

T A
Č R

Program **Alfa**

PŘÍJEMCE PODPORY:



KLOKNERŮV ÚSTAV, ČVUT V PRAZE

DALŠÍ ÚČASTNÍCI PROJEKTU:

SKANSKA

 **BASF**
The Chemical Company



EV. Č. PROJEKTU: TA01010269

NÁZEV PROJEKTU:

**APLIKOVANÝ VÝZKUM ULTRAVYSOKOHODNOTNÉHO
BETONU (UHPC) PRO PREFABRIKOVANÉ PRVKY STAVEB**

METODIKA 2

**METODIKA
PRO NAVRHOVÁNÍ PRVKŮ Z UHPC**

VERZE 2015

Vypracoval:

Ing. Milan Kalný

Ing. Jan Komanec

Ing. Václav Kvasnička

doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

Ing. Petr Tej, Ph.D.

V Praze 30. 6.2015

OBSAH

1.	Úvod a vymezení platnosti.....	3
2.	Materiálové vlastnosti UHPC	5
2.1.	Pevnost UHPC v tlaku	5
2.2.	Charakteristiky UHPC v pružném stavu.....	5
2.3.	Pevnost UHPC v tahu za ohybu.....	5
3.	Klasifikace UHPC	7
4.	Zásady pro navrhování.....	8
5.	Mezní stav únosnosti.....	9
6.	Dílčí součinitele spolehlivosti.....	9
7.	Pracovní diagram napětí/přetvoření	10
7.1.	Pracovní diagram pro UHPC v tlaku.....	10
7.2.	Pracovní diagram pro UHPC v tahu.....	11
8.	Vliv orientace výztužných vláken/drátků	13
9.	Ověření únosnosti a použitelnosti prvků z UHPC	13
9.1.	Mezní stav únosnosti.....	14
9.2.	Posouzení smyku	14
9.3.	Mezní stav použitelnosti	15
10.	Konstrukční pravidla pro navrhování prvků.....	15
11.	Bibliografie	16

„Metodika pro navrhování prvků z UHPC“

byla vytvořena s finanční podporou TA ČR“.

1. Úvod a vymezení platnosti

Tato metodika vznikla s cílem vytvořit první podklad v rámci ČR pro možné využívání nového moderního cementového materiálu, který je v literatuře a v mezinárodním kontextu označován jako „*Ultra-High Performance Concrete*“ (UHPC), pro stavební konstrukce. Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA01010269 Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky. Tato metodika navazuje na metodiky „*METODIKA 1 -Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*“^[40], „*METODIKA 3 -Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*“^[41], které byly zpracovány v rámci téhož projektu.

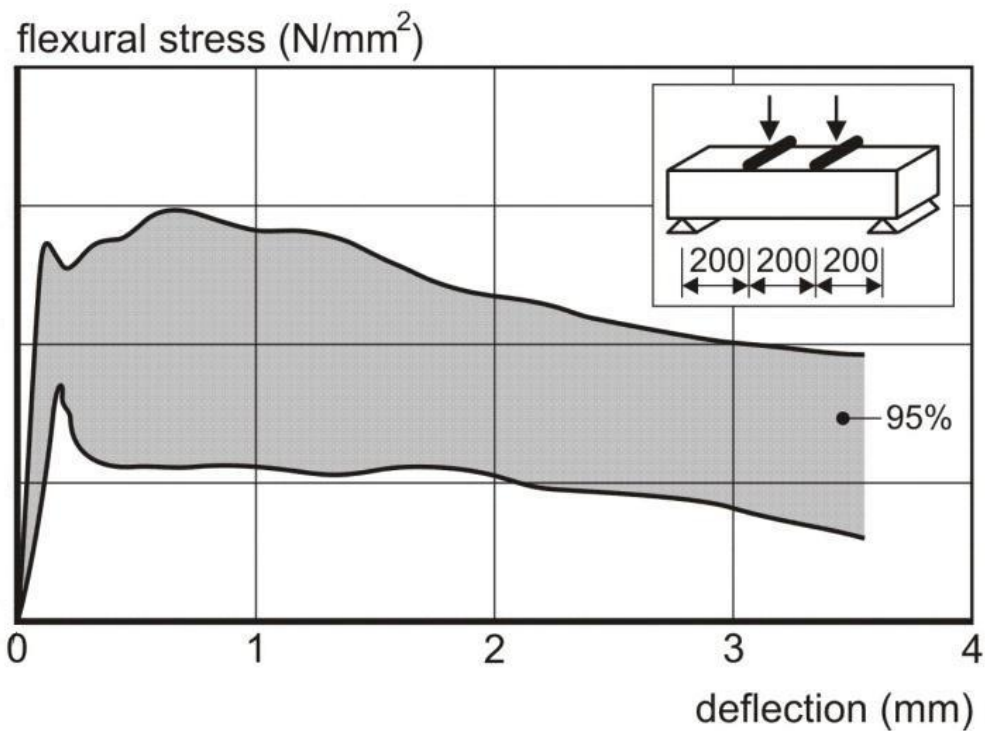
UHPC se významně liší od běžného betonu. Kromě vysoké dávky cementu (600 - 1000 kg/m³) obsahují pouze jemnozrné kamenivo (běžně zrnitost do 1 mm), vlákna (mikrovlákna s průměrem do 0,3 mm a délky do 20 mm), mikroplniva (příměsi), vysoké dávky přísad (superplatifikátory a další). Vyznačují se nízkou hodnotou vodního součinitele (w/c je do cca 0,25) a vysokým obsahem kovových nebo polymerních vláken (obsah 1 – 3 % objemu směsi).

Materiály UHPC (Ultra Hight Performance Concrete) jsou kromě své specificky jemnozrné struktury zejména vysokopevnostní kompozity na bázi cementu dosahující vysoké pevnosti v tlaku. Obvyklou hranicí pevnosti uváděnou v zahraniční literatuře je 150 MPa a více. Mají vysokou reziduální pevnost v tahu či v tahu za ohybu po vzniku trhliny s vysokou lomovou energií, a vysokou duktilitou.

Ekonomicko-technická optimalizace materiálu pro řadu prvků umožní využít různých pevností (i nižších) při udržení vysoké úrovně trvanlivosti pro UHPC obvyklé. Tato metodika pro navrhování prvků z UHPC platí pro ultra vysokohodnotné betony (UHPC) s válcovou charakteristickou pevností $110 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 180 \text{ MPa}$ (tj. od třídy C110/130 do C180/200¹) s minimálním množstvím rovnoměrně rozptýlených ocelových krátkých drátků délky $L_f = 8 \div 20 \text{ mm}$ ve výši 1,5% objemu betonu (120 kg/m³). Tyto parametry zajišťují dostatečnou duktilitu výsledného materiálu v konstrukčních prvcích. Doporučení předpokládá výrobu betonové směsi ze složek dostupných v ČR při využití přiměřené technologie. Při navrhování prvků z UHPC se požaduje, aby rozptýlená výztuž zaručila dostatečnou reziduální pevnost materiálu i po vzniku trhlin a zajistila, že nedojde ke křehkému porušení prvku.

Základním problémem předpisu pro navrhování UHPC je velký rozptyl výsledků v souvislosti s použitými materiály, technologií výroby, způsobu zpracování a lití betonové směsi, ale také v souvislosti se zkušebními metodami a velikostí vzorků. Statické působení UHPC je značně ovlivněno zejména orientací a rozložením ocelových drátků. Příkladem tohoto rozptylu je níže uvedená zkouška pevnosti v tahu provedená na trámečku se čtyřbodovým ohybem. Níže uvedený graf představuje oblast výsledků, kam byl zařazen kvantil 95% zkoušek provedených na TU Delft (Walraven & kol.).

¹ Pozn.: ČSN EN 206 uvádí pro obyčejný beton třídy pevnosti v tlaku do C100/115, fib Model Code 2010 do C120/140. Pro UHPC se obvykle uvádí pevnost C150/170 a vyšší, což zajišťuje vysokou trvanlivost a odolnost materiálu vůči agresivním vlivům prostředí. Provedené zkoušky prokázaly, že již od pevnosti C110/130 má základní materiál hutnou mikrostrukturu s maximální velikostí pórů cca 0,01 mm a předpokládaná trvanlivost UHPC třídy C110/130 a vyšší dosahuje min. 120 let. Navržené rozmezí pevností umožňuje navrhovat ekonomické konstrukční prvky v podmínkách ČR.



Obr. 1: Rozptyl výsledků pevnosti UHPC v tahu za ohybu odvozený v TU Delft [3]

Vývoj, výzkum a praktické uplatnění UHPC stále pokračují na národní a celosvětové úrovni. Proto je nutné předpokládat doplnění této metodiky pro navrhování po uplynutí přechodného období, které stanovujeme max. 3 roky od schválení, tj. nejpozději v roce 2018.

2. Materiálové vlastnosti UHPC

2.1. Pevnost UHPC v tlaku

Charakteristická pevnost betonu v tlaku f_{ck} se přednostně určuje na válcích dle ČSN EN 12390-3. Pro účely tohoto předpisu se předpokládá použití jako referenční zkušební válece o štíhlostním poměru 1:2 s min. průměrem 100 mm. Lze tedy využít válce 150 x 300 mm (pro účely této metodiky referenční válece) případně také 100x200 mm. S ohledem na jemnozrnnost materiálu lze předpokládat minimální rozdíly a vzájemnou shodnost výsledků u těchto těles. V případě využití jiných těles (krychle např. 100 mm či trámce) je nutno zkouškou ověřit převodní vztah. Přepočítávací poměry se určí z průkazných zkoušek provedených na obou typech těles v množství min. 3 ks postupně ze 3 nezávislých záměsí (celkem 9 zkoušek). Při zkoušení a jeho statistickém vyhodnocení se pro danou třídu UHPC požaduje, aby 95% vzorků vyhovělo předepsané charakteristické pevnosti v tlaku.

Tabulka 1: Označení tříd UHPC v souladu s fib Model Code 2010 je dáno pouze válcovou pevností.

Třída UHPC	C110	C120	C130	C140	C150	C160	C170	C180
f_{ck} [MPa]	110	120	130	140	150	160	170	180

2.2. Charakteristiky UHPC v pružném stavu

Velikost sečnového statického modulu pružnosti E_c v rozsahu elastického chování závisí zejména na pevnosti UHPC v tlaku a na jeho složení. Pro každou recepturu UHPC je nutno určit E_c zkouškou. Pro konstrukce citlivé na deformace, při vnesení zatížení na mladé prvky nebo při postupu výstavby s různě starými prvky je nutno provést zkoušky v časové řadě (např. 3, 7, 14, 28, 90 dní).

Přibližnou hodnotu E_c lze určit ze vztahu:

$$E_c = k_0 \cdot f_{cm}^{1/3} \quad (1)$$

kde: $k_0 = 10000$ (obvykle: $8800 < k_0 < 10200$)

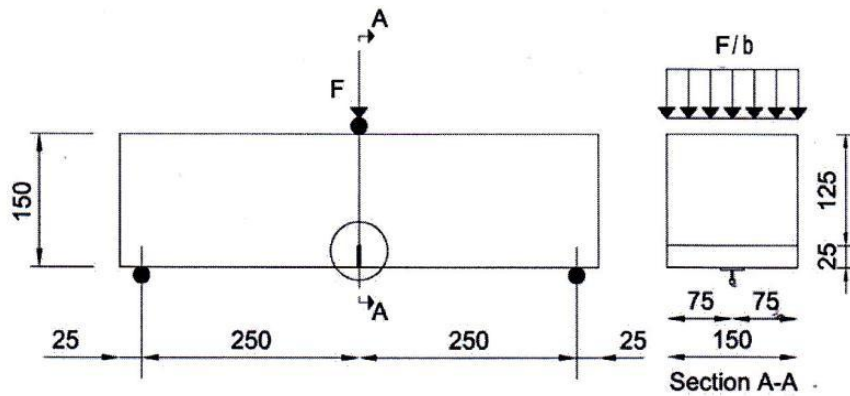
Pro úroveň napětí v tlaku do 80% f_{ck} lze předpokládat Poissonův součinitel ν_c hodnotou $0,15 \div 0,20$. Pro navrhování prvků v mezním stavu únosnosti se použije hodnota $\nu_c = 0,20$.

Obecné rovnice pro průběh smrštění a dotvarování běžného betonu jsou uvedeny v Model Code 2010 [1]. Pro UHPC je třeba zejména v raném stadiu a při reálné hydratační teplotě zjistit normovými zkouškami skutečné hodnoty průběhu smrštění a dotvarování, na jejichž základě je možné příslušné konstanty v Model Code 2010 upřesnit a případně i uvedené vztahy zjednodušit.

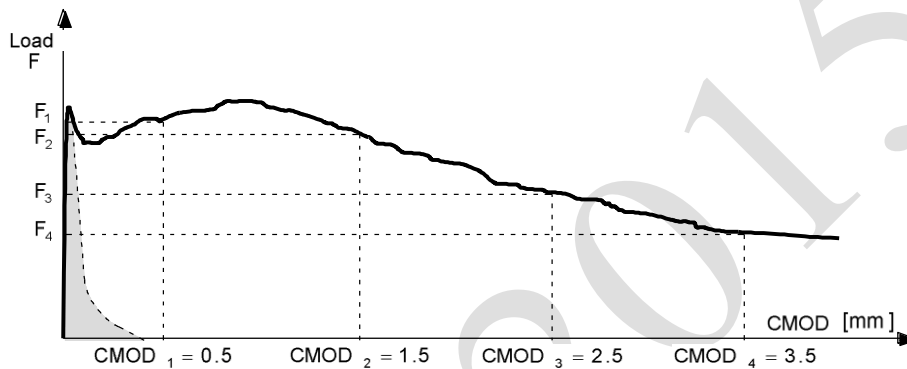
Součinitel teplotní roztažnosti lze předpokládat hodnotou $\alpha_T = 1,1 \cdot 10^{-5}$.

2.3. Pevnost UHPC v tahu za ohybu

Pro určení mezního stavu únosnosti se používá zkouška v tahu za ohybu podle ČSN EN 14651 na trámečku se zářezem, kde je možné sledovat chování UHPC po vzniku trhliny a určit reziduální charakteristickou pevnost v tahu. Tato zkouška má charakter průkazní zkoušky. Jiné zkoušky lze akceptovat jen pokud se provede korelace se zkouškami podle ČSN EN 14651.

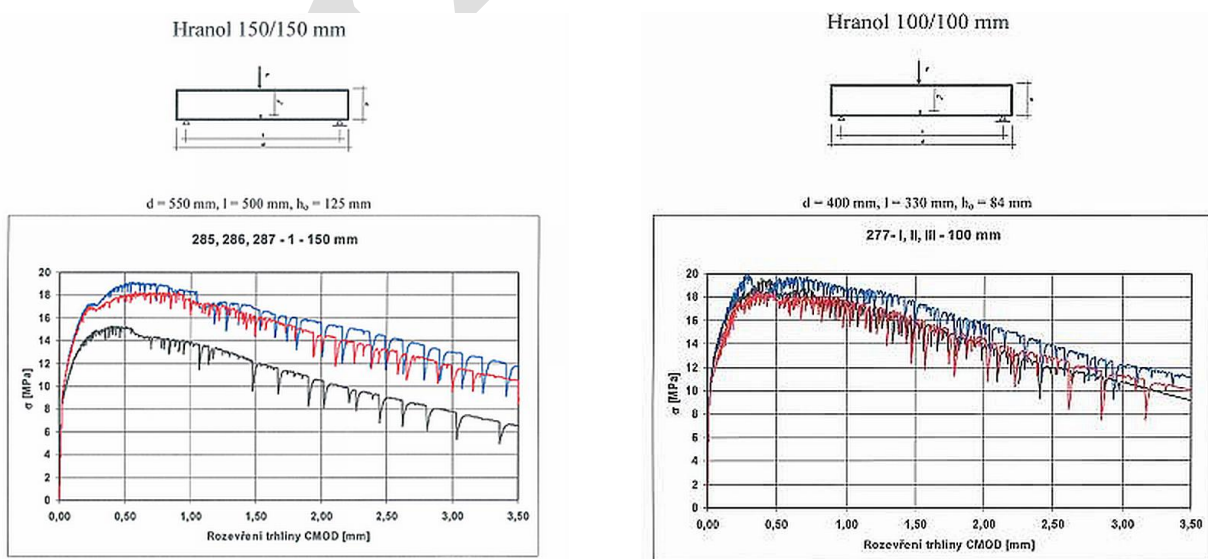


Obr. 2: Uspořádání zkoušky v ohybu na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 [12]



Obr. 3: Typický výsledek ohybové zkoušky na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 [12]

V rámci projektu TAČR TA01010269 Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky staveb byla provedena řada zkoušek v tahu za ohybu na trámečcích se zářezem podle EN 14651 i na menších vzorcích. Vliv velikosti vzorku (scale effect) je podstatný až v řádu desítek %. Proto za základní se považují větší zkušební tělesa, která poskytují konzervativnější hodnoty. Příklad srovnání výsledků je uveden na následujícím obrázku 4.



Obr. 4: Výsledky ohybové zkoušky na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 získané v rámci projektu [7].

Obdobou zkoušky ČSN EN 14651, která poskytuje informaci o chování materiálu po vzniku trhliny je test čtyřbodovým ohybem dle ČSN P 732452. Zkoušky trámů s vrubem poskytují konzervativnější (nižší) výsledky z hlediska maximálních napětí v tahu za ohybu pro stejné materiály. Pro využívání zkoušky čtyřbodovým ohybem je nutné znát vztah mezi výsledky testovacích metod pro konkrétní materiál. Zkouška dle ČSN EN 14651 je pro účely tohoto dokumentu referenční.

Pro určení mezního stavu použitelnosti je možné používat zkoušku v tahu za ohybu čtyřbodovým ohybem na zkušebních hranolech o rozměrech 150 mm x 150 mm x 700 mm bez vrubu podle ČSN EN 12390-5. Tato zkouška má charakter kontrolní zkoušky.²⁾

Pro kontrolní zkoušky je možné pro zajištění vysoké kontroly kvality používat i menší zkušební tělesa, vždy je však nutno provést na dostatečném počtu zkušebních vzorků korelaci se zkouškou podle ČSN EN 14651.

Charakteristická střední hodnota pevnosti UHPC v tahu za ohybu f_{ctm} se určí ze zkoušky podle ČSN EN 14651: $f_{ctm} = 0,7 \times f_{R1k}$

kde f_{R1k} je pevnost v tahu za ohybu při velikosti rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm

Minimální a maximální hodnoty $f_{ctk,min}$ a $f_{ctk,max}$ mohou být odvozeny takto:

$f_{ctm} = 0,7 \times f_{R1k}$	$f_{ctk,min} = 0,7 \times f_{ctm}$	$f_{ctk,max} = 1,3 \times f_{ctm}$
--------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

3. Klasifikace UHPC

Klasifikace UHPC je založena na reziduální (zbytkové) pevnosti po vzniku první trhliny. Vyhodnocuje se pevnost v tahu za ohybu $f_{R,j}$ při velikosti rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm a $CMOD_3 = 2,5$ mm; tyto pevnosti odpovídají mezním stavům použitelnosti a únosnosti.

Třída reziduální pevnosti se popisuje dvojicí čísel f_{R3k}/f_{R1k} [MPa] a podílem $0,5 < f_{R3k}/f_{R1k} < 1,3$.

Třída reziduální pevnosti			
<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>d</u>
$0,5 < f_{R3k}/f_{R1k} < 0,7$	$0,7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0,9$	$0,9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1,1$	$1,1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1,3$

Hodnoty podílu $f_{R3k}/f_{R1k} < 1,0$ popisují materiál se změkčením.

Hodnoty podílu $f_{R3k}/f_{R1k} > 1,0$ popisují materiál se zpevněním.³⁾

Během přechodného období se v ČR nesmí počítat s využitím větší pevnosti betonu v tahu f_{R3k} než je hodnota $f_{R3k} = f_{R1k}$.

Pro navrhování prvků bez betonářské výztuže podle této metodiky musí vždy platit:

$$0,5 < f_{R3k}/f_{R1k}$$

²⁾ Pozn.: Zkouška čtyřbodovým ohybem neumožňuje spolehlivě zjistit chování UHPC po vzniku trhlin, zejména hodnoty f_{R1k} a f_{R3k} při rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm a $CMOD_3 = 2,5$ mm. Tyto hodnoty jsou důležité pro klasifikaci UHPC a pro odvozené výpočetní postupy. Po vzniku rozevřené trhliny nesmí dojít ke křehkému lomu ohýbaného prvku. Metody, které používají ke stanovení f_{R1k} a f_{R3k} výpočet šířky trhlin na základě průhybu trámečku při čtyřbodovém ohybu jsou méně spolehlivé a nelze je v přechodném období používat.

³⁾ Pozn.: Přitom ke vzniku trhliny může dojít při menším nebo větším tahu než je hodnota f_{R1k} .

4. Zásady pro navrhování

Standardní metodou pro výpočet vnitřních sil, napětí, přetvoření a deformací je lineárně pružná analýza na výpočetním modelu konstrukce. Redistribuci vnitřních sil na prutových prvcích lze částečně uplatnit jen u prvků se zajištěnou duktilitou u třídy reziduální pevnosti \underline{b} a vyšší. Plastická analýza konstrukci lze použít pouze pro tenkostěnné desky a skořepiny.

Statické působení UHPC je značně ovlivněno zejména orientací a rozložením ocelových drátků, zejména v oblasti namáhání v tahu. Proto při navrhování prvků z UHPC je vždy nutno provádět větší množství průkazných a kontrolních zkoušek. Výhodné využití vlastností UHPC lze předpokládat u tenkostěnných prutových, deskových nebo stěnových prefabrikovaných prvků namáhaných tlakem a ohybem. U jednoosé nebo vícesměrně osově tažených prvků, nelze předpokládat využití tahové pevnosti UHPC bez betonářské výztuže, pokud nejde o UHPC třídy reziduální pevnosti \underline{d} , tato kategorie se ovšem v přechodném období nedoporučuje využívat. Rovněž u masivních prvků je nutno velmi opatrně postupovat při interpretaci zkoušek provedených na malých zkušebních tělesech, zde je třeba provést ověřovací zkoušku i na kompletním prvku z UHPC vyrobeném v běžných provozních podmínkách.

Příčinou velkého rozptylu změřených vlastností UHPC v tahu jsou technologické vlivy při výrobě a ukládání betonové směsi, především způsob míchání a lití do bednění. Některé systematické vlivy jsou zřejmé, např. v těsné blízkosti k bednění povrchů je většina drátků orientována paralelně s bedněním. Proto také mnoho zkoušených vlastností závisí na velikosti a geometrii zkušebního tělesa, u menších vzorků je větší pravděpodobnost stejnoměrnějšího rozptýlení drátků a jejich příznivější orientace vlivem blízkého povrchu bednění.

Kromě statistického vyhodnocení výsledků zkoušek na standardních zkušebních tělesech je také nutné provést kalibraci mezi výsledky na těchto zkušebních tělesech a prvcích z UHPC, vyrobených stejným způsobem jako průmyslově vyráběné kompletní prefabrikované prvky. Doporučuje se také odebrat srovnávací vzorky z různých oblastí kompletního prvku, a to pro různé směry působení namáhání. Touto metodou lze poměrně spolehlivě zjistit součinitel orientace drátků K a další koeficienty pro posouzení různých částí jednoho prvku.

Na základě statistického vyhodnocení zkoušek prvků ve skutečné velikosti (metoda navrhování na základě zkoušek dle fib Model Code 2010 [1]) lze také zjistit empirické hodnoty pro přímé posouzení vyrobených prvků.

5. Mezní stav únosnosti

Pokud použijeme při navrhování nosných konstrukcí z UHPC výpočetní metodu založenou na dílčích součinitelích spolehlivosti, která se běžně používá pro navrhování stavebních konstrukcí, je důležité vzít v úvahu řadu charakteristických vlastností materiálu UHPC. Úpravy jsou nutné hlavně na straně únosnosti průřezů prvků z UHPC, zatímco obvyklé dílčí součinitelé pro zatížení a jejich kombinace zůstávají pro UHPC stejné jako jiných materiálů.

Tyto speciální vlastnosti UHPC se týkají zejména následujících vlastností:

1. Materiál se vyznačuje vysokou citlivostí na změny složení směsi, způsobu míchání, betonování a klimatické okrajové podmínky.
2. Ve srovnání s normálním betonem je značně křehčí.
3. Používají se drátky a vlákna jako konstrukční výztuž.

Bod 1 klade vysoké nároky na kvalitu míchání a betonážní postup. Díky vyššímu standardu kvality v prefě, zejména pokud jde o výrobu a její kontrolu (a také díky vyloučení vlivu počasí) se zdá, že prefabrikované betonové konstrukce z UHPC jsou výhodnější než monolitické konstrukce z UHPC betonované na stavbě. Avšak nevýhody betonáže in situ lze do značné míry kompenzovat tím, že se zavedou komplexní opatření k zajištění kvality a vyberou se dostatečně kvalifikovaní dodavatelé.

6. Dílčí součinitele spolehlivosti

Dílčí součinitelé spolehlivosti v mezním stavu únosnosti jsou uvedeny v následující tabulce 2.

Tabulka 2: Dílčí součinitele pro MÚ I

	Návrhová situace	
	Trvalá a dočasná	Mimořádná
UHPC v tlaku		
Vysoká úroveň kvality	$\gamma_c = 1,35$	$\gamma_c = 1,15$
Normální úroveň kvality	$\gamma_c = 1,5$	$\gamma_c = 1,3$
Bez zaručené duktility	$\gamma'_c = 1,2$	
UHPC v tahu (účinnost rozptýlené výztuže)		
(požaduje se vysoká úroveň kvality)		
Obecně	$\gamma_{cf} = 1,5$	$\gamma_{cf} = 1,3$
Pro lokální posouzení	$\gamma_{cf} = 2,1$	$\gamma_{cf} = 1,5$
Betonářská nebo předpínací výztuž	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,0$

Vysoká úroveň kvality se předpokládá při výrobě prefabrikovaných prvků v prefě při trvalé kontrole procesu míchání betonové směsi a technologie betonáže.

Zaručená duktilita pro prvky namáhavé kombinací tlaku a ohybu je dána požadavkem na splnění minimálně reziduální třídy a, tj. $f_{R3k}/f_{R1k} > 0,5$ a současně minimálním množstvím rovnoměrně rozptýlených ocelových krátkých drátků ve výši 1,5% objemu betonu (120 kg/m^3). Součinitel spolehlivosti pro prvky bez zaručené duktility je stejný jako pro nevyztužené prvky z prostého betonu (γ_c x γ'_c).

Pro jednotlivé tahově namáhané prvky a jejich detaily, jejichž selhání by mohlo ohrozit celkovou bezpečnost konstrukce (např. kotevní oblast) se použije zvýšený dílčí součinitel spolehlivosti pro lokální posouzení.

7. Pracovní diagram napětí/přetvoření

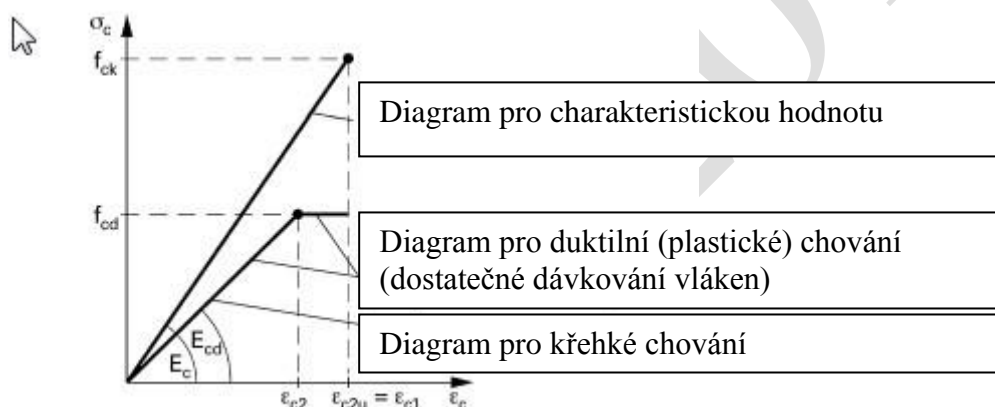
Pro prutové prvky zatížené ohybem nebo kombinací tlaku a ohybu předpokládáme použití pracovního diagramu popsaného v kapitole 7.1 a 7.2

Pro prutové prvky namáhané čistým tahem nebo kombinací tahu s ohybem, kde tažená část průřezu tvoří více než 60% plochy průřezu, je nutno použít UHPC v kombinaci s betonářskou výztuží nebo předpětím.

Pro plošné a stěnové prvky, u nichž nastává po vzniku první trhliny redistribuce vnitřních sil, se doporučuje zpřesnit výpočet mezního stavu únosnosti na nelineárním 3-D modelu. Rovněž je možné vycházet ze zkoušek reálných plošných nebo stěnových prvků.

7.1. Pracovní diagram pro UHPC v tlaku

Pro jednoduchost lze pracovní diagram (graf napětí-přetvoření) pro UHPC v tlaku zjednodušit zanedbáním malé nelinearity pozorované při zkouškách nad úroveň napětí asi 80-90% pevnosti betonu v tlaku. Lze předpokládat, že je chování UHPC je lineárně pružné až po dosažení návrhové hodnoty pevnosti betonu v tlaku (požaduje se zaručená duktilita).



Obr.5: Pracovní diagram pro navrhování UHPC v tlaku

Platí vzorec:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / (\gamma_c \cdot \gamma'_c) \quad (2)$$

kde:

f_{ck} ... charakteristická hodnota pevnosti v tlaku změřená na válcích

γ_c ... součinitel spolehlivosti pro UHPC v tlaku (viz tabulka v odst. 6.)

γ'_c ... další součinitel spolehlivosti pro UHPC bez zaručené duktility (viz tabulka v odst. 6.)

α_{cc} ... součinitel pro vliv dlouhodobého zatížení na pevnost betonu v tlaku a pro konverzi mezi válcovou pevností a posuzovanou složkou pevnosti v tlaku

$\alpha_{cc} = 0,85$... pro dlouhodobé nebo opakované zatížení

$\alpha_{cc} = 0,95$... pro krátkodobé zatížení

Podobně jako u předpisů pro normální a vysokopevnostní beton je stoupající část grafu napětí-deformace pro navrhování plošší než u grafu určeného z průměrných nebo charakteristických hodnot materiálových vlastností. Je to zdůvodněno započtením účinků dotvarování (při dlouhodobém zatížení), a také vztahem mezi pevností betonu v tlaku

a modulem pružnosti betonu. Hodnota podle vzorce je navržena jako návrhová hodnota modulu pružnosti:

$$E_{cd} = E_{cm} / 1,3 \quad (3)$$

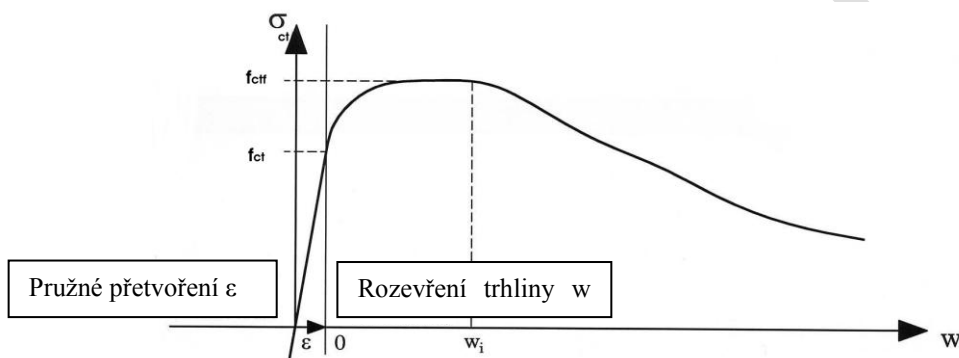
kde:

E_{cm} ... průměrná hodnota modulu pružnosti betonu

$$\varepsilon_{c2} = f_{cd} / E_{cd} \quad \varepsilon_{c2u} = f_{ck} / E_c$$

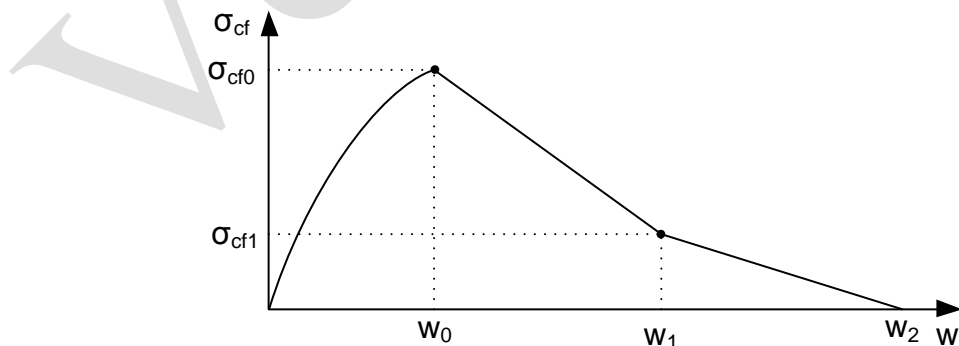
7.2. Pracovní diagram pro UHPC v tahu

Pro navrhování prvků z UHPC je nezbytné při působení v tahu uvažovat s vlivem rozptýlené výztuže a rozlišovat stavy před a po vzniku trhlin. V mezním stavu únosnosti se po vzniku trhlin neuvažuje s tahovou pevností cementové matrice, ale započítává se tahový účinek rozptýlené výztuže. Kvalitativní schéma vztahu mezi tahovým napětím a šířkou trhliny je následující:



Obr.6: Vztah mezi tahovým napětím a otevřením trhliny pro UHPC

Hodnota f_{ct} se zjistí zkouškami jako minimální napětí při vzniku trhlin na zkušební vzorku (6 zkoušek) pro čtyřbodový ohyb, resp. Kdy je ukončena lineárně pružná odezva zkušební vzorku na zatížení. Obvyklý diagram napětí/přetvoření nelze pro UHPC bez zahrnutí dalších vlivů pro kombinaci tahového a ohybového namáhání použít. Je třeba doplnit účinek rozptýlené výztuže a také velikosti prvku (size effect).



Obr.7: Návrhový diagram UHPC v tahu po vzniku trhlin

Ve fázi aktivace rozptýlené výztuže po vzniku trhliny ($w \leq w_0$) je vztah mezi napětím a šířkou trhlin definován takto:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf0} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{w}{w_0}} - \frac{w}{w_0} \right) \quad (4)$$

kde:

σ_{cf} je tahové napětí přenášené výztužnými vlákny v trhlíně

σ_{cf0} je reprezentativní hodnota maximálního tahového napětí přenášeného výztužnými vlákny po vzniku trhlin

$\sigma_{cf0} = \sigma_{cf0k}$, kde σ_{cf0k} je charakteristická hodnota účinnosti výztužných vláken (f_{ctm} při velikosti rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm), která se použije pro ověření mezního stavu použitelnosti (omezení napětí, šířka trhlin, deformace)

$\sigma_{cf0} = \sigma_{cf0d}$, kde σ_{cf0d} je návrhová hodnota účinnosti rozptýlené výztuže, která se použije pro ověření mezního stavu únosnosti (ULS)

$w_0 = 0,5$ mm je referenční šířka trhlin pro maximální hodnotu účinnosti rozptýlené výztuže

Návrhová hodnota maximálního tahového napětí přenášeného výztužnými vlákny po vzniku trhlin (účinnost rozptýlené výztuže) je definována takto:

$$\sigma_{cf0d} = \alpha_{ct} \cdot \frac{\sigma_{cf0k}}{\gamma_{cf}} \quad (5)$$

kde:

σ_{cf0k} ... charakteristická hodnota účinnosti výztužných vláken

γ_{cf} ... dílčí součinitel spolehlivosti pro působení UHPC v tahu (viz. kap. 6)

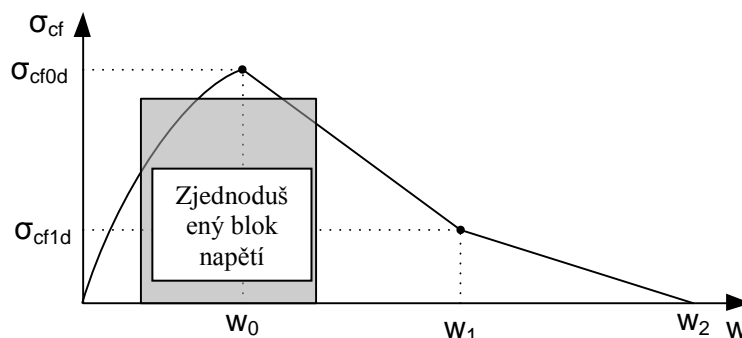
α_{ct} ... součinitel vlivu délky zatížení

$\alpha_{ct} = 0,9$... pro dlouhodobé zatížení

$\alpha_{ct} = 1,0$... pro krátkodobé zatížení

Ve fázi vytahování vláken ($w > w_0$) se vztah mezi napětím a rozevřením trhliny určí ze zkoušky tříbodovým ohybem s vrubem pro hodnoty $w_1 = 2,5$ mm a $w_2 = 0,5 L_f$ s lineárním průběhem.

Protože únosnost ohýbaného průřezu je obvykle vyčerpána při poměrně malém přetvoření, je možné další zjednodušení tahové větve pracovního diagramu UHPC:



Obr.8: Zjednodušený model návrhového diagramu působení UHPC v tahu

kde:

$$w_0 = 0,5 \text{ mm} , w_1 = 2,5 \text{ mm} \text{ a } w_2 = 0,5 L_f$$

$$\sigma_{cfd} = 0,9 \sigma_{cofd}$$

resp. $\sigma_{cfd} = 0,85 \sigma_{cofd}$ pro prutové prvky, jejichž šířka se rozšiřuje směrem k taženým krajním vláknům průřezu

Plocha zjednodušeného bloku napětí v intervalu $\langle 0, w_0 \rangle$ je 90% integrované plochy pracovního diagram v této části, plocha zjednodušeného bloku napětí v intervalu $\langle w_0, w_1 \rangle$ je 35% integrované plochy pracovního diagram v této části.

8. Vliv orientace výztužných vláken/drátků

Vliv orientace vláken/drátků musí být stanoven na základě zkoušek nebo nedestruktivní diagnostiky individuálně navržených materiálů a prvků. Rozdílná orientace rozptýlené výztuže způsobuje značný rozptyl v chování konstrukčních prvků, a to v příznivém i nepříznivém směru. Velkou pozornost je nutno věnovat zejména rovnoměrnému lití betonové směsi u rozměrnějších prvků a místům, kde dochází ke slítí dvou proudů nebo přelití dvou vrstev čerstvé betonové směsi. U menších prvků z UHPC se vždy doporučuje ověřit teoretické předpoklady zatěžovacími zkouškami provedenými na kompletním konstrukčním prvku.

Pro izotropní rozdělení rozptýlené výztuže se předpokládá součinitel orientace $K = 1,0$. Součinitelem K se upravují hodnoty návrhové reziduální pevnosti v tahu f_{Ftsd} (mezní stav použitelnosti) a f_{Ftud} (mezní stav únosnosti) takto:

$$f_{Ftsd,mod} = f_{Ftsd}/K \quad \text{resp.} \quad (6)$$

$$f_{Ftud,mod} = f_{Ftud}/K \quad (7)$$

Hodnota $K < 1,0$ znamená příznivé účinky orientace rozptýlené výztuže, hodnota $K > 1,0$ znamená nepříznivé účinky orientace rozptýlené výztuže. Pokud se v jednom směru uplatní $K < 1,0$, pak je nutné ověřit hodnotu K pro ostatní směry namáhání konstrukčního prvku.

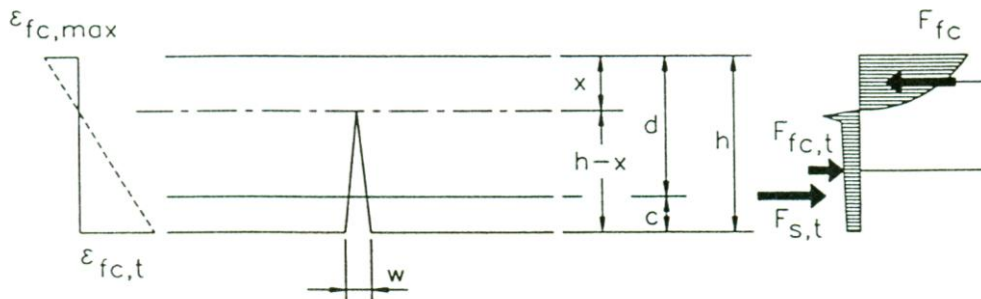
9. Ověření únosnosti a použitelnosti prvků z UHPC

Předpis pro statické posuzování prvků z UHPC navazuje na koncepční normu Model Code 2010 a předpokládáme obdobné členění.

Klasifikace prvků z UHPC podle prostorového působení a podle případného použití UHPC v kombinaci s betonářskou výztuží je důležitá, neboť zkoušky prokázaly výrazný vliv těchto kritérií ve srovnání z klasickým betonem/železobetonem. Pro různé typy prvků je vhodné doporučit i rozdílné zkušební metody.

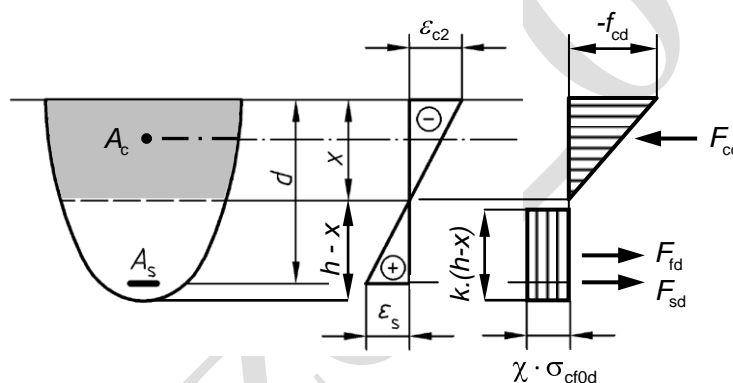
9.1. Mezní stav únosnosti

V mezním stavu únosnosti je nutno pracovat s nelineárním pracovním diagramem včetně tahové větve. Pozice neutrální osy se určí z podmínky rovnováhy vnitřních a vnějších sil. Příklad pro posouzení prutového prvku v mezním stavu únosnosti, včetně případné betonářské výztuže, je následující:



Obr.9: Příklad rozdělení napětí po výšce průřezu prutového průřezu kde $\varepsilon_{fc,max} = f_{ck} / E_c$

Při zjednodušeném pracovním diagramu průřezu z UHPC vypadá rozdělení napětí takto



Obr. 10: Rozdělení napětí po výšce průřezu prutového průřezu (zjednodušený diagram) kde $k = 0,9$ a $\chi = 0,85 \div 0,90$

9.2. Posouzení smyku

Pro prvky z UHPC byl zjištěn značný rozdíl ve smykové únosnosti lineárních prvků (trámů) a plošných prvků (desek). Vzhledem k velikosti plošných prvků lze předpokládat značnou redistribuci napětí při lokálním přetížení. Skutečnou únosnost deskových prvků ve smyku a protlačení je nutno zjistit zkouškami prvků v reálné velikosti. Pro prvky s betonářskou výztuží platí pravidla stejná jako u železobetonu (viz. Model Code 2010, ČSN EN 1992-1, ČSN EN 1992-2). Pro příspěvek rozptýlené výztuže ke smykové únosnosti se použije vzorec:

$$V_u = b_w \cdot h \cdot \cot \Theta \cdot \sigma_{pf} \quad (8)$$

kde:

b_w ... šířka stěny

h ... celková výška průřezu

$\cot \Theta$... sklon diagonály ($1 \leq \cot \Theta \leq 3$)

$\sigma_{pf} = 0,5f_{R1k}(t)$... tahová pevnost po vzniku trhliny

9.3. Mezní stav použitelnosti

Ověření mezního stavu použitelnosti se provede kontrolou napětí v betonu a v betonářské výztuži, pokud je v průřezu uplatněna.

Dílní součinitelé spolehlivosti v mezním stavu použitelnosti jsou obvykle zaváděny hodnotami $\gamma_F = 1,0$ a $\gamma_M = 1,0$. Součinitel orientace rozptýlené výztuže K se použije ve zjištěné hodnotě. Mezní hodnoty napětí jsou v následující tabulce 3.

Tabulka 3: Mezní hodnoty napětí

	Charakteristická kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
Napětí betonu v tahu	$0,5 f_{R1k}(t)$	$0,4 f_{R1k}(t)$
Napětí betonu v tlaku	$0,6 f_{ck}(t)$	$0,5 f_{ck}(t)$
Tahové napětí ve výztuži	$0,8 f_{yk}$	$0,6 f_{yk}$

Limitní šířka trhlin pro častou kombinaci zatížení:

$w_{lim} = 0,3$ mm pro třídu prostředí X0

$w_{lim} = 0,2$ mm pro třídy prostředí XC, XD, XS a XF

Pokud jsou dodrženy podmínky pro kontrolu napětí, není nutno mezní šířku trhlin posuzovat.

Limitní hodnoty deformací se pro prvky z UHPC řídí požadavky kapitoly 7.6.5 vzorové normy Model Code 2010 [1], respektive příslušnými ČSN.

10. Konstrukční pravidla pro navrhování prvků

Pro konstrukční prvky z UHPC, jejichž nejmenší rozměr příčného řezu h je menší než trojnásobek délky jednotlivých vláken výztuže $h \leq 3L_f$, je nutno určit tahovou pevnost na zkušebních vzorcích v plné velikosti. V zkušební laboratoři a v provozních podmínkách je přitom nutno dodržet stejnou technologii výroby, zejména způsob lití směsi, který ovlivňuje orientaci výztužných vláken.

Pro prvky z UHPC, jejichž všechny rozměry jsou větší než $3L_f$, není praktické provádět série zkoušek na vzorcích v plné velikosti. Zkoušky se provedou standardních zkušebních vzorcích, při navrhování lze vycházet z konstitutivních pravidel a doporučuje se návrh ověřit aspoň u jednoho prvku zkušebně zatíženého na úroveň předpokládané mezní únosnosti nebo u tří prvků zkušebně zatížených na úroveň mezního stavu použitelnosti pro častou kombinaci zatížení.

Min. tloušťka deskového nebo stěnového konstrukčního prvku je $h = 2L_f$, nejméně však 25 mm.

Min. rozměr příčného řezu prutového konstrukčního prvku je $h = 3L_f$, nejméně však 35 mm.

Pokud je navržena betonářská výztuž, její minimální krytí je $c = 1,5 L_f$, nejméně však 20 mm.

Min. krytí soudržné předpínací výztuže je $h = 3L_f$, nejméně však 35 mm.

Min. krytí kabelového kanálku předpínací výztuže je 50 mm.

Ostatní konstrukční pravidla lze uplatnit přiměřeně podle Model Code 2010.

11. Bibliografie

- [1] fib Model Code for Concrete Structures 2010, ©2013 fib, vyd. Ernst & Sohn
- [2] SETRA/AFGC: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations*, 01/2002
- [3] AFGC/SETRA: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations* (06/2013). Paris CEDEX.
- [4] JSCE, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks, Rokugo K., (ed.) Concrete Eng. Series, 82, 2008
- [5] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton: Ergänzungen zu DIN 1045, Teile 1 bis 4 (07/2001). 21. Entwurf. DAfStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2005
- [6] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion*, (2001). ISBN 3-410-65800-9.
- [7] DBV Merkblatt STAHLFASERBETON – Oktober 2001
- [8] Schmidt M. et al.: Sachstandsbericht Ultrahochfeste Beton, DAfStb Beton Heft 561, 2008
- [9] Sborník z konference HIPERMAT 3rd International symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Material, Kassel, March 7-9,2012
- [10] Fehling, Schmidt, Walraven, Leutbecher, Fröhlich: UHPC, BetonKalender 2013
- [11] GRAYBEAL, B. A. - BABY, F. - MARCHAND, P. - TOUTLEMONDE, F. *Direct and Flexural Tension Test Method for Determination of the Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC*. Kassel 2012. ISBN: 978-3-86219-264-9.
- [12] FERRARA, L. – FAIFER, M. – TOSCANI, S. *A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fibre reinforced cementitious composites – part 1: method calibration*. Materials and Structures (2012), doi: 10.1617/s11527-011-9793-y.
- [13] LATASTE, J.F. – SIRIEIX, C. – BREYSSE, D. – FRAPPA, M. *Electrical Resistivity Measurement Applied to Cracking Assessment on Reinforced Concrete Structures in Civil Engineering*. NDT & E International (2003) vol 36., Issue 6. ISSN 0963-8695.
- [14] KIM, J. W. – LEE, D. G. *Measurement of Fiber Orientation Angle in FRC by Intensity Method*. Journal of Materials Processing Technology (2008).
- [15] KOLÍSKO, J. - RYDVAL, M. – HUŇKA, P. UHPC – *Assessing the Distribution of the Steel Fibre and Homogeneity of the Matrix*. fib Symposium Tel Aviv, Tel Aviv, Israel. 2013. ISBN 978-965-92039-0-1.
- [16] Kolisko, J. - Tichý, J. - Kalný, M. – Huňka P. – Hájek P. – Trefil, V.: Vývoj ultravysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR, BETON TKS samostatná příloha Betonové konstrukce 21. století betony s přidanou hodnotou, ročník 20. č. 6 samostatná příloha, s. 51-56, ISSN 1213-3116
- [17] Rydval, M. – Kolisko, J – Huňka, P. – Tichý, J.: Závislost únosnosti prvků vyrobených z UHPFRC na distribuci vláken. 20. Betonářské dny v Hradci králové, 27.-28.11.2013, SBN 978-80-87158-34-0/978-80-87158-35-7 (CD)
- [18] Tichý, J.: Technologický postup výroby – Výroba předem předpjatých mostních nosníků z UHPC – podniková norma Skanska a.s., 22. 2. 2013
- [19] Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Publication No. FHWA-HRT-13-060, JUNE 2013
- [20] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2006.

- [21] ČSN EN 12390-1 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [22] ČSN EN 12390 - 2 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [23] ČSN EN 12390-3 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843346.
- [24] ČSN EN 12390-5 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843353.
- [25] ČSN EN 12390-6 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. EAN: 8590963858937.
- [26] ČSN EN 12390-7 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [27] ČSN EN 12390-8 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [28] ČSN P CEN /TS 12390-9 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování - Odlupování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [29] ČSN EN 14488-3 (73 1304) *Zkoušení stříkaného betonu - Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006. EAN: 8590963769554.
- [30] ČSN EN 14488 - 7 (73 1304) *Zkoušení stříkaného betonu - Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006. EAN: 8590963769578
- [31] ČSN 73 1318 (73 1318) *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1986. EAN: 8590963310855.
- [32] ČSN ISO 1920-10 (73 1319) *Beton - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 12/2014.
- [33] ČSN 73 1320 (73 1320) *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1988.
- [34] ČSN 73 1322 (73 1322) *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*.
- [35] ČSN 73 1326 (73 1326) *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*.
- [36] ČSN 73 2030 (73 2030) *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
- [37] ČSN EN 206 (73 2403) *Beton - Specifikace, výroba, vlastnosti a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [38] ČSN P 732452 (702452) *Vláknobeton - Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [39] ČSN EN 1992-2 (73 6208) *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2007.

- [40] Metodika 1 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014
- [41] Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014

Verze 2015