.



Ing. Zdeněk Hlavsa
Fakulta stavební ČVUT v Praze
& TBG METROSTAV s.r.o.
zdenek.hlavsa@tbg-beton.cz

Literatura:

- [1] ČSN 73 0532. *Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních konstrukcí a výrobků – Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [2] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [3] ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [4] HLAVSA, Z., COUFAL, R., VÍTEK, J. L. Použití recyklovaného kameniva do betonu. *Beton TKS*. 2022, roč. 22, č. 1, s. 46–49.
- [5] ČSN EN ISO 10140-2. *Akustika – Laboratorní měření zvukové izolace stavebních konstrukcí – Část 2: Měření vzduchové neprůzvučnosti*. Praha: ÚNMZ, 2022.
- [6] ČSN EN ISO 717-1. *Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [7] ČSN EN ISO 12354-1. *Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi*. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [8] KAŇKA, J., NOVÁČEK, J., ŽÍKA, J. *Stavební fyzika 3. Akustika pozemních staveb*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-05674-5.
- [9] VAVERKA, J. *Stavební fyzika 1. Urbanistická, stavební a prostorová akustika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 978-80-214-1283-5.

POKUSNÁ BETONÁŽ VRTANÝCH PILOT Z BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM

Zdeněk Hlavsa, Robert Coufal, Jan Kubr, Jan Šperger

Příspěvek prezentuje výsledky pokusné betonáže dvou vrtaných pilot, pro jejichž provedení byla použita betonová směs s 15% a 50% náhradou přírodního kameniva recyklovaným smíšeným hrubým kamenivem. V rámci pokusu byly ověřeny základní parametry čerstvého a ztvrdlého betonu, chování betonové směsi při betonáži a výsledná kvalita pilot. Hotové konstrukce byly za použití dvou metod podrobeny zkouškám integrity pilot a po celé jejich délce byly provedeny zkušební vývrty pro ověření pevnosti betonu v tlaku v různých hloubkách.

TRIALS OF CONCRETE BORED PILES USING RECYCLED AGGREGATE

This contribution presents results of an experimental concreting of two bored piles, where concrete mixes with a replacement ratio of 15 % and 50 % of natural aggregate by recycled mixed coarse aggregate were used. Basic properties of fresh and hardened concrete were checked, together with the behaviour of the fresh concrete during its placing and the final quality of the piles. Integrity tests were carried out using two different methods on both piles. In addition, cores bored through the entire length of the piles were collected and the compressive strength of the concrete was tested at different depths of the piles.

Na pokusu spolupracovaly společnosti

Metrostav a.s. Divize 5 – hlavní zhotovitel stavby
Zakládání staveb, a.s. – subdodavatel hlubinného zakládání
TBG METROSTAV s.r.o. – dodavatel betonových směsí s recyklovaným kamenivem
SQZ, s.r.o. – akreditovaná zkušební laboratoř

V posledních letech stále více výrobců betonu uvádí na trh betonové směsi s obsahem recyklovaného kameniva. Zhotovitelé staveb se tyto směsi snaží začleňovat do probíhajících i připravovaných projektů, a to ať již na popud dodavatelů betonu, kteří chtějí nabídnout ekonomicky výhodnější a environmentálně šetrnější alternativu, nebo i z vlastní iniciativy s cílem redukovat náklady anebo jít naproti přisňujícím se požadavkům na posuzování vlivu stavby na životní prostředí. Zatímco výzkumné práce ověřují vliv recyklovaného kameniva na vlastnosti betonu ze všech možných úhlů pohledu, je zároveň zapotřebí provádět i pokusné betonáže menších i větších rozměrů, které ověří chování těchto směsí na reálných konstrukcích. Jedním z takových pokusů, jenž proběhl 12. dubna 2022, bylo ověřování chování betonové směsi s hrubým recyklovaným smíšeným kamenivem při použití do konstrukcí vrtaných pilot.

Cíl a průběh pokusu

V rámci pokusu byly provedeny dvě zkušební vrtané piloty, pro jejichž zabetonování byl použit beton s 15% a 50% náhradou přírodního kameniva hrubým recyklovaným smíšeným kamenivem. Hlavním cílem pokusu by-

lo ověřit integritu pilot po celé jejich délce a odhalit potenciálně závadná místa v průřezu piloty, kterými mohou být kaverny a dutiny, předměty s modulem pružnosti výrazně odlišným od betonu, pracovní spáry ad. Současně se během betonáže ověřovalo, zda nedochází důsledkem hydrostatického tlaku k vytlačování lehčích materiálů (např. dřeva, plastů, plynosilikátů, ale i cihel) k hlavě piloty, příp. zda nedochází ke krvácení betonu a odlučování vody. Riziko znečištění recyklovaného kameniva nežádoucími materiály, které mohou způsobovat výše uvedené problémy, je poměrně vysoké. Důvodem znečištění může být nedostatečná kázeň při demolici a třídění materiálů na stavbě, ale také během procesu výroby recyklovaného kameniva, resp. při jeho manipulaci během transportu. Integrita pilot byla zkoušena dvěma metodami: pile integrity test (PIT) a cross hole analyzer test (CHA). Po provedení zkoušek integrity pilot byly odebrány vývrty po celé délce pilot, ze kterých se následně vyrobila válcová tělesa o rozměrech 72 × 140 mm pro zkoušky pevnosti betonu v tlaku. Během pokusu byly ověřeny základní vlastnosti čerstvého betonu a byla vyrobena tělesa pro zkoušky ztvrdlého betonu na betonárně i na stavbě.

Pokusná betonáž proběhla na staveništi nového úseku dálnice D6 u obce Krupá. Piloty byly navrženy o průměru 880 mm a délce 8 m. Betonáž pilot proběhla do vrtů zapažených ocelovými pažnicemi systémem betonáže pod vodou přes licí roury. Beton byl specifikován dle [1] a [2] v pevnostní třídě C25/30, stupni vlivu prostředí X0, XC1–4, XD1, XF1 a XA1, s předepsanou konzistencí S4 a dobou zpracovatelnosti minimálně 120 min. Pro zabetonování jedné piloty byl použit beton s 15% obsahem hrubého recyklovaného smíšeného kameniva z celkového obsahu kameniva v betonu. U druhé piloty byla celá hrubá složka přírodního kameniva (50 % z celkového obsahu kameniva) nahrazena hrubým recyklovaným smíšeným kamenivem. Výroba betonu proběhla na betonárně společnosti TBG Metrostav v Radlicích, odkud byl beton převezen na stavbu.

V obou betonových směsích byl použit portlandský smíšený cement CEM II/B-S 32,5 R z cementárny Radotín v množství 375 kg, které udává příloha D normy ČSN EN 206+A2 pro betonáž do vody. Jako příměs byl použit popílek. Recyklované smíšené kamenivo frakce 8–16 mm použité pro náhradu hrubého přírodního kameniva pochází ze stavebního a demoličního odpadu bývalých pekáren Odkolek v pražských Vysočanech, výrobcem recyklovaného kameniva byla společnost Metrostav Divize 3.

Z pravidelných zkoušek prováděných na betonárně se průměrná objemová hmotnost recyklovaného kameniva pohybuje okolo 2 480 kg/m³, nasákavost okolo 7 % a obsah jemných částic 1,7 %.

Pro ověření kvality betonu byly na betonárně odebrány vzorky pro zkoušky čerstvého betonu i pro výrobu těles pro zkoušky ztvrdlého betonu. Po namíchání byla změřena konzistence čerstvého betonu zkouškou dle ČSN EN 12350-2 a objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6. Následně byla vyrobena tělesa pro zkoušky krychelné pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 a pro stanovení maximálního průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 (krychle o hraně 150 mm), válcové pevnosti betonu v tlaku a statického modulu pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 (válcové těleso o průměru 150 a výšce 300 mm). Na stavbě pak byly odebrány vzorky pro zkoušku konzistence betonu a pro výrobu těles na zkoušku krychelné pevnosti betonu v tlaku, průsaku tlakovou vodou a válcové pevnosti betonu v tlaku.

Výsledky pokusu a vyhodnocení

Výsledky všech zkoušek provedených na betonárně i na stavbě jsou shrnuty v tab. 1. Obě betonové směsi splnily předepsanou specifikaci s dostatečnou rezervou. Směs s vyšším podílem recyklovaného kameniva dosáhla dle očekávání horších vlastností. Krychelná pevnost betonu klesla přibližně o 10 %, objemová hmotnost ztvrdlého betonu o 7 % a statický modul pružnosti o 19 %. Hloubka průsaku tlakovou vodou byla splněna u obou betonových směsí i pro nejpřísnější požadavek 20 mm. Pevnost betonu v tlaku na krychli i na válci se u směsi s vyšším podílem recyklovaného kameniva mezi betonárnou a stavbou značně liší. Tento rozdíl mohl být způsoben odebráním vzorku betonu k výrobě těles ze začátku bubnu automíchávací, kde směs nemusela být homogenně promíchána. Určitý vliv mohl mít i způsob odebrání vzorků a výroby těles přítomnými pracovníky.

Výsledky zkoušky integrity pilot stanovené metodou CHA jsou prezentovány na obr. 1 a 2. Obě piloty jsou homogenní, bez ztelných závad po celé

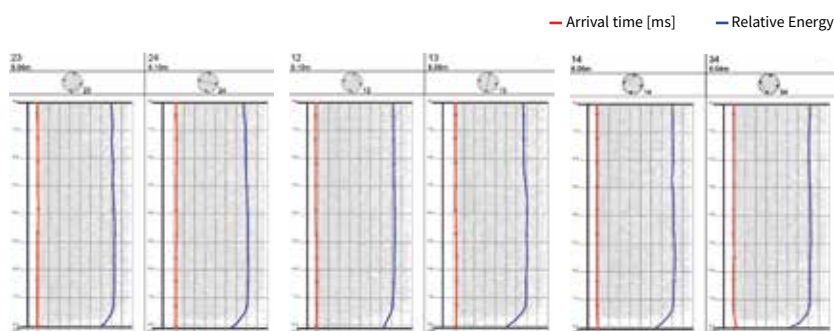
Tab. 1 Vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu

Tab. 1 Properties of fresh and hardened concrete

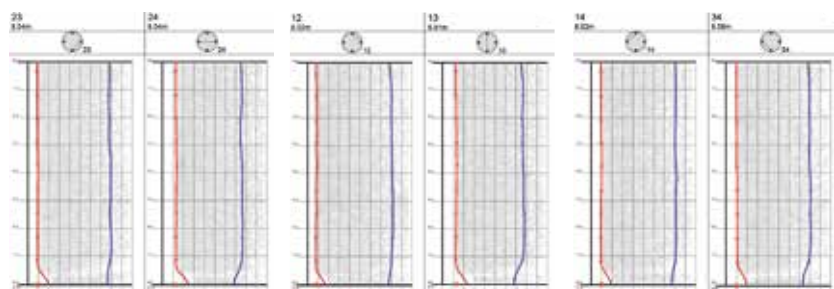
Vlastnosti betonu	Jednotka	Beton s 15% náhradou kameniva		Beton s 50% náhradou kameniva		
pevnostní třída		C25/30				
stupně vlivu prostředí		XC4, XD2, XF1, XA1				
obsah cementu	[kg/m ³]	375				
vodní součinitel	[-]	0,4		0,43		
podíl recyklovaného kameniva z celkového obsahu kameniva v směsi	[%]	15		50		
množství recyklovaného kameniva v betonové směsi	[kg/m ³]	228		706		
Zkoušky čerstvého i ztvrdlého betonu		Odběr na betonárně	Odběr na stavbě	Odběr na betonárně	Odběr na stavbě	
sednutí kužele	[mm]	210	220	230	210	
objemová hmotnost ČB	[kg/m ³]	-	2 320	-	2 160	
pevnost v tlaku	7 d	[MPa]	34,8	34,8	32,8	30,4
			51,2	51,1	43,2	37,5
			48,5	-	44,8	-
			50,0	-	45,1	-
objemová hmotnost ZB	[kg/m ³]	2 320	2 310	2 180	2 140	
válcová pevnost v tlaku	[MPa]	44,3	42,4	41,4	31,1	
modul pružnosti – 28 dní	[GPa]	33,2	39,2	27	24,1	
maximální průsak – 28 dní	[mm]	13	8	14	7	

své délce ve všech měřených průřezích. Jediná nevýznamná imperfekce homogenity betonu byla zaznamenána na patě piloty, kde byly zjištěny stopy znečištění betonu zeminou z počvy vrtu. Nicméně tento problém nesouvisí s kvalitou betonu nebo závadou v průběhu betonáže. Obdobně ani stanovení integrity pilot metodou PIT neprokázalo zjevné závady.

Vývrty z pilot zhotovené pro kontrolu pevnosti betonu v tlaku na několika místech po délce pilot jsou zobrazeny na obr. 3. Po celé délce vývrtů nejsou místa se zjevnými známkami segregace kameniva nebo výskytem kaveren či pracovních spár. Výsledky jednotlivých zkoušek pevnosti betonu v tlaku jsou uvedeny v tab. 2. Z výsledků plyne, že pevnost v tlaku po celé délce pilot spl-



1 Výsledky zkoušky integrity piloty z betonové směsi s 15% podílem RCK (měřeno metodou CHA)
1 Results of an integrity test of a pile with 15 % content of coarse recycled aggregate



2 Výsledky zkoušky integrity piloty z betonové směsi s 50% podílem RCK (měřeno metodou CHA)
2 Results of an integrity test of a pile with 50 % content of coarse recycled aggregate



3 a) Vývrt z piloty z betonu s 15% náhradou recyklovaného kameniva po odebrání na stavbě, **b)** vývrty z obou pilot (s 15% i 50% náhradou kameniva RCA) převezené do laboratoře SQZ na Rohanském ostrově, **c)** vyznačení míst pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku **4** Hrubé recyklované směsné kamenivo **5** Betonáž zkušebních pilot na staveništi dálnice D6 u obce Krupá

3 a) Cores of a pile made of concrete with 15 % content of recycled aggregate after their extraction on the construction site, **b)** cores of both piles (with 15 % and 50 % of RCA) in the laboratory of SQZ at Rohanský ostrov, **c)** markings for the locations where cores for compressive strength of concrete along the pile's length were extracted **4** Coarse recycled mixed aggregate **5** Concreting of trial piles at the D6 highway construction site near Krupá

Tab. 2 Pevnosti betonu v tlaku na vývrtech zkušebních pilot

Tab. 2 Strength of concrete in compression measured on cores extracted from the piles

Vlastnosti betonu na vývrtnu 72 × 140 mm v hloubce	Beton s 15% náhradou kameniva		Beton s 50% náhradou kameniva	
	pevnost v tlaku [MPa]	objemová hmotnost [kg/m ³]	pevnost v tlaku [MPa]	objemová hmotnost [kg/m ³]
1 m	32,3	2 270	33,2	2 140
3 m	41,5	2 330	36,5	2 160
5 m	40,6	2 310	34,8	2 200
7 m	40,5	2 350	31,8	2 190



ňuje požadovanou pevností třídu. S výjimkou hlavy piloty z betonu s nižší dávkou recyklovaného kameniva, kde byla v hloubce 1 m zjištěna nižší pevnost betonu v tlaku než ve zbytku zkušebních míst, je pevnost v tlaku po celé délce zkušebních pilot bez dalších výraznějších výkyvů. Nižší pevnosti v tomto místě odpovídá i nižší objemová hmotnost betonu, což mohlo být způsobeno vyšším množstvím vzduchových pórů, které se nashromáždily u hlavy piloty během betonáže a nedokázaly se dostat z čerstvého betonu ven. Obdobně byla zjištěna nižší objemová hmotnost na stejném místě i u piloty z betonu s 50% podílem recyklovaného kameniva.

Závěr

Příspěvek prezentuje výsledky pokusné betonáže vrtaných pilot za použití betonu s hrubým recyklovaným směsným kamenivem v dávkách 15 a 50 % z celkové dávky kameniva ve směsi. Specifikované vlastnosti be-

tonu prokázaly zkoušky čerstvého i ztvrdlého betonu na betonárně i na stavbě. U obou pilot byla ověřena jejich integrita pomocí dvou zkušebních metod. Zkoušky prokázaly, že ani u jedné z pilot nedošlo k závažným vadám na konstrukci způsobeným kvalitou betonu. Tyto výsledky byly podpořeny i vývrty provedenými po celé délce pilot, na kterých nebyly vidět známky segregace kameniva ani jiná závadná místa. Zkoušky pevnosti betonu v tlaku na vývrtech v hloubkách 1, 3, 5 a 7 m potvrdily specifikovanou pevnost betonu.

Zkušební betonáž pilot podporuje možnost využití betonu s hrubým recyklovaným směsným kamenivem i pro tento druh konstrukcí. Použití betonu s 15% podílem recyklovaného kameniva z celkového obsahu kameniva nepředstavuje v zásadě žádná omezení a lze tvrdit, že výsledné piloty jsou srovnatelné s těmi z běžného betonu s přírodním kamenivem. Při na-

hrazení celé hrubé složky kameniva hrubým recyklovaným směsným kamenivem je nutné brát v potaz pokles modulu pružnosti, který může být nižší až o 30 %. Nicméně při betonáži pilot nedocházelo k segregaci ani krvácení betonu a výsledná konstrukce nevykazovala žádná problematická místa.

Příspěvek byl podpořen z projektu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS22/032/OHK1/1T/11.



Ing. Zdeněk Hlavsa
Fakulta stavební ČVUT v Praze
& TBG METROSTAV s.r.o.
zdenek.hlavsa@tbg-beton.cz



Ing. Robert Coufal
TBG METROSTAV s.r.o.
robert.coufal@tbg-beton.cz



Ing. Jan Kubr
Metrostav a.s.
Divize 5
jan.kubr@metrostav.cz



Ing. Jan Šperger
Zakládání staveb, a.s.
sperger@zakladani.cz

MOŽNOSTI NÁHRADY PŘÍRODNÍHO DROBNÉHO TĚŽENÉHO KAMENIVA V BETONU RECYKLOVANÝM KAMENIVEM:

EXPERIMENTÁLNÍ A ENVIRONMENTÁLNÍ VYHODNOCENÍ

Tereza Pavlů, Kristina Fořtová, Jan Pešta, Jakub Řepka, Tomáš Vlach

Článek se věnuje potenciálu použití drobného recyklovaného kameniva jako náhrady přírodního drobného kameniva při výrobě betonu. Během provedeného experimentu byla v konvenčním betonu dvou pevnostních tříd kompletně nahrazena drobná frakce těžného kameniva (0–4 mm) drobným recyklovaným kamenivem. Fyzikální a mechanické vlastnosti a trvanlivost těchto směsí byly srovnávány s referenčními směsmi, které obsahovaly pouze přírodní kamenivo. Výsledky ukázaly mírný pokles mechanických vlastností a trvanlivosti betonu s náhradou přírodního písku, nejvyšší pokles lze pozorovat u modulu pružnosti a hloubky karbonatace. Pomocí metody LCA bylo provedeno environmentální vyhodnocení, při němž se projevil pozitivní dopad této náhrady.

POSSIBILITIES OF REPLACING NATURAL SAND IN CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATE: EXPERIMENTAL AND ENVIRONMENTAL EVALUATION

This study explores the potential of using fine recycled aggregate to replace natural sand in concrete production. The natural aggregate's complete fine fraction (0–4 mm) was replaced with fine recycled aggregate in conventional concrete of two strength classes. The physical and mechanical properties and durability of these mixtures were evaluated against reference mixtures that contained only natural aggregate. Results showed a slight decline in concrete's mechanical properties and durability with the substitution of natural sand. The highest decrease can be observed for the modulus of elasticity and carbonation depth. Furthermore, the impact of climate change was assessed by the LCA method and the positive impact of sand replacement was proved.

Spotřeba přírodního kameniva ve stavebním průmyslu je největší při výrobě betonu. Beton je zároveň běžně zcela závislý na primárních zdrojích, jako je písek, štěrk, cement a voda. Jedním z řešení, jak snížit negativní dopad výroby betonu na životní prostředí, je nahrazení přírodního kameniva (NA) recyklovaným kamenivem (RA). Použití recyklovaného kameniva (RA) v betonu je však často spojeno se zhoršením mechanických vlastností a trvanlivosti ve srovnání s běžným betonem (NAC).

Recyklované betonové kamenivo (RCA) obsahuje přírodní kamenivo v kombinaci s cementovou maltou. Vlastnosti a kvalita RCA jsou závislé na procesu demolice a recyklace,

včetně způsobu, rychlosti a počtu kroků drcení a prosévání [1–5], a zároveň jsou ovlivněny typem a velikostí přírodního kameniva v původním betonu a také jeho pevností. RCA se od přírodního kameniva odlišuje především tvarem zrna, který je více nepravidelný a hranatý, drsnou strukturou a porézností [6], [7], [8]. Použití drobného recyklovaného kameniva (fRA) (< 4 mm) v betonu s sebou nese ještě více komplikací v porovnání s hrubým recyklovaným kamenivem, a to především proto, že zatím nebyla jednoznačně vyvinuta metodika pro měření nasákavosti drobného recyklovaného kameniva a zároveň není známa jeho absorpční kapacita během míchání. To způsobuje nejistotu

při stanovení skutečného efektivního vodního součinitele. V rámci výzkumných studií bylo porovnáno celkem 15 variant ověření nasákavosti fRA a rozptyl výsledků je 4,5 až 270 % [9], [10]. Z tohoto důvodu ve většině zemí, ve kterých se povoluje využívat recyklované kamenivo do betonu, není povoleno využívat fRA.

Z hlediska dopadů na životní prostředí, především dopadu na změnu klimatu, bylo zjištěno, že výroba kameniva do betonu představuje pouze asi 15 % emisí z výroby a přepravy betonu [11–16]. Z hlediska úplné náhrady přírodního drobného těžného kameniva bylo zjištěno snížení emisí CO₂ pouze o 2 % [9], což se v porovnání s výrobou cementu nebo do-



pravou může zdát jako nevýznamná část. Využití fRA v betonové směsi navíc představuje příliš mnoho neznámých týkajících se vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Na druhou stranu je nutné upozornit, že zásoby drobného těžného kameniva nejsou nekonečné [17] a těžba písku má celosvětově celkem významné dopady na životní prostředí, včetně eroze a poškozování krajiny.

Cílem této studie bylo ověřit mechanické vlastnosti a trvanlivost betonů, kde bylo přírodní drobné těžné kamenivo (fNA) plně nahrazeno drobným recyklovaným betonovým (fRCA) a cihelným (fRMA) kamenivem. Zároveň byly porovnány vlivy jednotlivých betonů na klimatické změny srovnávací metodou hodnocení životního cyklu (LCA), jako funkční jednotka byla zvolena stropní deska z vyztuženého betonu.

Materiály a metody

Pro ověření možného nahrazení přírodního drobného těžného kameniva drobným recyklovaným kamenivem bylo vyrobeno a testováno celkem šest betonových směsí ve dvou pevnostních třídách. Tři směsi obsahovaly 260 kg/m³ cementu CEM I 42,5 R, efektivní vodní součinitel byl 0,65 (směsi označené I) a tři směsi obsahovaly 300 kg/m³ cementu CEM I 42,5 R, efektivní vodní součinitel byl 0,55 (směsi označené II). Vždy byla vyrobena jedna referenční směs (NAC I, NAC II), která obsahovala pouze přírodní kamenivo o zrnitosti frakcí 0–4, 4–8 a 8–16 mm. Ve všech ostatních směsích se jako hrubé kamenivo (4–16 mm) použilo přírodní těžné kamenivo a jako drobné recyklované kamenivo (0–4 mm) betonový recyklát (směsi fRCAC I, fRCAC II) a cihelný recyklát (směsi fRMAC I, fRMAC II). Do směsí nebyly použity žádné přísady. Zpracovatelnost všech směsí byla shodná a odpovídala sedimentnímu kuželi S1. (obr. 1 a 2)

Ke zkoušce pevnosti v tlaku byla použita zkušební tělesa – krychle o hraně 150 mm dle EN 12390-3 (2003). Pro testování pevnosti v tahu za ohybu dle EN 12390-5 (2009), statického modulu pružnosti dle EN 12390-13 (2014), dynamického modulu pružnosti dle EN 12504-4 (2005), mrazuvzdornosti dle ČSN 73 1322 (1969) a odolnosti



1 Přírodní kamenivo (NA): a) frakce 0–4 mm, b) frakce 4–8 mm, c) frakce 8–16 mm **2** Recyklované kamenivo (RA): a) betonový recyklát, b) cihelný recyklát

1 Natural aggregate (NA): a) fraction 0–4 mm, b) fraction 4–8 mm, c) fraction 8–16 mm **2** Recycled aggregate (RA): a) concrete aggregate, b) masonry aggregate

vůči karbonatci dle ČSN EN 12390-12 byly použity trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm.

Vlastnosti kameniva použitého pro betonáž a navržené směsi

Recyklované kamenivo pocházelo z recyklačního střediska v ČR. Bylo vyrobeno z předtříděného stavebního a demoličního odpadu (betonu a zdiva) a drceno, nežádoucí materiály byly odseparovány pomocí vody. Laboratorně byly ověřeny vlastnosti recyklovaného kameniva, které jsou zásadní pro návrh směsi, a to zrnitost, objemová hmotnost a nasákavost.

Nasákavost byla testována metodou popsanou v ČSN EN 1097-6, přestože dosud nebyla jednoznačně prokázána vhodnost této metody pro drobné recyklované kamenivo. Dále byl pro návrh směsi měřen aktuální obsah vody v kamenivu (vysušením v sušárně do ustálené hmotnosti) pro určení množství vody pro přednasáknutí kameniva a odhad efektivního vodního součinitele. Vlastnosti NA a RA použitého v této studii jsou uvedeny v tab. 1.

Dle ověřených vlastností byly navrženy betonové směsi, pro návrh receptury byla použita Bolomeyova křivka ideální zrnitosti (tab. 2).

Tab. 1 Vlastnosti použitého kameniva
Tab. 1 Properties of the used aggregate

Typ kameniva		Frakce [mm]	Obsah jemných částic f [%]	Objemová hmotnost – vysušená ρRD [kg/m ³]	Nasákavost WA24 [%]	Obsah vody [%]
NA	přírodní kamenivo	0–4	0,3	2 570 ± 81	1,0 ± 0,0	0,0
		4–8	0,3	2 530 ± 12	1,7 ± 0,3	0,0
		8–16	0,4	2 540 ± 12	1,9 ± 0,2	0,0
fRCA	drobné recyklované betonové kamenivo	0–4	0,6	2 430 ± 60	3,6 ± 0,8	1,6
fRMA	drobné recyklované cihelné kamenivo	0–4	1,0	2 320 ± 130	6,6 ± 0,8	4,7

Tab. 2 Receptury betonových směsí na 1 m³
Tab. 2 Concrete mixtures per 1 m³

Betonová směs	Cement [kg/m ³]	Záměsová voda + voda na přednasáknutí [kg/m ³]	Vodní součinitel [-]	Odhadnutý efektivní vodní součinitel [-]	Přírodní kamenivo		Recyklované kamenivo
					drobné [kg/m ³]	hrubé [kg/m ³]	drobné [kg/m ³]
NAC I	260	169 + 0	0,65	0,65	709	1 130	0
fRMAC I	260	169 + 18	0,72	0,65	0	766	971
fRCAC I	260	169 + 17	0,71	0,65	0	949	843
NAC II	300	165 + 0	0,55	0,55	671	1 167	0
fRMAC II	300	165 + 17	0,61	0,55	0	822	920
fRCAC II	300	165 + 16	0,60	0,55	0	994	800

Výsledky a diskuze

Objemová hmotnost betonů s drobným recyklovaným kamenivem vykazovala mírný pokles v porovnání s referenční variantou, maximální pokles byl 7 % pro směs s fRMA. Nasákavost betonu s fRA byla vyšší než u referenčních směsí, maximální nárůst byl o 85 % u směsi s fRMA, které obsahovaly vysoce porézní materiály, jako jsou cihly, pórobeton a malta. Nárůst nasákavosti byl pro obě třídy betonu stejný.

Efekt použití fRMA v betonové směsi byl pro obě třídy betonu podobný – pevnost v tlaku se snížila o 10, resp. 15 %. Naproti tomu úplná náhrada NA za fRCA ovlivnila pevnost v tlaku pouze minimálně. U směsi s vyšším množstvím cementu došlo k poklesu pouze o 4 % a u směsi s nižším množstvím cementu byl oproti referenční směsi zjištěn dokonce nárůst pevnosti o 3 %. Pevnost v tahu za ohybu u všech betonových směsí s fRA ve srovnání se směsí s NA klesla. K nejvýraznějšímu snížení došlo u směsi s fRCA a vyšším obsahem cementu, a to o 13 %. Statický a dynamický modul pružnosti vykazoval podobný trend. Všechny směsi s fRA vykázaly pokles vlastností ve srovnání s referenční směsí, přičemž pokles u směsi s fRMA byl výraznější (39 a 31 %) než u směsi s fRCA (19 a 14 %). Hodnoty dynamického modulu pružnosti byly mírně vyšší než hodnoty statického modulu pružnosti s maximálním rozdílem 18 % pro směs fRMAC 1. Z hlediska mrazuvzdornosti výsledky pevnosti v tahu za

ohybu měřené před a po zmrazování neukazovaly významný pokles, u dvou směsí dokonce došlo k mírnému nárůstu. Z měření dynamického modulu pružnosti před a po zmrazování (100 zmrazovacích cyklů) vyplynul mírný pokles, maximálně však 13 %, což stále splňuje požadavky na mrazuvzdornost, tj. pokles do 25 %. Odolnost vůči karbonataci betonu byla vyhodnocena jako poměr k referenční směsi a z výsledků bylo patrné zvýšení hloubky karbonatace až na více než 2,5násobek. Fyzikální a mechanické vlastnosti a trvanlivost jsou uvedeny v tab. 3. Vývoj pevnosti v tlaku pak v grafu na obr. 3.

Dopady na klimatické změny

Dopady na klimatické změny byly vyhodnoceny metodou LCA pomocí indikátoru změny klimatu popisujícího vliv na globální oteplování (graf na obr. 4.). Jako funkční jednotka byla stanovena stropní deska navržená na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Do posouzení na mezní stav únosnosti (MSÚ) vstupovaly výsledky pevnosti v tlaku a do posouzení na mezní stav použitelnosti (MSP) výsledky modulu pružnosti. Případný pokles vlastností byl kompenzován zesílením stropní desky (MSÚ) a navýšením stupně vyztužení (MSP). Výsledky ukazují pozitivní vliv nahrazení přírodního drobného kameniva fRCA, důvodem je především minimální pokles mechanických vlastností a pozitivní dopad recyklace oceli z původních železobetonových

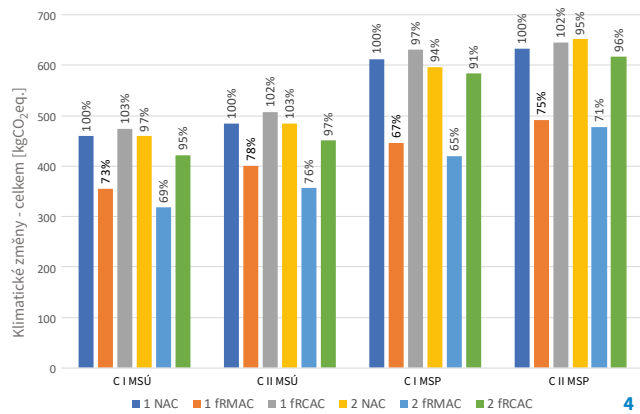
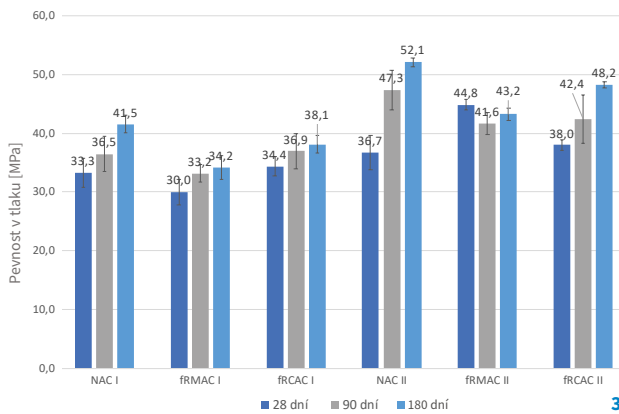
Tab. 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti betonů

Tab. 3 Mechanical and physical properties of concrete

Betonová směs		NAC I	fRCA I	fRMA I	NAC II	fRCA II	fRMA II	
objemová hmotnost – vysušená	[kg/m ³]	2241 ± 18	2195 ± 11	2080 ± 14	2269 ± 13	2206 ± 5	2115 ± 12	
nasákavost	[%]	5,89 ± 0,35	7,68 ± 0,25	10,89 ± 0,38	5,03 ± 1,11	7,70 ± 0,06	10,30 ± 0,32	
pevnost v tlaku	28 dní	33,3 ± 2,5	34,4 ± 1,7	30,0 ± 2,2	44,8 ± 0,9	42,8 ± 0,8	38,0 ± 0,9	
	90 dní	36,5 ± 3,0	37,0 ± 3,0	33,2 ± 1,5	47,4 ± 3,3	42,4 ± 4,1	40,6 ± 1,8	
	180 dní	41,5 ± 1,5	38,1 ± 1,5	34,2 ± 2,0	52,1 ± 0,7	48,2 ± 0,5	43,2 ± 1,1	
pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	6,2 ± 0,2	5,8 ± 0,3	5,5 ± 0,4	7,6 ± 0,9	6,5 ± 0,4	6,8 ± 0,6	
modul pružnosti	statický	[GPa]	36,7 ± 1,4	29,6 ± 0,4	22,4 ± 1,0	35,9 ± 0,5	31,4 ± 1,0	25,3 ± 0,2
	dynamický	[GPa]	38,2 ± 1,8	34,5 ± 0,7	27,3 ± 1,4	38,2 ± 0,8	35,7 ± 0,6	30,0 ± 0,9
index mrazuvzdornosti (100 zmrazovacích cyklů)	pevnost v tahu za ohybu	[-]	1,12	1,14	1,06	1,03	1,03	0,99
	dynamický modul pružnosti	[-]	0,98	0,89	0,98	0,87	0,88	0,88
hloubka karbonatace – vztah k referenci	[-]	1,00	1,62	2,55	1,00	0,74	2,22	

Literatura:

- [1] DE JUAN, M. S., GUTIÉRREZ, P. A. Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate. *Constr. and Build. Mater.* 2009, Vol. 23, Issue 2, pp. 872–877. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- [2] AKBARNEZHAD, A., ONG, K. C. G. 10 - Separation Processes to Improve the Quality of Recycled Concrete Aggregates (RCA). In: PACHECO-TORGAL, F., TAM, V. W. Y., LABRINCHA, J. A., DING, Y., BRITO, J. D., eds. *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2013, pp. 246–269. ISBN 978-0-85709-682-1.
- [3] FAN, C.-C., HUANG, R., HWANG, H., CHAO, S.-J. Properties of Concrete Incorporating Fine Recycled Aggregates from Crushed Concrete Wastes. *Constr. and Build. Mater.* 2016, Vol. 112, pp. 708–715. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154.
- [4] FLOREA, M. V. A., BROUWERS, H. J. H. Properties of Various Size Fractions of Crushed Concrete Related to Process Conditions and Re-Use. *Cem. and Concr. Res.* 2013, Vol. 52, pp. 11–21. DOI:10.1016/j.cemconres.2013.05.005.
- [5] EVANGELISTA, L., GUEDES, M., DE BRITO, J., FERRO, A. C., PEREIRA, M. F. Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Fine Recycled Aggregates Made from Concrete Waste. *Constr. and Build. Mater.* 2015, Vol. 86, pp. 178–188. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112.
- [6] EVANGELISTA, L., DE BRITO, J. Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates. *Cem. and Concr. Compos.* 2007, Vol. 29, Issue 5, pp. 397–401. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
- [7] EVANGELISTA, L., DE BRITO, J. Concrete with Fine Recycled Aggregates: A Review. *Eur. J. of Environ. and Civ. Eng.* 2014, Vol. 18, pp. 129–172. DOI:10.1080/19648189.2013.851038.
- [8] LI, Z., LIU, J., TIAN, Q. Method for Controlling the Absorbed Water Content of Recycled Fine Aggregates by Centrifugation. *Constr. and Build. Mater.* 2018, Vol. 160, pp. 316–325. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.068.
- [9] NEDELJKOVIĆ, M., VISSER, J., ŠAVIJA, B., VALČEK, S., SCHLANGEN, E. Use of Fine Recycled Concrete Aggregates in Concrete: A Critical Review. *J. of Build. Eng.* 2021, Vol. 38, 102196. DOI:10.1016/j.job.2021.102196.
- [10] SOSA, M. E., VILLAGRÁN ZACCARDI, Y. A., ZEGA, C. J. A Critical Review of the Resulting Effective Water-to-Cement Ratio of Fine Recycled Aggregate Concrete. *Constr. and Build. Mater.* 2021, Vol. 313, 125536. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125536.
- [11] KURDA, R., SILVESTRE, J. D., DE BRITO, J. Toxicity and Environmental and Economic Performance of Fly Ash and Recycled Concrete Aggregates Use in Concrete: A Review. *Heliyon* 2018, 4, e00611. DOI:10.1016/j.heliyon.2018.e00611.
- [12] BRAUNSCHWEIG, A., KYTZIA, S., BISCHOF, S. Recycled Concrete: Environmentally Beneficial Over Virgin Concrete? In: LCM 2011 – Towards Life Cycle Sustainability Management. Berlin, Germany, 2011.
- [13] MARINKOVIĆ, S., DRAGAŠ, J., IGNJATOVIĆ, I., TOŠIĆ, N. Environmental Assessment of Green Concretes for Structural Use. *J. of Clean. Prod.* 2017, Vol. 154, pp. 633–649. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.04.015.
- [14] MARINKOVIĆ, S., RADONJANIN, V., MALEŠEV, M., IGNJATOVIĆ, I. Comparative Environmental Assessment of Natural and Recycled Aggregate Concrete. *Waste Manag.* 2010, Vol. 30, pp. 2255–2264. DOI:10.1016/j.wasman.2010.04.012.
- [15] TOŠIĆ, N., MARINKOVIĆ, S., DAŠIĆ, T., STANIĆ, M. Multicriteria Optimization of Natural and Recycled Aggregate Concrete for Structural Use. *J. of Clean. Prod.* 2015, Vol. 87, pp. 766–776. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.10.070.
- [16] FLOWER, D. J. M., SANJAYAN, J. G. Green House Gas Emissions Due to Concrete Manufacture. *Int. J. of Life Cycle Assess.* 2007, Vol. 12, pp. 282–288. DOI:10.1065/lca2007.05.327.
- [17] GODÁNY, J. Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a šterkopisků v ČR. *Beton TKS*. 2021, roč. 21. č. 1, s. 15–21.



3 Vývoj pevnosti v tlaku, měřeno ve stáří betonu 28, 90 a 180 dní **4** Výsledky klimatických změn pro betonovou desku navrženou na mezní stav únosnosti (MSÚ) a mezní stav použitelnosti (MSP) s kompenzací různou tloušťkou desky (1) a kompenzací různou úrovní vyztužení (2)

3 Long-term development of compressive strength of concrete mixtures after 28, 90 and 180 days 4 Results of climate change for concrete slab designed according to the load-bearing capacity (LBC) and serviceability limit state (SLS); the compensation by varying thickness of slab (1), the compensation by varying reinforcement level (2)

konstrukcí. Naopak použití fRMA, kde dochází k většímu zhoršení mechanických vlastností a chybí benefit z recyklace oceli, nedosahuje tak příznivých výsledků. Snížení emisí skleníkových plynů souvisejících se směsmi s plnou náhradou přírodního drobného kameniva fRCA je mezi 84 kg CO₂ ekv. a 141 kg CO₂ ekv. pro návrh založený na MSÚ a 140 kg CO₂ ekv. a 308 kg CO₂ ekv. pro návrh na základě MSP, který vykazuje pokles o 23 až 31 % a 22 až 35 %. V případě fRMA lze pozorovat podobný nebo mírně vyšší potenciální dopad na indikátor změny klimatu ve srovnání s referencí. Maximální nárůst byl 23 kg CO₂ ekv., což odpovídá 5 %. Z hlediska kompenzace zhoršení mechanických vlastností se jako výhodnější z pohledu dopadů na klimatické změny jeví navýšení stupně vyztužení oproti zvětšení tloušťky desky.

Závěr

Tato studie se zabývala možností náhrady přírodního drobného těženého kameniva drobným recyklovaným kamenivem, které pocházelo ze stavebního a demoličního odpadu. Kamenivo bylo upraveno speciální recyklační technologií v recyklačním středisku a dosahovalo tak nadstandardní kvality. Výsledky mechanických vlastností a trvanlivosti betonu se 100% náhradou přírodního drobného těženého kameniva tak neukazují významný pokles. Ten byl pozorován především u modulu pružnosti a hloubky karbonatice. Studie tedy ukazuje, že v případě využití kvalitního drobného recyklovaného kameniva náhrada přírodního drobného těženého kameniva v betonu možná je, a to především pro běžné třídy betonu. Výsledky dále ukázaly pozitivní dopady na životní prostředí, a to

nejen z pohledu snížení spotřeby přírodního drobného těženého kameniva, ale i dopadu na změnu klimatu.



Ing. Tereza Pavlů, Ph.D.
tereza.pavlu@cvut.cz



Ing. Kristina Fořtová, Ph.D.
kristina.fortova@cvut.cz



Ing. Jan Pešta
jan.pesta@svut.cz



Ing. Jakub Řepka
jakub.repka@cvut.cz



Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.
tomas.vlach@cvut.cz

všichni: ČVUT v Praze
Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

inzerce



MODERNÍ BETONY A KOMPOZITY

11. a 12. října 2023, Hotel Ski, Nové Město na Moravě

Druhý ročník mezinárodní konference pořádaný Fakultou stavební ČVUT v Praze.

Konference je zaměřena na sdílení informací a znalostí z oblasti nových a nastupujících technologií, materiálů, měřicích postupů a návrhových přístupů použitelných v oblasti stavebnictví a při formulaci nových typů kompozitních materiálů.

Více informací a přihláška www.silnicnispolecnost.cz



FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE

Kontakt:

d.pivodova@silnicnispolecnost.cz
+420 604 271 835

ČESKÁ SILNIČNÍ SPOLEČNOST



CZECH ROAD SOCIETY

NOVÉ DRUHY SMĚSNÝCH CEMENTŮ A JEJICH IMPLEMENTACE DO NOREM PRO BETON

Jan Gemrich, Vladimír Veselý

Článek obsahuje informaci o rozšíření počtu druhů směsných cementů prostřednictvím nově zavedené neharmonizované normy EN 197-5 a nastiňuje výhled dalšího rozšíření o cementy s novou hlavní složkou – jemným betonovým recyklátem – dle připravované předběžné neharmonizované normy FprEN 197-6. Článek obsahuje také informace o probíhajícím procesu implementace těchto nových cementů do národní dodatkové normy ČSN P 73 2404, která upřesňuje požadavky při jejich použití v ČR.

NEW TYPES OF COMPOSITE CEMENTS AND THEIR IMPLEMENTATION IN CONCRETE STANDARDS

The article provides information on the expansion of the number of types of composite cements through the newly introduced non-harmonised standard EN 197-5 and outlines the prospect of further expansion to include cements with a new main component – recycled concrete fines – according to the upcoming preliminary non-harmonised standard FprEN 197-6. The article also contains information on the ongoing process of implementation of these new cements into the national supplementary standard ČSN P 73 2404, which specifies the requirements for their use in the Czech Republic.

Schválený přechod stávajícího evropského systému pro obchodování s emisemi EU ETS (Emissions Trading System) s omezeným přidělem volných povolenek na emise skleníkových plynů pro výpal slínku při výrobě cementu na nový systém CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), který od roku 2026 zahájí každoroční snižování přidělu volných povolenek po dobu následujících cca 7 let, zesílil v posledních letech environmentální a s tím související ekonomické tlaky na optimalizaci samotného výpalu slínku, následně na výrobu cementu a v konečné fázi i na složení nabíze-

ného sortimentu cementů pro výrobu betonu.

Současně je však zapotřebí tuto konečnou fázi optimalizace sortimentu cementu považovat za počátek procesu stanovení dalších parametrů pro možnost obecného použití směsných harmonizovaných i neharmonizovaných cementů do betonů včetně postupů jejich zkoušení tak, aby vyhovely při použití v betonu postupně vlivu prostředí, pro které dosud obecná použitelnost konkrétních druhů stanovena není (např. v ČSN P 73 2404). Tak bude splněno ustanovení harmonizovaných i neharmonizovaných výrobních norem pro cement, aby byl výběr cementu, pokud jde o druh a pevnostní třídu, prováděn podle požadavků na trvanlivost betonu v místě jeho použití.

Potřeba reagovat na požadavky a vytyčené cíle v oblasti udržitelného rozvoje snižováním uhlíkové stopy, a to jak při výrobě cementu, tak i při výrobě betonu, vedla k intenzivní spolupráci mezi odbornými skupinami Svazu výrobců cementu ČR a Svazu výrobců betonu ČR. Svaz výrobců betonu ČR je navíc i centrem technické normalizace pro oblast betonu v České republice.

Tab. 1 Složení a obsah složek směsných cementů dle ČSN EN 197-5 tabulky 1 [1]

Tab. 1 Composition and content of main constituents of composite cements according to ČSN EN 197-5 Table 1 [1]

Hlavní druhy	Označení výrobků (druhy cementů)		Složení (poměry složek podle hmotnosti ^{a)})										doplňující složky	
			hlavní složky											
			slínek	vysokopecní struska	křemičitý úlet	pucolány		popílky		kalcinovaná břidlice	vápennec			
						přírodní	přírodní kalcinovaný	křemičité	vápenné		L ^{d)}	LL ^{d)}		
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L ^{d)}	LL ^{d)}					
CEM II	portlandský směsný cement ^{d)}	CEM II/C-M	50–64	36–50										0–5
CEM VI	směsný cement	CEM VI (S-P)	35–49	31–59	-	6–20	-	-	-	-	-	-	0–5	
		CEM VI (S-V)	35–49	31–59	-	-	-	6–20	-	-	-	-	0–5	
		CEM VI (S-L)	35–49	31–59	-	-	-	-	-	-	6–20	-	0–5	
		CEM VI (S-LL)	35–49	31–59	-	-	-	-	-	-	-	6–20	0–5	

Pozn.: ^{a)} Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.
^{b)} V případě použití křemičitého úletu je jeho obsah omezen od 6 do 10 % hmotnostních.
^{c)} V případě použití vápence je jeho obsah (součet L, LL) omezen od 6 do 20 % hmotnostních.
^{d)} Hlavní složky mimo slínek mohou být použity maximálně dvě a musí být deklarovány v značení cementu (viz příklad v kapitole 6 normy).

Stávající harmonizované a nové neharmonizované cementy

V září roku 2021 byla vydána neharmonizovaná norma EN 197-5 Cement – Část 5: Portlandský směsný cement CEM II/C-M a Směsný cement CEM VI [1]. Norma uvažuje výrobu cementů se sníženým obsahem slínku, tedy cementů více odpovídajících současným environmentálním požadavkům na snižování uhlíkové stopy. Norma nově obsahuje portlandský směsný cement CEM II/C-M, dosud nezahrnutý v harmonizované EN 197-1 [2], se sníženým obsahem slínku o 15 % oproti cementům CEM II/B-M. Dále zavádí odlišný druh cementu CEM VI se třemi přesně definovanými hlavními složkami. Ten má vyšší obsah slínku než cementy CEM III/B a CEM V/A a B a obsahuje přesně vymezený obsah vysokopeční strusky (tab. 1).

Vzhledem k tomu, že je tato norma neharmonizovaná, byl zahájen proces na její zařazení mezi normy zahrnuté do systému českých technických norem a zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky.

K dosud zavedeným 27 druhům portlandských cementů přibýlo tedy dalších 5. V tab. 2 je pro porovnání uveden obsah slínku a ostatních hlavních složek v jednotlivých druzích cementu. Z tab. 1 a 2 vyplývá, že u nově zavedených cementů CEM II/C-M a CEM VI došlo k snížení obsahu slínku

na úroveň v pásnu CEM III/A a k možnosti použít ve složení cementu více dalších hlavních složek.

Nové hlavní složky cementů

Zároveň je potřeba v budoucnosti počítat s další cementářskou neharmonizovanou normou, jejíž příprava již probíhá, a to FprEN 197-6 [3] Cement with recycled building materials s novou hlavní složkou cementu s označením F (fines – recycled concrete fines, volně přeloženo jako jemné částice recyklovaného betonu). Podíl této složky bude moci být až do 20 % obsahu cementu (tab. 3).

Normalizační proces by mohl být dokončen nejdříve na podzim 2023, ale již z názvu normy se dá předpokládat její rozšiřování o další recyklovatelné stavební materiály v rámci environmentálních principů cirkulární ekonomiky.

Dokončení normy nicméně nebude jednoduché s ohledem na zpracovávané připomínky (např. zavedení dalších sledovaných veličin – limitování obsahu látek nebetonového původu, zpřesnění definice nové hlavní složky fines, hodnocení obsahu jílovitých látek podle EN 933-9 zkouškou methylenovou modří, sledování obsahu alkálií v recyklovaném betonu ad.).

Tab. 2 Přehled obsahu hlavních složek v cementu dle platných standardů

Tab. 2 Overview of the content of the main constituents in cement according to the applicable standards

Hlavní druhy		Obsah hlavních složek % hm.		doplňující složky	Standard ČSN EN
		slínek	další hlavní složky ¹⁾		
CEM I	portlandský cement	95–100	0	0–5	197-1
CEM II/A-D	portlandský cement směsný	90–94	6–10	0–5	
CEM II/A		80–94	6–20	0–5	
CEM II/B		65–79	21–35	0–5	
CEM II/C		50–64	36–50	0–5	197-5
CEM III/A	vysokopeční cement	35–64	36–65	0–5	197-1
CEM III/B		20–34	66–80	0–5	
CEM III/C		5–19	81–95	0–5	
CEM IV/A	pucolánový cement	68–89	11–35	0–5	
CEM IV/B		45–64	36–55		
CEM V/A	směsný cement	40–64	18–30	0–5	
CEM V/B		20–38	31–49	0–5	
CEM VI		35–49	31–59	0–5	197-5

Pozn.: ¹⁾ bez rozlišení jejich druhu

Tab. 3 Návrh složení cementu dle FprEN 197-6

Tab. 3 Design of cement composition according to FprEN 197-6

Hlavní druhy	Označení výrobků (druhy cementů)		Složení (poměry složek podle hmotnosti ^{a)})											doplňující složky
			hlavní složky											
			slínek	jemný betonový recyklát	vysokopeční struska	křemičitý úlet	pucolány		popílky		kalcinovaná břidlice	vápenec		
							přírodní	přírodní kalcinovaný	křemičitý	vápenné		L ^{c)}	LL ^{c)}	
Název druhu	Označení druhu	K	F	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L ^{c)}	LL ^{c)}		
CEM II	portlandský cement s jemným betonovým recyklátem	CEM II/A-F	80–94	6–20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
		CEM II/B-F	65–79	21–35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0–5
	portlandský směsný cement ^{d)}	CEM II/A-M	80–88	6–14					6–14					0–5
		CEM II/B-M	65–79	6–29					6–29					0–5
		CEM II/C-M	50–64	6–20					16–44					0–5
CEM VI	směsný cement	CEM VI	35–49	6–20	31–59	-	-	-	-	-	-	-	0–5	

Pozn.: ^{a)} Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.

^{b)} V případě použití křemičitého úletu je jeho obsah omezen od 6 do 10 % hmotnostních.

^{c)} V případě použití vápence je celkový obsah vápence a jemného betonového recyklátu (součet L, LL a F) omezen do 35 % hmotnostních.

^{d)} Hlavní složky mimo slínek mohou být použity maximálně dvě a musí být deklarovány v značení cementu (viz příklad v kapitole 6 normy).

V případě použití jak složky F, tak složky (L, LL) je počet hlavních složek jiných než slínek omezen na tři a tyto hlavní složky cementu musí být uvedeny v označení cementu.

Je zde namísto dodat, že přidávání recyklovaných složek je již v současnosti možné, a to např. hydraulických stavebních pojiv definovaných v normě ČSN EN 15368+A1.

Implementace cementů dle ČSN EN 197-5 do betonářských standardů

Srovnáme-li předmět harmonizované normy ČSN EN 197-1 [2], zahrnující 27 dlouhodobě používaných druhů cementů pro obecné použití, s předmětem neharmonizované ČSN EN 197-5 [1] a připravované FprEN 197-6 [3], které sortiment cementů doplňují o nové druhy, jde o výrobky se shodným určením, tedy pro výrobu stavebních materiálů na bázi hydraulického pojiva, kterým je cement.

Standards v úvodu obsahují důležitou poznámku ohledně výběru cementu pro konkrétní zamýšlené použití, a to že výběr cementu má být prováděn mimo jiné i s ohledem na:

- požadavky na trvanlivost podle stupňů vlivu prostředí a druhu konstrukce,
- příslušné normy a/nebo předpisy pro beton nebo maltu platné v místě použití.

To vychází ze skutečnosti, že i cement je jako pojivo vyráběn z místních surovin, byť obecně stejných, nicméně v konkrétních případech se lišících. Logicky je tedy obtížné, nebo možná i prakticky nemožné najít uni-

verzální parametry pro výrobu a složení cementu přenosné do obecných podmínek pro složení betonu.

Předpisem platným v místě použití betonu, který konkretizuje použití jednotlivých druhů cementu do betonu pro konkrétní vliv prostředí (stupně vlivu prostředí), je ČSN P 73 2404:2021 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace [4].

Používání složek pro výrobu betonu není jen záležitost technická či technologická. Výrobce betonu odpovídá i za bezpečnost výrobku ve smyslu příslušných nařízení EU, která jsou v ČR konkretizována zákonem č. 22/1997 Sb., v platném znění o technických požadavcích na výrobky. Evropská neharmonizovaná norma EN 206 v platném znění a ČSN 73 2404:2021, jako předpis platný v místě použití betonu, jsou vyhlášeny jako normy určené a při splnění podmínek a parametrů v nich uvedených se má za to, že beton je výrobek bezpečný.

První etapa návrhu

V první etapě implementace směsných cementů do předpisů byla provedena rešerše předpisů a postupů platných v okolních státech. Na základě této rešerše byla navržena zásadní změna současného postupu uvedeného v ČSN P 73 2404:2021, který vyžaduje ověření použitelnosti směsného cementu pro beton vystavený

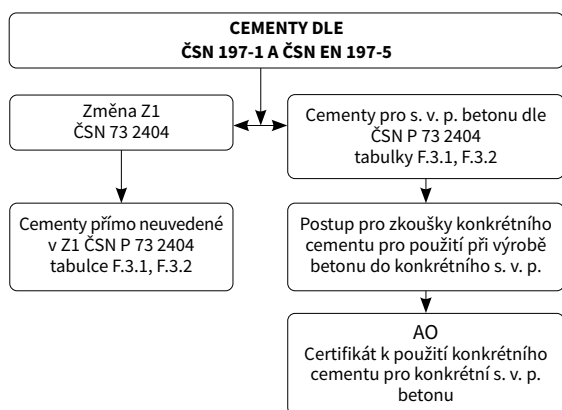
působení konkrétního vlivu prostředí formou průkazných zkoušek betonu. Nově navržený systém předpokládá ověření obecné použitelnosti cementu do betonů pro konkrétní stupně vlivu prostředí (s. v. p.) výrobcem cementu. Navržený postup je znázorněn na obr. 1. Tento postup byl následně zapracován do návrhu změny Z ČSN P 73 2401 a byl projednán. Obecná použitelnost cementu a použitelnost cementu podmíněná prokazováním je v tomto návrhu rozpracována do tabulky F.3.1 a F.3.2 (viz tab. 4 a 5).

Druhá etapa návrhu

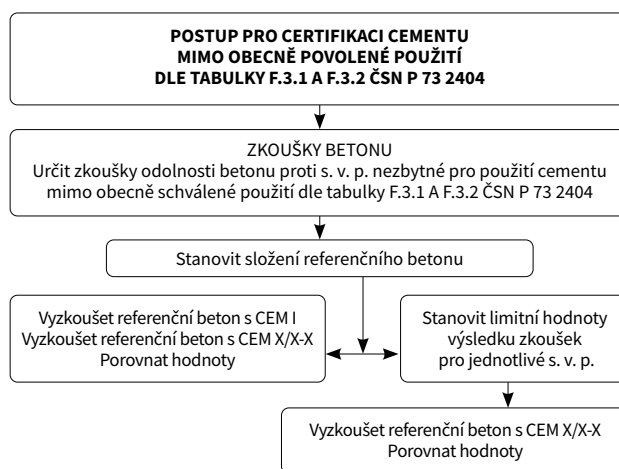
Druhá etapa implementace vychází z postupu pro certifikaci cementu mimo již obecně povolené použití, jehož schéma je uvedeno na obr. 2.

Během přípravy na návrh nové dodatkové certifikace cementů byla provedena řada zkoušek srovnávacích cementů CEM I a CEM II, které měly potvrdit nikoliv konkrétní výsledky, ale vhodnost navrženého postupu po vzoru německé certifikace Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung a v souladu s dokumentem Working Draft 10 EN 206 part 100 Exposure Resistance Classes. Rozsah zkoušek úvodního experimentu je uveden v tab. 6.

Výsledkem systémových zkoušek bude právě zpracovávaná samostatná příloha ČSN P 73 2404 popisující uvedený způsob dodatkové certifikace k již vydanému ověření podle TN 01.01.03.



1 Postup pro použití cementů do betonu dle ČSN EN 206+A2 dle předpisu platného v místě použití betonu – ČR (návrh 2022)
 1 Procedure for the use of cements in concrete according to ČSN EN 206+A2 in accordance with local conditions of concrete production – Czech Republic (draft 2022)



2 Postup pro certifikaci cementu mimo obecně povolené použití dle tabulky F.3.1 a F.3.2 ČSN P 73 2404
 2 Procedure for certification of cement outside the generally permitted uses according to Table F.3.1 and F.3.2 of ČSN P 73 2404

Tab. 4 Tabulka F.3.1: Oblast použití cementů dle ČSN EN 197-1 pro výrobu betonu dle ČSN P 73 2404 Z1

Tab. 4 Table F.3.1: Scope of application of cements according to EN 197-1 for concrete production according to ČSN P 73 2404 Z1

Cementy podle ČSN EN 197-1 ed. 2	Stupeň vlivu prostředí																		Kompatibilita s předpínací ocelí
	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	Koroze výztuže							Koroze betonu										
		koroze způsobená karbonátací				koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody			působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich				chemické působení			koroze vlivem mechanického působení (obrus)			
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2 ^{a)}	XA3 ^{a)}	XM1	XM2	XM3		
CEM I	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CEM II/A, B-S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CEM II/A-D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CEM II/A, B-P, Q	X	X	X	X	X	X	X	X	P	X	P	X	X	X	X	X	X	0	
CEM II/A, B-V	X ^{f)}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CEM II/A-W	X ^{f)}	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	0	
CEM II/B-W	X ^{f)}	P	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	0	
CEM II/A, B-T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CEM II/A-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^{b)}	X ^{b)}	X	X	X	X	
CEM II/B-LL	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	X	
CEM II/A-L	X	X	X	X	X	X	X	X	P	P	P	P	X ^{b)}	X ^{b)}	X	X	X	X	
CEM II/B-L	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	X	
CEM II/A- M ^{f),g)}	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	0	
CEM II/B- M ^{f),g)}	X	P	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	0	
CEM III/A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^{b)}	X	X	X	X	X	X	
CEM III/B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^{l)}	X	X	X	X	X	X	
CEM III/C	X	P	X	P	P	P	X	P	P	P	P	X	X	X	P	P	P	0	
CEM IV ^{f),g)}	X	P	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	0	
CEM V ^{f),g)}	X	P	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	0	

Použitelnost cementů – platí pro tab. 4 i tab. 5:

X – Použitelný pro daný stupeň vlivu prostředí.

P – Použití pro daný stupeň vlivu prostředí je možné pouze na základě příslušného schválení, a to tak, že výrobce/dodavatel předloží příslušný doklad, schválení či certifikát konkrétního výrobku pro konkrétní stupeň (stupně) vlivu prostředí dle tabulky F.3.1 nebo F.3.2 vydaný k tomu oprávněnou osobou.

0 – Pro výrobu betonu dle této normy není vhodnost obecně prokázána.

Poznámky ^{a)} až ^{l)} k tab. 4 a ^{a)} až ^{l)} k tab. 5 naleznete v on-line verzi článku na webu ebeton.cz

Tab. 5 Tabulka F.3.2: Oblast použití cementů dle ČSN EN 197-1 (upřesnění pro cementy CEM II/A, B-M se třemi hlavními složkami) a cementy dle ČSN EN 197-5 pro výrobu betonu dle ČSN P 73 2404

Tab. 5 Table F.3.2: Scope of application of cements according to EN 197-1 (clarification for CEM II/A, B-M cements with three main constituents) and cements according to EN 197-5 for concrete production according to ČSN P 73 2404

Cementy dle ČSN EN 197-1 ed. 2 a ČSN EN 197-5	Obsahuje slínek a kombinaci dvou dalších uvedených hlavních složek	Stupeň vlivu prostředí																		Kompatibilita s předpínací ocelí
		Bez nebezpečí koroze nebo narušení	Koroze výztuže							Koroze betonu										
			koroze způsobená karbonátací				koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody			působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich				chemické působení			koroze vlivem mechanického působení (obrus)			
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2 ^{a)}	XA3 ^{a)}	XM1	XM2	XM3			
CEM II/A-M	S-D; S-T; S-LL; D-T; D-LL; T-LL; S-V ^{f)} ; V-T ^{f)} ; V-LL ^{f)}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^{b)}	X ^{b)}	X	X	X	X
	S-P; D-P; D-V ^{f)} ; P-V ^{f)} ; P-T; P-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	X	P	X	X ^{b)}	X ^{b)}	X	X	X	X ^{c)}
CEM II/B-M	S-D; S-T; D-T; S-V ^{f)} ; V-T ^{f)}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	S-P; D-P; D-V ^{f)} ; P-T; P-V ^{f)}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	X	P	X	X	X	X	X	X	X ^{c)}
	S-LL ^{e)} ; V-LL ^{e)} ; T-LL ^{e)}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	P	P	X	X ^{b)}	X ^{b)}	X	X	X	X ^{c)}
	S-LL; D-LL; P-LL; V-LL ^{f)} ; T-LL	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	X ^{c)}
CEM II/C-M	S-V ^{d),f)}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	P	P	X	X	X	X	X	X	X ^{c)}
	S-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	P	P	X	X ^{b)}	X ^{b)}	X	X	X	X ^{c)}
	V ^{d),f)} -LL	X	X	X	P	P	P	P	P	X	P	P	P	X	X ^{b)}	X ^{b)}	P	P	P	X ^{c)}
	S-W ^{d),f)}	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	0
	V ^{f)} -W ^{f)}	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	0
	W ^{d),f)} -LL	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	0
CEM IV/B	(P ^{k)})	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	X	P	X	X	X	X	P	P	0
	(S-P ^{h)})	X	X	X	X	X	X	X	X	X	P	X	P	X	X	X	X	P	P	0
CEM VI	S-V ^{d)}	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	X	X	X	P	P	P	0	
	S-LL	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P ^{b)}	P ^{b)}	P	P	P	0	
	S-P	X	X	X	P	P	P	P	P	P	P	P	X	X	X	P	P	P	0	

Legenda k použitelnosti cementů je uvedena u tab. 4.

Tab. 6 Srovnávací zkoušky betonů ze zvolených cementů – rozsah

Tab. 6 Comparative tests of concretes made of the selected cements – range

		Beton s cementem						
		parametry betonu na 1 m ³	CEM I 42,5 R			CEM II/A-L 42,5		
		v/c	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
		obsah cementu	260	310	375	260	310	375
		účinný obsah vody	170	170	170	170	170	170
Zkušební postup		Těleso	Počet těles potřebných pro experiment					
č. 1	ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles (včetně ČSN EN 12390-1 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar a rozměry zkušebních těles a ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu)	krychle 150/150/150	6	6	6	6	6	6
č. 2	ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou	krychle 150/150/150	6	6	6	6	6	6
č. 3	ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu T100	trámec 100/100/400	6	6	6	6	6	6
č. 4	ČSN EN 14630 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení hloubky zasažení karbonatů v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody (expozice v boxu s atmosférou CO ₂)	krychle 100/100/100	6	6	6	6	6	6
č. 5	ČSN EN 12390-11 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 11: Stanovení odolnosti betonu proti chloridům, jednosměrná difuze	krychle 100/100/100	12	12	12	12	12	12
č. 6	porozita betonu – porozimetricky	použijí se tělesa ze zkoušky č. 4	-	-	-	-	-	-
č. 7	ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metoda A	krychle 150/150/150	6	6	6	6	6	6

Závěr

Návrh nové dodatkové certifikace cementů, byť v České republice dosud nepoužívaný, přinese první faktické propojení cementářských a betonářských norem a pro výrobce cementů přímou možnost uplatnění a odzkoušení cementů pro použití pro jednotlivé stupně vlivu prostředí v betonech pro konstrukční použití. Bude to na určitou dobu znamenat stabilizaci složení směsných cementů a předběžnou znalost použití pro výrobce betonu.

Lze ale předpokládat, že s ekologizací evropské společnosti mohou být během nadcházejících desetiletí ne-

dostupné další známé hlavní složky cementu, např. vysokopecní granulovaná struska anebo kvalitní křemičité popílky. Tomu odpovídá i současný výzkum a vývoj v cementářském průmyslu zaměřený na použití dalších povolených hlavních složek, např. přírodních kalcinovaných pucolánů Q, popř. kalcinované břidlice T.



Ing. Jan Gemrich
Svaz výrobců cementu ČR
svcement@svcement.cz



Ing. Vladimír Veselý
Svaz výrobců betonu ČR
vladimir.vesely@svb.cz

Literatura:

- [1] EN 197-5. Cement – Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI (Cement – Část 5: Portlandský směsný cement CEM II/C-M a Směsný cement CEM VI). 2021.
- [2] EN 197-1. Cement – Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements (Cement – Část: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití). 2011.
- [3] FprEN 197-6. Cement – Part 6: Cement with recycled building materials.
- [4] ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: ÚNMZ, 2021.

inzerce

23. - 25. 5. 2023
Hotel Antoň Teič



ICBMPT2023

International Conference
Building Materials, Products and Technologies

VUSH

Vážení přátelé,
rádi bychom Vás informovali
o konání XXVI. ročníku
mezinárodní konference
Výzkumného ústavu stavebních hmot, a.s.

Bližší informace na

www.icbmpt.com
www.vush.cz

KLIMATICKÁ KOMORA ICH C

Mezinárodně hodnocena jako nejlepší klimatická komora pro stabilizační testy dle ICH/WHO/EMA/ASEAN/GMP/GLP/GCCP.



- díky schopnosti testování **KARBONATACE** vhodné pro betonářský průmysl
- dlouhodobě stabilní teplotní a vlhkostní homogenita

Karbonatace betonu je chemický a fyzikální jev, který zasahuje veškeré nosné železobetonové konstrukce staveb. Řízená regulace CO₂ v klimatické komoře (Norma DIN EN 206) předpokládá životnost betonových konstrukčních prvků nejméně 50 let.



Klimatická komora ICH C nabízí ideální podmínky pro testování stavebních materiálů a betonu.

Díky elektronické regulaci CO₂ s automatickou neutrální polohou (měřicí systém NDIR) může být využita k realizování dlouhodobých testů pro stanovení hloubky karbonatace betonu bez nákladných, rozměrných a energeticky náročných testovacích komor.

Parametry:

- teplotní rozsah +10 až +50 °C
- infračervený měřicí systém a rozsah nastavení 0 až 20 % (s rozlišením 0,1 %)
- rozsah vlhkosti: 10 až 80 % rh

	Vnitřní rozměry (š × v × h) [mm]	Vnější rozměry (š × v × h) [mm]	Objem [l]
ICH 110C	560 × 480 × 400	745 × 1 233 × 585	108
ICH 260C	640 × 800 × 500	824 × 1 552 × 685	256
ICH 750C	1 040 × 1 200 × 600	1 224 × 1 950 × 785	749

KONEKO marketing, spol. s r.o.

Fakturační adresa: Sojovická 2, 197 00 Praha 9 – Kbely

Obchodní a poštovní adresa: Na Cikánce 2, 153 00 Praha 5 – Radotín

Tel: 257 911 116
Mobil: 603 357 809

e-mail: koneko@laboratore.cz
e-shop: www.laboratore.cz



ZKUŠENOSTI Z MODERNIZACE DÁLNICE D1 Z POHLEDU ŘEDITELSTVÍ SILNIC A DÁLNIC ČR

Jiří Hlavatý

Dálnice D1 je nejdůležitější a také nejvytíženější dopravní tepna na území České republiky mezi dvěma největšími městy Brnem a Prahou. Modernizace této dálnice probíhala od Mirošovic (exit 21) po Kývalku (exit 182) a stala se největším a nejdražším projektem, který kdy Ředitelství silnic a dálnic ČR realizovalo. Článek se zabývá parametry samotné modernizace a následně řeší realizaci cementobetonového krytu, který je v celém rozsahu modernizované dálnice.

EXPERIENCE FROM D1 MOTORWAY MODERNIZATION FROM THE VIEW OF THE ROAD AND MOTORWAY DIRECTORATE OF THE CZECH REPUBLIC

The D1 motorway is the most important and also the busiest road in the Czech Republic; it connects the two largest cities – Prague and Brno. The modernization of the D1 motorway was carried out in the section from Mirošovice (exit 21) to Kývalka (exit 182) and became the largest and most expensive project ever implemented by the Road and Motorway Directorate of the Czech Republic. The article informs about the parameters of the project and describes the construction of the concrete pavements, which was implemented in all sections of the project.

Projekt modernizace D1

Modernizace dálnice D1 byla realizována na 20 mezikřížovatkových úsecích (obr. 1), a to mezi Mirošovicemi (exit 21) a Kývalkou (exit 182), což bylo 160,2 km dálnice, resp. 320,4 km jízdního pásu dálnice.

Stavební náklady dvaceti úseků dle záměru projektu schváleného Ministerstvem dopravy (MD) byly předpokládány ve výši 21,6 miliard Kč (bez DPH, v cenové úrovni roku 2012). Předpokládané celkové stavební náklady jednotlivých úseků k září 2021 byly 21,8 miliard Kč bez DPH (tj. 26,3 miliard Kč s DPH). Po přepočtu na srovnatelnou cenovou úroveň roku 2012 jsou aktuální stavební náklady o cca 2 miliardy Kč nižší, než byly ze strany MD schváleny. Při přepočtu vyšla modernizace 1 km dálnice na 136 milionů Kč bez DPH.

Realizace staveb modernizace dálnice dle schváleného záměru projektu (2012) byla předpokládána v letech 2012 až 2018. Při zahájení stavebních prací (v roce 2013) byl časový harmonogram postupu prací (HMG) aktualizován na období 2013 až 2020, neboť odvolávání občanského sdružení Děti země proti vydaným stavebním povolením zdrželo realizaci modernizace o jeden rok.

Modernizace nezahrnovala pouze opravu vozovek, ale i mostů. V modernizovaném úseku dálnice se nachází 147 mostů, z toho 104 mostů na hlav-

ní trase dálnice a 43 nadjezdů. Předmětem modernizace bylo 127 mostů, z toho 92 mostů na hlavní trase a 35 nadjezdů. Mosty na hlavní trase:

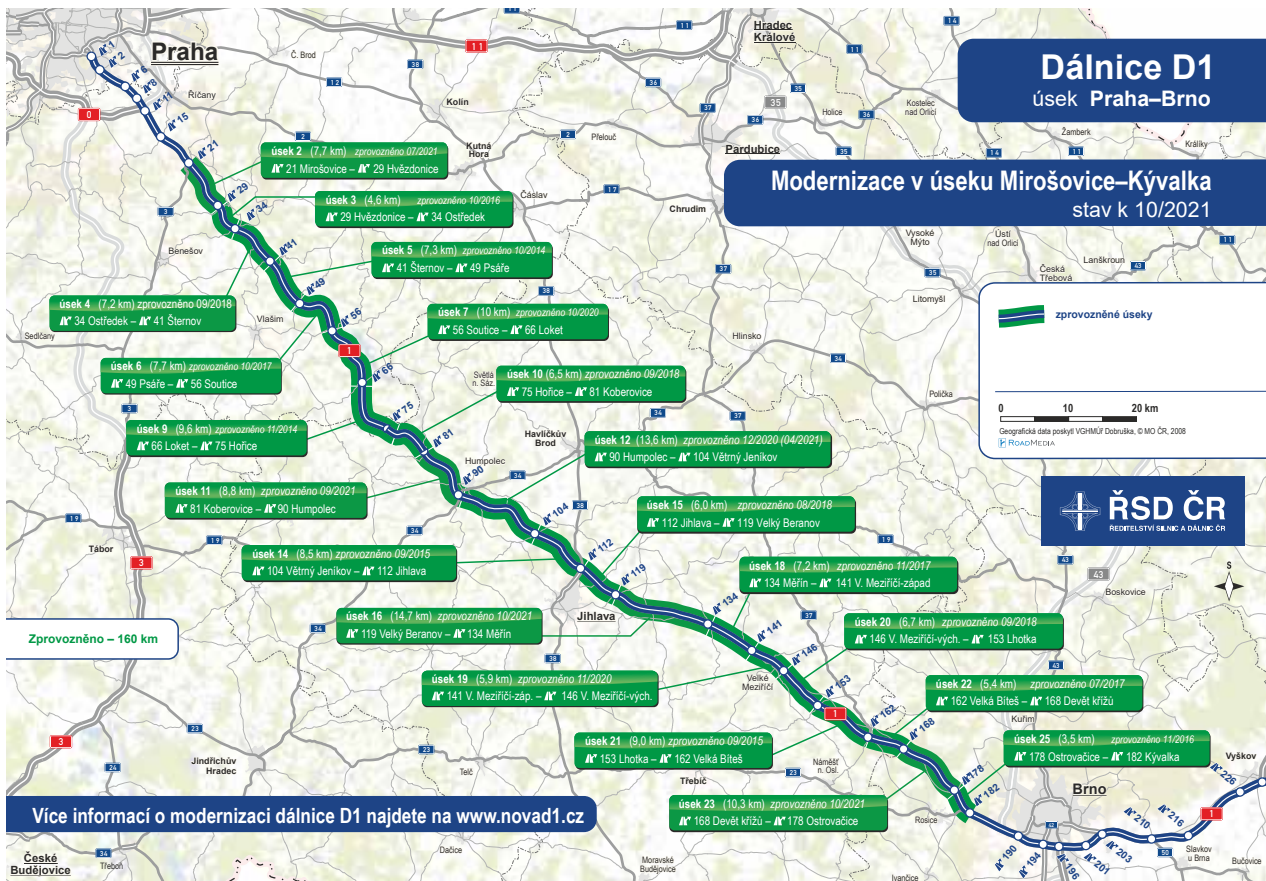
- 25 zcela nových mostů (nová nosná konstrukce včetně spodní stavby a založení),
- 16 mostů s novou nosnou konstrukcí,
- 14 mostů s rozšířenou nosnou konstrukcí,
- 37 rekonstrukcí mostů – např. sanace, výměna ložisek, oprava vozovky, říms, příslušenství (šířka nosné konstrukce vyhovovala požadavkům modernizace).

Jako příklad modernizace jednoho z nejvýznamnějších mostů jak z pohledu technologie, tak z pohledu zajištění dopravy v průběhu provádění prací lze uvést most Vysočina (obr. 2). Zde bylo nutné převést veškerou dopravu na jednu polovinu dálnice (jeden most), kde byla nedostatečná šířka pro vedení dopravy v režimu 2 + 2 jízdní pruhy. Most je 461 m dlouhý a tyčí se ve výšce 77,5 m nad údolím řeky Oslavy. Hlavní nosnou konstrukci mostu tvoří ocelová konstrukce spojitého mostního trámu o čtyřech polích (rozpětí polí je 80 + 110 + 135 + 100 m), která je podpírána třemi mezilehlými železobetonovými pilíři. Tuto nosnou ocelovou konstrukci bylo nutné rozšířit přivařením ocelových konzol.

Na základě generální dohody mezi Ministerstvem dopravy a Minister-

stvem životního prostředí byly vybudovány čtyři nové ekodukty pro přechod zvěře na úsecích 12 (km 94,760), 16 (km 128,800) a dva na úseku 23 (km 169,740 a km 175,611). Jako příklad je na obr. 3 letecký snímek ekoduktu realizovaného na úseku 12 (více také v *Betonu TKS 6/2020 – pozn. red.*).

Mezi další významné stavební práce, které byly v rámci modernizace dálnice D1 realizovány, patří výstavba či komplexní rekonstrukce protihlukových stěn spojená s jejich přesunutím v celkové délce 12,3 km. V délce 1 650 m v obou jízdních pásích (v úseku 21,254–22,349 Mirošovice a 27,685–28,250 Hvězdovice) byla pro ještě větší snížení vlivu stavby na okolí realizována speciální asfaltová vozovka se sníženou hloučností. Na celém modernizovaném úseku byla provedena také výměna zastaralých ocelových svodidel v celkové délce 371 km (střední dělicí pás, krajnice, mosty, mimoúrovňové křižovatky, odpočívky a přeložky křižujících komunikací a modernizace nadjezdů), z toho 160 km byla svodidla s vysokou úrovní zadržetí (H3) ve středním dělicím pásu dálnice. Dále bylo instalováno téměř 17 000 km optických vláken v optických kabelech, 90 dohledových kamer, 26 meteostanic, 195 SOS hlásek pro zajištění bezpečnosti a plynulosti provozu. V km 123 byla realizována jedna vysokorychlostní dynamická váha a dále bylo modernizováno 20 mimoúrovňo-



1

vých křižovatek. V celém modernizovaném úseku dálnice byla kompletně vybudována kanalizace pro odvedení vody z dálnice v celkové délce potrubí 223 km, současně byly vybudovány dvě zcela nové retenční nádrže.

Pro zajištění bezpečnosti provozu ve skálních zářezích bylo vystavěno 32 361 m² zábran proti padajícímu kamení (vysokopevnostní kotvené ocelové sítě). Bylo modernizováno celkem 12 dálničních odpočívek, přičemž u devíti byly provedeny opravy stávajícího povrchu a tři dálniční odpočívky byly modernizovány kompletně

(Speřice vpravo, Devět křížů vpravo a vlevo). Nad rámec projektu modernizace dálnice D1 byly v průběhu jeho realizace kompletně modernizovány další čtyři odpočívky (Střečov vpravo a vlevo, Studený a Humpolec vlevo).

Samotná modernizace neřešila jen opravu již dosluhujících konstrukčních částí mostů a vozovek, ale i jejich návrhové parametry, zejména příčné sklonky pro odvedení vody z vozovky, délky připojovacích/odbočovacích pruhů, odvodnění, rozhledové poměry a uvedení do souladu s aktuálně platnými ČSN.

Vylepšení kategorie dálnice z původní D26,5/120 na modernizovanou D28/120 představovalo změnu základních parametrů – rozšíření o 0,75 m na každou stranu jízdního pásu (na úkor středního dělicího pásu (SDP), jednostranně), opravu konstrukce vozovky, úpravu návrhových prvků trasy podle platné ČSN 73 6101, jako např. úpravu příčného sklonu v trase a ve směrových obloucích, změny klopení – úpravu délky vzestupnic a sestupnic –, úpravu délek, příp. doplnění odbočovacích a připojovacích pruhů, prověření délek a úpravu stoupacích pruhů, op-

1 Úseky modernizace D1 2 Most Vysočina v km 144 (úsek 19) 3 Ekodukt v km 94,76 (úsek 12)

1 D1 motorway modernisation sections 2 Vysočina Bridge at km 144 (section 19) 3 Ecoduct at km 94.76 (section 12)



2 3



timalizaci rozmístění přejezdů SDP, rozšíření a opravu dálničních mostů a nadjezdů, opravu kanalizace a její doplnění o bezpečnostní prvky (bezpečnostní stavitka, norné stěny), výměnu a doplnění svodidel v celém úseku, opravu a modernizaci stávajícího systému tísňového volání a informačního systému, doplnění telematických zařízení (informační portály a zařízení pro provozní informace) a řadu dalších stavebních úprav, které byly vyvolány samotnou modernizací.

V rámci modernizace byla aplikována technická řešení, která v minulosti v ČR ještě nebyla využívána, jako např. použití mobilních svodidel pro oddělení protisměrných jízdních pásů v omezení, realizace dočasných sjezdů pro integrovaný záchranný systém pro případ mimořádné události, realizace dočasných zálivů pro odstranění porouchaných vozidel v uzavírci a v místech stoupacích pruhů, videomonitoring, tedy pravidelné natáčení stavby, ze kterého je následně možné analyzovat postup prací. Pro zajištění bezpečnosti a plynulosti dopravy v uzavřených úsecích byly použity radary pro kontrolu rychlosti vozidel v uzavírci. Pro modernizaci byly vyvinuty přenosné informativní LED vozíky, které byly umístěny před každou uzavírkou.

V neposlední řadě je třeba zdůraznit, že v rámci modernizace byla vzhledem k jejímu napnutému časovému harmonogramu řada prací realizována v noci, jako např. demolice nadjezdů, odstraňování stávající vozovky, vybudování kanalizace ad. Jedna z technologicky nejnáročnějších prací, která při modernizaci dál-

nice probíhala i v noci, byla pokládka cementobetonového krytu vozovek.

Cementobetonový kryt na modernizované dálnici D1

V průběhu přípravy projektu byla vedena dlouhá diskuze, jaký bude na dálnici použit kryt vozovky, a to s ohledem na životnost, délku realizace a cenu. Nakonec byl vybrán cementobetonový kryt (CBK), což ze svého pohledu vnímám jako správné rozhodnutí nejenom z důvodu výše uvedených, ale i z důvodu intenzity dopravy, která se pohybuje v rozmezí 60 000 až 100 000 TNV (těžká nákladní vozidla).

Na dálniční vozovku byl položen CKB v délce cca 140 km a bylo spotřebováno více než 900 tisíc m³ betonu. Na zbývajících cca 21 km je v oblastech předpolí mostů a na mostech položena asfaltová vozovka. Je třeba říct, že to bylo v ČR poprvé, kdy se na dálnici v takovém měřítku realizovala technologie CBK.

Pro realizaci CBK byla použita dvouvrstvá technologie v tloušťce 270 mm, z toho spodní vrstva má tloušťku 220 mm a horní vrstva má tloušťku 50 mm s frakcí 4–8 mm pro realizaci povrchu s obnažených kamenivem. CBK staré D1 byl vybudován jako jednovrstvý o tloušťce 240 mm.

V rámci realizace CBK na modernizované dálnici D1 byly použity technologické novinky, které v ČR doposud nebyly používány vůbec, nebo pouze výjimečně, jako je těsnění spár pomocí pryžových těsnicích profilů místo původně užívaných asfaltových zálivek. V kombinaci s těmito

profily byly jako novinka používány drenážní proužky z geotextilie umístěné pod CBK v oblasti spárořezu. Je také třeba zdůraznit použití technologie obnaženého kameniva, která byla do doby modernizace D1 využívána pouze v lokálních úsecích. Vzhledem k výborným zkušenostem z pohledu protismykových vlastností v čase provozování dálnice je tato technologie úpravy povrchu CBK používána na všech dalších realizovaných CBK v ČR. Pro představu, od první realizace uplynulo již téměř osm let provozu a protismykové vlastnosti se stále drží mezi stupněm 1 a 2 na rozdíl od protismykových vlastností CBK s povrchem upraveným taženou jutou. V případě tažené juty se protismykové vlastnosti pohybovaly mezi stupněm 3 a 4 z pětistupňové škály již po pěti letech provozu.

Lze říct, že mezi technologicky nejnáročnější práce, které probíhaly nepřetržitě, se řadila právě pokládka cementobetonového krytu vozovek (obr. 4).

Závěr

Modernizace dálnice D1 byl největší projekt dopravních staveb v České republice. V rámci ní byly použity nové, ale i ověřené technologie tak, aby byla zaručena maximální životnost a trvanlivost celého modernizovaného úseku D1. Během realizace CBK se vyskytly jen drobné vady, jako např. ulomené hrany CBK. V rámci dalších úseků se již díky přijatým opatřením tyto vady nevyskytovaly.

Hlavní změny se promítly do Zvláštních technických kvalitativních podmínek – technické specifikace, která se stala následně vzorovou pro všechny modernizované úseky a nejen ty. Vzorová technická specifikace se nyní používá pro všechny realizované stavby a pravidelně se aktualizuje.

Přestože harmonogram prací byl často na hranici časových možností, podařilo se dodržet kvalitativní parametry, které jsou předpokladem splnění požadované životnosti modernizované dálnice D1.

4 Pokládka CBK v nočních hodinách 4 Placing of concrete pavements in night hours



Ing. Jiří Hlavatý, Ph.D.
Ředitelství silnic a dálnic ČR
Úsek kontroly kvality staveb
jiri.hlavaty@rsd.cz

Spo(h)lečná budoucnost pod křídly



Byznys s sebou přináší změny, a přestože pořekadlo „změna je život“ může znít lehce ohraně, pro JORDAHL & PFEIFER Stavební technika platí letos dvojnásobně. Od května 2023 bude společnost pokračovat v podnikání pod názvem své mateřské společnosti – německé rodinné firmy PohlCon. Nová „firemní fasáda“ samozřejmě nic nemění na filozofii společnosti a postoji k našim partnerům. Zákazníkům budeme i nadále zajišťovat špičkový odborný servis, bezprecedentní kvalitu, lidský přístup a návrh efektivního technického řešení přesně podle jejich potřeb.

Stále budeme plnit nejpřísnější technické a bezpečnostní předpisy, které díky síle tradic a dlouholetým zkušenostem dokonce i v rámci mezinárodních grémií již nějakou dobu spoluvytváříme. Technologicky pokročilá výrobní základna v Německu je téměř stoprocentní garancí, že pro vás najdeme řešení pro každý stavební problém spadající do naší kompetence.

To všechno jsou klíčové hodnoty, jichž jsme si odjakživa cenili jako Jordahl & Pfeifer a budeme si jich cenit i jako PohlCon. Zejména je pro nás důležité, abyste vy, naši obchodní partneři, tuto změnu identity pocítili co nejméně, nebo ji zaregistrovali výhradně prostřednictvím zkvalitnění našich služeb.

SILNÉ ZÁZEMÍ A TRADICE RODINNÉ FIRMY

Historie PohlCon se počítá od roku 1951, kdy inženýr Hermann Pohl vynalezl inovativní kabelovou svorku a založil společnost Hermann Pohl OHG. Tu pak v roce 1969 sloučil s firmou Anton Klein OHG, čímž vznikla společnost jménem PUK (zkratka Pohl und Klein).

V roce 1977 činná rodina Pohlů do své skupiny začlenila společnost JORDAHL, specialistu na výztuže a upevňovací řešení. O dvě dekády později, konkrétně roku 2001, přidali společnost H-BAU Technik, dodavatele stavebních materiálů pro betonářské společnosti a výrobce prefabrikovaných dílců.

V roce 2019 rodina Pohlů zakládá PohlCon Vertriebs GmbH, která je ovšem o tři roky později společně se skupinami PUK, JORDAHL a H-BAU Technik sloučena do jedné společnosti, a to PohlCon se sídlem v Berlíně.

Díky dlouholetému působení na českém trhu jako Jordahl & Pfeifer si PohlCon zachová určitá specifika. V našem sortimentu i nadále zůstávají vibroizolace od společnosti Calenberg či výrobky značky Pfeifer.

JEŠTĚ ŠIRŠÍ SORTIMENT A OBCHODNÍ VZTAHY

Společnost PohlCon věří, že ti, kteří rozumí svému řemeslu, mohou dosáhnout výjimečných věcí či je přímo tvořit. Filozofie PohlCon a jejich produktů tkví v naší osobní ambici, aby každý ze zaměstnanců společnosti dosáhl výjimečnosti ve svém vlastním oboru. Klade si také za cíl dokonalé pochopení zákazníka a jeho potřeb. Podpoříme ho všude, kde nás bude potřebovat – ať už ve fázi vývoje, výroby, dodání produktových řešení až po odborné instalace, či při osobní konzultaci na stavbě.

Už teď lze sebevědomě prohlásit, že naše společná budoucnost bude zářná a růžová. I když pod křídly PohlConu bude spíš zářná a fialová, stejně jako naše logo. I motto zůstane stejné: Zakotveno v kvalitě. Těšíme se na další spolupráci.



www.jp.cz



Jordahl & Pfeifer změnil své jméno dle mateřské společnosti. Partnerství zakotvené v kvalitě zůstává.



Victoria Palace
Isonosníky



Masaryčka
Vibroizolace



Bořislavka
Kotvení fasády



Fragment
Bílá vana

WHITETOPPING A ULTRATENKÝ WHITETOPPING V ČR

Bohuslav Slánský, Ladislav Vysloužil

Whitetopping je technologie oprav dopravních ploch a vozovek pomocí tenké betonové vrstvy, přičemž jsou v maximální možné míře zachovány stávající vrstvy vozovky a je využita jejich zbytková únosnost. V ČR byla tato technologie poprvé použita na opravy dvou dálničních odpočívek. V rámci projektové dokumentace byla pozornost věnována zejména diagnostice vrstev vozovky a podloží a následnému výpočtu tloušťky nové vrstvy – whitetoppingu – a rozložení spár. Byly také definovány specifické požadavky na betonovou směs a technologické požadavky při realizaci, a proto je popsán i vývoj několika variant betonové směsi za použití protismršťovací přísady a vláken s vyšším modulem pružnosti. Součástí obou projektů je unikátní systém měření deformací, separací vrstev a průběhu teplot v reálné konstrukci. V článku je představena také první realizace ultratenkého whitetoppingu tloušťky 60 mm.

WHITETOPPING AND ULTRA-THIN WHITETOPPING IN THE CZECH REPUBLIC

Whitetopping is a technology for repair of surfaces of trafficked areas and roads using a thin concrete layer, which utilises to its maximum the residual load-bearing capacity of the original wearing course. It has been recently used for the first time in the Czech Republic for two motorway rest areas. An attention was paid during the design to the assessment of existing pavement layers and the subbase and to the calculation of the new concrete whitetopping layer thickness and spacing of joints. Special requirements were established for the concrete mix design as well as technological requirements for the construction process. Several concrete mix designs were therefore prepared and tested, shrinkage reduction admixtures and high modulus fibres were used. Both projects used a unique monitoring system for deformations, layer separation and temperature measurement in the real structure. Furthermore, there is a description of the first practical implementation of the ultra-thin whitetopping layer with thickness of 60 mm.

Technologie whitetopping (WT) pro opravy vozovek byla vyvinuta v USA před cca 30 lety a používá se již řadu let i v západní Evropě. Od roku 2018 je SFDI a ŘSD vyvíjena intenzivní aktivita na podporu realizace pilotních projektů oprav vozovek touto technologií.

Oprava spočívá v překrytí původní vozovky novou tenkou vrstvou cementobetonového (CB) krytu, která je s podkladem buďto spojena, nebo je spojení záměrně zabráněno. Hlavním cílem je využít z velké části původní konstrukci vozovky, tedy její reziduální únosnosti. V případě spojení původní a nové vrstvy vozovky se navíc do určité míry využívá kompozitního chování obou vrstev. Oprava tech-

nologií WT má zajistit navíc i zlepšení vlastností krytu vozovky, tj. únosnosti, odolnosti proti trvalým deformacím a protismykových vlastností. Tím dochází k úspoře nákladů a času na realizaci a prodloužení životnosti stávající konstrukce vozovky ve srovnání s jinými technologiemi. Oprava technologií WT může být ve většině případů časově i ekonomicky vhodnější než kompletní rekonstrukce vozovky a může zajistit další fungování vozovky bez opakování vzniku trvalých deformací než např. oprava asfaltové vozovky obnovou krytových vrstev nebo kompletní rekonstrukcí na CB vozovku. V neposlední řadě má tak tato technologie pozitivní vliv na redukci uhlíkové stopy a úsporu nákladů.

Pilotní realizace whitetoppingu v ČR

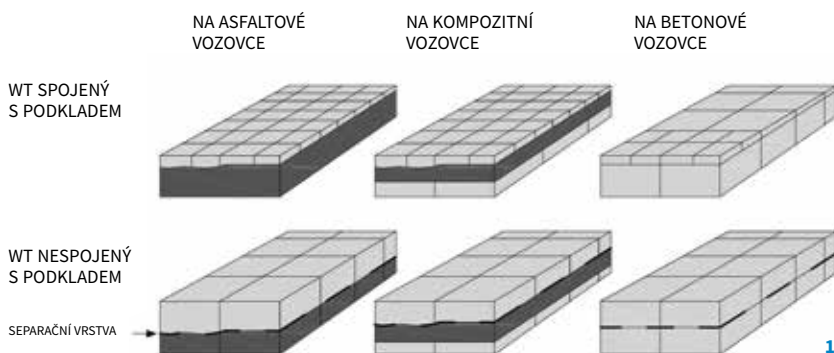
Opravy vozovek metodou WT se dělí na dvě základní skupiny – vrstva WT spojená a nespojená s podkladem – a mohou být realizovány jak u vozovek asfaltových, tak i betonových a kompozitních (obr. 1).

Pro pilotní realizace v České republice byly vybrány dvě dálniční odpočívky, resp. plochy pro parkování těžkých nákladních vozidel, kde se využijí výhody tuhé CB vrstvy na povrchu pro zabránění trvalých deformací od stojících těžkých nákladních vozidel. Pro oba projekty byla zvolena varianta whitetoppingu spojeného se stávající asfaltovou vozovkou. Spojení s podkladní vrstvou bylo navrženo z důvodu eliminace rizika pohybu betonových desek způsobeného brzdými a odstředivými silami od vozidel.

Obě odpočívky mají pro kamiony vyhrazena typická šikmá stání, mezi nimiž jsou pojezdové komunikace. Obě plochy byly navrženy v technologii WT, příjezdové komunikace k odpočívce byly provedeny z asfaltu.

Únosnost vozovky ověřená metodou rázových zatěžovacích zkoušek vykazovala u obou odpočívek vyhovující parametry. Stav povrchu vozovky byl ovšem v místech odstavných

1 Přehled možných typů a aplikací WT 1 Overview of possible WT types and applications



stání pro kamiony hodnocen jako havarijní. Poruchy se vyskytovaly především v krytové vrstvě, jednalo se zejména o výtluky, deformace a trhliny, vysprávký a nepravidelné hrboly.

Dálniční odpočívka Rajhrad na dálnici D52

První pilotní stavba byla realizována v roce 2020 technologií WT spojeného s asfaltovým podkladem, rozsah a uspořádání parkovacích stání je znázorněn na obr. 2. Oprava spočívala v odfrézování stávající asfaltové vozovky v tloušťce 140 mm a jejím nahrazení vrstvou WT tloušťky 140 až 150 mm v celkové ploše 3 603 m², zbytková tloušťka asfaltové vrstvy byla minimálně 80 mm.

Dálniční odpočívka Ladná na dálnici D2

Druhý pilotní projekt byl realizován v roce 2021 opět technologií WT spojeného s asfaltovým podkladem. Odfrézováno bylo 140 mm asfaltové vozovky, na kterou byl proveden WT tloušťky 160, resp. 180 mm v celkové ploše 2 010 m². Rozsah a uspořádání parkovacích stání je znázorněn na obr. 3.

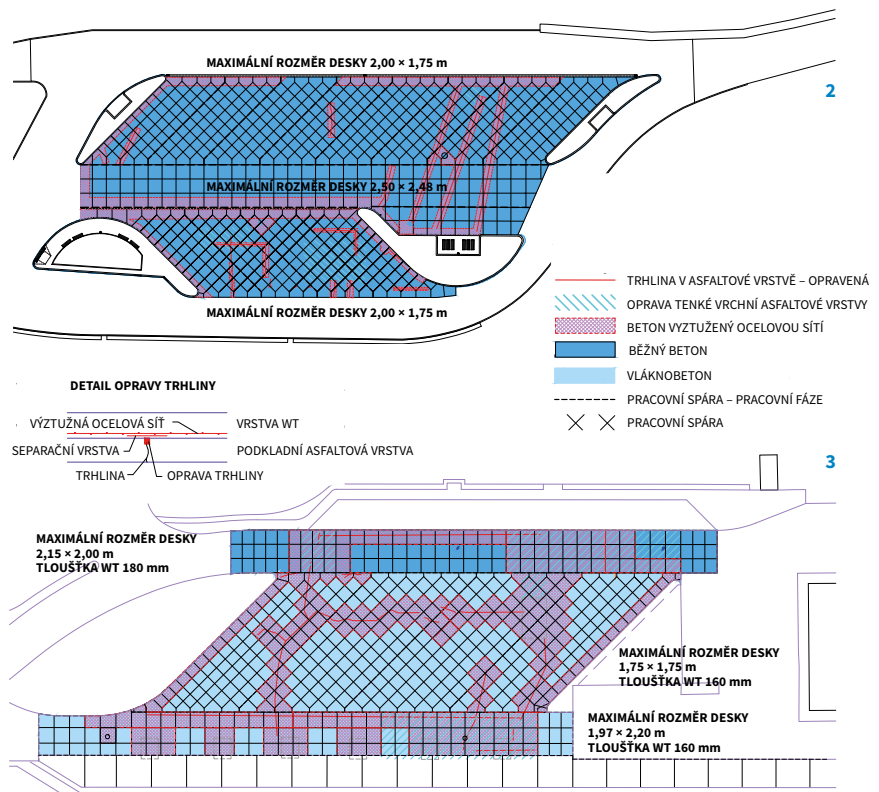
Posouzení, výpočetní model

Posouzení návrhu whitetoppingu dle národního předpisu TP170 nebylo možné použít, jelikož výpočet nepočítá se spojením cementobetonových a asfaltových vrstev. Posouzení návrhu tloušťky WT bylo provedeno dle metodiky MEYERHOF, tedy výpočtem modulu reakce podloží. Výsledkem posouzení je výpočet maximálního ohybového momentu od kombinace maximálního návrhového zatížení náprav vozidla, smrštění a vlivu teploty pro daný rozměr desky.

Výstavba

Zkušební úsek

K ověření navržené receptury betonu pro WT byl nejprve ve vlastní provozně společnosti Skanska proveden zkušební úsek na staré asfaltové vozovce, která byla odfrézována silniční frézou. Primárně šlo o ověření základních parametrů betonové směsi (pevnost, smrštění, odolnost proti CHRL), která byla navržena ze směsného ce-



2 Rozsah aplikace WT na odpočívce Rajhrad 3 Rozsah aplikace WT na odpočívce Ladná
2 Scope of the WT application on the Rajhrad rest area 3 Scope of the WT application on the Ladná rest area

mentu za účelem zpomalení hydratace a omezení rizika vzniku trhlin v raném stadiu hydratace. Dále bylo na jádrových vývrtech zkušeno spojení mezi vrstvou CB a původní asfaltovou vozovkou. Realizovány byly čtyři varianty pro stanovení optimálního ošetření povrchu asfaltové vrstvy pro zajištění dobrého spojení s CB krytem:

- podklad navlhčený vodou,
- podklad ošetřený polymerním disperzním spojovacím nátěrem 5 min před betonáží,
- podklad suchý bez ošetření,
- podklad ošetřený spojovacím nátěrem 60 min před betonáží.

Na vývrtech průměru 100 a 150 mm byly provedeny zkoušky pevnosti ve smyku podle ČSN 73 6160 s výslednými hodnotami 16 až 35 kN v průměru 150 mm, tedy s poměrně velkým rozptylem. Nicméně i tak bylo zjištěno, že vliv aplikovaného spojovacího můstku nebyl podstatný. Nejhorších hodnot bylo dosaženo u povrchu navlhčeného vodou, což bylo následně promítnuto do postupu realizace vlastního pilotního projektu.

Na výsledcích zkoušek provedených na vzorcích ze stavby se však ukáza-

lo, že způsob zkoušení spojení podle ČSN 73 6160 není úplně vhodný, protože k plnému spojení mezi cementobetonovou a asfaltovou vrstvou nedochází, jedná se pouze o mechanické „zaklínění“ díky makrotextuře vytvořené při frézování asfaltové vrstvy. Povrch asfaltu je navíc hydrofobní, takže k chemickému spojení betonu s asfaltem prostřednictvím hydratace cementu ani dojít nemůže. Zkoušku spojení vrstvy WT a asfaltu bude nutné v budoucnu lépe definovat, aby postihla princip skutečného chování souvrství u technologie WT.

Frézování a příprava podkladu

Frézování má zajistit dostatečnou makrotexturu asfaltového povrchu, aby mohlo dojít k maximálnímu mechanickému spojení s CB vrstvou, proto byly na zkušebních úsecích provedeny dva pojezdy silniční frézou.

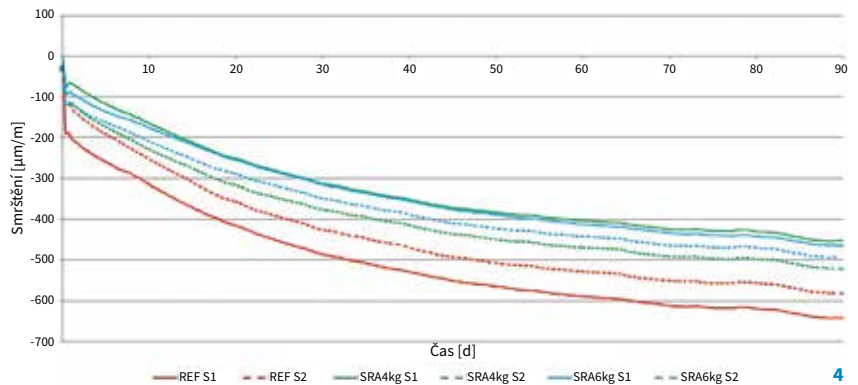
Po odfrézování asfaltových vrstev na odpočívce Rajhrad byl povrch kompaktní, měřením byla potvrzena vyhovující únosnost konstrukce. Veškeré trhliny byly uzavřeny a pasivní, nebylo je tedy nutné sanovat. Pro omezení jejich kopírování do povrchu WT byly pře-

mostěny ocelovou výztužnou kari sítí 100/100/10 mm osazenou při spodním povrchu vrstvy WT.

U odpočívky Ladná byla situace zcela odlišná. Povrch byl sice kompaktní, avšak zjištěné poruchy zejména ve formě aktivních příčných i podélných trhlin a síťových trhlin indikovaly problémy s podlozím vozovky, což bylo potvrzeno i měřením únosnosti. Bylo tedy nutné přistoupit k návrhu sanací těchto poruch. Naštěstí však byly naměřeny větší tloušťky zbytkových asfaltových vrstev v rozsahu 120 až 260 mm. Po přepočtu podle výše uvedeného modelu bylo rozhodnuto o zesílení navržených tloušťek WT o 20 mm, použití betonu s rozptýlenou výztuží a zmenšení vzdáleností spár WT. V místech nad aktivními trhlinami a pracovními spárami byly desky WT zesíleny výztužnou ocelovou sítí 100/100/8 mm, přičemž aktivní trhliny byly proříznuty a zalaty pružnou záplivkou a pro zabránění kopírování reflexních trhlin byla separace zajištěna vložení pruhu asfaltového pásu šířky 200 mm.

Beton pro whitetopping

Složení betonové směsi bylo provedeno pro CB kryt třídy CB I se zahrnu-



4 Vliv protismršťovací přísady 5 Pokládka vrstvy WT finišerem – Ladná
 6 Úsek zhotovený technologií WT – Rajhrad 7 Úsek zhotovený technologií WT – Ladná
 4 Effect of a shrinkage reducing admixture 5 WT paving – Ladná
 6 WT section – Rajhrad 7 WT section – Ladná

tím specifických požadavků pro WT:

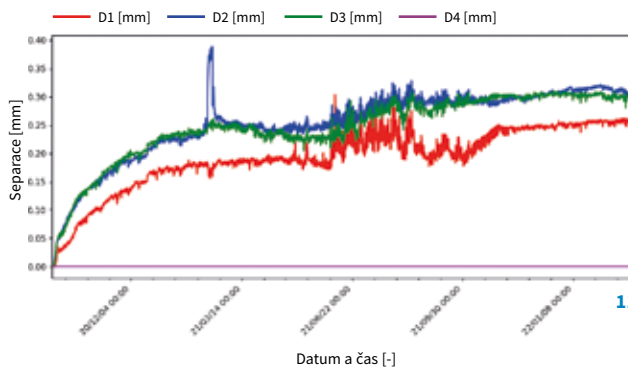
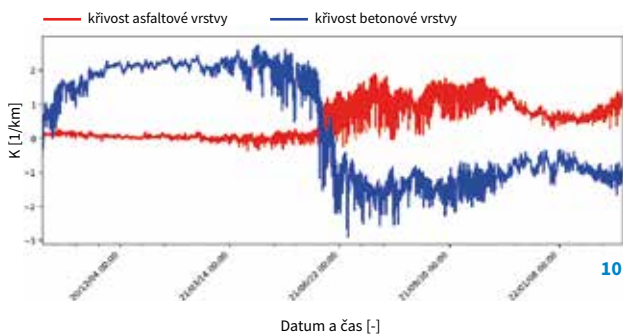
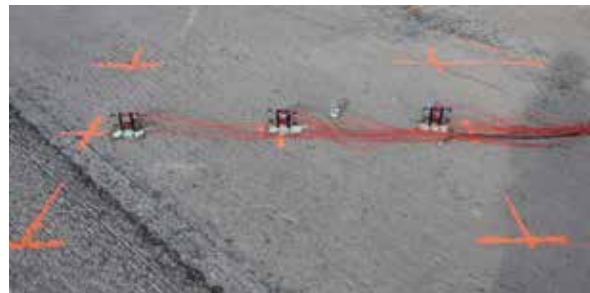
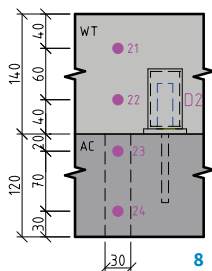
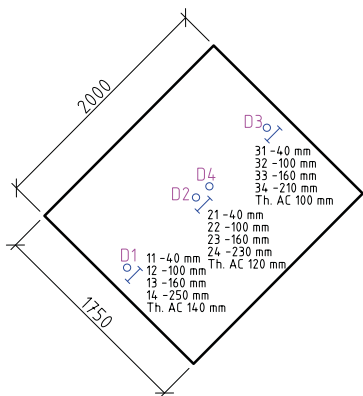
- minimalizace smrštění betonu maximálně 0,5 mm/m ve 28 dnech, ideálně nižší (obr. 4),
- směsný cement CEM II/A-S nebo CEM II/B-S, příp. mletá granulovaná struska jako příměs při výrobě betonu v kombinaci s cementem CEM I,
- doporučený vodní součinitel $v/c \leq 0,4$,
- třída pevnosti v tahu ohybem (ČSN EN 12390-5) F 4,5.

Pro odpočívku Ladná byla navíc použita rozptýlená výztuž. Na zákla-

dě testování různých typů vláken byla použita skelná vlákna délky 36 mm s modulem pružnosti 72 GPa.

Na odpočívce Ladná byl v té době dostupný pouze cement s jemnějším mletím (větší měrný povrch podle Blaina), tedy cement s rychlejším nárůstem pevnosti, což se při realizaci negativně projevilo vznikem smršťovacích trhlin na povrchu na několika deskách WT. To potvrzuje, že v rámci specifikace betonové směsi pro WT je potřeba omezit jemnost mletí cementu na hodnoty kolem 300 m²/kg.





Pokládka vrstvy whitetoppingu

Spojovací můstek byl použit jen v omezené ploše, a to pouze pro sledování rozdílů v chování. V okolí kanalizačních šachet a vpustí byly desky vyztuženy šikmými ocelovými výztužnými pruty v rozích. Na důkladně očištěný povrch byla menším typem finišeru Bidwell 5000 položena vrstva WT v šikmých pruzích podle uspořádání stání vozidel (obr. 5). Pokládka byla prováděna nejprve v lichých pruzích šířky cca 10 m do podélného ocelového bednění a poté v sudých pruzích mezi již hotové konstrukce. Povrch betonu byl ošetřen kartáčováním pro zajištění dobrých protismykových vlastností a na závěr byl opatřen nástřikem proti odparu.

K řezání spár do hloubky 1/2 tloušťky desky bylo přistoupeno přibližně po 20 h od pokládky. Spáry nebyly vyztužovány kluznými trny. Následně byly spáry v horní části rozšířeny do tvaru komůrky a vyplněny pružnou záplivkou za studena. Hotová vrstva WT s prořezanými spárami je na obr. 6 a 7.

Uspořádání spár u šikmých stání znamená vytvoření atypických tvarů desek, tzv. biskupských čepic, na styku s kolmo uspořádanými jezdovými komunikacemi, aby nevznikaly ostré rohy (obr. 2 a 3). U některých koncových detailů se však nebylo

8 Schematické znázornění monitoringu **9** Osazení snímačů před betonáží **10** Celková křivost na betonové a asfaltové vrstvě **11** Průběh separace betonové a asfaltové vrstvy na třech místech během šestnácti měsíců

8 Plan of an instrumented slab and positions of the sensors **9** Setting up of the sensors before the paving started **10** Total curvature of the asphalt and WT layers **11** Course of the separation of concrete and asphalt layers at three places during a period of sixteen months

možné nestandardním tvarům desek vyhnout, ty byly však vyztuženy ocelovou sítí.

Monitoring

Součástí obou staveb bylo zřízení měřicího a sledovacího zařízení pro monitoring během realizace stavby a tři let po realizaci. Zařízení je osazeno ve vybrané desce WT na třech místech (2× na okraji, 1× uprostřed) a vždy ve čtyřech úrovních (2× ve WT, 2× v asfaltové vrstvě) (obr. 8 a 9).

Sledovány jsou parametry, které slouží k ověření chování konstrukce v průběhu výstavby a za provozu, hodnoty jsou odečítány v intervalu 10 min:

- deformace v hotové konstrukci pomocí strunových tenzometrů,
- separace mezi betonovou a asfaltovou vrstvou s použitím indukčních snímačů,
- průběh teplot v hotové konstrukci v místě každého strunového tenzometru,
- průběh teploty vzduchu ve standardní výšce 2 m,

- průběh intenzity slunečního osvětlení,
- sekvenční fotografický záznam monitorovaného místa.

Do současné doby (leden 2023) ukázal monitoring dobré chování vrstvy WT s tím, že naměřené deformace a z nich vypočtená napětí nepřekračují dovolené namáhání. Měření křivosti (graf na obr. 10) potvrzuje, že k plnému spřažení vrstvy WT s asfaltovou vrstvou nikdy nedošlo. Měření separace (graf na obr. 11) potvrdilo, že dochází k postupnému rozevírání vodorovné spáry a po šestnácti měsících se hodnota ustálila na cca 0,25 až 0,30 mm. Makrotextura vytvořená frézou na asfaltové vrstvě zajišťuje mechanické „zaklínění“ obou vrstev a brání tak vzájemnému posunu, obě vrstvy však nefungují jako spřažený heterogenní průřez pro ohyb.

Kromě uvedených měření se ještě jednou ročně provádí celoplošná kontrola spojení vrstvy WT s podkladem metodou impact echo.

Na základě výsledků monitoringu, který stále probíhá, pak budou zhodnoceny a případně upraveny projek-



12



13

tové předpoklady a kalibrovány výpočtové modely. Závěry mohou také posloužit jako podklad pro vypracování samostatného předpisu pro opravy vozovek technologií WT.

Ultratenký whitetopping

V rámci projektu Oprava nádvoří Ústavu hematologie a krevní transfúze v Praze (ÚHK) realizovala společnost Skanska v srpnu 2022 ultratenký whitetopping (UTWT), kdy je tloušťka betonové krycí vrstvy menší než 100 mm. Podle rešerší se jedná o první UTWT v České republice. Podkladem byl 22 let starý beton s povrchem, který byl degradován vlivem zmrazovacích cyklů. Nová deska má tloušťku 60 mm s řezanými spárami ve vzdálenostech 800 až 900 mm a je spojena s podkladem.

Ve fázi přípravy byla navržena a ověřena receptura betonu s důrazem na dobrou odolnost vůči CHRL a pevnost v tahu. Výsledný beton C50/60 - XF4 - D_{\max} 8 mm obsahoval CEM II/A-M

(S-LL) 42,5 R, dvě frakce kameniva, nanofiler, superplastifikační přísada, provzdušňovací přísada a rozptýlenou výztuž. Protože autodomíhač nemohl vjet do areálu, bylo nutné zřídit překládové místo betonu a receptura betonu musela být navržena na prodlouženou dobu zpracovatelnosti 180 min.

Projekt byl realizován jako sponzorský dar, a proto byly minimalizovány náklady na diagnostiku podkladních vrstev. Vzhledem k absenci poruch se předpokládalo, že podkladní vrstvy byly dohnutny provozem. Povrch stávajícího betonu byl nejprve očištěn od volných nečistot, těsně před pokládkou byl vysokotlakým čističem navlhčen (bez louží) a poté na něj byla uložena vrstva UTWT. Záměrem bylo realizovat UTWT spojený s podkladním betonem, avšak na základě poznatků z realizace a monitoringu předchozích pilotních projektů nebylo bazírováno na spojení dokonalém. Bylo v zásadě využito hrubé makrostruktury podkladního betonu,

Zdroje:

- [1] HELA, R. a kol. *Technologické podklady pro opravy asfaltových nebo betonových vozovek technologií whitetopping. Závěrečná zpráva.* VUT Brno, 09/2018.
- [2] HARRINGTON, D., FICK, G., BORDELON, A., CABLE, J. *Guide to Concrete Overlays, Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements.* ACPA Publication TB 021-03P. 3rd edition. USA, 2014.
- [3] ŠMILAUER, V., SLÁNSKÝ, B. *Projekt monitoringu – Osazení monitoringu pro whitetopping na odpočívce D52 km 10,5 Rajhrad L.* 2020.
- [4] SLÁNSKÝ, B., BIJOK, P., VYSLOUŽIL, L. *Whitetopping v ČR.* In: *Sborník konference Betonové vozovky 2020.* Praha, 2020.
- [5] SLÁNSKÝ, B., VYSLOUŽIL, L., BIJOK, P., ŠMILAUER, V., HELA, R. *The First Whitetopping in the Czech Republic. National Report of the Czech Republic: Structural Concrete in the Czech Republic.* 6th fib Congress. Oslo, 2022.

který zajišťoval budoucí horizontální stabilitu finální vrstvy (obr. 13).

Beton byl ukládán do bednění, které tvořily ocelové úhelníky, popř. stávající obrubníky. Po ztuhnutí betonu vibračním hladítkem byl povrch urovnán plastovým hladítkem. Poté byla pomocí měkkého koštěte vytvořena striáž. Pro zajištění správné hydratace byl povrch opatřen parotěsným nástřikem ve zvýšeném dávkování.

Další technologickou komplikací byl zákaz řezání spár v době nočního klidu mezi 22. a 6. h. Z toho důvodu bylo složení betonu nastaveno tak, aby za dané teploty bylo možné spáry nařezat hned po betonáži tentýž den, přičemž poslední pokládka musela proběhnout před 13. h. Příčné spáry byly řezány ruční rezačkou, dlouhé podélné spáry byly řezány pro lepší dosažení pohledové linky rezačkou s pojezdem.

Tenké spáry byly zatěsněny jednosložkovým polyuretanovým tmelem pro dosažení delší životnosti. Pohled na finální plochu zhotovenou technologií UTWT je na obr. 14.

12 Plocha nádvoří ÚHK před realizací 13 Tenká betonová deska těsně po betonáži a makrotextura stávajícího betonu 14 Tenká betonová deska těsně po betonáži a prořezání spár
 12 Courtyard area of the Institute of Haematology and Blood Transfusion (IHKT) before the repair
 13 UTWT just after concreting and the macrotexture of the existing concrete 14 UTWT just after concreting and cutting of the joints



14

Závěr

Realizace pilotních projektů oprav parkovacích stání dálničních odpočívček metodou WT na asfaltový podklad jsou prvními opravami realizovanými touto metodou na území ČR. Jako klíčová se ukázala důkladná diagnostika stávající vozovky před vlastním návrhem a následná kontrola a odstranění poruch zjištěných po odfrézování vozovky. Díky monitoringu bylo ověřeno chování celého souvrství a změřena separace vrstev, které ohybově prakticky nespolutpůsobí.

Technologie WT na asfaltovém podkladě může být efektivní metodou opravy stávajících zatížených vozovek, které jsou v dobrém stavu z hlediska únosnosti vozovkového souvrství a u kterých je žádoucí odstranit dlouhodobě opakovaný vznik povrchových poruch způsobených pomalu se pohybující dopravou, tj. trvalé deformace, příp. rozpad povrchu krytu vozovky.

Technologie whitetopping je také šetrnější k životnímu prostředí a je i ekonomičtější řešením díky tomu, že se ponechává maximum materiálů z původní vozovky a využívá se jejich reziduální únosnosti. Tím se omezuje spotřeba nových materiálů a jejich doprava. U uvedených projektů činí předpokládané snížení stopy CO₂ oproti kompletní výměně vozovkového souvrství za CB kryt cca 40 %. Nákladová úspora se pohybuje na stejné úrovni, tedy opět 40 %.

Technologie ultratenký whitetopping může být velmi efektivní technologií oprav betonových ploch a vozovek. Pilotní realizace proběhla v srpnu 2022, přičemž plocha bude v dalším období sledována. Finální vyhodnocení úspěšnosti této technologie bude provedeno cca po jednom roce provozu.



Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D.
Skanska a.s.
bohuslav.slansky@skanska.cz



Ing. Ladislav Vysloužil
Skanska a.s.
ladislav.vyslouzil@skanska.cz

inzerce

POZVÁNKA NA ŠKOLENÍ

CBS

Česká betonářská
společnost ČSSI
www.cbsbeton.eu

ve spolupráci s



Výzkumným ústavem
maltovin Praha, s.r.o.
www.vumo.cz

WEBINÁŘE JSOU ZAŘAZENY
DO AKREDITOVANÝCH VZDĚLÁVACÍCH
PROGRAMŮ V PROJEKTECH
CELOŽIVOTNÍHO VZDĚLÁVÁNÍ ČKAIT

URČENO PRO VÝROBCE BETONU –
MANAGEMENT, PRACOVNÍKY ZAJIŠŤJÍCÍ
ZPRACOVÁNÍ BEZPEČNOSTNÍCH LISTŮ
NA BETON A EXTERNÍ POSKYTOVATELE
SLUŽEB V TÉTO OBLASTI LEGISLATIVY.

Školení ČBS AKADEMIE BETON

– postup při oznamování
jednotlivých směsí
dle nařízení EP
a Rady (ES) 1272/2008 CLP,
příloha VIII

Cyklus 2 on-line webinarů

CBS akademie

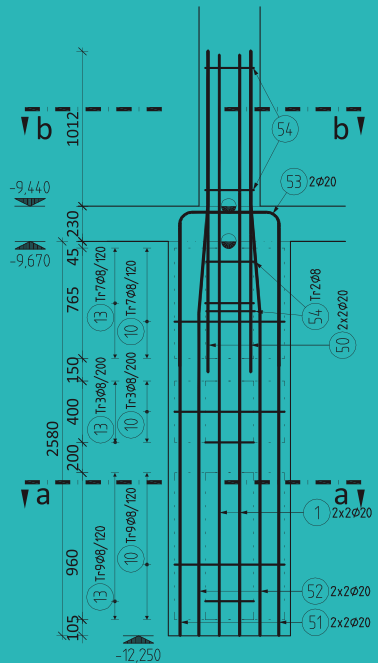


26.04., 03.05. 2023

on-line webinarů

inzerce

RECOC BETON



ŘEZ a-a

ŘEZ b-b

ŘEZ c-c

ŘEZ d-d

ŘEZ e-e

ŘEZ f-f

ŘEZ g-g

ŘEZ h-h

ŘEZ i-i

ŘEZ j-j

ŘEZ k-k

ŘEZ l-l

ŘEZ m-m

ŘEZ n-n

ŘEZ o-o

ŘEZ p-p

ŘEZ q-q

ŘEZ r-r

ŘEZ s-s

ŘEZ t-t

ŘEZ u-u

ŘEZ v-v

ŘEZ w-w

ŘEZ x-x

ŘEZ y-y

ŘEZ z-z

ŘEZ aa

ŘEZ bb

ŘEZ cc

ŘEZ dd

ŘEZ ee

ŘEZ ff

ŘEZ gg

ŘEZ hh

ŘEZ ii

ŘEZ jj

ŘEZ kk

ŘEZ ll

ŘEZ mm

ŘEZ nn

ŘEZ oo

ŘEZ pp

ŘEZ qq

ŘEZ rr

ŘEZ ss

Vázaná výztuž

- # software vyvinutý projektanty pro projektanty
- # zdokonalovaný 30 let podle potřeb armovačů
- # několik set aktivních uživatelů v ČR i SR
- # moduly pro parametrické vyztužování subkonstrukcí

www.recoc.cz

RECOC
S.R.O. - STATICKÁ KANCELÁŘ

Navazující
skupiny programů

REBIM^{3D} a RENEX^{3D}

VÝSLEDKY SKÚMANIA VHODNOSTI ZMESNÝCH CEMENTOV NA POUŽITIE V CEMENTOBETÓNOVÝCH KRYTOCH

Michal Bačuvčík, Lukáš Húlek, Michal Cápaj, Ivan Janotka

Jednou z možností redukcie emisií CO₂ v stavebnom priemysle je výraznejšie používanie zmesných až kompozitných cementov CEM II až CEM VI, ktoré oproti portlandskému cementu CEM I obsahujú menej ekologicky zaťažujúceho slinku. Na dosiahnutie tohto zámeru je nutné objektívne preukazovať ich vhodnosť v relevantných výrobných stavebných normách. Článok prezentuje výsledky dlhodobého projektu s cieľom nezávislého overenia použiteľnosti štyroch zmesných cementov v cementobetónových krytoch vozoviek skupín CB I, II a III, ktorých vhodnosť doteraz nebola preukazovaná.

RESULTS OF AN INVESTIGATION INTO SUITABILITY OF BLENDED CEMENTS FOR USE IN CONCRETE PAVEMENTS

One option for reducing CO₂ emissions in construction industry is a more significant use of blended or composite cements CEM II to CEM VI, which contain less of the ecologically damaging clinker when compared to Portland cement CEM I. To achieve this goal, it is necessary to demonstrate reliably their suitability in relevant product building standards. This article presents the results of a long-term project which aimed to verify independently the applicability of four blended cements in cement-based concrete road pavements of groups CB I, II and III; suitability of which has not been proven so far.

Vozovky ciest sú na Slovensku zhotovované prevažne z asfaltu z dôvodu nižších investičných nákladov a jednoduchosti opráv v porovnaní s vozovkami s cementobetónovým krytom (CBK). Treba zdôrazniť, že používanie CBK prináša určité špecifické výhody, ktoré presvedčili mnohé krajiny, a preto je nutné uvažovať o ich intenzívnejšom používaní aj na Slovensku. Medzi výhody CBK sa zaraďujú napr. ich tuhosť, mechanická odolnosť, využiteľnosť domácich zdrojov na ich zhotovenie, nižšie nároky na ich údržbu, úplná recyklovateľnosť, svetlejší povrch, nehorľavosť a absencia nebezpečných látok. Nevýhodami CBK oproti asfaltovým vozovkám sú napr. vyššie náklady na zhotovenie, zložitosť opráv a riešenie škár. Výroba vstupných materiálov na zhotovenie

CBK je pokrytá z domácich surovín, čo má na rozdiel od asfaltu pozitívny vplyv na zahraničnú obchodnú bilanciu a udržanie a rast lokálnej zamestnanosti [1]. Pozitívnym príkladom môže byť úspešné zhotovenie vozovky z CBK na 8 km úseku cesty medzi Rohožníkom a Malackami v roku 2019 (obr. 1), na ktorom Technický a skúšobný ústav stavebný, n. o., (TSÚS) vykonal kontrolné skúšky čerstvého a zatvrdnutého betónu.

Norma STN 73 6123 [2] dokumentuje použitie cementov pre jednotlivé skupiny CBK nasledovne: pre skupinu CB I je vyžadovaný výlučne portlandský cement CEM I alebo špeciálny cestný cement pevnostnej triedy minimálne 42,5 MPa a pre skupiny CB II a CB III cementy CEM I, príp. CEM II/A-S a CEM II/B-S, s obmedzeniami na

pevnostné triedy minimálne 32,5 MPa alebo 42,5 MPa.

Cementárne sa zaviazali do roku 2030 znížiť emisie skleníkových plynov oproti roku 1990 až o 55 % a do roku 2050 dosiahnuť tzv. uhlíkovú neutralitu [3]. Zväz výrobcov cementu Slovenskej republiky (ZVC) je preto tlačenej, aby podnikal efektívne kroky na rapidne znižovanie emisií CO₂ pri produkcii cementov, resp. pri výrobe portlandského slinku, ktorý sa v najväčšom rozsahu používa na produkciu portlandského cementu CEM I [4]. Jednou z možností redukcie emisií CO₂ je produkcia ekologicky úspornejších zmesných až novodobých kompozitných cementov, ktoré obsahujú výrazne menej slinku ako cement CEM I. Zmesné cementy CEM II až CEM V sú známe už dlhšiu dobu, ale produkcia nových kompozitných cementov bola uvedená na Slovensku až zavedením normy STN EN 197-5 [5] v roku 2021. U týchto cementov sa povoľuje zastúpenie slinku minimálne 35 %, zatiaľ čo v cemente CEM I je obsah slinku minimálne 95 % [6].

Využitie ekologicky šetrnejších cementov sa stretáva s normatívnymi problémami ich zabudovania v niektorých stavebných výrobkoch, kde sa doteraz nepreukázala vhodnosť ich použitia. TSÚS preto vykonal dlhodobý výskumný projekt preukazovania vhodnosti dodnes nepoužívaných zmesných cementov v CBK.

1 a) CBK na ceste medzi mestami Rohožník a Malacký, b) aplikácia CEM II/B-S

1 a) CBK on the road between the towns of Rohožník and Malacký, b) application of the CEM II/B-S



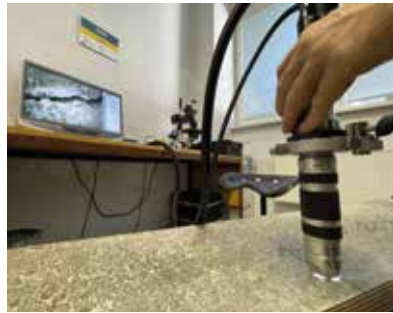
1a



1b



2a



2b



2c



2d

Metodika projektu

Na Oddelení materiálového výskumu TSÚS sme podľa zadania ZVC overovali použiteľnosť nasledovných typov cementov v CBK (ďalej ako CB I, CB II a CB III): pre CB I cementy CEM II/A-S (skr. A-S) a CEM II/B-S (skr. B-S), pre CB II cement CEM II/A-LL (skr. A-LL) a pre CB III cementy CEM III/A (skr. III/A) a CEM II/A-LL. Projekt bol pre každý overovaný systém rozdelený do troch samostatných etáp. Všetky skúšky sa realizovali podľa relevantných európskych skúšobných noriem na betón.

Základné parametre cementov a betónov

Prvá etapa projektu bola zameraná na skúšky vlastností cementov podľa požiadaviek STN EN 197-1 [6], ktoré sme porovnávali s požiadavkami podľa kapitoly 5.2.2 STN 73 6123 [2]. Úlohou bola špecifikácia parametrov a prvotné zhodnotenie vhodnosti overovaných cementov na ďalšie skúšanie v betónoch pre CBK.

Ďalej sme posudzovali vhodnosť cementov na základe parametrov čerstvých a zatvrdnutých betónov. Vyrobili a skúšali sme referenčné betóny (REF-CB) podľa receptúr od priemyselných výrobcov betónov s deklarovanými a overenými vlastnosťami pre CBK a experimentálne betóny podľa rovnakých receptúr s rozdielom použitia overovaných cementov podľa zadania ZVC (EXP-CB).

Overenie funkčných a trvanlivostných parametrov betónov

V druhej etape projektu sa podrobili jednotlivé REF-CB a EXP-CB betóny skúškam na overenie ich tzv. funkčných a trvanlivostných parametrov (obr. 2), ktoré boli zvolené nad rámec požadovaných skúšok podľa STN 73 6123 [2].

2 Skúšky z 2. etapy: a) obrusnosť, b) vznik trhlín, c), d) dlhodobá expozícia betónov
2 Tests from the 2nd stage: a) abrasion, b) crack propagation, c), d) long-term exposure tests of the concrete

Na betónoch sme skúšali a overovali vplyv cementov na:

- plastické zmršťovanie so zameraním na posúdenie vzniku zmršťovacích trhlín,
- objemové zmeny počas expozície 360 dní v regulovanom prostredí,
- súdržnosť povrchovej vrstvy betónu pred a po skúške odolnosti proti pôsobeniu vody a chemických a rozmrazovacích látok (CHRL),
- obrusnosť betónových povrchov,
- pevnosť v ťahu pri ohybe, v priečnom ťahu a v tlaku a objemové zmeny a zmeny v dynamickom module pružnosti (ultrazvukovým prístrojom) počas jedného roka expozície klimatickým zmenám na pobočke TSÚS Tatranská Štrba a v referenčnom laboratórnom uložení.

Cieľom druhej etapy bolo zhodnotenie a porovnanie dlhodobých a ďalších podstatných vlastností ex-

perimentálnych betónov v porovnaní s betónmi referenčnými.

Overenie použiteľnosti betónov na referenčnom úseku

Tretia etapa predstavovala realizačný výstup projektu. Podľa špecifikácií v kapitole 8.4 normy STN 73 6123 [2] bola v priemyselnom meradle na ceste medzi mestami Rohožník a Malacky zhotovená pokusná realizácia tzv. referenčného úseku CB krytu, na ktorom sa použil betón s overovaným cementom CEM II/B-S. Počas realizácie CB krytu sme odobrali betón a vykonali normou [2] predpísaný rozsah skúšok.

Výsledky 1. etapy projektu

Skúšky cementov

Výsledky skúšok parametrov skúmaných cementov, ktoré sme porovnávali s požiadavkami na cement pre

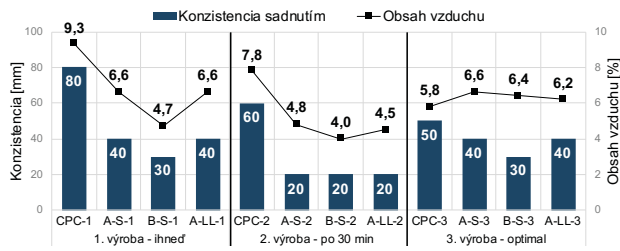
Tab. 1 Základné parametre cementov podľa STN EN 73 6123 a STN EN 197-1

Tab. 1 Basic parameters of cements according to STN EN 73 6123 and STN EN 197-1

Vlastnosť cementu	Jednotka	Požiadavka pre CB I	Zistený parameter				
			REF CPC	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/A-LL	CEM III/A
strata žiháním	[% hmot.]	≤ 3	1,25	3,32	3,74	7,28	2,35
obsah MgO	[% hmot.]	≤ 5	4,45	2,80	3,94	1,95	5,88
kys. nerozlož. podiel	[% hmot.]	≤ 1,5	0,45	0,27	0,72	0,21	0,43
obsah SO ₃	[% hmot.]	≤ 3,5	2,81	2,77	2,81	2,58	2,35
merný povrch	[m ² /kg]	225–350	318	394	439	447	426
začiatok tuhnutia	[min]	≥ 90	135	155	215	160	205
doba tuhnutia	[min]	< 720	185	225	340	265	300
objemová stálosť	[mm]	≤ 10	0,5	0,5	0,0	0,5	1,0
pevnosť v tlaku – 2 dni	[MPa]	STN EN 197-1	25,7	22,5	17,6	26,6	15,1
pevnosť v tlaku – 28 dní	[MPa]	STN EN 197-1	55,4	51,5	56,3	49,8	46,1
obsah chloridov	[% hmot.]	STN EN 197-1	0,103	0,055	0,053	0,080	0,068

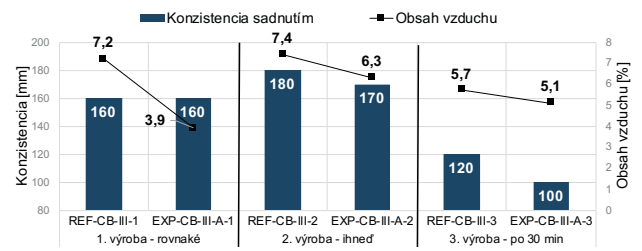
3 Reologické vlastnosti čerstvých betónov pre CB I a CB II

3 Rheological properties of fresh concretes for CB I and CB II



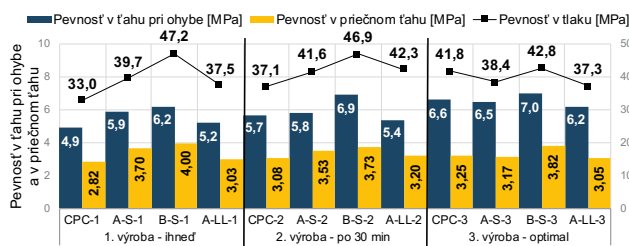
4 Reologické vlastnosti čerstvých betónov pre CB III

4 Rheological properties of fresh concretes for CB III



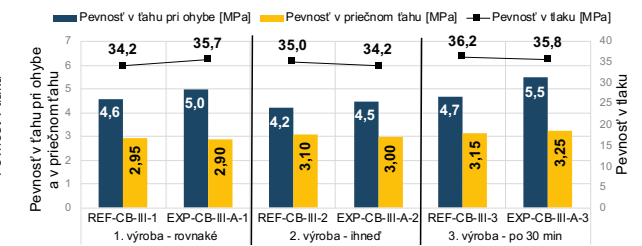
5 Pevnostné charakteristiky zatvrdnutých betónov pre CB I a CB II

5 Strength characteristics of hardened concretes for CB I and CB II



6 Pevnostné charakteristiky zatvrdnutých betónov pre CB III

6 Strength characteristics of hardened concretes for CB III



CB I podľa kapitoly 5.2.2 STN 73 6123 [2], sú uvedené v tab. 1. Cementy sa v niektorých vlastnostiach líšia od požiadaviek pre cestný portlandský cement (CPC) v CB I:

- vyšším merným povrchom (čo môže spôsobiť zvýšenie spotreby zámesovej vody, zvýšené riziko zmrštenia betónu – overujeme ďalšími skúškami),
- vyššou stratou žíhaním okrem CEM III/A (kvôli zmesovosti cementov),
- vyššou hodnotou straty žíhaním u cementu CEM II/A-LL pripisujeme prítomnosti vápenca CaCO₃ (skr. LL), čo sme preukázali termickou analýzou cementu,
- mierne vyšším obsahom MgO pre CEM III/A (pre CB III sa nepredpisuje).

Na základe výsledkov sme zhodnotili, že overované cementy sú vhodné na

ďalšie skúšanie v betónoch pre CBK, kde sa študuje vplyv cementov na podstatné vlastnosti čerstvých a zatvrdnutých betónov.

Skúšky betónov

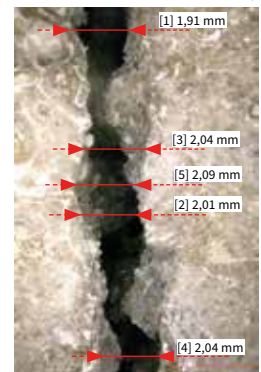
Pre skúšky sme použili dve overené receptúry: 1. pre skupinu CB I a CB II a 2. pre CB III. Vyrobili sme vždy tri zámesi betónov a odskúšali ich reologické vlastnosti a pevnostné charakteristiky podľa požiadaviek STN 73 6123 [2]. Prvé a druhé zámesi pre CB I a II obsahovali rovnaké dávky prísad, v tretej zámesi sa optimálne upravili dávky prísad za účelom dosiahnutia rovnakých reologických vlastností čerstvých betónov. Prvá a tretia zámes sa skúšala a plnila do foriem ihneď po zamiešaní, druhá zámes po 30 min stávia betónu v miešačke. Všetky betóny

mali zložky rovnaké (okrem druhu cementu). Podobne sme postupovali pri CB III, kde prvé zámesi obsahovali rovnaké dávky prísad a skúšali a plnili sa do foriem ihneď po zamiešaní, druhé a tretie zámesi mali upravenú dávku prevzdušňovacej prísady na dosiahnutie porovnateľného obsahu vzduchu a boli skúšané ihneď a po 30 min stávia v miešačke.

Betón s cestným portlandským cementom (CPC) predstavoval prvý referenčný betón a betóny s CEM II/A-S (A-S), CEM II/B-S (B-S) a CEM II/A-LL (A-LL) predstavovali experimentálne betóny pre skupiny CB I a CB II (obr. 3 a 5). Pre skupinu CB III bola použitá 2. receptúra betónov s referenčným cementom CEM II/A-S (REF-CB-III) a experimentálnym cementom CEM III/A (EXP-CB-III-A) (obr. 4 a 6).

7 Plastické zmršťovanie betónov v čerstvom stave 8 Meranie vzniknutej trhliny 9 Detail trhliny

7 Plastic shrinkage of fresh concretes 8 Measurement of a crack 9 Detail of the crack



Tab. 2 Odolnosť betónov proti chem. rozm. látkam a ich mrazuvzdornosť
Tab. 2 Resistance of concretes against chem. deicing agents and their frost resistance

Označenie CBK	Označenie betónu	Odolnosť proti CHRL	Mrazuvzdornosť - 300 cyklov
		odpad po 75/100 cykloch ¹⁾ [g/m ²]	súčiniteľ mrazuvzdornosti [-]
CB I a CB II	REF-CB-I-II-CPC	223	0,91
	EXP-CB-I-A-S	337	1,02
	EXP-CB-I-B-S	622	0,94
	EXP-CB-II-A-LL	340	0,91
CB III	REF-CB-III	57	1,00
	EXP-CB-III-A	128	0,89

Pozn.: ¹⁾ betóny pre CB I a CB II po 100 cykloch, betóny pre CB III po 75 cykloch

Tab. 3 Odolnosť 90-dňových betónov proti chemickým rozmrazovacím látkam
Tab. 3 Resistance of 90-day concretes against chemical deicing agents

Označenie CBK	Označenie betónu	Odolnosť proti CHRL - odpad po 100 cykloch [g/m ²]
CB I a CB II	REF-CB-I-II-CPC	111,43
	EXP-CB-I-A-S	166,16
	EXP-CB-I-B-S	272,47
	EXP-CB-II-A-LL	272,99

Tab. 6 Obrusnosť betónov a ich vlastnosti po dlhobohkej expozícii v laboratóriu a exteriéri
Tab. 6 Abrasion resistance of the concretes and their properties after a long-term exposure in the laboratory and outdoors

Označenie CBK	Označenie betónu	Obrusnosť betónu - úbytok [%]			Pevnosť v tlaku [MPa]			Pevnosť v pričnom ťahu [MPa]			Dynamický modul pružnosti [GPa]		
		hmotnosti	výšky	objemu	lab.	exteriér	zmena	lab.	exteriér	zmena	lab.	exteriér	zmena
CB I a CB II	REF-CB-I-II-CPC	5,7	6,1	19,1	50,6	50,8	0,2	3,73	3,88	0,1	52,8	52,0	-0,7
	EXP-CB-I-A-S	6,1	6,6	20,8	55,9	58,8	2,9	4,05	3,95	-0,1	53,5	52,6	-0,8
	EXP-CB-I-B-S	6,2	6,6	20,4	57,5	52,7	-4,8	4,07	3,85	-0,2	52,6	50,9	-1,7
	EXP-CB-II-A-LL	6,3	6,7	20,7	50,6	50,2	-0,4	3,68	3,75	0,1	51,2	50,1	-1,1
CB III	REF-CB-III	3,8	3,6	11,7	57,1	57,1	0,0	4,05	3,60	-0,5	48,5	47,1	-1,4
	EXP-CB-III-A	3,8	3,9	12,7	58,1	55,6	-2,5	4,18	3,48	-0,7	50,0	46,4	-3,6

Použitím cementov v experimentálnych betónoch pre CB I a II (A-S, B-S a A-LL) sa pri zachovaní dávok prísad (prvá a druhá výroba) menili ich reologické vlastnosti - v porovnaní s referenčným betónom (CPC) sa znižoval obsah vzduchu a znižovala miera sadnutia kužeľa (konzistencia). Optimálnou úpravou dávok prísad (tretia výroba) sa dosiahli betóny porovnateľných reologických vlastností.

Pri zachovaní rovnakých dávok prísad (prvá výroba) boli oba betóny pre CB III charakterizované identickou konzistenciou sadnutím kužeľa (S4), pričom betón s cementom CEM III/A vykázal výrazne nižší obsah vzduchu. Úpravou dávky prevzdušňovacej prísady (druhá a tretia výroba) sme dosiahli porovnateľné hodnoty konzistencie a obsahu vzduchu.

Betóny sme ďalej podrobili skúškam pevností (obr. 5 a 6), odolnosti povrchu proti pôsobeniu vody a chemických rozmrazovacích látok (CHRL) po 75 a 100 cykloch, mrazuvzdornosti po 300 cykloch (tab. 2) a na betónoch z tretej (pre CB I a II), resp. prvej (pre CB III) výroby sa stanovil súčiniteľ priestorového rozloženia vzduchových pórov.

Za účelom komplexného zhodnotenia všetkých relevantných vlastností betónov sme pre CB III vykonali aj skúšky vlastností, ktoré nemajú špecifikované požiadavky podľa STN 73 6123 [2] (mrazuvzdornosť a súčiniteľ priestorového rozloženia vzduchových pórov).

Pri použití overovaných cementov sme v experimentálnych betónoch rovnako ako u referenčných betónov dosiahli parametre pevností podľa kritérií STN 73 6123 [2] pre jednotlivé skupiny CBK. Pevnosti experimentálnych betónov sú porovnateľné s pevnosťami referenčných betónov.

U všetkých betónov bola splnená požiadavka na minimálny súčiniteľ mrazuvzdornosti 0,85 a maximálny stupeň odolnosti proti CHRL po 100 (pre CB I a II), resp. 75 (pre CB III) cykloch maximálne 2 (odpad do 500 g/m²), okrem betónu s cementom CEM II/B-S pre CB I (EXP-CB-I-B-S).

Všetky betóny pre CB I a CB II splnili požiadavku na súčiniteľ priestorového rozloženia vzduchových pórov maximálne 0,24 mm [2]. Pre betóny CB III sa v norme STN 73 6123 [2] toto kritérium nepredpisuje.

Pre CB I a II sme vykonali podľa za-

Tab. 4 Parametre trhliny v betónoch
Tab. 4 Parameters of the cracks in concrete

Označenie CBK	Označenie betónu	Parametre trhliny			
		maximálna šírka [mm]	priemerná šírka [mm]	dĺžka [mm]	celková plocha [mm ²]
CB I a CB II	REF-CB-I-II-CPC	0,47	0,28	309,6	85,2
	EXP-CB-I-A-S	0,65	0,40	295,0	138,7
	EXP-CB-I-B-S	2,15	1,14	277,2	348,2
	EXP-CB-II-A-LL	1,59	0,94	256,3	241,2
CB III	REF-CB-III	1,54	0,79	356,4	281,0
	EXP-CB-III-A	1,70	0,98	314,8	307,6

Tab. 5 Pevnosť v ťahu povrchových vrstiev betónov
Tab. 5 Tensile strength of the surface layers of concrete

Označenie CBK	Označenie betónu	Pevnosť v ťahu povrchových vrstiev [MPa]		
		uloženie vo vode	po 100 cykloch	rozdiel
CB I a CB II	REF-CB-I-II-CPC	4,15	4,26	0,11
	EXP-CB-I-A-S	4,81	4,50	-0,31
	EXP-CB-I-B-S	3,78	3,77	-0,01
	EXP-CB-II-A-LL	4,04	3,92	-0,13
CB III	REF-CB-III	2,69	2,65	-0,04
	EXP-CB-III-A	2,83	2,49	-0,35

dania ZVC opakované skúšky odolnosti betónov proti CHRL vo veku 90 dní od výroby (tab. 3). Zámerom bolo preukázať vplyv všeobecne známej vlastnosti zmesných cementov postupného tvrdnutia aj po 28 dňoch. Táto vlastnosť sa využíva pri skúškach pevnosti po 56 alebo 90 dňoch. Zlepšenie výsledkov opakovaných skúšok po 90 dňoch sa najvýraznejšie prejavilo na betóne s CEM II/B-S, čím sme overili jeho odolnosť proti CHRL v tejto časovej relácii.

Výsledky 2. etapy projektu

Účelom skúšok plastického zmršťovania bolo porovnanie parametrov zámerne vyvolaných trhlín v betónoch pri rovnakom režime uloženia v špeciálnej forme počas prvých 24 h od zamiešania betónov. Trhlna vznikla účinkom plastického zmršťovania čerstvých betónov pomocou pôsobenia vetra a vyvolávača napätia (obr. 7 až 9).

Použitím overovaných cementov sa v porovnaní s referenčnými betónmi ovplyvnilo plastické zmršťovanie betónov a vznikli trhliny s väčšou šírkou (tab. 4). Jednu z hlavných príčin uvádzame súčinnosť menšieho obsahu slinku a väčšieho merného po-

vrchu overovaných cementov oproti referenčným. V praxi sa redukuje riziko vzniku zmršťovacích trhlin napr. vhodným počiatočným ošetrovaním.

Vplyv cementov na súdržnosť povrchových vrstiev betónov sme overovali skúškou ich pevnosti v ťahu. Merali sme súdržnosti povrchovej vrstvy betónu po úprave zdrsnením pred a po skúške odolnosti proti pôsobeniu vody a CHRL (tab. 5). Skúšali sme obrusnosť betónov a vyhodnocovali sme úbytok hmotnosti, výšky a objemu betónovej vzorky po 440 otáčkach obrusovania brúsnym kotúčom (tab. 6). Overované cementy v porovnaní s referenčnými betónmi významne neovplyvnili obrusnosť betónov a súdržnosť ich povrchových vrstiev.

Po jednoročnej expozícii betónov v laboratóriu a exteriéri sme odskúšali dlhodobú pevnosť v priečnom ťahu a v tlaku a dynamický modul pružnosti (tab. 6). Uložením betónov v exteriéri došlo len k marginálnym zmenám v sledovaných vlastnostiach v porovnaní s laboratórnym uložením a referenčnými betónmi.

Literatúra:

- [1] ROBL, P. Výhody cementobetónových vozoviek. *ASB* [online]. 21.07.2011. [cit. 13.08.2021]. Dostupné na: asb.sk/stavebnictvo/inzinierske-stavby/vozovky/vyhody-cementobetónových-vozoviek
- [2] STN 73 6123. *Stavba vozoviek. Cementobetónové kryty*. 2018.
- [3] *Cementing the European Green Deal, Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050* [online]. Cembureau / The European Cement Association. [cit. 25.02.2022]. Dostupné na: cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- [4] MACKOVIČ, R. Dosiachnutie uhlíkovej neutrality v cementárskom priemysle a jej vplyv na betón. In: *Zborník príspevkov z konferencie Betón 2021*. Štrbské Pleso, 2021, s. 13–15.
- [5] STN EN 197-5. *Cement. Časť 5: Portlandský kompozitný cement CEM II/C-M a kompozitný cement CEM VI*. 2022.
- [6] STN EN 197-1. *Cement. Časť 1: Zloženie, špecifikácie a kritériá na preukázanie zhody cementov na všeobecné použitie*. 2012.

Záver

Z porovnania výsledkov skúšok experimentálnych a referenčných betónov vyplývajú nasledovné zistenia:

- všetky betóny spĺňajú požiadavky na reologické vlastnosti pre CBK,
- všetky betóny spĺňajú požiadavky na pevnostné charakteristiky pre CBK,
- všetky betóny spĺňajú odporúčanú požiadavku na mrazuvzdornosť pre CBK,
- všetky betóny okrem betónu s CEM II/B-S spĺňajú požiadavku na odolnosť proti CHRL pre CBK,
- zlepšenie odolnosti betónov proti CHRL bolo dosiahnuté vo veku 90 dní,
- všetky betóny spĺňajú požiadavku na súčiniteľ priestorového rozloženia vzduchových pórov pre CBK,
- parametre experimentálnych betónov s overovanými cementmi sú v rámci prvej aj druhej etapy porovnateľné s referenčnými betónmi s normou [2] povolenými cementmi.

Vykonaný rozsah výskumu neobjavil žiadne významné prekážky pre použitie zmesných cementov v CBK, čím sa preukázala ich vhodnosť podľa zadania. Výsledky poukázali na možné zhoršenie odolnosti betónu proti CHRL vo veku 28 dní a možnú zvýšenú náchylnosť na vznik zmršťovacích trhlin v plastickom stave pri použití cementu CEM II/B-S. Preto sa navrhuje pri aplikácii cementu CEM II/B-S v betónoch pre CB I uplatňovať adekvátne opatrenia na zabezpečenie prijateľnej odolnosti proti CHRL, ako napr.:

- prísnejšie kritériá v rámci skúšok typu,
- zvýšiť početnosť kontrolných skúšok,

- akceptovať výsledky skúšok vykonaných na telesách vo veku 90 dní so sprísneným kritériom,
- v rámci projektovania zohľadniť poveternostné podmienky lokality výstavby a pod.

Výsledky ďalej poukázali na potenciálne riziko vyššej náchylnosti na vznik zmršťovacích trhlin v betónoch pre CB kryty s overovanými cementmi v porovnaní s referenčnými cementmi. Preto sa odporúča venovať zvýšenú pozornosť pri ošetrovaní hlavne čerstvého a mladého betónu v plastickom stave.

V roku 2022 bol ukončený výskumný projekt zameraný na overenie použiteľnosti nového druhu cementu CEM II/C-M (S-LL) podľa STN EN 197-5 v betónoch podľa STN EN 206+A2. Porovnávacími referenčnými cementmi boli CEM I, CEM II/B-M (S-LL) a CEM III/A. Výsledky budú prezentované na slovenských a českých konferenciách.

Tento projekt vznikol vďaka finančnej podpore Zväzu výrobcov cementu SR. Ďakujeme spoločnostiam ALAS SLOVAKIA, s.r.o., Bratislava a Danucem Slovensko a.s. Rohožník za poskytnutie overených receptúr betónov pre CB kryty.



Ing. Michal Bačuvčík, PhD.
bacuvcik@tsus.sk



Ing. Lukáš Húlek
hulek@tsus.sk



Ing. Michal Čápay
capay@tsus.sk



Ing. Ivan Janotka, Dr.Sc.
janotka@tsus.sk

všetci: TSÚS, n. o., Bratislava

inzerce

PROFESIONÁLNÍ ŘEŠENÍ

výzkum ■ vývoj ■ výroba ■ obchod ■ poradenství
pro sanace betonových konstrukcí

Redrock Construction s.r.o.
Újezd 40/450, Michnuv palác
Praha 1, Malá Strana
Telefon: +420 283 893 533
Fax: +420 284 816 112
E-mail: info@redrock-cz.com
www.redrock-cz.com

REDROCK
CONSTRUCTION

ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ OMEZENÍM Vlivu ALKALICKO-KŘEMIČITÉ REAKCE

Tomáš Táborský, Kateřina Jiroušková

Současné hodnocení odolnosti betonu vůči alkalicko-křemičité reakci (ASR) se zaměřuje na reaktivnost kameniva a alkalický ekvivalent v cementu. Při stanovení obsahu jednotlivých alkálií se nicméně prokazuje, že podstatně větší vliv než ionty K^+ mají ionty Na^+ , tedy že při výpočtu alkalického ekvivalentu (ekv. Na_2O) ionty K^+ zkreslují výsledek. Navrhovaná metoda umožňuje dle modelového grafu určit rizikovost určitého cementu pro vznik ASR na základě individuálního vlivu jednotlivých alkalických iontů.

INCREASE OF THE DURABILITY OF CONCRETE ROADS BY LIMITING THE EFFECT OF ALKALI-SILICA REACTION

Current evaluation of resistance against alkali-silica reaction (ASR) is focused on aggregate reactivity and sodium oxide equivalent in cement. When determining the content of alkalis by type (Na^+ and K^+), it is proven that Na^+ ions have a significantly greater influence than K^+ ions. A new method based on a model graph enables the risk of the specified cement for the formation of ASR to be determined according to the individual influence of each alkalis.

V současnosti se odolnost betonu vůči alkalicko-křemičité reakci (ASR) zaměřuje na reaktivnost kameniva a alkalický ekvivalent v cementu. Otázka reaktivnosti kameniva není vždy jednoznačná. Jsou známy případy, kdy se příznaky alkalické rozpínivosti objevily i přesto, že bylo kamenivo vyhodnoceno jako nereaktivní. Podobně ani požadavek na alkalický ekvivalent v použitém cementu není dostatečnou zárukou, že ke vzniku ASR nedojde.

Ve všech slíncích, a tím i v cemen-tech, vyráběných v ČR je několikanásobně vyšší obsah iontů K^+ (0,6 až 0,9 hm. %) oproti obsahu iontů Na^+ (0,1 až 0,2 hm. %). Je to dáno obsahem alkálií v surovinové základně, neboť spalování alternativních paliv obsah alkálií ve slínku významně neovlivňuje.

Při stanovení obsahu jednotlivých alkálií se projevuje podstatně větší vliv iontů Na^+ než iontů K^+ , tzn. že při výpočtu alkalického ekvivalentu (ekv. Na_2O) ionty K^+ zkreslují výsledek. Je proto potřeba se zaměřit na obsah iontů Na^+ , které hrají při vzniku ASR dominantní roli. Alkalický ekvivalent zavádí limitovaný obsah alkálií bez zohlednění rozdílného chování sodíku a draslíku a jejich původu. Toto rozdílné chování je proto vhodné hodnotit odděleně.

V případě dodávání alkálií ve velkém měřítku zvenčí je pro vznik ASR v betonu význam obsahu alkálií v ce-

mentu méně důležitý. Na tomto místě je důležité zmínit schopnost některých složek cementu naopak zvyšovat chemickou odolnost betonu a omezovat vznik ASR snižováním celkové alkality betonu. Proto je nezbytné nejen sledovat a snižovat obsah alkálií v cementu, ale zároveň pomocí vhodných složek nebo přísad do cementu omezit možnost aktivace chemické reakce mezi alkáliemi (ze všech možných zdrojů) a aktivním SiO_2 obsaženým v kamenivu.

Je zjevné, že se účinky jednotlivých alkálií liší a že je potřeba zabývat se jejich rozdílným chováním při ASR. V rámci řešení projektu Zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů (CBK) pozemních komunikací omezením vlivu alkalicko-křemičité reakce (ASR) se Výzkumný ústav maltovin Praha (VUMO) ve spolupráci s VÚT v Brně zaměřil na:

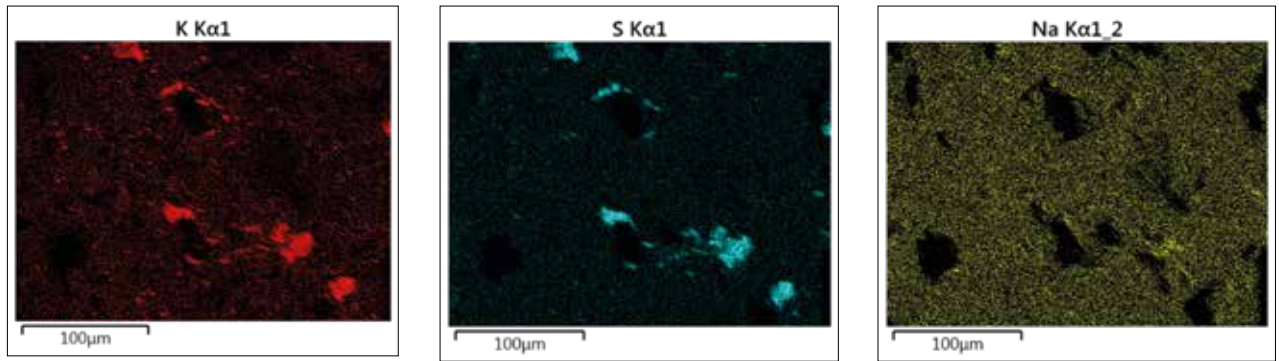
- zjištění rozdílné aktivity jednotlivých alkálií:
 - alkálie, které vstupují do betonu spolu s cementem,
 - alkálie, které působí zvenčí (prostředky zimní údržby),
- nalezení vhodných způsobů odhadu chování daného cementu s daným typem kameniva,
- určení možností eliminace rizik vzniku ASR úpravou složení slínku a použitím vhodných složek cementu bránících nastartování ASR.

Zjištění rozdílů v aktivitě alkálií podle druhu (Na^+ , K^+) a podle jejich způsobu vazby v portlandském slínku

Pro vznik ASR je důležité to, jak rychle přechází jednotlivé alkálie do pórových roztoků betonu, čímž jsou k dispozici pro reakci s reaktivními křemičitany na povrchu kameniva. Způsob vazby alkálií ve slínku ovlivňuje rychlost přecházení iontů Na^+ a K^+ do roztoku v průběhu hydratace cementu a z toho plyne, že jednotlivé alkálie mohou do reakcí vstupovat v jiné fázi tvrdnutí betonu.

Pomocí mappingu na elektronovém mikroskopu bylo potvrzeno, že se draslík ve slínku vyskytuje převážně jako minerál arkanit (síran draselný). Draslík se vyskytuje společně se sírou, většinou v okolí uzavřených pórů – obr. 1a a 1b). Oproti tomu sodík je rozptýlen rovnoměrně po celé hmotě slínku – obr. 1c). Z toho plyne, že sodík vstupuje do krystalové mřížky slínkových minerálů, většinou trikalciumaluminátu, který krystaluje v ortorhombické soustavě namísto v soustavě kubické.

Na jaké další slínkové minerály, kromě arkanitu, jsou alkálie vázány, ale není zřejmé. Proto byly laboratorně připraveny surovinové směsi z čistých chemikálií, do nichž byly přidávány alkálie ve formě uhličitánů sodných a draselných a síranů



1 Rozložení výskytu: a) sodíku, b) draslíku, c) síry 1 Distribution of: a) sodium, b) potassium, c) sulphur

sodných a draselných. Množství bylo spočítáno tak, aby podíl alkálií ve slínku odpovídal obsahu 1,2 % ekv. Na₂O (tato hodnota vychází z normy ČSN 72 117 Stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi). Z takto připravených surovinových směsí byly v laboratorní peci vypáleny slínky. Všechny surovinové směsi měly stejné moduly a stupeň sycení. Slínky byly kvantitativně a kvalitativně analyzovány na elektronovém mikroskopu a bylo potvrzeno, že alkálie přednostně vstupují do slínkových fází dle následujícího pořadí C₃A > C₄AF > C₂S > C₃S.

Přítomnost alkálií ve slínkových fázích byla zjišťována na laboratorně připravených slínkách pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu s elektrodynamickou sondou. V tab. 1 jsou uvedené koncentrace alkálií zjištěných v jednotlivých slínkových minerálech.

Pro ověření rychlosti přecházení alkálií do roztoku byl pomocí výluho-

vé zkoušky simulován hydratační proces během tvrdnutí betonu. Byly připraveny cementové suspenze a v nich byl v daných intervalech stanoven podíl rozpuštěných alkálií přešlých do roztoku.

V grafu na obr. 2 je zaznamenána kinetika vyluhování alkálií ze slínků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě uhličitanů, tj. Na₂CO₃ a K₂CO₃. Předpoklad je, že uhličitaný během výpalu odtěkají a alkálie se zabudují do mřížky slínkových minerálů. Na grafu lze pozorovat, že:

- sodík (modrá křivka) se začne rozpuštět až po jedné hodině, ve stejnou dobu se začíná rozpadat primární ettringit a začíná hydratace trikalciumpuluminátu C₃A. Z tab. 1 lze navíc vyčíst, že nejvíce sodíku je přítomno v mřížce C₃A (5,96 % Na),
- draslík (zelená křivka), který se oproti sodíku rozpouští okamžitě, a to ve formě arkanitu, se ve slínku

objevil jak samotný, tak i ve formě arkanitu, přičemž do mřížky C₃A se zabudoval jen v polovičním množství (3,08 % K – tab. 1), více draslíku bylo také nalezeno v mezerní hmotě, která je vůči rozpouštění inertní.

V grafu na obr. 3 je zaznamenána kinetika vyluhování alkálií připravených ze slínků s dotovanými alkáliemi ve formě síranů, tj. Na₂SO₄ a K₂SO₄, neboť se předpokládá, že alkálie se ve slínku budou vyskytovat jako sírany. Na tomto grafu lze pozorovat, že:

- draselné ionty (fialová křivka) v přítomnosti síry zůstávají převážně ve formě arkanitu, do roztoku přechází okamžitě z 80 %,
- sodík se se sírou vyvázal ze 40 % (oranžová křivka), do roztoku následně přechází sodíkové ionty vázané v C₃A, do belitu přešlo 1,3 % sodíku (draslíku pouze 0,48 %). Belit se rozpouští nejpomaleji,

Tab. 1 Koncentrace alkálií v jednotlivých slínkových minerálech, slínek připravený s dotovanými alkáliemi do surovinové směsi

Tab. 1 Concentration of alkalis in clinker minerals, the clinker was prepared with the alkali added to the mix of the raw materials

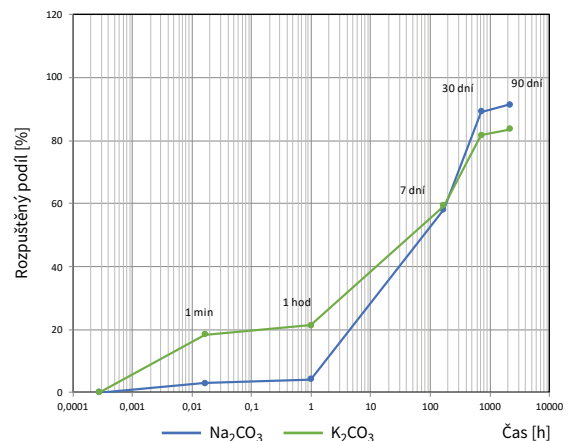
	+ Na ₂ CO ₃ [hm. % Na ₂ O]	+ K ₂ CO ₃ [hm. % K ₂ O]	+ Na ₂ SO ₄ [hm. % Na ₂ O]	+ K ₂ SO ₄ [hm. % K ₂ O]
alit	0,25	0,03	0,19	0,01
belit	1,43	1,16	1,30	0,48
C ₃ A	5,96	3,08	0,89	0,39
C ₄ AF (mezerní hmota)	0,51	1,37	0,24	0,03

Tab. 2 Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi (zkouška podle TP 137)

Tab. 2 Classification of aggregate for concrete from the point of view of its reactivity with alkalis (test according to TP 137)

Riziko reakce s alkáliemi	Rozpínavost vzorků
nízké	≤ 0,1 % délky
střední	0,1 až 0,2 % délky
vysoké	> 0,2 % délky

Slínek Na₂CO₃ x K₂CO₃



2 Porovnání kinetiky vyluhování slínků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě Na₂CO₃ a K₂CO₃

2 Comparison of the leaching kinetics of clinkers prepared with added alkali in the form of Na₂CO₃ and K₂CO₃

bude tedy mít podíl na dlouhodobém rozpouštění.

Výsledky mappingu

Ukazuje se, že draslík je v cementech přítomen především ve své rozpustné formě jako síran, takže během procesu tuhnutí dojde ihned k jeho rozpouštění a následnému zreagování. Oproti tomu sodík je zabudovaný do krystalové mřížky a uvolňuje se postupně ve fázi, kdy už je proces tuhnutí ukončen, čímž může docházet k porušování struktury ztvrdlého betonu. Z uvedeného plyne, že sodík je v procesu vzniku ASR mnohem nebezpečnější.

Přítomnost síranových iontů v procesu výpalu slínku má velký význam. Bez přítomnosti síranů jsou alkálie, pokud nevytěkají při výpalu, vázány ve slínkových minerálech a nevyskytují se jako dobře rozpustné alkalické sírany.

Stanovení vlivu alkálií působících na CBK zvnějšku a zjištění rozdílu reakce Na⁺ a K⁺ iontů

Klíčové informace o vlivu alkálií působících zvnějšku a zjištění rozdílu reakce Na⁺ a K⁺ iontů byly získány pomocí modifikované dilatometrické zkoušky ASTM C-1260-14.

Tato metoda umožňuje zjistit během 16 dní ASR kameniva s alkáliemi na zkušebních maltových trámečcích o rozměrech 250 × 250 × 285 mm. Trámečky se umístí do 1N roztoku NaOH

na dobu 14 dní a po celou dobu se udržuje teplota 80 °C.

Za účelem zjištění rozdílného chování alkálií dodaných zvenčí, tzn. že chování není ovlivněno způsobem jejich vazby, byla metoda modifikována a trámečky byly ukládány jak do 1N roztoku NaOH, tak roztoku KOH.

Trend rozdílného chování je patrný na výsledcích uvedených v tab. 3. Zatímco alkalická rozpínavost vzorků uložených v roztoku KOH (vnější vliv draselných iontů) nepřekročila hodnotu 0,1 % délky, vzorky uložené v roztoku NaOH (vnější vliv sodných iontů) vykazovaly alkalickou rozpínavost v závislosti na obsahu strusky.

Na stejných směsích byly současně prováděny dlouhodobé dilatometrické zkoušky podle ČSN 72 1179, kdy byly jednotlivé alkálie přidávány do záměsové vody tak, aby jejich obsah odpovídal 1,2 % ekv. Na₂O v cementu (za účelem zjištění rozdílného chování alkálií, které jsou vnášeny cementy). Zde byly rozdíly mezi účinkem Na₂O a K₂O mnohem menší.

Výsledky dilatometrických zkoušek

Z dosažených výsledků dilatometrických zkoušek je evidentní rozdíl mezi účinky sodíku a draslíku a rozdíl mezi tím, když jsou alkálie obsaženy v betonové směsi od počátku, nebo když vstupují zvenčí až do ztvrdlého betonu (a to i při vysoké koncentraci).

Lze vyvodit, že průběh ASR nezá-

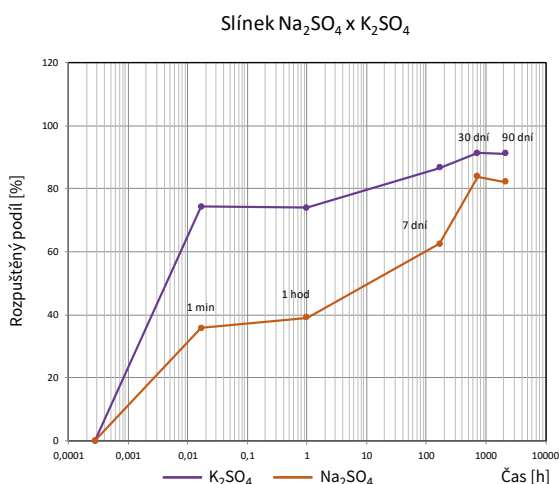
visí pouze na obsahu ekv. Na₂O, ale také na mobilitě a rychlosti difuze alkálií v pórovém roztoku (sodík má menší iontový poloměr a vyšší hustotu náboje).

Dále se potvrdilo, že směsné cementy mají na průběh ASR značný vliv. Složky cementu s pucolánovými nebo latentně hydraulickými vlastnostmi díky pucolánové reakci snižují celkovou alkalitu vody v pórech ztvrdlého betonu a obsah alkálií schopných vstupovat do reakce (alkálie jsou např. ve strusce přítomny ve sklovité fázi, takže se snižuje jejich dostupnost), rovněž snižují propustnost a možnost difuze v betonu. Složky směsných cementů mají vysoký obsah reaktivního SiO₂ velice jemně rozptýlený, a proto reakce ASR proběhne ještě dříve, než stihne směs ztvrdnout, a nedochází tak k expanzi a vzniku trhlin.

Nová metodika zkoušení – obsah alkálií v roztoku nad hydratujícím cementem

Dosažené výsledky byly použity k vývoji nové metodiky, která vhodně doplňuje hodnocení pomocí alkalického ekvivalentu. Tato metodika zahrnuje stanovení výluhu jednotlivých sodných a draselných alkálií a rozšiřuje tak stanovení obsahu ekv. Na₂O. Cílem vytvoření nového zkušebního postupu je rychlá laboratorní kontrola cementu k vyhodnocení rizika vzniku ASR.

Poměr hlavních složek směsného



3 Porovnání kinetiky vyluhování slíneků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě Na₂SO₄ a K₂SO₄

3 Comparison of the leaching kinetics of clinkers prepared with added alkali in the form of Na₂SO₄ and K₂SO₄

Tab. 3 Porovnání alkalické rozpínivosti v roztoku NaOH a KOH

Tab. 3 Comparison of alkali expansion in NaOH and KOH solutions

Označení cementu	Obsah strusky [% hm.]	Na ₂ O	K ₂ O	ekv. Na ₂ O	Alkalická rozpínavost [%]		Rozpínavost v KOH/NaOH [%]
					v NaOH	v KOH	
CEM I	0	0,18	0,83	0,73	0,210	0,075	280
CEM II/A-S	10	0,22	0,79	0,74	0,174	0,063	276
CEM II/A-S	20	0,25	0,75	0,74	0,140	0,069	203
CEM II/B-S	30	0,28	0,7	0,74	0,097	0,048	202

Tab. 4 Výsledky dlouhodobých dilatometrických zkoušek podle ČSN 72 1179

Tab. 4 Results of a long-term dilatometric tests according to ČSN 72 1179

Označení cementu	Obsah strusky [% hm.]	Na ₂ O	K ₂ O	ekv. Na ₂ O	Alkalická rozpínavost [%]	
					Cement dotovaný Na	Cement dotovaný K
CEM I	0	0,18	0,83	0,73	0,036	0,030
CEM II/B-S	30	0,28	0,7	0,74	0,011	0,011

cementu je úměrný obsahu a lokaci jednotlivých alkálií Na^+ a K^+ . Vhodný poměr hlavních složek cementu pro jeho bezpečné použití v CBK s ohledem na vznik ASR se tak určí z modelového grafu (příklad na obr. 4), který je na základě výsledků dilatometrických a výluhových zkoušek vytvořen pro každý vyráběný cement. V grafu jsou znázorněny vztahy mezi alkalicou rozpínavostí daného cementu s vybraným kamenivem, obsahem hlavní složky a obsahem alkálií v roztoku nad hydratujícím cementem v čase 1 h.

Pro zjednodušení se v následujících příkladech použití předpokládá jako hlavní složka struska.

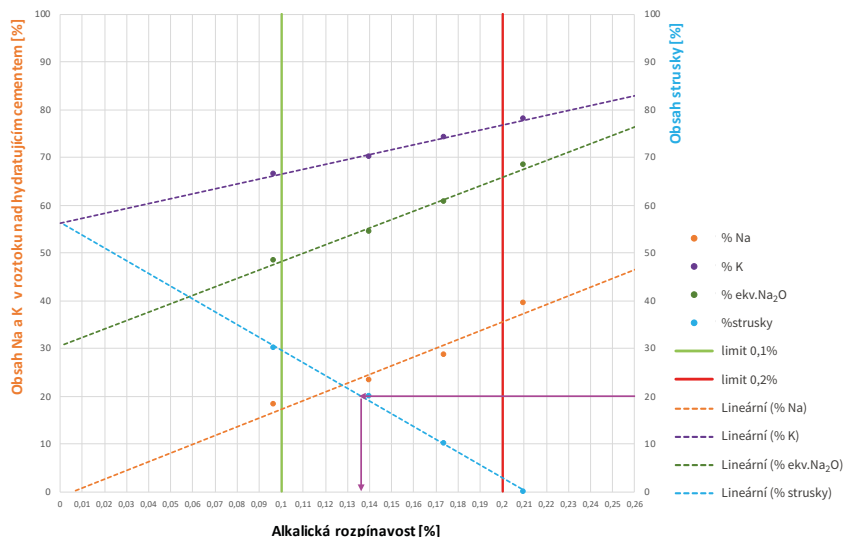
Příklady použití

Při použití této metody je vytvořen modelový graf pro určení rizikovitosti cementu ke vzniku ASR, který popisuje chování daného cementu během zrychlené dilatometrické zkoušky rozpínání podle přílohy 1 TP 137 Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi. (V metodice se uvažuje použití kameniva droba, které je středně reaktivní a je nejčastěji používané na stavbách cementobetonových pozemních komunikací v ČR.)

Díky dosaženým výsledkům bude výrobce schopen určit chování daného cementu s kamenivem droba a obsah strusky potřebný k tomu, aby alkalicí rozpínavost byla maximálně 0,1 % (hodnoceno jako nízká rizikovitost podle TP 137 tabulky 2) nebo 0,2 % (hodnoceno jako střední rizikovitost). Chování každého cementu je specifické a nesporná výhoda této metody spočívá v tom, že jsou v grafech znázorněny vztahy, ve kterých je zohledněno jak složení konkrétního cementu, tak přítomnost daného kameniva.

Příklad 1 – z pohledu výrobce

Pro daný směsný cement se vytvoří modelový graf, na kterém bude možné odečítat vztah mezi alkalicí rozpínavostí a obsahem strusky, kterou znázorňuje modrá křivka. Výrobce tak bude moci optimalizovat obsah strusky v cementech typu CEM II/A-S (obsah strusky 6 až 20 %) a CEM II/B-S (obsah strusky 21 až 35 %).



4 Modelový vztah mezi alkalicí rozpínavostí, obsahem strusky a obsahem alkálií dostupných během procesu tvrdnutí

4 Model relationship between alkali expansion, slag content and alkali content (content of alkalis available during the hardening process)

Zdroje:

- [1] MODRÝ, S. *Reakce kameniva s alkáliemi v betonu, příčiny a důsledky rozpadu, diagnostika a omezení rizik*. Praha: Sekurkon, 1999.
- [2] *Zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů (CBK) pozemních komunikací omezením vlivu alkalicí-křemičité reakce (ASR). Závěrečná zpráva projektu z let 2019–2022.*

Tab. 5 Klasifikace kameniva do betonu podle TP 137 z hlediska rizika reakce s alkáliemi po šesti měsících (zkouška podle ČSN 721179)

Tab. 5 Classification of aggregates for concrete according to TP 137 from the point of view of their reaction with alkalis after 6 months (test according to ČSN 72 1179)

Riziko reakce s alkáliemi	Rozpínavost vzorků
nízké	≤ 0,070 % délky
střední	0,070 až 0,100 % délky
vyšší	> 0,100 % délky

V grafu na obr. 3 je šipkami purpurové barvy naznačený postup při odečítání. Alkalicí rozpínavost je pro tento cement s obsahem strusky 20 % přibližně 0,135 %, tzn. že směs daného cementu a kameniva droba bude při dilatometrické zkoušce vykazovat střední rizikovitost.

Výrobce cementu bude moci průběžně pomocí rychlé laboratorní zkoušky stanovovat obsah vyluhovaných alkálií a jednoduše tak ověřovat vlastnosti cementu ve vztahu k riziku vzniku ASR.

Příklad 2 – z pohledu odběratele

Zpracovatel nebo odběratel cementu nebude znát informaci o obsahu strusky v cementu. Pomocí modelového grafu bude moci určit vztah mezi podílem vyluhovaného sodíku a alkalicí rozpínavostí. Provede se výluhová zkouška a stanoví se poměr vyluhovaného sodíku (příp. alkálií) např. 20 %, přičemž jde o rychlou la-

boratorní kontrolu. Na oranžové křivce se pro daný cement odečte alkalicí rozpínavost 0,115 %, tzn. že směs daného cementu a kameniva droba bude při dilatometrické zkoušce dle TP 137 vykazovat střední rizikovitost. Ověří se tak, zda cement odpovídá svému účelu použití a zda riziko vzniku ASR odpovídá očekávání.

Závěr

Na základě výsledků dilatometrických zkoušek (zrychlené a dlouhodobé, kdy první zohledňuje především vliv alkálií působících zvenčí a druhá hodnotí především vliv alkálií obsažených v cementu) lze říci, že výrazně větší vliv mají alkálie vstupující zvenčí, zejména Na^+ (rozmrazovací soli) oproti K^+ .

Používání rozmrazovacích solí se při zimní údržbě nelze vyhnout. Ani používání kameniva s minimálním či nulovým obsahem reaktivních forem SiO_2 není vzhledem k dostupnosti lokalit, kde se takové kamenivo těží,

vždy možné. Kamenivo může navíc mít i v rámci jedné lokality proměnlivé vlastnosti, což je dáno existencí mnoha forem reaktivního SiO₂. Takže neefektivnější cestou kontroly vzniku ASR je návrh betonové směsi, který počítá s možností výskytu reaktivního kameniva.

V rámci zmiňovaného projektu bylo prokázáno, že na omezení vzniku alkalicko-křemičité reakce mají vliv především složky cementu s pucolánovými vlastnostmi, jako je struska, popílek, mikrosilika nebo přírodní pucolány. Pomocí směsných cementů lze také eliminovat nebezpečí vzniku alkalické reakce přísunem alkálií zvnějšku (posypová sůl). Jako hlavní přednosti směsných cementů lze uvést:

- podstatně snižují riziko vzniku ASR tím, že reagují s hydroxidem vápenatým (portlanditem) za vzniku převážně kalcium silikát hydrátů (CSH). Důsledkem této interakce je snížení pH,
- velmi jemně semletá struska v cementu vnáší rovnoměrně rozložený reaktivní SiO₂, který může reagovat

s alkáliemi z cementu ještě během procesu tuhnutí, kdy tvorba alkalicko-křemičitého gelu není škodlivá, protože je cementová pasta ještě plastická,

- alkálie jsou ve strusce (jako složky cementu) vázány ve sklovité fázi, čímž se snižuje jejich dostupnost a reaktivita. Proto se použitím náhrad cementu relativně snižuje obsah alkálií přítomný v cementu,
- granulometrická návaznost mletého slínku a mleté strusky vede k hutnější struktuře, čímž se snižuje možnost vlivu alkálií působících zvenčí (rozmrazovací soli), které by se mohly dostat k reaktivním zrnům kameniva,
- po ztuhnutí je struktura cementového kamene uzavřenější a hutná a brání tak prostupu alkálií působících zvnějšku. Snižuje se také průnik vody do zatvrdlého betonu.

Pro zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů pozemních komunikací omezením vlivu alkalicko-křemičité reakce je ve srovnání s portlandským cementem CEM I vhodné použití směsných cementů s obsahem 20 až 50 %

dalších hlavních složek s pucolánovými nebo latentně hydraulickými vlastnostmi. Vhodný poměr hlavních složek cementu závisí na obsahu jednotlivých alkálií Na⁺ a K⁺ a lze jej stanovit s využitím nové zkušební metodiky a vyhodnocením dle příslušného modelového grafu pro daný cement.

Nová zkušební metoda doplňuje hodnocení pomocí alkalického ekvivalentu a přináší možnost kvantifikovat citlivost celého systému pro vznik ASR, čímž je možné zjistit úroveň rizika.

Článek vznikl v rámci projektu č. TH04010207 Zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů (CBK) pozemních komunikací omezením vlivu alkalicko-křemičité reakce (ASR), jenž se zabýval problematikou alkalicko-křemičité reakce z pohledu vyráběných cementů. Řešiteli byli VUMO Praha a VUT v Brně.



Ing. Tomáš Táborský
taborsky@vumo.cz



Ing. Kateřina Jiroušková

oba: Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o.

inzerce



Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o., Vás zve na odborný seminář

VÁPNO, CEMENT, EKOLOGIE

15.–17. 5. 2023 Kongresový hotel Jezerka na Seči

- Revize směrnice o průmyslových emisích (IED)
- Principy zavádění CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism
- Snižování rtuti a těžkých kovů v odpadních plynech
- Kamenivo z recyklovaného betonu – granulometrie, ekonomika výroby
- Principy revize Construction Product Regulation
- Aktuální novinky v oblasti legislativy odpadového hospodářství
- Presentace technologií pro úsporu energií a údržbu

www.vumo.cz

RYCHLETVRDNOCÍ BETON PRO SANACI CEMENTOBETONOVÝCH PLOCH

Dogaç Özsar, Felicia Nägele

Opravy přistávacích a vzletových drah, pojezdových drah a odstavných ploch letišť je nutné provádět s minimálním dopadem na samotný letištní provoz. V takových případech se během posledních 15 let osvědčilo použití nové generace rychletrvdoucích betonů. V článku je blíže popsán jeden typ takového betonu, resp. Q-Flash 2/20, včetně tří příkladů, kde byl tento materiál použit.

RAPID-HARDENING CONCRETE FOR PAVEMENT REHABILITATION

Rehabilitation of the surfaces of airport runways, taxiways and parking position pavements must be carried out with minimal impact on the airport operation itself. In such cases, the use of a new generation of rapid-hardening concretes has proven its worth over the last 15 years. One type of such concrete, Q-Flash 2/20, is described in more detail in this article, including three examples where this material has been used.

Nová generace rychletrvdoucích betonů

Letiště jsou v provozu nepřetržitě 24 h denně po 7 dní v týdnu, a to jak aktivně, zatížena leteckým provozem, tak i pasivně, v přestávkách mezi odlety a přílety letadel. K poškození povrchů ploch tvořených cementobetonovým krytem dochází jak na přímo pojízdných, tak odstavných (parkovacích) plochách v důsledku dlouhodobého používání (opotřebení) nebo přetěžování (vyššího zatížení oproti původně plánovanému). Vzhledem k rostoucímu počtu přepravovaných cestujících a tím nárůstu hustoty leteckého provozu je třeba provádět opravy letištní infrastruktury bez omezování provozu letiště. V neposlední řadě také proto, aby bylo zabráněno možným ekonomickým ztrátám. Dosud používané tradiční postupy jsou z tohoto pohledu již nedostačující, a proto bylo nutné zavést nové inovativní metody, které jsou rychlé a které umožňují dosáhnout kvalitních výsledků včetně následné dlouhé životnosti opraveného úseku. Opravy musí být zvládnuty v krátkých časových intervalech tak, aby nebyla ohrožena bezpečnost leteckého provozu a aby nedošlo k ekonomickým ztrátám.

Dosavadní zkušenosti ukazují, že jednou z možností je použití rychletrvdoucích betonů nové generace. Ten získává svoji pevnost oproti předchozí generaci rychletrvdoucích betonů pomocí rozdílných mechanismů procesu tuhnutí a tvrdnutí. Pokud jde o splnění příslušných norem a zejména

na požadavků na trvanlivost, byl by běžný, dosud používaný rychletrvdoucím beton téměř ve všech následně uvedených případech nedostačující. Vhodnost rychletrvdoucích betonů nové generace s vysokou trvanlivostí prokazují zkušenosti s jeho aktivním používáním na různých letištích ve všech částech světa po dobu více než 15 let.

Konkrétně rychletrvdoucím beton Q-Flash 2/20, produkt švýcarské společnosti Concretum, byl vyvinut speciálně pro opravy letištních ploch a drah, které je nutné realizovat během krátkých časových intervalů. Jeho dlouhodobá trvanlivost je založena na mechanismu procesu tuhnutí a tvrdnutí, jenž je výsledkem hydratace kalciumsulfoaluminátu (CSA) a fázových složek portlandského cementu. Podle požadavků projektu a podle způsobu uložení je možné upravovat i dobu zpracovatelnosti v intervalu od 45 do 120 min. Díky nízkému hydratačnímu teplu a zároveň vysoké počáteční pevnosti čerstvého betonu je beton Q-Flash 2/20 připraven k používání do jedné hodiny od uložení. To umožňuje stanovit dobu potřebnou pro výrobu a uložení betonu, které na letištích probíhají zpravidla v nočních hodinách.

Pro opravy menších ploch, k nimž stačí malé objemy betonu, mohou být použity betony s kratší dobou zpracovatelnosti – tyto opravy jsou pak rychlé. Uložení většího množství betonu na velké ploše pak samozřejmě vyžaduje delší dobu zpracovatelnosti. Je

možné ho vyrábět a zpracovávat stávajícími výrobními prostředky a tradičními betonářskými metodami, bez potřeby dodatečných investic. Jeho přípravu a uložení tedy zvládne i pracovní tým se zkušenostmi s tradičními metodami betonářů.

Vzhledem k flexibilitě dosahovaných vlastností betonu (konzistence, doba zpracovatelnosti, pevnost, stupně vlivu prostředí) je beton Q-Flash 2/20 vhodný pro všechny výrobní postupy. Důležitými parametry, které výrobní postup nakonec určují, jsou tak velikost plochy, která má být opravována, složení betonu a plánovaný denní objem oprav. Beton lze připravit jak ve stálé, tak i mobilní betonárně. Pro opravy malého rozsahu jej lze připravit přímo na staveništi pomocí domíchávače či přenosné míchačky.

Opravy na mezinárodním letišti v Curychu

Rychletrvdoucím beton Q-Flash 2/20 byl poprvé použit v roce 2004 na opravu pojezdové dráhy Bravo na mezinárodním letišti v Curychu (obr. 1). V současnosti je opravená plocha stále používána v nezměněné kvalitě. Tato technologie se na letišti v Curychu používá dodnes a bylo pomocí ní opraveno již přibližně 30 000 m² ploch. Ukládání betonu bylo prováděno různými způsoby – jak ručně, tak i mechanizovaně pomocí finiše-ru. Během necelých 19 let byly používány rozdílné metody výroby, hlavní však byla výroba betonu na stabilních betonárnách. Pro tento způsob výroby



1a

1b

by byly od počátku vhodné všechny betonárny v blízkosti letiště. Přeprava betonu na stavbu byla prováděna pomocí sklápěcích nákladních vozidel a autodomývačů. Většina prací byla prováděna od 23 do 6 h, aby byl minimalizován nepříznivý dopad na letecký provoz. Význam těchto oprav postupně narůstal spolu s nárůstem počtu odbavovaných letů a omezeného prostoru na letišti. Během nočních prací byli technologové společnosti Concretum k dispozici jak na vlastním staveništi, tak i na betonárně, aby bezprostředně podporovali každou fázi výrobního postupu (tab. 1).

Letiště Curych kladlo vysoké požadavky na vlastnosti čerstvého betonu, na rychlý nárůst pevnosti i na vysokou trvanlivost betonu. Před opětovným povolením k používání přistávací a vzletové dráhy byla ve specifikaci betonu požadována minimální pevnost v tlaku $f_{c,cube} 16 \text{ N/mm}^2$. Beton Q-Flash 2/20 umožňuje dosáhnout maximální hodnoty $f_{c,cube} 20 \text{ N/mm}^2$ již během 2 h tvrdnutí.

Obnova ranveje na istanbulském mezinárodním letišti Sabiha Gökçen

Mezinárodní letiště Sabiha Gökçen, které v Istanbulu slouží jako vedlejší letiště, bylo postaveno v roce 2001. Původní projektovaná kapacita činila 3,5 milionu cestujících, avšak již krátce po jeho otevření se počty odbavených cestujících začaly rychle zvyšovat. V roce 2008 byla kapacita terminálu navýšena na 25 milionů cestujících bez jakýchkoli stavebních prací či úprav. Projektované vytížení letiště, činící 25 milionu cestujících ročně, bylo překročeno v roce 2015. V současnosti již ročně odbaví 41 milionů cestujících a je tak jedním z nejnrušnějších letišť s jedinou ranvejí a pouze jedním odbavovacím terminálem.

Tento rychlý nárůst měl samozřejmě negativní dopad na ranvej, zejména v její ose, která je letadly zatěžována nejvíce. Skutečnost, že letiště ani při tomto hustém leteckém provozu nemá možnost použít alternativní vzletovou a přistávací dráhu, znamená, že správa letiště má velmi omezené možnosti její

Tab. 1 Vlastnosti betonu Q-Flash 2/20 pro noční práce na mezinárodním letišti v Curychu

Tab. 1 Concrete properties of concrete Q-Flash 2/20 for nightly work at Zurich International Airport

stupeň vlivu prostředí	XC4, XD3, XF4
třída pevnosti	C50/60
třída konzistence	S1/S2 (C1/C2)
maximální velikost zrna kameniva	32 mm (těžené)

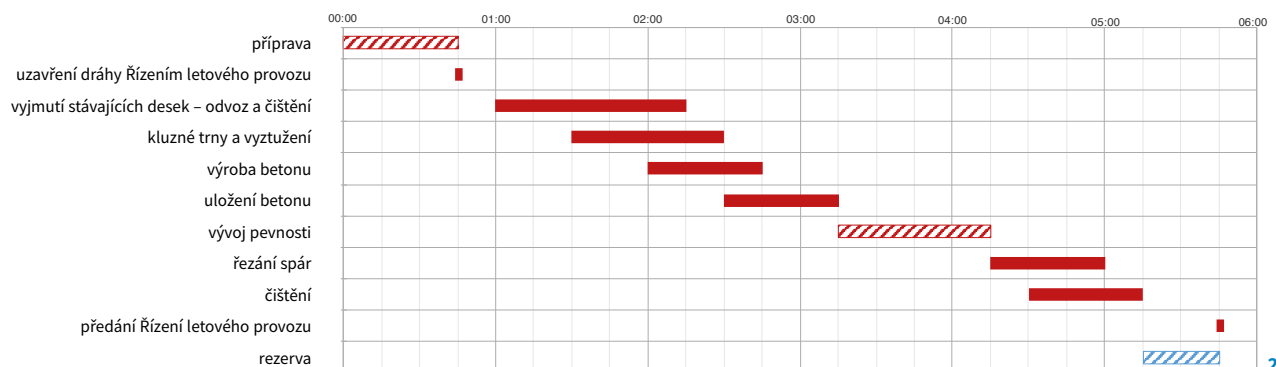
1 Fotografie desky opravené v roce 2004 po 11 letech užívání

1 Photo of the slab repaired in 2004 after 11 years in service

údržby. V roce 2018 bylo proto rozhodnuto, že práce související s opravami ranveje budou prováděny během nočních uzavírek od 0:50 do 5:50, a to vždy pět dnů v týdnu. Aby bylo možné zajistit, že na opravu a opětovné použití konkrétního úseku letové dráhy bude stačit pět hodin, byl pro realizaci prací vybrán rychletvrdnoucí beton s vysokou trvanlivostí. Vzhledem k objemu betonu použitému na opravy v roce 2018 se jedná o dosud nejrozsáhlejší projekt aplikace rychletvrdnoucího betonu.

Požadavkem pro zpětné uvedení ranveje letiště do provozu bylo dosažení minimální pevnosti v tlaku $f_{c,cube} 16 \text{ N/mm}^2$. Očekávaná konzistence betonu byla podobná konzistenci betonu používaného pro zhotovení silničního cementobetonového krytu tak, aby bylo možné provádět výrobu betonu a následnou manipulaci s ním pomocí stávajícího vybavení a stávajícím kvalifikovaným personálem. Beton byl vyráběn v betonárně zřízené speciálně pro tento projekt, jež byla vzdálená 15 min jízdy od letiště. Beton byl přepravován

2 Harmonogram nočních stavebních prací na mezinárodním letišti Sabiha Gökçen **2** Nightly construction schedule for Sabiha Gökçen International Airport





3



4



5



6



7



8



9

3 Rozbítí a odstraňování starých betonových desek **4** Umístování výztuže, zatímco je odstraňována zbylá část desky **5** Uložení betonu do oblasti desky pomocí bagru **6** Zhutňování betonu vibrací a konečná úprava povrchu **7** Zdršňování povrchu kartáčem **8** Ošetřování betonu a přikrytí povrchu pro zajištění nárůstu pevnosti **9** Řezání spár

3 Breaking and removing of old slabs 4 Reinforcement placement while the rest of the slab is being removed 5 Concrete placement into the slab with the aid of excavator 6 Concrete compacting, vibrating and surface finishing 7 Broom finish application 8 Concrete curing and surface cover application for strength development 9 Joint cutting

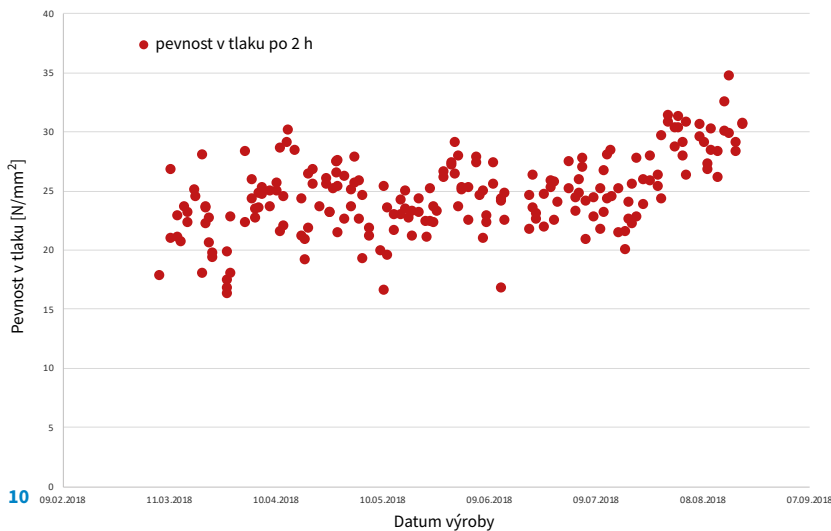
sklápěcími nákladními vozidly, čímž byla umožněna rychlá nakládka betonu u betonárny i vykládka na staveništi. Dalšími výhodami použití sklápěcích nákladních vozidel byla možnost vizuální kontroly konzistence betonu a snadného měření teploty čerstvého betonu v průběhu výroby. V neposlední řadě byla tato vozidla využívána i pro přepravu odstraněných původních betonových desek. Přímo u betonárny byli přítomni techničtí pracovní-

ci společnosti Concretum, aby mohli poskytnout potřebnou podporu a aby mohli okamžitě reagovat na jakoukoli změnu stanovených parametrů betonu. V grafu na obr. 10 jsou uvedeny hodnoty pevnosti v tlaku dosažené během roku 2018. Doba zpracování betonu byla udržována v rozmezí 45 až 120 min podle požadavků zhotovitele.

Beton Q-Flash 2/20 obsahoval pojivo na plně cementové bázi Q-Flash cem 100 (P), superplastifikátor Q-Flash sp (L)

a zpomalovač tuhnutí Q-Flash ret (L), kterým se regulovala doba zpracovatelnosti. Kamenivo, které bylo používáno pro přípravu betonové směsi, pocházelo z místních zdrojů v okolí Istanbulu, přičemž maximální velikost zrna byla 38 mm. Vodní součinitel v/c vyráběného betonu byl udržován v rozmezí 0,31 až 0,35. Podrobné složení betonu je uvedeno v tab. 2.

Projekt byl zahájen v roce 2018 a do dnešního dne byla za použití rych-



le tvrdnoucího betonu Q-Flash 2/20 opravena ranvej, pojezdové dráhy a odstavné plochy o celkové výměře 20 000 m². Během realizace projektu proběhly všechny potřebné práce bez jakýchkoli mimořádných událostí, které by měly nepříznivý dopad na letový provoz. Předání opravených ploch pracovníkům řízení letového provozu probíhá vždy na konci každé noční pracovní směny.

Opravy ploch mezinárodního letiště Sabiha Gökçen pokračovaly i v roce 2022. V době zahájení realizace projektu v roce 2018 byla každou noc opravena plocha o velikosti 75 m² (čtyři desky), v současnosti se daří opravit až 130 m² (sedm desek) za noc. Veškeré množství vyrobeného betonu bylo během realizace projektu ukládáno ručně.

Tento projekt dokládá skutečnost, že použití nové generace rychletvrdnoucího betonu Q-Flash 2/20 umožňuje provádění rekonstrukce ploch formou výměny betonu v takto rozsáhlém měřítku během krátkodobých nočních uzavírek, a to za použití stejného vybavení i metod jako při práci s obvykle vyráběným běžným betonem. Jelikož se očekává, že zatížení leteckým provozem bude v průběhu následujících let dále narůstat, je význam takových nových postupů zřejmý.

Oprava odstavných ploch na pařížském letišti Charles De Gaulle

Největší pařížské letiště Charles de Gaulle odbaví ročně 65 milionů cestujících. Z důvodu tak vysoké kapacity leteckého provozu je vyloučeno

provádět opravy letištních ploch při úplném uzavření letiště. Při použití betonu Q-Flash 2/20 lze provést opravy jednotlivých částí betonových desek bez poškození okolního betonu. Práce na těchto opravách lze provádět pomocí mobilní míchačky vhodné pro opravy relativně malých ploch. Podle harmonogramu, v němž nejsou žádné časové rezervy, mohou být takto opravené betonové desky opět zatěžovány již po 30 min po uložení. Po 4 h od namíchání betonu dosahuje pevnost v příčném tahu požadované hodnoty 3,3 N/mm².

Plně vytižená mobilní míchačka má výrobní kapacitu 9 m³ betonu. V případě potřeby lze během samotného míchání zároveň zavážet míchačku dalším materiálem a zvyšovat tak množství vyrobeného betonu. Tímto způsobem lze zkrátit dobu pro ukládání betonu (cca 30 min) o dobu nutnou pro dopravu betonu ze vzdálenější stabilní betonárny.

Použitím zmiňovaného postupu bylo nahrazeno přes 5 000 m² původního povrchu. Flexibilita tohoto řešení umožňuje dosahovat ve všech fázích realizace normových parametrů a vysoké trvanlivosti opravovaných ploch.

Závěr

Vlastnosti rychletvrdnoucích betonů nové generace umožňují použití těchto materiálů k provádění rychlých a trvanlivých oprav na letištích bez přerušení leteckého provozu, přičemž flexibilita a spolehlivost zmiňovaných produktů sehrává klíčovou ro-

Tab. 2 Složení betonové směsi pro mezinárodní letiště Sabiha Gökçen

Tab. 2 Concrete mix design at Sabiha Gökçen International Airport

rychletvrdnoucí cement Q-Flash cem 100 (P)	390 kg/m ³
kamenivo (0-5, 5-12, 12-22 a 22-38 mm)	1 950 kg/m ³
vodní součinitel v/c	0,31 až 0,35
superplastifikátor Q-Flash sp (L)	2,2 až 6,8 kg/m ³
zpomalovač tuhnutí Q-Flash ret (L)	0,8 až 5,3 kg/m ³

10 Hodnoty pevnosti v tlaku již po 2 h tuhnutí ($f_{c,cube}$)

10 Compressive strength values only 2 h after the setting ($f_{c,cube}$)

li pro úspěšnou výměnu desek (částí ploch). Beton Q-Flash 2/20 je produkt, který byl použit při opravách prováděných na mnoha letištích a který představuje i spolehlivé alternativní řešení v případě nezbytné naléhavé opravy. Jeho vynikajícími vlastnostmi, mezi něž patří zejména dlouhodobá trvanlivost, je dosahováno díky obsahu pojiva na čistě cementové bázi. Vysoké počáteční pevnosti splňují a překračují hodnoty požadované na letištích pro rychlé uvedení zpět do provozu, tedy bez mimořádných časových prodlev. Možnost zvolit dobu pro zpracování betonu znamená, že je metoda vhodná pro různé druhy oprav a množství vyměňovaného materiálu, přičemž nevhodnější je pro výměnu poškozených částí ploch.

Dlouhodobá podpora poskytovaná technickými pracovníky společnosti Concretum v podobě navrhování složení směsí, laboratorních zkoušek, technické podpory na stavbě, pečlivě připravených plánů výměny částí ploch a alternativních postupů je zárukou vysoce kvalitní práce. Tu dokládá i rozsáhlá pozitivní zpětná vazba od leteckých dopravních společností, pilotů i členů letištního technického personálu.



Dogaç Özsar
Concretum Construction Science AG
dogac.ozsar@concretum.com



Felicia Nägele
Concretum Construction Science AG
felicia.naegle@concretum.com

VLIV HYDRATACE A VYSYCHÁNÍ NA VZNIK TRHLIN V CEMENTOBETONOVÝCH KRYTECH

Vít Šmilauer, Jakub Veselý, Bohuslav Slánský

Článek se zabývá mechanismem vzniku viditelných trhlin v cementobetonových krytech (CBK) jako důsledku spojování neviditelných trhlin v mikrostrukturu během hydratace a vysychání. Zkoušky na smršťujících prstencích potvrdily příznivý účinek zpomalené reaktivity cementu. Termo-hygro-mechanický model desky CBK prokázal, že ze všech běžných zatěžovacích stavů vede vysychání k největším tahovým napětím a volba houževnatých materiálů s pomalou hydratací je tak pro eliminaci viditelných povrchových trhlin klíčová.

EFFECTS OF HYDRATION AND DRYING OUT ON CRACK FORMATION IN CONCRETE PAVEMENTS

The article deals with the mechanism of the formation of visible cracks in concrete pavements by a coalescence of invisible microstructural cracks during hydration and drying. Ring shrinkage tests confirmed the beneficial role of cement of a slow reactivity. A thermo-hygro-mechanical model of a concrete pavement slab has shown that the drying out process generates the greatest tensile stresses of all in the loading cases considered. The selection of tough materials with a slow hydration is therefore the key to the elimination of visible surface cracking.

Příčiny vzniku trhlin

Návrhové období cementobetonových krytů (CBK) se standardně pohybuje mezi 20 až 40 lety, a to v závislosti na podmínkách a zkušenostech jednotlivých zemí. Rakousko běžně uvažuje 30 let, Německo 30 let, Švýcarsko ≥ 20 let, Francie 30 let, Holandsko 30 až 40 let, ČR 25 let, USA 20 let [1]. Životnost CBK se za předpokladu běžné údržby a oprav očekává minimálně v délce návrhového období. Existuje celá řada CBK, které dosáhly životnosti přes 50 let, např. úseky dálnice A1 mezi Vídní a Salzburgem, E40 z Bruselu do Liège či západní úsek dálnice A18 v Polsku v délce 54 km. Při modernizaci D1 na úseku Mirošovice–Kývalka dosáhlo mnoho úseků životnosti přes 40 let, přičemž životnost mohla být i vyšší, kdyby se zde nena-

cházelá asfaltová mezivrstva, která vedla k vytváření schůdků. Vznik trhlin v CBK je jednou z hlavních příčin jejich degradace, jež vede ke snížené životnosti (obr. 1).

Pro účely mapování stavu povrchových trhlin byla zavedena metodika na základě laserového skenování LCMS (laser crack measurement system). Celková délka pasportovaných úseků s CBK činí dnes okolo 900 pruhokilometrů, což představuje přibližně polovinu CBK v ČR. Měřicí vozidlo pořizuje snímky CBK, které jsou dále strojově vyhodnocovány z hlediska stavu povrchových trhlin. Pro vyhodnocení se používá stupnice:

- 0 – úsek bez viditelných trhlin,
- 1 – patrné vlasové trhlinky,
- 2 – trhliny do šíře cca 0,4 mm stále bez rozpadu betonu,

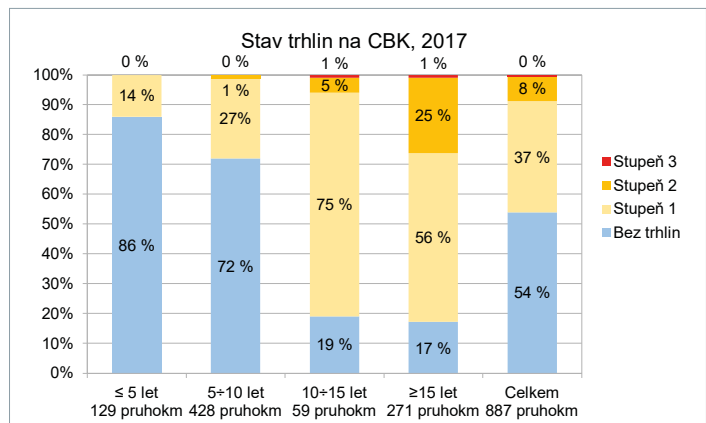
- 3 – viditelný rozpad betonu, zejména v okolí spár.

V roce 2017 byla provedena analýza povrchových trhlin vzhledem k stáří CBK (obr. 2). Výsledky ukazují, že 75 % povrchů CBK vykazuje viditelné trhliny po 15 letech používání a s dalším stárnutím krytů se stav dále zhoršuje [1].

Vznik trhlin má mnoho příčin, hlavní mechanismy jsou uvedeny na obr. 3 [2]. Z hlediska životnosti CBK jsou nejhorší trhliny, které se projeví až po raném tvrdnutí betonu, neboť k jejich viditelným projevům dochází i několik let po betonáži. Tento příspěvek se zaměřuje na objemové deformace betonu, konkrétně na autogenní smrštění a smrštění od vysychání, jako na hlavní příčiny vzniku trhlin na CBK.

1 Příklad vzniku trhlin na dálnici D1 km 237,4; stáří krytu 17 let 2 Povrchové trhliny CBK s ohledem na jejich stáří

1 Example of cracks which developed on the D1 highway km 237.4; the pavement was 17 years old 2 Surface cracking of concrete pavements in relation to their age



Alkalicko-křemičité reakci (ASR) [3] včetně způsobu její eliminace [4] bylo v ČR věnováno mnoho pozornosti a dnes se ukazuje, že byl její vliv přeceňován. V letech 2017 a 2018 byla dle německé metodiky zkoušení TP B-StB AKR-Potenzial and Dauerhaftigkeit von Beton provedena série testů na ASR, během nichž byla měřena expanze betonových jader v cyklech $-30\text{ °C} \div +60\text{ °C}$ při postupné saturaci a vysychání. Na pěti úsecích českých dálnic, u nichž bylo podezření na ASR, byly provedeny vývrty, které byly testovány na Bauhaus-Universität Weimar [5]. Výsledky ukázaly, že se ASR našla pouze v lehké formě na D5 a ve velmi malém, až žádném rozsahu na ostatních úsecích. Tím byl experimentálně prokázán minimální příspěvek ASR ke vzniku povrchových trhlin v CBK v ČR, byť v historii existovaly zasažené úseky např. na dálnici D11. Dalším argumentem potvrzujícím malý příspěvek ASR ke vzniku trhlin je expanze, ke které během ASR nutně dochází a která by znamenala uzavírání kontrakčních spár a vystřelování desek, jež se však dělo pouze na několika úsecích a v součinnosti s dalšími faktory.

Tlak na rychlost výstavby v posledních desetiletích způsobil, že v současnosti používané cementy mají vyšší reaktivitu a jemnost mletí [6]. Tento trend se promítl i do výstavby českých cementobetonových vozovek [7]. Žádný z dnešních běžných testů cementů a betonů nepostihuje vliv vysychání na vznik trhlin, neboť vzorek by musel vysychat minimálně několik měsíců. Toto chování však dobře vystihují nenormové testy na smršťujících prstencích [7]. Výsledky ukazují, že pouze 2 z 10 komerčně vyráběných a testovaných cementů vyhovují nenormovému požadavku na odolnost cementů proti vzniku trhlin od vysychání [7]. Pokud se upraví jemnost mletí, pak kritérium s použitím standardních současných technologií výroby vyhovuje 10 z 15 cementů [7]. Je tedy čistě otázkou preferencí, zda mírně zpomalit rychlost náběhu pevností a tempo výstavby, či předčasně vyvářet trhliny, které jsou zdrojem zkrácené životnosti. Na nebezpečí rychlých náběhů pevnosti u silničních



3 Příčiny vzniku trhlin a charakteristická doba jejich výskytu na CBK [2]

3 Causes of the crack formation and their characteristic period of time for their occurrence in concrete pavements [2]

cementů a jejich náchylnost k trhlinování upozornil již v roce 1961 R. Bárta [8] a později i další autoři [9].

Objemové deformace

Celkové přetvoření v materiálovém bodě ε lze přibližně rozložit na jednotlivé příspěvky:

$$\varepsilon = \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{scr} + \varepsilon_{as} + \varepsilon_{ds}, \quad (1)$$

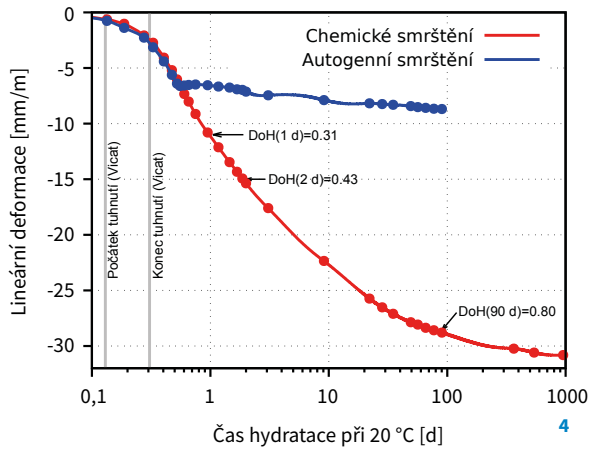
kde ε_{ve} je viskoelastická deformace, ε_{scr} rozetřená deformace od trhlin, ε_{as} autogenní smrštění a ε_{ds} smrštění od vysychání. Při dokonale omezeném makroskopickém smrštění je $\varepsilon = 0$ a nenulové ε_{as} nebo ε_{ds} tak vedou ke vzniku ε_{ve} a ε_{scr} . Při pomalých objemových deformacích (pomalé vysychání či pomalá hydratace cementu) dominuje viskoelastická deformace ε_{ve} , která vede k relaxaci napětí. Při rychlé objemové deformaci je naopak relaxace nižší a dominuje vznik trhlin ε_{scr} . Pro eliminaci trhlin je proto nutné zpomalit nárůst ε_{as} nebo ε_{ds} a podpořit relaxaci napětí pomocí ε_{ve} . Nalezení správného vodního součinitele je umění, neboť jeho zvýšení způsobí obecně nárůst ε_{ve} , snížení pevnosti pro indukci ε_{scr} , snížení ε_{as} a zvýšení ε_{ds} .

Ať už trhliny charakterizované ε_{scr} vznikly jakýmkoliv způsobem, jejich růst je stabilní pouze do jejich určité délky [10]. Pro paralelní trhliny podmínka stability vyžaduje, že se každá n -tá trhlina později uzavře a že se šířka jiné rostoucí trhliny naopak zvětší.

Tímto mechanismem se neviditelné trhliny stávají viditelnými. Podmínkou růstu je hnací síla, kterou může být cyklická změna teploty či změna relativní vlhkosti. K podobným závěrům dospěl v roce 1994 K. Mehta, který popsal přechod nespojitých trhlin do spojitých v souvislosti s rozpadem betonu [11]. Trhliny vzniklé kvůli autogennímu smrštění či vysychání tak představují zárodky budoucích viditelných trhlin, jež jsou ve finále odpovědné za makroskopický rozpad betonu. Experimentálně byla tato hypotéza potvrzena na testech 104 panelů vyrobených z 28 cementů s různou reaktivitou, jež probíhaly 53 let. Menší povrchové trhliny panelů korelovaly s nižší reaktivitou cementů [9].

Autogenní smrštění

Autogenní smrštění je makroskopické smrštění v zapečetěných podmínkách, kde nedochází k transportu vody mimo vzorek. Vlivem hydratace dochází k vyprazdňování kapilárních pórů a vzniku menisků. Např. pro vodní součinitel 0,5 je po 90 dnech relativní vlhkost cca 0,96, póry mající poloměr větší než 100 nm jsou prázdné a ve vodě vzniká kapilární napětí 1,4 MPa [12]. Při dalším snižování vodního součinitele kapilární napětí podstatně roste a s tím i autogenní smrštění. Charakteristický průběh chemického smrštění a autogenního smrštění pro cementovou pastu zobrazuje graf na obr. 4, kde je deforma-



4 Charakteristický průběh chemického a autogenního smrštění na cementové pastě, vodní součinitel 0,40–0,45 5 Rentgenová 3D mikrotomografie malt v zapečetěném prostředí, modrá barva značí vzduchové póry, oranžová neviditelné trhliny 6 Mesoskopický model betonu 50 × 50 mm a vznik trhlin při vysychání: a) profil relativní vlhkosti od povrchového vysychání, b) vznik trhlin 7 Nárůsty pevností vybraných silničních cementů: a) pevnost v tlaku, b) pevnost v tahu za ohybu 8 Deformovaný tvar a první hlavní napětí od zatížení dopravou 9 Deformovaný tvar a první hlavní napětí od teplotního zatížení v noci 4 Typical evolution of chemical and autogenous shrinkages of a cement paste, w/c ratio 0.40–0.45 5 X-ray 3D microtomography of mortars in a sealed environment, blue colour indicates air filled pores, orange colour indicates invisible cracks 6 Mesoscopic model of concrete 50 × 50 mm and the formation of cracks during drying out: a) relative humidity profile during surface drying, b) the formation of cracks 7 Gain in strength of selected road cements: a) compressive strength, b) tensile bending strength 8 Deformed shape and the first principal stress due to the loading by traffic 9 Deformed shape and the first principal stress due to temperature loading during the night-time

ce pro ilustraci vyjádřena jako délková [13]. Krátce po konci tuhnutí dojde vlivem tuhé mikrostruktury k oddělení obou částí deformace a autogenní smrštění je podstatně menší než chemické. Maximální hodnota chemického smrštění je okolo 9 % objemu pro plnou hydrataci C₃S, přepočít na lineární smrštění tak vychází okolo 30 mm/m. Rozdíl obou křivek je deformace, která je přenášena mikrostrukturou cementové pasty a nutně vede ke vzniku napětí.

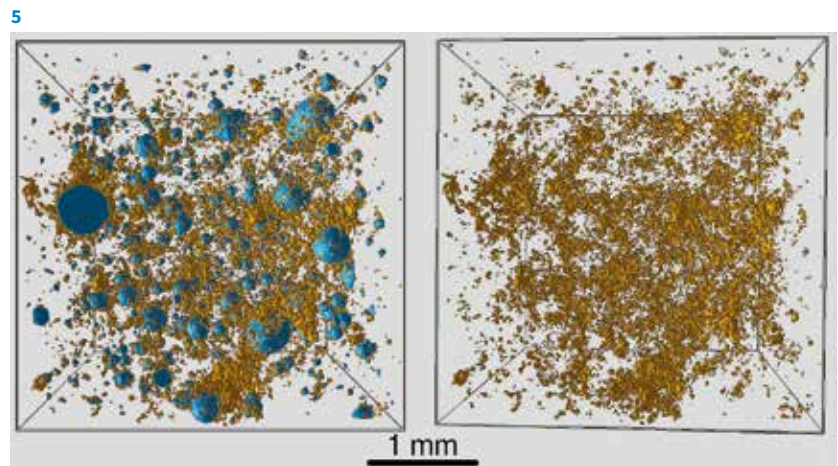
vysychání vrchního povrchu od 50% relativní vlhkosti vzduchu a čas vysychání dosáhl 19 h (obr. 6). Trhliny mají v modelu šířku do 1 μm přes konečný prvek, při jejich spojení vznikají trhliny šířky až desítky μm. Nejvíce trhlin vzniká na povrchu, kde je největší gradient vlhkosti. Trhliny jsou hluboké cca 10 mm, další růst do hloubky je velmi malý díky nižšímu gradientu relativní vlhkosti a zvětšení viskoelastické části deformace ε_{ve}.

Testy na smršťujících prstencích

Odolnost pojiv proti vzniku trhlin od autogenního smršťování a vysychání zachycuje test na smršťujících prstencích [7]. Kromě kalorimetrických měření reaktivitu dobře popisuje nárůst pevností dle ČSN EN 196-1 (obr. 7). Pro ilustraci je zachyceno chování čtyř vybraných silničních cementů:

- CEM I 42,5 R(sc) Mokrá jako standardní silniční cement používaný

Účinek napětí na vznik trhlin se podařilo prokázat na zapečetěných maltách, které byly podrobeny ne-destruktivnímu 3D snímkování pomocí rentgenového mikrotomografu s rozlišením 1,5 μm na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v Telči. Z obrazů se podařilo získat prostorové rozložení pórů a trhlin (obr. 5). Maximální délka trhlin je v řádu 0,1 až 1 mm a jejich šířka do 20 μm [14]. Trhliny vznikají zejména v důsledku omezení deformace zrnů písku a zůstávají nespojitě.

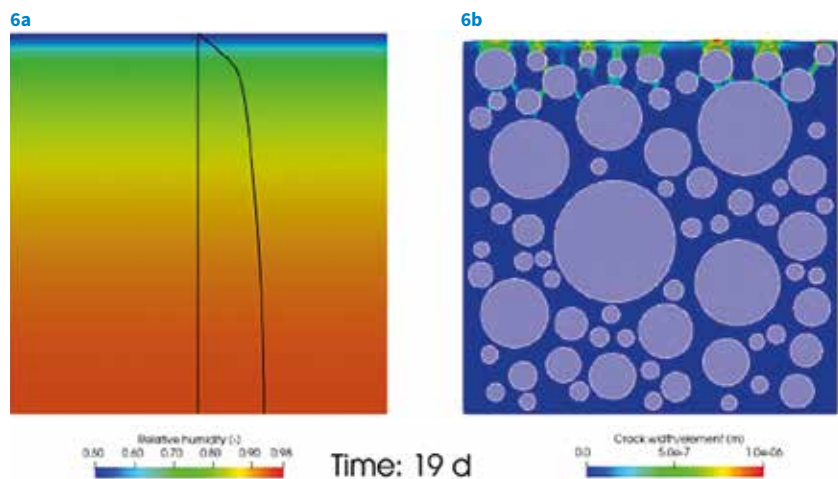


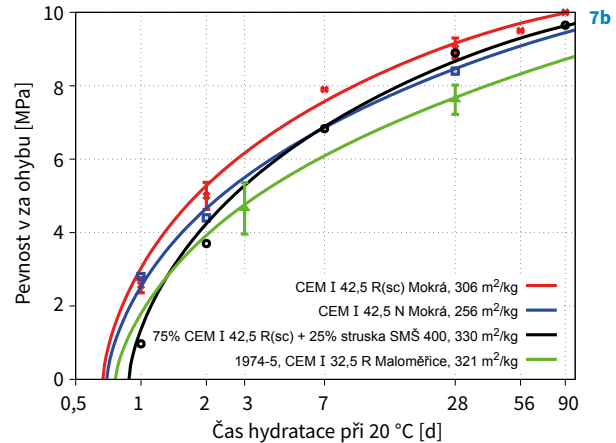
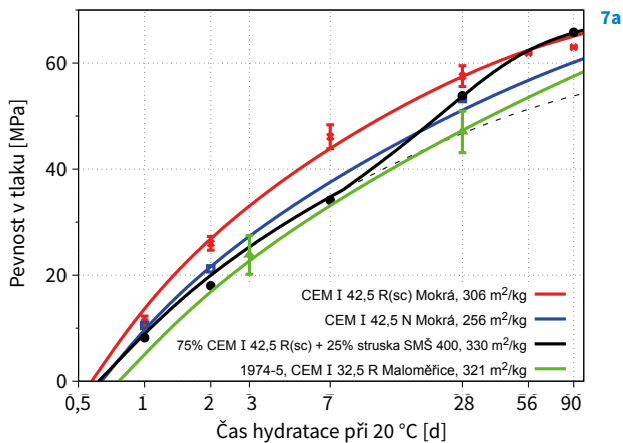
Smrštění při vysychání

Hnacím mechanismem smrštění při vysychání je úbytek vodní páry ze vzorku. Smrštění na úrovni materiálového bodu lze přibližně popsat rovnicí:

$$\frac{d\varepsilon_{ds}}{dt} = k_{sh} \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

kde ε_{ds} je smrštění od vysychání, k_{sh} součinitel smrštění a h relativní vlhkost. Růst trhlin může být zobrazen na mezoskopickém modelu betonu, kdy byla buňka o rozměru 50 × 50 mm vystavena





během posledních desetiletí v ČR na CBK, jemnost mletí 306 m²/kg,

- CEM I 42,5 N Mokrá se sníženou jemností mletí na 256 m²/kg. Tento speciální cement byl vyroben během kratší doby mletí,
- směsný cement 75 % CEM I 42,5 R(sc) + 25 % mleté granulované vysokopeční strusky SMŠ 400. Jemnost mletí směsného cementu je 330 m²/kg. Toto směsné pojivo bylo experimentálně použito na stavbu téměř 9km úseku dálnice D1 Přerov – Lipník nad Bečvou,
- CEM I 32,5 R Maloměřice (označen SC70), který byl používán pro výstavbu krytů v letech 1970 až 1996 a ze kterého byl zhotoven i původní CBK dálnice D1 Praha–Brno. Udávaná jemnost mletí byla 321 m²/kg, používal se mokrý proces výroby a neselektivní mletí v kulových mlýnech, které dává jinou křivku rozdělení velikosti částic a odlišnou reaktivitu při srovnání s dnešními cementy. Zkoušky na smršťujících prstencích

prokázaly, že pomalejší nárůst pevnosti vede k delšímu času porušení prstence. Referenční cement CEM I 42,5 R(sc) Mokrá vykázal prasknutí prstence po 30 dnech, ostatní cementy po více než 56 dnech. Obecně tak platí, že čím nižší je jemnost mletí, tím je vyšší odolnost cementů/malt/betonů vůči vzniku trhlin při vysychání [7]. Vysvětlení je takové, že cementy s nízkou reaktivitou vytvářejí méně trhlin během autogenního smrštění a vykazují vyšší dotvarování, které pomáhá relaxaci napětí při následném vysychání. Zpomalování reaktivity cementů má svoje omezení i zdola, např. CEM III/B 32,5N LH/SR Mokrá vykazuje již příliš nízkou počáteční pevnost a doba porušení prstence je pouze 5 dní.

Termo-hygro-mechanický model desky CBK

Pro interpretaci vlivu objemových deformací betonu v kombinaci s teplotou a kolovým zatížením na životnost CBK je využit sdružený termo-hygro-mechanický model implementova-

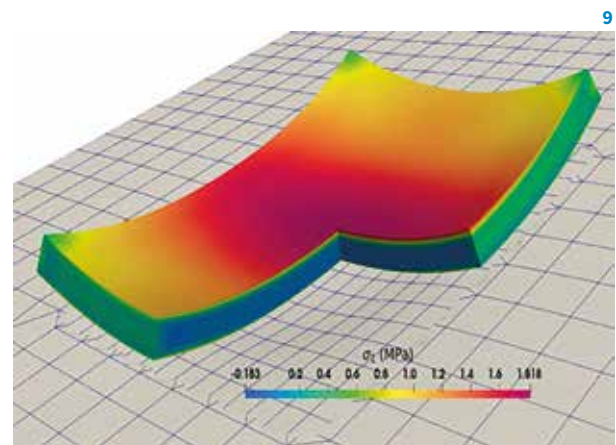
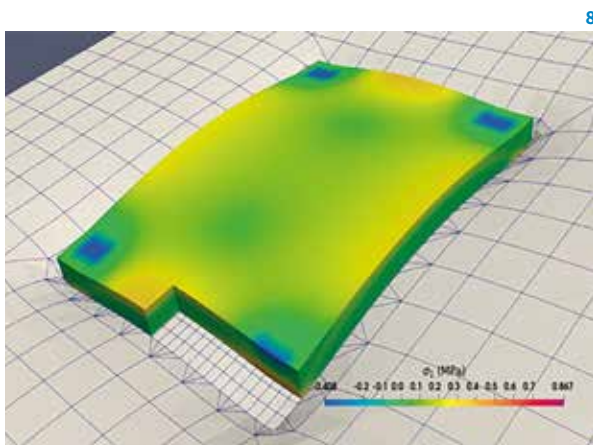
ný v programu OOFEM. Tento model je validován na základě dlouhodobého monitoringu na pilotním úseku D1 [15]. V článku jsou dále ukázány tři různé úlohy zatížení desky CBK:

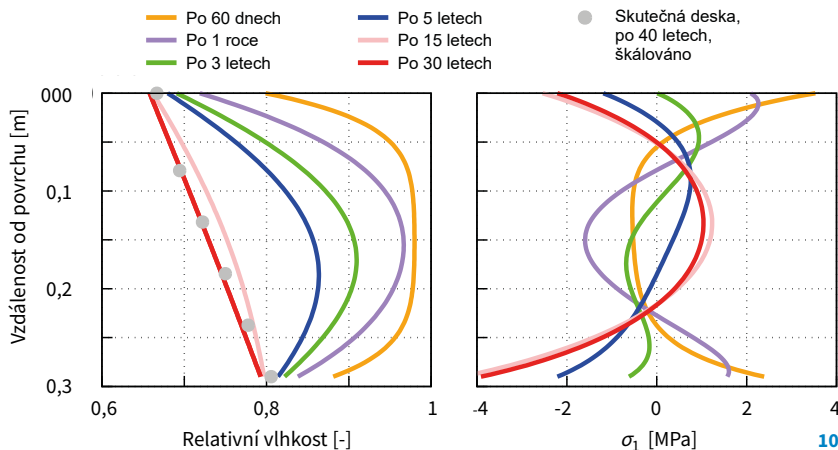
- zatížení dopravou (mechanická úloha),
- zatížení teplotními cykly (termo-mechanická úloha),
- zatížení vysycháním (hygro-mechanická úloha).

Zatížení dopravou

Mechanický model uvažuje cemento-betonovou desku jako diskretizované 3D kontinuum s viskoelastickým materiálem MPS (microprestress-solidification theory) a podkladní systém jako Winkler–Pasternakovo podloží s parametry $c_1 = 70 \text{ MNm}^{-3}$ a $c_2 = 60 \text{ MNm}^{-1}$. Mezi deskou a podkladním systémem jsou vloženy 1D kontaktní prvky, které umožňují separaci desky od podloží.

Zatížení dopravou obecně způsobuje tahové napětí na spodním povrchu desky vozovky, které se nachází





10 Profil relativní vlhkosti a napětí σ_x v desce CBK
10 Profile of the relative humidity and the σ_x stress in a concrete slab

pod umístěnou nápravou. Kolové zatížení je reprezentováno svislou silou 50 kN a pro vyvolání maximálního tahového napětí na horním povrchu je zatížení umístěno do rohů desky. Na povrchu vozovky tak vzniká hlavní tahové napětí $\sigma_1 = 0,40$ MPa (obr. 8).

Zatížení teplotními cykly

Úloha nestacionárního vedení tepla je formulována jako:

$$-\nabla^T q(x) = \rho(x) c_v(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}, \quad (3)$$

kde q je teplotní tok, T teplotní pole, ρ objemová hmotnost a c_v tepelná kapacita. Teplota v desce je nejvíce ovlivněna teplotou okolního vzduchu a osluněním. Pro zjednodušení se uvažují cyklické funkce s následujícími parametry:

- teplota vzduchu osciluje mezi 15 až 35 °C se střední hodnotou 25 °C,
- sluneční tepelný tok má amplitudu 700 W/m².

Změna teplot v průběhu charakteristického letního dne způsobuje tahové napětí – v noci vzniká na horním povrchu desky (způsobuje nadzdvížení rohů desky vozovky) a ve dne na spodním povrchu desky (způsobuje nadzdvížení středu desky). Největší tahové napětí $\sigma_1 = 1,82$ MPa vzniká ve 2:00 h v noci na povrchu vozovky (obr. 9).

Dlouhodobé vysychání desky

Nelineární model transportu vlhkosti popisuje následující bilanční rovnice:

$$k(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla [c(h) \nabla h], \quad (4)$$

kde h je bezrozměrná relativní vlhkost, $k(h) = \partial w / \partial h$ [kg/m³] kapacita vlhkosti (v případě lineární sorpční izotermy je tato kapacita konstantní $k(h)=k_1$) a $c(h)$ vlhkostní permeabilita, např. dle vztahu Bažant-Najjar [16]. Okrajové podmínky a výsledný vlhkostní profil po ukončení vysychání jsou stanoveny na základě měření

staré desky z modernizované D1. Profil relativní vlhkosti je takřka lineární, na horním povrchu desky je relativní vlhkost 65 % a na spodním 80 %, což jsou zároveň okrajové podmínky modelu transportu vlhkosti. Doba vysychání dle modelu vychází okolo 30 let.

Vysychání způsobuje největší tahové napětí na horním povrchu CBK v době 60 až 100 dní po betonáži. S postupem procesu vysychání se povrch následně pomalu dostává do tlaku a tažený je naopak střed desky (obr. 10). Typická deformace desky pro tento zatěžovací mód jsou zvednuté rohy. Maximální hodnota tahového napětí je $\sigma_1 = 3,53$ MPa. Hodnoty hlavního napětí σ_1 a maximálního tahového napětí σ_x , resp. σ_y , na povrchu jsou vzhledem k povaze napjatosti prakticky totožné.

Kombinace zatížení

Pro přibližný výpočet maximálního napětí lze použít princip superpozice, byť se jedná o slabě geometricky nelineární úlohy. Maximální hodnoty tahového napětí $\sigma_1 = 0,4 + 1,82 + 3,53 = 5,75$ MPa je dosaženo ve 2:00 h v noci po 60 dnech od betonáže při kolovém zatížení desky v rozích. Návrhový předpis TP 170 [17] dominantní napětí od vysychání zanedbává, čímž dochází k iluzi nízkých napětí od nápravy a teploty. Ke zmenšení účinků vysychání je třeba vybrat cement odolný proti vzniku trhlin, např. pomocí zkoušek na smršťujících prstencích. I v tomto případě dojde ke vzniku malých trhlin, houževnatost betonu musí být dostatečná na to, aby zabránila nestabilnímu růstu trhlin.

Literatura:

[1] HLAVATÝ, J., ŠMILAUER, V., SLÁNSKÝ, B., DVOŘÁK, R. Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek – část I. *Silniční obzor*. 2019, roč. 80, č. 6, s.164–168.

[2] KHAN, A. et al. Control of Cracking in Concrete: State of the Art. *Transportation Research Circular E-C107*. Technical report. Washington, DC: Transportation Research Board, 2006.

[3] HROMÁDKO, J. Příčiny střechovitěho zdvihu betonových desek krytu vozovky dálnic v ČR od roku 2010. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 2, s. 42–52.

[4] PERTOLD, Z. et al. Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 2, s. 34–41.

[5] ŠEYFARTH, K., PATZELT, M. Stanovení ASR na vybraných úsecích českých dálnic. Nepublikovaná přednáška. ŘSD Praha, 9. 10. 2018.

[6] BHATTY, J., TENNIS, P. U. S. and Canadian Cement Characteristics: 2004. Technical report. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2008.

[7] ŠMILAUER, V., REITERMAN, P., SCHORÍK, P. Odolnost cementů vůči tvorbě trhlinek během vysychání. *Beton TKS*. 2022, roč., 22, č. 1, s. 64–67.

[8] BÁRTA, R. *Chemie a technologie cementu*. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1961.

[9] BURROWS, R. W. The Visible and Invisible Cracking of Concrete. *ACI International*. 1998.

[10] BAŽANT, Z., OHTSUBO, H., AOH, K. Stability and post-critical growth of a system of cooling or shrinkage cracks. *Construction and Building Materials*. 1979, Vol. 15, No. 5, pp. 443–456.

[11] MEHTA, P. K. Concrete Technology at the Crossroads – Problems and Opportunities. *Concrete Technology Past, Present and Future*, SP-144. P. 1–31. Detroit: ACI, 1994.

[12] JIANG, Z., SUN, Z., WANG, P. Autogenous Relative Humidity Change and Autogenous Shrinkage of High-Performance Cement Pastes. *Cement and Concrete Research*. 2005, Vol. 35, No. 8, pp. 1539–1545.

[13] ŠMILAUER, V., VESELÝ, J., SLÁNSKÝ, B., VYSLOUŽIL, L., ŠEVČÍK, R. Trvanlivost cementobetonových krytů – vznik trhlin jako důsledek hydratace a vysychání. In: *Sborník konference Betonové vozovky 2022*. 2022.

[14] ŠEVČÍK, R., ADAMKOVÁ, I., VOPÁLENSKÝ, M., VIANI, A. The visualization of microcracks in aged cement mortar using tomography. In: *Conference Proceedings of International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2022*.

[15] SLÁNSKÝ, B., VYSLOUŽIL, L., ŠMILAUER, V., VESELÝ, J. Opatření pro vyšší životnost CBK – výsledky pilotního projektu. In: *Sborník konference Betonové vozovky 2020*. 2020, s. 32–47.

[16] BAŽANT, Z. P., NAJJAR, L. J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Matériaux et Construction*. 1972, pp. 3–20.

[17] TP 170. *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Praha: MD ČR, 2004 (ve znění pozdějších dodatků).

Závěr

Tlak na rychlost výstavby v uplynulých desetiletích způsobil, že dnešní cementy používané pro výstavbu cementobetonových krytů mají oproti dřívějším cementům příliš vysokou reaktivitu. Výsledkem jsou neviditelné trhlinky v celém objemu betonu. Ty se vlivem cyklických změn vlhkosti a teploty spojují do trhlin viditelných a jsou dle našeho názoru jednou z příčin povrchových trhlin po 10 až 15 letech provozu CBK.

Testy na smršťujících prstencích dobře postihují kombinaci autogenního smrštění a smrštění od vysychání. Výsledky ukazují, že pouze třídy cementů 32,5 R a 42,5 N splňují dobu porušení prstence přes 40 dnů, která je brána jako kritérium odolnosti proti vzniku trhlin [7].

Tlak na snižování uhlíkové stopy při výrobě cementů přináší na trh nové, výrazně jiné typy cementů, než byly dosud standardně vyráběny a používány. Jedná se o cementy s velkým obsahem příměsí, příp. i s jejich kombinacemi. Pro použití do betonů pro CBK je třeba nové typy cementů důsledně ověřit, čímž se zabývá projekt podporovaný Ředitelstvím silnic a dálnic ČR.

Sdružený termo-hygro-mechanický model desky cementobetonového krytu ukazuje, že největší hlavní tahové napětí $\sigma_1 = 3,53$ MPa vzniká při jejím vysychání. V kombinaci s kolovým zatížením a teplotními účinky nutně dochází ke vzniku trhlin, které lze omezit použitím cementů s pomalými náběhy pevností a houževnatým návrhem betonu.

Tento příspěvek vznikl za podpory grantu GAČR 21-03118S s názvem Termo-hygro-mechanický model betonových vozovek.



prof. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra mechaniky
vit.smilauer@cvut.cz



Ing. Jakub Veselý
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra silničních staveb
jakub.vesely.2@fsv.cvut.cz



Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D.
Skanska a.s.
bohoslav.slansky@skanska.cz

inzerce

BETON

VÍTEJTE VE SVĚTĚ BETONU

Užitečné funkce:

- **on-line vyhledávání informací** v archivu časopisu Beton
- **jednoduché vytvoření specifikace** betonu podle ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404
- **jasná definice pojmu** z betonářského řemesla v encyklopedii (např. bednění)
- **vyhledání nejbližší betonárny** dle vaší aktuální polohy
- **novinky** ze světa betonu
- **kalendář** odborných školení, seminářů a konferencí



STAŇTE SE I VY PARTNERY ODBORNÉHO WEBU

Volné pozice na rok 2023:

- **partner specifikace**
- **partner aktuálního čísla** časopisu Beton
- **partner archivu** časopisu Beton
- **partner webu**

Kontakt:

Ing. Lucie Šimečková
šéfredaktorka
mobil: +420 602 839 429
e-mail: inzerce@betontks.cz

inzerce

doka

Odborníci na bednění.

Dáváme betonu tvar

Encyklopedie ebeton: **Bednění** (německy: die Schalung, odtud slangové šalování, šalunk; anglicky: formwork) je dočasná nebo trvalá pomocná konstrukce vytvářející formu pro uložení a ztuhnutí čerstvého betonu při výrobě betonových a železobetonových konstrukcí a prvků.

Doka je hrdým partnerem encyklopedie **ebeton**.

BETON

Doka je zavedený dodavatel profesionálních bednicích systémů, jejich komponent, technického řešení, bezpečnostních prvků i moderních digitálních služeb souvisejících s betonáží.

Jsmo **Odborníci na bednění**.



Nákup i nájem bednění online.
Kdykoliv, kdekoliv.
shop.doka.com



Snadné plánování nassazení bednicích systémů online.
DokaTools



Aktuální informace i přehled bednicí techniky
www.doka.cz

VLIV ORGANICKÝCH VLÁKEN NA POŽÁRNÍ ODOLNOST BETONU

Jan Klobása, Martin Sedlmajer, Rudolf Hela

Článek je zaměřen na problematiku chování betonu při zatížení vysokými teplotami. Cílem práce je ověřit vliv přídavku organických vláken na požární odolnost betonu, přičemž důraz je kladen na popsání možnosti použití recyklovaných vláken z PET nebo celulózy z důvodu pozitivního ekologického dopadu. Ze získaných výsledků vyplývá, že je možné využívat vlákna pro zvýšení požární odolnosti i ze zdrojů, které nepocházejí z primární výroby.

THE INFLUENCE OF ORGANIC FIBRES ON THE FIRE RESISTANCE OF CONCRETE

The article is focused on behaviour of concrete under high temperatures. The aim of this work is to verify the influence of an addition of organic fibres on the fire resistance of concrete. Emphasis is placed on the possibility of using recycled fibres from PET or cellulose due to the positive ecological impact of their use. Results obtained suggest that it is possible to use such fibres to increase the fire resistance, even using materials that do not come from their primary production.

Požár patří k nejobávanějším nebezpečím, která mají neblahý dopad na fungování celého konstrukčního systému. Je provázen vysokými teplotami, jež negativně ovlivňují chování jednotlivých materiálů i jejich vzájemné spolupůsobení. Mezi tyto materiály bezpochyby patří i nejpoužívanější konstrukční materiál – beton. Extrémně vysoké teploty poškozují strukturu betonu, což má za následek zhoršení jeho mechanických vlastností, odprýskání a následné vystavení ocelové výztuže vysoké teplotě. V krajních případech může dojít až ke kolapsu celého konstrukčního systému [1].

První změny struktury betonu se při nárůstu teploty projeví mezi 100 a 200 °C, kdy dochází k odpařování volné vody (vlhkosti) obsažené v betonu. Rychlý nárůst teploty může mít za následek odprýskávání povrchu betonu v důsledku vytváření vysokého vnitřního tlaku páry. Při dosažení teploty 250 °C začíná docházet k dehydrataci chemicky vázané vody. Dosažení teploty 550 °C je kritické, jelikož dochází k dehydrataci hydroxidu vápenatého, jenž je produktem hydratace portlandských cementů, přičemž jeho množství závisí na složení konkrétního použitého cementu. Své chování i vlastnosti mění při narůstající teplotě i použité kamenivo [1], [3], [5].

Jako jedna z účinných možností ochrany betonu před zatížením extrémní teplotou při požáru je přesvědčivě prokázáno použití nekovových

vláken jako součást směsi. Tím může být značně omezeno odprýskávání vrstev betonu. Nejčastěji používaná vlákna pro zvýšení požární odolnosti jsou vlákna polypropylenová (PP). Tato vlákna fungují tak, že vytvoří ve struktuře betonu cesty a expanzní prostor pozitivně ovlivní migraci vlhkosti a/nebo procesy odpařování v zahřátém betonu. To umožňuje snížení okamžitého vnitřního napětí v betonu v důsledku snížení tlaku páry, čímž se snižuje náchylnost k odprýskávání povrchů. Zlepšený transport vlhkosti a větší expanzní prostor je nejlépe zajištěn vytvořením prázdných kanálků, které zanechávají pyrolyzovaná (roztavená) PP vlákna při cca 170 °C [4].

V posledních několika letech vyvolaly problémy související s environmentální a ekologickou problematikou rozsáhlý výzkum materiálů šetrných k životnímu prostředí. Zvláštní zájem je u kompozitních materiálů věnován použití vláken získaných z obnovitelných rostlinných zdrojů. Např. celulózová vlákna (CEL) vykazují řadu důležitých výhod, jako je široká dostupnost za relativně nízkou cenu, biologická obnovitelnost a rozložitelnost. U těchto vláken dochází při teplotě okolo 260 °C k tepelné degradaci, resp. k rozpadu vláken a tvorbě kanálků, čímž se zlepšuje požární odolnost. Následně se vytváří prostor pro rozpínání vodní páry nebo může docházet až k unikání vodní páry z betonu díky propojení vytvořených mikrotrhlin a dutin [3], [4].

Během posledních desetiletí se ukázalo, že obrovské množství nerozložitelného odpadu představuje pro životní prostředí vážný problém, přičemž jde zejména o odpadní plast, který je dokonce považován za jeden z nejnebezpečnějších zdrojů znečištění. Přírodní zdroje, jež nelze obnovit, jde právě efektivně šetřit opětovným použitím zmiňovaného polymerního odpadu, v němž má největší zastoupení polyethylen následován polyethylentereftalátem, známým pod zkratkou PET. Stejně jako PP vlákna, tak i PET vlákna mají potenciál ke snížení odprýskávání betonu při vysokých teplotách, neboť při narůstající teplotě dochází k vytváření kanálků, kde se vodní pára může rozpínat. PET vlákna však mají vyšší bod tání (cca 260 °C) než PP vlákna, což je jejich menší nevýhodou [4].

Přídavek vláken do betonu se nepoužívá jen pro zvýšení požární odolnosti, ale také pro zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností. Přídavek vláken snižuje počet a velikosti trhlin a pórů, propustnost vody nebo vnikání chemických látek v čerstvém i zatvrdlém stavu [2], [3], [4], [5].

Experimentální část

Použité suroviny

Pro výrobu betonu byly v rámci proběhlého výzkumu vybrány materiály, které se běžně používají v praxi. Důvodem výběru těchto surovin je simulace chování obvykle dostupného beto-

nu při vysokých teplotách a zkoumání možné eliminace negativních účinků při působení vysokých teplot na beton. Pro výrobu betonu byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z produkce závodu Mokrá. Prané těžené kamenivo ve frakcích 0–4, 4–8 a 8–16 mm bylo použito z lokality Žabčice. Byla též použita plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů s obchodním označením Chryso Optima 247. V experimentální části byly použity tři druhy vláken:

- PP vlákna s obchodním označením Chryso Fibrin 23 D. Jedná se o syntetická vlasová monofilamentní vlákna s délkou cca 12 mm a průměrem 18 μm ,
- recyklovaná celulózová vlákna (CEL) z novínového odpadu. Tato vlákna mají proměnlivý průřez. Díky velkému rozptýlu velikosti částic, který se projevuje na délkách i průměrech vláken, se vlákna jeví jako směs vláken a prachu,
- PET vlákna Namflex. Podle údajů poskytnutých výrobcem se jedná o speciálně upravená PET vlákna získaná zpětnou recyklací z odpadních surovin, nejčastěji z PET lahví postupným rozvlákněním hrubě nardrcených částic (vloček) o velikosti desítek milimetrů.

Celkem bylo namícháno sedm různých receptur, u nichž se měnil druh vlákna nebo byla použita jejich kombinace. Z důvodu možného porovnání jednotlivých druhů vláken byla dávka vláken volena objemově, proto se při pohledu na složení jednotlivých betonů v tab. 1 hmotnostní zastoupení vláken liší.

Mechanické parametry

Receptury byly míchány na předpokládanou konzistenci 40 až 60 mm sedimentu kužele dle ČSN EN 12 350-2. Konzistence byla regulována množstvím plastifikační přísady, nikoli zvýšením obsahu vody. Následně bylo provedeno stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu dle ČSN EN 12 350-6. Hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu se pohybovaly v rozmezí 2 270 až 2 380 kg/m^3 . S přidáním vláken došlo ke snížení objemové hmotnosti díky nižší objemové hmotnosti samotných vláken a došlo také ke zvýšení obsahu vzduchu, který je do směsi

Tab. 1 Složení betonových receptur

Tab. 1 Mix designs

Surovina	Jednotka	Receptura						
		REF	PP	CEL	PET	PP+CEL	PP+PET	CEL+PET
CEM I 42,5 R Mokrá		350	350	350	350	350	350	350
DTK 0–4 mm Žabčice		945	945	945	945	945	945	945
HTK 4–8 mm Žabčice		315	315	315	315	315	315	315
HTK 8–16 mm Žabčice		600	600	600	600	600	600	600
voda	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	180	180	180	180	180	180	180
ChrysoOptima 247		0,8	1,4	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
ChrysoFibrin 23D		–	1,2	–	–	0,6	0,6	–
celulóza		–	–	1,6	–	0,8	–	0,8
Namflex		–	–	–	1,8	–	0,9	0,9
objem vláken v betonu	$[\%/\text{m}^3]$	–	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086

Tab. 2 Výsledky mechanických parametrů

Tab. 2 Results of tests for mechanical characteristics

Receptura	Objemová hmotnost ČB $[\text{kg}/\text{m}^3]$	Objemová hmotnost ZB $[\text{kg}/\text{m}^3]$	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
REF	2 380	2 330	46,1	4,8	2,2
PP	2 330	2 300	54,7	6,2	2,7
CEL	2 290	2 290	52,0	7,2	2,5
PET	2 310	2 270	57,0	6,0	2,5
PP+CEL	2 320	2 290	50,6	6,1	2,8
PP+PET	2 320	2 300	52,2	5,9	2,6
CEL+PET	2 330	2 300	54,6	6,9	2,5

vpraven na povrchu vláken. Od každé receptury byly vyrobeny krychle o hraně 150 mm, na kterých byla ve stáří 28 dní stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12 390-7. Na těchto krychlích, příp. dalších zkušebních tělesech byly zjišťovány i další mechanické parametry:

- pevnost v tlaku na pěti krychlích dle ČSN EN 12 390-3,
- pevnost v tahu ohybem na pěti trámčích 100 × 100 × 400 mm dle ČSN EN 12 390-5,
- pevnost v příčném tahu na třech krychlích dle ČSN EN 12 390-6. [6–11]

Při porovnání výsledků měření (tab. 2) je patrné, že přidáním vláken do betonů došlo ke zlepšení mechanických parametrů oproti betonu referenčnímu. Přídavek vláken do struktury betonu přispěl ke zvýšení pevnosti v tlaku, který se projevil na všech betonech s vlákny. Tento efekt není primárně požadován, vysvětlením je zpevnění struktury a lepší rozložení a roznesení napětí při zatěžování. Všechny betony s přidáním vláken vykazovaly průměrně o 1 MPa vyšší pevnost v tahu za ohybu oproti betonu referenčnímu (4,8 MPa). Jako u předešlých pevnostních parametrů, tak i u zkoušky pevnosti v příčném tahu pozorujeme pozitivní vliv přidáním vláken do betonu. Z toho

plyne, že nejnižší hodnota příčného tahu byla zjištěna u referenčního betonu bez vláken. Obecně bylo očekáváno zvýšení tahových pevností přidáním vláken, což se potvrdilo, přestože se ve většině případů jedná o mikroválkna. U betonů s CEL došlo ke zvýšení pevnosti pravděpodobně nejen z důvodu zpevnění struktury, ale také z důvodu vnitřního ošetřování. Vlákna do sebe absorbovala vodu, čímž se snížil vodní součinitel a tím se snížila i pórovitost betonu. Voda absorbovaná ve vláknech se při hydrataci extrahovala a tím podpořila hydrataci cementu a vznik kompaktní struktury.

Vysokoteplotní zatížení

Zatěžování vysokou teplotou bylo prováděno v požární peci dle normové teplotní křivky ČSN EN 1363-1 (ISO 834). Zatížení vysokou teplotou bylo prováděno na hranici teploty 1 000 °C, po dosažení této teploty byla zkouška ukončena a zkušební vzorky byly ponechány k pozvolnému ochlazení na laboratorní teplotu. Po vysokoteplotním zatížení byla dále zkoumána zbytková pevnost v tlaku a změna hmotnosti. Pokles hmotnosti je kromě dehydratace betonu dán mimo jiné i vyhořením vláken, rozkladem hydrosilikátů, portlanditu a dalšími změnami struktury. Zkouška pevnosti v tlaku ukázala, že nejvyšší

hodnoty se vyskytovaly u všech betonů před teplotním zatížením, kdy proti namáhání spolupůsobila vlákna s cementovou matricí. V grafu na obr. 1 jsou hodnoty zbytkové pevnosti v tlaku [%]. Před ověřením působení vysokoteplotního zatížení bylo předpokládáno, že dojde ke snížení pevnosti kvůli změnám ve struktuře betonu, jako je rozklad portlanditu, rozklad CSH fází nebo fázová přeměna použitého křemičitého kameniva. Tyto změny způsobují vznik mikrotrhlin, které snižují zbytkové pevnosti.

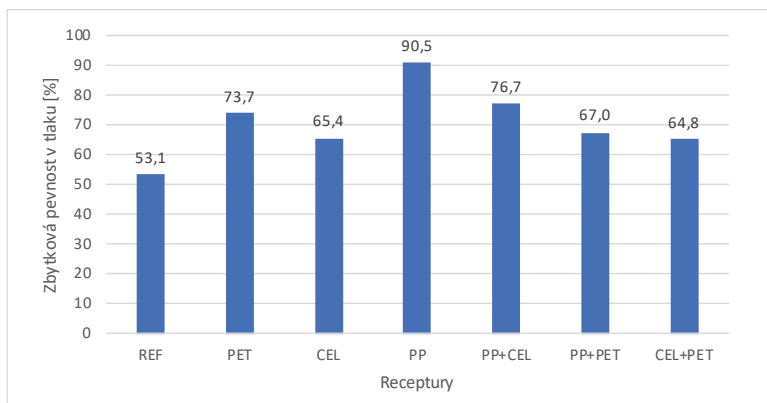
Z obr. 1 je patrné, že přidavek vláken vedl ke zvýšení zbytkové pevnosti oproti referenčnímu betonu bez vláken. Nejvyšší zbytková pevnost v tlaku byla vyhodnocena pro beton s přidávkou PP vláken, čímž bylo potvrzeno, že jejich přidávání do betonu za účelem zvýšení požární odolnosti je opodstatněné. Hodnota zbytkové pevnosti v tlaku se pohybovala přes 90 % z původní hodnoty. Hodnota zbytkové pevnosti u receptury PET byla oproti receptuře s PP nižší. Důvodem může být vyšší teplota tání přidaných vláken. Nejnižších hodnot zbytkových pevností dosahovaly receptury s recyklovanou celulózou. Pravděpodobně to bylo způsobeno rychlou přeměnou vlhkosti obsažené ve vlákně na páru a nárůstem tlaku, který se podílel na snížení pevnosti, čímž nedocházelo k dostatečně rychlé tvorbě kanálků pro transport a rozpínání vzniklé páry. Kombinace PP a PET vláken neměla příliš velký vliv na zbytkovou pevnost ve srovnání s recepturou obsahující pouze PET vlákna.

Pozorování mikrostruktury betonu

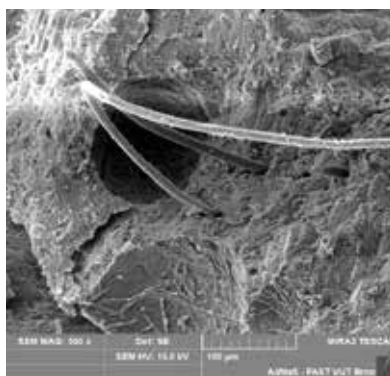
Při studiu působení vláken v betonu bylo provedeno snímkování mikrostruktury betonu. Sledovány a studovány byly zkušební vzorky jak před, tak i po vysokoteplotním zatížení pro srovnání chování betonu ve vysokých teplotách.

Na obr. 2 je beton s PET a PP vlákny před a po vysokoteplotním zatížení. Na obr. 2a lze vidět PET vlákna pevně zakotvená do cementové matrice. Za vlákna je také vidět struktura póru o velikosti 100 μm . Na obr. 2b jsou patrná lůžka po vyhořelých PET a PP vláknech, která zvyšují permeabilitu betonu.

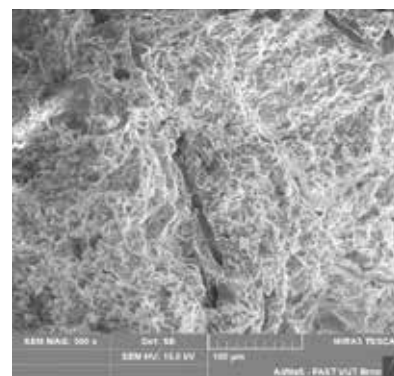
Značný rozdíl je zřejmý při srovnání vláken polymerních a celulózových.



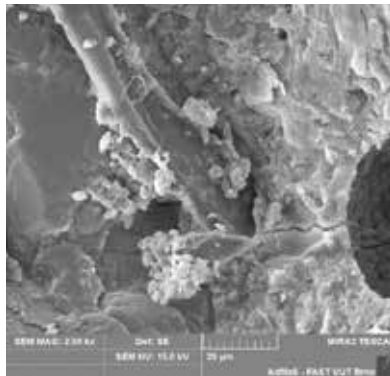
1 Zbytková pevnost v tlaku jednotlivých receptur **2** Beton s PET + PP vlákny: a) před, b) po vysokoteplotním zatížení **3** Beton s CEL vlákny: a) před, b) po vysokoteplotním zatížení **1** Residual compressive strength of individual mixes **2** Concrete with PET + PP fibres: a) before, b) after high temperature exposure **3** Concrete with CEL fibres: a) before, b) after high temperature exposure



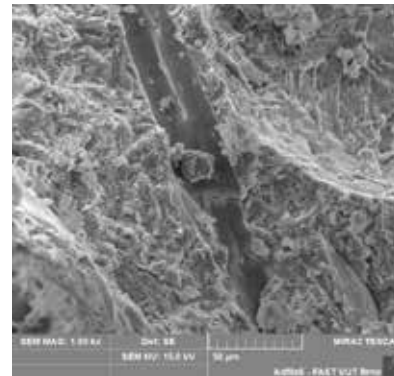
2a



2b



3a



3b

Zdroje:

- [1] KUPILÍK, V. *Konstrukce pozemních staveb: Požární bezpečnost staveb*. 2., aktualiz. vyd. Praha: ČVUT, 2009. Stavíme. ISBN 978-80-01-04291-5.
- [2] YANG, J., PENG, G.-F., ZHAO, J., SHUI, G.-S. On the explosive spalling behavior of ultra-high performance concrete with and without coarse aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials* [online], 2019, Vol. 226, pp. 932–944. [cit. 2022-11-02]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.299
- [3] BLÁZY, J., BLÁZY, R., MARTI-VARGAS, J. R., SERNA, P. Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials* [online], 2021, Vol. 14, No. 6, pp. 321–329. [cit. 2022-11-07]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2021.e00549
- [4] SINGH, H., GUPTA, R., WANG, Z. et al. Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Case Studies in Construction Materials* [online], 2020, Vol. 12, No. 11, pp. 207–219. [cit. 2022-11-07]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2019.e00324
- [5] FOTI, D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures* [online]. Elsevier, 2013, Vol. 96, pp. 396–404. [cit. 2022-11-08]. ISBN 9780081026762. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2012.09.019
- [6] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sedimentu*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [7] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [8] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [9] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [10] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [11] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [12] KIM, S. B., YI, N. H., KIM, H. Y., KIM, J.-H. J., SONG, Y.-Ch., INCARNATO, L. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Cement and Concrete Composites* [online], 2010, Vol. 32, No. 3, pp. 232–240. [cit. 2023-02-27]. ISBN 9780081026762. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002

Vlákna z recyklované celulózy (obr. 3) nejsou oproti polymerním celistvá. Tato vlákna jsou hladká a jsou spíše plochého charakteru. U kotvení vlákna je na obr. 3a vidět trhlina, která mohla vzniknout při expanzi vlákna při nabobtnání. Na vlákně lze vidět zbytky matrice z ukotvení vlákna. Na obr. 3b se vzorkem po zatížení je vidět lůžko, které vzniklo z recyklovaného celulóзовého vlákna a není spojitého průřezu.

Diskuze

Přídavek všech druhů vláken pozitivně ovlivnil mechanické vlastnosti betonu za normálních podmínek. U všech receptur s vlákny došlo ke zvýšení pevnostních parametrů. Vlákna napomohla k zpevnění struktury a rozložení napětí při zatěžování, přestože se jedná o mikrovlákna, která nejsou do betonů primárně přidávána pro zvýšení mechanických vlastností, ale pro eliminaci šířky trhlin vznikajících během procesu tvrdnutí betonu [2], [4].

Po vystavení vysokoteplotnímu zatížení došlo u betonů s vlákny k výrazně menšímu zhoršení mechanických vlastností než u betonu referenčního, vlákny nevytlučeného. U zbytkové pevnosti v tlaku u receptur s PET a PP vlákny došlo k nižšímu úbytku zbytkové pevnosti ve srovnání s referenční recepturou (73,7, resp. 90,5 % oproti 53,1 %). PET vlákna vyrobená z odpadního materiálu mají potenciál pro přidávání do betonu k dosažení vyšší požární odolnosti betonu či prvků konstrukce díky uspokojivému chování při vysokém teplotním zatížení. Na základě dosažených výsledků by mohla PET vlákna fungovat podobně jako PP vlákna s pozitivním ekologickým dopadem [3], [12].

U betonů s CEL vlákny došlo také k nižšímu úbytku zbytkové pevnosti v tlaku ve srovnání s referenčním betonem, avšak oproti betonům s PET a PP vlákny s menší efektivitou. Vyšší úbytek zbytkové pevnosti je pravděpodobně možné vysvětlit obsaženou vlhkostí uvnitř vlákna, proto je nezbytné brát v potaz jeho absorpční schopnost, a dále nedostatečně propustnou síť ve struktuře betonu. Smrštění vláken totiž může vést až k mezifázovému oddělení vláken od matrice, kdy poté nemusí docházet k iniciaci mikrotrhlin ve struktuře betonu kvůli slabému spojení me-

zi maticí a vlákny. I když přídavek celulóзовých vláken nepřispěl k výraznému zvýšení požární odolnosti, vlákna z recyklované celulózy začleněná v betonu prokázala svou funkčnost a betony s těmito vlákny vykazovaly srovnatelné mechanické vlastnosti jako ostatní betony s vlákny [3], [5].

Závěr

Studie se zabývá problematikou chování cementových betonů při vysokoteplotním zatížení se zaměřením na sledování vlivu vybraných druhů vláken na fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu.

Rozptýlená výztuž se do betonu přidává pro zvýšení houževnatosti, pevnostních charakteristik i pro zvýšení trvanlivosti betonu. Kromě zlepšení výše uvedených vlastností je rozptýlená výztuž zásadním opatřením proti porušení a destrukci betonu při vysokoteplotním zatížení, kdy dochází k teplotní dilataci a zvyšování tlaku vodní páry uvnitř betonu.

Novodobým trendem je použití a začlenění vláken z recyklovaných organických surovin. Na základě zjištěných poznatků v teoretické i experimentální části je zřejmé, že pro zvýšení užitečných vlastností betonů je možné využívat vlákna i ze zdrojů, které nepochází z primární výroby. Zkoušená vlákna získaná z recyklovaných PET materiálů a celulóзовá vlákna z recyklovaného papíru vykazují velmi dobrý potenciál pro možné využití v oblasti technologie betonu.

Článek vznikl v rámci výzkumu VUT FAST-J-22-8059 Vliv organických vláken na požární odolnost betonu.



Ing. Jan Klobása
197260@vutbr.cz



Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
sedlmajer.m@fce.vutbr.cz



prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
hela.r@fce.vutbr.cz

všichni: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Získejte titul na beton!

B E T O N
U N I V E R S I T Y

Betony blízke budoucnosti

23. 5. 2023 České Budějovice
10. 10. 2023 Uherské Hradiště
24. 10. 2023 Ústí nad Labem

Více informací na
betonuniversity.cz

Vypsání webinářů v 14. ročníku Beton University jsou zařazeny do akreditovaných vzdělávacích programů v projektech celoživotního vzdělávání ČKAIT i ČKA.

CBS

Česká betonářská společnost ČBS

Spolupořadatel

TVORBA REPLIKY ZÁBRADELNÍ VÝPLNĚ Z PŘEDSÁDKOVÉHO BETONU

Aleš Hvizdal, David Čítek, Vítězslav Vacek, Petr Tej

Článek se zabývá výběrem a ověřením vhodnosti postupů pro vytvoření repliky prefabrikovaného prvku zábradlí nad obloukovým mostem Libeňského soumostí. Cílem bylo nalézt způsob, který by v maximální možné míře splňoval podmínky pro rekonstrukci betonových konstrukcí a zároveň by byl proveden v intencích restaurátorských zásahů obvyklých na památkově chráněných objektech z betonu. Při rekonstrukci této části zábradlí byla zjištěna kamenická technika úpravy povrchu, která by do budoucna mohla být cestou k efektivnímu doplnění nových materiálů do původní hmoty zábradlí bez výrazných estetických rozdílů.

PRODUCTION OF A REPLICA INFILL PANEL FOR A BRIDGE PARAPET MADE OF A HISTORIC DECORATIVE CONCRETE

The article describes the selection process for the best materials and production methods for casting replica elements in the restoration of a parapet of a historic Libensky bridge in Prague. The aim was to find the best way of satisfying both the technical requirements of this project and the requirements for restorations of listed historic concrete structures. Methods used by original stonemasons were revealed during the restoration work. These may be used in future again when similar historic decorative concrete required repairs using modern materials while ensuring that the restoration did not produce any significant changes in appearance of the restored structure.

Popis zábradelního prvku

Zábradlí nad obloukovým mostem Libeňského soumostí je složeno ze tří typů do sebe vkládaných prefabrikovaných částí, které jsou osazeny do podélné drážky mostní římsy. Jedná se o sloupky, výplně a podélná madla, která mají dělicí spáry v místě sloupků. Díly jsou spojeny systémem pero-drážka. Obvod sloupku je perem, které je vloženo do drážek okolních částí. U výplně je horizontální spoj perem a vertikální drážkou. Při rozebírání dílců bylo zjištěno, že ve spojích bylo užito tvrdé maltové směsi.

Jednotlivé prvky zábradlí byly vyrobeny jako prefabrikáty, které byly sesazeny na stavbě, výjimku tvoří cca 10 % zábradlí v místech nad pilíři, kde je zá-

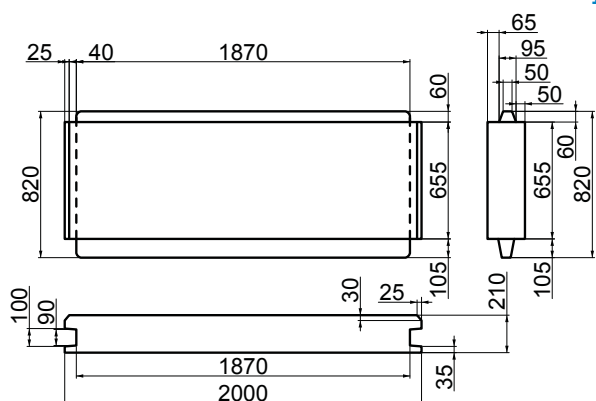
bradlí provedeno jako monolitické. Výplňové desky a madla byly vyrobeny souběžnou betonáží jádrového betonu a předsádkového betonu s mramorovým kamenivem. (Jádrový beton je beton s běžným kamenivem, předsádkový beton je lícový beton s přísadou minerální drti s viditelným povrchem bez úpravy nátěrem, omítkou nebo obkladem).

Předsádkový beton má u prefabrikovaných prvků typickou tloušťku cca 30 až 40 mm a u monolitických částí 40 až 70 mm. Sloupky byly dusány z jedné směsi s mramorovým kamenivem.

Z provedené diagnostiky zábradlí je zřejmé, že přibližně 30 % prefabrikovaných prvků zábradlí je poškozeno nebo bylo již dříve vyměněno za nevhodné

kopie, které svým povrchem neodpovídají originálním prvkům. Původnímu materiálu neodpovídal ani typ kameniva (mramorová drť), ani jeho granulometrie. Typickým poškozením prefabrikovaných desek je odlomení hrany desky, zpravidla u sloupků. Místa, kde v minulosti došlo k odpadnutí ulomené hrany, jsou provizorně doplněna maltovou vysrávkou. V několika případech bylo zjištěno poškození desky trhlinami. Monolitické desky zábradlí v rozšířené části konzoly nad pilíři jsou zpravidla poškozeny trhlinami šířek 1 až 4 mm u podstavců kandelábrů či v půdorysném zalomení tvaru. Z povrchu madel a povrchu většiny desek a sloupků směrem k chodníkům je vymyté pojivo, zpravidla až do hloubky 1 až 3 mm.

1 Výkres výplně, která je jednou ze tří částí prefabrikovaného zábradlí z předsádkového betonu **2** Fotografie zábradlí, kde jsou viditelné všechny tři části: madlo, sloupek, výplň. Madlo vpravo je novodobý doplněk, který neodpovídá původnímu povrchu ani směsi s použitím mramorového kameniva
1 Drawing of the infill, which is one of the three parts of the precast concrete parapet where a decorative surface layer of concrete was used
2 Photograph of the parapet, showing all its three parts: handrail, post, infill. The handrail on the right is a modern addition. It does not match the original surface concrete which used a marble aggregate





3

3 Demontovaný zábradelní panel ve fázi destruktivního sondování na dvoře KÚ ČVUT v Praze; tloušťky krycí vrstvy výztuže zábradelních desek jsou 80 mm (svislá výztuž) a 65 mm (vodorovná výztuž), avšak u obvodu desky je krytí výztuže podél svislé drážky jen 15 až 20 mm 4 Vápencová drť – drobnější, použitá pro vytvoření repliky betonového dílce 5 Vápencová drť – hrubší, použitá pro vytvoření repliky betonového dílce

3 Dismantled parapet panel in the courtyard of the CTU in Prague during a destructive inspection. The thicknesses of the cover layer of the reinforcement in the railing panels are 80 mm (vertical reinforcement) and 65 mm (horizontal reinforcement), but at the perimeter of the panel the cover of the reinforcement along the vertical groove is down to only 15-20 mm 4 Fine grained crushed limestone used to create a replica of a concrete element 5 Coarse crushed limestone used to create a replica of a concrete element

Poruchy zábradlí se nacházejí převážně nad klouby oblouků, kde již neprocházejí přiznané dilatační spáry jako u níže položených částí konstrukcí.

Předsádkový beton

Struktura pohledového, kamenicky opracovaného předsádkového betonu je obvykle hutná, tj. pevná a kompaktní, v některých případech však může cementový tmel obsahovat větší množství makropórů. Tyto makropóry se mohou objevit i lokálně pod kompaktním povrchem, což znamená, že struktura může být místy slabě mezerovitá, a tím náchylná na odprýskávání cyklickým působením vody a mrazu. Maximální rozměr zrna drceného kameniva, které bylo použito pro výrobu předsádkového betonu, je 25 až 30 mm, avšak lokálně je možné najít i kamenivo o rozměru až 70 mm.

Pevnost v tlaku použitého betonu se může lišit a charakteristická krychelná pevnost, která byla zjištěna zkouškami, se pohybuje v rozmezí 35 až 50 MPa. Pevnost povrchových vrstev předsádkového betonu v tahu byla zjištěna vysoká, průměrně 4,8 MPa. Povrchová nasákavost předsádkového betonu je nízká, což je dáno zmiňovanou hutností matrice. Předsádkový beton má i dle dnešních požadavků dostatečnou odolnost proti působení CHRL, tj. odpovídá požadavkům pro stavby pozemních komunikací s předpokládanou životností 100 let (dle platné normy ČSN EN 206+A2).

Tloušťky krycí vrstvy výztuže zábradelních desek jsou 80 mm (svislá výztuž) a 65 mm (vodorovná výztuž), avšak u obvodu desky je krytí výztuže podél svislé drážky jen 15 až 20 mm. Sloupky nevyhovují aktuálnímu požadavku na minimální tloušťku krycí vrstvy 55 mm, což je způsobeno subtilností průřezu sloupku, který má tloušťku pouze 90 mm. Tloušťka zkarbona-

vané vrstvy předsádkového betonu se pohybuje v rozmezí 0 až 10 mm. Stanovený obsah chloridů v předsádkovém betonu nepředstavuje riziko pro vznik koroze ocelové výztuže.

Jádrový beton

Struktura jádrového (vnitřního) betonu prefabrikovaných ani monolitických částí není homogenní, její hutnost kolísá od hutné až místy po slabě mezerovitou. Beton obsahuje vyvážený podíl drobného a hrubého těžného kameniva. Maximální rozměr zrn hrubého kameniva běžně dosahuje 50 až 70 mm. Průměrná objemová hmotnost jádrového betonu prefabrikovaných i monolitických zábradelních desek je $2\,270\text{ kg/m}^3$, pevnost v tlaku je velmi variabilní ($v = 30\%$). Charakteristická pevnost odvozená z výsledků zkoušek odpovídá pevnostní třídě betonu C20/25. Mrazuvzdornost jádrového betonu odpovídá pouze T25, takže nesplňuje požadavky na mrazuvzdornost betonu pro stavby pozemních komunikací s předpokládanou životností 100 let pro stupně vlivu prostředí XF. V jádrovém betonu nebyly identifikovány zjevné typické znaky alkalicko-křemičité reakce kameniva.

Výroba repliky betonového dílce

Pro výrobu repliky bylo navrženo provedení v horizontální dřevěné formě. Betonová směs byla navržena jako základní sanační beton s bílou vápen-

covou drtí a mírně světlou pigmentací, blízkou současnému vzhledu očištěného povrchu předsádkového betonu. Při pozdějším detailnějším petrografickém rozboru kameniva odebraného z diagnostikovaného prvku pro co nejpřesnější určení výprávkové hmoty bylo zjištěno, že plnivem není vápencová, ale mramorová drť. Tento detailní petrografický rozbor byl proveden až po úvodních testech výroby repliky, jež byla vytvořena s použitím vápencové drti z Čertových schodů. (obr. 4 a 5)

Technologie výroby repliky

Z původních písemných specifikací stavby je patrné, že předsádkový beton byl dusán společně s jádrovým betonem. V dokumentech je také přímo definováno, že není možno předsádkový beton aplikovat jako omítku. Spolu s tímto tvrzením je zde i zmínka o poměru pojiva ke kamenivu, které bylo definováno 1:3.

Replika byla vyrobena z jednoho betonu, jehož finální povrch je shodný s povrchem originálních dílů. Vzhledem ke složení základní směsi a velmi nízkému vodnímu součiniteli, jehož udržení bylo motivováno dosažením co nejvyšší trvanlivosti, vykazoval beton panelů repliky následující parametry:

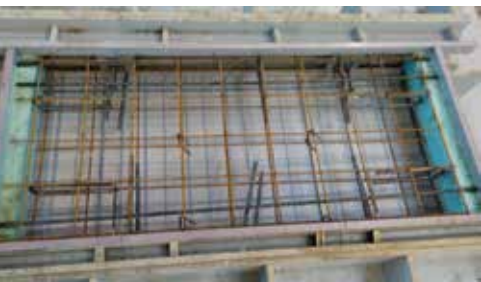
- průměrná objemová hmotnost cca $2\,460\text{ kg/m}^3$,
- průměrná krychelná pevnost v tlaku po 7 dnech cca 75 MPa,



4



5



6



7

6 Pohled do bednění – formy s osazenou výztuží 7 Ukládání betonové směsi do formy 8 Vzorek s vybraným typem hrubšího ručního pemřování (štokování) obdobného jako u originálu i s jemným páskem na hranách 9 Vzorky replik prefabrikátu zábradelního panelu na dvoře KÚ ČVUT v Praze
6 View into the formwork – a mould with the reinforcement in place 7 Placing of the concrete mix into the mould 8 Sample with a selected type of coarse surface treatment of the hardened concrete similar to the original and with a band of fine texturing along the edges 9 Samples of the replicas of precast parapet panels in the yard of the Klokner Institute of the CTU in Prague

- průměrná krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech cca 85 MPa,
- hloubka průsaku při zkoušce odolnosti proti tlakové vodě maximálně 8 mm.

Kamenická úprava povrchu repliky

Po sedmi dnech zrání za vlhka byly prefabrikáty převezeny z výroby společnosti KŠ Prefa do laboratoří Kloknerova ústavu ČVUT v Praze, kde dále zrály volně na vzduchu a kde byla provedena kamenická úprava jejich povrchu jak z vrchní strany, tak ze strany spodní od formy. Přes rozdílný charakter obou typů povrchů se potvrdilo, že lze obě plochy opracovat kamenickými postupy s obdobným výsledným vzhledem.

8



9



V historických specifikacích díla je uvedeno, že kamenicky opracovaný povrch by měl mít tloušťku minimálně 30 až 40 mm a měl by být dostatečně vyžralý, resp. od odbednění by mělo uplynout minimálně šest týdnů.

S ohledem na množství ploch je dále doporučeno používat pro opracování mechanické nástroje poháněné stlačeným vzduchem. Ze zkoušek opracování je stále patrný větší podíl šedých pojivových ploch, který je příznačný pro vrstvy betonu blíže povrchu, kde ještě není obnaženo kamenivo do větší hloubky (obr. 8).

Závěr

Cílem projektu bylo ověřit možnost výroby repliky prefabrikovaných částí zábradlí i s přihlédnutím na dobové kamenické ruční opracování povrchu. Repliky lze vytvořit a nahradit jimi již nevyhovující části, i přestože je z prací patrná komplexita jejich výroby. Ať už jde o vizuální kvality kamenického opracování povrchu, tak i o sestavení vhodných receptur, kterých bude z hlediska struktury a barevnosti potřeba

více variant pro každou typickou část. V úvahu by připadala i varianta betonáže ve větším bloku s následným nařezáním v místech budoucích pohledových ploch. Tím by mohla být zjednodušena práce při obnažení zrn kameniva, důležitá pro přiblížení se rozměrům zrn i pro docílení podobnosti se zvětřalým povrchem původních dílů. Pro vytvoření repliky byla použita vápencová drť, která by však měla být nahrazena mramorovou drtí, jež byla v diagnostikovaném prvku petrograficky zjištěna. V současnosti je možno získat bílý český mramor ve stále funkčních lomech z oblasti Jeseníků, odkud bylo podle historických písemných zdrojů dováženo i původní kamenivo.

Z celého výzkumu je jasně patrné, že k rekonstrukci historických mostů je nutné přistupovat z řady hledisek, např. ze stavebního, z kamenického či restaurátorského, a vycházet i z historických písemných zdrojů, které mohou osvětlit obtížně zjistitelná fakta o detailech dobové technologie výroby či tehdy používaných zdrojích surovin.

Výrobní princip předsádkových betonů byl použit při výstavbě mnoha mostů budovaných na začátku 20. století, proto je vhodné se dnes, resp. v době rekonstrukcí těchto mostů, daným tématem zabývat. Rekonstrukce předsádkových betonů je plánována i na mostech zapsaných na seznamu hmotných památek.

Tato práce byla podpořena z programu Ministerstva kultury České republiky na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje národní a kulturní identity na léta 2016 až 2022 (NAKI II), grantový projekt č. DG20P020W005 Technologie a postupy pro ochranu historických betonových mostů.



MgA. Aleš Hvizdal
ales.hvizdal@cvut.cz



Ing. David Čítek, Ph. D.
david.citek@cvut.cz



Ing. Vítězslav Vacek, CSc.
vitezslav.vacek@cvut.cz



Ing. arch. MgA. Petr Tej, Ph.D.
petr.tej@cvut.cz

všichni: Kloknerův ústav ČVUT v Praze

Mobilní továrna na prefabrikované domy poprvé nasazena na Pobřeží slonoviny

V č. 2/2019 časopisu Beton TKS jsme informovali o novém konceptu výroby prefabrikovaných dílů přímo v místě výstavby, který v roce 2019 představila společnost Neulandt, sesterská společnost dodavatele bednění Doka. Mobilní betonárna N3P této společnosti se teď dočkala prvního nasazení.

K prvnímu ostrému nasazení mobilní betonárny Neulandt 3P (N3P) došlo v rámci výstavby nových obytných čtvrtí v největším městě Pobřeží slonoviny Abidžan. Dynamicky se rozvíjející město je hlavním politickým, správním, obchodním a finančním centrem. Je třetí největší frankofonní městskou aglomerací na světě a se svými téměř pěti miliony obyvatel se rozkládá na ploše 2 119 km².

Právě kvůli potřebě rychlé a dynamické výstavby sem byla v loňském roce dovezena mobilní betonárna Neulandt 3P. Po necelých šesti týdnech montáže byl 70 m dlouhý a 15 m široký stroj N3P zkompletovaný a stoprocentně funkční pro průmyslovou výrobu betonových prefabrikátů z místních zdrojů a s nasazením místních pracovních sil. Kompletní systém byla dokončena v říjnu 2022 a od prosince probíhá plnohodnotná produkce. Při plném výkonu může aktuální zařízení dosáhnout výkonu více než 1 000 m² panelů denně nebo 1 500 ubytovacích jednotek o ploše 45 m² ročně, což je přibližně 230 000 m² prefabrikovaných elementů.

Se svým prvním závodem v Abidžanu pokládá společnost Neulandt základy industrializace stavebnictví v části světa, kde jsou otázky urbanistického plánování a přístupu k bydlení velmi citlivé. V rámci výroby bylo navíc přijato 100 místních obyvatel, kteří jsou po krátkém zaškolení schopni plně kvalifikovaného nasazení.

Krátce o systému

Mobilní betonárna N3P představuje linku na výrobu prefabrikovaných dílů, která může být lokalizována přímo na místě stavby. Výroba prefabrikovaných dílů probíhá pomocí tzv. motýlků, které představují formy pro jednotlivé panely, a díky postupnému procesu betonáže, základního zrání a dozrávání na rozdílných místech je možné s výrobou postupovat mnohem rychleji a efektivněji

a vyrábět více prefabrikátů najednou. Důležitý je také fakt, že celý proces zohledňuje i ekologické hledisko, je připraven na provoz za pomoci solární energie, má nízké emise CO₂, snižuje náklady na dopravu i ekologické dopady výroby na okolí.

Výhody systému

- Výroba prefabrikátů přímo v místě stavby přináší snížení finančních i časových nákladů,
- optimalizovaná výroba s motýlkovou technologií umožňuje rychlou výrobu bez prostojů daných technologickými postupy,
- průmyslový výrobní proces zvyšuje efektivitu a produktivitu,
- stabilní kvalita betonových odlitků bez závislosti na počasí,
- možnost kombinace s monolitickou výstavbou,
- technologie patentovaná v padesáti zemích světa.

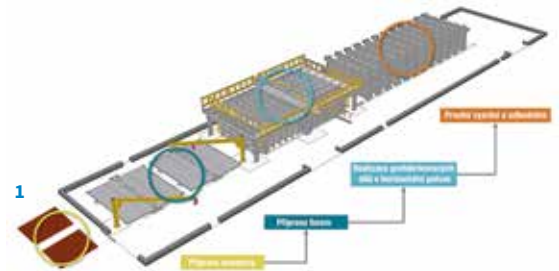
Možnosti využití mobilní výroby v širším kontextu

Mobilní továrna je v případě nasazení na místě nejen prostředníkem pro snadnou výstavbu. Díky jednoduché koncepci, kdy využívá místní zdroje surovin, ekologickou energii i lokální pracovníky, dokáže smysluplně podpořit i místní rozvoj.

Možná doprava mobilní továrny přímo na místo výstavby může být velmi prospěšná nejen v rámci růstu městských aglomerací, kde jsou právě menší obydlí jasně v kurzu, ale také v případě budování kvalitního humanitárního ubytování pro oběti přírodních katastrof jako např. v Turecku a Sýrii.



Radek Syka
Česká Doka bednicí technika,
spol. s r. o.
radek.syka@doka.com



1 Schéma mobilní betonárny N3P (příprava armatury – příprava forem – realizace prefabrikovaných dílů v horizontální poloze – prvotní vyzrání a odbednění) 2 Díky postupnému procesu výroby na různých místech je možné vyrábět více prefabrikátů najednou 3 Vyzrávání prefabrikátů 4 Vzorový domek



RESTAUROVÁNÍ DROBNÝCH DEFECTŮ NA POVRŠÍCH Z PŘEDSÁDKOVÉHO BETONU

Josef Červinka, Aleš Hvíždal, Petr Tej, Michael Gabriel

V roce 2021 byl týmem Kloknerova ústavu a restaurátorem zaměřeným na restaurování betonových artefaktů zpracován památkový postup s názvem Rekonstrukce cenných betonových mostních objektů. Jeho součástí byl i experiment zaměřený na možnosti restaurování zábradlí Libeňského mostu. Experiment se věnoval složení vysprávkové směsi a postupu doplňování menších defektů na originálních částech zábradlí mostu. Vzhledem k povaze a architektonickému významu objektu byl experimentální zásah proveden se snahou o akceptování nejen technických, ale i estetických hledisek, jak je u stavebních kulturních památek běžné.

RESTORATION OF MINOR DEFECTS ON CHISELED CONCRETE SURFACES

In 2021, a team from the Klokner Institute together with a specialist in the restoration of concrete artefacts developed a conservation procedure for the reconstruction of non-load-bearing concrete elements of historic bridges. It included an experiment focused on the restoration of the parapet of the historic Libeň Bridge. The experiment included development of a mix design for the repair mortar and of the procedure of filling-in minor defects on the original parts of the parapet. Given the character and architectural significance of the bridge, the experimental repair process considered not only technical aspects of the remedial work but also aesthetic ones, as is appropriate in the case of restoration of architectural cultural heritage.

Koncepce restaurátorského zásahu

Restaurátorský zásah obecně by měl být veden snahou doplnit chybějící části objektu a vizuálně je sjednotit tak, aby finální vzhled co nejvíce odpovídal předpokládané podobě objektu v době svého vzniku. V našem případě byly zvažovány různé přístupy a kombinace restaurátorských metod s metodami běžnými ve stavební praxi. Pro restaurování byla zvolena řada komerčních výrobků, před jejichž aplikací bylo provedeno několik zkoušek modifikovatelnosti a zpraco-

vatelnosti. Důraz byl kladen zejména na maximální přiblížení vlastností doplňované hmoty původním materiálům a na to, aby použité materiály vizuálně neměnily původní materiálu objektu. Pro tyto účely byly navrženy materiály vyvzorkované samostatně a následně byly aplikovány na referenční plochy objektu. (obr. 1 a 2)

Restaurovaný prvek

Zábradlí nad obloukovým mostem Libeňského soumostí je složeno ze tří typů do sebe vkládaných prefabrikovaných prvků, které jsou osazeny do

podélné drážky mostní římsy. Jedná se o sloupky, výplně a podélná madla, která mají dělicí spáry v místě sloupků. Díly jsou spojeny systémem pero-drážka. Obvod sloupku je perem, které je vloženo do drážek okolních částí. U výplně je horizontální spoj perem a vertikální drážkou. (obr. 3)

Restaurátorský zásah byl provádněn na sloupku (obr. 3), který je zhotoven z předsádkového betonu stejně jako výplně a madla, ale na rozdíl od nich neobsahuje vzhledem k tloušťce 90 mm jádrový beton.

Popis poškození

Betonová výplň zábradlí vykazovala několik poškození:

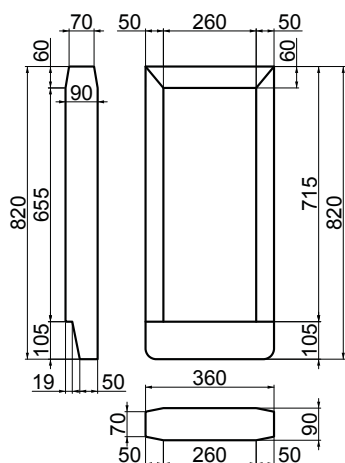
- povrch byl znečištěn tmavými depozity,
- na reliéfu povrchu se vedle autentického kamenického opracování podílela i částečná ztráta pojiva obnažující hrany zrn použitého kameniva,
- na styčných plochách s jinými dílci byly zbytky ložné cementové malty,
- v části tvořící pero pro drážku protilehlého kusu byl odpadlý beton nad výztuží, která byla poškozena povrchovou korozi a deformací, jež neumožňovala návrat výztuže do původní polohy,
- v souvislosti s mechanickým namáháním okraje dílce se ve hmotě



1



2



3

betonu vyskytovala trhlina. Ztráta hmoty zde byla zapříčiněna odložením hran, pera a rohu dílce. Tato poškození prezentovala plastický defekt s nepravidelným okrajem o mocnosti chybějící hmoty od nuly do několika centimetrů. Další typ plastického defektu tvořil otvor po jádrovém vrtání. (obr. 4)

Materiálový průzkum

Petrografický rozbor

V rámci odebraného vzorku betonu byly v základní hmotě zastoupeny prakticky výhradně horninové klasty (zrna) mramorů (krystalických vápenců). Pouze výjimečně bylo možno v základní hmotě betonu pozorovat drobné klasty granitoidů (křemen-živcový agregát) nebo zaoblená zrna křemene. Generálně byly horninové klasty mramorů zastoupeny angulárními až subangulárními zrny velikosti do 10 mm. V základní hmotě betonu se nacházela četná zrna mramorů (většinou jednotlivá zrna, která jsou tvořena jedním krystalem – jedincem – středně až hrubě krystalického kalcitu), jež byla omezena vlastními krystalografickými plochami (krystalografické omezení podle klenců). Struktura vzorku byla zubovitá (zubovitě granoblastická), z hlediska mineralogického složení se jednalo o kalcit a sekundární součásti (oxid-hydroxid Fe–Mn). Horninové klasty mramorů byly složeny výhradně z krystalického agregátu kalcitových zrn. Tento krystalický agregát velikosti 0,25 až 10 mm (středně až hrubě krystalický) byl tvořen většinou ze zubovitě (nevýrazně laločnatě) omezených kalcitových zrn, která byla pigmentova-



4

ná (zakalená) oxidy–hydroxidy Fe–Mn. Běžně byla patrná lamelovaná nebo dvojčetně lamelovaná zrna kalcitů, která byla tlakově deformovaná (různě velké zprohýbání lamel). Ojedinele byl v intergranulárních spárách (mezi zrny) zastoupen jemný mikroagregát kalcitu, který vznikl drčením a rekrytalizací zrn (plastické deformace).

Z petrografického rozboru vyplynulo, že součástí betonové směsi bylo drčené mramorové kamenivo (obr. 5), s největší pravděpodobností z lomů v Jeseníkách (Supíkovice, Dolní Lipová). Svědčí o tom fakt, že jediným nalezištěm nerostu s těmito vlastnostmi v ČR je právě zmiňovaná lokalita. Zde je mimo jiné těžen i materiál na

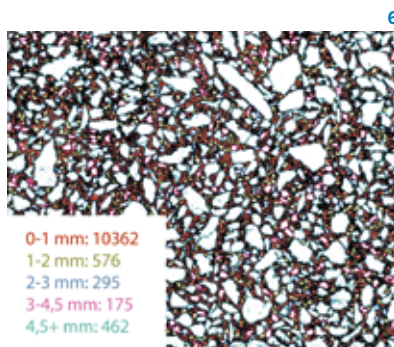


5a



5b

1 Vzorky cementů: A – portlandský směsný cement: CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, B – portlandský směsný cement: CEM I 42,5 R Českomoravský cement, C – portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-V-LL) 32,5 R Prachovice Cemex, D – portlandský cement CEM II/A-LL 32,5 R Schwenk, E – portlandský cement CEM II/A-LL 32,5 R Čížkovický cement **2** Vzorky mramorových drtí z lokality Jeseník: 0,5–1; 1,5–2; 2,5–3; 3–4,5; 4,7; 6–9; 9–12; 16–25; 25–50 mm **3** Rozměry betonové výplně zábradlí **4** Stav před restaurováním **5** Petrografický rozbor vzorku betonu z Libeňského mostu: a) makrosnímek, b) tenký řez vzorkem, polarizace **6** Výsledek součtu zrn a rozdělení podle frakcí **7** Zainjektování nízkoviskózní epoxidovou pryskyřicí Injektionsharz 100 **1** Cement samples: A portland blended cement: CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, B – portland blended cement CEM I 42,5 R Českomoravský cement, C – portland mixed cement CEM II/B-M (S-V-LL) 32,5 Prachovice Cemex, D – portland cement CEM II/A-LL 32,5 R Schwenk, E – portland cement CEM II/A-LL 32,5 R Čížkovický cement **2** Samples of the crushed marble aggregate from the site of Jeseník: 0,5–1; 1,5–2; 2,5–3; 3–4,5; 4,7; 6–9; 9–12; 16–25; 25–50 mm **3** Dimensions of the concrete element/post **4** Condition of the bridge before the restoration **5** Petrographic analysis of a sample of existing concrete from the Libeňsky bridge: a) macroshot, b) thin section of sample, polarization **6** Result of granulometry and size distribution **7** Grouting with a low viscosity epoxy resin Injektionsharz 100



6



7



8



9a



9b



9c



10

8 Stav před restaurováním **9** Ošetření armatur adhezivním můstkem s konzervačním účinkem (Rostschutz EP, Betofix RM) **10** Vlepení nerezové armatury o průměru 4 mm pomocí epoxidového tixotropního lepidla (Akepox 5010)

8 Condition before the restoration **9** Treatment of the reinforcement using an adhesive coating which had a preservative effect (Rostschutz EP, Betofix RM) **10** Bonding-in of a 4 mm diameter stainless steel reinforcement using a thixotropic epoxy based adhesive (Akepox 5010)

výrobu bílých dlažebních kostek, kterými je vydlážděna část Prahy. Po vypracování petrografického průřezu byla domněnka o původu kameniva potvrzena i historickým článkem v časopise Věstník hlavního města Prahy ze dne 13. 12. 1926 (ročník 33, číslo 721). V článku věnovaném výstavbě mostu přes Vltavu na Manínách je zmínka o firmě, která dodávala kamenivo pro výrobu předsádkového betonu. Tou společností byl Orlit z Kyšperka (od roku 1950 Letohrad). Blízkost sídla společnosti a mramorových lomů v Jeseníkách lze považovat za důkaz, že použité kamenivo bylo skutečně z Jeseníků.

Granulometrie směsi

Pro zjištění zrnitosti směsi nebylo možno postupovat chemickou metodou, při které se rozpouští cementové pojivo, jako je to běžné u silikátových směsí. Proto bylo nutno zjistit granulometrii z 2D obrazu povrchu. Nejprve byl povrch vzorku opískován a následně vyfocen. Na vzorku o rozměru 200 × 200 mm byl pomocí počítačového programu zjištěn počet zrn a následně byla tato zrna roztržena podle velikosti. Tento výsledek je však jen orientační pro určení přibližného poměru frakcí ve směsi. (obr. 6)

Čištění

V rámci předloženého zásahu byly provedeny zkoušky čištění povrchu betonové části zábradlí od atmosférických depozitů. Při čištění byl kladen důraz na ohleduplnost k autentickému povrchu betonu, na snadné provedení a na šetrnost k životnímu prostředí. Výše uvedené podmínky vyloučily chemické čištění.

Byla provedena zkouška čištění studenou tlakovou vodou do 130 bar, čištění horkou tlakovou vodou 130 bar / 130 °C a přímé tryskání hnědým korundem FEPA 180 za nízkého tlaku do 5 bar. Na základě vizuálního hodnocení lze konstatovat, že všechny tři metody čištění nepoškozují povrch betonu a čistí jej účinně. Nejrychlejší a nejefektivnější bylo čištění horkou tlakovou vodou.

Povrch dílce určeného pro referenční zásah byl proto očištěn horkou tlakovou vodou 130 bar / 130 °C a byly odstraněny zbytky ložné malty pomocí ručního kamenického nářadí.

Trhliny

Identifikované trhliny šířky 0,1 až 1,1 mm byly po vyčištění horkou vodou a po následném vyschnutí zainjektovány nízkoviskózní epoxidovou pryskyřicí Injektionsharz 100. Po vytvrdnutí pryskyřice byl povrch trhliny zaplněn jemnou minerální reprofilační maltou Betofix RM2. (obr. 7)

Ošetření obnažené kovové armatury

Korozní produkty z povrchu obnažených armatur byly otryskány a očištěné armatury ošetřeny adhezivním můstkem s konzervačním účinkem (Rostschutz EP, Betofix RM). Nefunkční a deformované armatury byly odříznuty a nahrazeny nerezovou hladkou kulatinou o průměru 4 mm, která byla do betonu vlepena pomocí epoxidového tixotropního lepidla (Akepox 5010). (obr. 8 až 10)

Tmelení

Hluboký kolmo ohraničený defekt prezentovaný kruhovým otvorem po jádrovém vrtu byl doplněn směsí tvořenou jedním dílem šedého cementu (Prachovice) a třemi díly mramorové drti tvořené frakcemi 0,5 až 5 mm (Jesenický mramor). Do předvlhčeného defektu byla směs nadusána tak, aby doplněk převyšoval autentický povrch minimálně o 5 mm.

Defekty tvořené ztrátou hmoty od 50 do 0 mm byly doplněny reprofilační maltou Betofix RM2 plněnou mramorovou drtí frakce 0,5 až 4 mm. Směs byla opět nanášena na předvlhčený povrch v přebytku cca 2 mm. Dle textury doplňovaného místa byly do tmelu lokálně vloženy větší kusy drti. (obr. 11)

Lokální plastické retuše

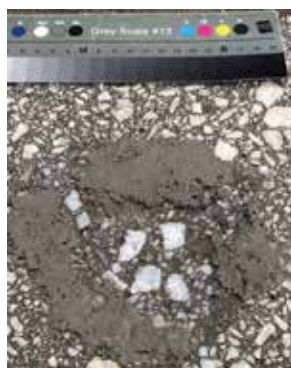
Po pěti dnech zrání byl povrch tmeľů opracován. Nejprve byl přebytečný tmel obroušen diamantovým kotoučem do úrovně doplňovaného povrchu. Obroušený povrch tmelu byl dále upravován pemrlováním a jehlováním, tak aby reliéf povrchu co nejvíce odpovídal okolnímu autentickému povrchu. V již zmíněném článku v časopise Věstník hlavního města Prahy je zmínka, že štokování pemrlicí se dělo pneumatickými nástroji. (obr. 12 až 14)



11a



11b



11c



11d



12



13



14

11 Proces tmelení **12** Broušení povrchu diamantovým kotoučem **13** Pemrlování povrchu **14** Ukázka fází povrchové úpravy: povlak cementového pojiva po nanesení – jehlování – pemrlování – broušení diamantovým kotoučem **15** Stav po restaurování
11 Filling-in process **12** Surface grinding with a diamond disc **13** Treatment of the surface by a bush hammer **14** Example of the stages in the surface treatment: surface of the cementitious binder coating after its application – needling – bush hammering – diamond disc grinding **15** Condition after the restoration

Lokální barevné retuše

Povrch barevně nesourodých tmelů byl lokálně barevně retušován, aby byl sjednocen s okolním materiálem. Retuš byla provedena s použitím anorganických pigmentů (Kremer Pigmente a Bayferrox) pojených 5% akrylátovou disperzí (Primal FS 061).

Závěrečná povrchová úprava

Navzdory poměrně nízké nasákavosti původního materiálu byla provedena hydrofobní ochrana povrchu. Po vyzrání použitých materiálů byl povrch opakovaně natřen hydrofobizačním prostředkem na bázi silanů (Funcosil BI).

Závěr

Při volbě přístupu k restaurování sloupku Libeňského mostu byly zvažovány různé kombinace restaurátorských a kamenických metod s metodami běžnými ve stavební praxi. Důraz byl kladen na vlastnosti doplňované hmoty a na to, aby použité materiály vizuálně neměnily původní materií objektu. Důležitým přínosem bylo ověření zdroje použitého mramorového kameniva z lokality Jeseník a opracování doplňků broušením a pemrlováním. U provedených doplňků byly konstatovány i limity napodobení textury doplňovaného prvku v případě,

15



kdy má defekt menší rozměr než největší zrna kameniva. Na základě provedeného experimentu lze konstatovat, že restaurování povrchů Libeňského mostu předloženou metodou je možné. (obr. 15)

Tato práce byla podpořena z programu Ministerstva kultury České republiky na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje národní a kulturní identity na léta 2016 až 2022 (NAKI II), grantový projekt č. DG20P02OV005 Technologie a postupy pro ochranu historických betonových mostů.



MgA. Josef Červinka
restaurátor
info@josefcervinka.cz



MgA. Aleš Hvizdal
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
ales.hvizdal@cvut.cz



Ing. arch. MgA. Petr Tej, Ph.D.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
petr.tej@cvut.cz



Ing. arch. Michael Gabriel
Atelier Gabriel
michal.gabriel@agn-atelier.com



inzerce



Bednění PERI pro kvalitní pohledový beton Různé konstrukce s různými systémy

Expozice tragédie na Ploštině

Hlavní výzvou tohoto projektu bylo zhotovení štítové železobetonové stěny v pohledové kvalitě s uspořádaným modulem spár a spínání. Na tuto stěnu bylo zvoleno rámové bednění MAXIMO, které umožňovalo betonáž 9 m vysoké stěny v jednom záběru.

Obvodové železobetonové stěny byly řešeny nasazením panelů nosíkového stěnového bednění VARIO GT 24. Sloupy byly bedněny systémem QUATTRO, který přináší stavbě velkou úsporu jeřábu, protože lze celý sloup včetně stabilizátorů a betonářské plošiny přemístit najednou.



**Bednění
Lešení
Služby**

www.peri.cz

Vandex

OCHRÁNÍME KAŽDÝ BETON.

**Hydroizolace a ochrana
betonových konstrukcí.**

www.vandex.cz





ECOCRETE® R

Beton z recyklovaného kameniva

- ohleduplný k životnímu prostředí
- šetří přírodní neobnovitelné zdroje
- snižuje množství skládkované stavební suti
- výhodná cena betonu
- zlepšuje hodnocení pro získání certifikace LEED, BREEAM a další
- snižuje uhlíkovou stopu při výrobě materiálu

TBG METROSTAV s.r.o.
Rohanské nábřeží 68,
186 00 Praha 8 – Karlín