

REÁLNÁ APLIKACE UHPFRC V NOSNÝCH KONSTRUKCÍCH MOSTŮ A VÝSLEDKY KONTROLNÍCH ZKOUŠEK

Jan Marek, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
jan.marek.2@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Príspevok shrnuje nové aplikace materiálu UHPC (Ultra High Performance Concrete) přesněji UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete), které se podařilo v roce 2018 zrealizovat. Jedná se o tři unikátní lávky pro pěší a dále použití ztraceného bednění na ocelových mostech se spřaženou betonovou mostovkou. Všechny tyto konstrukce si zaslouží pozornost nejen odborné veřejnosti.

Príspevok zejména srovnává sady výsledků kontrolních zkoušek na různých zkušebních tělesech a v různých formách, které všechny doprovázely reálnou průmyslovou výrobou.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPFRC = ultra vysoko hodnotný beton s vlákny • prefabrikované dílce • rozměrový efekt • kontrolní zkoušky • reálná průmyslová aplikace

ABSTRACT

This article deals with new UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) bridges produced or constructed in 2018. The paper includes a short description of 3 unique pedestrian bridges with load bearing structure made of UHPFRC and 2 steel bridges with lost formwork for bridge decks and cornices made of UHPFRC slabs. All these structures are worth of the attention of bridge experts and community of concrete specialists.

Focus is given on the testing of the material, the comparison of test specimens and summary of results from UHPFRC production in real industrial volume of cubic meters.

KEYWORDS

UHPFRC=Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete • Precast Elements • Size Effect • Control Testing • Real Industrial Production

1. O MATERIÁLU UHPC

UHPC, Ultra High Performance Concrete, v češtině se obvykle užívá pojmu ultra vysokohodnotný beton. Jde o inovativní cementový kompozitní materiál, který je dalším stupněm ve vývoji betonových směsí. Tento materiál se vyznačuje velmi vysokými hodnotami mechanických vlastností a chemickou

stabilitou a odolností. Jedná se o betony, tedy kompozity využívající principu plniva obvykle tvořeného kamenivem a dalšími jemnými složkami a pojiva, cementu, a případně dalších reaktivních komponent.

Velmi vysoké pevnosti a dalších mechanických vlastností, je dosaženo díky až extrémně nízké porositě finální matrice a dalších mikrostrukturních parametrů. V literatuře se obvykle uvádějí pevnosti v tlaku větší než 150 MPa, v praxi se v současnosti dosahuje pevností až 200 MPa, laboratorně však dokonce pevností až 400 – 800 MPa.

Neexistence předpisů či norem, které by popisovaly průmyslové použití takových materiálů, vytváří prostředí s otázkami typu co konkrétně znamená pevnost v tlaku 150 MPa, jaká zkušební tělesa používat, jak interpretovat výsledky zkoušek, jak stanovit návrhové parametry konstrukcí atp.

Většina současného výzkumu a vývoje na poli betonových materiálů i konstrukcí se UHPC zabývá, proto autor dále podrobněji nepopisuje detaily složení, parametrů vstupních materiálů, postupů míchání ani ošetřování, ale věnuje se zejména problému aplikace UHPC do konstrukcí v průmyslovém měřítku.

2. VÝROBA V PRŮMYSLOVÉM MĚŘÍTKU

Pro reálné použití UHPC pro praktické konstrukce je zcela zásadní jak receptury směsí, navržené a vyzkoušené v laboratorním měřítku, aplikovat v měřítku průmyslového prostředí.

Dále jak jednotlivé výrobky spolehlivě a opakovaně odlévat do forem a z nich vyjímat, a po odlití a i po vynětí z formy ošetřovat. S tím je spojená otázka manipulace s prvky a manipulačních úchytů nebo montáže a spojování. Současně také používání zkušebních těles pro kontrolní zkoušky kvality výroby a zkušební normy celkově nejsou pro UHPC připraveny.

V současné průmyslové výrobě betonu jsou využívány systémy stacionárních, výjimečně pak mobilních betonáren renomovaných výrobců. Tyto stacionární betonárny nejsou ve stávajícím stavu použitelné pro UHPC. Překážkami jsou zejména počet jednotlivých složek směsí, dále přesnost dávkování těchto složek a vlastní chování směsi při míchání a dávkování vláken, a také celkový objem, nepoužitelný pro malé záměsi.

* Školitel: prof. Ing. Vladimír Křístek, DrSc.

Přerod míchání UHPC z laboratorního měřítka v množství desítek litrů směsi na průmyslové měřítko v desítkách kubických metrů není snadným a dostupným technologickým krokem a vyžaduje mimo jiné dlouhou dobu intenzivního zkoušení a aplikovaného výzkumu.

3. HISTORIE PRŮMYSLOVÉHO POUŽITÍ V ČR

Průmyslové použití UHPC pro mostní konstrukce v ČR začalo první aplikací do desek ztraceného bednění na mostě v Benátkách nad Jizerou. Zde byly vyráběny dílce v objemech desítek až stovek litrů.

Další menší dílce vyráběla Skanska a.s. v závodě Štětí, byly určeny pro fasády administrativního objektu ve Švédském Malmö, objemy zhotovovaných prvků byly obdobné, maximálně do stovky litrů.

Dosud největší dílce vyrobené v České republice v jednom kuse byly segmenty lávky Čelákovice, kde byla na jeden záběr zhotovena betonáž o objemu 3,8 m³ (výrobce Metrostav, UHPC dodala společnost TBG Metrostav), dále pak objemem srovnatelná lávka přes Opatovický kanál v Čeperci, kde byla betonáž 4,0 m³, kterou zhotovila Prefa ve Štětí.

4. SOUČASNOST PRŮMYSLOVÉHO POUŽITÍ

Společnost KŠ PREFA s.r.o., nástupce firmy Skanska a.s. v prefě ve Štětí řeší ve spolupráci s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze a projekční kanceláří Pontex s.r.o. dotační projekt TAČR Epsilon, jehož jedním z cílů je zavést výrobu prefabrikátů z UHPC do průmyslového prostředí a zejména do průmyslového měřítka.

V roce 2017 byly upravovány betonárny a zkoušeny směsi, současně byly připravovány komerční projekty, které stavěly na vyvíjené technologii výroby UHPC.

Rok 2018 se stal mezníkem pro použití UHPC v mostním stavitelství v ČR. Byly vytvořeny a namontovány konstrukce lávek v Táboře, Příboře a Kladně Vrapicích, dále byly vyrobeny a použity desky ztraceného bednění a lícni prefabrikáty na mostech v Přerově. Jde o použití UHPFRC jako konstrukčního materiálu v běžném průmyslovém měřítku.

Prefabrikáty byly vyrobeny z UHPC třídy C110/130 XC4+XD3+XF4, s požadovanými parametry:

- tahová pevnost při vzniku trhliny – průměrná min. 18 MPa, jediný vzorek min. 15 MPa

- třída reziduální pevnosti min: $0.7 < f_{R3K}/f_{R1K}$.

Průkazní i kontrolní zkoušky prokázaly kvalitu používané receptury, v jednotlivých tabulkách dále jsou patrné vlivy rozměrového efektu (size effectu) zkušebních těles.

Objemy materiálu v konkrétních číslech byly 12 m³ lávka v Táboře, 32 m³ lávka v Příboře, 2 m³ lávka v Kladně - Vrapicích a cca 25 m³ pro mosty v Přerově.

V součtu jde o více než 70 m³ prefabrikovaných dílců z UHPFRC o hmotnosti cca 175 tun.

4.1. Lávka v městě Příboře

Lávka přes řeku Lubinu v městě Příboře se se svou stavební výškou 0,8 m při rozpětí nosné konstrukce 35,5 m blíží poměru 1:45, pro trémový betonový most to jistě svědčí o odvaze projektanta využít materiál UHPFRC a dodržet návrhy a představy architekta. Současně jde o ojedinělou aplikaci vodotěsných spojek chrániček předpětí a zejména použití přímo pochozího povrchu nosné konstrukce.

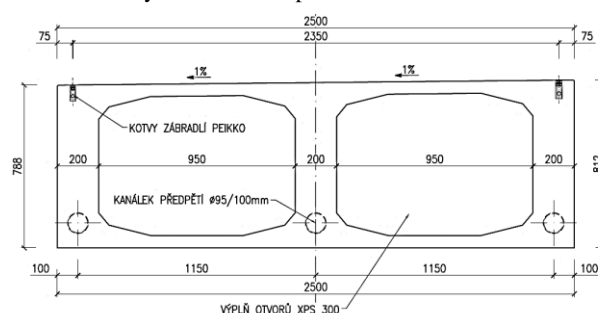
Tato unikátní konstrukce lávky obdélníkového průřezu, viz obrázek 1, s nerezový zábradlím s integrovaným osvětlením, přímo pochozím povrchem splňuje vysoké estetické nároky architekta a plní zadání vítěze architektonické soutěže.

Nosná konstrukce je tvořena z 5 segmentů spojených zainjektovanými předpínacími lany typu monostrand vedenými ve třech vnitřních stěnách v parabolických chráničkách, s využitím speciálních vodotěsných spojek. Segmenty byly vyráběny kontinuálně jako vzájemné otisky a slepovány epoxidovou maltou.

Postupně byly provedeny zkušební betonáže o objemu 1,0 - 2,0 m³ jako zkoušky technologie a také pro zjištění vývinu hydratačního tepla. Následně byly vytvořeny 2 pokusné segmenty pro lávku o objemu v součtu 7,8 m³. Jednalo se o upravený koncový segment lávky, který byl rozdělen na díly o poloviční délce. Tento objem betonáže 7,8 m³ najednou znamenal potřebu upravit betonárku, přesně naplánovat dobu míchání, upravit recepturu a postup míchání a dodržet potřebnou koordinaci betonážních prací.

Tato úspěšná betonáž znamenala v té chvíli v ČR rekordní objem UHPC namíchaný během jedné betonáže a uložený do formy v jednom záběru. Opakovaná výroba potvrdila správnost postupu míchání a ukládání a bylo vytvořeno 5 segmentů o objemech 2 x 7,8 a 3 x 5,4 m³.

Lávka byla uvedena do provozu na konci roku 2018.



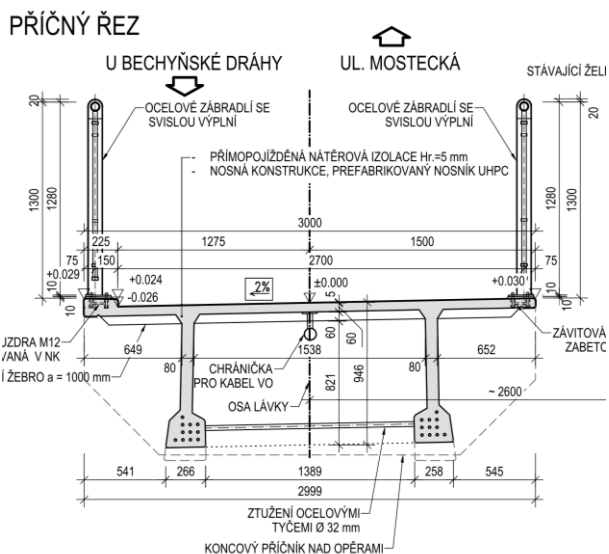
Obrázek 1: Schéma příčného řezu segmentu lávky v Příboře

4.2. Lávka v Táboře

Lávka je koncipována pro pěší i cyklisty a bezprostředně navazuje na přístupové cesty a je situována v těsné blízkosti železničního mostu ve vzdálenosti 1,1 m.

Nosná konstrukce je tvořena z předem předpjatého nosníku tvaru TT, s jedním prostým polem o rozpětí 27,00 m. NK je navržena na zatížení dopravou dle ČSN EN 1991-2 a dle Metodiky pro navrhování prvků z UHPC, Kloknerův ústav ČVUT, 2015 (dále jen Metodika). Zatížení chodci je uvažováno rovnoměrným zatížením 5 kN/m². Na lávce je dle požadavku správce uvažováno se zatížením obslužným vozidlem o celkové hmotnosti 3,5t s uvažováním dynamického součinitele $\delta = 1,10$.

Jako mimořádné zatížení je uvažován model zatížení 12t vozidla dle ČSN EN 1991-2. Příčný řez vizte na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma příčného řezu lávky v Táboře

Betonáž prefabrikovaného dílce z UHPC o objemu 12 m³ je v Evropě ojedinělou záležitostí.

Po zkouškách a úspěšných aplikacích betonáží segmentů pro Lávkou v Příboře, které jsou popsány výše, bylo učiněno rozhodnutí zabetonovat lávku v Táboře v jednom záběru o objemu 12 m³.

To vyžadovalo detailní přípravu formy, postupu zamíchání a zejména koordinace míchání a ukládání čerstvé směsi. Betonáž samotná byla provedena v čase menším než 2 hodiny. Vlastní směs UHPC byla upravena tak aby po celou dobu udržela dostatečnou zpracovatelnost. Betonáž byla naplánována a zkoordinována tak, aby nedošlo k přerušení ukládání čerstvé směsi na více jak několik jednotek minut, aby nedošlo ke vzniku nechtěné pracovní spáry. Tato rekordní betonáž se bez větších problémů podařila a výsledný prefabrikát je bez jakýchkoli povrchových vad, kaveren či nedostatků, je namontován a uveden do provozu.

Byla potvrzena schopnost prefy ve Štětí ve spolupráci s partnery z Kloknerova ústavu a s projektanty z Pontexu navrhnut, zamíchat a odlít, namontovat a úspěšně aplikovat lávku o rozpětí cca 29 metrů a objemu nosné konstrukce 12 m³ z UHPFRC. Jedná se o potvrzení možnosti uplatnění tohoto materiálu ve skutečném průmyslovém měřítku, o rekordní počín, mezník v uplatnění UHPFRC pro dopravní stavby. Dokončenou konstrukci vizte na obrázku 3.

4.3. Lávka v Kladně - Vrapicích

Lávka pro pěší s příčným řezem tvaru U, na rozpětí 10 m, světlé šířky 1,50 m. Nosná konstrukce je tvořena prostorově zakřiveným nosníkem (výškově i půdorysně) z UHPFRC bez použití konvenční výztuže. Tloušťka skořepinové konstrukce osciluje v intervalu 30-45 mm, objem materiálu cca 1,8 m³.

Lávka byla odlita v jednom záběru. Z důvodu komplikovaného tvaru prvku bylo nezbytné teoretické analýzy ověřovat testováním na menších vzorcích. Nejprve byl odlit zkušební segment, poté odlita první lávka. Na ní byla ověřena možnost provedení a statickou zkouškou kalibrován návrhový model. Na základě výsledku betonáže a statické zkoušky byly provedeny dílčí úpravy tvaru a byla vybetonována druhá, konečná verze lávky. Tato lávka byla instalována v části města Kladna Vrapice v listopadu 2018. První lávka byla znehodnocena statickou zatěžovací zkouškou, je vystavena jako experimentální prototyp v provozovně KŠ PREFA Štětí. Druhá lávka byla darována Městu Kladno, tak aby její potenciál mohl být ověřen skutečným provozem chodců.

Lávka v Kladně Vrapicích podle návrhu architektů Ondřeje Císlera a Petra Teje je unikátní konstrukční řešení betonového nosníku se skořepinovým působením bez použití konvenční výztuže. I přes malé rozměry jde o přelomový experimentální výrobek technicky srovnatelný se špičkovými světovými konstrukcemi. Dokončenou konstrukci vizte na obrázku 3.



Obrázek 3: Dokončená lávka v Kladně - Vrapicích

4.4. Mosty přes SŽDC v Přerově

Oba mosty překračují prostory železničních tratí Přerov – Bohumín a Česká Třebová – Přerov. NK tvoří dva ocelové plnostěnné parapetní svařované nosníky spojené svařovanými příčníky, které byly zabetonovány do spřahující desky mostovky. Na pravé straně mostů jsou zvenku příčné konzoly a na nich vybetonována spřahující deska tvořící chodník. Pro bednění spodního povrchu spřahované desky byly použity desky ztraceného bednění z UHPFRC. Tloušťka spřahující desky mostovky je proměnná 220–400 mm. Spřahující deska chodníku má tloušťku 190 mm.



Obrázek 4: UHPFRC desky ztraceného bednění říms a mostovky

UHPFRC desky jsou uloženy na přírubách ocelových nosníků na rozpětí cca 1,7 m. Pro uložení je na konci desek vytvořen ozub hloubky 15 mm. Rozměr desek je standardně 1800 x 1000 mm. Tloušťka bednicích desek je 60 mm pro bednění spřahující desky mostovky a 50 mm pro chodníkovou část. Spodní povrch desek je hladký bedněný a horní povrch je zdrsňený. Osazené prefabrikáty ztraceného bednění vizte na obrázku 4.

Licní prefabrikáty mají standardně délku 1990 mm a výšku 600 mm; tloušťka prvku je 50 mm. Prefabrikát je na rubové části vybaven 4 ks závitových pouzder z nerezové oceli pro připevnění prefabrikátu k ocelové konstrukci mostu.

5. MATERIÁLOVÉ ZKOUŠENÍ

5.1. Materiál

UHPFRC použité receptury pro sériovou výrobu je výrobní tajemství výrobce, ale je možno říci, že jde o běžně známé složení křemičitých písků, mouček, mikrosiliky, cementu a plastifikátoru (polykarboxylátu), s několika zvláštními přísadami a zejména se speciálním postupem míchání. Směs je vyztužena 1,5% ocelových drátků výrobce Krampe-Harex.

Průkazní zkouška tohoto kompozitu je nastavena na pevnostní třídu C110 /130, XA1, XC1-74, XD1-3, XF1-4. Pevnostní třída je nastavena pro maximální třídu dle ČSN EN 206+A1.

5.2. Kontrolní zkoušky

V průběhu všech betonáží UHPC byly odebírány vzorky v rozsahu průkazních zkoušek dle jediného platného normativního dokumentu, tedy Metodiky. Ne všechny výsledky jsou zde prezentovány, je zde vybráno jen cca 250 výsledků materiálových zkoušek na různých tělesech a to z 6 betonáží vždy zkoušeno po 28 dnech.

Byly zkoušeny moduly pružnosti na válcích 150x300 mm, pevnosti v tlaku na stejných válcích, na krychlích o hraně 100 mm a 150 mm a na zlomcích trámečků 40x40x160 mm.

5.3. Metody

Byly používány metody zkoušení i odběru vzorků v souladu s platnými normami pro zkoušení standardních betonů, pro trámečky 40x40x160 bylo použito normy pro zkoušení cementových trámečků.

Vlastní výsledky není podle čeho interpretovat, metodika v ČR neexistuje, bylo by možno použít smluvní dokumentaci ze Systému jakosti pozemních komunikací TP226, ale její platnost je omezena třídou C 90/105.

Všechny prezentované zkoušky pevnosti jsou zkoušeny na jednom zkušebním lisu, tedy nejsou zatíženy chybou zařízení nebo vlivem různých laboratoří. Byly zkoušeny v laboratoři s odbornou způsobilostí ve Štětí.

Všechna zkušební tělesa byla ošetřována ve vodě s laboratorní teplotou. Moduly pružnosti byly zkoušeny v laboratořích Kloknerova ústavu.

6. VÝSLEDKY

6.1. Moduly pružnosti

Moduly pružnosti jsou uvedeny pouze pro informaci, je vhodné je sledovat zejména jako jeden z návrhových parametrů, u kterého je vždy vhodné znát co nejpřesnější reálnou hodnotu, a nelze ji prakticky spolehlivě najít v žádné normě. Naměřené minimum bylo po 28 dnech 44,6 GPa, maximum 51 GPa, průměr 47,8 GPa, procentní rozptyl všech vzorků +-7%.

6.2. Pevnosti

Pevnost v tlaku na krychlích 150x150x150 mm byla srovnávána s pevnostmi na krychlích 100x100x100 mm a dále s pevnostmi na zlomcích trámečků 40x40x160 mm. Tato zkušební tělesa jsou volena z několika důvodů.

Štíhlé části konstrukcí, obvykle nevyztužené desky nebo stěny, mají v našem případě zpravidla tloušťku 50 - 60 mm. Zkušební tělesa nejmenších rozměrů 150 nebo 100 mm se nezdaří autorovi věrohodná pro popis vlastností takových konstrukcí nebo jejich částí.

Praktickým důvodem je, že běžně používané zkušební lisy v současné době nemají kapacitu pro zkoušení 150 mm krychlí s pevnostmi nad 130 MPa. (síla lisu nad 3 MN).

Naprotitomu nejběžnější lis s kapacitou 2 MN zvládá pevnosti až 180 MPa, ale na krychlích s hranou 100mm.

Dalším faktem, který soustavně pozorujeme při zkoušení naší receptury, je, že porušení krychle s hranou 150 mm, která je vyztužená ocelovými drátky, vykazuje značné odchylky od správného normového porušení zkušební krychle z prostého betonu. UHPFRC krychle s hranou 150 mm se stejně jako u běžného betonu porušuje defacto příčným tahem, kdy napětí v tlaku přesahující tlakovou pevnost způsobí příčnou deformaci a tahové příčné porušení. V případě UHPFRC ale následuje aktivace většího množství drátků, objeví se množství lomových ploch a krychle je po viditelné příčné deformaci stále možno zatěžovat a síla stále roste.

Naměřená pevnost je tak z větší části v rukách zkušebního technika nebo případně v nastavení zkušebního stroje. Je takové

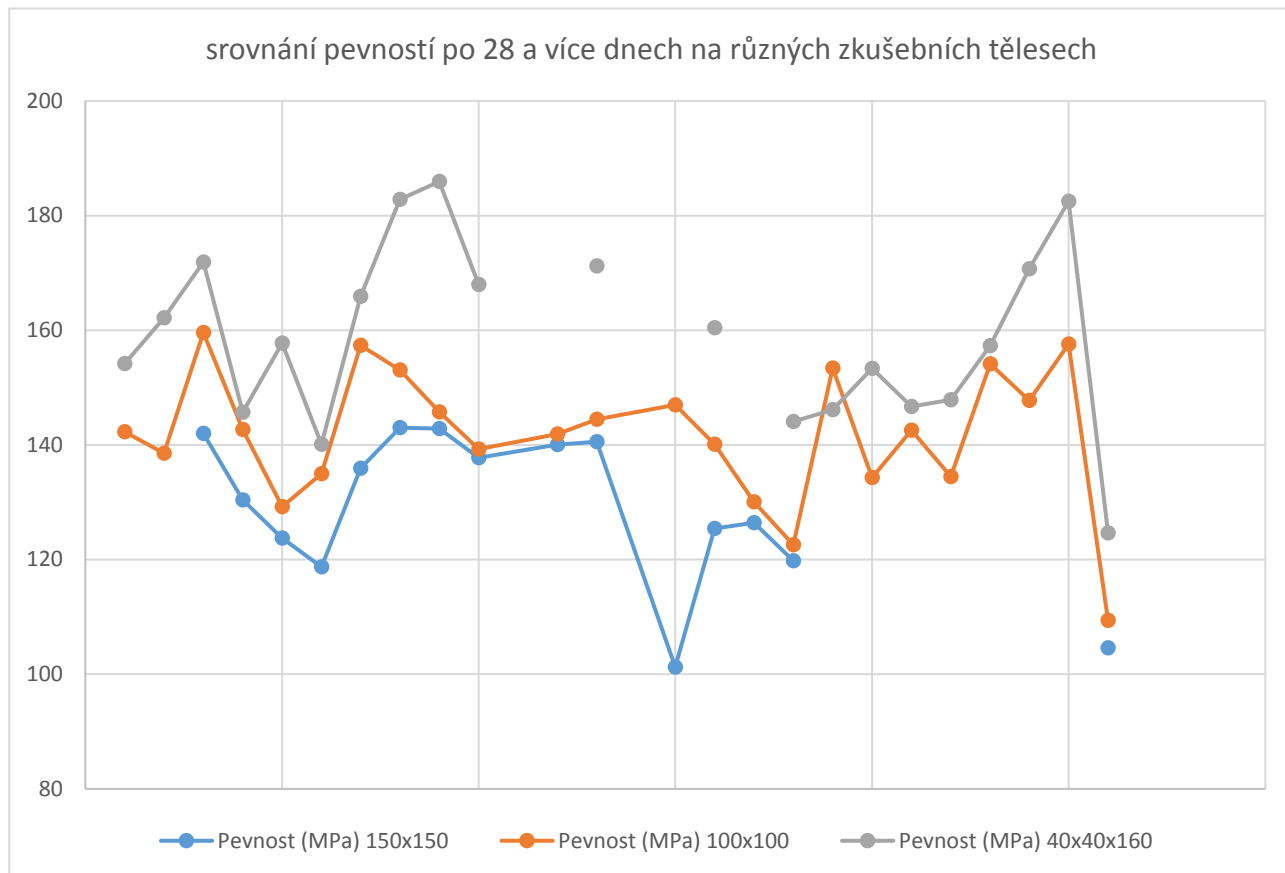
chování zkušebního tělesa věrohodným obrazem zkoušeného materiálu?

U těles menších, jakými jsou krychle s hranou 100 mm nebo zlomek trámečku s hranou 40 mm, tento jev nepozorujeme.

Dle platného předpisu, Metodiky, jsou referenční tělesa válce 150x300, případně krychle 150mm.

Do další analýzy výsledků jsou zahrnuty i výsledky, které vybočily z očekávaných řad, i ty, které vykazují nenormové porušení zkušebních těles. Proto je minimální naměřená 28 denní pevnost 101,3 MPa (zd nejde o průměr ze 3 těles) na krychli 150 mm, maximální potom 185,9 MPa na zlomku trámečku 40x40x160 mm.

Na grafu níže jsou zaneseny pevnosti po 28 dnech (v ojedinělých případech i více) tak, aby bylo možno graficky znázornit rozměrový efekt (size effect) zkušebních těles. Ne ve všech případech jsou k dispozici všechny varianty všech tří těles. Každý bod na grafu je minimálně trojice zkušebních těles, tedy je použit aritmetický průměr, a reprezentuje výsledky z reálných záměsí pro reálné použití konstrukcí.



Obrázek 5 : grafické znázornění size efektu při zkouškách 28 denních pevností na různých tělesech

7. DISKUZE

Z prezentovaných výsledků zkoušek pevností UHPFRC na různých tělesech je možno sledovat rozměrový efekt. Při konstantních poměrech pevností mezi jednotlivými tělesy by šlo o tři stejné křivky posunuté podle daných poměrů.

Je vidět, že dochází k lokálním odchýlkám, ale celkově jsou poměry mezi výsledky na jednotlivých druhích zkušebních těles ve shodných intencích.

Průměrně je pevnost zjištěná na krychli s hranou 100 mm o 10 % vyšší než na krychli 150 mm, a na zlomku trámečku 40x40x160 mm o 23% vyšší než na 150 mm krychli.

8. ZÁVĚR

Autor bude dále sledovat a vyhodnocovat jednotlivá zkušební tělesa při reálných použití materiálu UHPFRC a věří, že bude možné výsledně stanovit takové poměry rozměrového efektu, které bude možno nadále používat pro přibližný převod mezi jednotlivými zkušebními tělesy.

Takový postup umožní používání menších zkušebních těles a zároveň bude deklarovat parametry materiálu podle v současnosti používaných předpisů.

ACKNOWLEDGEMENTS

Příspěvek vznikl za finanční podpory z programu Epsilon, číslo projektu TH02020373, Technologické agentury ČR a firmy KŠ PREFA s.r.o.

Reference

- Doo Yeol Yoo, Nemkumar Banthia, Su Tae Kang, Young Soo Yoon. (2016), Size effect in ultra-high-performance concrete beams, in 'Engineering Fracture Mechanics', Vol. 157, pp. 86–106.
- Spasojevic Ana, Redaelli Dario, Fernández Ruiz Miguel, Muttoni Aurelio (2008), Influence of tensile properties of UHPFRC on size effect in bending. *Ultra High Performance Concrete (UHPC), Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 303-310