VYSOKOHODNOTNÉ VLÁKNOBETONY PRO SUBTILNÍ BETONOVÉ KONSTRUKCE ▮ HIGH-PERFORMANCE FIBRE CONCRETE FOR SUBTLE CONCRETE STRUCTURES

Petr Hájek, Magdaléna Kynčlová, Ctislav Fiala

Na základě optimalizace složení silikátového kompozitu se zaměřením na jeho mikrostrukturu byla z lokálně dostupných surovin navržena skladba a technologie výroby vysokohodnotného vláknobetonu využitelného pro subtilní konstrukční prvky. Odladěný kompozit o pevnosti v tlaku dosahující 140 MPa byl aplikován při návrhu subtilní kazetové stropní konstrukce. Experimentální ověření reprezentativních výseků kazetové desky prokázalo velmi dobré mechanické vlastnosti. Environmentální analýza potvrdila výhodnost navrženého přístupu z hlediska dlouhodobého zajištění vysoce kvalitních funkčních vlastností i z hlediska redukce dopadů na životní prostředí. ▮ Composition and mixing technology of high-performance fibre concrete from locally available resources has been determined based on optimization of microstructure of silicate composite. This composite having compressive strength about 140 MPa was used and tested in subtle waffle floor structure. Experimental verification of representative full scale parts of waffle slab showed very good mechanical properties. Environmental analysis supported assumption about advantages of this approach from the point of view of long term performance quality as well as reduction of environmental impacts.

VÝCHODISKA

Vylehčená železobetonová deska (žebrová, komůrková nebo kazetová) představuje vzhledem ke své tvarové podstatě jeden z efektivních typů konstrukcí z hlediska relace mezi spotřebou konstrukčních materiálů a statickými parametry. Důvodem jsou nesporné statické výhody vyplývající z odlehčeného žebrového charakteru průřezu s menší plošnou hmotností. V porovnání s plnou železobetonovou deskou lze v případě odlehčených desek dosáhnout až 50% (event. i větší) úspory betonu, a tím i snížení zatížení. Redukce zatížení se odráží i v menší spotřebě výztužné oceli vlastní desky a menších dimenzích konstrukcí podporujících.

Při použití nových kompozitních silikátů a progresivních technologií jejich zpracování je reálný předpoklad dosažení ještě většího vylehčení konstrukce, a tím i snížení environmentálních dopadů spojených se spotřebou primárních surovin a s likvidací odpadů a nároků na recyklaci. Některé příklady ze zahraničí ukazují, že nové kompozitní silikátové materiály a související technologie umožňují realizaci subtilních skořepinových konstrukcí s velmi malou tloušťkou stěn (30 mm i méně).

Dílčím cílem výzkumného projektu bylo ověření možností návrhu subtilních kazetových nebo žebrových stropních konstrukcí s minimalizovanou tloušťkou horní desky (až 30 mm). Deska takové tloušťky nemůže být efektivně vyztužena konvenční výztuží, a proto byla ověřována možnost využití vláknobetonů – a to i s ohledem na zajištění vysoké spolehlivosti konstrukce. Deska musí spolehlivě přenést ohybové namáhání od svislého zatížení a tlakové namáhání od spolupůsobení s žebrem při ohybu.

Optimalizace složení betonové směsi

Vysokohodnotné betony lze použít pro optimalizované tvary železobetonových průřezů, které mohou být s ohledem na mechanické vlastnosti materiálu velmi subtilní. Často se využívá kompozitních vláknobetonů, vyztužených ocelovými, skleněnými nebo plastovými vlákny.

Recyklované odpady mohou být využity ve vlastní betonové směsi nebo pro výrobu bednicích prvků event. dalších komponentů. Pro zvýšení pevnosti a zpracovatelnosti se využívá příměsí: popílku, strusky nebo křemičitého úletu, které nahrazují primární kamenivo a vzhledem k cementujícím vlastnostem snižují spotřebu energeticky náročného portlandského cementu.

Optimalizace tvaru – vylehčení železobetonové konstrukce

Nárůst pevností vysokohodnotných betonů umožňuje optimalizaci tvaru vedoucí k subtilním vylehčeným průřezům konstrukcí s cílem snížení spotřeby materiálu. Klasický přístup odlehčení ve formě kazetové nebo žebrové konstrukce je pro velké rozpony běžně používán. Zachování rovného podhledu betonové stropní konstrukce při současné snaze o snížení plošné hmotnosti vede k vylehčování jádra železobetonového průřezu různými typy vložek z lehkých materiálů, přičemž vlastní betonový průřez může být velmi subtilní. Tímto způsobem lze dosahovat efektivního vylehčení stropní desky a současně úspory betonu o 30 až 50 %.

OPTIMALIZACE MATERIÁLU

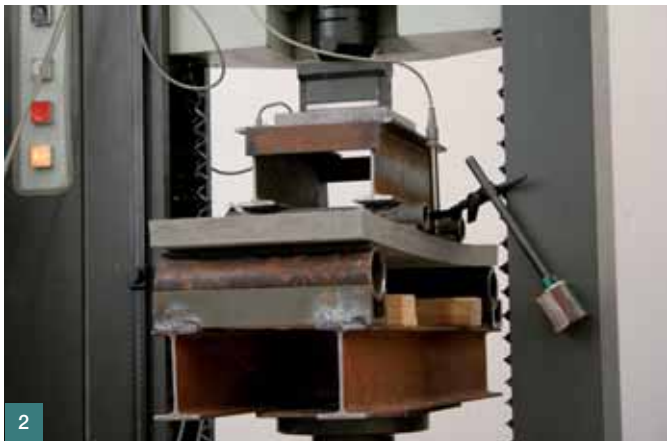
Mechanické vlastnosti tenkých destiček

Prvním krokem k návrhu kazetové stropní konstrukce s minimalizovanou tloušťkou horní desky (25 až 30 mm) bylo najít vhodný materiál. Deska takové tloušťky nemůže být vyztužena konvenční výztuží, proto se ověřovala možnost využití vláknobetonů.

V první fázi byla na několika sadách zkušebních těles (desek tloušťky 30 mm) z různých druhů vláknobetonů ověřována pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Pro porovnání byla referenční série desek S-I vyztužena konvenční výztuží, kari sítí 100 x 100 x 4 mm, která byla umístěna do střednicové roviny desky. Celkem bylo odzkoušeno

Tab. 1 Zkoušené varianty vláknobetonů a dosažené pevnosti ▮
Tab. 1 Alternatives of tested fibre concretes and attained strengths

Série č.	Výztuž	Tahová pevnost vláken [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
S-I	Kari síť 4/100/100	550	5,7	46,5
S-II	BeneSteel 50/35 polypropylen 35 mm	660	5,6	54,3
S-III	Fibrex A1 ocel 25 mm	350	6,4	55,2
S-IV	Třinec 60 ocel 60 mm	1 000	7,8	54,1
S-V	Dramix ZP 305 ocel 30 mm	1 100	6,9	53,6
S-VI	Prostý beton	–	6,8	89,6
S-VII	Dramix RC 80/30 BP ocel 30 mm	2 300	7,2	83,8
S-VIII	Prostý beton	–	6,7	59,6
S-IX	Fibrex A1 ocel 25 mm	350	8,6	80
S-X	Ocelová mikrovlákna 9 mm	2 400	14,8	176,5
S-XI	Dramix RC 80/30 BP ocel 30 mm	2 300	5,9	92,3
S-XII	Stratec 0,15 ocel 13 mm	2 400	10,4	136,8



Obr. 1 Zkušební tělesa ▮ Fig. 1 Test specimens

Obr. 2 Zkouška čtyřbodovým ohybem ▮ Fig. 2 Four-point bending load test

Obr. 3 Porovnání environmentálních parametrů zkušebních desek z různých typů vláknobetonů ▮ Fig. 3 Comparison of environmental parameters of the tested thin slabs from various types of fibre concretes

dvanáct různých směsí, použitá vlákna měla různou geometrii a pevnost v tahu (tab. 1).

Pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu byla zkoušena na tenkých destičkách 250 × 700 × 30 mm, které byly zatěžovány čtyřbodovým ohybem (obr. 1 a 2). Pro zjištění pevnosti v tlaku byly použity krychle o hraně 150 mm. Pro účely následné numerické simulace experimentů byla na trámcích 100 × 100 × 400 mm provedena zkouška lomové energie v Kloknerově ústavu (pod vedením Doc. J. Kolíska).

Destičky s 60 mm dlouhými ocelovými vlákny vykazovaly dobré mechanické vlastnosti, ale zapracovat taková vlákna do 30 mm tenkých destiček bylo velmi obtížné. Vlákna vyčnívala a manipulace s destičkami byla proto složitá. Zároveň je třeba uvážit vliv směrové orientace delších vláken v tenké destičce na výsledky mechanických zkoušek. Může docházet k nárůstu tahové pevnosti, současně je však třeba zhodnotit ortotropní charakter a větší míru nepravidelnosti rozptýlení vláken v matrici vedoucí ke statisticky většímu rozptylu výsledků.

Nejlépe z hlediska zpracovatelnosti a mechanických vlastností vyšla série S-X, která byla vyrobena na univerzitě v Kasselu týmem profesora M. Schmidta z jejich UHPC směsi M2Q. Potvrdilo se, že pro výrobu subtilních prvků jsou výhodnější ocelová mikrovlákna v délkách 9 až 15 mm. Kromě rovnoměrnějšího rozptýlení vykazují mikrovlákna větší měrný povrch (při stejném množství), zajišťující jejich lepší soudržnost v cementové matrici.

V dalším kroku výzkumu byla zkoušena směs z jemnozrnných materiálů, které jsou dostupné na českém trhu, s rozptýlenou výztuží z ocelových mikrovláken.

Odladění HPC140 z lokálně dostupných surovin

Složení směsi vycházelo z receptur pro ultravysokopevnostní beton M1Q a M2Q Prof. M. Schmidta. Jednotlivé komponenty byly vybrány podle dostupnosti na českém trhu, jen ocelová mikrovlákna byla pro první sadu experimentů dovezena z Německa od firmy Stratec. Pro další výzkum byla zakoupena mikrovlákna od firmy Bekaert Petrovice. Celkem bylo vyzkoušeno čtrnáct směsí.

Byly použity dva typy cementu CEM I 52,5R a CEM II/A-LL 52,5N a čtyři různé druhy superplastifikátorů – všechny na bázi polykarboxylátů. Jednotlivé směsi se dále lišily v množství superplastifikátoru a vody. Experimenty ukázaly, že z hlediska zpracovatelnosti není důležité jen množství vody a superplastifikátorů, ale také správný postup míchání. Osvědčilo se nejdřív zamíchat všechny sypké složky, potom přidat vodu, dále superplastifikátor, zamíchat a nakonec přidat vlákna. Mechanické vlastnosti byly zkoušeny na trámečkách 40 × 40 × 160 mm. Nejlepší směsi dosahovaly 28denní pevnosti v tlaku kolem 170 MPa a pevnosti v tahu za ohybu cca 45 MPa.

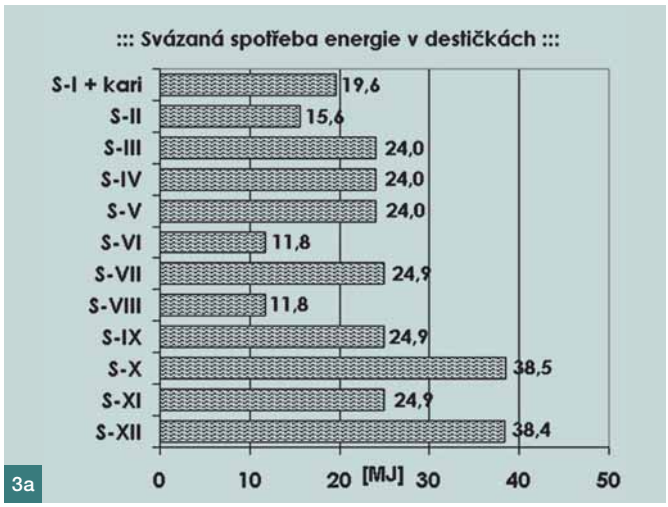
Tab. 2 Environmentální parametry vybraných vláknobetonů použité v analýze ▮ Tab. 2 Environmental parameters of selected fibre concretes used in the analysis

Materiál	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Svázaná energie [MJ/kg]	Svázané emise $CO_{2,ekviv.}$ [kg $CO_{2,ekviv.}$/kg]	Svázané emise $SO_{2,ekviv.}$ [g $SO_{2,ekviv.}$/kg]
Beton				
Beton C30/37	2 380	0,766	0,120	0,266
Beton C50/60	2 440	0,881	0,143	0,306
HPC 105 Fibrex A1	2 498	1,903	0,189	0,556
HPC 140 Stratec 0,15/13	2 393	3,046	0,240	0,839
UHPC 180 Kassel	2 424	3,029	0,241	0,834
Ocel				
Betonářská ocel	7 850	22,70	0,935	5,67

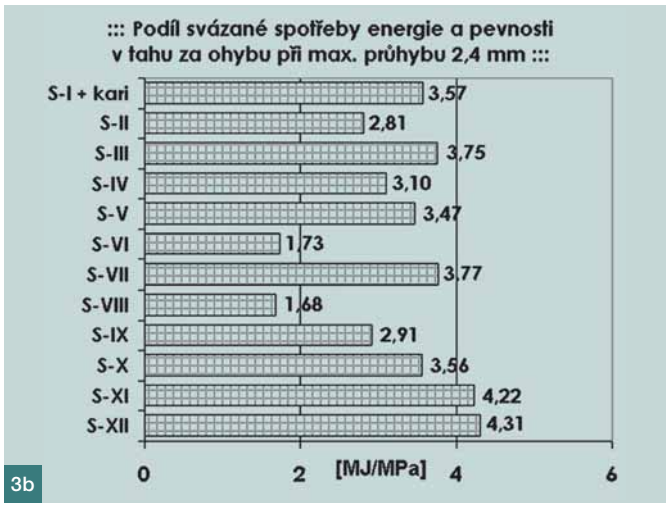
Environmentální vyhodnocení destiček

Při environmentálním porovnávání alternativ desek z různých směsí betonů (S-I až S-XII, tab. 1) byly sledovány hodnoty svázané spotřeby energie a svázaných emisí $CO_{2,ekviv.}$ a $SO_{2,ekviv.}$ v jednotlivých deskách. Environmentální parametry vysokohodnotných silikátových materiálů byly stanoveny výpočtem. Pro výpočet byla využitá zdrojová data [1], [2] a [3]. Hodnoty svázané spotřeby energie a svázaných emisí byly získány výpočtem z dat pro prostý beton C50/60 dle [1], data pro jednotlivé druhy vláken [2] a rozdíl v kvalitě a množství cementu jednotlivých druhů vysokohodnotných betonů byl dopočítán dle [3].

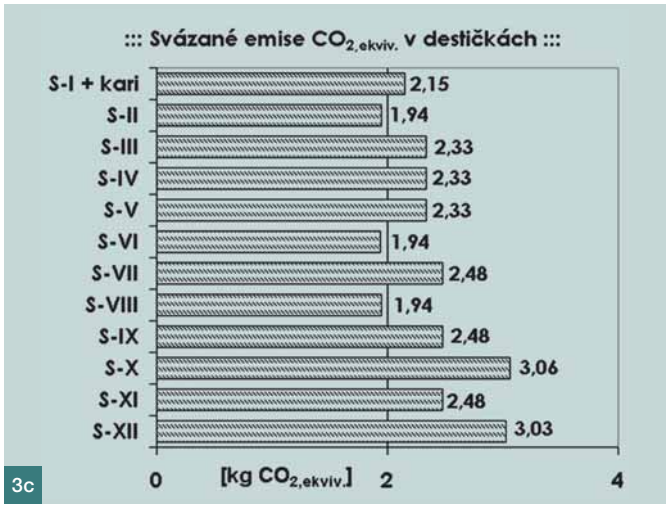
V případě porovnávaných druhů betonů pro jednotlivé stropní desky byl v prováděných analýzách pro výpočet použit jednotný postup zohledňující použití plastifikátorů a rozdílných druhů cementů, spolu s novějšími daty z let 2008 a 2009. Analýza souboru dat ze zahraničních



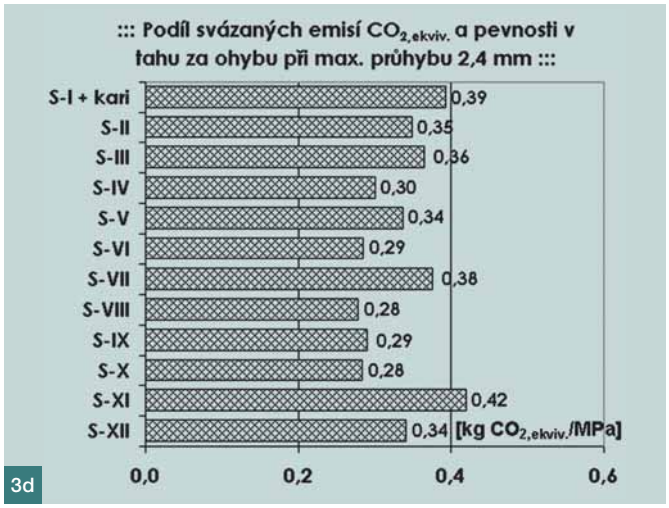
3a



3b



3c



3d

zdrojů ukázala značný rozptyl deklarovaných parametrů, a proto byla věnována pozornost upřesnění vstupních dat pro v našich podmínkách nejčastěji používané betony a pro nové druhy vysokohodnotných betonů ověřovaných na FSv ČVUT v Praze. Environmentální parametry jednotlivých vybraných materiálů použitých v provedených analýzách jsou uvedeny v tab. 2.

Environmentální efektivita využití materiálu (*EE*) je nepřímo úměrná podílu environmentálního dopadu (*EI*) na jednotku výkonu (*P*): $EE = (EI/P)^{-1}$. Čím menší je množství environmentálního dopadu na jednotku výkonu, tím je větší environmentální efektivita využití materiálu z hlediska posuzovaného environmentálního dopadu.

V případě posuzovaných desek byl pro vybrané environmentální dopady (svázaná spotřeba energie, svázané emise $CO_{2,ekviv.}$, svázané emise $SO_{2,ekviv.}$) vyčíslen jejich podíl s experimentálně dosaženou pevností v tahu za ohybu (která je úměrná únosnosti desky – tj. jejímu mechanickému výkonu). Na obr. 3 jsou znázorněny porovnávací grafy pro dva vybrané posuzované environmentální dopady (svázaná spotřeba energie, svázané emise $CO_{2,ekviv.}$) – vlevo absolutní hodnoty dopadů, vpravo podíl dopadu a pevnosti v tahu za ohybu při mezním průhybu *L*/250. Např. pro případ svázané energie vyjadřují grafy množství svázané energie [MJ] potřebné pro dosažení pevnosti 1 MPa v tahu za ohybu pro jednotlivé porovnávané typy betonů.

Z grafů je dobře patrná vyšší environmentální efektivita desky z UHPC, která dopadla výrazně lépe než všechny ostatní desky z vláknobetonů při uvažování max. dosažených pevností, přestože množství produkovaných emisí a spotřeby energie na 1 kg je horší než u ostatních ověřovaných směsí vláknobetonů. Při uvažování pevnosti při mezním průhybu *L*/250 již není environmentální efektivita pro tento typ konstrukce tak výrazná. Nicméně deska z prostého betonu vyztužená sítí dopadla oproti většině desek z vláknobetonů díky svázaným emisím a energii v oceli konvenční výztuže hůře.

Nutno poznamenat, že uvedené zhodnocení environmentální efektivity je relevantní pouze v případech, kdy lze v maximální míře využít funkčního (v tomto případě mechanického) výkonu.

VELKOFORMÁTOVÉ ZKOUŠKY

Příprava vzorků

Na základě výsledků mechanických zkoušek tenkých destiček a zpracovatelnosti byla vybrána HPC směs S-IX pro výrobu první série výseků kazetové konstrukce (dále v textu směs označována jako HPC 105). Použitá ocelová vlákna Fibrex A1 jsou 25 mm dlouhá a mají pevnost v tahu 350 MPa. Do směsi bylo zamícháno 1 obj. % těchto vláken.

Druhá série segmentů byla vyrobena z jemnozrnné směsi s ocelovými mikrovlákny Stratec 0,15 13 mm dlouhými, s pevností v tahu 2 400 MPa (dále v textu směs nazývána HPC 140). Složení jednotlivých směsí je uvedeno v tab. 3.

Zkušební vzorky měly rozměry: tloušťka horní desky 30 mm, žebra 50 až 70 × 170 mm, velikost výseku kazetové stropní desky byla 1,2 × 1,25 m (obr. 4). Žebra byla

4

5

6

7

vyztužena výztuží profilu R10. Vzorky neobsahovaly žádnou konvenční smykovou a torzní výztuž. Celkem byly vyrobeny tři vzorky ve tvaru výseku kazetové konstrukce (obr. 5) spolu s doprovodnými tělesy – krychle na zkoušení pevnosti v tlaku, trámce na zkoušení modulu pružnosti v tlaku.

Jemnozrnná směs s ocelovými mikrovlákny měla výrazně lepší zpracovatelnost než směs s 25 mm dlouhými ocelovými vlákny a umožňovala v podstatě odlití vzorku.

Mechanické zkoušky segmentů kazetové konstrukce

Pevnost v tlaku byla zkoušena na krychlích o hraně 150 mm. Vzorky s vlákny Fibrex A1 měly průměrnou pevnost v tlaku 105 MPa. Použitím pevnějšího kameniva, v tomto případě basaltu, byla dosažena vyšší pevnost, než je udávána u S-IX (tab. 1). Na krychlích z jemnozrnného betonu HPC 140 byla naměřena pevnost v tlaku 140 MPa. Kontrolní zkoušky pevnosti v tlaku provedené na trámečkách 40 × 40 × 160 mm dokonce vykázaly pevnost 180 MPa.

Zkušební tělesa (výsek kazetové konstrukce) byla zatěžována kombinací ohybu a kroucení. Umístění válců je patrné z obr. 6.

Postup zatěžování byl navržen s ohledem na výsledky výpočtu. Nejdříve bylo vneseno kroucení dvěma krajními válci. Zatěžovalo se v krocích po 1 kN s následným odlehčením na 1 kN. Při dosažení síly 10 kN v krajních válcích se začalo zatěžovat středním válcem, který vyvolával ohyb. Zatěžovalo se v krocích po 5 kN s odlehčováním na 1 kN až do porušení vzorku. Síla v krajních válcích se neměnila.

Všechny tři zkoušené vzorky HPC 105 přenesly cca 65 kN vyvolaných prostředním válcem a 10 kN od krajních válců. První trhlina se vždy objevila u křížení žeber u krajního horního válce. Vrchní tenká deska zůstala bez viditelných trhlin až do porušení segmentu.

Maximální ohybová síla HPC 140 vzorků byla 85 kN plus 10 kN v kroucení.

Naměřené hodnoty jsou u HPC 105 cca 1,5krát vyšší než spočítané podle EC1, pro HPC 140 cca 1,9krát vyšší. Měření ukázalo výrazně menší průhyb HPC 140 vzorků.

Environmentální vyhodnocení

Zkoušené kazetové konstrukce ze směsí HPC 105 a HPC 140 byly porovnávány s plnou železobetonovou deskou z betonu C30/37 a s kazetovou konstrukcí ze stejného betonu C30/37. Všechny tři varianty byly navrženy za stejných okrajových podmínek – stálé zatížení 4 kN/m^2, užitné zatížení 1,5 kN/m^2, rozpětí stropní desky 5 x 5 m, tloušťka konstrukce 200 mm. Kazetová konstrukce z betonu C30/37 měla horní desku tloušťky 60 mm, žebro 80/140 mm. Pro hodnocení železobetonové a vláknobetonových variant byla použita data pro beton, vláknobetony a betonářskou ocel uvedené v tab. 2.

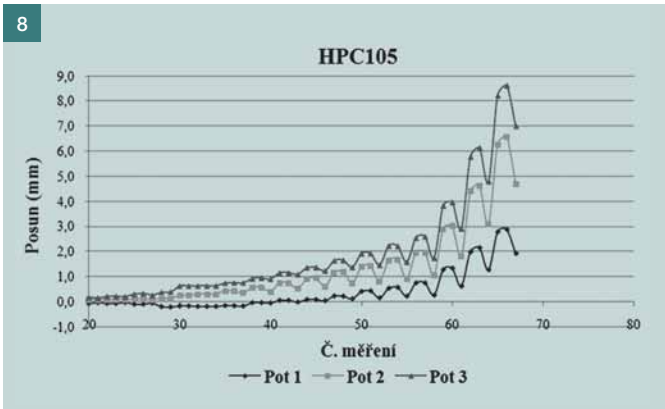
Jednotlivé environmentální dopady (svázaná spotřeba energie, svázané emise $CO_{2,ekviv.}$, svázané emise $SO_{2,ekviv.}$) a plošná hmotnost jednotlivých variant jsou v relativních hodnotách vyčísleny v grafu na obr. 10. Za referenční (100 %) byla zvolena varianta plné železobetonové stropní desky.

Z grafu je zřejmé, že kazetová deska je z hlediska hodnocených environmentálních kritérií výhodnější než referenční plná železobetonová deska. Využitím výhodného tvaru kazetové konstrukce lze snížit hmotnost konstrukce až o 50 % v porovnání s plnou železobetonovou deskou, dalších 20 % lze uspořit využitím vysokopevnostního vláknobetonu.

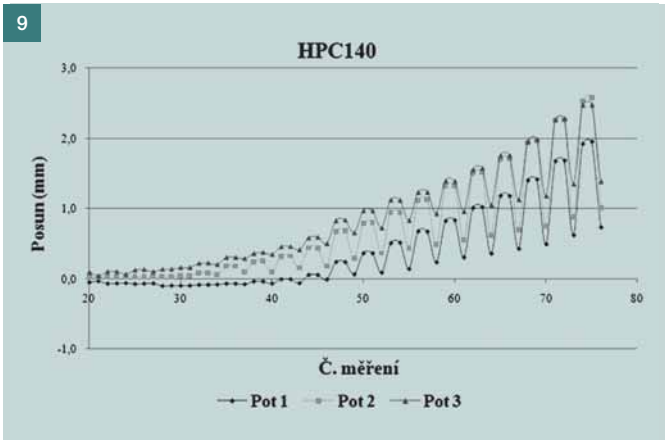
Další environmentální i ekonomické výhody souvisí především

- se snížením spotřeby primárních neobnovitelných surovin (úspora betonu a jeho složek – kameniva, cementu aj.),

8



9



Obr. 4 Forma s osazenou výztuží ▮ Fig. 4 Formwork with steel reinforcement

Obr. 5 Betonáž zkušebního vzorku ▮ Fig. 5 Concreting of test specimen

Obr. 6 Umístění válců při zatěžovací zkoušce ▮ Fig. 6 Position jacks in loading test

Obr. 7 Pohled na zkušební těleso zdola ▮ Fig. 7 Bottom view on the test specimen

Obr. 8, 9 Průběh posunů při zatěžovací zkoušce HPC 105 a HPC 140 ▮ Fig. 8, 9 Displacement development by loading test HPC 105 and HPC 140

Obr. 10 Relativní porovnání environmentálních dat ▮ Fig. 10 Relative comparison of environmental parameters

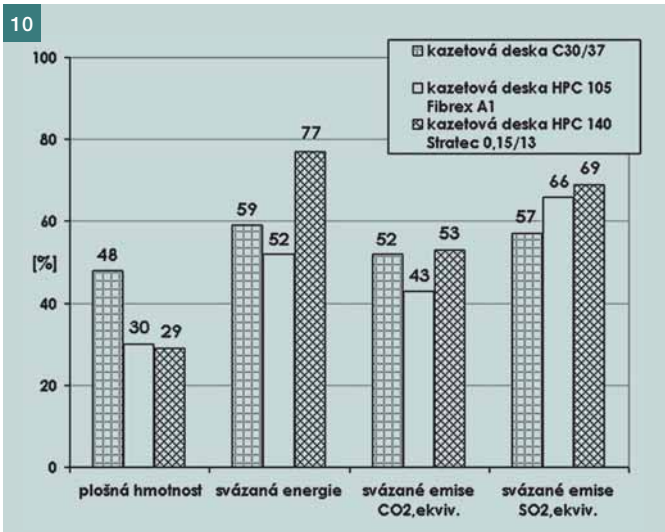
- se snížením nároků na dopravu a manipulaci materiálů (menší množství betonu),
- s úsporami v podporujících konstrukcích,
- s větší trvanlivostí konstrukcí z HPC v rámci celého životního cyklu.

ZÁVĚR

Na základě analýzy a optimalizace skladby byl odladěn vlastní kompozit z lokálních surovinových zdrojů o pevnostech v tlaku dosahujících 140 MPa. Kompozit byl aplikován v rámci experimentálního návrhu a optimalizace tvaru a vyztužení kazetové stropní konstrukce (horní deska tloušťka 30 mm bez konvenční výztuže, subtilní žebra bez smykové výztuže) s redukovanou spotřebou konstrukčních materiálů.

Experimentální ověření reprezentativních výseků kazetové desky prokázalo velmi dobré mechanické vlastnosti. Porovnání environmentálního profilu navrženého konstrukčního řešení kazetové desky s běžně užívanými konstrukcemi v rámci LCA analýzy jasně prokázalo potenciál navrženého přístupu z hlediska dlouhodobého zajištění vysoce kvalitních funkčních vlastností i z hlediska redukce dopadů na životní prostředí v rámci požadavků na splnění kritérií udržitelnosti [4]. Širší uplatnění vysokohodnotných betonů však bude vyžadovat legislativní podporu v rámci technických norem a předpisů, stanovujících podmínky pro jejich použití.

10



Tab. 3 Složení použitých vláknobetonů HPC 105 a HPC 140 ▮ Tab. 3 Mixture of the used fibre concretes HPC 105 and HPC 140

HPC 105	[kg/m³]
Kamenivo 0-4	925
Basalt 4-8	830
CEM I 42,5R	480
Mikrosilika	24
Superplastifikátor	8,8
Voda	150
Vlákna Fibrex A1	80

HPC 140	[kg/m³]
Písek 01/06	985
Křemenná moučka	179
CEM I 52,5R	717
Mikrosilika	225
Superplastifikátor	32,6
Voda	176
Stratec 0,15/13	80

Literatura:
[1] *www.bauteilkatalog.ch*, 2009
[2] *Waltjen T.:* Passivhaus-Bauteilkatalog 2008 – Ökologisch bewertete Konstruktionen, Springer-Verlag, Wien, 2008, ISBN 978-3-211-29763-6
[3] *Schießl P., Stengel T.:* Der kumulierte Energieaufwand ausgewählter Baustoffe für die ökologische Bewetung von Betonbauteilen, Wissenschatl. Kurzbericht Nr.13,2007
[4] *Hájek P., Fiala C., Kynčlová M.:* Utilization of high performance concrete in the design of sustainable buildings, In proc. Sustainable Building – Affordable to All, SB10, Portugal, 2010

Tento výsledek byl získán za finančního přispění Grantové agentury ČR – grant GAČR, projekt 103/07/0400 a 103/08/1658.

Prof. Ing. Petr Hájek, CSc.
e-mail: petr.hajek@fsv.cvut.cz

Ing. Magdaléna Kynčlová
e-mail: magdalena.kynclova@fsv.cvut.cz

Ing. Ctislav Fiala
e-mail: ctislav.fiala@fsv.cvut.cz

všichni: Katedra konstrukcí pozemních staveb
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6