



TP 267

Technické podmínky

Ministerstvo dopravy

ULTRA VYSOKOHODNOTNÝ BETON (UHPC)

březen 2024



Ministerstvo dopravy



ŘEDITELSTVÍ
SILNIC
A DÁLNIC

Schváleno Ministerstvem dopravy, Odborem pozemních komunikací pod č. j. MD-8895/2024-940/2 ze dne 7.března 2024 s **účinností od 1.dubna 2024**.

Tento dokument se shoduje se schválenou verzí.

Distribuce pouze v elektronické podobě na webu pjk.rsd.cz.

Obsah

1	ÚVOD.....	5
1.1	Předmět technických podmínek	5
1.2	Vývoj UHPC.....	6
1.3	Související technické normy.....	6
1.4	Související metodiky TAČR	7
1.5	Související zahraniční předpisy	7
1.6	Použitá literatura.....	8
1.7	Termíny a definice.....	8
1.8	Značky a zkratky	9
2	MATERIÁL A ZKOUŠENÍ	12
2.1	Úvod	12
2.2	Klasifikace.....	13
2.2.1	Pevnost v tlaku.....	13
2.2.2	Pevnost v tahu za ohybu a v prostém tahu	14
2.2.3	Modul pružnosti.....	18
2.2.4	Stupeň vlivu prostředí.....	18
2.2.5	Konzistence a viskozita	19
2.3	Požadavky na UHPC a metody jejich ověřování.....	20
2.3.1	Základní požadavky na složky UHPC	20
2.3.2	Základní požadavky na složení UHPC.....	20
2.3.3	Požadavky na UHPC ve vztahu ke stupňům vlivu prostředí.....	20
2.3.4	Požadavky na čerstvý UHPC.....	21
2.3.5	Požadavky na ztvrdlý UHPC	22
2.4	Specifikace UHPC	23
2.4.1	Specifikace typového UHPC.....	23
2.4.2	Příklad specifikace UHPC	23
2.5	Dodávání čerstvého UHPC	24
2.6	Kontrola shody a kritéria shody	24
2.6.1	Kontrola shody pevnosti v tlaku	24
2.6.2	Kontrola shody pevnosti v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti.....	25
2.6.3	Kritéria shody pro trvanlivost	27
2.6.4	Kritéria shody pro jiné vlastnosti než výše uvedené.....	28
2.7	Řízení výroby	28
2.8	Hodnocení shody	28
2.9	Označování typového betonu	28
2.10	Průkazní zkoušky	29
2.10.1	Obecně.....	29
2.10.2	Podmínky průkazních zkoušek.....	29
2.10.3	Provedené zkoušky a zkušební tělesa z jedné záměsi průkazní zkoušky.....	29
2.10.4	Kritéria pro přijetí průkazních zkoušek	30

3	NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z UHPC	31
3.1	Úvod a vymezení platnosti.....	31
3.1.1	Materiálové vlastnosti UHPC pro účely navrhování	33
3.1.2	Charakteristiky UHPC v pružném stavu	34
3.1.3	Pevnost UHPC v tahu za ohybu.....	34
3.1.4	Pevnost UHPC v prostém tahu	35
3.1.5	Klasifikace UHPC z hlediska zbytkové pevnosti.....	35
3.2	Zásady pro navrhování	36
3.3	Mezní stav únosnosti	36
3.4	Dílčí součinitele spolehlivosti	37
3.5	Pracovní diagram napětí–přetvoření	38
3.5.1	Pracovní diagram pro UHPC v tlaku	38
3.5.2	Pracovní diagram pro UHPC v tahu.....	39
3.6	Vliv orientace výztužných vláken (drátků)	42
3.7	Ověření únosnosti a použitelnosti prvků z UHPC.....	43
3.7.1	Mezní stav únosnosti	43
3.7.2	Posouzení smyku.....	44
3.7.3	Posouzení na protlačení.....	45
3.7.4	Mezní stav použitelnosti	46
3.8	Časově závislé deformace	46
3.8.1	Dotvarování.....	47
3.8.2	Smršťování	47
3.9	Konstrukční pravidla pro navrhování prvků.....	47
3.10	Navrhování transportních úchytů	48
4	PROVÁDĚNÍ KONSTRUKCÍ Z UHPC	49
4.1	Management provádění.....	49
4.1.1	Předpoklady	49
4.1.2	Dokumentace.....	49
4.1.3	Management kvality	49
4.2	Bednění a podpěrné konstrukce.....	49
4.3	Vyztužování konstrukcí z UHPC.....	50
4.3.1	Betonářská výztuž	50
4.3.2	Předpínací výztuž	50
4.4	Betonáž prvků a konstrukcí.....	51
4.4.1	Práce před betonáží.....	51
4.4.2	Betonáž na existující konstrukci.....	51
4.4.3	Betonáž spojů betonových prvků	52
4.4.4	Doprava UHPC autodomíchávači.....	52
4.4.5	Ukládání a zhutňování UHPC	53
4.4.6	Ošetřování a ochrana UHPC po betonáži.....	53
4.5	Výroba prefabrikovaných dílců	54
4.6	Geometrické tolerance	54

4.7	Ověřování kvality výroby.....	54
4.7.1	Ověřování kvality prefabrikovaných dílců.....	54
4.7.2	Ověřování kvality monolitických prvků/konstrukcí	54
4.7.3	Ověřování kvality při rekonstrukcích	55
4.7.4	Požadavky na kontrolní zkoušky prováděné na stavbě	55
PŘÍLOHA 1	REKONSTRUKCE A ZESILOVÁNÍ	57
PŘÍLOHA 2	ROBOTICKÁ ADITIVNÍ FABRIKACE (3D TISK) UHPC	61

1 Úvod

1.1 Předmět technických podmínek

Tyto technické podmínky (dále jen TP) platí pro výrobu, navrhování a provádění konstrukcí z ultra vysokohodnotných betonů s všesměrně rozptýlenou vláknovou výztuží. Uvádějí rozšiřující ustanovení pro výrobu a zkoušení ultra vysokohodnotných betonů, zavádějí postupy návrhu a posouzení konstrukčních prvků a konstrukcí a stanovují pravidla pro jejich výrobu a kontrolu. Jsou určena pro aplikaci v České republice a pro materiály vyráběné z místních zdrojů. Mezinárodně je tento typ materiálu označován jako ultra-high-performance concrete (UHPC) nebo ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC).

Tyto TP jsou určeny pro ultra vysokohodnotné betony (dále jen UHPC), jejichž pevnostní třída přesahuje rámec ČSN EN 206+A2 [1]. Na ustanovení ČSN EN 206+A2 [1], doplňkovou ČSN P 73 2404 [2], systém evropských norem a některých dalších doplňujících českých norem tyto TP navazují a doplňují je.

Pokud jsou v textu TP uvedeny názvy a odkazy na legislativní dokumenty, ČSN, technické předpisy Ministerstva dopravy, případně jiné dokumenty, je uvedeno jejich základní označení s tím, že pro ně obecně platí dovětek „v platném znění“.

Návrhová pravidla respektují principy evropských návrhových norem a doplňují je tak, aby navržené konstrukce splňovaly požadavky na bezpečnost, použitelnost i hospodárnost. Pravidla pro provádění a kontrolu výroby konstrukčních prvků vycházejí z evropské normy, která má v ČR označení ČSN EN 13670 [12] a doplňují ji o další ustanovení vyvolaná zvláštním charakterem UHPC.

TP platí pro definitivní i dočasné konstrukce nebo jejich části vyráběné z UHPC blíže specifikovaného v kapitole Termíny a definice. Platí pro konstrukce prefabrikované i monolitické, popř. pro části konstrukcí vyráběné z UHPC, které souvisí s konstrukcemi z běžných betonů. Platí též pro rekonstrukce a zesilování betonových konstrukcí, a to pro ty části, kde UHPC se stávajícím betonem spolupůsobí.

Tyto TP platí pro navrhování prvků z UHPC s válcovou charakteristickou pevností v tlaku $f_{ck} \geq 110 \text{ N/mm}^2$ (MPa) a s charakteristickou pevností v prostém tahu $f_{ctk} \geq 4 \text{ N/mm}^2$ (MPa). Výroba UHPC se předpokládá z lokálně dostupných surovin nebo z předem prefabrikovaných suchých směsí. Využívá se přiměřené technologie míchání, dopravy a zpracování.

Využití UHPC se předpokládá zejména v následujících případech:

- prefabrikované nosné i nenosné konstrukční prvky,
- monolitické konstrukce,
- spoje konstrukčních prvků prováděné na stavbě,
- zesilování a opravy stávajících nosných konstrukcí,
- fasádní a dekorační prefabrikované prvky,
- prvky vyráběné robotickou fabrikací (3D tisk)¹⁾.

¹ Pro prvky vyráběné technologií 3D tisku viz příloha 2 těchto TP.

1.2 Vývoj UHPC

UHPC – ultra vysokohodnotný beton – se začal používat již během 90. let 20. století. Vznikal postupně v různých zemích. Postavila se řada konstrukcí, avšak stále neexistovaly dokumenty, které by definovaly požadavky na výrobu tohoto materiálu, navrhování a provádění konstrukcí. Teprve v druhé dekádě nového tisíciletí se objevily předpisy na národní úrovni (např. francouzské nebo švýcarské normy, pravidla FHWA v USA, návrhy Richtlinie v Německu a další). Dosud nebyla nalezena názorová shoda vedoucí k tomu, aby mohla vzniknout pravidla pro používání UHPC uznávaná mezinárodně. Avšak v novém fib Model Code 2020, který je v poslední fázi vývoje, bude kapitola upravující pravidla pro UHPC obsažena.

V České republice se z UHPC postavila již řada staveb na základě rozsáhlých zkoušek, čímž byly získány cenné zkušenosti. V rámci projektu Technologické agentury ČR TA010110269 byly vypracovány metodiky pro aplikaci UHPC [32], [33], [34], které byly v roce 2015 certifikovány Ministerstvem dopravy ČR. Protože v praxi nebylo možné používat mezinárodní předpisy, neboť dosud neexistují, připravila ČBS pro českou odbornou veřejnost vlastní rozšířená pravidla, která využívají zkušenosti nejen ze zahraničí, ale i z tuzemských realizací. Technická pravidla ČBS 07 Ultra vysokohodnotný beton [47] vydaná v roce 2022 navazují na tyto certifikované metodiky MD ČR.

Technická pravidla ČBS 07 byla podkladem pro tyto Technické podmínky TP 267. Protože jde stále o nový materiál, byla snaha formulovat pravidla pro jeho používání spíše mírně konzervativně. Předpokládá se, že po získání dalších zkušeností bude možné TP 267 modifikovat tak, aby lépe odpovídaly budoucí realitě a poskytovaly rámec pro návrh bezpečných, ekonomických a udržitelných konstrukcí.

1.3 Související technické normy

- | | | |
|------|-----------------|---|
| [1] | ČSN EN 206+A2 | Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda |
| [2] | ČSN P 73 2404 | Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace |
| [3] | ČSN EN 14651+A1 | Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost) |
| [4] | ČSN EN 14889-1 | Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda |
| [5] | ČSN EN 1990 | Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí |
| [6] | ČSN EN 1992-1-1 | Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby |
| [7] | ČSN EN 1992-2 | Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady |
| [8] | ČSN EN 14889-1 | Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda |
| [9] | ČSN EN 14488-1 | Zkoušení stříkaného betonu – Část 1: Odběr vzorků čerstvého a ztvrdlého betonu |
| [10] | ČSN EN 14488-7 | Zkoušení stříkaného betonu – Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu |
| [11] | ČSN P 73 2452 | Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu |
| [12] | ČSN EN 13670 | Provádění betonových konstrukcí |
| [13] | ČSN ISO 13822 | Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí |
| [14] | ČSN EN 12390-3 | Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles |
| [15] | ČSN EN 12390-13 | Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku |
| [16] | ČSN EN 1542 | Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou |

- [17] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí
- [18] ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku
- [19] ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích
- [20] ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost
- [21] ČSN EN 12350-8 Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím
- [22] ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou
- [23] ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)
- [24] ČSN 73 2030 Statické zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí
- [25] ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek
- [26] ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu
- [27] ČSN 73 1318 Stanovení pevnosti betonu v tahu
- [28] ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [29] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkoušení sednutím
- [30] ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles
- [31] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti

1.4 Související metodiky TAČR

- [32] KOLÍSKO, J. a kol. *Metodika 1 – Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky*. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Metodika certifikovaná MD ČR. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014.
- [33] KOLÍSKO, J. a kol. *Metodika 2 – Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Metodika certifikovaná MD ČR. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014.
- [34] KOLÍSKO, J. a kol. *Metodika 3 – Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Metodika certifikovaná MD ČR. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014.

1.5 Související zahraniční předpisy

- [35] *fib MC2010. fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Fédération Internationale du Béton. Lausanne, Switzerland; Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, 2013.
- [36] *fib Model Code 2020*. (draft 2023).
- [37] Francouzská norma NF P 18-470. *Concrete – UHPFRC – Specifications, performance, production and conformity*. 2016.
- [38] Francouzská norma NF P 18-710 NA to EC2. *Design of concrete structures: specific rules for UHPFRC*. 2016.
- [39] Francouzská norma NF P 18-451. *Concrete – Execution of concrete structures – Specific rules for UHPFRC*. 2018.
- [40] Švýcarská norma SIA 2052. *Ultra-High-Performance Fibre Reinforced Cement-based composites*. 2016.
- [41] Německé podklady. *DAfStb – Richlinie Ultrahochfester Beton*. (Entwurf 2022).
- [42] Americká norma ASTM C230/C230M. *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. 2013.
- [43] *Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay*. Publication No. FHWA-HRT-17-096. USA: Federal Highway Administration, September 2017.
- [44] *Ultra-High Performance Concrete for Bridge Deck Overlays*. Publication No. FHWA-HRT-17-097. USA: Federal Highway Administration, February 2018.

1.6 Použitá literatura

- [45] BRÜHWILER, E., DENARIÉ, E. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High-Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International*. IABSE. 2013, 23(4), pp. 450–457.
- [46] VÍTEK, J. L., BOHÁČEK, L., ČÍTEK, D., COUFAL, R. Experimentální ověření zesilování konstrukcí pomocí UHPC. In: *Sborník sympozia Mosty 2021. Brno 7.–8. 10. 2021*. S. 156–161. Sekurkon, 2021.
- [47] COUFAL, R., KALNÝ, M., KOLÍSKO, J., VÍTEK, J. L. Technická pravidla ČBS 07 Ultra vysokohodnotný beton (UHPC), 2022.

1.7 Termíny a definice

ultra vysokohodnotné betony (UHPC)

Běžné mezinárodní označení pro tento typ hmot je ultra-high-performance concrete (UHPC) nebo ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC). V rámci těchto TP je všude použito UHPC. Jedná se o kompozitní materiály s cementovou matricí, jemným plnivem a rozptýlenou výztuží ve formě kovových či nekovových všesměrně rozptýlených vláken, vzhledem k jejich rozměrům obvykle tzv. mikrovláken.

tahové zpevnění (*strain hardening*)

Chování UHPC, které zajistí přenos namáhání v tahu i po vzniku trhliny a vyčerpání tahové kapacity samotné matrice, přičemž po vzniku trhliny dochází ke zvyšování únosnosti UHPC. Dochází tedy k jevu, který je označován jako tahové zpevnění (obr. 1).

tahové zpevnění v rozsahu menších přetvoření (*low strain hardening*)

Tahové zpevnění UHPC, které je zajištěno v tažené oblasti po překročení meze úměrnosti ($w = 0,05$ mm) až do hodnoty rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm.

tahové zpevnění v rozsahu větších přetvoření (*high strain hardening*)

Tahové zpevnění UHPC, které je zajištěno v tažené oblasti při zkoušce v ohybu na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 [3] od hodnoty rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm do $CMOD_3 = 2,5$ mm.

tahové změkčení (*strain softening*)

Chování UHPC, které zajistí přenos namáhání v tahu i po vzniku trhliny a vyčerpání tahové kapacity samotné matrice. Po vzniku dochází náhle či postupně ke snižování únosnosti UHPC. Dochází k jevu, který je označován jako tahové změkčení (obr. 1).

ocelová vlákna (*steel fibres*)

Rovná nebo tvarovaná vlákna, oddělovaná z taveniny a protahovaná z drátu taženého za studena, nebo vlákna frézovaná z ocelových bloků, která jsou vhodná k homogennímu zamíchání do betonu nebo malty.

mikrovláčna (*microfibres*)

Ocelová nebo polymerová vlákna s průměrem $d_f \leq 0,3$ mm.

polymerová vlákna (*polymer fibres*)

Rovné nebo tvarované části extrudovaného, orientovaného, řezaného materiálu, které jsou vhodné k homogennímu zamíchání do betonu nebo malty.

dávka vláken (batch of fibres)

Procento objemu označované V_f , který vyplní použitá dávka vláken.

zbytková pevnost v tahu za ohybu (residual flexural strength)

Fiktivní napětí v konci vrubu, za předpokladu lineárního rozdělení napětí v průřezu uprostřed rozpětí bez trhlin na hranolu zatíženém uprostřed délky zatížením F_j , odpovídající $CMOD_j$, kdy $CMOD_j > CMOD_{FL}$, nebo δ_j , kdy $\delta_j > \delta_{FL}$ ($j = 1, 2, 3, 4$). Stanovuje se dle ČSN EN 14651 [3].

šířka rozevření trhliny naměřená na povrchu zkušebního tělesa (crack mouth opening displacement (CMOD))

Lineární deformace měřená tenzometrickým snímačem instalovaným na zkušebním tělese, které je uprostřed zatěžováno zatížením F . Stanovuje se dle EN 14651 [3].

jednotky napětí použité v těchto pravidlech – $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$ (units)

Značení jednotek napětí N/mm^2 v kap. 4 reflektuje označování jednotek dle normy pro výrobu betonu ČSN EN 206+A2 [1]. Značení jednotek napětí MPa v kap. 5 reflektuje označování jednotek dle norem pro navrhování ČSN EN 1992-1-1 [6] a ČSN EN 1992-2 [7].

1.8 Značky a zkratky**Velká písmena latinské abecedy**

A	průřezová plocha
A_c	průřezová plocha betonu
A_p	průřezová plocha předpínacích vložek, popř. předpínací vložky
A_s	průřezová plocha betonářské výztuže
E_{cm}	sečnový modul pružnosti betonu střední (průměrná hodnota)
E_{cd}	návrhová hodnota modulu pružnosti
E_p	návrhová hodnota modulu pružnosti předpínací oceli
E_s	návrhová hodnota modulu pružnosti betonářské oceli
F	zatížení
F_d	návrhová hodnota zatížení
F_k	charakteristická hodnota zatížení
F_{fc}	výslednice sil přenášených UHPC v tlaku
$F_{s,t}$	síla přenášená výztuží
$F_{fc,t}$	výslednice sil přenášená vlákny
F_{cd}	návrhová hodnota síly přenášené UHPC v tlaku
F_{sd}	návrhová hodnota síly přenášené výztuží
F_{fd}	návrhová hodnota síly přenášené vlákny
L	délka
L_f	délka vláken
M	ohybový moment
M_{Ed}	návrhová hodnota působícího vnitřního ohybového momentu
N	normálová síla
N_{Ed}	návrhová hodnota působící normálové síly (tah nebo tlak)
P	předpínací síla
MSP	mezní stavy použitelnosti
T	krouticí moment

T_{Ed}	návrhová hodnota krouticího momentu
MSÚ	mezní stavy únosnosti
V	posouvající síla
V_{Ed}	návrhová hodnota posouvající síly
V_{Rd}	návrhová únosnost průřezu ve smyku
$V_{Rd,c}$	návrhová únosnost ve smyku prvku bez smykové výztuže
$V_{Rd,s}$	návrhová hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu
$V_{Rd,f}$	příspěvek rozptýlené výztuže ke smykové únosnosti
V_{ccd}	návrhová hodnota smykové složky síly v tlakové oblasti v případě skloněného tlačného pásu
V_f	objemový podíl dávky vláken v % z celkového objemu směsi

Malá písmena latinské abecedy

a	vzdálenost
b	celková šířka průřezu, popř. skutečná šířka příruby průřezu T nebo L
b_w	šířka stojiny průřezu T , I nebo L
c	vzdálenost těžiště tažené výztuže od krajních vláken
$c_{min,b}$	minimální tloušťka betonové krycí vrstvy výztuže z hlediska soudržnosti
$c_{min,dur}$	minimální krycí vrstva výztuže s ohledem na trvanlivost
$\Delta c_{dur,y}$	přídavná bezpečnostní složka krycí vrstvy výztuže s ohledem na trvanlivost
d	účinná výška průřezu
d_f	průměr vláken
d_s	průměr betonářské výztuže
d_p	průměr předpínací výztuže
f_c	válcová pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
$f_{c,cube}$	krychelná pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
f_{cd}	návrhová pevnost betonu v tlaku
f_{ck}	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
f_{cm}	průměrná válcová pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
$f_{ck,cube}$	charakteristická krychelná pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
$f_{c,i}$	jednotlivý výsledek zkoušky válcové pevnosti betonu v tlaku
$f_{ct,f}$	pevnost betonu v tahu za ohybu (mez pevnosti v tahu za ohybu)
$f_{ct,f400}$	pevnost betonu v tahu za ohybu třibodovou zkouškou na trámci $100 \times 100 \times 400$ mm dle ČSN EN 12390-5 [30]
$f_{ct,f160}$	pevnost betonu v tahu za ohybu třibodovou zkouškou na trámci $40 \times 40 \times 160$ mm dle ČSN EN 196-1 [31]
$f_{ct,L,f}$	pevnost betonu v tahu za ohybu na smluvní mezi úměrnosti dle ČSN EN 14651 [3] odpovídající rozevření trhliny 0,05 mm
$f_{ctk,L,f}$	charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu na mezi úměrnosti
$f_{ctm,L,f}$	průměrná pevnost betonu v tahu za ohybu na mezi úměrnosti
$f_{ctm,f}$	průměrná pevnost betonu v tahu za ohybu
$f_{ctk,f}$	charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu
$f_{Ri,j}$	zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_i$ nebo průhybu δ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro jedno zkušební těleso
f_{Rim}	průměrná zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_i$ nebo průhybu δ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro sadu minimálně tří těles

f_{Rik}	charakteristická zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_i$ nebo průhybu δ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro sadu minimálně tří těles
f_{ct}	pevnost betonu v dostředném tahu
f_{ctm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu
f_{ctk}	charakteristická pevnost betonu v dostředném tahu
f_{Ftuk}	charakteristická hodnota limitní zbytkové pevnosti UHPC za předpokladu trhliny šířky $w_u = 1,5$ mm
f_{tu}	mez pevnosti betonu v prostém tahu
f_{yk}	charakteristická mez kluzu výztuže
h	celková výška průřezu
k	součinitel
k_F	součinitel orientace vláken
l (nebo L)	délka; rozpětí
m	hmota
t	tloušťka
t	uvažovaný časový okamžik
t_0	stáří betonu v okamžiku zatížení
u	obvod betonového průřezu o ploše A_c
w	šířka trhliny
x	vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačného okraje
x, y, z	souřadnice
z	rameno vnitřních sil

Malá písmena řecké abecedy

α_{ct}	součinitel vlivu délky zatížení
α_{cc}	součinitel pro vliv dlouhodobého zatížení na pevnost betonu v tlaku a pro konverzi mezi válcovou pevností a posuzovanou složkou pevnosti v tlaku
γ_M	dílčí součinitel vlastnosti materiálu, zahrnující nejistoty vlastností materiálu, geometrických odchylek a použitého výpočetního modelu
γ_c	dílčí součinitel pro beton v tlaku
γ_{cf}	dílčí součinitel spolehlivosti pro působení UHPC v tahu
γ_s	dílčí součinitel betonářské nebo předpínací oceli
δ	přírůstek; redistribuční poměr
ϵ_c	poměrné stlačení betonu
ϵ_{c1}	poměrné stlačení betonu při dosažení maximálního napětí f_c
ϵ_{cu}	mezní poměrné stlačení betonu
ϵ_{c2}	poměrné přetvoření UHPC pro návrhové hodnoty parametrů UHPC v tlaku
ϵ_{c2u}	poměrné přetvoření UHPC pro charakteristické hodnoty parametrů UHPC v tlaku a mezní poměrné přetvoření pro návrhový pracovní diagram
ϵ_{tc}	poměrné přetvoření při vzniku trhliny
ϵ_{tu}	poměrné přetvoření při dosažení meze pevnosti tahu
ϵ_{cs}	celkové smrštění
ϵ_{ca}	autogenní smrštění (obvykle 0,6 až 1 ‰)
ϵ_{cd}	smrštění od vysychání betonu
$\epsilon_{fc,max}$	hodnota maximálního přetvoření v tlačené oblasti průřezu
$\epsilon_{fc,t}$	hodnota maximálního přetvoření v tažené oblasti průřezu

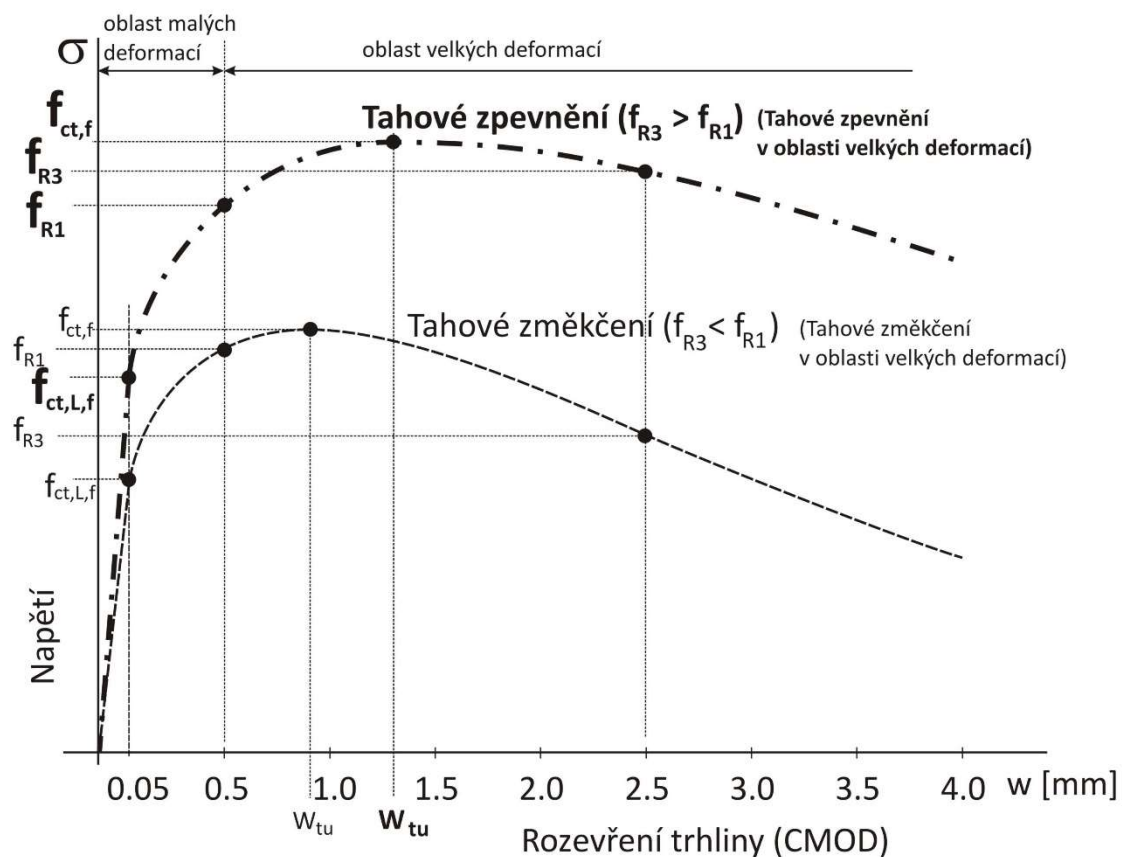
θ	úhel
ν	Poissonův součinitel
σ	napětí
σ_c	tlakové napětí v betonu
σ_{cf}	tahové napětí přenášené výztužnými vlákny v trhlíně
σ_{cfd}	upravená návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu
σ_{cfd0d}	návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu
$\varphi(t, t_0)$	součinitel dotvarování, kterým se definuje dotvarování mezi okamžiky t a t_0 , vztažený k pružné deformaci betonu ve stáří 28 dní
$\varphi(\infty, t_0)$	konečná hodnota součinitele dotvarování
$\cot \Theta$	sklon tlačené diagonály

2 Materiál a zkoušení

2.1 Úvod

Z hlediska mechanických vlastností jsou materiály označované jako UHPC definovány pro účely těchto TP charakteristickou válcovou pevností v tlaku $\geq 110 \text{ N/mm}^2$ (MPa) (tab.1), pevností v prostém tahu (tab. 2) a třídou zbytkové pevnosti (tab. 3). Současně jsou zde definovány dalšími užitečnými vlastnostmi, jako je vysoká trvanlivost a odolnost proti působení okolního prostředí. Vodní součinitel UHPC se pohybuje obvykle pod hranicí 0,25. UHPC je zkratkou běžného mezinárodního označení tohoto typu hmot ultra-high-performance concrete nebo ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC). V rámci těchto TP je všude používáno UHPC a přičemž je tím míněno UHPFRC.

Při navrhování prvků z UHPC se požaduje, aby rozptýlená výztuž zaručila dostatečnou zbytkovou pevnost materiálu i po vzniku trhlin a zajistila, že nedojde ke křehkému porušení materiálu ani prvku. Pro vyztužení pevné, ale křehké matrice UHPC a pro zvýšení tahových (lomových) vlastností tohoto materiálu je do směsi přidávána nekonvenční rozptýlená vláknová výztuž, a to zejména kovová (ocelová) vlákna. V závislosti na objemu a typu vláken je dosahováno různého typu duktilního chování, tj. tahového změkčení nebo tahového zpevnění (obr. 1).



Obrázek 1 – Ilustrativní pracovní diagramy zkoušky v tahu (tahu za ohybu) popisující variantní kvazi plastické chování UHPC s vlákny

Kde je:

$f_{ct,f}$	mez pevnosti betonu v tahu za ohybu,
$f_{ct,L,f}$	pevnost betonu v tahu za ohybu na mezi úměrnosti (při vzniku trhliny),
w_{tu}	rozevření trhliny při dosažení meze pevnosti,
přerušovaná křivka	tahové změkčení (<i>strain softening</i>),
čerchovaná křivka	tahové zpevnění (<i>strain hardening</i>).

2.2 Klasifikace

2.2.1 Pevnost v tlaku

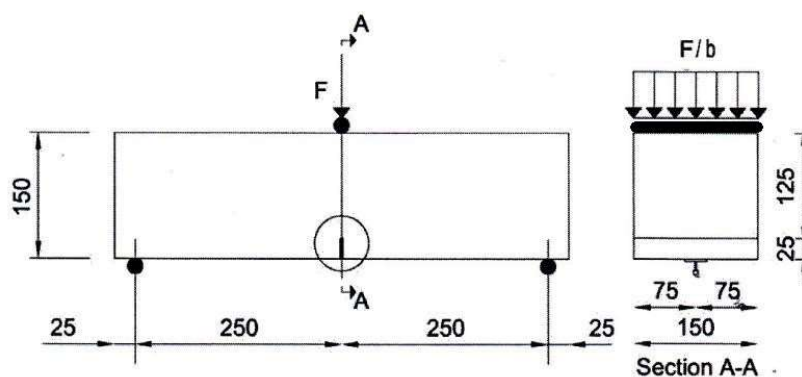
Těmito TP jsou pro ČR zaváděny třídy pevnosti UHPC dle tab. 1. Zkoušky se provádí podle ČSN EN 12390-3 [14]. Vzhledem k jemnozrnnosti UHPC a výraznému vlivu množství ocelových vláken na poměr tlakové pevnosti zjištěné na válcích a krychlích je jako referenční považována charakteristická pevnost v tlaku f_{ck} , stanovená na válcích o průměru 100 mm a výšce 200 mm koncovaných broušením. Čím vyšší je obsah ocelových vláken v materiálu, tím lze předpokládat menší rozdíl mezi krychelnou a válcovou pevností zkoušenou na standardních tělesech. Jako referenční těleso je proto pro průkazní i kontrolní zkoušky uvažován výše uvedený válec o rozměrech 100 × 200 mm. Koncování válců je výhradně broušením. Jiná tělesa lze použít pouze pro doplňkové zkoušky (např. vývoj pevnosti v čase) nad rámec těchto TP.

Tabulka 1 – Pevnostní třídy UHPC v tlaku (doplňující ČSN EN 206+A2 [1] tabulku 12)

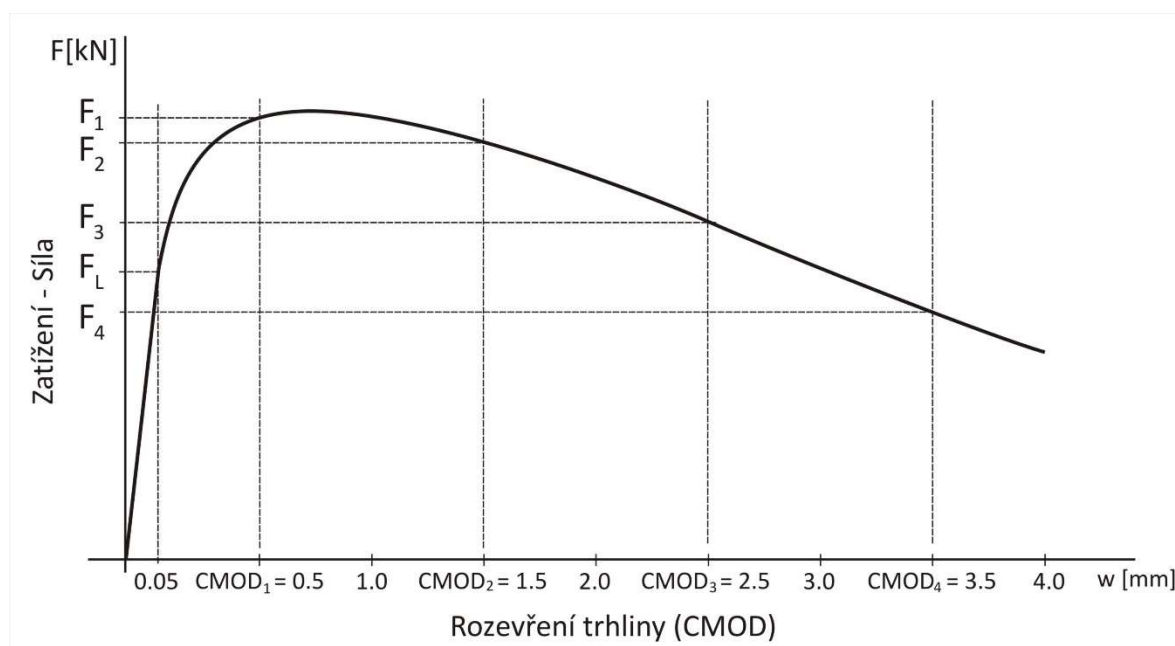
Třída Pevnosti v tlaku	Charakteristická válcová pevnost f_{ck} [N/mm ²]
C110	110
C120	120
C130	130
C140	140
C150	150
C160	160
C170	170

2.2.2 Pevnost v tahu za ohybu a v prostém tahu

Pro určení pevnostních charakteristik UHPC v tahu za ohybu a tahu se používá tříbodová zkouška v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651 [3] na trámci se vrubem, při níž je možné sledovat chování UHPC po vzniku trhliny a určit zbytkovou charakteristickou pevnost v tahu. Tato zkouška se provádí v rámci průkazných i kontrolních zkoušek (pokud nejsou použita alternativní tělesa dle kap. 2.6.2.3.1). Za referenční těleso pro tuto zkoušku se považuje pouze normový trámec o rozměrech 700 (550) × 150 × 150 mm (obr. 2). Vzhledem k uspořádání zkoušky je možno z důvodu snížení hmotnosti tělesa zkrátit délku referenčního trávce až na minimálně 550 mm. Toto platí pro celý následující text a toto těleso.



Obrázek 2 – Uspořádání zkoušky v ohybu na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 [3]



Obrázek 3 – Typický výsledek ohybové zkoušky na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 [3]

Ilustrace typického pracovního diagramu z ohybové zkoušky UHPC na normovém trámci je uvedena v grafu na obr. 3. Výpočet napětí v místě vrubu pro různé hodnoty $CMOD$ při zkoušce dle EN 14651 [3] lze stanovit ze vzorce:

$$f_{Ri,j} = 3 \cdot F_i \cdot l / (2 \cdot b \cdot h^2), \quad (1)$$

kde značení na obr. 2 a 3 a ve vzorci (1) znamenají:

- F_i síla při dosažení rozevření vrubu (trhliny) $CMOD$ definovaného zkušební normou ČSN EN 14651 [3],
- $f_{Ri,j}$ zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_j$ nebo průhybu δ_j ($i = 1, 2, 3, 4$) u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro jedno zkušební těleso,
- f_{Rim} průměrná zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_j$ nebo průhybu δ_j ($i = 1, 2, 3, 4$) u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro sadu minimálně tří těles,
- $CMOD_i$ rozevření vrubu $CMOD$ ($i = 1, 2, 3, 4$) definované zkušební normou ČSN EN 14651 [3] hodnotami 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm a 3,5 mm.
- F_L síla na mezi úměrnosti dle kap. 9.2 ČSN EN 14651 [3]. Hodnota zatížení na úrovni otevření trhliny = 0,05 mm,
- $f_{ct,L,f}$ pevnost betonu v tahu za ohybu na mezi úměrnosti odpovídající rozevření trhliny 0,05 mm,
- l vzdálenost podpor při zkoušce v tahu za ohybu. U zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] je 500 mm,
- h výška průřezu zkušební tělesa v místě v rubu, dle ČSN EN 14651 [3] je to 125 mm,
- b šířka průřezu zkušební tělesa v místě v rubu, dle ČSN EN 14651 [3] je to 150 mm.

Zkoušky v tahu za ohybu na trámečcích se vrubem dle ČSN EN 14651 [3] provedené na menších vzorcích (trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm nebo výjimečně 40 × 40 × 160 mm) prokazují podstatný vliv velikosti vzorku (*size effect*) na výsledek zkoušky. Obvykle je dosahováno vyšších hodnot, a to až v řádu desítek procent. Možnosti využití alternativních těles jsou uvedeny v kapitole 2.6.

Zjednodušeně lze charakteristickou pevnost UHPC v tahu za ohybu po vzniku trhliny $f_{ctk,f}$ (pro rozevření trhliny $CMOD_1$, a tedy sílu F_1) určit ze zkoušek provedených dle ČSN EN 14651 [3] na minimálně třech tělesech následujícím postupem.

Pro pevnosti $f_{R1,j}$ $CMOD_1 = 0,5$ mm se stanoví průměrná pevnost v tahu za ohybu dle vzorce:

$$f_{ctm,f} = f_{R1m} = \sum f_{R1,j} / n, \quad (2)$$

kde je:

- f_{R1m} průměrná hodnota zbytkové pevnosti betonu (UHPC) v tahu za ohybu pro rozevření vrubu $CMOD_1 = 0,5$ mm u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3],
- n počet zkoušek,
- $f_{R1,j}$ zbytková pevnost betonu (UHPC) v tahu za ohybu pro rozevření vrubu $CMOD_j = 0,5$ mm u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro jedno zkušební těleso ($j = 1, 2, \dots, n$),
- $f_{ctm,f}$ průměrná zbytková pevnost betonu (UHPC) v tahu za ohybu.

Charakteristická pevnost UHPC v tahu za ohybu se určí ze vzorce:

$$f_{ctk,f} = f_{R1k} = 0,7 \cdot f_{R1m}, \quad (3)$$

kde je:

- $f_{ctk,f}$ charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu,
- f_{R1k} charakteristická zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu při rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro sadu minimálně tří těles
- f_{R1m} průměrná zbytková pevnost v tahu za ohybu při velikosti rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] pro sadu minimálně tří těles.

Pro vyjádření třídy zbytkové pevnosti UHPC poměrem f_{R3m} / f_{R1m} (tab. 3) je nutné ze zkoušek vyjádřit i zbytkovou pevnost pro rozevření vrubu $CMOD_3 = 2,5$ mm. Při stanovení průměrné hodnoty f_{R3m} se postupuje dle stejného algoritmu uvedeného výše pro $CMOD_1$.

Převod charakteristické pevnosti v tahu za ohybu stanovené zkouškou na charakteristickou pevnost v dostředném (prostém) tahu se provede dle vzorce:

$$f_{ctk} = 0,5 \cdot f_{ctk,f}, \quad (4)$$

kde je:

- $f_{ctk,f}$ charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu,
- f_{ctk} charakteristická pevnost betonu v dostředném tahu.

Charakteristická hodnota pevnosti UHPC v dostředném tahu z ohybových zkoušek lze přímo vyjádřit ze vzorce:

$$f_{ctk} = 0,5 \cdot f_{ctk,f} = 0,35 \cdot f_{R1m}, \quad (5)$$

kde je

f_{ctk} charakteristická pevnost betonu v dostředném tahu,

$f_{ctk,f}$ charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu,

f_{R1m} průměrná hodnota zbytková pevnost betonu (UHPC) v tahu za ohybu pro rozevření vrubu $CMOD_1 = 0,5$ mm u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3].

Pro účely kontrolních zkoušek, příp. statických analýz lze z výsledků stanovit další limitní hodnoty. Tyto hodnoty jsou popsány v příslušných kapitolách.

2.2.2.1 Třídy pevnosti v prostém tahu

Za účelem specifikace pevnosti v prostém tahu jsou zavedeny třídy pevnosti v prostém tahu (tab. 2). Třída pevnosti v prostém tahu specifikuje předpokládanou charakteristickou hodnotu f_{ctk} , určenou pomocí výše uvedených vzorců aplikovaných na výsledky průkazní zkoušky tahu za ohybu dle ČSN EN 14651 [3] na trámčích o rozměrech $700 \times 150 \times 150$ mm se vrubem z parametru f_{R1k} .

Tabulka 2 – Třídy pevnosti v prostém tahu

Třída pevnosti v prostém tahu	Charakteristická pevnost betonu v prostém tahu $f_{ctk} = 0,5 \times f_{ctk,f}$ [N/mm ²]	Charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu $f_{ctk,f} = 0,7 \times f_{R1m}$ [N/mm ²]	Odpovídající průměrná hodnota zbytkové pevnosti betonu (UHPC) v tahu za ohybu při rozevření vrubu (trhlíny) $CMOD_1 = 0,5$ mm f_{R1m} [N/mm ²]
FR4	4	8	11,4
FR5	5	10	14,3
FR6	6	12	17,1
FR7	7	14	20,0
FR8	8	16	22,9
FR9	9	18	25,7
FR10	10	20	28,6

Přímá zkouška pevnosti betonu v prostém tahu je v poměrech ČR popsána v normě ČSN 73 1318 [27]. Tento postup však nepopisuje způsoby měření zbytkových pevností a pro měření pevnosti UHPC v prostém tahu se nedoporučuje.

2.2.2.2 Třídy zbytkové pevnosti

Klasifikace UHPC z pohledu tahu za ohybu je založena na 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 (f_{R1k}) a $CMOD_3 = 2,5$ mm (f_{R3k}).

Třída zbytkové pevnosti se popisuje poměrem mezi f_{R3k} / f_{R1k} . Jednotlivé třídy zbytkové pevnosti jsou popsány v tab. 3.

Tabulka 3 – Třídy zbytkové pevnosti

Třída zbytkové pevnosti	Požadavek na třídu	Koeficient zaručené zbytkové pevnosti K_R
A	$0,5 < f_{R3k} / f_{R1k}$	0,5
B	$0,7 \leq f_{R3k} / f_{R1k}$	0,7
C	$0,9 \leq f_{R3k} / f_{R1k}$	0,9
D	$1,1 \leq f_{R3k} / f_{R1k}$	1,1

Pro třídu zbytkové pevnosti *D* je vždy nutné zkoušet i pevnost v prostém tahu. Provedení zkoušky se musí zvolit tak, aby byla zaznamenána a vyhodnocena i zbytková pevnost. Zkoušku lze provést např. dle SIA 2052 Appendix D [40].

2.2.3 Modul pružnosti

V tab. 4 jsou uvedeny orientační střední hodnoty modulů pružnosti E_{cm} . Vzhledem k odlišnostem v recepturách je možný vysoký rozptyl hodnot. Pokud je třeba modul pružnosti zaručit, je nutné ho specifikovat, např. dle TP ČBS 05.

Tabulka 4 – Orientační předpokládaná střední hodnota modulů pružnosti UHPC dle pevnostní třídy

Třída pevnosti v tlaku	Předpokládaná střední hodnota modulu pružnosti E_{cm} [GPa]
C110	44
C120	45
C130	46
C140	47
C150	48
C160	49
C170	50

2.2.4 Stupeň vlivu prostředí

UHPC ve smyslu těchto TP a pevnostních tříd dle tab. 1 musí splňovat požadavky pro stupně vlivu prostředí dle tab. 5.

Tabulka 5 – Splněné stupně vlivu prostředí

Třída betonu	C110, C120, C130, C140, C150, C160, C170
XC1–4	x
XD1–3	x
XF1–4	x
XA1	x
XA2–3	x ¹⁾
XM1–3	x
¹⁾ Pokud množství SO ₂ vyvolává stupeň vlivu prostředí XA2 nebo XA3, je nezbytné použít síranovzdorný cement SR dle EN 197-1, příp. použít vhodný sekundární ochranný povlak.	

Konkrétní vlivy prostředí působící na konstrukci musí být specifikovány projektem.

V případě působení kyselých prostředí rozpouštějících cementový tmel je nezbytné využít vhodný ochranný sekundární povlak.

2.2.5 Konzistence a viskozita

Vhodná konzistence a viskozita UHPC musí zajistit, že směs UHPC dobře vyplní předpokládanou formu, nebo umožní ukládku do spádu a nedojde k segregaci směsi, tj. např. sedání vláken. Tyto parametry se specifikují pouze v případech, kdy je to třeba, a specifikuje je většinou ten účastník výstavby, který konstrukci provádí ve spolupráci s dodavatelem směsi. Konzistence a viskozita se specifikují na základě způsobu provádění konstrukce z UHPC, a to dle ČSN EN 206+A2 [1] nebo doplňkově dle tab. 6 a 7 uvedených níže.

Skupina konzistence se může doplňkově specifikovat následovně:

- samozhutnitelný UHPC (K1)** – ukládaný bez vibrace a bez mechanického usměrnění toku,
- viskózní UHPC (K2)** – běžně ukládaný bez nutnosti vibrace, pouze za mechanického usměrnění toku,
- tixotropní UHPC (K3)** – ukládaný za pomoci vibrace, příp. za mechanického usměrnění toku při možnosti ukládky ve spádu, doporučeno maximálně 2 %.
- Tixotropní UHPC (K4)** pro vyšší spády – ukládaný za pomoci vibrace do vrstev ve spádu, doporučeno maximálně 6 %. Před realizací je nutno domluvit přesnou konzistenci, na základě spádu a tloušťky vrstvy.

Tabulka 6 – Skupiny konzistence

Skupina	Klasifikace konzistence dle zkoušky sednutí-rozlitím dle ČSN EN 12350-8 [21]	Klasifikace konzistence sednutím kužele dle ČSN EN 12350-2 [29]	Klasifikace konzistence rozlitím bez poklepu při využití kužele dle ČSN EN 1015-3 [23], ASTM C230/C230M [42]
K1	SF3 (760–850 mm)	-	≥ 270 mm
K2	SF2 (660–750 mm)	-	230–270 mm
K3	SF1 (550–650 mm)	-	< 230 mm
K4	(300–550 mm)	S5 (≥ 220 mm) S4 (160–210 mm)	

V některých případech, zejména u tenkostěnných konstrukcí, je nutné stanovit maximální viskozitu směsi, při které ještě lze konstrukci správně probetonovat. Pro zkoušení viskozity lze použít platné předpisy pro samozhutnitelný beton, je však nutné stanovit meze splnitelné betonem UHPC. Vysoká viskozita směsí UHPC je dána zejména vysokým obsahem plastifikátorů a nízkým obsahem vody. Při snižování viskozity nesmí docházet k segregaci směsi. Pro stanovení viskozity se doporučuje použít stupeň viskozity t_{500} , stanovený při zkoušce sednutí-rozlítím dle ČSN EN 12350-8 [21]. Stupeň viskozity se stanoví dle maximální doby trvání rozlití Abramsova kužele na průměr 500 mm.

Tabulka 7 – Příklady stupňů viskozity

Stupeň viskozity	t_{500} zkoušený dle EN12350-8 [21]
VS10	< 10 s
VS15	< 15 s
VS20	< 20 s
VS25	< 25 s
VS30	< 30 s

2.3 Požadavky na UHPC a metody jejich ověřování

2.3.1 Základní požadavky na složky UHPC

Pro UHPC dle těchto TP se musí použít složky dle kap. 5.1 ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2]. Při použití speciálních složek mimo rozsah těchto norem se musí jejich vhodnost prokázat v rámci průkazných zkoušek. Regenerované kamenivo, recyklované kamenivo a kalová voda nejsou povoleny. Všeobecně jsou na složky UHPC kladeny ty nejvyšší nároky, zejména na rovnoměrnost kvalitativních parametrů v čase.

2.3.2 Základní požadavky na složení UHPC

Složení UHPC je od běžného betonu velmi odlišné. UHPC je jemnozrnný materiál, v němž zrno kameniva může mít maximálně 8 mm ($D_{max} 8$). Velká část používaných směsí UHPC je ale jemnozrnější a hrubé kamenivo vůbec neobsahuje ($D_{max} 4$, $D_{max} 2$).

Zásadní je ověření kompatibility všech složek, zejména cementu a plastifikační přísady. Cementy jsou voleny z běžného výrobního sortimentu cementáren, avšak s ohledem na použití pro UHPC.

Pro UHPC je standardní využití křemičitého úletu. Vodní součinitel, spočtený dle ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2], se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,25.

Dávka plastifikační přísady je výrazně vyšší než u běžných betonů.

2.3.3 Požadavky na UHPC ve vztahu ke stupňům vlivu prostředí

Všechny navržené směsi UHPC musí dle těchto TP splnit požadavky na veškeré stupně vlivu prostředí uvedené v tabulkách F.1.1 a F.1.2 ČSN P 73 2404 [2] (též kap. 2.2.4 těchto TP). Výjimkou je provzdušnění, neboť provzdušňování UHPC se nepředpokládá. Odolnost proti vlivům prostředí je zajištěna hutností UHPC.

Maximální průsak vody při zkoušce dle ČSN EN 12390-8 [22] činí 5 mm pro všechny typy UHPC dle těchto TP. Standardně by měl být maximální průsak do 1 mm. Hranice maximálního průsaku 5 mm je

stanovena např. pro případ imperfekce zkušebního tělesa. Maximální průsak se však standardně nezkouší kvůli problémům s rozlomením vláknů hustě vyztužené krychle.

Odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) je požadována při zkoušce dle ČSN 73 1326 [25] (metoda / počet cyklů / odpad) a činí maximálně A/100/200 nebo C/75/200 g/m².

2.3.4 Požadavky na čerstvý UHPC

2.3.4.1 Zpracovatelnost UHPC

Z pohledu zpracovatelnosti UHPC jsou klíčové následující parametry:

2.3.4.1.1 Konzistence

Konzistence UHPC se může po dohodě mezi dodavatelem a odběratelem měřit i specifikovat všemi metodami pro beton i potěry a malty. Doporučuje se specifikace skupinou konzistence dle kap. 2.2.5. Jako základní způsoby zkoušení konzistence se předepisují následující metody, použité pro zařazení UHPC do skupin konzistence dle tab. 6:

- klasifikace konzistence dle sednutí-rozlitím dle ČSN EN 12350-8 [21]
Tato metoda je vhodná pro všechny typy UHPC. Výhodou je kromě změření konzistence i zjištění t_{500} a zařazení dle stupně viskozity v rámci jedné zkoušky. Provedení této zkoušky je nutné minimálně v rámci průkazných zkoušek. Nevýhodou zkoušky je její vyšší náročnost.
- klasifikace konzistence rozlitím bez poklepu při použití kuželu dle ČSN EN 1015-3 [23] a ASTM C230/C230M [42]
Tato metoda je vhodná zejména jako kontrolní zkouška během produkce UHPC díky své nízké náročnosti. Pomocí této zkoušky však standardně nedokážeme kontrolovat viskozitu směsi.
- klasifikace konzistence sednutím kužele dle ČSN EN 12350-2 [29]
Tato metoda je použitelná pro UHPC skupiny konzistence K4, která je určená pro vyšší spády. Pro zvýšení přesnosti se doporučuje kromě sednutí kužele měřit i průměr sednutého kužele.

2.3.4.1.2 Viskozita

Pro stanovení viskozity se doporučuje použít stupeň viskozity t_{500} , stanovený při zkoušce sednutí-rozlitím dle ČSN EN 12350-8 [21]. Stupeň viskozity se stanoví hodnotou, která udává maximální dobu rozlití Abramsova kužele na průměr 500 mm. Měření viskozity poskytuje lepší nástroj pro přejímku UHPC než běžné stanovení konzistence. V rámci přípravy stavby a průkazných zkoušek je vhodné zaslavnit přiměřený stupeň viskozity (dle tab. 7) pro danou recepturu UHPC a betonovanou konstrukci.

2.3.4.1.3 Stabilita směsi

Čerstvý UHPC musí být dostatečně stabilní, aby nedocházelo k segregaci ocelových vláken a případného hrubého kameniva.

2.3.4.1.4 Doba zpracovatelnosti

Nestandardní doba zpracovatelnosti musí být předem dohodnuta mezi dodavatelem a odběratelem a odzkoušena v rámci průkazných zkoušek. Pokud není specifikováno jinak, musí být zajištěna zpracovatelnost UHPC minimálně 90 min.

2.3.4.2 Vodní součinitel

Maximální vodní součinitel UHPC ve smyslu těchto TP činí 0,25. Výpočet vodního součinitele se provádí dle kap. 5.4.2 ČSN EN 206+A2 [1].

2.3.4.3 Obsah vzduchu

Obsah vzduchu se nemusí stanovovat, protože se výroba provzdušněného UHPC nepředpokládá. Odolnost UHPC proti vlivům prostředí je zajištěna hutností materiálu.

2.3.4.4 Obsah vláken

Standardní UHPC obsahuje pro dosažení dostatečné duktility minimálně 1,5 % ocelových vláken z objemu betonu ($V_f = 1,5 \%$, tj. 120 kg/m^3).

V případě použití jiných vláken, než níže popsaných ocelových musí být dosaženo minimálně třídy pevnosti v prostém tahu FR4 a zbytkové třídy pevnosti A dle tab. 2 a 3. Použití jiného typu vláken, než ocelových musí být buď výslovně uvedeno v projektové dokumentaci, nebo musí být odsouhlaseno autorem projektové dokumentace.

Ocelová vlákna mohou být použita v nižší dávce pouze v případech, kdy je to ve specifikaci v projektové dokumentaci výslovně uvedeno. Vždy však musí být dosaženo minimálně třídy FR4 a zbytkové třídy pevnosti A dle tab. 2 a 3.

Ocelová vlákna musí splňovat následující parametry:

- délka $L_f = 8 \div 18 \text{ mm}$,
- průměr $d_f \leq 0,3 \text{ mm}$,
- štíhlostní poměr $L_f / d_f > 55$.

2.3.5 Požadavky na ztvrdlý UHPC

2.3.5.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku UHPC se stanovuje na válcích 100/200 mm koncovaných broušením (referenční těleso pro pevnost v tlaku). Tato tělesa nahrazují tělesa uvedená v kap. 5.5.1 ČSN EN 206+A2 [1]. Pevnost v tlaku zjištěná na válcích 100/200 mm koncovaných broušením je přímo použitelná pro hodnocení shody vyráběného UHPC bez redukujících součinitelů. Tato pevnost je vyjádřena jako f_c . Postup výroby zkušebních těles, jejich ošetřování a zkoušení je stejný, jako je uvedeno v kap. 5.5.1 ČSN EN 206+A2 [1].

Pevnost v tlaku zjištěná na jiných tělesech, než referenčních může být použita pouze pro doplňkové zkoušky nad rámec požadavků těchto TP. Základní četnost odběrů na referenčních tělesech musí být zachována.

2.3.5.2 Pevnost v tahu

Pro zjištění pevnosti v tahu se používá tříbodová zkouška v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651 [3] na trámci o rozměrech $700 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ se vrubem (referenční těleso pro pevnost v tahu za ohybu), kde je možné sledovat chování UHPC po vzniku trhliny a určit zbytkovou charakteristickou pevnost v tahu. Pomocí této zkoušky se UHPC zařazuje do příslušné třídy pevnosti v prostém tahu (kap. 2.2.2.1) a třídy zbytkové pevnosti (kap. 2.2.2.2). U velmi tenkostěnných konstrukcí lze místo ohybové zkoušky

dle ČSN EN 14651 [3] odzkoušet přímo navrhovaný prvek např. dle ČSN EN 1990 přílohy D a/nebo dle ČSN 73 2030 [24] a výsledek zkoušek vyhodnotit dle její přílohy B.

2.3.5.3 Objemová hmotnost

Postupuje se dle kap. 5.2.2 ČSN EN 206+A2 [1]. Dle této normy a zatřídění UHPC dle objemové hmotnosti se standardně jedná o obyčejný beton. Běžná objemová hmotnost UHPC se pohybuje v rozmezí $2\,450 \pm 100 \text{ kg/m}^3$. Objemovou hmotnost výrazně ovlivňuje použitá dávka ocelových vláken.

2.3.5.4 Odolnost UHPC (vodonepropustnost a CHRL)

U UHPC se předpokládá řádově vyšší odolnost proti vlivům prostředí, než je tomu u běžného betonu. Pro ověření odolnosti je vhodná zkouška odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326 [25].

Zkouška maximálního průsaku tlakovou vodou se neprovádí vzhledem k vyztužení UHPC ocelovými vlákny a obtížnému rozlomení tělesa pro vyhodnocení zkoušky. Zkoušku maximálního průsaku nahrazuje zkouška odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326 [25]. Pokud tato zkouška vyhoví, považuje se UHPC za vodonepropustný materiál.

2.4 Specifikace UHPC

2.4.1 Specifikace typového UHPC

Specifikace UHPC probíhá obecně dle kap. 6.1 norem ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2]. Specifikace UHPC je oproti výše uvedeným normám rozdílná v následujících bodech:

- třída pevnosti v tlaku se specifikuje dle tab. 1,
- třída pevnosti v tahu se specifikuje dle tab. 2,
- třída zbytkové pevnosti se specifikuje dle tab. 3,
- konzistenci a viskozitu lze specifikovat dle kap. 2.3 nebo dle jiných platných norem pro specifikaci konzistence a viskozity.

Specifikace UHPC může navíc obsahovat požadavek na úpravu povrchu UHPC do spádu a hodnotu spádu volného povrchu nebo jiná specifika při ukládce UHPC.

2.4.2 Příklad specifikace UHPC

Zde jsou uvedeny příklady, jak může vypadat specifikace pro různé typy konstrukcí. Konkrétní hodnoty musí být stanoveny projektovou dokumentací. Jedná se pouze o ilustrativní příklady.

- UHPC pro segment lávky s volným horním povrchem segmentu:
UHPC dle ČSN EN 206+A2 [1], ČSN P 73 2404 [2] a TP 267 UHPC
C120 – FR6-A – XF4 – CI 0,2 – D_{max} 8 – K2.
- UHPC pro tenkostěnný segment lávky s uzavřenou formou:
UHPC dle ČSN EN 206+A2 [1], ČSN P 73 2404 [2] a TP 267 UHPC
C130 – FR8-B – XF4 – CI 0,2 – D_{max} 4 – K1 – VS10.

- c) UHPC pro sanační tenkovrstvé zesílení mostovky. Nutná ukládka povrchu do spádu:
UHPC dle ČSN EN 206+A2 [1], ČSN P 73 2404 [2] a TP 267 UHPC
C120 – FR10-B – XF4 – CI 0,2 – D_{max} 2 – K3 – ukládka do spádu 2 %.

2.5 Dodávání čerstvého UHPC

Dodávání UHPC se plně řídí kap. 7 ČSN EN 206+A2 [1].

2.6 Kontrola shody a kritéria shody

2.6.1 Kontrola shody pevnosti v tlaku

2.6.1.1 Obecně

Kontrola shody probíhá obecně dle kap. 8 ČSN EN 206+A2 [1]. Pro UHPC dle těchto TP se oproti ČSN EN 206+A2 [1] nerozlišují četnosti odběrů dle počáteční a průběžné výroby. Stejně tak lze tento beton vyrábět pouze na provozovnách se zavedeným a kontrolovaným systémem řízení výroby. Pro kontrolu shody nesmí být použita koncepce souboru betonů.

2.6.1.2 Plán odběru vzorků a zkoušek

Vzorky jsou odebírány dle kap. 8 norem ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2]. Minimální četnost odběru vzorků pro posouzení shody ve výrobě je ale stanovena v tab. 8 těchto TP. Jako referenční těleso pro zkoušku pevnosti v tlaku se používá válec o průměru 100 mm a výšce 200 mm koncovaný broušením. Pro kontrolu vývoje pevnosti v čase nebo jiné doplňkové zkoušky se mohou použít i libovolná jiná tělesa. Minimální četnost zkoušek na referenčním tělese dle tab. 8 však musí být zachována.

Tabulka 8 – Minimální četnost odběru vzorků pro posouzení shody pevnosti v tlaku

Těleso	Minimální četnost časová	Minimální četnost objemová
válec 100 × 200 mm koncovaný broušením	1 těleso během 1 dne výroby UHPC	1 těleso / 12 m ³

2.6.1.3 Kritéria shody pro pevnost v tlaku

Jako kritéria pro hodnocení shody pevnosti v tlaku se použijí kritéria shody z kap. 8.2.1.4 ČSN P 73 2404 [2]. Kritéria jsou shrnuta v tab. 9. V případě odběru více těles z jedné dodávky je za jeden výsledek považován jejich průměr. V případech, kdy je od jedné hodnocené receptury méně než “n = 3” výsledků, hodnotí se pouze dle kritéria 2.

Tabulka 9 – Kritéria shody válcové pevnosti v tlaku

Počet „n“ výsledků ve skupině	Kritérium 1 průměr „n“ po sobě jdoucích výsledků (f_{cm}) [N/mm ²]	Kritérium 2 každý jednotlivý výsledek zkoušky (f_{ci}) [N/mm ²]
3	$\geq f_{ck} + 5$	$\geq f_{ck} - 5$

2.6.2 Kontrola shody pevnosti v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti

2.6.2.1 Obecně

Pro kontrolu shody pevnosti v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti se používá tříbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu. Stanovuje se dle ČSN EN 14651 [3] na trámci o rozměrech $700 \times 150 \times 150$ mm se vrubem. Naměřené hodnoty se porovnávají s hodnotami uvedenými v tab. 2 a 3 těchto TP. Při provádění alternativních zkoušek dle kap. 2.6.2.3.1. se použije hodnocení dle tabulek 12 a 13 v závislosti na použitých tělesech.

2.6.2.2 Plán odběru vzorků a zkoušek

Vzhledem k náročnosti výroby těles a zkoušení postačuje odebrat pro jeden zkušební odběr pouze jedno těleso (trámec o rozměrech $700 \times 150 \times 150$ mm). Při výrobě těles je třeba dbát na homogenizaci UHPC před ukládkou do formy. Minimální četnost odběrů je uvedena v tab. 10.

Tabulka 10 – Minimální četnost odběru vzorků pro posouzení shody pevnosti v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti

Těleso	Minimální četnost časová	Minimální četnost objemová
trámec $700 \times 150 \times 150$ mm ^{a)}	1 těleso během 4 kalendářních týdnů	1 těleso / 50 m ³

Pozn: ^{a)} pro alternativní tělesa platí kap. 2.6.2.3.1

2.6.2.3 Kritéria shody pro pevnost v tahu za ohybu

Kontrola shody pevnosti UHPC v tahu za ohybu probíhá porovnáním naměřených výsledků dle ČSN EN 14651 [3] s hodnotami v tab. 2. Jednotlivý naměřený výsledek pevnosti v tahu za ohybu při rozevření trhliny 0,5 mm f_{R1} se posoudí dle kritéria 2 v tab. 11. Průměrná hodnota pěti po sobě jdoucích výsledků f_{R1} se posoudí dle kritéria 1 v tab. 11. V případech, kdy je od jedné hodnocené receptury méně než "n = 5" výsledků, hodnotí se pouze dle kritéria 2.

Tabulka 11 – Kritéria shody pro pevnost v tahu za ohybu

Počet „n“ výsledků ve skupině	Kritérium 1 průměr „n“ výsledků (f_{R1}) [N/mm ²]	Kritérium 2 každý jednotlivý výsledek zkoušky ($f_{R1,j}$) [N/mm ²]
5	$\geq f_{ctk,f} + 1,5$	$\geq f_{ctk,f} - 1,5$

V rámci kontrolních zkoušek se vyhodnocuje i smluvní mez úměrnosti $f_{ctk,L,f}$ (zatížení při rozevření trhliny 0,05 mm) pokud se nepostupuje dle kap. 2.6.2.3.1. Tato hodnota je ale pouze informativní a neposuzuje se u ní shoda.

2.6.2.3.1 Alternativní metody pro kontrolu shody pevnosti v tahu za ohybu

Alternativní metodu pro kontrolu shody lze použít pro třídy zbytkové pevnosti A a B, pokud to není ve smluvní dokumentaci pro konkrétní stavbu zakázáno. V případě použití alternativní metody se kontroluje pouze pevnost v tahu za ohybu, kontrola třídy zbytkové pevnosti se neprovádí.

Jako alternativní metodu lze použít zkoušku pevnosti v tahu za ohybu na trámci o rozměrech 400 × 100 × 100 mm dle ČSN EN 12390-5 [30] nebo na trámečkách o rozměrech 160 × 40 × 40 mm dle ČSN EN 196-1 [31]. Místo jednoho kusu předepsaného trámce o rozměrech 700 × 150 × 150 mm lze vyrobit jeden trámec rozměru 400 × 100 × 100 mm nebo sadu tří rámečků o rozměrech 160 × 40 × 40 mm. Výsledkem zkoušky sady tří trámečků je průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu. Všechny typy trámců jsou zatěžovány 3 bodovým ohybem. U trámců délky 160 mm a 400 mm se na tělesech neprovádí vrub. Kritéria shody pro alternativní trámce rozměrů 400 × 100 × 100 mm jsou uvedena v tabulce 12 a kritéria shody pro alternativní trámečky rozměrů 160 × 40 × 40 mm jsou uvedena v tabulce 13.

Alternativní shodu je možno použít pouze tehdy, má-li výrobce v rámci kontrolních nebo průkazných zkoušek stanovený poměr mezi standardní a alternativní metodou. Tento poměr musí být stanovený minimálně na 3 tělesech od každé zkoušky, na alespoň jedné záměsi dané receptury, nebo na 1 tělese od každé zkoušky, na alespoň třech záměsích dané receptury. Tento součinitel je ale pouze informativní, pro přepočet výsledku na výsledek na referenčním tělese se použije redukující součinitel z tabulky 12 nebo 13.

Tabulka 12 – Kritéria shody pro pevnost v tahu za ohybu – alternativní tělesa rozměrů 400 × 100 × 100 mm, zkouška dle ČSN EN 12390-5 [30]

Třída pevnosti v prostém tahu	Charakteristická pevnost betonu v prostém tahu f_{ctk}	Charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu $f_{ctk,f}$	Kritérium 1 - průměr „n = 5“ výsledků $f_{ct,f400,m} \geq$ hodnota v tabulce	Kritérium 2 - každý jednotlivý výsledek zkoušky $f_{ct,f400,i} \geq$ hodnota v tabulce	Redukující součinitel k referenčním u tělesu
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
FR4	4	8	10,4	7,4	0,9
FR5	5	10	12,6	9,6	0,9
FR6	6	12	14,8	11,8	0,9
FR7	7	14	17,1	14,1	0,9
FR8	8	16	19,3	16,3	0,9
FR9	9	18	21,5	18,5	0,9
FR10	10	20	23,7	20,7	0,9

Tabulka 13 – Kritéria shody pro pevnost v tahu za ohybu – alternativní tělesa rozměrů 160 × 40 × 40 mm, zkouška dle ČSN EN 196-1 [31]

Třída pevnosti v prostém tahu	Charakteristická pevnost betonu v prostém tahu f_{ctk}	Charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu $f_{ctk,f}$	Kritérium 1 - průměr „n = 5“ výsledků $f_{ct,f160,m}$ ² hodnota v tabulce	Kritérium 2 - každý jednotlivý výsledek zkoušky $f_{ct,f160,i}$ ² hodnota v tabulce	Redukující součinitel k referenčním u tělesu
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
FR4	4	8	21,6	15,6	0,43
FR5	5	10	25,2	19,2	0,45
FR6	6	12	28,5	22,5	0,47
FR7	7	14	31,6	25,6	0,49
FR8	8	16	34,4	28,4	0,51
FR9	9	18	37,0	31,0	0,53
FR10	10	20	38,7	32,7	0,56

2.6.2.4 Kritéria shody pro třídu zbytkové pevnosti

Kontrola shody třídy zbytkové pevnosti UHPC v tahu za ohybu probíhá porovnáním naměřených výsledků dle ČSN EN 14651 [3] s hodnotami uvedenými v tab. 14. U jednotlivých výsledků kontrolních zkoušek dle ČSN EN 14651 [3] se vypočte poměr f_{R3}/f_{R1} . Tento poměr musí vyhovět kritériu 2 pro specifikovanou třídu zbytkové pevnosti uvedené v tab. 14. Průměrná hodnota z 5 po sobě jdoucích výsledků musí vyhovět kritériu 1 pro specifikovanou třídu zbytkové pevnosti uvedené v tab. 14. Shoda s požadovanou třídou zbytkové pevnosti je potvrzena tehdy, když je počet nevyhovujících výsledků pro určitý počet zkušebních výsledků menší nebo rovno přejímacímu číslu z tabulky 24 ČSN EN 206+A2 [1]. Pro třídy zbytkové pevnosti A a B se shoda zbytkové pevnosti nevyhodnocuje.

Tabulka 14 – Kritéria shody pro třídu zbytkové pevnosti v tahu

Třída zbytkové pevnosti	Koeficient zaručené zbytkové pevnosti K_R	Kritérium 1 - průměr „n = 5“ výsledků $f_{R3i}/f_{R1i} \geq$ hodnota v tabulce	Kritérium 2 - každý jednotlivý výsledek zkoušky $f_{R3i}/f_{R1i} \geq$ hodnota v tabulce
A	0,5	nehodnotí se	nehodnotí se
B	0,7	nehodnotí se	nehodnotí se
C	0,9	0,9	0,7
D	1,1	1,1	0,9

2.6.3 Kritéria shody pro trvanlivost

2.6.3.1 Obecně

Pro kontrolu trvanlivosti je předepsána zkouška odolnosti povrchu UHPC proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL) dle ČSN 73 1326 [25]. Tato zkouška je pro ověření dostatečné hutnosti UHPC (jako základního parametru tohoto materiálu) předepsána nezávisle na specifikovaném stupni vlivu prostředí.

V konkrétních případech, resp. na základě požadavku investora, je možné tuto zkoušku nahradit zkouškou mrazuvzdornosti dle ČSN 73 1322 [26] pro konstrukce bez možnosti výskytu CHRL. V tomto případě musí být systém kontroly shody dohodnut mezi odběratelem a dodavatelem UHPC na základě požadavků investora. V rámci průkazných zkoušek ale musí být v tomto případě provedeny obě zkoušky (dle ČSN 73 1326 [25] i ČSN 73 1322 [26]).

2.6.3.2 Plán odběru vzorků a zkoušek

Odběr vzorků i zkoušení probíhá dle ČSN 73 1326 [25]. Minimální četnost odběrů těles je uvedena v tab. 15.

Tabulka 15 – Minimální četnost odběru vzorků pro posouzení shody odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CHRL

Těleso	Minimální četnost časová	Minimální četnost objemová
válec 50 × 150 mm	1 těleso během 4 kalendářních týdnů výroby materiálu	1 těleso / 100 m ³

2.6.3.3 Kritéria shody pro trvanlivost

Výsledky zkoušek trvanlivosti musí vyhovět parametrům uvedeným v tab. 16.

Tabulka 16 – Kritéria shody pro trvanlivost

Metoda dle ČSN 73 1326 [25]	Počet cyklů	Maximální odpad [g/cm ²]
A	100	200
C	75	200

2.6.4 Kritéria shody pro jiné vlastnosti než výše uvedené

Kritéria shody pro jiné vlastnosti, než pevnost se definují individuálně mezi odběratelem a dodavatelem betonu před začátkem dodávání betonu. Pokud nejsou žádná dodatečná kritéria stanovena, postupuje se dle kap. 8.2.3 ČSN EN 206+A2 [1].

2.7 Řízení výroby

Řízení výroby UHPC se plně řídí kap. 9 norem ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2].

2.8 Hodnocení shody

Hodnocení shody UHPC se plně řídí kap. 10 norem ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2].

2.9 Označování typového betonu

Označování UHPC se řídí kap. 11 norem ČSN EN 206+A2 [1] a ČSN P 73 2404 [2] a kap. 2.4 těchto TP.

2.10 Průkazní zkoušky

2.10.1 Obecně

Průkazní zkouška má prokázat, že složení UHPC vyhoví specifikaci dle kap. 2.4. Průkazní zkoušky probíhají dle přílohy A uvedené v ČSN EN 206+A2 [1]. Odlišnosti a doplnění oproti ČSN EN 206+A2 [1] jsou uvedeny níže.

Postup provádění průkazních zkoušek se aplikuje na směsi připravované z lokálních surovin i na suché prefabrikované směsi.

2.10.2 Podmínky průkazních zkoušek

Průkazní zkoušky se provádí výhradně na míchacím zařízení, kde bude probíhat vlastní výroba.

Teplota čerstvého UHPC musí být zaznamenána. Požadovaná teplota není předepsána.

2.10.2.1 Průkazní zkouška jednotlivého UHPC

Pro průkazní zkoušku jednotlivého složení UHPC se musí vyzkoušet minimálně tři záměsi. Z každé záměsi se provedou zkoušky dle kap. 2.10.3. Výsledkem jedné záměsi je průměr naměřených hodnot ze všech vzorků (z jednoho typu zkoušky). Výsledkem průkazní zkoušky je průměr z hodnot jednotlivých záměsí.

2.10.2.2 Průkazní zkouška modelového složení

Při zkouškách modelového složení betonu se musí provést minimálně tři modelové záměsi. Maximální rozdíl mezi jednotlivými recepturami je následující:

- 100 kg/m³ cementu,
- 60 kg/m³ ocelových vláken,
- 50 kg/m³ křemičitého úletu.

Z každé záměsi se provedou zkoušky dle 2.10.3. Výsledkem jedné záměsi je průměr naměřených hodnot ze všech vzorků (z jednoho typu zkoušky). Výsledkem průkazní zkoušky je lineární závislost měřeného parametru na měnícím se obsahu dané složky (cement, ocelová vlákna, křemičitý úlet). Výsledné navrhované složení se získá interpolací v rámci stanovené lineární závislosti (na základě požadované hodnoty parametru). Extrapolace není povolena.

2.10.3 Provedené zkoušky a zkušební tělesa z jedné záměsi průkazní zkoušky

2.10.3.1 Zkoušky čerstvého betonu

Na čerstvém UHPC se provedou minimálně tyto zkoušky:

- čerstvá objemová hmotnost dle ČSN EN 12350-6 [20],
- teplota,
- konzistence a stupeň viskozity dle ČSN EN 12350-8 [21].

2.10.3.2 Pevnost v tlaku

Z každé záměsi se odeberou minimálně tři válce o rozměrech 100 × 200 mm pro provedení zkoušky pevnosti v tlaku ve stáří 28 dní. Válce jsou vždy koncovány broušením.

Doporučují se odebrat i další tělesa pro stanovení nárůstu pevnosti UHPC v čase. Doporučuje se stáří 2, 7 a 90 dní. Pokud je vývoj pevností měřen na jiných tělesech než na referenčních, je nutné na alternativním tělese zopakovat zkoušku i ve stáří 28 dní za účelem stanovení převodního součinitele. Jako alternativní těleso se doporučuje krychle o hraně 100 mm.

2.10.3.3 Pevnost v tahu za ohybu a zbytková pevnost

Pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti se odeberou minimálně tři trámce o rozměrech 700 × 150 × 150 mm na každou záměs. Trámce jsou zkoušeny třibodovou zkouškou v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651 [3].

2.10.3.4 Trvanlivost

Pro ověření odolnosti proti vlivům prostředí se odebere jedno těleso (dle použité metody) pro stanovení odolnosti proti vodě a CHRL dle ČSN 73 1326 [25]. V případě průkazní zkoušky jednotlivého UHPC (tři stejných záměsí) postačí odebrání jednoho zkušebního tělesa z jedné ze záměsí. V případě modelového složení se odebere vzorek ze všech provedených modelových záměsí (pokud se mění složení matrice betonu). Pokud se mění pouze množství ocelových vláken, stačí odebrat pouze jedno těleso z libovolné modelové záměsi.

2.10.3.5 Modul pružnosti

Pro ověření modulu pružnosti se z každé záměsi odeberou minimálně dva válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm (1× na zkoušku pevnosti v tlaku a 1× na zkoušku modulu pružnosti). Válce se koncují výhradně broušením. Zkouška probíhá dle ČSN ISO 1920-10 [28]. Pokud není modul pružnosti předepsaný ve specifikaci, jedná se pouze o hodnotu informativní.

2.10.3.6 Volitelné doplňkové zkoušky

Dle typu konstrukce mohou být požadovány doplňkové zkoušky (více v kap. 3 – objemové změny, vývoj pevností, vývoj teplot během hydratace atd.).

2.10.4 Kritéria pro přijetí průkazních zkoušek

2.10.4.1 Kritéria pro pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku jedné záměsi $f_{cm,i}$ musí splnit kritérium 2 uvedené v tab. 17. Průměrná hodnota ze tří záměsí průkazní zkoušky f_{cm} musí splnit kritérium 1 uvedené v tab. 17.

V případě modelového složení musí pevnost v tlaku každé jednotlivé záměsi $f_{cm,i}$ splnit kritérium 1 uvedené v tab. 17. S kritériem 1 se počítá i při interpolaci výsledků a odvozování finálních receptur.

Tabulka 17 – Kritéria pro přijetí průkazních zkoušek – válcová pevnost v tlaku

Kritérium 1 (f_{cm}) [N/mm ²]	Kritérium 2 ($f_{cm,i}$) [N/mm ²]
$\geq f_{ck} + 12$	$\geq f_{ck} + 5$

2.10.4.2 Kritéria pro pevnost v tahu za ohybu

Pevnosti UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651 [3] se porovnají s hodnotami uvedenými v tab. 2. Průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu jedné záměsi, při rozevření trhliny 0,5 mm ($f_{R1m,i}$), se posoudí dle kritéria 2 uvedeného v tab. 18. Průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu ze tří záměsí průkazní zkoušky f_{R1m} se posoudí dle kritéria 1 uvedeného v tab. 18. V případě modelového složení se všechny modelové záměsi posoudí dle kritéria 1 tabulky 18.

Tabulka 18 – Kritéria pro přijetí průkazních zkoušek – pevnost v tahu za ohybu

Kritérium 1 (f_{R1m}) [N/mm ²]	Kritérium 2 ($f_{R1m,i}$) [N/mm ²]
$\geq f_{ctk,f} + 3$	$\geq f_{ctk,f}$

V rámci průkazních zkoušek se vyhodnocuje i mez úměrnosti $f_{ctk,L,f}$ (zatížení při rozevření trhliny 0,05 mm). Charakteristická hodnota $f_{ctk,L,f}$ se stanoví jako 70 % průměrné hodnoty $f_{ctm,L,f}$. Tato hodnota je ale pouze informativní a neposuzuje se u ní dále shoda.

2.10.4.3 Kritéria pro zbytkovou pevnost

Hodnocení zbytkové pevnosti UHPC v tahu za ohybu probíhá porovnáním naměřených výsledků dle ČSN EN 14651 [3] s hodnotami uvedenými v tab. 3. U jednotlivých výsledků zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] se vypočte poměr f_{R3}/f_{R1} . Tento poměr musí vyhovět předepsané hodnotě pro specifikovanou třídu zbytkové pevnosti uvedené v tab. 3. Současně musí platit vzorec, že $f_{R1m} > 1,2 \cdot f_{ctm,L,f}$.

2.10.4.4 Kritéria pro trvanlivost

Výsledky zkoušek trvanlivosti musí vyhovět parametrům uvedeným v tab. 19.

Tabulka 19 – Kritéria pro přijetí průkazních zkoušek – trvanlivost

Metoda dle ČSN 73 1326 [25]	Počet cyklů	Maximální odpad [g/m ²]
A	100	100
C	75	100

3 Navrhování konstrukcí z UHPC

3.1 Úvod a vymezení platnosti

Z hlediska mechanických vlastností jsou materiály označované jako UHPC definovány pro účely těchto TP charakteristickou válcovou pevností v tlaku minimálně **110 MPa**, charakteristickou pevností v prostém tahu minimálně **4 MPa**, resp. charakteristickou pevností v tahu za ohybu minimálně **8 MPa** (tab. 2) a třídou zbytkové pevnosti minimálně **A** (tab. 3). Současně jsou zde definovány dalšími užitnými vlastnostmi, jako je vysoká trvanlivost a odolnost proti působení okolního prostředí. Vodní součinitel UHPC se pohybuje obvykle pod hranicí **0,25**.

Návrh prvků z UHPC využívá zbytkovou pevnost kompozitního materiálu po vzniku trhlin, kterou zajišťuje rozptýlená výztuž z vláken. Pro konstrukční použití musí být zaručeny minimální mechanické charakteristiky UHPC. Vlákná zlepšují chování materiálu v mezním stavu použitelnosti (MSP), protože zmenšují vzdálenosti a šířku trhlin, čímž se zlepší trvanlivost konstrukčního prvku. Vlákná také zlepšují

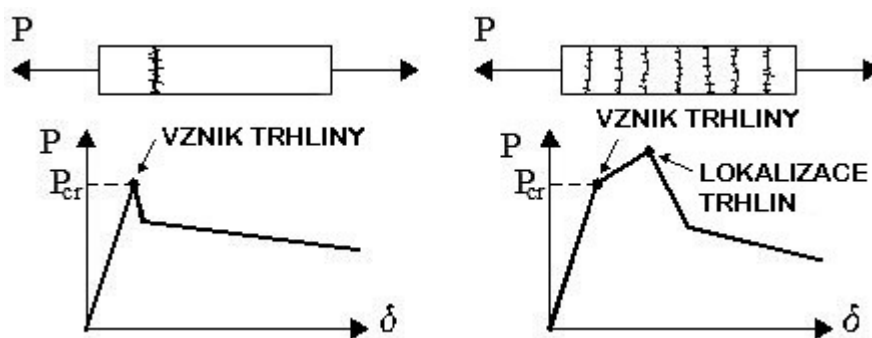
chování v mezním stavu únosnosti (MSÚ), neboť zvyšují únosnost, brání křehkému chování při porušení a zajišťují tažnost a houževnatost prvku. Rozptýlená vlákna mohou částečně nebo úplně nahradit betonářskou výztuž.

Přidáním vláken jsou upraveny mechanické vlastnosti cementové matrice, avšak elastické vlastnosti a pevnost v tlaku významně ovlivněny nejsou, pokud není použito vysoké procento vláken. Na rozdíl od výztužných prutů nebo svařovaných sítí se většina vláken při rozevření trhliny vytáhne, aniž by došlo k jejich přetržení. Vlákna jsou aktivní, jakmile se v betonu vytvoří mikrotrhliny.

Vlastnosti kompozitu závisí na parametrech základních složek materiálu, na jejich dávkování a také na dalších faktorech, jako je geometrie, objemový podíl a mechanické vlastnosti vláken. Vazba mezi vlákny a betonovou matricí a mechanické vlastnosti matrice významně ovlivňují vlastnosti UHPC. Pravidla v této kapitole jsou založena především na zkušenostech s UHPC vyztuženým ocelovými vlákny. U ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého jinými vlákny (polymery, karbon, sklo, bio vlákna) mohou platit další pravidla.

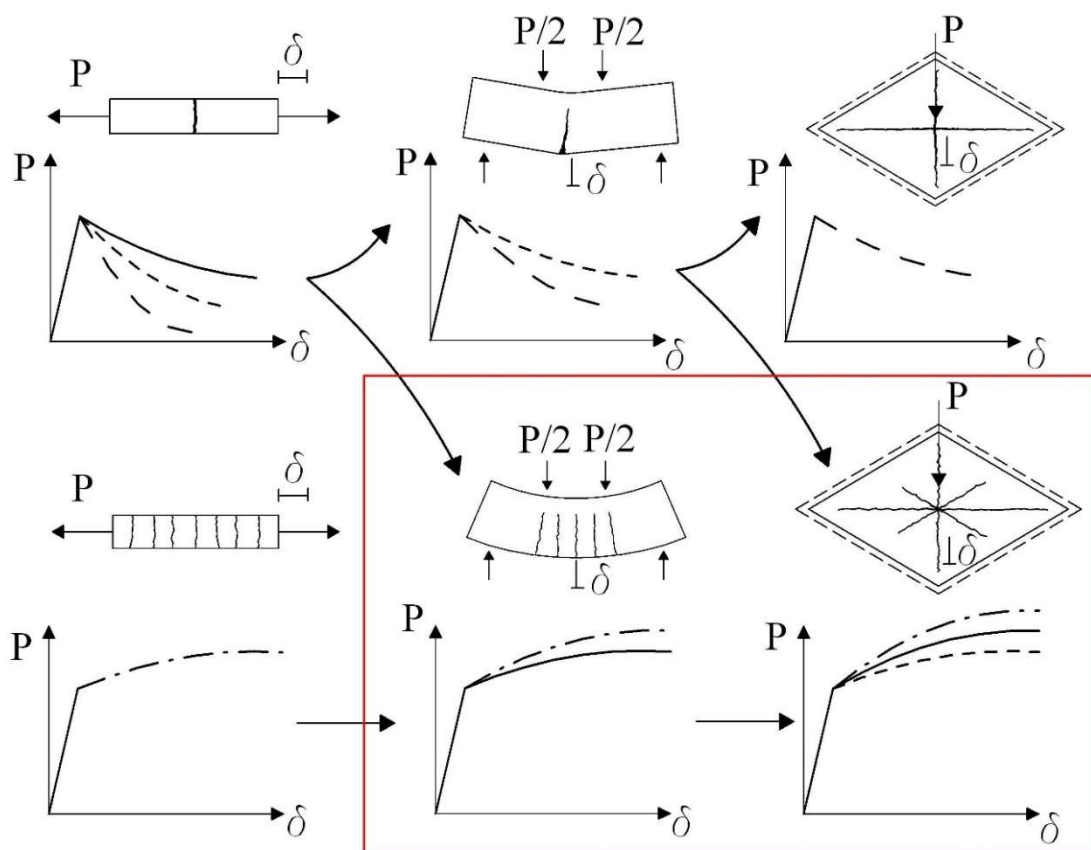
V rámci navrhování prvků UHPC je nutné reflektovat a zvažovat potenciálně velký rozptyl výsledků v souvislosti s použitými materiály, technologií výroby, tvarem forem, způsobem zpracování a lití betonové směsi, ale také v souvislosti se zkušebními metodami a velikostí vzorků. Statické působení UHPC je značně ovlivněno zejména orientací a anizotropní distribucí ocelových vláken.

V závislosti na svém složení může UHPC vykazovat rozdílné chování po vzniku první trhliny (kap. 2.1). V případě chování se změkčením (obr. 4a) se deformace lokalizují v jedné trhlíně. V případě chování se zpevněním (obr. 4b) dochází k vícenásobnému vzniku trhlin před dosažením maximální únosnosti při porušení prvku. Toto rozdílné chování při změkčení a zpevnění je zobrazeno na příkladu osově taženého prvku z UHPC (obr. 4).



Obrázek 4 – Chování UHPC: a) změkčení, b) zpevnění při jednoosém napětí

Schematické znázornění vztahu mezi různými prvky UHPC se změkčujícím chováním v prostém tahu může u ohýbaného trémového prvku odpovídat chování UHPC se zpevněním. UHPC se změkčením v ohybu u trému může vést u deskového prvku k zajištění monotónně rostoucího zatížení konstrukce v závislosti na její schopnosti redistribuce napětí, která závisí na systému podepření (obr. 5).



Obrázek 5 – Rozdílné chování prvků z UHPC v prostém (osovém) tahu a tahu za ohybu pro trémové a deskové prvky; návrh dle těchto TP má zajistit mechanické chování prvku dle schématu v rámečku

Použití UHPC bez betonářské výztuže pro konstrukční prvek zatížený pouze prostým osovým tahem se v těchto TP nepředpokládá. Na obr. 5 jsou v rámečku vyznačeny trémové a deskové prvky působící v ohybu, které je dle těchto TP možné navrhovat z UHPC i bez betonářské výztuže, protože vykazují tahové zpevnění.

U trémových a deskových konstrukčních prvků zatížených ohybem se požaduje zajistit chování UHPC se zpevněním po vzniku první trhliny v rozsahu menších přetvoření (*low strain hardening*). V oblasti větších přetvoření nesmí dojít ke křehkému porušení ani při rozevření trhliny $CMOD_3 = 2,5$ mm při ohybové zkoušce na zkušebním tělese s vrubem dle ČSN EN 14651 [3].

Bezpečnost konstrukčních prvků z UHPC musí být ověřena pro následující stavy:

- posouzení průřezů v mezních stavech únosnosti,
- posouzení konstrukce v mezním stavu použitelnosti (napětí nebo šířka trhlin, deformace, vibrace, únava),
- stabilita tenkostěnného prvku a konstrukce (posuzuje se podobně jako u ocelové konstrukce),
- posouzení styků a spojů (soudržnost, kotevní prvky, spojky).

3.1.1 Materiálové vlastnosti UHPC pro účely navrhování

Charakteristická pevnost UHPC v tlaku f_{ck} se určuje na válcích dle ČSN EN 12390-3 [14]. Referenční zkušební válce mají štíhlostní poměr 1 : 2 a průměr 100 mm.

Tabulka 20 – Souhrn minimálních parametrů UHPC dle návrhové třídy pevnosti

Třída UHPC	C110	C120	C130	C140	C150	C160	C170
charakteristická válcová pevnost v tlaku f_{ck} [MPa]	110	120	130	140	150	160	170
průměrná válcová pevnost v tlaku f_{cm} [MPa]	118	128	138	148	158	168	178
minimální třída pevnosti v prostém tahu dle tab. 2	FR4	FR4	FR5	FR5	FR5	FR6	FR6
minimální požadovaná třída zbytkové pevnosti	A	A	B	B	B	B	B
střední hodnota E_{cm} [GPa]	44	45	46	47	48	49	50

Označení tříd UHPC je v souladu s ČSN EN 1992-1-1 [6] dáno pouze válcovou pevností f_{ck} .

Třída pevnosti v prostém tahu je minimální požadovaná pro danou třídu UHPC. Pokud se navrhne vyšší třída pevnosti v prostém tahu, musí být prokázáno splnění požadovaných vlastností v rámci průkazných zkoušek. Detailní charakteristiky tříd pevnosti v prostém tahu jsou uvedeny v tab. 2.

3.1.2 Charakteristiky UHPC v pružném stavu

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

Přibližnou hodnotu E_{cm} lze převzít z tab. 20 nebo určit ze vzorce:

$$E_{cm} = k_0 \cdot f_{cm}^{1/3}, \quad (6)$$

kde je:

$k_0 = 8\,900$ (obvykle: $8\,500 < k_0 < 10\,000$)

Pro úroveň napětí v tlaku do 80 % f_{ck} lze předpokládat Poissonův součinitel ν hodnotou $0,18 \div 0,2$ (částice 2 až 8 mm). Pro navrhování prvků v mezním stavu únosnosti se použije hodnota $\nu = 0,20$.

3.1.3 Pevnost UHPC v tahu za ohybu

Postup stanovení charakteristické a průměrné hodnoty pevnosti UHPC v tahu za ohybu $f_{ctk,f}$ a $f_{ctm,f}$ ze zkoušky dle ČSN EN 14651 [3] je podrobně popsán v kap. 2.2.2.

Minimální a maximální hodnoty $f_{ctk,f} = f_{ctk,f;0,05}$ (5% kvantil) a $f_{ctk,f;0,95}$ (95% kvantil) mohou být v případě potřeby pro účely návrhu odvozeny ze vzorců:

$$f_{ctk,f} = 0,7 \cdot f_{R1m} \text{ (tab. 2),} \quad (7)$$

$$f_{ctk,f;0,95} = 1,3 \cdot f_{R1m}, \quad (8)$$

kde je:

f_{R1m} průměrná hodnota zbytkové pevnosti UHPC v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_1$ ze zkoušky dle ČSN EN 14651 [3].

3.1.4 Pevnost UHPC v prostém tahu

Charakteristická hodnota pevnosti UHPC v prostém tahu f_{ctk} je pro účely těchto TP odvozena přepočtem z pevnosti v tahu za ohybu určené ze zkoušky dle ČSN EN 14651 [3]. Podrobně je tento postup uveden v kap. 2.2.2. a v tab. 2.

Základní vzorec pro stanovení pevnosti v prostém tahu na základě zkoušek je:

$$f_{ctk} = 0,5 \cdot f_{ctk,f} = 0,35 \cdot f_{R1m}, \quad (9)$$

kde je:

$f_{ctk,f}$ charakteristická pevnost UHPC v tahu za ohybu,

f_{R1m} průměrná zbytková pevnost UHPC v tahu za ohybu odpovídající rozevření trhliny $CMOD_1$ ze zkoušky dle ČSN EN 14651 [3].

3.1.5 Klasifikace UHPC z hlediska zbytkové pevnosti

Z hlediska statického působení je podstatné, jaké namáhání je UHPC schopen přenášet po vzniku první trhliny, kdy je aktivována funkce vláken. Pro tento účel je zavedena v těchto TP klasifikace UHPC založená na zbytkové pevnosti po vzniku definované trhliny. Podrobně je popis získání a zpracování výsledků ohybových zkoušek dle ČSN EN 14651 [3] uveden v kap. 2.2.2. Těmito TP jsou zaváděny třídy uvedené v tab. 21.

Tabulka 21 – Třídy zbytkové pevnosti

Třída zbytkové pevnosti			
A	B	C	D
$0,5 < f_{R3k} / f_{R1k}$	$0,7 \leq f_{R3k} / f_{R1k}$	$0,9 \leq f_{R3k} / f_{R1k}$	$1,1 \leq f_{R3k} / f_{R1k}$

Hodnota f_{R1k} musí být vždy vyšší než mez úměrnosti (linearity) $f_{ctk,L,f}$:

$$f_{R1k} > 1,2 \cdot f_{ctk,L,f}, \quad (10)$$

příčemž $f_{ctk,L,f} = 0,7 \cdot f_{ctm,L,f}$.

Další charakteristiky a požadavky jsou:

- hodnoty podílu $f_{R3k} / f_{R1k} < 1$ popisují materiál se změkčením v oblasti větších přetvoření (*high strain softening*),
- hodnoty podílu $f_{R3k} / f_{R1k} > 1$ popisují materiál se zpevněním v celé oblasti přetvoření (*strain hardening*),
- pro navrhování konstrukčních nenosných prvků bez betonářské výztuže se musí použít minimálně třída A zbytkové pevnosti, tj. vždy platí $f_{R3k} / f_{R1k} > 0,5$,
- pro navrhování prvků nosných konstrukcí bez betonářské výztuže se musí použít minimálně třída B zbytkové pevnosti, tj. vždy platí $f_{R3k} / f_{R1k} > 0,7$.

3.2 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 zbytkové pevnosti **B** a vyšší. Plastickou analýzu konstrukcí lze použít pouze pro tenkostěnné desky a skořepiny.

Statické působení UHPC je značně ovlivněno zejména orientací a rozložením ocelových vláken, zejména v oblasti namáhání v tahu. Proto je při navrhování prvků z UHPC vždy nutné provádět větší množství průkazních a kontrolních zkoušek. Výhodné využití vlastností UHPC lze předpokládat u tenkostěnných prutových, deskových nebo stěnových prefabrikovaných prvků namáhaných tlakem a ohybem. U jedno- nebo vícesměrně osově tažených prvků nelze předpokládat využití tahové pevnosti UHPC bez betonářské výztuže, pokud nejde o UHPC třídy zbytkové pevnosti **D**. Rovněž u masivních prvků je nutné velmi opatrně postupovat při interpretaci zkoušek provedených na malých zkušebních tělesech. Zde je třeba provést ověřovací zkoušku i na modelu přiměřeně odpovídajícímu 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 u povrchu bednění je většina ocelových vláken orientována paralelně s bedněním. Proto také mnoho zkoušených vlastností závisí na velikosti a geometrii zkušebního tělesa, u menších vzorků je větší pravděpodobnost stejnoměrnějšího rozptýlení ocelových vláken 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 (řezáním či jádrovým vrtáním) srovnávací vzorky z různých oblastí kompletního prvku, a to pro různé směry působení namáhání. Touto metodou lze poměrně spolehlivě zjistit součinitel orientace ocelových vláken k_F a další koeficienty pro posouzení různých částí jednoho prvku.

Na základě statistického vyhodnocení zkoušek prvků ve skutečné velikosti (metoda navrhování na základě zkoušek dle ČSN EN 1990 [5] a 1992-1-1 [6] nebo *fib* Model Code 2010 [35]) lze také zjistit hodnoty pro přímé posouzení vyrobených prvků.

3.3 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 UHPC. Úpravy jsou nutné hlavně na straně únosnosti průřezů prvků z UHPC, zatímco obvyklé dílčí součinitele pro zatížení a jejich kombinace zůstávají pro UHPC stejné jako u jiných materiálů.

Tyto speciální vlastnosti UHPC se týkají zejména následujících charakteristik:

1. Materiál se vyznačuje vysokou citlivostí na změny složení směsi, způsobu míchání, betonování a klimatické okrajové podmínky.
2. Ve srovnání s normálním betonem je významně křehčí.
3. Jako konstrukční výztuž se používají všesměrně rozptýlená ocelová vlákna či jiný typ vláken.

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

3.4 Dílčí součinitele spolehlivosti

Dílčí součinitele spolehlivosti v mezním stavu únosnosti jsou uvedeny v tab. 22.

Tabulka 22 – Dílčí součinitele pro materiál UHPC

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 (použije se spolu s γ_c)	$\gamma'_c = 1,2$	
UHPC v tahu – účinnost rozptýlené výztuže		
vysoká úroveň kvality	$\gamma_{cf} = 1,4$	$\gamma_{cf} = 1,2$
normální úroveň kvality	$\gamma_{cf} = 1,5$	$\gamma_{cf} = 1,3$
pro lokální posouzení	$\gamma_{cf} = 2,0$	$\gamma_{cf} = 1,5$
Betonářská nebo předpínací výztuž	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,0$

Vysoká úroveň kvality se předpokládá při výrobě prefabrikovaných prvků při trvalé kontrole procesu míchání betonové směsi a technologie betonáže. Tato úroveň vyžaduje management kvality a kontrolu provádění prací v prováděcí třídě 3 dle ČSN EN 13670 [12].

Normální úroveň kvality se předpokládá u monolitických konstrukcí prováděných na stavbě. Tato úroveň vyžaduje management kvality a kontrolu provádění prací v prováděcí třídě 2 dle ČSN EN 13670 [12].

Zaručená duktilita pro prvky namáhané kombinací tlaku a ohybu je dána požadavkem na splnění minimálně zbytkové třídy **A**, tj. $f_{R3k} / f_{R1k} > 0,5$ a současně požadavkem na minimální množství rovnoměrně rozptýlených krátkých ocelových vláken ve výši 1,5 % objemu betonu (120 kg/m³).

Součinitel spolehlivosti pro prvky bez zaručené duktility je stejný jako pro nevyztužené prvky z prostého betonu a zvětšuje se o součin: $\gamma_c \cdot \gamma'_c$.

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.

Dílčí součinitele spolehlivosti materiálu v mezním stavu použitelnosti jsou $\gamma_c = \gamma_{cf} = \gamma_s = 1$.

3.5 Pracovní diagram napětí–přetvoření

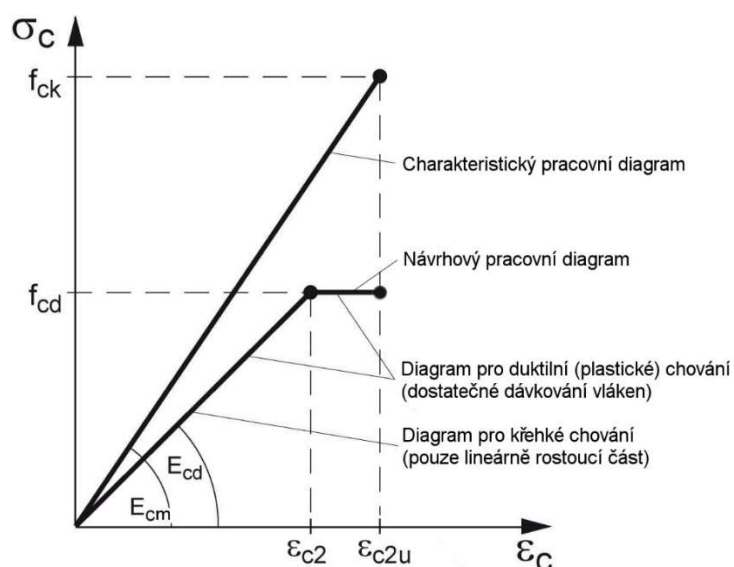
Pro prutové prvky zatížené ohybem nebo kombinací tlaku a ohybu předpokládáme použití pracovního diagramu popsaného v kap. 3.5.1 (obr. 6) a 3.5.2 (obr. 7).

Pro prutové prvky namáhané čistým tahem nebo kombinací tahu a ohybu, kde tažená část průřezu tvoří více než 60 % plochy průřezu v mezním stavu použitelnosti při charakteristické kombinaci, je nutné 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 3D modelu. Rovněž je možné vycházet ze zkoušek reálných plošných nebo stěnových prvků.

3.5.1 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 až 90 % pevnosti betonu v tlaku. Zjednodušeně lze předpokládat, že chování UHPC je lineárně pružné až po mez dosažení návrhové hodnoty pevnosti betonu v tlaku (požaduje se zaručená duktilita).



Obrázek 6 – Pracovní diagram pro navrhování UHPC v tlaku

Platí vzorec:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / (\gamma_c \cdot \gamma'_c), \quad (11)$$

kde je:

- f_{cd} návrhová hodnota pevnosti UHPC v tlaku,
- f_{ck} charakteristická hodnota pevnosti UHPC v tlaku,
- γ_c dílčí součinitel spolehlivosti pro UHPC v tlaku (tab. 22),
- γ'_c další součinitel spolehlivosti pro UHPC bez zaručené duktility (tab. 22),
- 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 rostoucí část návrhového pracovního diagramu napětí–přetvoření plošší než u diagramu 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 dle vzorce je navržena jako návrhová hodnota modulu pružnosti:

$$E_{cd} = E_{cm} / 1,3 \quad (12)$$

kde je:

E_{cm} průměrná hodnota modulu pružnosti betonu.

$$\varepsilon_{c2} = f_{cd} / E_{cd}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{c2u} = f_{ck} / E_{cm}, \quad (14)$$

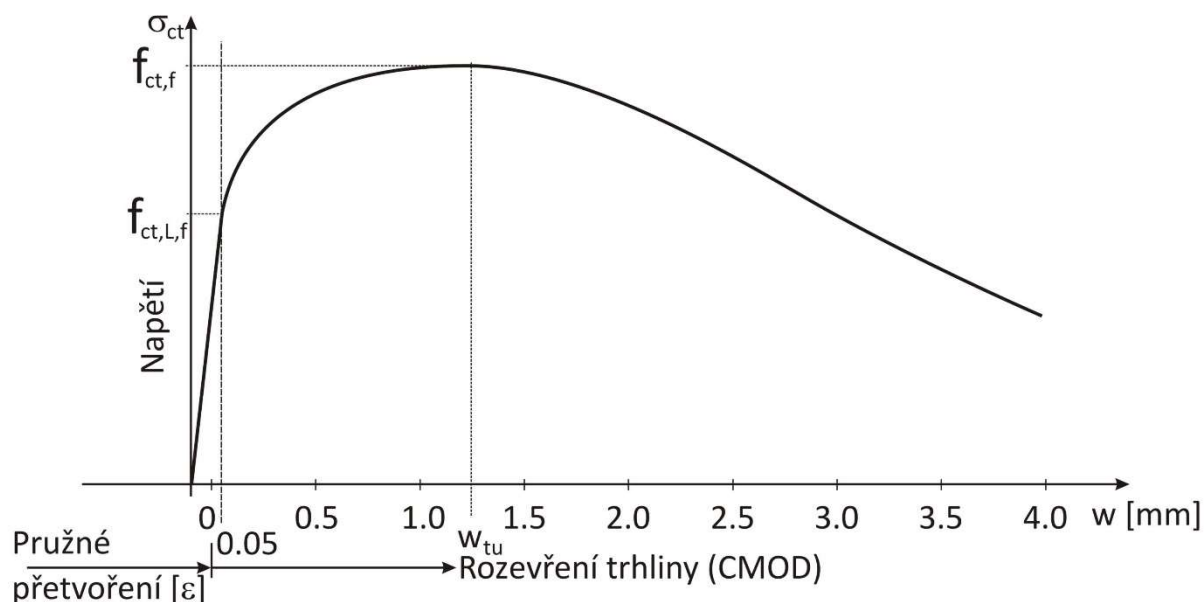
kde je:

ε_{c2} přetvoření UHPC pro návrhové hodnoty parametrů UHPC v tlaku,

ε_{c2u} přetvoření UHPC pro charakteristické hodnoty parametrů UHPC v tlaku.

3.5.2 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 zobrazeno v grafu na obr. 7.



Obrázek 7 – Vztah mezi tahovým napětím a otevřením trhliny pro UHPC

Hodnota meze úměrnosti $f_{ct,L,f}$ dle obr. 7 se zjistí zkouškami dle ČSN EN 14651 [3] při zatížení na úrovni otevření trhliny 0,05 mm. Tato hodnota se považuje jako smluvní mez při vzniku trhlin na zkušební vzorku, při němž je ukončena lineární pružná odezva zkušební vzorku na zatížení (charakteristická hodnota $f_{ct,L,f}$ se stanoví jako 70 % průměrné hodnoty $f_{ctm,L,f}$).

Maximální hodnota pevnosti v tahu za ohybu $f_{ct,f}$ dle obr. 7 se při zkoušce dle ČSN EN 14651 [3] obvykle nachází v oblasti $CMOD_1$ až $CMOD_3$, tj. při rozevření vrubu w_{tu} v rozmezí 0,5 až 2,5 mm. Pro návrhový diagram průřezu se tato hodnota stanoví zjednodušeně ze vzorce:

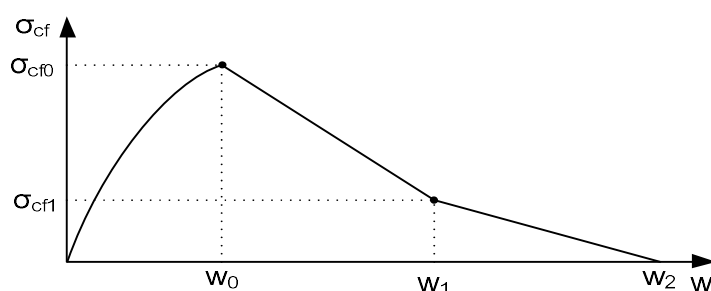
$$f_{ctk,f} = 0,7 \cdot f_{R1m}, \quad (15)$$

kde je:

$f_{ctk,f}$ charakteristická pevnost UHPC v tahu za ohybu,

f_{R1m} průměrná hodnota zbytkové pevnosti UHPC v tahu za ohybu pro rozevření vrubu $CMOD_1 = 0,5$ mm u zkoušky dle ČSN EN 14651 [3].

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 velikost prvku (*size effect*).



Obrázek 8 – Návrhový diagram UHPC v tahu po vzniku trhlin

Ve fázi aktivace rozptýlené výztuže po vzniku trhliny ($w \leq w_0 = 0,5$ mm) je vztah mezi napětím a šířkou trhlin definován vzorcem:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf0} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{w}{w_0}} - \frac{w}{w_0} \right), \quad (16)$$

kde je:

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

$$\sigma_{cf0} = f_{ctk,f} = 0,7 \cdot f_{R1m}.$$

Reprezentativní hodnota maximálního tahového napětí přenášeného výztužnými vlákny po vzniku trhlin je charakteristická hodnota účinnosti výztužných vláken ($f_{ctk,f}$ při velikosti rozevření trhliny $CMOD_1 = 0,5$ mm), která se použije pro ověření mezního stavu použitelnosti (omezení napětí, šířka trhlin, deformace), přičemž:

$w_0 = 0,5$ mm referenční šířka trhlin pro maximální hodnotu účinnosti rozptýlené výztuže (odpovídající pevnosti f_{R1}),

$w_1 = 2,5$ mm šířka trhliny odpovídající pevnosti f_{R3} ,

$w_2 = 0,5 L_f$ šířka trhliny odpovídající polovině délky výztužného vlákna,

w šířka trhliny $w \leq w_0 = 0,5$ mm.

$$\sigma_{cf1} = 0,7 \cdot f_{R3m}.$$

Ve fázi vytahování vláken ($w_0 < w < w_1$) se vztah mezi napětím a rozevřením trhliny určí ze zkoušky tříbodovým ohybem s vrubem pro hodnoty $w_0 = 0,5$ mm a $w_1 = 2,5$ mm s lineárním průběhem a dále ($w_1 < w < w_2$) se uvažuje lineární průběh až do nulového napětí pro hodnotu $w_2 = 0,5 L_f$ (tj. polovina délky vláken).

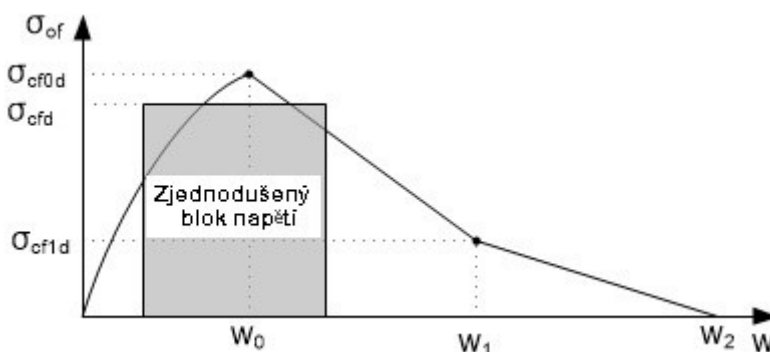
Návrhová hodnota maximálního tahového napětí přenášeného výztužnými vlákny po vzniku trhlin σ_{cf0d} (účinnost rozptýlené výztuže), která se použije pro ověření mezního stavu únosnosti (MSÚ), je definována takto:

$$\sigma_{cf0d} = \alpha_{ct} \cdot (f_{ctk,f} / \gamma_{cf}), \quad (17)$$

kde je:

- σ_{cf0d} návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu,
- $f_{ctk,f}$ charakteristická hodnota pevnosti UHPC v tahu za ohybu,
- γ_{cf} dílčí součinitel spolehlivosti pro působení UHPC v tahu (tab. 22),
- α_{ct} součinitel vlivu délky zatížení,
 $\alpha_{ct} = 0,9$ pro dlouhodobé zatížení,
 $\alpha_{ct} = 1,0$ pro krátkodobé zatížení.

Protože únosnost ohýbaného průřezu je obvykle vyčerpána při poměrně malém přetvoření, je možné další zjednodušení tahové větve pracovního diagramu UHPC (obr. 9),



Obrázek 9 – Zjednodušený model návrhového diagramu působení UHPC v tahu

kde je:

$w_0 = 0,5$ mm, $w_1 = 2,5$ mm a $w_2 = 0,5 L_f$ (šířky trhliny w odpovídají měření $CMOD$ a odvozeným hodnotám σ_{cf0}).

$$\sigma_{cfd} = \chi \cdot \sigma_{cf0d}, \quad (18)$$

kde je:

- σ_{cf0d} návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu dle vzorce (17),
- σ_{cfd} upravená návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu dle obr. 9,
- $\chi = 0,9$ pro běžný průřez, resp.
- $\chi = 0,85$ 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 diagramu v této části (lze použít hodnotu $0,73 \cdot \sigma_{cf0d} \cdot w_0$), plocha zjednodušeného bloku napětí v intervalu $\langle w_0, w_1 \rangle$ je 35 % integrované plochy pracovního diagramu v této části (lze použít hodnotu $0,175 \cdot (\sigma_{cf0d} + \sigma_{cf1d}) \cdot (w_1 - w_0)$). Umístění zjednodušeného bloku napětí je zřejmé dle obr. 11 (zjednodušený pracovní diagram průřezu).

3.6 Vliv orientace výztužných vláken (drátků)

Rozdílná orientace rozptýlené výztuže způsobuje značný rozptyl v chování konstrukčních prvků, a to v příznivém i nepříznivém smyslu. Velkou pozornost je nutné věnovat zejména rovnoměrnému lití betonové směsi u rozměrnějších prvků a místům, kde dochází ke slití dvou proudů nebo přelití dvou vrstev čerstvé betonové směsi. Informativní hodnoty součinitele orientace vláken k_F jsou uvedeny v tab. 20. Vliv orientace vláken lze stanovit přesněji na základě zkoušek nebo nedestruktivní diagnostiky individuálně navržených materiálů a prvků. U menších prvků z UHPC se doporučuje vždy ověřit teoretické předpoklady zatěžovacími zkouškami provedenými na kompletním konstrukčním prvku.

Pro izotropní rozdělení rozptýlené výztuže se předpokládá součinitel orientace vláken $k_F = 1$. Součinitelem k_F se upravují hodnoty návrhové zbytkové pevnosti v tahu f_{Ftsd} (mezní stav použitelnosti) a f_{Ftud} (mezní stav únosnosti) dle následujících vzorců:

$$f_{Ftsd} = k_F \cdot \sigma_{cf0d}, \quad (19)$$

$$f_{Ftud} = k_F \cdot \sigma_{cf0}, \quad (20)$$

kde je:

σ_{cf0d} návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu dle vzorce (17),
 $\sigma_{cf0} = f_{ctk,f}$ reprezentativní hodnota maximálního tahového napětí přenášeného výztužnými vlákny po vzniku trhlin, je to charakteristická hodnota účinnosti výztužných vláken ($f_{ctk,f}$ při velikosti rozevření trhliny $CMOD_I = 0,5$ mm), která se použije pro ověření mezního stavu použitelnosti (omezení napětí, šířka trhlin, deformace).

Hodnota $k_F > 1$ znamená příznivé účinky orientace rozptýlené výztuže,
hodnota $k_F < 1$ znamená nepříznivé účinky orientace rozptýlené výztuže.

Pokud se v jednom směru uplatní $k_F > 1$, pak je nutné ověřit a upravit hodnotu k_F pro ostatní směry namáhání konstrukčního prvku.

Tabulka 23 – Součinitel k_F zohledňující vliv okrajových podmínek na orientaci vláken

Charakteristická vlastnost	Okrajové podmínky	Hodnota k_F
tloušťka prvku d	≤ 50 mm	1
	50–100 mm	lineární interpolace
	≥ 100 mm	0,8
kolmo na plochu tenkostěnné deskové konstrukce		0,3
výrobní proces	ve směru lití	1,0 – 1,2
	kolmo na směr lití	0,8 – 1,0
lokální namáhání	bez možnosti redistribuce vnitřních sil	0,85

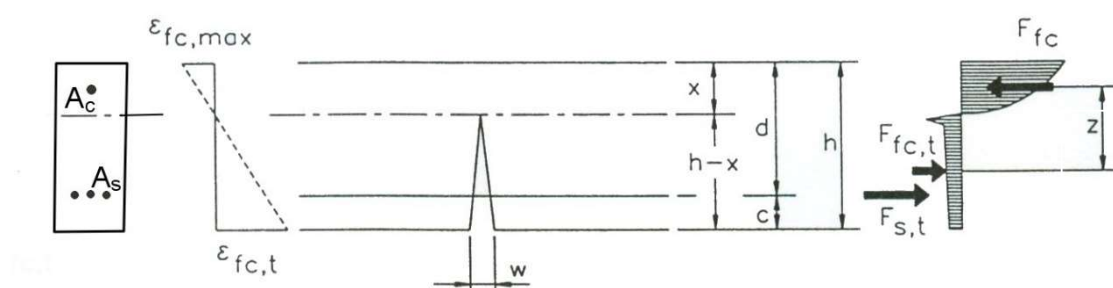
3.7 Ověření únosnosti a použitelnosti prvků z UHPC

Pro statické posuzování prvků z UHPC tato TP navazují na ČSN EN 1992-1-1 [6] a na koncepční normu *fib Model Code 2010* [35] a předpokládají obdobné členění.

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

3.7.1 Mezní stav únosnosti

V mezním stavu únosnosti je nutné 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 uveden na obr. 10 a 11 a jejich popisu.



Obrázek 10 – Příklad rozdělení napětí po výšce průřezu prutového průřezu

Pro stanovení poměrných přetvoření platí vztahy:

$$\varepsilon_{fc,max} = f_{ck} / E_{cm}, \quad (21)$$

$$\varepsilon_{fc,t} = w / (h - x), \quad (22)$$

kde je:

A_c tlačená plocha průřezu z UHPC,

A_s plocha tažené výztuže,

x poloha neutrální osy,

h výška průřezu,

w šíře trhliny,

c vzdálenost těžiště tažené výztuže od krajních vláken,

z rameno vnitřních sil,

F_{fc} výslednice zatížení přenášeného UHPC v tlaku,

$F_{s,t}$ zatížení přenášené výztuží,

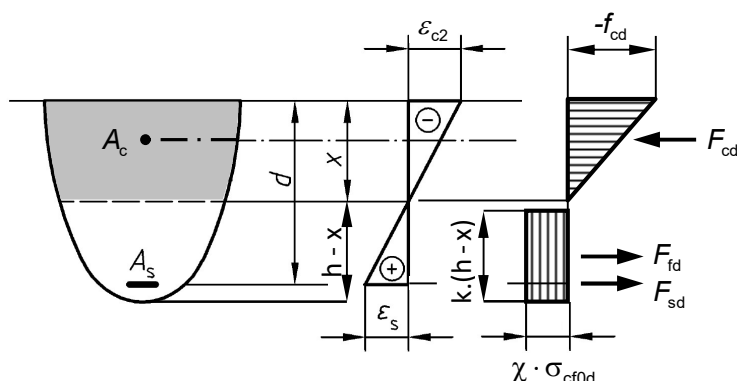
$F_{fc,t}$ zatížení přenášená vlákna,

$\varepsilon_{fc,max}$ hodnota maximálního přetvoření v tlačené oblasti průřezu – vzorec (21),

$\varepsilon_{fc,t}$ hodnota maximálního přetvoření v tažené oblasti průřezu – vzorec (22),

E_{cm} střední hodnota modulu pružnosti.

Při zjednodušeném pracovním diagramu průřezu z UHPC vypadá rozdělení napětí tak, jak je uvedeno na obr. 11.



Obrázek 11 – Rozdělení napětí po výšce prutového průřezu (zjednodušený diagram)

Součinitele jsou uvažovány:

$$k = 0,9$$

$$\chi = 0,85 \div 0,9 \quad \text{hodnota } \chi \text{ dle šířky tažené oblasti dle vzorce (18),}$$

kde je:

f_{cd} návrhová hodnota pevnosti UHPC v tlaku,

f_{ck} charakteristická hodnota pevnosti UHPC v tlaku,

ε_{c2} přetvoření UHPC pro návrhové hodnoty parametrů UHPC,

σ_{cf0d} návrhová hodnota účinnosti výztužných vláken v tahu za ohybu dle vzorce (17),

x poloha neutrální osy,

d účinná výška průřezu,

A_c tlačaná plocha průřezu z UHPC,

A_s plocha tažené výztuže,

F_{cd} návrhová hodnota zatížení přenášená UHPC v tlaku,

F_{sd} návrhová hodnota zatížení přenášená výztuží,

F_{fd} návrhová hodnota zatížení přenášená vlákny.

3.7.2 Posouzení smyku

Pro prvky bez betonářské výztuže platí vzorec:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f} \geq V_{Ed}. \quad (23)$$

Pro prvky s betonářskou výztuží platí obdobná pravidla jako u železobetonu (dle ČSN EN 1992-1-1 [6], ČSN EN 1992-2 [7]). V případě skloněného tlačného pásu lze tento vzorec doplnit i o účinek návrhové hodnoty příslušné smykové složky síly V_{ccd} , přitom je nutné ověřit, zda není překročena návrhová hodnota maximální posouvající síly $V_{Rd,max}$, kterou může prvek přenést, aniž by došlo k rozdrčení tlakových diagonál.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \geq V_{Ed}, \quad (24)$$

kde je:

V_{Rd} návrhová únosnost průřezu ve smyku,

- V_{Ed} návrhová smyková síla od vnějšího zatížení,
 $V_{Rd,c}$ návrhová únosnost ve smyku prvku bez smykové výztuže dle ČSN EN 1992-1-1 [6],
 $V_{Rd,s}$ návrhová hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu dle ČSN EN 1992-1-1 [6],
 V_{ccd} účinek návrhové hodnoty příslušné smykové složky síly dle ČSN EN 1992-1-1 [6].

Pro příspěvek rozptýlené výztuže ke smykové únosnosti $V_{Rd,f}$ se použije vzorec:

$$V_{Rd,f} = 0,64 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_{cf}} \cdot \cot \theta \cdot b_w \cdot h, \quad (25)$$

kde je:

- f_{Ftuk} charakteristická hodnota limitní zbytkové pevnosti pro UHPC za předpokladu trhliny šířky $w_u = 1,5$ mm, uvažuje se hodnotou $f_{Ftuk} = (f_{R1k} + f_{R3k}) / 2$,
 $\cot \theta$ sklon tlačené diagonály ($1,2 \leq \cot \theta \leq 3$),
 b_w šířka stěny,
 h celková výška průřezu.

U prvků 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 možné zjistit zkouškami prvků v reálné velikosti.

3.7.3 Posouzení na protlačení

Únosnost v protlačení je u prvků z UHPC dána součtem únosnosti vlákniny vyztužené matrice a betonářské výztuže:

$$V_{R,d} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s}, \quad (26)$$

kde je:

$V_{Rd,F}$ příspěvek vlákniny vyztuženého betonu k únosnosti v protlačení definovaný vzorcem:

$$V_{Rd,F} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f}, \quad (27)$$

$$V_{Rd,f} = \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_{cf}} \cdot b_0 \cdot d_v, \quad (28)$$

kde je:

- $V_{Rd,c}$ návrhová únosnost ve smyku prvku bez smykové výztuže dle ČSN EN 1992-1-1 [6],
 f_{Ftuk} charakteristická hodnota limitní zbytkové pevnosti pro UHPC za předpokladu trhliny šířky $w_u = 1,5$ mm, uvažuje se hodnotou $f_{Ftuk} = (f_{R1k} + f_{R3k}) / 2$,
 b_0 kontrolní obvod vzdorující protlačení dle ČSN EN 1992-1-1 [6],
 d_v efektivní tloušťka průřezu desky vzdorující protlačení dle ČSN EN 1992-1-1 [6].

Pokud je nutná výztuž na protlačení, je požadován minimální obsah vláken k zajištění potřebné deformační kapacity dle vzorce:

$$V_{RD,s} + V_{RD,f} \geq 0,5 V_{Ed}, \quad (29)$$

kde je

$V_{RD,s}$ návrhová hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu dle ČSN EN 1992-1-1 [6],

$V_{RD,f}$ příspěvek rozptýlené výztuže ke smykové únosnosti,

V_{Ed} návrhová smyková síla od vnějšího zatížení.

3.7.4 Mezní stav použitelnosti

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

Dílčí součinitele spolehlivosti v mezním stavu použitelnosti jsou obvykle zaváděny hodnotami $\gamma_F = 1$ a $\gamma_M = 1$.

Součinitel orientace rozptýlené výztuže k_F se použije ve zjištěné hodnotě.

Mezní hodnoty napětí jsou uvedeny v tab. 24.

Tabulka 24 – Mezní hodnoty napětí pro posouzení mezního stavu použitelnosti (MSP)

	Charakteristická kombinace zatížení	Kvazistálá a častá kombinace zatížení
Napětí betonu v tahu za ohybu	$0,5 f_{ctk,f}(t)$	$0,4 f_{ctk,f}(t)$
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 a XC1,
- $w_{lim} = 0,2$ mm pro třídy prostředí XC2–XC4, XD, XS a XF.

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

Limitní hodnoty deformací se pro prvky z UHPC řídí požadavky ČSN EN 1992-1-1 [6] a příslušnými ČSN.

3.8 Časově závislé deformace

Obecné rovnice pro časový průběh smrštění a dotvarování běžného betonu jsou uvedeny v ČSN EN 1992-1-1 [6] a v *fib Model Code 2010* [35]. 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 uvedené v *fib Model Code 2010* [35] upřesnit, příp. uvedené vztahy i zjednodušit. Časově závislé objemové změny ovlivňuje zejména typ cementu, proteplování a ošetřování UHPC. U konstrukcí citlivých na objemové změny se doporučuje provedení zkoušek průběhu smršťování a dotvarování.

3.8.1 Dotvarování

Tabulka 25 – Informativní konečné hodnoty dotvarování $\varphi(t_{\infty}, t_0)$

Stáří UHPC ve dnech na počátku zatížení	Vnitřní prostředí relativní vlhkost RH = 50%	Vnější prostředí relativní vlhkost RH ≥ 80%
3	2,0	1,75
7	1,4	1,2
14	1,1	0,95
28	0,9	0,8
90	0,7	0,65
365	0,5	0,5

Pokud je UHPC vystaveno tepelnému ošetřování, lze předpokládat nižší hodnoty dotvarování. Doporučuje se ověření zkouškami.

3.8.2 Smršťování

Informativní konečné hodnoty smršťování jsou následující:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd}, \quad (30)$$

kde je:

ε_{cs} celkové smršťování,
 $\varepsilon_{ca} = 0,8 \text{ ‰}$ je autogenní smršťování (obvykle 0,6 až 1 ‰),
 $\varepsilon_{cd} = 0,2 \text{ ‰}$ je smrštění od vysychání betonu.

Pro konstrukce, kde smršťování významně ovlivňuje napjatost se doporučuje ověření smršťování zkouškami.

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

3.9 Konstrukční pravidla pro navrhování prvků

U prvků malých průřezových rozměrů dochází k usměrnění vláknové výztuže. Návrh dle těchto TP by vedl velmi pravděpodobně ke konzervativnějšímu návrhu konstrukce. Proto se pro konstrukční prvky z UHPC, jejichž nejmenší rozměr příčného řezu h je menší než trojnásobek délky jednotlivých vláken výztuže $h \leq 3L_f$, doporučuje postupovat metodou navrhování dle zkoušek prvků např. dle ČSN EN 1990 [5] nebo *fib Model Code 2010* [35]. Ve zkušební laboratoři a v provozních podmínkách je přitom nutné 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 prvcích 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.

Minimální tloušťka deskového nebo stěnového konstrukčního prvku je $h = 2 L_f$, nejméně však 25 mm. Pro nenosné např. obkladové prvky lze tloušťky volit menší, ale je nutné posuzovat při návrhu individuálně.

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

Pokud je navržena žebírková betonářská výztuž, její minimální krytí je $c_{min,b} = 1,5 d_s$, pro třídy prostředí X0 až XC4, nejméně však 20 mm, pro ostatní třídy prostředí nejméně 25 mm. Pokud povrch konstrukčního prvku slouží jako ztracené bednění, lze minimální krytí snížit o 10 mm.

Minimální krytí soudržné předpínací výztuže je $c_{min,b} = 2 d_p$, nejméně však 35 mm pro předpětí lany. Pro předpětí jednotlivými dráty je krytí min. 25 mm. U předem předpjatých konstrukcí zajišťuje použití UHPC stupeň ochrany předpínací výztuže PL2 podle ČSN EN 1992-2 [7] (včetně změn Z1, Z2, Z3).

Minimální krytí kabelového kanálku předpínací výztuže je polovina vnějšího průměru ($c_{min,b} = 0,5 \varnothing_e$), nejméně však 50 mm.

Hodnoty minimální krycí vrstvy s ohledem na trvanlivost $c_{min,dur}$ jsou u konstrukcí z UHPC obecně menší než hodnoty požadované pro zajištění soudržnosti. Přídavná složka $\Delta c_{dur,\gamma}$ je již ve výše uvedených hodnotách zahrnuta. Výše uvedené hodnoty minimálního krytí nezahrnují stavební tolerance, při betonáži prvku v pref v prováděcí třídě 3 dle ČSN EN 13670 [12] se mohou stavební tolerance snížit.

Při výrobě je nutné kontrolovat kvalitu probetonování krycí vrstvy a rovnoměrnosti rozptýlení vláken.

Minimální kotevní délka žebírkové betonářské výztuže se požaduje 10 profilů výztuže, pro dynamicky namáhané konstrukce 15 profilů výztuže.

U nekovové výztuže je třeba stanovit kotevní délky vždy na základě zkoušek.

Stykování výztuže přesahem je možné. Pokud není zkouškami stanovena přesnější hodnota, doporučuje se jako minimální délka přesahu ocelových prutů 12 profilů výztuže, u dynamicky namáhaných konstrukcí 18 profilů výztuže.

U konstrukcí s výraznou proměnou tloušťky je nutno posoudit vliv objemové změny (zejména autogenní smršťování) a lokální koncentrace napětí, v problematických případech se doporučují výrobní zkoušky konstrukčních prvků.

Ostatní konstrukční pravidla lze uplatnit přiměřeně dle *fib* Model Code 2010 [35], ČSN EN 1992-1-1 [6].

3.10 Navrhování transportních úchytů

U zabudovaných prvků v UHPC, u kterých nejsou splněny požadavky výrobce jako velikost kotvení, vzdálenosti od okrajů apod. (např. transportní úchyty, předpínací kotvy atd.) je třeba individuální posouzení nebo ověření zkouškami.

4 Provádění konstrukcí z UHPC

4.1 Management provádění

4.1.1 Předpoklady

Uvažuje se platnost předpokladů uvedených v kap. 4.1 ČSN EN 13670 [12], přičemž důraz je kladen zejména na kvalifikaci pracovníků zhotovitele.

4.1.2 Dokumentace

Pro konstrukce nebo jejich části vyrobené z UHPC musí být vždy zpracován plán zajištění jejich kvality – kontrolní a zkušební plán.

4.1.3 Management kvality

Konstrukce z UHPC nebo jejich části, které jsou vyrobeny z UHPC, vždy spadají do prováděcí třídy 2 nebo 3. Pokud je pro konstrukci nebo prvek z UHPC rozhodující jeho tahové působení, spadá vždy do třídy provádění 3.

4.2 Bednění a podpěrné konstrukce

Bednění musí splňovat běžné požadavky dle ČSN EN 13670 [12]. Bednění navíc musí být dokonale těsné, neboť UHPC se většinou dodává ve formě samozhutnitelného betonu, a musí mít nenasákavý povrch, aby neodebíralo vodu z čerstvého UHPC.

Před betonáží se povrch bednění opatří vhodným odbedňovacím nátěrem (ověření jeho vhodnosti se provede na zkušebních modelech nebo dle zkušenosti).

Dimenzování bednění musí zohlednit tlaky čerstvého UHPC s ohledem na postup betonáže a jeho samozhutnitelný charakter.

Při použití bednění horní plochy nebo záporně skloněné šikmé plochy je třeba zajistit odvod vzduchu, aby se na povrchu netvořily vzduchové bubliny. Protože bubliny obvykle nelze zcela eliminovat, doporučuje se na těchto plochách zvýšit krytí o 5 mm.

UHPC se vyznačuje velkým autogenním smršťováním, které probíhá současně s náběhem pevnosti. Bednění je třeba konstruovat s ohledem na tento vývoj deformace UHPC tak, aby nebránilo vznikajícím deformacím a aby případná omezení deformací nebyla příčinou vzniku trhlin v betonovaném prvku.

Bednění musí mít dostatečnou tuhost s ohledem na přípustné tolerance rozměrů betonovaného prvku.

U prefabrikátů vyráběných kontaktním způsobem je třeba uvážit možné deformace vlivem smršťování UHPC a vlivem teplotních gradientů s ohledem na tolerance kontaktních spár.

V případě použití tepelného urychlování tvrdnutí UHPC je nutné uvážit interakci deformací ohřátého UHPC a bednění, resp. formy, aby nedošlo ke vzniku trhlin v UHPC.

4.3 Vyztužování konstrukcí z UHPC

K vyztužení konstrukcí z UHPC lze použít ocelovou nebo nekovovou betonářskou výztuž či ocelovou, popř. nekovovou předpínací výztuž. Pro vyztužování platí obvyklá pravidla dle ČSN EN 13670 [12], pokud zde není stanoveno jinak.

4.3.1 Betonářská výztuž

Betonářská výztuž musí být v konstrukci umístěna tak, aby v bednění nebránila vyplnění prostoru UHPC i s ohledem na obsah vláken.

Krytí výztuže v UHPC může být s ohledem na trvanlivost i statické působení nižší, než je tomu u běžného betonu. Minimální krycí vrstva betonářské výztuže je určena dle kap. 3.9.

Pro minimální poloměry ohybů výztuže platí ČSN EN 13670 [12].

Pro svařování výztuže platí ČSN EN 13670 [12].

Kotevní délky v UHPC se stanoví na základě zkoušek pro konkrétní složení UHPC. Konzervativně lze předpokládat kotevní délky dle kap. 3.9.

Poloha betonářské výztuže v prvku se zajišťuje betonovými distančními tělísky, které v případě konstrukcí z UHPC mají být vyrobeny z kvalitního betonu odolávajícímu prostředí XF4 (např. z UHPC bez vláken) a jejichž rozměry co nejmenší (mohou být jen nepatrně větší, než je průměr výztuže d). Distanční tělíska mají spolehlivě zajistit polohu výztuže v betonovaném prvku, jejich počet však nesmí být příliš velký, aby nebránila spolehlivému vybetonování prvku. Maximální počet distančních tělísek a jejich minimální vzdálenost je dána tab. 26.

Distanční tělíska mají co nejméně bránit toku betonu při plnění bednění a ideálně se instalují do jednotlivých řad.

Tabulka 26 – Minimální vzdálenost a počet distančních tělísek pro prvky z UHPC

Průměr výztuže [mm]	Minimální vzdálenost s_{min} [mm]	Počet tělísek n [ks/m ²]
6, 8, 10	300	14
12, 14, 16	350	10
20, 25, 28	400	6

4.3.2 Předpínací výztuž

Pro vyztužování předpínací výztuží platí pravidla dle ČSN EN 13670 [12], pokud zde není stanoveno jinak.

Pro prvky z UHPC lze použít ocelovou předpínací výztuž se soudržností nebo bez soudržnosti či nekovovou předpínací výztuž.

Minimální krycí vrstvy vnitřních předpínacích jednotek s ohledem na soudržnost jsou uvedeny v kap. 3.9.

Při použití běžných kotev pro dodatečné předpětí lze napínat dříve, než je dosaženo 80 % 28denní pevnosti. Konkrétní pevnost pro zahájení napínání je nutné stanovit dle vývoje pevnosti použitého UHPC.

Při nedostatku místa pro umístění standardní podkotevní desky lze použít podkotevní desky menších rozměrů, pokud se prokáže, že podkotevní napětí budou spolehlivě přenesena. S ohledem na vyztužení UHPC ocelovými vlákny lze rovněž redukovat podkotevní výztuž. Spolehlivý přenos napětí se prokáže buď statickým výpočtem, nebo experimentálně.

4.4 Betonáž prvků a konstrukcí

Betonážní práce musí respektovat ustanovení kap. 2 těchto TP. Betonáži je třeba věnovat mimořádnou pozornost, a to při dopravě UHPC, jeho ukládání i následném ošetřování. Specifikaci UHPC provede projektant po dohodě s dodavatelem dle kap. 2 těchto TP.

4.4.1 Práce před betonáží

Pro betonáž musí být připraven technologický postup a plán kontroly kvality.

Pro složitější nebo opakovaně vyráběné prvky se provedou zkoušky betonáže na částech prvků nebo na celých prvcích, aby se ověřilo jejich probetonování. Na jejich základě se vytvoří technologický postup a kontrolní a zkušební plán.

Pro betonáže za nízkých teplot ($< 5^{\circ}\text{C}$) se stanoví příslušná opatření.

Při vysokých teplotách je třeba zajistit potřebnou dobu zpracovatelnosti UHPC vhodnými technologickými opatřeními.

Při betonáži UHPC je nutné ověřit závislost zpracovatelnosti na teplotě, aby byla zajištěna schopnost UHPC spolehlivě vyplnit bednění. Zejména pokud je konstrukce vyztužena betonářskou a/nebo předpínací výztuží.

4.4.2 Betonáž na existující konstrukci

V případě zesilování nebo rekonstrukcí se betonuje UHPC v kontaktu s existující konstrukcí. V takovém případě se požaduje zajištění spolupůsobení stávajícího betonu a UHPC. Kvalita spojení je dána kvalitou stávajícího betonu, který má s vysokou pravděpodobností horší kvalitu než UHPC. Spolupůsobení UHPC se stávajícím betonem je možné a účelné, pokud má stávající beton určité minimální pevnostní parametry.

Stávající beton je proto nutné očistit tak, aby se obnažila zrna hrubého kameniva (nerovnosti cca 3 mm hluboké) a povrch se zbavil jemných částí, které nemají dostatečnou soudržnost se stávajícím betonem. Zrna hrubého kameniva musí být pevně zakotvena v betonu a tmel mezi nimi musí být pevný a bezprašný. Mezi možné metody, jak dosáhnout kvalitního a čistého povrchu lze zařadit otrýskání vysokotlakým vodním paprskem, brokování, pískování, frézování apod., příp. jejich kombinaci. Takto upravený povrch se před betonáží UHPC navlhčí, aby byl silně zvlhlý, ale na povrchu nesmí stát voda. Pak teprve může následovat betonáž.

Před aplikací UHPC na stávající konstrukci je nutné provést zkoušky podkladu. Kvalitu podkladu lze zjistit odtrhovými zkouškami, popř. zkouškami kvality na vývrtech. UHPC je vysoce kvalitní materiál a je vhodný pro zesilování konstrukcí, které však mají určitou minimální kvalitu. Průměrná odtrhová pevnost se doporučuje $> 1,5$ MPa, přičemž jednotlivá hodnota by měla být minimálně 1,2 MPa (odpovídá cca pevnostní třídě C25/30). Při zjištění nižší kvality je ke zvážení, zda je zesilování nebo oprava pomocí UHPC vhodná.

Při zesilování sloupů, kdy se obetonuje celý obvod průřezu sloupu, není nutné požadovat tak vysokou kvalitu povrchu existujícího (zesilovaného) povrchu sloupu. Postačí očištění a zajištění souvislého pevného povrchu. Dle tloušťky obetonování se rozhodne o použití výztuže v zesilující vrstvě. Kritériem pro rozhodování je spolehlivost probetonování zesilující vrstvy s minimalizací rizika neprobetonování průřezu.

Teplota betonového podkladu musí být v rozsahu 5 až 30 °C.

Při betonáži na existující konstrukci není umožněno volné smršťování UHPC. Při návrhu musí být věnována pozornost dostatečnému vyztužení vláknou, popř. prutovou výztuží. Je třeba respektovat tahová napětí v UHPC vznikající vlivem omezení deformace vrstvy UHPC od smršťování. Při nedostatečné kvalitě stávajícího betonu nebo jeho povrchu může vznikat riziko delaminace vrstvy UHPC na okrajích betonážních úseků. Proto se doporučuje přikotvení nabetonované vrstvy UHPC na okrajích betonážních úseků pomocí mechanických kotev.

4.4.3 Betonáž spojů betonových prvků

Pro betonáž spojů betonových konstrukcí platí podobná pravidla jako pro betonáž na existující konstrukci (kap. 4.4.2). Povrch kontaktu stávajícího betonu musí být očištěn a musí mít dostatečnou kvalitu. Před betonáží musí být navlhčen.

Výztuž spojů se provede dle návrhu projektanta. Množství výztuže nesmí omezovat spolehlivé probetonování spoje. Kotevní délky a přesahy musí splňovat konstrukční zásady (čl. 3.9).

4.4.4 Doprava UHPC autodomíchávači

Doprava UHPC je možná pouze v autodomíchávačích za stálého míchání.

Maximální doba od přidání vody do míchačky do uložení betonu je závislá na návrhu směsi a je specifikována výrobcem betonu. Tato doba nesmí být překročena. Pokud není stanoveno jinak, musí být UHPC uložen do 90 min od okamžiku přidání vody do míchačky.

Před uložením do bednění se ověřuje zpracovatelnost (kap. 2.2.5 a 2.3.4.1) a teplota UHPC.

Doprava UHPC z autodomíchávače do bednění (např. na zesilovanou desku) může být realizována čerpáním nebo bádími. Pokud se UHPC má čerpat, musí být navrženo vhodné složení, které bylo předem odzkoušeno. Běžné UHPC není čerpatelné. Při návrhu postupu betonáže je třeba vzít v úvahu i to, že čerpadlo se musí naplnit UHPC a po skončení betonáže opět vyčistit. Čerpání je proto vhodné pro větší objemy betonáží, kdy budou ztráty z potrubí relativně menší. Pro dopravu bádími je rovněž nutné navrhnout vhodnou konzistenci směsi, aby bylo možné bádíe snadno vyprazdňovat.

4.4.5 Ukládání a zhutňování UHPC

Při použití samozhutnitelného UHPC se postupuje dle technologického postupu, buď ověřeného na zkušebním prvku, nebo na základě předchozích zkušeností. Obvykle se nedoporučuje hutnění vibrací.

Při ukládání UHPC musí být zajištěno rovnoměrné rozdělení vláken v jednotlivých částech prvku/konstrukce.

Ukládání UHPC probíhá tak, aby nedošlo k jeho rozmísení vlivem překážek v bednění (např. výztuž). V případě rizika je třeba betonáž ověřit před zahájením výroby na vhodných modelech v měřítku 1 : 1.

Při betonáži uzavřených průřezů se forma plní z jedné strany, aby beton tekł jedním směrem a bylo zajištěno dokonalé vyplnění prostoru bednění.

V případě, že UHPC není samozhutnitelný, probíhá hutnění pomocí příložných nebo ponorných vibrátorů podobně jako u běžného betonu. Postup hutnění je třeba ověřit na zkušebních vzorcích podobné velikosti jako betonovaný prvek, zejména s ohledem na dosažení rovnoměrného rozmístění vláken.

Pro povrchy ve sklonu (např. desky mostů) je třeba použít takový UHPC, který potřebný sklon udrží. Technologii ukládky je třeba ověřit před aplikací na experimentálních vzorcích.

Povrch UHPC lze při vhodném složení upravovat leštěním, hlazením, vibrační lištou, stržením latí apod. Pro konkrétní UHPC je třeba úpravu povrchu vždy ověřit na experimentálním vzorku.

Během ukládání je třeba chránit UHPC proti povětrnostním vlivům (sluneční záření, déšť atd.).

V rámci pokládky UHPC je nezbytné postup a průběžné ošetřování upravit tak, aby bylo zabráněno vzniku nežádoucích pracovních spár z důvodu vyschnutí povrchu, na který je ukládána nová vrstva UHPC.

4.4.6 Ošetřování a ochrana UHPC po betonáži

Povrch UHPC po betonáži je mimořádně citlivý na rychlé vysychání. Proto je třeba povrch po finální úpravě okamžitě začít chránit. Postup prací se zakotví v technologickém postupu.

Povrch prvku/konstrukce je možné upravovat různým způsobem (stržením latí, vibrační lištou, hlazením, leštěním apod.). Přitom se brání vysychání povrchu (i po částech) neustálým mlžením (rozstřik jemné mlhy v místech, kde hrozí vysychání).

Ihned po finální úpravě se povrch opatří nástřikem proti odpařování vody a zakryje se dle konkrétních podmínek (s ohledem na teplotu, vítr atd.). Způsob zakrytí má zajistit povrch UHPC ve vlhkém stavu, pokud možno bez významných výkyvů teploty.

Doba ošetřování se stanoví dle požadované odolnosti UHPC. Doba ošetřování je dána dosažením požadovaného procenta 28denní pevnosti UHPC.

Třída prostředí XC0, XC1 – 35 %.

Ostatní třídy prostředí – 50 %.

4.5 Výroba prefabrikovaných dílců

Pro výrobu prefabrikovaných dílců platí ustanovení a předpisy pro výrobu hromadně vyráběných prvků/výrobků. Při použití UHPC platí tyto předpisy beze změny.

Při opakované výrobě je třeba věnovat zvýšenou pozornost řízení kvality výroby zejména s ohledem na rozmístění vláken v konstrukci. Lze pak připustit vyšší využití materiálu úpravou součinitelů ve statickém návrhu konstrukce (kap. 3.4). U hromadně vyráběných dílců se proto doporučuje provedení zkoušek na výrobcích a ověření vhodného technologického postupu s cílem dosažení potřebné kvality prvku a zároveň rovnoměrnosti v kvalitě výroby.

Konkrétní předmět odzkoušení stanoví projektant ve spolupráci s výrobcem dílců.

4.6 Geometrické tolerance

Geometrické tolerance obecně stanovuje norma pro provádění ČSN EN 13670 [12]. Ty platí i pro prvky a konstrukce z UHPC. Konstrukce z UHPC jsou však obvykle tenkostěnné, a jejich funkčnost je tedy citlivější na odchylky v jejich rozměrech. Zcela zásadní jsou pak tolerance u segmentových konstrukcí, kde je přesnost výroby rozhodující pro funkčnost i bezpečnost konstrukce. Proto je třeba u některých konstrukcí z UHPC povolené tolerance upravit.

Tato TP doporučují stanovení tolerancí vždy na konkrétní konstrukci. Specifikaci tolerancí provede projektant v součinnosti se zhotovitelem konstrukce. Stanovené tolerance, které budou přísnější, než stanovuje ČSN EN 13670 [12], budou oprávněné, pokud budou významné pro funkčnost, popř. spolehlivost konstrukce. Přísnější požadavky na tolerance musí být vždy technicky zdůvodněny a odsouhlaseny projektantem a zhotovitelem konstrukce. Podmínkou jejich platnosti je, že budou stanoveny předem, tj. před zahájením stavby, a to písemně, a stanou se součástí projektové dokumentace stavby.

4.7 Ověřování kvality výroby

4.7.1 Ověřování kvality prefabrikovaných dílců

Výroba prefabrikovaných dílců se ověřuje zkouškou na vyrobeném dílci (kap. 4.5). Zkoušky se provádějí při zavádění dílce do výroby a pak v pravidelných intervalech dle počtu vyrobených dílců a dle časového intervalu s cílem zajistit trvale rovnoměrnou kvalitu výroby. Konkrétní intervaly a rozsah zkoušení stanoví pro každý prefabrikovaný prvek projektant společně s výrobcem prefabrikátu v době zavádění prvku do výroby. Po získání zkušeností s průběhem výroby mohou projektant společně s výrobcem intervaly upravit.

4.7.2 Ověřování kvality monolitických prvků/konstrukcí

U složitých monolitických konstrukcí je třeba ověřit kritická místa z pohledu kvality výroby, zejména na účinnost vláknové výztuže. Projektant se zhotovitelem posoudí, kde jsou na konstrukci problematická místa, a před zahájením stavby navrhnu modely, které mohou vystihnout chování kritických míst konstrukce. Za kritická místa lze považovat ty části konstrukce, kde se předpokládá, že tahová napětí budou přenášet pouze vlákna bez zapojení betonářské nebo předpínací výztuže (např. oblasti namáhané hlavním tahovým napětím, kde nejsou části konstrukce vyztuženy prutovou výztuží, nebo

části desek bez výztuže namáhaných ve více směrech). Na těchto modelech se zkouškou ověří, zda je možné vybetonovat tyto části v kvalitě předpokládané projektem.

Pravidla pro ověřování kvality u konstrukcí zhotovených robotickou fabrikací (3D tisk) jsou komentována v příloze 2.

4.7.3 Ověřování kvality při rekonstrukcích

Na veškeré činnosti se zpracují technologické postupy a kontrolní zkušební plány. Vlastnosti UHPC jsou specifikovány v projektu v závislosti na účelu použití pro zesilovanou nebo jinak upravovanou konstrukci. Vlastnosti navrženého UHPC se ověří pomocí průkazných zkoušek dle kap. 2.10. Při výrobě se kontroluje shoda dle postupů v těchto TP, a to na betonárně i na staveništi (kap. 2.6).

Příprava podkladu k dosažení podmínek uvedených v kap. 4.4.2 musí být podrobně popsána v technologickém postupu s ohledem na konkrétní podmínky (pozemní stavba, most, vyztužení).

Na pokládku UHPC se zpracuje technologický postup, kde se specifikuje postup ukládání, velikost pracovních záběrů, rozmístění pracovních spár, úprava povrchu a postup při ošetřování. V případech nutnosti kotvení vrstvy UHPC do podkladu (např. v místě namáhaném na protlačení) se v technologickém postupu definuje též způsob instalace kotevních prvků.

Po zatvrdnutí se provede kontrola nabetonované vrstvy a v technologickém postupu se uvede postup případných oprav povrchu (broušení, lokální opravy, opravy trhlin apod.)

O všech případných opravách se provede zápis, který bude uložen v dokumentaci skutečného provedení stavby.

4.7.4 Požadavky na kontrolní zkoušky prováděné na stavbě

Kontrola shody ztvrdlého UHPC v místě betonáže se provádí stejným způsobem, jako ve výrobě UHPC (dle kapitoly 2.6).

Minimální četnost odběru vzorků je uvedena v tabulce 27. V případě, že je UHPC ukládáno ve stejném místě, kde probíhá jeho výroba (např. výroba prefabrikovaných dílců v prefách), není nutno odebírat vzorky zvlášť ve výrobě a zvlášť v místě ukládky, ale postupuje se pouze podle tabulky 27. Tabulkou 27 se pro zkoušení ztvrdlého UHPC nahrazuje tabulka 18-5 část II a III z TKP 18.

Zkoušky čerstvého betonu se provádí dle TKP 18, tabulky 18-5 část I. Zkoušky obsahu vzduchu se neprovádí.

Tabulka 27 – Požadavky na kontrolní zkoušky ztvrdlého UHPC – druh a minimální četnost kontrolních zkoušek v místě betonáže

Druh zkoušky	Četnost časová	Četnost objemová	Množství těles (zkoušek)	Minimální množství na konstrukční prvek ¹⁾
Pevnost v tlaku (viz. kapitola 2.3.5.1)	Každý den ukládky UHPC	na každých 12 m ³	1 těleso	3 tělesa
Pevnost v tahu za ohybu (viz. kapitola 2.3.5.2)	Každé 2 týdny	na každých 30 m ³	1 těleso ²⁾	3 tělesa ²⁾
Odolnost vůči vlivu vody, mrazu a CHRL (viz. kapitola 2.3.5.4)	Každé 4 týdny	na každých 100 m ³	1 těleso	3 tělesa
Statický modul pružnosti v tlaku u konstrukcí a konstrukčních částí podle tabulky 18-2, TKP 18	-	na každých 100 m ³	1 sada těles dle čl. 2.10.3.5	3 sady těles dle čl. 2.10.3.5

Poznámky:

- 1) Za konstrukční prvek se považuje například celá mostovka lávky, která je složena z jednotlivých dílců, nebo celá zesilující vrstva mostovky, která je prováděná v několika betonážních postupech. V některých případech se může dílec rovnat konstrukčnímu dílu (například když je mostovka lávky provedena v jednom dílu, nebo když je zesilující vrstva zabetonována v jednom postupu). Za konstrukční prvek se nepovažuje ztracené bednění, nebo jiné prvky, které nemají trvalou statickou funkci (např. dlažby nebo odvodňovací dílce). Četnost vzorků při výrobě těchto elementů se řídí časovým a/nebo objemovým požadavkem dle této tabulky.
- 2) Pro třídy zbytkové pevnosti A, B je možné využití alternativních těles dle kap. 2.6.2.3.1.

Příloha 1 Rekonstrukce a zesilování

1. Úvod

UHPC poskytuje nové možnosti nejen pro výstavbu nových konstrukcí, ale i pro rekonstrukce a zesilování konstrukcí stávajících. Aplikovatelnost UHPC při rekonstrukcích lze spatřovat zejména v těchto oblastech:

- zesílení a opravy pozemních staveb (obytných, obchodních i průmyslových),
- zesílení a opravy mostních a inženýrských staveb,
- opravy pojižděných ploch.

Zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC spočívá ve většině případů v nabetonování vrstvy UHPC na existující betonovou konstrukci. Přibetonovaná vrstva UHPC může být v případě malých tloušťek (do 40 mm) bez betonářské výztuže nebo při větších tloušťkách s betonářskou výztuží. Konstrukce, které se mají zesilovat pomocí UHPC, musí splňovat určité podmínky, aby zesílení, popř. jiná intervence byly přiměřeně účinné. Základním předpokladem účinnosti je dobrá soudržnost mezi původním betonem a přidanou vrstvou UHPC. Znamená to, že kvalita původního betonu musí být na dostatečné úrovni, aby bylo zesílení realizovatelné a smysluplné. Velká výhoda této technologie spočívá v tom, že vysoká soudržnost UHPC a stávajícího betonu umožňuje u ohýbaných prvků (trámy, desky) vynechání spřahujících prvků ve velkých plochách. Pokud není dosaženo dostatečné soudržnosti, je nutné spřahovací prvky navrhnout. Při návrhu zesílení původní konstrukce pomocí UHPC je třeba posoudit účinnost zesílení.

2. Parametry UHPC

Pro zesilování nosných konstrukcí se požaduje třída zbytkové pevnosti B nebo vyšší (dle tab. 3).

Pro zesilování mostů, kde se požaduje též zajištění vodonepropustnosti vrstvy UHPC se použije UHPC s požadavkem na minimální třídu tahové pevnosti FR7 (dle tab. 2).

Pro zesilování stávajících konstrukcí je vhodné používat UHPC s pokud možno malým smršťováním. Smršťování není možné vyloučit, ale je možné jej redukovat vhodným složením, popř. použitím protismršťujících přísad.

Pro zesilování pozemních staveb, kde je zesilující vrstva ve vnitřním prostředí, a navíc obvykle ještě kryta dalšími konstrukcemi (např. podlahou), je návrh směsi zaměřen zejména na mechanické parametry.

Při zesilování mostů nebo jiných konstrukcí, které jsou vystaveny i účinkům agresivního prostředí, je třeba sledovat i příslušné odolnosti. Tam, kde vrstva UHPC nahrazuje i hydroizolaci, musí být zajištěna nepropustnost vrstvy UHPC, trhliny musí být vyloučeny. Vyloučení trhlin lze dosáhnout tím, že se použije vysoký obsah vláken, popř. v kombinaci s prutovou výztuží v zesilující vrstvě. Pracovní spáry je nutné navrhnout jako vodonepropustné.

Pokud jde o přímo pojižděnou vrstvu UHPC, pak je třeba navrhnout složení směsi tak, aby bylo možné zajistit úpravu povrchu splňující požadavky na pojižděné plochy (rovinnost a protismykové vlastnosti).

3. Vstupní parametry stávající konstrukce

Vstupní parametry pro statické nebo dynamické výpočty jsou závislé na konkrétní posuzované konstrukci. Stanoví se na základě průzkumů a diagnostiky existující konstrukce. Dle způsobu zesílení se navrhnou parametry zesilující vrstvy UHPC a požadavky na materiálové vlastnosti UHPC. Pro hodnocení existující konstrukce se použije ČSN ISO 13822 [13]. Pro návrh zesílení nebo jiné úpravy je třeba stanovit obecné parametry, jako jsou účel úpravy, doba účinnosti v závislosti na plánované další (zbytkové) životnosti objektu, směrná spolehlivost na základě významu konstrukce apod.

Geometrické údaje se zjistí přímým měřením a konfrontací výsledků s projektovou dokumentací (ideálně s dokumentací skutečného provedení).

Materiálové vlastnosti se zjistí pomocí destruktivních i nedestruktivních zkoušek realizovaných v rámci průzkumů. Z naměřených hodnot je nutné stanovit hodnoty návrhové, resp. charakteristické, které se použijí ve statických výpočtech.

U betonářské i předpínací výztuže je nutné posoudit stupeň poškození korozí. Nestačí zjistit průměrný úbytek průřezové plochy, ale je nutné posoudit i vliv lokálních poškození.

Obecně platný postup vyhodnocení výsledků zkoušek a stanovení návrhových hodnot je uveden v ČSN EN 1990 [5]. Postup stanovení charakteristických a návrhových hodnot je uveden v příloze D normy ČSN EN 1990 [5]. Příloha udává několik možností, jak postupovat.

4. Statické posouzení zesilovaných/rekonstruovaných konstrukcí

Statické posuzování existujících konstrukcí zesílených nebo rekonstruovaných pomocí UHPC vychází z obvyklých návrhových norem, tj. z ČSN EN 1992-1-1 [6], popř. z ČSN EN 1992-2 [7]. Parametry UHPC se stanoví dle těchto TP. Princip posuzování spočívá v posouzení dvou základních mezních stavů – mezního stavu použitelnosti a mezního stavu únosnosti. V obou mezních stavech je základem lineárně pružná analýza konstrukce, která slouží k stanovení vnitřních sil. U staticky neurčitých konstrukcí lze počítat s částečnou redistribucí namáhání, avšak jen tam, kde je použit UHPC s požadavkem na třídu zbytkové pevnosti B a vyšší (dle tab. 3 a/nebo 21). Ve statických výpočtech se předpokládá, že spřažení mezi stávajícím betonem a vrstvou UHPC je dokonalé a nedochází k žádnému posunu. Při posuzování je třeba vždy respektovat historii zatěžovacího procesu konstrukce. Kombinační součinitele pro zatížení se používají stejně jako u jiných konstrukcí dle ČSN EN 1990 [5].

4.1 Posuzování mezních stavů použitelnosti

Posuzování mezních stavů použitelnosti zahrnuje kontrolu napětí, posouzení šířky trhlin a výpočet deformací konstrukce. U zesilovaných konstrukcí je třeba respektovat zejména postupný vznik napjatosti vlivem postupu výstavby. Stávající konstrukce obvykle nelze zcela odlehčit a v konstrukčních prvcích zůstane určité napětí. Limitní hodnoty přípustných napětí v původní konstrukci jsou dány běžnou návrhovou normou (ČSN EN 1992-1-1 [6]), limitní hodnoty napětí v UHPC se uvažují dle těchto TP. Při posuzování napětí je třeba prokázat, že hlavní tahové napětí v oblasti spáry mezi UHPC a stávajícím betonem je menší než návrhová hodnota napětí stávajícího betonu v tahu. V případě, že toto kritérium není splněno, je třeba mezi UHPC a stávající beton doplnit spřahovací výztuž.

Šířky trhlin ve stávajícím betonu se počítají dle ČSN EN 1992-1-1 [6] při uvažování spřaženého průřezu ze stávajícího betonu a UHPC. Limitní šířka trhlin v UHPC se uvažuje dle kap.3.7.4. Pokud jsou splněna kritéria pro tahové napětí v UHPC a/nebo ve výztuži, není třeba šířku trhlin u UHPC posuzovat (tab. 24).

Limitní hodnoty deformací pro zesílené konstrukce se řídí požadavky Eurokódů. Při výpočtu se uvažují moduly pružnosti UHPC dle výsledků průkazných zkoušek. Pokud v době návrhu nejsou k dispozici, lze použít hodnoty dle tab. 4.

4.2 Posuzování mezních stavů únosnosti

Vyhodnocení mezních stavů únosnosti zahrnuje především následující posouzení: namáhání ohybem s účinky nebo bez účinků normálových sil, namáhání smykem a protlačení a namáhání kroucením. U namáhání ohybem se rozlišuje, zda je nabetonovaná vrstva UHPC v tlačené, nebo v tažené oblasti. Pokud se pro posouzení mezních stavů únosnosti používá metoda dílčích součinitelů spolehlivosti, uvažují se dílčí součinitele spolehlivosti dle Eurokódů pro stávající beton a dle kap. 3.4 pro UHPC.

4.2.1 Namáhání ohybem – vrstva UHPC je v tlačené oblasti

Ve vrstvě UHPC se uvažuje návrhová tlaková pevnost UHPC. V závislosti na tloušťce UHPC vyjde tlačená oblast do vrstvy UHPC buď celá, nebo jen částečně. Napětí v mezním stavu únosnosti se uvažuje dle návrhového pracovního diagramu (obr. 6) nebo pokud je vrstva UHPC ve srovnání s výškou průřezu malá, lze uvažovat zjednodušeně konstantní hodnotou po výšce rovné 80 % výšky tlačené oblasti. Napětí ve stávajícím betonu a výztuži se ve výpočtech uvažují dle Eurokódů. Pokud je tlačená vrstva UHPC vyztužena betonářskou výztuží, stanoví se napětí ve výztuži dle návrhového pracovního diagramu v závislosti na předpokládané deformaci (dle metody mezních přetvoření, popř. metody mezní rovnováhy).

4.2.2 Namáhání ohybem – vrstva UHPC je v tažené oblasti

Ve vrstvě UHPC lze uvažovat zjednodušené namáhání dle pracovního diagramu na obr. 8 nebo 9. Pokud je vrstva UHPC vyztužena betonářskou výztuží, lze uvažovat ve výztuži napětí odpovídající mezi kluzu, v případě, že jde o běžně vyztužený průřez. Při pochybnostech se použije metoda mezních přetvoření a napětí ve výztuži i v UHPC se stanoví dle pracovních diagramů v závislosti na předpokládaném průběhu deformace, resp. šířce trhliny v UHPC (obr. 8 nebo 9). V případě UHPC bez betonářské výztuže se spoléhá na tahové působení pouze UHPC. Takový návrh je přípustný, pokud jde o staticky neurčitou konstrukci, kde může dojít k redistribuci a odlehčení kritického průřezu. Pokud nemůže k redistribuci dojít, pak se doporučuje do zesilující vrstvy přidat tahovou betonářskou výztuž a zajistit tak větší duktilitu průřezu.

Vliv orientace vláken v UHPC je vzhledem k malým tloušťkám zesilující vrstvy ve srovnání s běžnými konstrukcemi z UHPC omezen. U tlustších vrstev je třeba vliv orientace vláken respektovat. Platí hodnoty součinitele k_F , který upravuje tahovou pevnost UHPC dle tab. 23.

4.2.3 Namáhání smykem

Konstrukce zesilované tenkou vrstvou UHPC jsou smykem namáhány obvykle nejvíce v oblasti, která je vyrobena z běžného betonu. Z hlediska smykového působení tedy rozhoduje většinou stávající konstrukce. K posouzení se použije postup dle Eurokódů. Zvýšení únosnosti ve smyku spočívá při zesilování vrstvou UHPC především v tom, že se zvýší výška průřezu.

4.2.4 Namáhání protlačení

Desky zesílené vrstvou UHPC, které jsou namáhány na protlačení, mají obvykle vrstvu UHPC v tažené oblasti. Únosnost zesílené tloušťky desky v protlačení lze počítat na zesíleném průřezu s uvážením stávající smykové výztuže. Nabetonováním vrstvy UHPC se zvětší tloušťka desky a následně i kontrolovaný obvod a únosnost v protlačení. Pokud by takové zesílení nebylo dostatečné, pak je

nutné v oblasti kolem podpory (sloup, stěna) přidat spřahující výztuž, která zároveň plní funkci smykové výztuže aktivní na protlačení (např. spřahující trny zakotvené do stávající desky nebo svorníky opatřené mechanickým kotvením na spodní straně desky).

4.3 Konstrukční zásady

Minimální tloušťka nabetonované vrstvy UHPC bez vložené betonářské výztuže je 30 mm. Současně musí platit, že tloušťka nabetonované vrstvy je větší než 2násobek délky použitých ocelových vláken.

Minimální tloušťka vrstvy UHPC vyztužené betonářskou výztuží je dána minimální krycí vrstvou betonářské výztuže (kap. 3.9).

Minimální krycí soudržné předpínací výztuže se uvažuje dle kap. 3.9. (U uvažovaného typu zesilování se však použití předpínací výztuže nepředpokládá.)

Tloušťka krycí vrstvy směrem k existující konstrukci je požadována minimálně 20 mm (popř. 1,5násobek délky ocelových vláken (drátků)), aby se zajistilo kvalitní obetonování výztuže.

Přídavná složka krycí vrstvy $\Delta c_{dur,\gamma}$ se u UHPC již neuvažuje, je zahrnuta do minimálních krytí dle výše uvedených požadavků.

Pro délky přesahů při stykování betonářské výztuže a pro kotevní délky platí ustanovení uvedená v kap. 3.9.

Pracovní spáry, které jsou namáhány tahovou silou, musejí být opatřeny průběžnou betonářskou výztuží dimenzovanou dle tahového namáhání.

5. Provádění zesilování a rekonstrukcí betonových staveb

Provádění konstrukcí i rekonstrukcí pomocí UHPC klade mimořádné nároky na kvalifikaci zhotovitele. UHPC je materiál, který vyžaduje zvláštní pozornost při výrobě, dopravě, ukládání i ošetřování. Platí pravidla uvedená v kap. 4, zvláště pak v kap. 4.4.2.

K zesilování konstrukcí, popř. k betonáži spojů a jiných konstrukčních detailů, je možné využít UHPC ve formě transportbetonu. V případě malých objemů je možné s výhodou použít prefabrikovanou směs, která se smíchá s vodou v malé mobilní míchačce na staveništi. Návrh UHPC tedy musí umožňovat výrobu, dopravu a ukládání směsi způsoby typickými pro transportbeton.

Pro ukládání a ošetřování UHPC platí kap.4.4.2, 4.4.5 a 4.4.6.

6. Kontrolní činnost

Pro kontrolní činnost platí kap. 4.7.3.

Příloha 2 Robotická aditivní fabrikace (3D tisk) UHPC

1. Úvod

Tato příloha reflektuje rozvoj nových technologií umožňujících zpracování specializovaných cementových kompozitů, jakým je i UHPC.

Jednou z rychle se rozvíjejících technologií je oblast tzv. robotické aditivní fabrikace cementových hmot, často nazývané 3D tisk. Aditivní fabrikace je založena na postupném vytlačování a vrstvení materiálu.

V oblasti robotické aditivní fabrikace nejsou ještě v plné míře probádány a ukotveny poznatky a ani pravidla dobré praxe. Tato příloha si klade za cíl vytyčit základní zásady pro možné využití této technologie při zpracování UHPC.

2. Základní popis strojní technologie a požadavků

Strojní vybavení pro robotickou aditivní fabrikaci obvykle sestává z:

- a) mísicího centra,
- b) transportního systému (čerpadla, potrubí, hadice),
- c) robotického zařízení (6osé robotické rameno či 3osý systém včetně ovládacího softwaru),
- d) extrudovacího nástroje (extrudér, tryska).

Mísicí centrum (ambulantní i stacionární) musí mít dostatečnou energii a uspořádání musí být takové, aby bylo schopno směs UHPC zamíchat. Je nutné používat mísicí zařízení s nuceným způsobem míchání.

Transportní systémy je nutné odzkoušet a sladit s konzistencí transportované směsi.

Nároky na vlastnosti robotického zařízení jsou primárně dány požadavkem na rozměr výsledného prvku.

Extrudovací nástroj (extrudér, tryska) je zásadní součástí technologie aditivní fabrikace, při které dochází k extruzi (vytlačování) materiálu tryskou a postupnému vrstvení tohoto materiálu do požadovaného tvaru. V závislosti na vytlačovaném materiálu mohou být součástí extrudéru další komponenty a nástroje.

3. Zásady

Vzhledem k nově se rozvíjející oblasti zpracování UHPC robotickou aditivní fabrikací a k malému stupni poznání nelze v daném okamžiku stanovit jednoznačná pravidla pro návrh, realizaci a kontrolu prvků realizovaných touto technologií.

V případě využití 3D tisku je nezbytné postupovat při návrhu i realizaci individuálně a podrobně koordinovat projekční, výrobní a kontrolní činnosti.

Pro zajištění dostatečné statické spolehlivosti lze doporučit využití postupů navrhování na základě zkoušek dle ČSN EN 1990 [5].

Příprava vzorků musí proběhnout na kompletním zařízení, které bude využíváno k realizaci finálních stavebních prvků.

V případě výroby prvků robotickou fabrikací (3D tisk) UHPC se hodnotí vlastnosti materiálu až po odběru směsi UHPC ze vzorků, při jejichž výrobě prošel UHPC dopravním systémem a extruzí (vytlačení) tiskovou hlavici.

Je nezbytné provést odběry, přípravu zkušebních těles a jejich zkoušky tak, aby byla podchycena specifičnost této technologie, tj. potenciální vrstevnatost, provázanost vrstev, obsah a orientace vláken vzhledem k extruzi, rychlost tisku atd.

Návrh zkušebního plánu pro přípravu a zkoušení zkušebních těles pro materiálové testy i celých prvků zpracovává projektant ve spolupráci s dodavatelem (realizátorem) prvku.

Vzhledem k možné anizotropii materiálu (potenciální vrstevnatost a možné usměrnění ocelových vláken technologií aditivní fabrikace) je pro získání finálních materiálových parametrů nezbytné volit postupy výroby zkušebních těles vhodně a pečlivě.

Možným vodítkem pro přípravu zkušebních těles (referenčních i kontrolních) mohou být odběry z větších těles, jako je tomu např. u zkoušení stříkaného betonu, tj. jádrové vrtání a řezání diamantovými kotouči (ČSN EN 14889-1 [8], ČSN EN 14488-1 [9]).

Požadavky na vlastnosti UHPC připraveného 3D tiskem jsou stejné jako v kap. 2.2 a 2.3., pakliže nejsou případné odchylky uvedeny v projektu.

Kontrolní zkoušky během výroby se přiměřeně řídí ustanoveními kap. 2.6. Zkoušky lze provádět také na dalších tvarech těles smluvených mezi projektantem, dodavatelem a odběratelem. Zkušební vzorky se připravují řezáním a vrtáním z hotových prvků vyrobených aditivní fabrikací a ošetřovaných dle individuální specifikace projektu.

Návrhové postupy uváděné v kap. 3 těchto TP jsou v případě prvků zhotovených aditivní robotickou fabrikací pouze informativní a nezávazné. Projektant musí pečlivě zhodnotit možné vlivy zpracování aditivní fabrikací na homogenitu UHPC a výsledné statické chování výsledného prvku v podmínkách užívání. Pro ověření statické spolehlivosti prvků je nezbytné provádět zatěžovací zkoušky na celých hotových prvcích či jejich podstatných částech, a to s přihlédnutím k funkci prvku v konstrukci. Postupy odzkoušení se řídí zásadami pro ověření spolehlivosti konstrukcí na základě zkoušek (např. [5], [35]).

TECHNICKÉ PODMÍNKY – TP 267 Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)

Schválilo:	Ministerstvo dopravy
Zpracovatel:	Česká betonářská společnost ČSSI Ing. Robert Coufal, Ph.D. Ing. Milan Kalný prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D. prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.
Vydání:	první
Počet stran:	62
Tech. redakční rada:	Ing. Pavla Březnická (Ministerstvo dopravy) Ing. Martin Luňáček, Ph.D., MBA (Ředitelství silnic a dálnic s. p.) Ing. Pavel Řehoř (Ředitelství silnic a dálnic s. p.) doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng. (ČVUT v Praze) doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D. (VUT v Brně) Ing. Petr Vitek (Hochtief CZ a.s.) Ing. Jan Prchal (KŠ PREFA s.r.o.)
Zástupce koordinátora:	Ing. Veronika Říhová (Ředitelství silnic a dálnic s. p.)