

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Kloknerův ústav

Oddělení experimentálních a měřicích metod

TECHNOLOGIE A VLASTNOSTI UHPC

TECHNOLOGY AND PROPERTIES OF ULTRA HIGH
PERFORMANCE CONCRETE

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Milan Rydval

Doktorský studijní program: P 3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Nauka o nekovových materiálech a stavebních hmotách
Školitel: doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

Praha, leden 2019

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně a obsah práce nebyl předložen k jiným akademickým nebo profesním řízením. Prohlašuji, že tato disertační práce byla vytvořena v souladu se všemi závaznými pravidly a že jsem řádně uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Prohlašuji, že práce vznikla jako součást doktorského studia, do kterého jsem řádně zapsán.

V Praze dne 21. ledna 2019

.....
Ing. Milan Rydval

PODĚKOVÁNÍ:

Poděkování patří zejména technickým pracovníkům Experimentálního oddělení Kloknerova ústavu, kteří se významnou měrou podíleli na přípravě a realizaci celé řady laboratorních zkoušek a experimentů. Dále děkuji svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Kolískovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a užitečné rady, které mi poskytoval v průběhu celého doktorského studia. Výsledky zkoušek prezentované v této disertační práci vznikly za podpory projektů GAČR 13-15175S „*Prvky z funkčně vrstvených vláknocementových kompozitů*“ a GAČR 15-05791S „*Analýza fyzikálních a chemických procesů při vysokoteplotním zatížení vysokohodnotných cementových kompozitů s hybridní vláknovou výztuží*“ financované grantovou agenturou GAČR Česká republika, dále projektu TA01010269 „*Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky staveb*“ financované technologickou agenturou TAČR a také za podpory SGS16/196/OHK1/2T/31 „*Vlastnosti vláknobetonových kompozitních materiálů vystavených vysokým teplotám*“ financovaného v rámci studentské grantové soutěže ČVUT.

ABSTRAKT

Disertační práce se věnuje technologii a vlastnostem moderního jemnozrnného cementového kompozitního materiálu označovaného běžně UHPC – „*Ultra High Performance Concrete*“. V případě, kdy je cementová matrice vyztužena krátkými rozptýlenými vlákny (disperzní výtuzí), je tento cementem pojený kompozitní materiál označován jako UHPFRC – „*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*“. S betonem, tak jak jej vnímá odborná i laická veřejnost, má tento kompozitní materiál společnou pouze základní skladbu směsi, a to vodu, kamenivo a cement. Složení směsi UHPC je ovšem daleko složitější a při volbě složek a jejich množství se vychází z předpokladu vytvoření co nejhutnější matrice. Hutné struktury je dosaženo použitím silikátového hydraulického pojiva (portlandského cementu), inertních příměsí fungujících jako mikroplnivo (jako příklad lze uvést mikromletý vápenec, mletý křemen, případně i pigmenty), latentně hydraulických příměsí (mletá vysokopecní struska, popílek, křemičitý úlet) drobného kameniva (do 4 mm, výjimečně i 8 mm), přísad (nejběžnější jsou superplastifikátory na bázi polykarboxylátů, dále zpomalovače tuhnutí, přísady regulující smrštění, apod.) a malého množství záměsové vody. Takto sestavená matrice je po zatvrdnutí velmi pevná, ale zároveň velmi křehká.

Pro zajištění duktilního chování je matrice vyztužena disperzní výtuzí. Disperzní výtuz z zásadním způsobem ovlivňuje chování materiálu po vzniku trhliny a při nehomogenním rozmístění po průřezu negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu je nutné optimalizovat složení směsi tak, aby výsledná receptura byla stabilní vůči segregaci vláken. Jako vhodná a přesná metoda kontroly distribuce vláken v zatvrdlém UHPC se jeví použití optické mikroskopické metody na řezné ploše. Homogenita distribuce vláken je dále ovlivněna technologickými vlivy a nekázní při výrobě prvků.

Práce popisuje vybrané technologické vlivy ovlivňující distribuci vláken po výšce průřezu a na výsledcích experimentů poukazuje na nutnost věnovat segregaci patřičnou pozornost. Práce dále přináší možnosti zvýšení lomových vlastností při zachování objemového zastoupení vláken vhodnou skladbou a funkčním vrstvením.

Klíčová slova: UHPC, technologie betonu, segregace vláken, duktilita

ABSTRACT

This doctoral thesis is focused on technology and material characteristics of a fine-grained cement based composite material which is worldwide known as UHPC – Ultra High Performance Concrete. In the case of a matrix reinforced by fibres, this material is then known as UHPFRC – Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete. UHPC has the same matrix basic components (water, aggregates and cement) such as commonly used concretes. However, the mixture design of UHPC is much more complicated and it is based on high matrix density. High amount of cement, fine-grained aggregates (maximum grain size 4 mm), fillers and micro fillers (silica fume, slag, fly ash, etc.), using superplasticizers and low water to cement ratio are fundamentals for achieving high density of the matrix. A UHPC matrix is very dense and strong but very brittle.

To achieve and increase a ductile behaviour after the first crack, the UHPC matrix is reinforced by a non-uniform reinforcing. The dispersion of the reinforcing has an essential impact on the material behaviour after the first crack and its homogeneity affects the load bearing capacity of UHPC. Therefore, the mixture design must be optimized for achieving a good stability of homogeneity of the dispersion reinforcing (steel fibres). An optical microscopic method appears to be a suitable and exact method for checking homogeneity of steel fibres. The steel fiber distribution is affected also by technological aspects.

This thesis describes the technological aspects of the steel fiber distribution and their impact on load bearing capacity of elements made from UHPC. The possibility and production of functionally layered elements is also noted in this thesis.

Keywords: UHPC; Concrete Technology; Fiber Segregation; Ductility

OBSAH

A.	ÚVOD	- 9 -
B.	CÍLE PRÁCE	- 14 -
C.	REŠERŠNÍ A TEORETICKÁ ČÁST	- 15 -
1	NÁVRH A PROVÁDĚNÍ PRVKŮ Z UHPC S OHLEDEM NA NORMY A DOPORUČENÍ	- 15 -
1.1	ZAHRANIČNÍ NORMY A DOPORUČENÍ	- 15 -
1.2	ČESKÉ NORMY PRO NAVRHOVÁNÍ A PROVÁDĚNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ	- 16 -
1.3	DOPORUČENÍ PRO UHPC V ČESKÉ REPUBLICE	- 18 -
2	PRAKTICKÉ APLIKACE UHPC V ČESKÉ REPUBLICE	- 18 -
2.1	KONSTRUKCE A KONSTRUKČNÍ PRVKY	- 20 -
2.1.1	Desky ztraceného bednění	- 20 -
2.1.2	Zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících	- 20 -
2.1.3	Lávka pro pěší v Čeperce	- 22 -
2.1.4	Rekonstrukce mostů přes železniční tratě v Přerově	- 24 -
2.1.5	Lávka přes řeku Lubinu v Příboru	- 25 -
2.1.6	Dvojitě zakřivená lávka pro pěší v obci Kladno – Vrapice	- 26 -
2.1.7	Lávka pro pěší a cyklisty v Táboře	- 26 -
2.2	OSTATNÍ APLIKACE V ČESKÉ REPUBLICE	- 27 -
2.2.1	Stůl na ping pong	- 27 -
2.2.2	Stéla urnové kobky	- 28 -
3	VYBRANÉ APLIKACE UHPC VE SVĚTĚ	- 28 -
3.1	MOSTNÍ STAVITELSTVÍ	- 28 -
3.1.1	První stavba z UHPC – Sherbrooke bridge, Kanada	- 29 -
3.1.2	Pont de la République v Montpellier	- 29 -
3.1.3	Lávka pro pěší Passerelle des Anges	- 30 -
3.2	VÝŠKOVÉ BUDOVY	- 31 -
3.2.1	Musashi Kosugi Towers v Tokiu	- 31 -
3.2.2	Trump International Hotel and Tower v Chicagu	- 31 -
3.3	ARCHITEKTURA	- 32 -
3.3.1	Malmö Live – Kontor	- 32 -
3.3.2	Fasádní panely na Jean Bouin Stadium's, Francie	- 32 -
3.3.3	Zastřešení železniční stanice Montpellier, Francie	- 33 -
3.3.4	Muzeum evropských a středozezemních civilizací MuCEM	- 34 -
4	SUROVINY POTŘEBNÉ PRO VÝROBU UHPC	- 35 -
4.1	CEMENT	- 35 -
4.2	KAMENIVO	- 35 -
4.3	PŘÍMĚSI	- 38 -
4.3.1	Příměsí typu II – latentně hydraulické	- 38 -
4.3.1.1	Křemičitý úlet (mikrosilika)	- 39 -
4.3.1.2	Elektrárenský popílek	- 40 -
4.3.1.3	Mletá granulovaná vysokopecní struska	- 42 -
4.3.2	Příměsí typu I – inertní	- 43 -
4.4	PŘÍSADY	- 43 -
4.4.1	Plastifikátory a superplastifikátory	- 44 -

4.5	VODA	- 44 -
4.6	DISPERZNÍ VÝZTUŽ	- 46 -
5	REOLOGIE UHPC	- 47 -
5.1	ZKOUŠKY KONZISTENCE	- 47 -
5.1.1	Zkouška sednutí – rozlitím	- 48 -
5.1.2	Stanovení konzistence pomocí Haggermanova kužílku	- 49 -
5.2	VISKOZITA UHPC	- 50 -
5.2.1	Měření viskozity UHPC reometrem RC20	- 51 -
5.2.2	Nepřímé měření viskozity	- 53 -
6	VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO UHPC	- 54 -
6.1	PEVNOST V TLAKU	- 54 -
6.2	ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI	- 57 -
6.2.1	Statický modul pružnosti v tlaku	- 57 -
6.2.2	Dynamický modul pružnosti	- 58 -
6.3	PEVNOST V TAHU	- 59 -
6.3.1	Zkouška pevnosti v tahu ohybem	- 60 -
6.3.1.1	Zkouška trojbodovým ohybem na tělesech s vrubem	- 60 -
6.3.1.2	Zkouška čtyřbodovým ohybem na tělesech bez vrubu	- 64 -
6.3.2	Zkouška pevnosti osovým tahem	- 66 -
6.3.3	Zkouška pevnosti příčným tahem	- 66 -
6.3.4	Tahové chování UHPC	- 67 -
7	VLIV DISTRIBUCE VLÁKEN NA CHOVÁNÍ A SLOŽENÍ UHPC	- 69 -
7.1	NÁVRH SLOŽENÍ RECEPTURY UHPC	- 71 -
7.2	METODY KONTROLY HOMOGENITY DISTRIBUCE DISPERZNÍ VÝZTUŽE	- 75 -
7.2.1	Kontrola distribuce vláken v čerstvém UHPC	- 75 -
7.2.1.1	Metoda odplavování jemných částic dle ČSN EN 14488-7	- 75 -
7.2.1.2	Metoda odplavování jemných částic dle DIN 1045	- 75 -
7.2.1.3	Magnetická metoda	- 76 -
7.2.1.4	Zkoušky konzistence UHPC	- 77 -
7.2.2	Kontrola homogenity distribuce výztuže u ztvrdlého UHPC	- 78 -
7.2.2.1	Kontrola distribuce vláken dle ČSN EN 14488-7	- 79 -
7.2.2.2	Elektrické odporové metody	- 79 -
7.2.2.3	Výpočetní tomografie	- 80 -
7.2.2.4	Optická kontrola na lomové ploše	- 81 -
7.2.2.5	Optická metoda na řezné ploše	- 82 -
D.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 83 -
8	KONTROLA DISTRIBUCE VLÁKEN OPTICKOU METODOU	- 84 -
9	ANALÝZA VLIVU DISTRIBUCE VLÁKEN NA NOSNOST DESEK ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ	- 85 -
9.1	ZKOUŠKY DESEK ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ	- 85 -
9.1.1	Parametry UHPC zkoušených desek	- 86 -
9.1.2	Zkoušky desek ve čtyřbodovém ohybu	- 88 -
9.1.2.1	Uspořádání zkoušky	- 88 -
9.1.2.2	Postup zkoušek	- 88 -
9.1.2.3	Výsledky vybraných ohybových zkoušek	- 89 -
9.1.3	Hodnocení distribuce drátků na vybraných deskách	- 90 -
9.2	ZKOUŠKY NOSNÍKŮ TVARU I	- 97 -

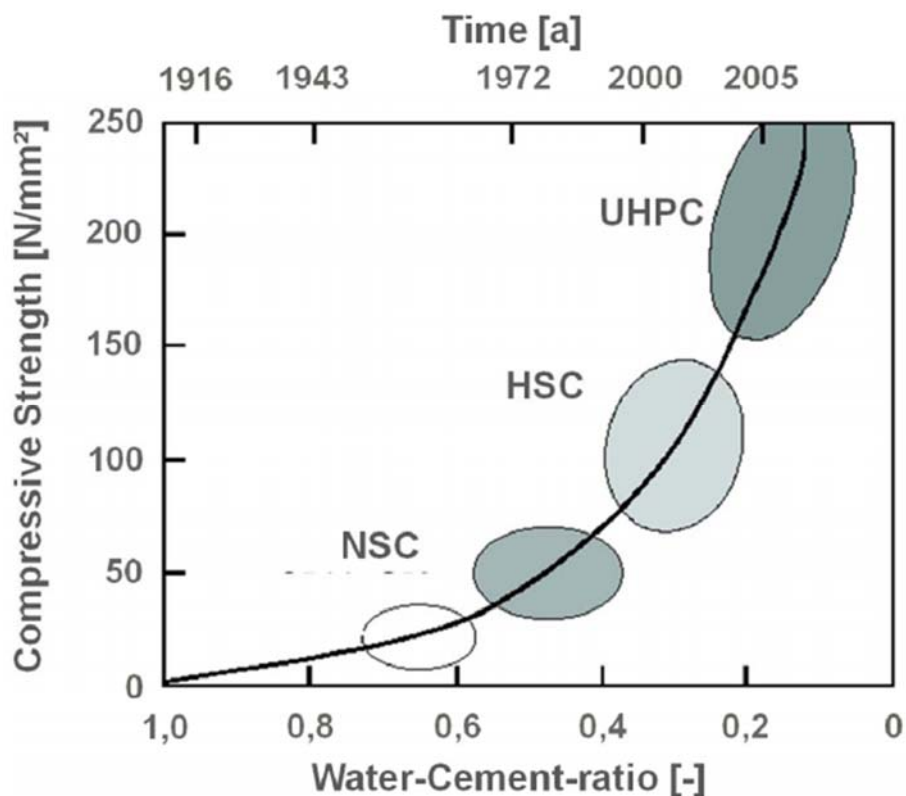
9.2.1	Materiálové parametry	- 98 -
9.2.2	Zkoušky nosníků ve čtyřbodovém ohybu	- 99 -
9.2.2.1	Uspořádání zkoušky	- 99 -
9.2.2.2	Postup zkoušky	- 100 -
9.2.2.3	Výsledky ohybových zkoušek nosníků	- 101 -
9.2.3	Hodnocení distribuce drátků na nosnících	- 102 -
10	PŘÍPRAVA A ANALÝZA TĚLES VYTVOŘENÝCH Z VRSTEV S PŘEDEM DEFINOVANÝM OBJEMEM VLÁKEN	- 108 -
10.1	VÝROBA HOMOGENNÍCH A VRSTVENÝCH TĚLES	- 108 -
10.1.1	Složení matrice	- 108 -
10.1.2	Postup míchání	- 110 -
10.1.3	Výsledky konzistence čerstvé směsi dle ČSN EN 1015-3	- 111 -
10.1.4	Výroba zkušebních těles	- 112 -
10.2	ZKOUŠKY HOMOGENNÍCH A VRSTVENÝCH TĚLES	- 113 -
11	TECHNOLOGICKÉ VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ ZPRACOVATELNOST SMĚSI A DISTRIBUCI VLÁKEN	- 118 -
11.1	KONZISTENCE ČERSTVÉ SMĚSI	- 118 -
11.1.1	Vliv množství disperzní výztuže na zpracovatelnost (SF)	- 119 -
11.1.2	Zachování zpracovatelnosti při vyšší dávce vláken (SFR)	- 121 -
11.1.2.1	Vliv množství vody na distribuci vláken	- 123 -
11.1.3	Porovnání získaných výsledků	- 124 -
E.	DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚRY PRÁCE	- 127 -
F.	SEZNAMY LITERATURY	- 131 -
12	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 131 -
13	VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA	- 140 -

A. ÚVOD

Disertační práce je zaměřena na technologii a vlastnosti moderních jemnozrnných cementem pojených kompozitních materiálů, které jsou v současné době označovány celosvětově uznávaným pojmem UHPC „*Ultra High Performance Concrete*“, případně pro zdůraznění přítomnosti vyztužení matrice krátkými rozptýlenými vlákny (disperzní výtuzí) pojmem UHPFRC „*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*“. Názvy lze přeložit jako velmi vysokohodnotné betony či vláknobetony. Odborná veřejnost, nejen v České republice, dnes již běžně používá výše uvedené zkratky UHPC a UHPFRC. Tyto zkratky v zásadě označují jeden typ vysokohodnotného vlákný vyztuženého kompozitu a jsou zaměnitelné. **Z tohoto důvodu bude v textu dále pod označením UHPC míněno i UHPFRC.**

Složení UHPC betonů a betonů běžných pevnostních tříd používaných v současné době, tak jak je zná i laická veřejnost, vychází ze stejného principu. U obou typů se jedná o kompozitní materiál, který má podobné základní složky (cement, kamenivo a vodu) a dále se skládá z přísad a příměsí. Při návrhu receptury běžného betonu a UHPC se volí nejen vhodné suroviny pro jejich výrobu, ale i jejich vzájemný poměr, aby výsledný materiál měl po zatvrdnutí požadované vlastnosti. Zde ale již podobnost mezi těmito materiály končí. Volba surovin a jejich procentuální podíl u běžného betonu lze dnes nalézt v řadě publikací (například v [1–3]). Příklad procentuálního zastoupení jednotlivých složek je uveden na Obr. 2.

Obecně lze říci, že běžný beton je složen z cca 300 – 400 kg/m³ cementu, 1700 – 1800 kg/m³ drobného a hrubého kameniva, 160 – 200 kg/m³ vody a přibližně 80 kg/m³ přísad a příměsí. U běžných betonů je používáno vodního součinitele, tedy podílu objemu vody k objemu cementu, v rozmezí 0,4 – 0,6. Hodnota vodního součinitele $w/c = 0,4$ se jeví jako mezi hodnotou mezi běžnými betony a betony vysokohodnotnými a vychází z teoretické hodnoty dávky vody potřebné k úplné hydrataci cementu, kterou v roce 1968 stanovil Powers [4]. Pro úplnou hydrataci cementu je minimální podíl $w/c = 0,22$. Ilustrativní vztah mezi vodním součinitelem a pevností v tlaku a postupný vývoj pevnosti v tlaku od počátku 19. století je patrný na následujícím Obr. 1.



Obr. 1: Vztah w/c a pevnosti v tlaku a vývoj pevnosti od počátku 19. století [5]; na svislé ose je uvedena pevnost v tlaku [MPa]; na spodní vodorovné ose pak hodnoty vodního součinitele; časová osa je pak reprezentována horní vodorovnou osou

Složení receptury UHPC se od běžného betonu liší v několika ohledech. Prvním z nich je dávka cementu, kdy pro UHPC jsou běžné dávky $600 - 1\,000 \text{ kg/m}^3$. Dále obsahuje pouze jemné kamenivo (maximální velikost zrna kameniva do 4 mm , běžně $\leq 1 \text{ mm}$) a vodní součinitel se běžně pohybuje do hodnoty $w/c \leq 0,25$. Díky vývoji superplastifikačních přísad je možno vyrábět betony s nižším vodním součinitelem při zachování jeho zpracovatelnosti. Dalším rozdílem v matrici UHPC je použití disperzní výztuže z krátkých vláken, která zvyšuje mechanické vlastnosti matrice a zajišťuje přenos zatížení i po vzniku trhliny. V současné době je nejrozšířenější použití kovových nebo polymerních vláken, případně jejich kombinace, v dávce $V_f = 1 - 3\%$ objemu směsi.

UHPC se od běžných betonů liší nejen složením a finální makrostrukturou, ale také výslednými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi. Mezi nejvýznamnější lze uvést výrazně vyšší pevnost v tlaku, které byla dlouhodobě rozhodujícím parametrem při specifikování betonu, vysokou pevnost v tahu či v tahu za ohybu s výraznými residuálními pevnostmi i po vzniku trhliny díky vyztužení rozptýlenými vlákny, vysokou duktilitou a vyšší hodnotou modulu pružnosti. Kromě výše uvedených výborných mechanických vlastností dosahují UHPC kompozitní materiály také vyšší trvanlivosti oproti běžným betonům. Výrazně vyšší trvanlivost je pro tyto materiály zásadním kritériem charakterizující skupinu cementem pojených jemnozrnných materiálů typu UHPC [6].

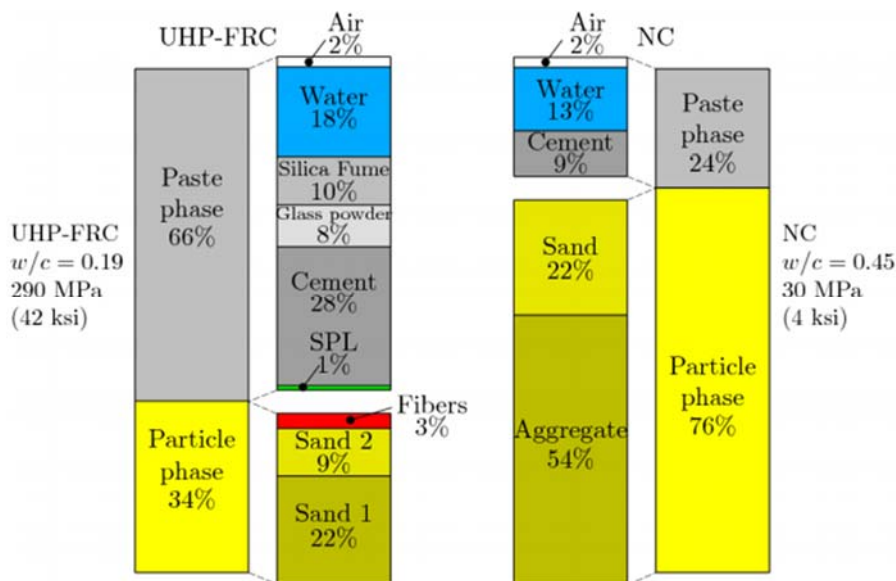
Z hlediska definování vlastností je i u skupiny UHPC kompozitních materiálů, obdobně jako u běžných betonů, první signální hodnotou pevnost v tlaku. V současné době neexistuje celosvětově ustálená hodnota pevnosti v tlaku a zkušební metoda

stanovení tohoto parametru. Materiály označované v mezinárodních publikacích jako UHPC mají pevnost v tlaku oscilující kolem hodnoty $f_{ck} = 150$ MPa, přičemž tato pevnost je stanovována na rozdílných tělesech a různého způsobu ošetřování, které může být i značně odlišné od podmínek běžných pro normální betony [7–10].

Ve francouzském doporučení AFGC byla udávána pevnost v tlaku v mezích $150 \leq f_{ck} \leq 250$ MPa [7]. Tato hodnota je stanovena na válcových tělesech průměru 110 mm a výšky 220 mm, která byla po dobu 3 dnů od výroby ošetřována v prostředí nasyceném vodní parou při teplotách 80 – 90°C. V německém doporučení Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [8] je pevnost v tlaku, pohybující se v intervalu $150 \leq f_{ck} \leq 200$ MPa, stanovena na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm. V japonském doporučení JSCE [9] je pevnost v tlaku stanovena na válcích průměru 100 mm a výšce 200 mm. Vzhledem k absenci hrubého kameniva připouští japonské doporučení stanovení pevnosti v tlaku i na válcích průměru 50 mm a výšce 100 mm. Dle Metodiky 1 [11], vydané v České republice v roce 2015, by měla být zkouška pevnosti v tlaku provedena na válci průměru 150 mm a výšce 300 mm. Dle Metodiky 2 [12], která je v souladu s dokumentem fib Model Code, dosahuje UHPC pevnosti v tlaku, stanovené na výše uvedených válcích, hodnot v rozmezí $110 \leq f_{ck} \leq 180$ MPa.

Kromě výše uvedených válcových těles lze pro zkoušku pevnosti v tlaku využít například trámečků 40 x 40 x 160 mm nebo na krychlích o hraně 100 mm. Velikost zkušebního tělesa, způsob ošetřování, provedení zkoušky a další krajové podmínky mají zásadní vliv na stanovené a prezentované výsledky. Z tohoto důvodu je nutné tyto okrajové podmínky vždy uvádět, aby bylo možné vyhodnotit srovnatelnost jednotlivých výsledků. Srovnatelnost výsledků dle okrajových podmínek má ve svém článku uveden například S. Abbas [6]. Současný trend specifikace UHPC ustupuje od klasifikace tohoto materiálu pouze tlakovou pevností, ale do popředí se dostávají i další užité parametry UHPC, které převyšují běžný beton. Ze zástupců těchto parametrů lze vybrat zejména vysokou trvanlivost, která jde ruku v ruce s jemnozrnností matrice a vytvořením co nejhutnější struktury a dále dosažení duktilního chování materiálu i po vzniku trhliny.

Vysoké pevnosti v tlaku a dalších užitných vlastností je dosahováno výběrem kvalitních surovin, jejich vhodným poměrem a technologií výroby. Návrh složení receptury UHPC vychází z předpokladu dosažení co nejhutnějšího objemu, který bude mít zároveň optimální křivku zrnitosti z hlediska zpracovatelnosti. Hutné struktury je dosaženo použitím silikátového hydraulického pojiva (portlandského cementu), inertních příměsí fungujících jako mikroplnivo (jako příklad lze uvést mikromletý vápenc, mletý křemen, případně i pigmenty), latentně hydraulických příměsí (mletá vysokopecní struska, popílek, křemičitý úlet) drobného kameniva (do 4 mm, výjimečně i 8 mm), přísad (nejběžnější jsou superplastifikátory na bázi polykarboxylátů, dále zpomalovače tuhnutí, přísady regulující smrštění, apod.) a vody. Takto sestavená matrice je po zatvrdnutí velmi pevná, ale zároveň velmi křehká. Rozdíl ve složení UHPC oproti běžným betonům je znázorněn na Obr. 2, který byl převzat z článku [13] věnovaném historii vývoje vysokohodnotných betonů od 70. let 19. století, kdy byly vyvinuty nové typy plastifikátorů umožňující snížení vodního součinitele pod hranici $w/c \leq 0,4$ [-] a takto vyráběné betony dosahovali pevnosti v tlaku až 60 MPa [4].

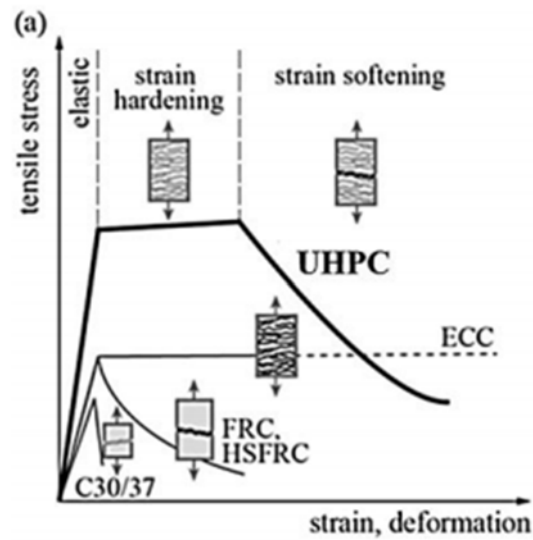


Obr. 2: Ilustrace rozdílu složení matrice UHPC a běžného betonu, ze složení je patrné, že u UHPC tvoří cca 66% objemu složky podílející se na procesu hydratace a vytvoření hutné a pevné mikrostruktury – převzato z [13]

Pevnost v tlaku není jediným rozhodujícím parametrem pro UHPC materiály. Dalšími parametry jsou tahové a lomové vlastnosti, vysoká trvanlivost a další mechanicko-fyzikální vlastnosti. Hutná struktura UHPC je velmi pevná, ale zároveň i křehká. Pro zajištění přenosu zatížení i po vzniku trhliny je matrice vyztužena disperzní výztuží. Duktilního chování je dosahováno zejména kovovými drátky, které jsou schopny přenášet tahové napětí i po vzniku trhliny. Polymerní vlákna jsou do směsi přidávána zejména z hlediska zvýšení odolnosti matrice vůči vysokým teplotám a zabránění vzniku smršťovacích trhlin. Typ a množství použitých vláken definuje výsledné chování prvku po vzniku trhliny, které je zobrazeno na Obr. 3.

Chování nevyztužené matrice po vzniku trhliny je stejné jako u prostého betonu, kdy dochází k vyčerpání schopnosti matrice přenášet tahová napětí a následnému kolapsu. Při malém objemovém zastoupení kovových vláken, nebo použitím vláken polymerních je průřez schopen přenášet tahová napětí a zároveň klesá jeho únosnost. Tomuto chování odpovídají vláknobetonu typu FRC („*Fiber Reinforced Concrete*“) nebo HSFRC („*High Strength Fiber Reinforced Concrete*“) a v literatuře je označováno jako tahové změkčení „*strain softening*“ [7, 11]. U jemnozrnných cementem pojených kompozitních materiálů typu ECC („*Engineered Cementitious Composites*“), které lze najít také pod označením SHCC („*Strain Hardening Cementitious Composites*“), lze vyztužením polymerními vlákny dosáhnout chování, kdy dochází k tvorbě série mikrotrhlin („*multiple cracking*“) při konstantní úrovni zatížení. Tento způsob chování označuje V.C. Li ve své publikaci jako „*pseudo strain hardening*“ [14]. Pro zajištění dostatečné únosnosti i po vzniku trhliny, tedy pro zajištění tahového zpevnění „*strain hardening*“, je nutno vyztužit maticí velkým množstvím kovových vláken. Ve francouzském doporučení AFGC je doporučeno množství kovových vláken $V_f = 2\%$ pro prvky bez běžné betonářské výztuže [7]. Tahového zpevnění lze dosáhnout i využitím polymerních vláken s odpovídající tahovou pevností a vyšším modulem pružnosti než matrice. Z běžně známých vláken tomu odpovídají PVA vlákna nebo vlákna

uhlíková. Rozdíl v chování jednotlivých cementem pojených kompozitních materiálů je patrný na následujícím Obr. 3.



Obr. 3: Ilustrativní porovnání pracovních diagramů tahové zkoušky různých vláknocementových kompozitních materiálů – převzato z [15]

B. CÍLE PRÁCE

Výsledné vlastnosti UHPC jsou závislé nejen na použitých materiálech, ale také na jejich skladbě za účelem dosažení co nejhutnější jemnozrné matrice, která bude dobře zpracovatelná. Kromě jemnozrnnosti matrice, zpracovatelnosti čerstvé směsi je jistým měřítkem i výsledná předpokládaná pevnost v tlaku, která se bude pohybovat nad hranicí $f_{ck} = 110$ MPa [10, 12]. Výsledná pevnost v tlaku je závislá na okrajových podmínkách, kterými jsou například velikost zkušebního tělesa, úprava tlačných ploch, centrování vzorku při zkoušce, způsob zatěžování, tuhost zkušebního stroje, podmínkách během ošetřování vzorku. Velmi pevná matrice je ale zároveň velmi křehkou, a proto je vyztužována disperzní výztuží. Typ použitých vláken ovlivňuje výsledné vlastnosti UHPC jako je vznik mikrotrhlin vlivem smrštění, pevnost v tlaku, ale především pevnost v tahu a lomové vlastnosti po vzniku trhliny. Díky vhodnému návrhu množství a typu vláken lze zásadním způsobem zvýšit tahové (lomové) vlastnosti. Pro zajištění duktilního chování po vzniku trhliny to jsou především vlákna kovová. Tahová pevnost UHPC a zejména její reziduální složky (po vzniku trhliny) jsou jedním z rozhodujících parametrů při návrhu a posuzování prvků z UHPC a to bez použití konvenční výztuže a vstupuje do statického výpočtu. Nejen typ a množství vláken, ale zejména jejich rovnoměrné prostorové rozložení, zásadním způsobem ovlivňuje chování. UHPC v tahu či v tahu za ohybu Na základě výše uvedeného byly stanoveny tyto cíle disertační práce:

- a) Stanovení distribuce krátkých rozptýlených drátků (disperzní výztuže) po výšce průřezu prvků z UHPC a vliv distribuce na ohybovou únosnost zvoleného prvku z UHPC.
- b) Ověření možnosti přípravy prvku z UHPC s řízeným vytvořením vrstev s různým objemovým dávkováním drátků V_f a porovnání s prvkem vyrobeným běžným způsobem.
- c) Analýza technologických vlivů na chování ztvrdlého UHPC v tahu za ohybu po vzniku trhliny, zejména s přihlédnutím na zpracovatelnost směsi a dávky rozptýlené výztuže.
- d) Analýza vlivu reologie a konzistence čerstvé směsi UHPC na stabilitu směsi vůči rozměšování a sedání ocelových drátků ke dnu formy.

C. REŠERŠNÍ A TEORETICKÁ ČÁST

Ve světové literatuře, ale i v České republice lze pro cementem pojené kompozitní materiály, jejichž matrice je vyztužena disperzní výztuží najít řadu označení s nejrůznějšími zkratkami (například UHPFRC – „*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*“; SHCC – „*Strain Hardening Cementitious Composites*“; SHFRCC – „*Strain Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites*“; ECC – „*Engineered Cementitious Composites*“; HPFRCC – „*High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*“ a další). Všechna tato označení spojují jemnozrný cementem pojený kompozitní materiál, jehož matrice je vyztužena rozptýlenou disperzní výztuží, a který je schopen odolávat a přenášet zatížení i po vzniku trhliny. Složení matrice těchto materiálů je odlišné od běžně používaných batonů. Rozdíly ve složení matrice jemnozrné cementem pojené matrice vyztužené vlákny typu UHPFRC a běžného betonu jsou uvedeny na Obr. 2 na str. - 12 -. Vzhledem k množství použitých zkratk bude v práci uváděno pouze označení UHPC – „*Ultra High Performance Concrete*“. Pod toto označení spadají i matrice vyztužené disperzní výztuží. Označení UHPC, které je uvedeno v práci, koresponduje i s názvoslovím uvedeném v německém [8], francouzském [7], americkém [16] i v českých doporučeních [11, 12, 17]. Zavedení UHPC do běžné stavební praxe je limitováno normativním prostředím, které je popsáno v následující kapitole 1.

1 NÁVRH A PROVÁDĚNÍ PRVKŮ Z UHPC S OHLEDEM NA NORMY A DOPORUČENÍ

1.1 ZAHRANIČNÍ NORMY A DOPORUČENÍ

V současné době neexistuje celosvětově uznávaný předpis či doporučení pro cementem pojené kompozitní materiály, které jsou označovány jako vysokohodnotné či ultravysokohodnotné betony. Tato doporučení neexistují nejen z hlediska návrhu a složení receptury, ale také z hlediska zkoušení základních mechanicko-fyzikálních vlastností, projektování a realizace staveb z těchto hi-tech materiálů.

Základním dokumentem, v nadnárodním měřítku, věnující se navrhování UHPC je fib Model Code 2010 [10], jehož finální podoba vyšla v roce 2012. V tomto mezinárodním dokumentu, obdobně jako v českých normách (viz kapitola 1.2), je uvedena nejvyšší pevnostní třída cementového kompozitu C 120/140. Další aktualizace tohoto doporučení, která by se měla stát celosvětově uznávanou normou respektující nejen normy ISO, ale i normy EN, je již nyní připravována a její vydání se předpokládá v roce 2030.

Vzhledem k absenci mezinárodního normativního podkladu vznikala nezávisle na sobě doporučení v zemích, které se problematikou UHPC dlouhodobě věnují. Jako příklad lze uvést francouzské doporučení AFGC [7], které se věnuje zejména výrobě prvků z průmyslově vyráběné suché směsi a vyztužených pouze nekonvenční výztuží. Jako jedna z mála doporučení obsahuje metodiky pro průkazní a kontrolní zkoušky UHPC. V tomto francouzském doporučení je charakteristická hodnota pevnosti v tlaku UHPFRC, tedy vyztuženého UHPC, v rozmezí $150 \leq f_{ck} \leq 250$ MPa. Samotné doporučení

dále uvádí, že těchto pevností je dosaženo v závislosti na pojivovém součiniteli w/b , který se může měnit v závislosti na přidání organických vláken, a dále francouzské doporučení udává, že se pevnost v tlaku může měnit v závislosti na způsobu teplotního ošetřování (uložení vzorků v prostředí nasyceného vodní párou teploty 80 – 90°C) [7]. Stanovení pevnosti v tlaku je dle tohoto doporučení provedeno na válcových tělesech o průměru 110 mm a výšce 220 mm.

Německou obdobou doporučení AFGC je pak kapitola IX Ultra-hochfester Beton UHPC [8], která vyšla v Beton-Kalender 2013 [18]. Tato kapitola se zabývá výrobou UHPC ze surovin dostupných ve Spolkové republice Německo a obsahuje i informace ohledně použití konvenční betonářské výztuže v UHPC. V německém doporučení je stanovena pevnost v tlaku na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Hodnoty pevnosti v tlaku se dle dikce německého doporučení pohybují v rozmezí $150 \leq 200$ MPa.

V japonském doporučení věnujícímu se HPFRCC „*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*“ nejsou uvedeny limitní hodnoty tlakové pevnosti, ale je zde kladen veliký důraz na chování UHPC po vzniku první trhliny a tahovému zpevnění [9]. V tomto doporučení jsou jako referenční tělesa uvedeny válce průměru 100 mm a výšky 200 mm, jako přípustná tělesa jsou pak uvedeny válce průměru 50 mm a výšky 100 mm.

Ve spojených státech lze nalézt několik dokumentů, ze kterých lze vybrat aktualizované vydání ACI 239R-18 Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology report stanovující jako mezi hodnotu pevnosti v tlaku 150 MPa a tahovou pevnost po vzniku trhliny na úrovni 5 MPa a dále uvádí hodnotu vodního součinitele nižší než $w/c \leq 0,22$ [-] [19]. Další sérii dokumentů vydaných ve spojených státech jsou dokumenty vydané ministerstvem dopravy [16, 20–22].

1.2 ČESKÉ NORMY PRO NAVRHOVÁNÍ A PROVÁDĚNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Navrhování konstrukčních prvků či celých konstrukcí z vysokohodnotných kompozitních materiálů typu UHPC nemá v současné době v České republice normativní podklad. Z pohledu základní betonářské normy ČSN EN 206+A1 [23] věnující se betonu, jako materiálu, není klasifikováno rozdělení na beton běžných a vysokých pevností.

Při použití podmínek uvedených v TP 226 [24] lze stanovit meze vysokohodnotných, vysokopevnostních betonů a UHPC dle níže uvedené Tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení pevnostních tříd betonů HSC, HPC, VHPC a UHPC dle TP 226 [24]

Třída betonu dle ČSN EN 206 + A1	Minimální charakteristická válnová pevnost $f_{ck, cyl}$ [MPa]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck, cube}$ [MPa]
Vysokohodnotný beton (HPC) / Vysokopevnostní beton (HSC)		
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
Velmi vysokohodnotný beton (VHPC)		
C 100/115	100	115
C 110/130	110	130
C 120/140	120	140
C 135/150	135	150
Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)		
> C 135/150	> 135	> 150

Hodnoty pevností v tlaku uvedené v Tab. 1 jsou dle ČSN EN 12390-3 [25] zkušeny na tělesech základních rozměrů. Pro válcové pevnosti $f_{ck, cyl}$ to jsou zkušební válce Ø 150 mm a výšky 300 mm (poměr délky k průměru $L/D = 2$) a pro krychelné pevnosti $f_{ck, cube}$ krychle o hraně 150 mm.

Další normou pro navrhování betonových konstrukcí je Eurokód 2, který se věnuje vysokopevnostním betonům. V části ČSN EN 1992-1-1 [26] je uvažována maximální pevnostní třída betonu C 90/105 a v části ČSN EN 1992-2 [27] jsou jako vysokopevnostní betony označovány hutné betony pevnostních tříd C55/67 a vyšších. V normě ČSN EN 1994-1-1 ed. 2 pro navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí pozemních staveb a pro spřažené ocelobetonové konstrukce mostů dle ČSN 1994-2 není pojem vysokohodnotný nebo vysokopevnostní beton zaveden [28, 29]. Z výše uvedených informací vyplývá, že jediným možným normativním způsobem návrhu konstrukcí z vysokohodnotného betonu UHPC je navrhování na základě experimentů, které je dle Eurokódů přípustné.

Z hlediska normy ČSN EN 13670 [30] na provádění betonových konstrukcí nemají provádějící firmy také žádnou oporu. Jedinou informací, uvedenou v této normě lze najít v kapitole 8.5 Ošetřování a ochrana, řádek 5, který uvádí, že při použití vysokohodnotného nebo samozhutnitelného betonu se má věnovat zvýšená pozornost před vznikem trhlin od plastického smršťování [30].

1.3 DOPORUČENÍ PRO UHPC V ČESKÉ REPUBLICE

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem byly v roce 2015 v rámci grantového projektu „TA01010269 – Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky staveb“ financovaného Českou technologickou agenturou vydány metodiky Metodika 1 – Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky [11], Metodika 2 – Metodika pro navrhování prvků z UHPC [12] a Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení [17].

Tyto metodiky korespondují se zahraničními doporučeními a respektují platné normy v České republice pro složení receptur, zkoušení čerstvého i ztvrdlého betonu. V Metodice 2 [12] je UHPC klasifikováno pevnostními třídami dle následující Tab. 2, která koresponduje s dokumentem fib Model Code [10]. Pevnostní třída UHPC je v fib Model Code klasifikována pouze charakteristickou válcovou pevností v tlaku $f_{ck,cyl}$ [MPa] [10].

Tab. 2: Pevnostní třídy UHPC platné pro Českou republiku v souladu s fib Model Code [10] je dáno pouze válcovou pevností $f_{ck,cyl}$; tabulka převzata z Metodiky 2 [12]

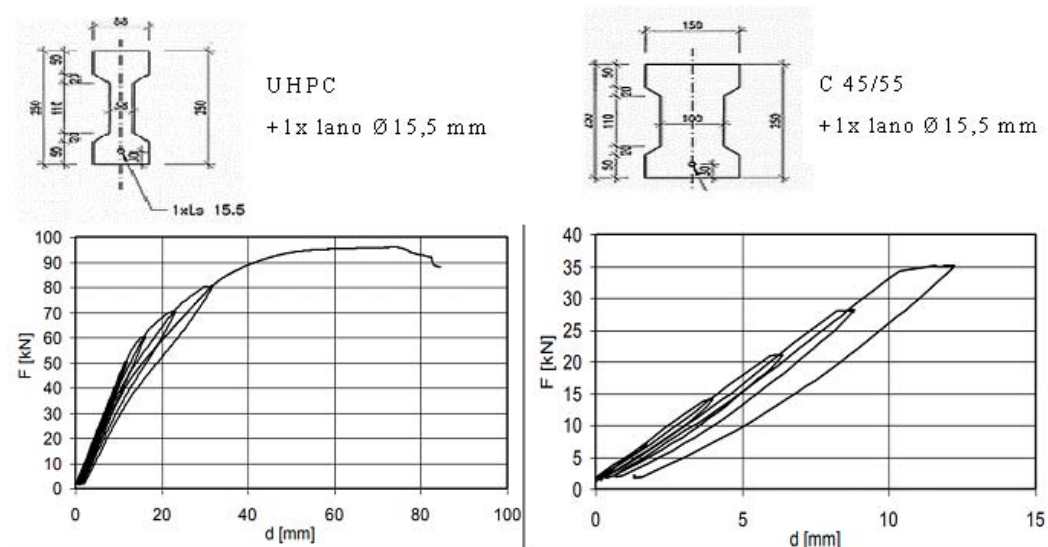
Třída UHPC	C110	C120	C130	C140	C150	C160	C170	C180
$f_{ck,cyl}$ [MPa]	110	120	130	140	150	160	170	180

2 PRAKTICKÉ APLIKACE UHPC V ČESKÉ REPUBLICE

Počátek vývoje a výzkumu vysokohodnotných cementem pojených kompozitních materiálů typu UHPC v České republice lze datovat rokem 2010, tedy 13 let od výstavby prvního mostu „*Sherbrooke bridge*“ v Kanadě, na jehož nosnou konstrukci byl použit „*Reactive Powder Concrete – RPC*“, viz Obr. 19 na straně - 29 -.

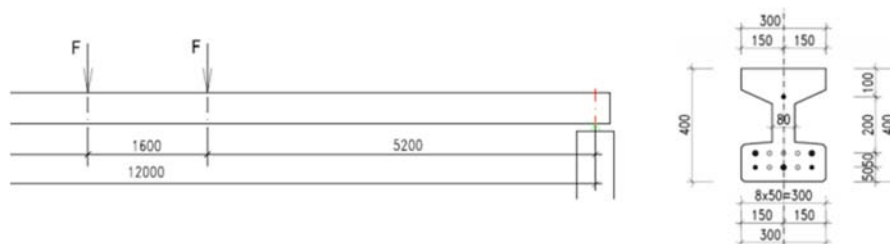
Na vývoji UHPC v České republice se podíleli přední dodavatelé staveb, a to společnost Mertrostav a.s. a Skanska a.s. Tyto společnosti dále spolupracovaly s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze a/nebo se společností Pontex s.r.o.

Prvním experimentálním ověřením potenciálu UHPC pro konstrukční prvky byla výroba předem předpjatých nosníků z UHPC 110/130 a betonu C 45/55 délky 4 m, které byly vystaveny cyklickému zatížení, a byla sledována jejich únosnost. Průřezy obou nosníků a výsledky dynamické zkoušky jsou patrné na Obr. 4. Zatěžování probíhalo ve středu nosníku se vzdáleností podpor 3,8 m. Zatěžovací zkoušky předpjatých nosníků proběhly v laboratořích Kloknerova ústavu ČVUT v Praze.



Obr. 4: Porovnání únosnosti předem předpjatého vazníku délky 4 m vyztuženého předpínací výztuží při dynamické zkoušce trojbodovým ohybem vyrobeného z UHPC 110/130 (vlevo) a betonu C 45/55 (vpravo) – převzato z [31]

Tyto nosníky byly vyrobeny společností Skanska v závodě Tovačov a na základě úspěšných výsledků z pilotního experimentu, kdy bylo dosaženo téměř trojnásobné únosnosti oproti nosníku z betonu pevnostní třídy C 45/55, se výroba přesunula do závodu ve Štětí, kde byly v roce 2012 vyrobeny předem předpjaté nosníky délky 12,4 m z UHPC třídy C 110/130, které byly vyztuženy celkem 11 předpínacími lany $\varnothing 15,7$ mm. Nosníky I-průřezu celkové výšky 400 mm a šířky 300 mm, viz Obr. 5 [32], byly zkoušeny ve čtyřbodovém ohybu se vzdáleností podpor 12,0 m a vzdáleností břemen 1,6 m. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v [32] a posloužili jako podklad pro verifikaci výpočetních modelů, kterou provádí Oddělení mechaniky, Kloknerův ústav ČVUT v Praze.



Obr. 5: Příčný řez a zatěžovací schéma zkoušky předem předpjatých I-nosníků délky 12 m – převzato z [32]

Kromě experimentálních zkoušek lze nalézt i reálné aplikace použití UHPC v České republice nejen pro konstrukce, ale také pro další prvky. Stručný popis vybraných staveb a prvků z UHPC je uveden v následujících kapitolách 2.1 a 2.2.

2.1 KONSTRUKCE A KONSTRUKČNÍ PRVKY

2.1.1 Desky ztraceného bednění

V rámci rekonstrukce mostu ev. č. 272-008 na silnici II. třídy č. 272 přes dříve rychlostní komunikaci R10, nyní přes dálnici D10, byl stávající most zbourán a nahrazen mostem novým, jehož nosná konstrukce je tvořena spřaženou ocelobetonovou konstrukcí. Z důvodu urychlení rekonstrukce mostu bylo přistoupeno k použití prefabrikovaných desek ztraceného bednění, které byly vyrobeny firmou Skanska a.s, závod Prefa – Štětí. Výroba desek ztraceného bednění probíhala od února 2012. Desky mají půdorysný rozměr 1,0 x 1,67 m a jejich tloušťka je 20 mm. V rámci zvýšení tuhosti byly desky vyztuženy žebry celkové výšky 60 mm (včetně tloušťky desky) nejen po obvodě, ale i v podélném směru. V příčném směru byly desky vyztuženy žebrem celkové výšky 40 mm. Desky byly vyrobeny z UHPC třídy C110/130 XF4 s rozptýlenou výztuží [33]. Na následujícím Obr. 6 je vidět montáž desek ztraceného bednění z UHPC.

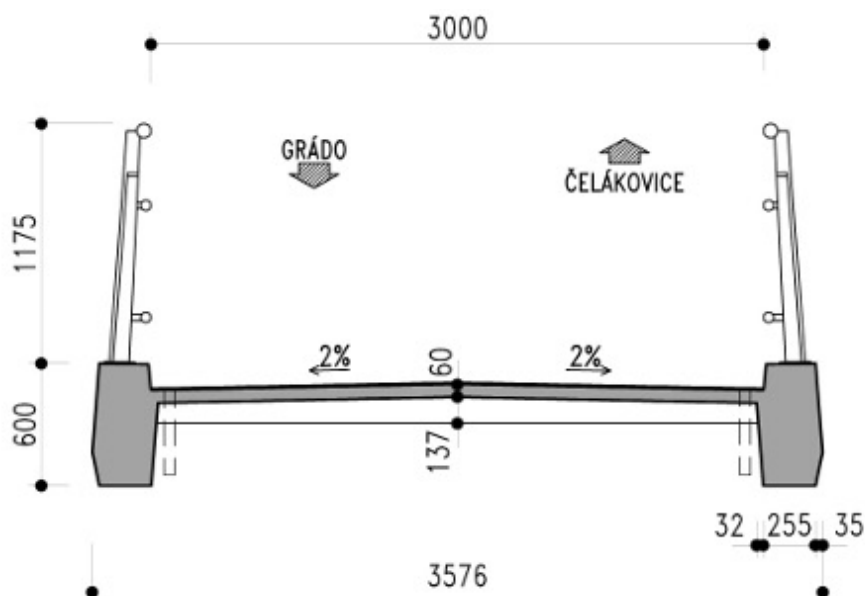


Obr. 6: Montáž desek ztraceného bednění z UHPC na mostu ev. č. 272-008 u Benátek nad Jizerou – převzato z [34]

2.1.2 Zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících

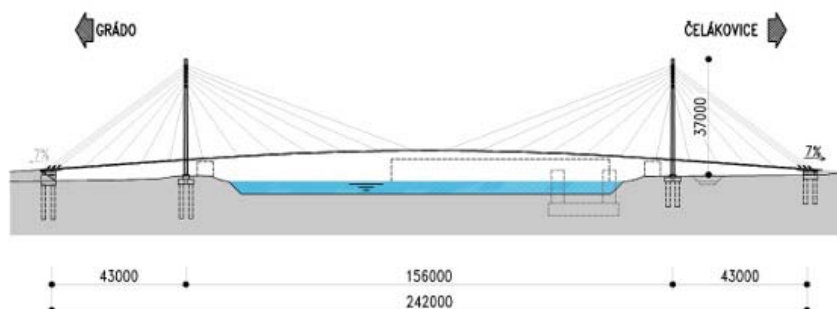
Pěší lávka přes Labe v Čelákovících je zavěšenou konstrukcí o třech polích, kdy krajní pole nad souší mají délku 43 metrů a délka středního pole přes Labe je 156 metrů. Konstrukční a architektonické řešení lávky pochází již z roku 2004, kdy byly porovnávány varianty zavěšené a visuté lávky. Jedním z hlavních požadavků města bylo překonat řeku Labe jedním polem, tedy bez mezilehlých podpěr zakládáných ve vodě. Zvolená varianta je méně citlivá na dynamické zatížení a umožňuje také jednodušší výměnu hlavních nosníků. V zadávací dokumentaci byla navržena spřažená mostovka s dvojicí podélných ocelových nosníků a příčníků po 2,5 metrech. Deska mostovky byla navržena z UHPC třídy C110/130 s rozptýlenými drátky.

Nosné ocelové pylony tvaru A výšky 36,9 m jsou vetknuté do základových betonových bloků, které jsou uloženy na velkopřůměrových pilotách. Zavěšená mostovka z vysokohodnotného betonu je sestavena ze segmentů se jmenovitou délkou 11,3 m. Jednotlivé segmenty jsou dodatečně předepnuty. Tloušťka desky je 60 mm a krajní žebra mají průřez cca 290 x 600 mm. V krajních žebrech je kromě předpínací výztuže také měkká výztuž. Uzavřená nosná lana jsou kotvena do okrajových podélných nosníků mostovky. Během výstavby byla nejprve provedena krajní pole pomocí pevné skruže a následně byla tato pole předepnuta. Postup výstavby je podrobně popsán v [35]. S výstavbou pěší lávky přes Labe v Čelákovících se začalo již na podzim roku 2012. Tato lávka byla oceněna v rámci American Concrete Institute Excellence in Concrete Construction Awards 2015 [35] a je zachycena na následujících Obr. 7 a Obr. 8.



Obr. 7: Příčný řez pěší lávkou přes Labe v Čelákovících

Obr. 8a)



Obr. 8b)

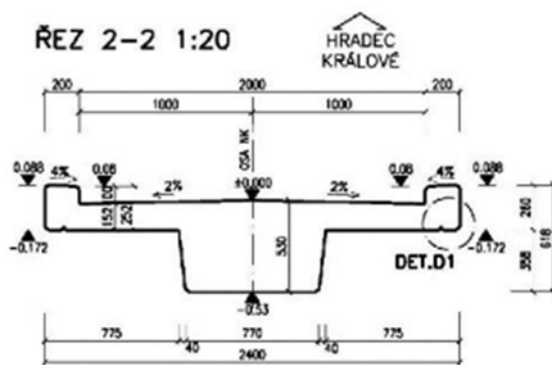


Obr. 8: Podélný řez (Obr. 8a) a finální podoba lávky v Čelákovících (Obr. 8b)

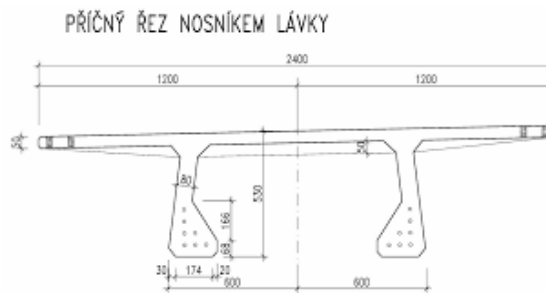
2.1.3 Lávka pro pěší v Čeperce

V druhé polovině roku 2014 se v rámci modernizace železniční tratě číslo 031 Pardubice – Hradec Králové – Jaroměř se naskytl další příležitost pro realizaci lávky pro pěší přes Opatovický kanál v obci Čeperka. Původní návrh lávky počítal s dodatečně předepnutým jednotrámovým nosníkem s konzolami, jehož rozpětí by bylo 15,3 m. Předpětí mělo být do konstrukce vneseno pomocí dvojice lan $\varnothing 15,7$ mm. Každé lano se mělo skládat z 12 drátů. Na takovou lávku by byla potřeba cca 14 m³ betonu C 35/45 XC4, XF3 [36].

V rámci prováděcí dokumentace, kterou zpracovávala společnost Pontex, s.r.o., byla navržena výrazně subtilnější konstrukce, jejíž příčný řez byl tvořen dvojitým T-průřezem, který byl předem předepnutý celkem 14 lany $\varnothing 15,7$ mm. Šířka mostovky je 2,4 m a celková výška průřezu je 530 mm. Mostovka má tloušťku 50 mm a po 1,0 m je vyztužena příčnými žebry výšky 50 mm pod mostovku, které se směrem k okrajům zmenšují, šířka stojiny je pouhých 80 mm. V rámci návrhu bylo plně využito vlastností UHPC třídy C 110/130 XF4 a objem betonu se tak snížil na cca 4 m³. Lávka v Čeperce neobsahuje žádnou měkkou betonářskou výztuž, čímž se odlišuje od lávky v Čelákovících, která je představena v kapitole 2.1.2. Prefabrikát byl doplněn monolitickými křídly z betonu C 35/45 XF4 o celkovém objemu 1 m³. Celková hmotnost lávky je o 13 t nižší než u původního řešení. Porovnání obou řešení je na následujícím Obr. 9. Lávka v Čeperce byla první zakázkou pro SŽDC v České republice.



Obr. 9a)



Obr. 9b)

Obr. 9: a) Příčný řez původního návrhu, b) příčný řez realizované lávky z UHPC – převzato z [36]

V rámci výroby lávky byly do konstrukce osazeny odporové tenzometry pro měření deformací během předpínání nosníku, skladování na provozovně Štětí a pro následný dlouhodobý monitoring lávky po osazení konstrukce. Použitý UHPC kompozitní materiál a celý proces výroby byl proveden dle technologického předpisu. Během ukládání čerstvé směsi UHPC s kovovými drátky nebyl použit žádný způsob vibrace. Finální povrch byl upravován ocelovým hladítkem a opatřen nástřikem proti odparu vody. Souběžně s výrobou lávky jsme spolu s kolegy vyráběli i doprovodná zkušební tělesa pro ověření mechanicko-fyzikálních vlastností směsi UHPC 110/130 XC4, XF3 v čase. Z vybraných vlastností byly sledovány lomové vlastnosti, pevnost v tlaku, statický modul pružnosti a dlouhodobé měření objemových změn vlivem smrštění UHPC. Betonáž lávky a doprovodných těles byla provedena dne 18. prosince 2014. Osazení lávky na předem připravená ložiska proběhlo 14. října 2015. Původní ocelové zábradlí z projektu bylo nahrazeno zábradelními panely z UHPC, které měly předepsaný barevný odstín DB 602. Do panelů byla vložena textilní síť ze skleněných vláken a panely prošly několika úpravami nejen samotné receptury, ale také úpravou finálního tvaru zábradelních desek, které byly vylehčeny otvory. Montáž zábradlí a sloupků proběhla v první polovině listopadu 2015. Celkový pohled na hotovou lávku je na Obr. 10.



Obr. 10: Pohled na dokončenou lávku u obce Čeperka, která je provedena z UHPC třídy C110/130 XC4 XF3 – převzato z [36]

2.1.4 Rekonstrukce mostů přes železniční tratě v Přerově

V rámci rekonstrukce silničních mostů přes železniční tratě číslo 270 Česká Třebová – Přerov – Bohumín byly použity desky ztraceného bednění z UHPC. Desky ztraceného bednění byly použity na stavební objekty SO 201 a SO 202 v dubnu a srpnu roku 2018 [37]. Délka desek, kladených na spodní pásnici ocelových profilů, byla 1,8 m při tloušťce desky 60 mm. Na následujících Obr. 11 a Obr. 12 jsou zachyceny desky ztraceného bednění na stavebním objektu SO 202.



Obr. 11: Pohled na spodní líc silničního mostu SO 202 přes železniční trať č. 270 v Přerově – převzato z [31]

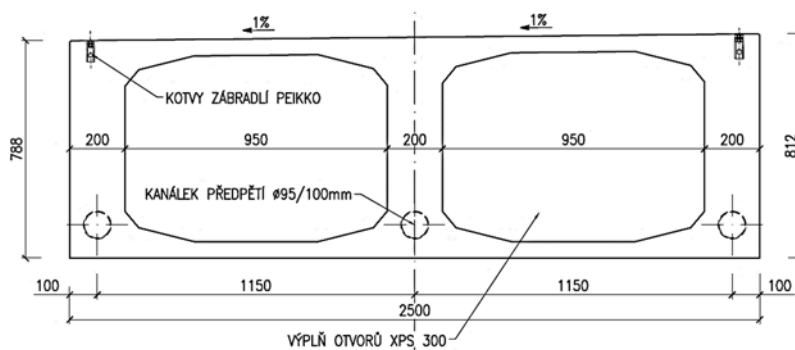


Obr. 12: Pohled na horní líc desek ztraceného bednění použitých při rekonstrukci mostů přes železniční trať v Přerově – převzato z [37]

2.1.5 Lávka přes řeku Lubinu v Příboru

V průběhu září 2018 byla namontována lávka pro pěší přes řeku Lubina v obci Příbor, okres Nový Jičín. Celková délka lávky je 36 metrů a je tvořena z 5 segmentů z UHPC třídy C 110/130, které jsou dodatečně předepnuté trojicí lan skládající se ze 17-ti drátů bez soudržnosti typu monostrand s ochranou plastovou vrstvou. Předpínací lana jsou vedena v ocelové chrániče, která byla zabudována do bednění. Poloha předpínacích lan není přímá, jak je tomu běžné u segmentových dodatečně předepnutých konstrukcí, ale je parabolická se vzepětím 400 mm [38, 39].

Příčný řez lávky (viz Obr. 13 dole) je tvořen jako dvoukomorový nosník o průměrné výšce 0,8 m a šířce 2,5 m, kdy nosný systém je tvořen podélnými a příčnými žebry. Celková hmotnost nosné konstrukce činí necelých 90 tun, přičemž krajní segmenty vážily kolem 20 tun a zbývající tři segmenty vážily kolem 16,5 tuny. Betonáž dílců proběhla v květnu 2018 na provozovně KŠ Prefa Štětí. Vzhledem k rozdílným rozměrům žebry byl při betonáži sledován také vývoj hydratačního tepla tak, aby nedocházelo k rozdílným objemovým změnám a vzniku trhlin vlivem diferenčního smrštění [38]. Celkový pohled na dokončenou lávku je na Obr. 13 a Obr. 14.



Obr. 13: Příčný řez lávkou přes řeku Lubina v městě Příbor – převzato z [38]



Obr. 14: Celkový pohled na dokončenou lávku v obci Příbor o celkové délce 36 m – převzato z [39]

2.1.6 Dvojitě zakřivená lávka pro pěší v obci Kladno – Vrapice

Další mostní konstrukcí z UHPC v České republice je lávka pro pěší v Kladně - Vrapicích. Instalace lávky proběhla 5. září 2018. Výroba lávky probíhala v provozovně KŠ Prefa Štětí ve třech etapách. V rámci první etapy byl vytvořen zárodek lávky, na kterém byla vyvíjena nejen metoda výroby lávky, ale také vývoj samotného bednění. Po úspěšných testech byla vyrobena první lávka, která byla podrobena statické zatěžovací zkoušce, na jejímž základě byla provedena optimalizace tloušťky stěny a mostovky a zvětšen rádius přechodu mezi mostovkou a zábradelní stěnou.

Výsledkem výše popsaných optimalizací a vývoje byl finální návrh lávky pro pěší, jejíž příčný průřez má tvar písmene U. Půdorysně i výškově je lávka odkloněna od přímé osy o 400 mm. Tloušťka mostovky je 45 mm a tloušťka stěn se pohybuje v rozmezí 30 až 35 mm, výška zábradelní stěny je 1,1 m. Lávka byla navržena na rozpětí 10 m bez použití jakékoliv betonářské nebo předpínací výztuže. Pro výrobu lávky byl použit kompozitní materiál UHPC třídy C110/130 s rozptýlenou kovovou výztuží [40].



Obr. 15: Pohled na finální dvojitě zakřivenou lávku z UHPC na rozpětí 10 m instalovanou v obci Vrapice – fotografie z archivu Kloknerova ústavu

2.1.7 Lávka pro pěší a cyklisty v Táboře

Na začátku září 2018 byla provedena instalace další lávky pro pěší v České republice, tentokrát v Táboře přes křižovatku u Černých mostů [41]. Příčný průřez lávky je opět dvojitý T průřez jako u lávky v obci Čeperka (viz kapitola 2.1.3). Stejně jako u lávky v Čeperci je i tato lávka vyrobena jako předem předepnutý nosník v závodu KŠ Prefa Štětí. Rozpětí této lávky je 27 m a byla vyhotovena z UHPC třídy C 110/130 XF4. Mostovka tloušťky 60 mm a je vyztužen příčnými žebry celkové výšky 120 mm (včetně tloušťky desky). Koncové příčníky tloušťky 250 mm byly vyrobeny z běžně používaného

betonu C 45/55 XC4 XD3 XF4. Na následujícím Obr. 16 je zachycena instalace lávky na místo. Na opěrách je nosník uložen na elastomerových ložiskách [42].



Obr. 16: Instalace předem přepravené lávky v Táboře s rozponem 27 m a příčným průřezem dvojitého T – převzato z [42]

2.2 OSTATNÍ APLIKACE V ČESKÉ REPUBLICE

2.2.1 Stůl na ping pong

Další aplikací UHPC v České republice, i když ne při použití v konstrukci, je stůl na ping pong, jehož celkové půdorysné rozměry jsou přibližně 153 x 275 cm s tloušťkou desky 1,5 cm. Každá deska je ztužena obvodovými a dvěma podélnými žebry. Hrací desky jsou podepřeny čtveřicí nohou, které mají celkový vnější rozměr 110 x 75 cm a jejich průřez je tvořen obdélníkovým profilem rozměru 12 x 6 cm. Celková váha stolu, včetně nohou, je 440 kg. Konstrukce stolu poukazuje na možnosti vyrábět z UHPC nejen nosné konstrukce, ale také další prvky [43].



Obr. 17: Pingpongový stůl z vysokohodnotného betonu instalovaný na provozovně Českomoravského betonu – převzato z [44]

2.2.2 Stéla urnové kobky

V červenci 2015 byl na lesním hřbitově, v katastrálním území obce Chyňava, vztyčen štíhlý 9 m vysoký kříž imitující akátový kmen. Materiálem pro tuto stélu se stal samozhutnitelný cementový kompozitní materiál s pevností v tlaku nad 100 MPa vyztužený rozptýlenou výztuží. Celková délka silikonové formy byla 10 m a na jejím konci měla průměr 50 mm. Z tohoto důvodu bylo nutné vyvinout nejen samotnou recepturu, ale také plastifikační přísadu na bázi polykarboxylátů. Vývoj receptury a příslušného plastifikátoru provedli pracovníci Kloknerova ústavu ČVUT v Praze a pracovníci společnosti Chryso, stavební chemie [45].



Obr. 18: Celkový pohled na Stélu urnové kobky na lesním hřbitově, která je téměř nerozpoznatelná od okolních stromů – převzato z [45]

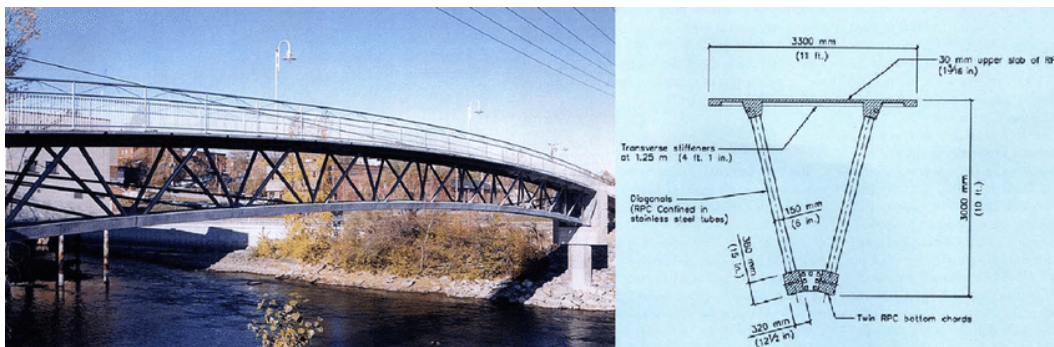
3 VYBRANÉ APLIKACE UHPC VE SVĚTĚ

3.1 MOSTNÍ STAVITELSTVÍ

Využití UHPC v mostním stavitelství se soustředí do oblasti krycí desky, spojů prefabrikovaných dílců a výroby předem předpjatých nosníků. Přehledný výčet mostních staveb a typu použití UHPC ve Spojených státech amerických a v Kanadě lze nalézt na stránkách ministerstva dopravy FHWA [46]. Použití UHPC ve světě pak lze nalézt v kapitole 6 publikace Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community [20], která je také vydávána Ministerstvem dopravy Spojených států amerických. Velký rozvoj UHPC v mostním stavitelství lze zaznamenat také v Malajsii, kde bylo postaveno na 30 mostů z UHPC a jejich přehled lze nalézt také v článku z 12. mezinárodní konference betonového stavitelství a technologie z roku 2014 [47].

3.1.1 První stavba z UHPC – Sherbrooke bridge, Kanada

První stavbou z UHPC, respektive z RPC, byla lávka pro pěší a cyklisty v Kanadě, která byla postavena roku 1997. Nosná konstrukce lávky je tvořena dodatečně předepnutým příhradovým vazníkem, který je složen ze 6 segmentů. Materiál spodního trámu a mostovky je RPC „*Reactive Powder Concrete*“ s tlakovou pevností 200 MPa, diagonály vazníku dlouhé 3 m jsou tvořeny ocelovými trubkami, které jsou také vyplněny RPC a jejich tlaková únosnost je 350 MPa. Celková délka lávky je 60 m a spojuje břehy podél řeky Magog River v obci Sherbrooke, Kanada.



Obr. 19: První lávka pro pěší z roku 1996, Sherbrooke bridge, Kanada, nosníky jsou z předpjatého RPC, mostovka je z RPC – převzato z [48]

3.1.2 Pont de la République v Montpellier

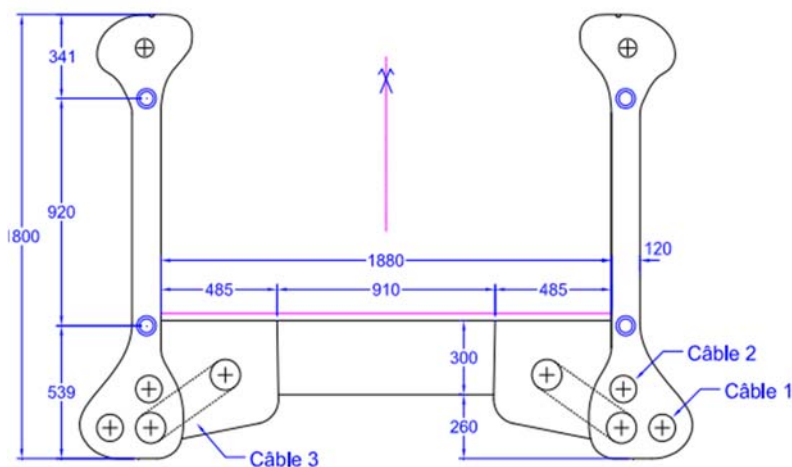
Vybraným zástupcem mostu z UHPC realizovaného v nedávné době v Evropě je most Pont de la République v Montpellier, jehož nosná konstrukce i pilíře jsou zhotoveny z UHPC. Jedná se o třípolový most šířky 17 m s rozpětím polí 25 m. Nosná konstrukce mostu je předepnutá v podélném i příčném směru. Architektem tohoto mostu byl Rudy Ricciotti, který proslul i dalšími reálnými aplikacemi, ve kterých využívá přednosti UHPC.



Obr. 20: Pont de la République, Montpellier, architektem byl Rudy Ricciotti – převzato z [49]

3.1.3 Lávka pro pěší Passerelle des Anges

Další vybranou konstrukcí je lávka pro pěší Passerelle des Anges, jejíž architektonický návrh provedl Rudy Ricciotti. Lávka je tvořena z dodatečně předepnutých 15 segmentů, jejichž příčný profil má tvar písmene U s výškou bočnic 1,8 m. Mostovka je ve výšce cca 560 mm od spodní hrany. Vnitřní šířka je 1,88 m. Poloha předpínací výztuže a příčný řez je patrný z Obr. 21. Tloušťka mostovky je pouhých 40 mm. Lávka je postavena přes údolí řeky Herault a její celková váha je 165 tun. Délka lávky je 69 m a nachází se cca 40 km severozápadně od Montpellier u obce Saint-Jean-de-Fos. Jako materiál byl použit DUCTAL® s pevností v tlaku 180 MPa vyztužený kovovými drátky s $V_f = 2,15\%$.



Obr. 21: Příčný řez segmentem lávky Passarelle des Anges – převzato z [50]



Obr. 22: Pohled na lávku Passerelle des Anges u Montpellier, jejímž architektem byl Rudy Ricciotti– převzato z [51]

3.2 VÝŠKOVÉ BUDOVY

3.2.1 Musashi Kosugi Towers v Tokiu

V únoru 2009 byla dokončena stavba dvou výškových budov vysokých 204 a 163 m, pro jejichž stavbu byl ve velkém měřítku použitý UHPC materiál označený jako APC. Pevnost v tlaku tohoto materiálu byla 150 MPa při vodním součiniteli 0,15. Z tohoto materiálu jsou vyrobeny sloupy v 1.NP o průřezu 120 x 130 cm, po výšce budovy klesá použitá pevnostní třída betonu.



Obr. 23: Odlitek sloupu z UHPC použitého při stavbě Musashi Kosugi Towers v Tokiu [52]

3.2.2 Trump International Hotel and Tower v Chicagu

Další výškovou stavbou, u níž bylo použito vysokohodnotného betonu, je 415 metrů vysoký Trump International Hotel v Chicagu. Vysokohodnotný beton byl použit pro exponované části ztužidel a ve stáří 90 dnů dosahoval válcové pevnosti 110 MPa. Receptura tohoto materiálu obsahovala kombinaci portlandského a struskového cementu, popílku a křemičitého úletu, aby se snížil vývin hydratačního tepla. [52].

3.3 ARCHITEKTURA

3.3.1 Malmö Live – Kontor

V rámci stavby administrativní budovy Kontor v obci Malmö byly společností Skanska a.s., závod Prefa Štětí, vyrobeny fasádní desky z bílého UHPC vyztuženého kombinací PVA vláken a textilní sítě se skleněnými vlákny. Vývoj receptury pro tyto panely probíhal ve spolupráci s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze, ve kterém byla navržena nejen receptura, ale také ověřeny vlastnosti matrice a výrobků. Finální podoba budovy je na následujícím Obr. 24.



Obr. 24: Pohled na dokončenou administrativní budovu v Kontor v Malmö s fasádními panely z bílého UHPC – převzato z [53]

3.3.2 Fasádní panely na Jean Bouin Stadium's, Francie

V Paříži byla v roce 2013 dokončena rekonstrukce stadionu, který nese jméno po stříbrném medailistovi v běhu na 5000 m z roku 1912 Jeanu Bouinovi. Původní kapacita stadionu, 12 tisíc diváků, byla navýšena na 20 tisíc. Architektem modernizace stadionu se stal architekt Rudy Ricciotti. Celý stadion je obložen panely velikosti cca 9 x 2,5 m, přičemž panely zastřešení mají tloušťku 35 – 45 mm a více jak 50% plochy je vyplněno sklem. Fasádní a stěnové panely jsou přibližně stejně velké s proměnnou tloušťkou, která klesá k 11 mm. Na stavbu bylo použito celkem 3600 panelů. Jako materiál byl použit DUCTAL® [54].



Obr. 25: Pohled na stadion Jean Bouin v Paříži s fasádními panely z UHPC – převzato z [55]

3.3.3 Zastřešení železniční stanice Montpellier, Francie

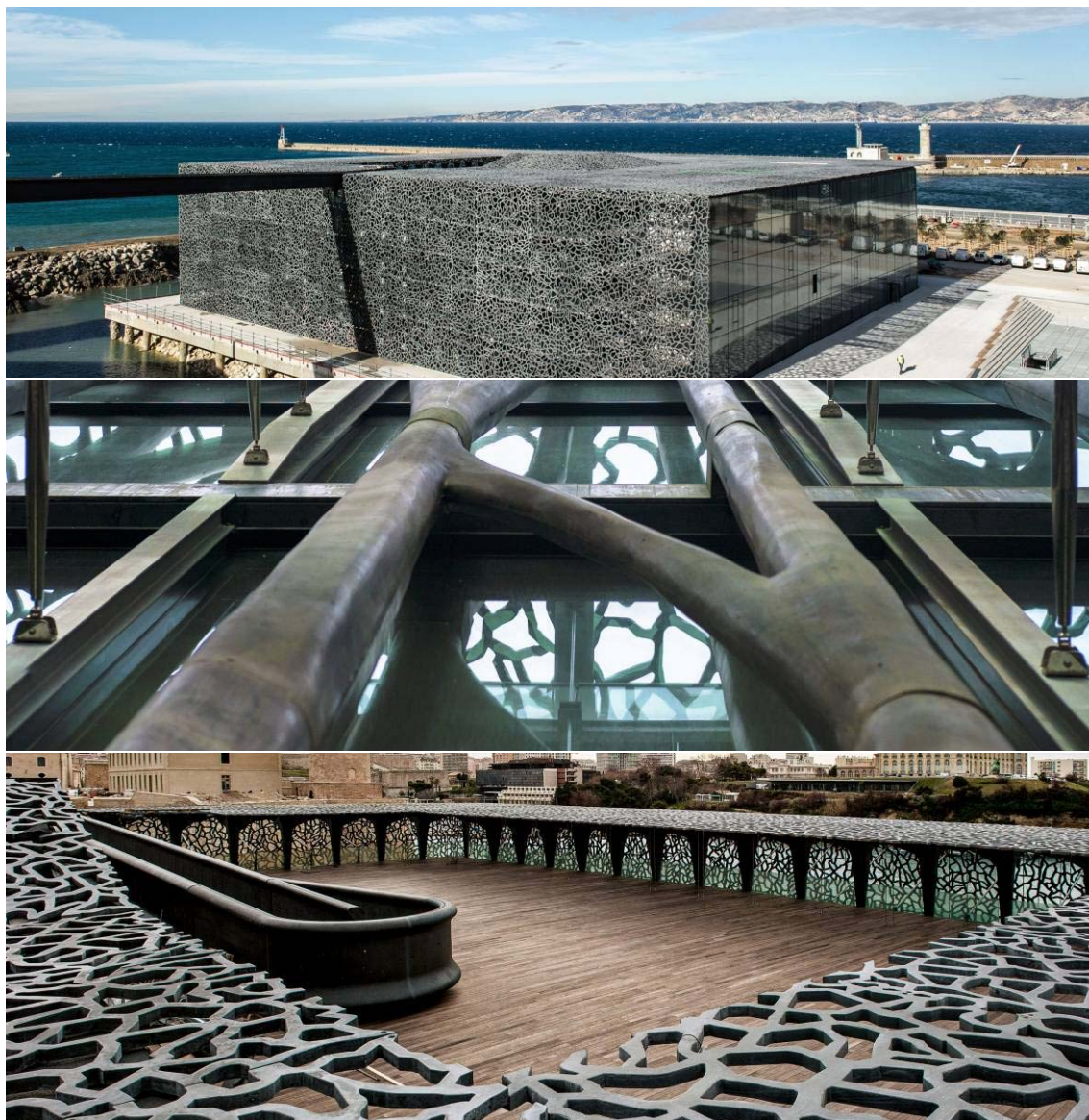
V roce 2017 byla dokončena stavba vlakového nádraží v Montpellier na jihu Francie, které má umožnit spojení vlaky TGV s Paříží. Pro zastřešení byly použity zakřivené panely s délkou 18 m. Šíře panelů je 2,7 m, jejich celková výška je 3 m a jejich tloušťka je pouhých 50 mm. Stěny panelů jsou vylehčeny otvory, ve kterých je skleněná výplň. Autorem tohoto projektu byl architekt Marc Mimram a materiálem pro fasádní panely se stal DUCTAL®.



Obr. 26: Pohled do odbavovací haly vlakového nádraží v Montpellier zastřešenou panely z DUCTAL® [54]

3.3.4 Muzeum evropských a středoze­m­ních civilizací MuCEM

Další významnou stavbou ve Francii, na jejímž návrhu se podílel architekt Rudy Ricciotti, je budova MuCEM, Muzeum evropských a středoze­m­ních civilizací v Marseille. Budova muzea je propojena s pevností Saint-Jean stejným typem lávky, jakou je Passerelle des Anges, viz kapitola 3.1.3. Celková délka lávky mezi pevností a muzeem je 115 m. Kromě této lávky lze UHPC najít u dalších prvků, kterými jsou nosné sloup­y nebo fasádní a střešní perforované panely. Budova muzea s vybranými detaily je na následujícím Obr. 27.



Obr. 27: Celkový pohled na budovu MuCEM (nahore), předepnutých sloupů (uprostřed) a panelů zastřešení s ukončením lávky (dole); obrázky byly převzaty ze stránek společnosti Ductal® [54]

4 SUROVINY POTŘEBNÉ PRO VÝROBU UHPC

Z hlediska složení lze UHPC definovat jako jemnozrný kompozitní materiál, na jehož výrobu je použito vysoké dávky portlandského cementu, dále inertní příměsí (příměsí typu I) fungující jako mikroplnivo (mikromletý vápenec, mletý křemen, případně i pigmenty), latentně hydraulických příměsí (mletá vysokopeční struska, elektrárenský popílek, křemičitý úlet), drobného kameniva (do 4 mm, výjimečně i 8 mm), přísad (nejběžnější jsou superplastifikátory na bázi polykarboxylátů, dále zpomalovače tuhnutí, přísady regulující smrštění, apod.) a malého množství záměsové vody. Pro zajištění lomových parametrů i po vzniku trhliny je matrice vyztužena nejčastěji kovovými drátky délky $L_f = 9 - 30$ mm se štíhlostním poměrem $\lambda = L_f/d_f = 50$ až 100 [-]

Kromě vysokých nároků na vstupní suroviny jsou kladeny také vysoké nároky na technologickou kázeň při navažování a dávkování jednotlivých komponent a na dodržení postupu míchání.

4.1 CEMENT

Pro výrobu cementových kompozitů je použito hydraulické pojivo na bázi portlandského cementu. Volba typů cementu musí splňovat požadavky normy ČSN EN 197 - 1 ed.2 [56]. Typ a dávkování cementu vyplývá z návrhu receptury a požadovaných výsledných vlastností.

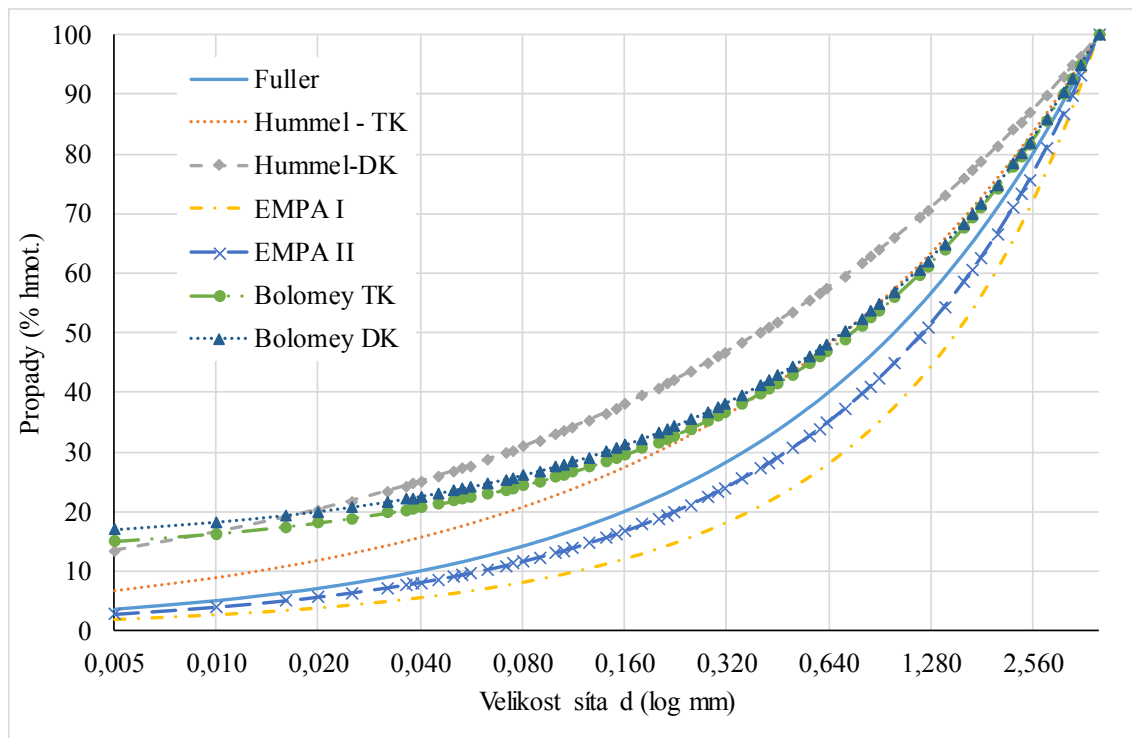
Pro výrobu UHPC jsou používány primárně portlandské cementy CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R. Ostatní typy cementů nejsou vyloučeny, ale je nutné ověřit jejich vlastnosti a vhodnost použití pro UHPC. Měrný povrch portlandských cementů se pohybuje v rozmezí od 250 do 400 m².kg⁻¹ (stanoveno permeabilitní metodou – Blaine dle ČSN EN 196 - 6 [57]). Objemová hmotnost cementu je 3 100 kg/m³. Obvyklá dávka portlandského cementu je vyšší než dávka cementu u běžných betonů (dávka cementu u UHPC se pohybuje v rozmezí 600 – 1000 kg/m³).

4.2 KAMENIVO

Nosná kostra UHPC matrice je tvořena jemnozrným kamenivem, na které jsou kladeny vysoké nároky, zejména na jeho pevnost, jakost a na minimální množství interních poruch. Vysoké nároky na kamenivo jsou dány vytvořením hutné struktury matrice a vlastnostmi UHPC.

Pro zajištění kvality UHPC je doporučeno používat tříděné písky z pevných vyvřelých hornin (žula, gabro, čedič, apod.) křemičité sklářské písky nebo písky slévárenské. Obecně lze doporučit použití drceného kameniva, které má sférický tvar zrn a lepší tvarový index než kameniva těžená. Díky této vlastnosti je možné snížit dávku plastifikátoru. Hladká plocha těženého kameniva snižuje kontaktní napětí v tranzitní zóně, což vede ke snížení pevnosti. Skladba kameniva je volena tak, aby byla sestavena optimální křivka zrnitosti za účelem vytvoření hutné matrice s minimálním množstvím pórů. Tyto parametry určují minimální dávku cementu, dobrou zpracovatelnost a vysokou pevnost. Použité kamenivo musí vyhovět normě ČN EN 12620+A1 [58]. Ideální křivku

zrnitosti skladby kameniva, Graf 1, lze popsat Füller-Thomsonovým vztahem, křivkou podle EMPA I a EMPA II a podle Bolomeye.



Graf 1: Ideální křivky zrnitosti pro $D_{max} = 4$ mm; vodorovná osa zobrazena v logaritmickém měřítku

Podle Fullera
$$y = \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^n \times 100 [\%] \quad (\text{Rov 1})$$

Podle EMPA I
$$y = 50 \times \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}\right) [\%] \quad (\text{Rov 2})$$

Podle EMPA II
$$y = 20 \times \left(\frac{d}{D_{max}} + 4\sqrt{\frac{d}{D_{max}}}\right) [\%] \quad (\text{Rov 3})$$

Podle Bolomeye
$$y = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} [\%] \quad (\text{Rov 4})$$

Kde: ycelkový propad sítem d , v % hmotnosti

duvažovaná velikost zrna (mm)

D_{max}uvažovaná maximální velikost zrna (mm)

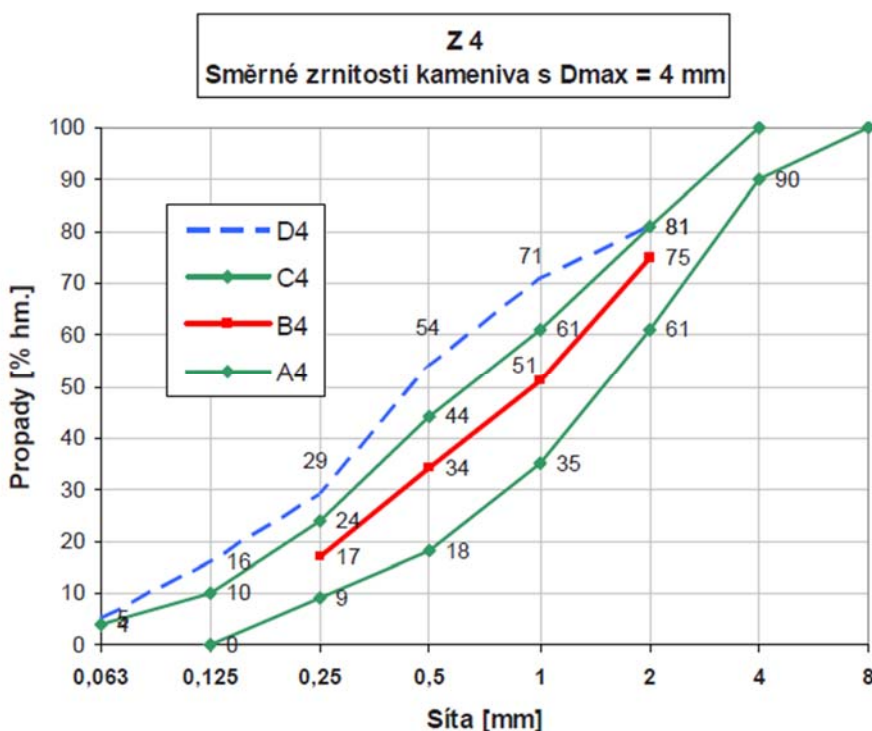
nexponent (dle Fullera 0,5, dle Hummela pro těžené kamenivo 0,4 a 0,3 pro drcené kamenivo)

Asoučinitel závislý na zpracovatelnosti směsi a tvaru zrna

V praxi je použití ideální křivky zrnitosti podle Füllera (Rov 1) vhodná pro směsi, u kterých je požadována nízká zpracovatelnost. Z tohoto důvodu není tato křivka vhodná

pro jemnozrnné cementem pojené kompozitní materiály typu UHPC, u kterých je dobrá zpracovatelnost a tekutost směsi jednou z podmínek použití. Úpravu rovnice provedl Bolomey zavedením koeficientu A , který zahrnuje vliv zpracovatelnosti směsi a tvar zrna. Ve výše uvedeném grafu je pro tekutou konzistenci a těžené kamenivo uvažována hodnota $A = 12$ a pro kamenivo drcené je uvažována hodnota $A = 14$. Bolomeyova křivka ideální zrnitosti se vyznačuje výrazným obsahem jemných podílů a proto je pro skladbu matric UHPC použitelnější [59].

Při návrhu receptury je používáno drobné kamenivo, jehož velikost je menší než 4 mm, i když jsou známy vědecké práce používající maximální zrna kameniva 8 mm. Z hlediska normy ČSN EN 206+A1 [23] je beton s kamenivem $D_{\max} \leq 4$ mm označován za maltu – viz řádek 6, kapitola 1, ČSN EN 206+A1 [23]. Následující Graf 2 zobrazuje směrné křivky zrnitosti kameniva maximální frakce 4 mm.



Graf 2: Směrná křivka zrnitosti kameniva při maximální velikosti zrna $D_{\max} = 4$ mm; oblast mezi zelenými křivkami představuje použitelnou granulometrii kameniva $D_{\max} = 4$ mm; červená křivka představuje optimální skladbu a oblast mezi modrou a zelenou křivkou je oblast použitelné zrnitosti kameniva [60]

Omezení velikosti kameniva je dáno i dalšími faktory, než jen vytvořením hutné struktury. Dalším důvodem je omezení vzniku mikrotrhlin mezi hrubými zrny nesmršťujícího se kameniva a cementovou pastou. Dalším důvodem omezení velikosti kameniva je i vznik mikroporuch ve velkých zrnech. Vyšší podíl jemných frakcí kameniva zároveň zvyšuje i dávku cementu, který je potřebný pro obalení zrn kameniva.

U cementem pojených kompozitů je, stejně jako u vysokopevnostních betonů s pevnostní třídou vyšší než C 70/85, doporučováno použití praného drceného kameniva, jelikož praním je odstraněn kamenný prach vzniklý při drcení. Obsah prachových částic

je mimo jiné závislý nejen na způsobu jeho výroby, ale také na způsobu skladování a jeho odebírání z jednotlivých vrstev. Z výše uvedeného vyplývá, že pro UHPC je vhodné použití balených tříděných písků s plynulou granulometrií s vyšším obsahem středních a větších zrn. Praním nesmí být odstraněny i velmi jemné částice s velikostí od 0,063 mm do 0,25 mm [61].

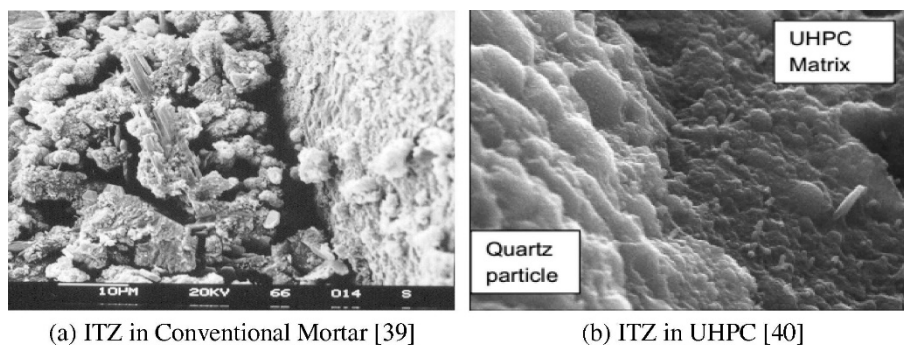
4.3 PŘÍMĚSI

Složení receptury vysokohodnotných kompozitů obsahuje kromě hydraulického pojiva (cementu) a kameniva také různé typy latentně hydraulických příměsí a příměsí inertních. Příměsí jsou dodávány jako jemnozrné prášky anorganického původu s max. velikostí zrna 250 μm . Použití příměsí ovlivňuje nejen hustotu směsi, ale také reologické vlastnosti čerstvé směsi. Typ a dávkování všech příměsí vyplývá z návrhu a optimalizace složení receptury UHPC. Zrnitost filleru, použitého jako mikroplnivo, musí kromě požadavků uvedených v ČSN EN 12620+A1 [58] splňovat také požadavky uvedené v ČSN EN 933-10 [62].

4.3.1 Příměsí typu II – latentně hydraulické

Mezi latentně hydraulické příměsí používané při výrobě UHPC patří křemičitý úlet, elektrárenský popílek a granulovaná vysokopecní struska. Informativně lze využít koncepce k-hodnoty, čili poměru dávky příměsí k cementu, která je uvedena v normě ČSN EN 206+A1 [23]. Latentní (skrytá) hydraulická příměsí vzrůstá v roztoku hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nebo sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Na následujícím Obr. 28 je zobrazen rozdíl v hustotě matrice UHPC a běžného betonu, který se projevuje např. v tranzitní zóně mezi cementovou pastou a zrnem kameniva (ITZ – „*Internal Transition Zone*“). Z obrázku je patrné, že u běžného betonu, u kterého není použito latentně hydraulických mikroplniv, je v tranzitní zóně vyšší pórovitost, která je způsobena uzavřením tenké vrstvičky vody pod zrny kameniva [61].



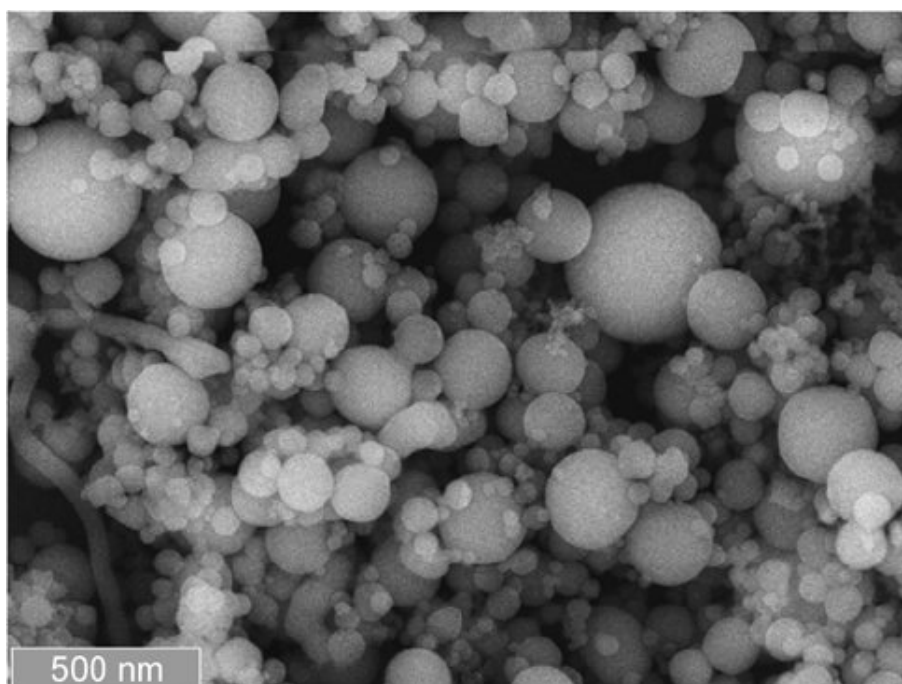
Obr. 28: Porovnání tranzitní zóny u běžného betonu (vlevo) a UHPC (vpravo) pořízených pomocí elektronového mikroskopu – převzato z [63]

K odstranění tranzitní zóny je použito kombinace křemičitých úletů, které mají výborné pucolánové vlastnosti, a superplastifikátorů. Pro běžné betony nebyl křemičitý úlet dlouho používán, jelikož jeho velikost pod 1 μm vyžadovala bez použití

superplastifikátoru velké množství záměsové vody. Takovéto betony měli velmi špatné mechanické vlastnosti.

4.3.1.1 Křemičitý úlet (mikrosilika)

Mikrosilika musí splňovat chemické a fyzikální vlastnosti dle kapitol 5.2 a 5.3 normy ČSN EN 13 236+A1 [64]. Mikrosilika obsahuje 85 – 97% velmi reaktivního SiO₂ a její měrný povrch, stanoven permeabilitní metodou – Blaine, se pohybuje od 15 000 do 30 000 m².kg⁻¹. Měrný povrch křemičitého úletu je přibližně 50x větší než měrný povrch portlandského cementu, který se pohybuje v rozmezí hodnot 250 – 400 m².kg⁻¹. Velikost částic mikrosiliky se pohybuje od 0,2 do 2 μm a její objemová hmotnost je 2 200 – 2 500 kg/m³. Tvar zrn mikrosiliky je patrný ze SEM analýzy zobrazené na Obr. 29.



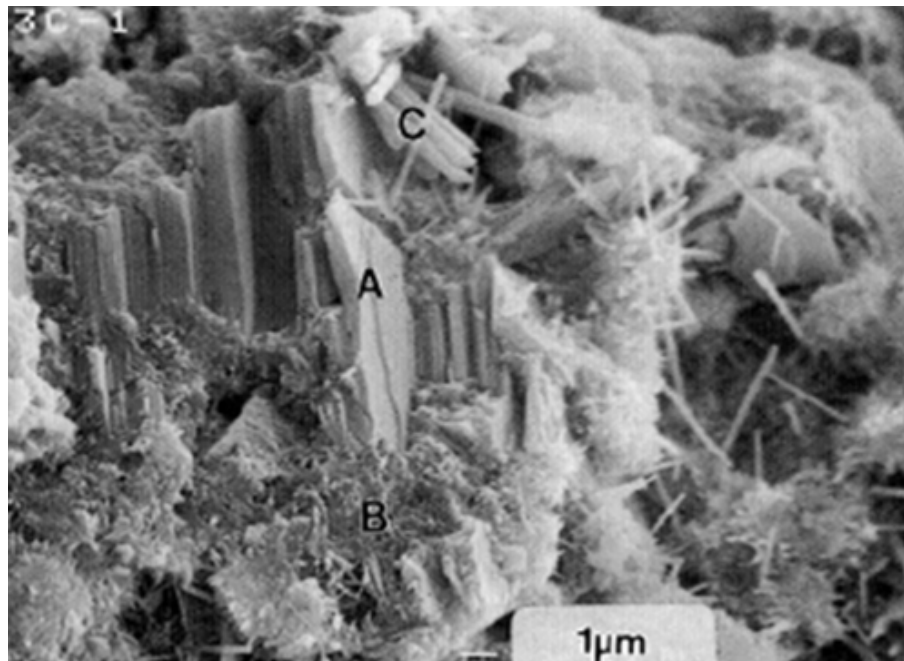
Obr. 29: Záznam typického tvaru zrn mikrosiliky s průměrnou velikostí kulovitých částic velikosti 1 μm provedený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) – převzato z [65]

V počátečních fázích tvrdnutí je mikrosilika využívána jako mikroplnivo, které musí splňovat požadavky na fillery uvedené v tabulce 7 v ČSN EN 12620 + A1 [58]. V pozdějších fázích tvrdnutí se využívá její pucolánové aktivity, kdy spolu s hydroxidem vápenatým (Ca(OH)₂), který je vedlejším produktem hydratace silikátových slínkových minerálů C₃S a C₂S, se tvoří C-S-H gely ucpávající pórovou strukturu. Reakce hydroxidu vápenatého a mikrosiliky je popsána následující rovnicí.



Díky sekundární tvorbě C-S-H gelů je výsledná permeabilita UHPC a ECC nižší. Francouzské doporučení AFGC [7] a německé doporučení [18] shodně uvádějí,

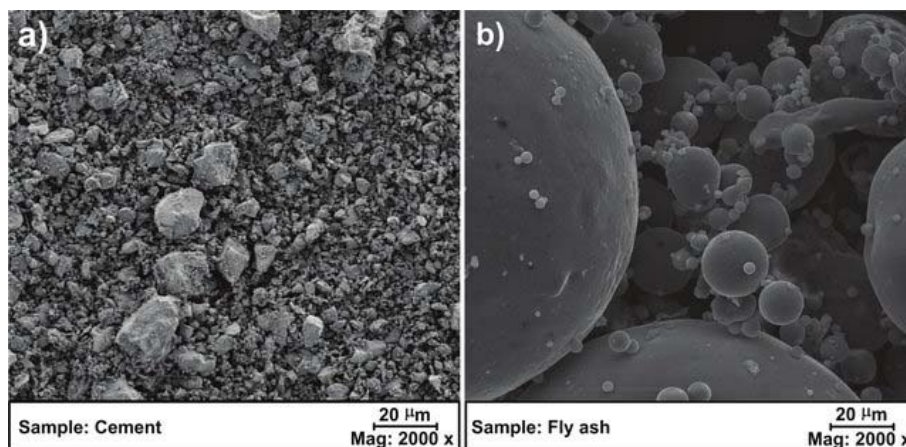
že pucolánové vlastnosti mikrosiliky se projeví při ošetřování vzorků vodní parou při teplotách 80 – 90°C. Hydratovaná zrna mikrosiliky jsou znázorněna na Obr. 30.



Obr. 30: Hydratovaná zrna mikrosiliky; A = $\text{Ca}(\text{OH})_2$; B = C-S-H gel; C = C-A-S-H ($2 \cdot \text{CaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) – převzato z [66]

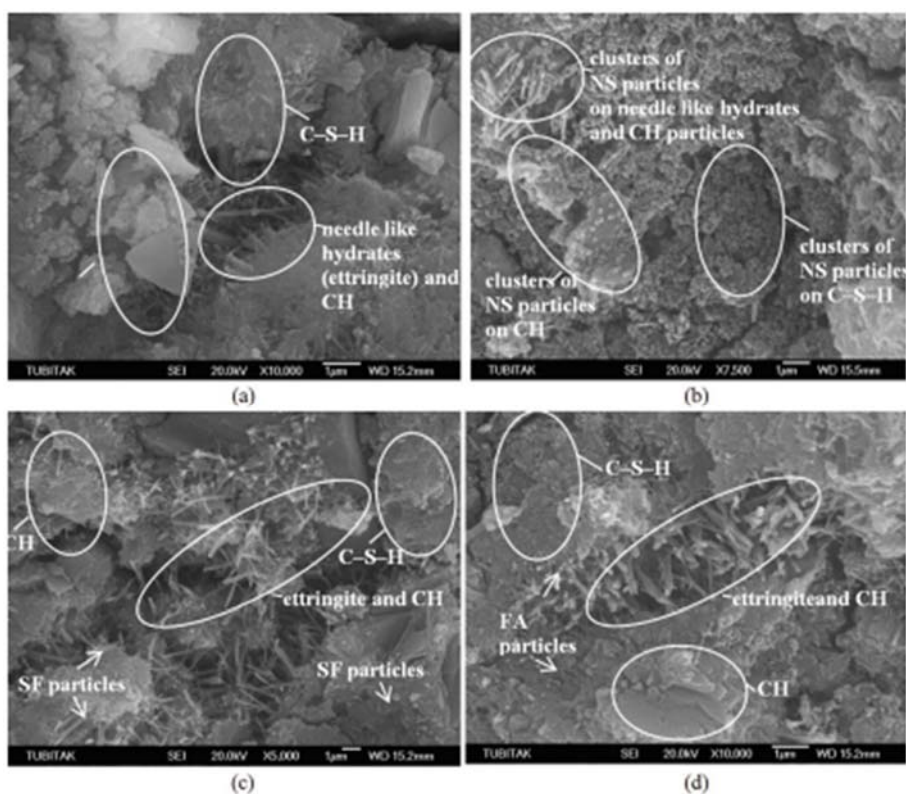
4.3.1.2 Elektrárenský popílek

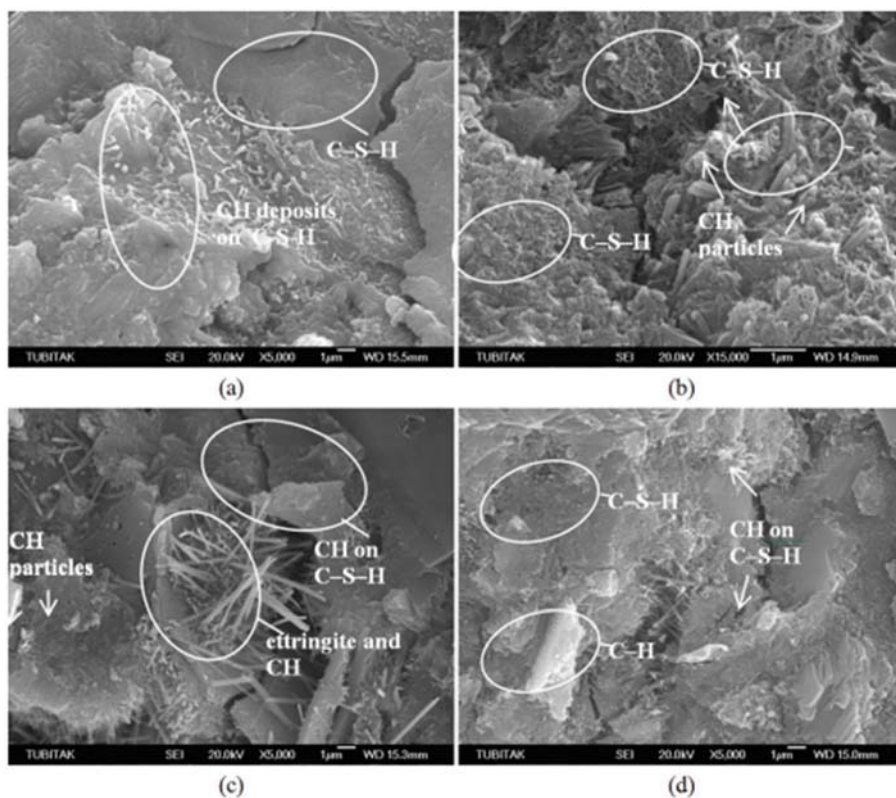
Elektrárenský popílek se obdobně jako mikrosilika využívá jako mikroplnivo, případně pro úpravu reologických vlastností případně pro snížení nárůstu hydratačního tepla pro výrobu masivních průřezů, jako tomu bylo u sloupů Musashi Kosugi Towers v Tokiu, kapitola 3.2.1. Nejčastěji používaným popílkem by měl být popílek černouhelný, který je stálejší. Vlastnosti popílku jsou stanoveny v normě ČSN EN 450-1 [67], mezi vybrané lze zařadit velikost specifického povrchu, který se pohybuje v mezích od 200 do 800 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a velikost jeho částic se pohybuje od 1 - 150 μm , přičemž pouze 10 – 30% částic je větších než 45 μm . Objemová hmotnost popílku se pohybuje od 1 120 do 1 500 kg/m^3 . Z chemického složení obsahují popílků cca 45% SiO_2 , cca 35% $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ a 2 až 20% CaO . Jako limitní hodnota náhrady portlandského cementu CEM I popílkem je v ČSN EN 206+A1 stanovena *k-hodnota* $k = 0,33$ [23]. Porovnání velikosti zrna cementu a popílku je patrné na následujícím Obr. 31 ze SEM analýzy, kterou publikoval G.L. Golewski.



Obr. 31: Porovnání zrna cementu (vlevo) a popílku (vpravo) při zvětšení 2 000x – převzato z [68]

Porovnání stupně hydratace a tvorby C-S-H gelu a hydroxidu vápenatého po 7 a 28 dnech uložení matrice ve vodním uložení je zobrazeno na následujícím obrázku Obr. 32.



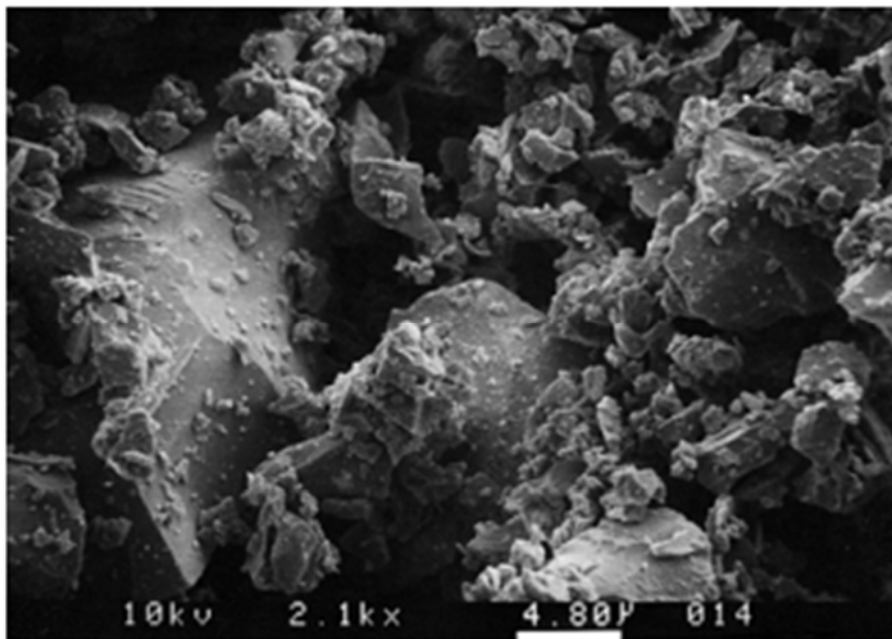


Obr. 32: Výsledky SEM analýzy matric po 7 dnech (horní 4 obrázky) a po 28 dnech (dolní 4 obrázky) ošetřování; a) portlandský cement při zvětšení 10 000x; b) 10% nanosiliky při zvětšení 7 500x; c) 10% mikrosiliky při zvětšení 5 000x; d) 10% popílku při zvětšení x10 000; CH = $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NS = nanosilika, SF = mikrosilika, FA = popílek – převzato z [69]

4.3.1.3 Mletá granulovaná vysokopecní struska

Primárním účelem strusky ve složení směsi je funkce mikroplniva. Vedlejší funkcí je pak úprava reologických vlastností čerstvé směsi a zpomalení počátku tuhnutí. Složení strusky musí splňovat požadavky stanovené v ČSN EN 15167-1 [70].

Na rozdíl od křemičitého úletu a popílku jsou zrna strusky nepravidelného tvaru, viz Obr. 33, s velikostí částic pod $45\ \mu\text{m}$ s jemností mletí $400 - 600\ \text{m}^2.\text{kg}^{-1}$. Objemová hmotnost mleté granulované strusky se pohybuje od $2\ 850$ do $2\ 950\ \text{kg}/\text{m}^3$.



Obr. 33: Záznam tvaru zrna mikrosiliky pořízeného pomocí elektronového mikroskopu (SEM) při zvětšení 21 000x – převzato z [71]

4.3.2 Příměsi typu I – inertní

Inertní příměsi používané pro UHPC a ECC slouží primárně jako mikroplnivo pro úpravu reologických vlastností čerstvé směsi. Mezi inertní příměsi lze zařadit mletý křemen, kamenné (křemenné) moučky jiného typu než mletý křemen, mikromletý vápenec a pigmenty. Tyto příměsi musí splňovat podmínky pro fillery uvedené v normě pro kamenivo do betonu ČSN EN 12620+A1 [58]. Požadavky na mletý vápenec jsou také uvedeny v ČSN 72 1220 [72]. Specifikace pigmentů je uvedena v ČSN EN 12878 [73].

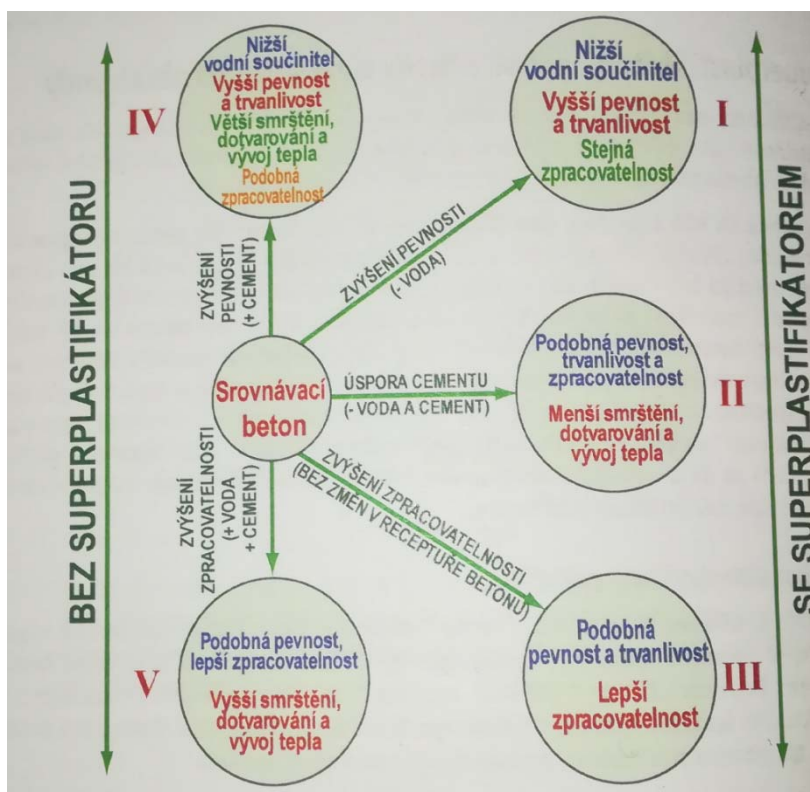
4.4 PŘÍSADY

Přísady jsou chemické látky upravující vlastnosti čerstvé směsi nebo ztvrdlého UHPC. Jejich dávkování je v malém množství v % hmotnosti cementu. Přísady musí splňovat požadavky určené normami ČSN EN 934-1[74] a ČSN EN 934-2+A1[75]. Z hlediska normy ČSN EN 206+A1 [23] nesmí být dávka přísady větší než 50g na 1 kg cementu, pokud se vyšší množství neprověří průkazní zkouškou. Při dávkování tekuté přísady v množství vyšším než 3 l na 1 m³ betonu je nutno toto množství uvažovat při výpočtu vodního součinitele.

Mezi přísady lze zařadit zpomalovače nebo urychlovače tuhnutí/ tvrdnutí, inhibitory koroze, stabilizační přísady, hydrofobizační přísady, provzdušňující přísady, přísady modifikující viskozitu betonu (VMA), přísady zamezující smrštění (SRA) a přísady snižující spotřebu vody nejméně o 5% a plastifikátory. O jednotlivých přísadách a jejich vlivu na vlastnosti betonu podrobně pojednává kapitola 13 Chemické přísady, [59 kap. 13].

4.4.1 Plastifikátory a superplastifikátory

Superplastifikátory, neboli přísady silně snižující obsah vody, jsou z výše uvedených přísad nejdůležitější, jelikož mají silný vliv na snížení spotřeby vody při zachování konzistence. Pro výrobu UHPC se používají plastifikátory na bázi polykarboxylátů (PCE). Na rozdíl od přidání vody není použití superplastifikátorů náchylné na její odlučování a jejího negativního vlivu na výslednou pevnost. Tyto přísady musejí splňovat požadavek normy ČSN EN 934-2 + A1 [75]. Funkci plastifikátorů a jejich vliv na beton je patrný z následujícího Obr. 34, který publikoval M. Collepardi [59].



Obr. 34: Schématický diagram znázorňující vliv superplastifikátoru na čerstvý a ztvrdlý beton – převzato z [59]

Použití konkrétního typu plastifikační přísady se musí prověřit průkazní zkouškou nejen pro cement, ale také spolu s dalšími příměsemi typu II. Vzhledem k fluktuaci zrn cementu, jakožto jedním z možných způsobů reakce plastifikátoru s cementem [59], může být plastifikátor jedním z činitelů ovlivňující distribuci vláken v UHPC.

4.5 VODA

Voda se podílí na hydrataci cementu a zlepšuje zpracovatelnost čerstvé směsi. Větší množství vody sice zlepšuje zpracovatelnost čerstvého UHPC, ale zároveň zvyšuje jeho pórovitost, jelikož zůstává vázána v kapilárách, ze kterých se postupně uvolňuje. V konečném důsledku snižuje pevnost v tlaku a odolnost proti působení vnějšího prostředí. Závislost vody, potažmo vodního součinitele, na pevnosti v tlaku je popsána na Obr. 1 na str.- 10 -. Požadavky na vlastnosti záměsové vody do UHPC musí splňovat

požadavky uvedené v ČSN EN 1008 [76]. Nutnost ověřovacích zkoušek pro jednotlivé druhy vod se dá shrnout dle následující Tab. 3.

Tab. 3: Klasifikace typů vod a požadavky na průkazní zkoušky

druh vody	použití jako záměsová voda
pitná	použitelná bez zkoušení
voda získaná při recyklaci	nutno ověřit průkazní zkouškou
podzemní voda	nutno ověřit průkazní zkouškou
povrchová voda	nutno ověřit průkazní zkouškou
odpadní průmyslová voda	nutno ověřit průkazní zkouškou
mořská voda	není vhodná pro výrobu železobetonu a předpjatého betonu
brakická (poloslaná) voda	
splašková voda	není vhodná

Oproti běžným betonům, s vodním součinitelem v rozmezí 0,4 – 0,6, se hodnota vodního součinitele u jemnozrnných cementem pojených kompozitních materiálů typu UHPC pohybuje kolem hranice 0,25. Takto nízkých hodnot vodního součinitele je dosaženo díky použití účinných plastifikátorů na bázi polykarboxylátů (PCE).

Z technologického hlediska dávka vody ovlivňuje zásadním způsobem výsledné vlastnosti. Správné dávkování záměsové vody vychází ze znalosti základních pojmů, které jsou uvedeny v ČSN EN 206+A1 [23]. Jedná se o celkový obsah vody, tedy dávkovanou vodu a vodu obsaženou v kamenivu (i na jeho povrchu), v přísadách a příměsích dávkovaných v suspenzi a vodou z přidávaného ledu pro snížení vývinu hydratačního tepla nebo při betonáži v letních měsících a vodou, která je používána při protěplování parou. Dalším pojmem je účinný obsah vody, tedy vody, která je potřebná k úplné hydrataci cementu. Účinný obsah vody lze vyjádřit jako rozdíl mezi celkovým obsahem vody a vodou obsaženou v kamenivu. Posledním údajem je vodní součinitel w/c tedy poměr účinného množství vody k cementu. V případě UHPC lze kromě vodního součinitele stanovit také hodnotu pojivového součinitele w/b , viz Rov 6.

$$\frac{w}{b} = \frac{w+SP}{c+\sum k \cdot p} \quad [-] \quad (\text{Rov 6})$$

Kde: wúčinné množství vody [kg]

SPdávka superplastifikátoru [kg]

cmnožství cementu [kg]

ksoučinitel zohledňující účinnost příměsi typu II

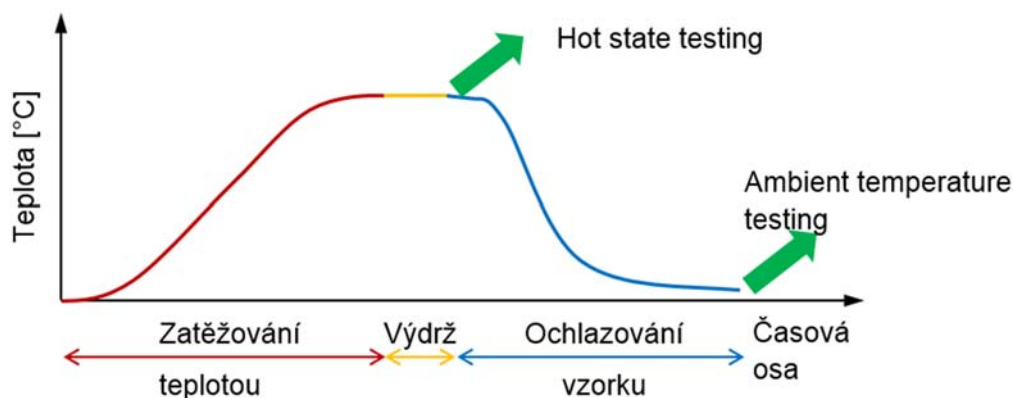
ppříměs typu II [kg]

4.6 DISPERZNÍ VÝZTUŽ

Jak již bylo uvedeno v úvodu, lze materiály typu UHPC charakterizovat jejich vysokou pevností v tlaku díky hutné skladbě skládající se z cementu, drobného kameniva a mikroplniva, za použití účinných superplastifikátorů a snížení dávky vody. Takto vytvořená matrice je velmi pevná, ale zároveň velmi křehká. Pro zajištění duktilního chování i po vzniku trhliny je do směsi přidávána disperzní (rozptýlená) ocelová výztuž v dávce $V_f = 1 - 3 \%$ objemu směsi. Pro zajištění tahového zpevnění se nejčastěji používají vlákna kovová s průměrem do 0,3 mm a délkou do 20 mm (štíhlostní poměr $\lambda = 60$).

Vhodným návrhem typu a množství vláken lze ovlivnit chování materiálu i po vzniku trhliny a zvýšit tak lomové parametry. K aktivaci disperzní výztuže dochází v okamžiku vzniku trhliny (vyčerpání tahové únosnosti samotné matrice). Na rozdíl od polymerních či skleněných vláken dochází k jejich vytažení z matrice (ztráta soudržnosti matrice s drátkou). U polymerních vláken, která nemají takové vlastnosti, jako vlákna ocelová, dochází k jejich přetržení. Skleněná vlákna jsou naopak velmi křehká a použití skleněných či polymerních vláken musí být ověřeno průkaznými zkouškami obdobně jako u vláken ocelových, které musí splňovat požadavky dle ČSN EN 14889-1 [77].

Použití polymerních a skleněných vláken zvyšuje mechanické vlastnosti před vznikem první trhliny. Během rozvoje trhlín ovšem dochází ke křehkému porušení skleněných vláken nebo k přetržení vláken polymerních. Z tohoto důvodu se tato vlákna uplatňují spíše pro omezení vzniku a přenosu tahových napětí vzniklých při objemových změnách. Polymerní vlákna, zejména PVA vlákna, lze také využít pro zvýšení odolnosti materiálu proti působení vysokých teplot do teploty cca 200°C. Při posuzování vlivu vláken na mechanické parametry je třeba věnovat zvýšenou pozornost způsobu zkoušení. Zkoušky lze provádět ve dvou režimech: „*hot state testing*“ a „*ambient temperature testing*“ [78, 79]. Rozdíl mezi jednotlivými zkouškami je na následujícím Obr. 35.



Obr. 35: Časové schéma zkoušek za vysokých teplot; ze schématu je patrné, že v režimu „*hot state testing*“ je zkouška provedena při vysoké teplotě, kdežto v režimu „*ambient temperature testing*“ je zkouška provedena po vychladnutí tělesa

5 REOLOGIE UHPC

Reologie čerstvé směsi jemnozrnného cementem pojeného kompozitního materiálu popisuje vztahy mezi napětím, vnitřním smykovým třením, viskozitou a konzistencí, které se dají zjednodušeně označit jako chování čerstvé směsi. Význam reologie čerstvé směsi se uplatňuje u dopravy, čerpání a ukládání směsi. Vzhledem k tekutosti směsi UHPC lze odvodit základní principy reologie z principů pro samozhutnitelné betony.

Reologie čerstvého směsi UHPC lze rozdělit na makro a mikro-reologii. Mikro-reologie odvozuje vlastnosti látek ze struktury jednotlivých složek. Makro-reologie popisuje globální vztahy a vlastnosti, mezi které patří tečné a normálové napětí, viskozita, mez toku a konzistence.

Chování čerstvé směsi lze popsat nejen zkouškami viskozity a stanovení vnitřního smykového tření, ale také pomocí zkoušek konzistence. Zpracovatelnost jemnozrnného materiálu je ovlivněna i kamenným prachem, který vzniká při drcení kameniva a ovlivňuje reaktivitu cementu a plastifikátoru a snižuje tak zpracovatelnost směsi. Nižší zpracovatelnost směsi UHPC lze označit jako lepivost, která se zvyšuje použitím nejrůznějších polyfunkčních přísad a plastifikátorů. Směsi s vyšší lepivostí se chovají jako viskózní (vazké) kapaliny bez tixotropie. Mezi další problémy, se kterými se lze u směsi s vyšší lepivostí setkat, patří zvýšený obsah vzduchu a negativní ovlivnění zpracovatelnosti a čerpatelnosti směsi.

5.1 ZKOUŠKY KONZISTENCE

Zpracovatelnost čerstvé směsi UHPC ovlivňuje způsob výroby prvků a jejich dimenze. Díky tekutému charakteru je chování UHPC podobné samozhutnitelným SCC betonům („*Self Compacting Concrete*“), ale jejich viskozita je mnohem vyšší. Přidáním disperzní výztuže do směsi se její tekutost snižuje.

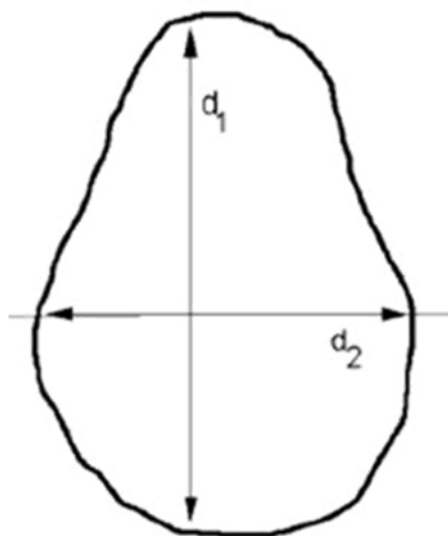
Pro stanovení konzistence a posouzení viskozity čerstvé směsi UHPC lze využít následující zkoušky používané pro SCC betony:

- Zkouška sednutí rozlitím dle ČSN EN 12350-8 [80] je pro UHPC materiály použitelná bez úpravy
- Zkouška V-nálevkou dle ČSN EN 12350-9 [81] je použitelná pro sledování schopnosti vyprázdnění nádoby za jednotku času, ale její použití pro UHPC materiály vyžaduje úpravu jejích rozměrů
- Zkoušky konzistence L-truhlíkem dle ČSN EN 12350-10 [82] a J-kroužkem dle ČSN EN 12350-12 [83] jsou použitelné pro prvky vyztužené betonářskou výztuží (ať už měkkou nebo předpínací), ale pro UHPC materiály bych doporučil úpravu rozměrů zkušebních zařízení
- Zkoušky konzistence pro čerstvé malty pomocí Haggermanova kužílku dle ČSN EN 1015-3 [84] jsou použitelné pro zkoušky konzistence nejen v laboratořích, ale také na stavbách či v závodech prefa

5.1.1 Zkouška sednutí – rozlitím

Stanovení konzistence pro samozhutnitelné betony metodou sednutí-rozlitím je popsáno v evropské normě ČSN EN 12350-8 [80]. Vzhledem k charakteru chování UHPC směsi lze tuto metodu použít i pro zkoušení čerstvé směsi UHPC.

Výsledkem zkoušky konzistence zkouškou sednutí-rozlitím je změření dvou na sebe kolmých rozměrů dle Obr. 36 a čas t_{500} . Základem zkoušky sednutí-rozlitím je zkouška sednutí dle ČSN EN 12350-2 [85], ve které jsou popsány rozměry Abramsova kužele, který je pro tuto zkoušku využíván. Mezi výše uvedenými zkouškami je rozdíl ve způsobu plnění, kdy při zkoušce sednutím je kužel plněn po cca třetinách a hutněn propichovací tyčí Ø 16 mm.



Obr. 36: Schéma měření dvou na sebe kolmých rozměrů

Výsledky zkoušky sednutí – rozlitím dle ČSN EN 12350-8 [80], které se stanoví dle níže uvedené Rov 7, udávají schopnost tečení čerstvé směsi UHPC a čas t_{500} udává rychlost tečení. Tento test je velmi citlivý na vlhkost podkladní desky rozměru 900 x 900 mm s dvojicí soustředných kružnic o poloměru 210 a 500 mm a na otřesy či vibrace. Při vizuálním pozorování a stanovení hodnoty t_{500} lze získat další informace a závislosti odolnosti směsi vůči odměšování vody. V případě použití popílku v receptuře UHPC lze při zkoušce sednutí-rozlitím případně i pozorovatelné odměšování popílku ze směsi.

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (\text{Rov 7})$$

Kde: SFsednutí-rozlitím [mm]

d_1největší průměr rozlití [mm]

d_2průměr rozlití ve směru kolmém na d_1 [mm]

Výsledky zkoušky lze klasifikovat stupnicí uvedenou v následující Tab. 4, která odpovídá klasifikaci uvedené v ČSN EN 206+A1 [23]. V případě, kdy je rozdíl

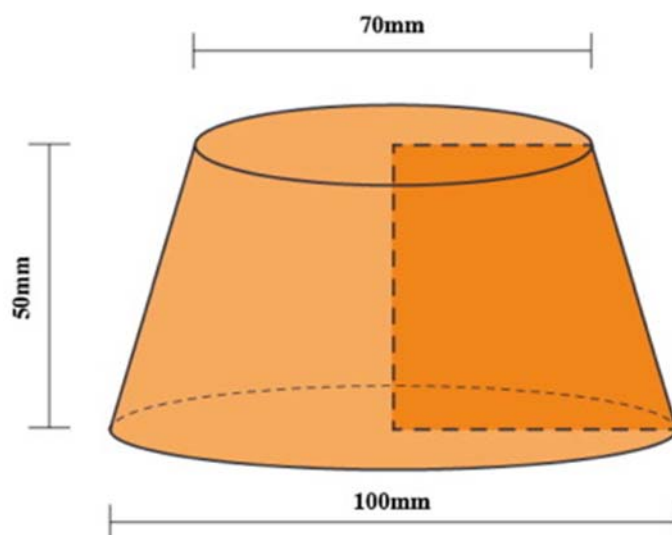
mezi měřeními d_1 a d_2 větší než 50 mm je nutné provést zkoušku znovu na novém zkušebním vzorku. V případě, kdy bude při dvou po sobě jdoucích zkouškách zjištěn rozdíl měření rozměrů d_1 a d_2 větší než 50 mm nemá UHPC potřebnou tekutost a zkouška není vhodná.

Tab. 4: Klasifikace výsledků zkoušky sednutí-rozlitím

Stupeň konzistence	Sednutí-rozlitím zkoušené podle ČSN EN 12350-8 SF [mm]
SF1	$550 \leq SF \leq 650$
SF2	$660 \leq SF \leq 750$
SF3	$760 \leq SF \leq 850$

5.1.2 Stanovení konzistence pomocí Haggermanova kužílku

Zkoušky konzistence čerstvého UHPC je možné provádět nejen v laboratoři, ale i na stavbě či při výrobě prefabrikátů, kde je směs míchána ve větším objemu. V případě vývoje receptury a ověřování jejích vlastností v laboratoři lze využít princip zkoušky sednutí-rozlitím pro samozhutnitelný beton. Vzhledem k malým objemům míchaných záměsí je ale Abramsův kužel zaměněn menším Haggermanovým kuželem, který se používá pro zkoušku konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3 [84]. Obdobně jako u zkoušky sednutí-rozlitím je výsledkem zkoušky rozlití směsi. Na následujícím Obr. 37 jsou uvedeny rozměry kuželu pro stanovení konzistence malt dle ČSN EN 1015-3 [84]. Tuto zkoušku lze nalézt pod anglickým označením „*mini slump flow test*“, čili mini zkouška sednutí rozlitím [86].



Obr. 37: Rozměry Haggermanova kuželu pro stanovení konzistence čerstvé směsi UHPC a pro zkoušky malt – převzato z [86]

5.2 VISKOZITA UHPC

Viskozita je fyzikální veličinou udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedícími vrstvami proudící kapaliny. Toto chování popisuje Newtonův zákon viskozity, který je uveden na následující Rov 8.

Viskozita charakterizuje vnitřní tření kapaliny, které je závislé na velikosti přitažlivých sil mezi jednotlivými částicemi. U kapalin s větší viskozitou jsou přitažlivé síly mezi částicemi větší, což vede ke zpomalení pohybu tuhých složek v čerstvé směsi.

Ideální kapaliny mají nulovou viskozitu, ostatní kapaliny s nenulovou viskozitou jsou kapaliny vazké. Nulovou hodnotu viskozity lze nalézt pouze u helia při teplotách blízkých se absolutní nule (termodynamická teplota $T = -273,149806372^{\circ}\text{C}$), tedy stavu, kdy je zastaven veškerý tepelný pohyb částic. Viskozita vody je rovna $1 \cdot 10^{-3}$ [Pa.s].

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{Rov 8})$$

Kde: τ tečné napětí [Pa]
 η součinitel vnitřního tření = dynamická viskozita [Pa.s]
 $\partial u / \partial x$ gradient rychlosti ve směru kolmém na rychlost [$1 \cdot \text{s}^{-1}$]

Převrácenou hodnotou dynamické viskozity η je tekutost φ , kterou lze vyjádřit vztahem Rov 9.

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (\text{Rov 9})$$

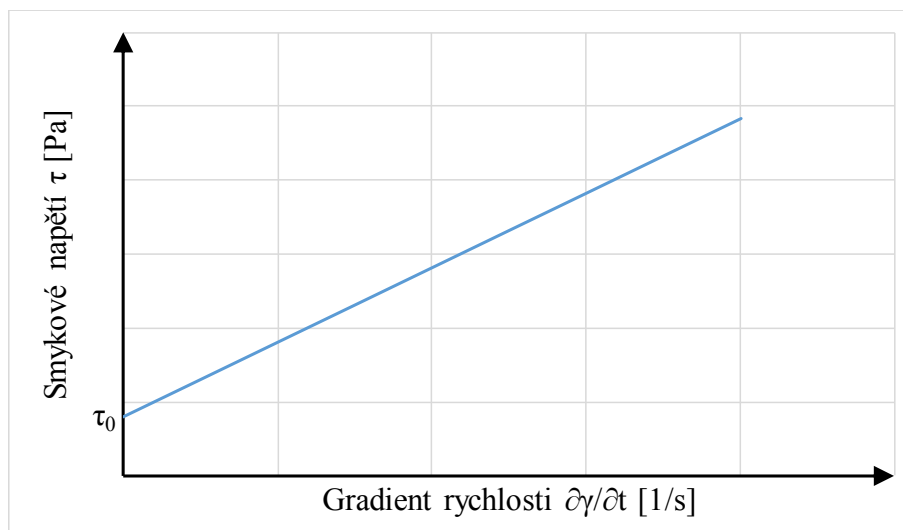
Podíl dynamické viskozity a hustoty se označuje jako kinematická viskozita ν (součinitel kinematické viskozity) a lze jej stanovit dle následující Rov 10.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{Rov 10})$$

Výše uvedené vzorce platí pro newtonovské kapaliny a plyny, které nejsou závislé na gradientu rychlosti. Čerstvá směs UHPC se ovšem chová jako nenewtonovská kapalina, jelikož rychlost deformace nezávisí pouze na napětí, ale také na době, po kterou napětí působí. S rostoucí dobou působení konstantního napětí se rychlost deformace čerstvé směsi zvětšuje. Toto chování mají tixotropní látky, čili látky, které v klidu a při nepůsobení vnější energie ztrácejí svoji tekutost. Z hlediska popisu chování nenewtonovské tekutiny lze chování čerstvé směsi popsat modelem Binghamovské tekutiny dle následujícího vztahu Rov 11, která je zobrazena na Graf 3.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (\text{Rov 11})$$

Kde: τ_0 mez tečení / minimální napětí nutné k tečení
 η součinitel vnitřního tření = dynamická viskozita [Pa.s]
 $\partial \gamma / \partial t$ gradient rychlosti ve směru kolmém na rychlost [$1 \cdot \text{s}^{-1}$]

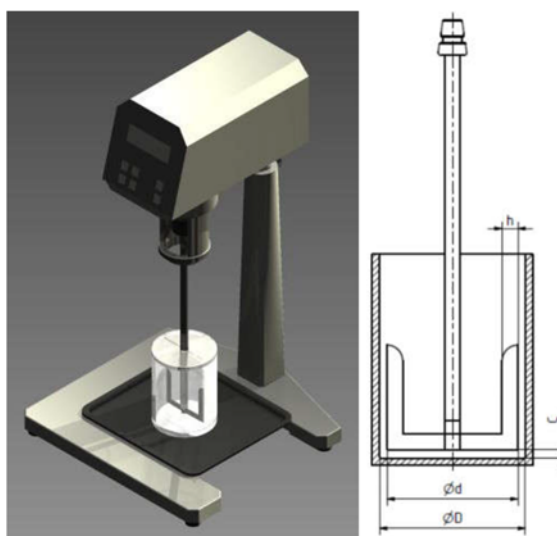


Graf 3: Graf závislosti smykového napětí na gradientu rychlosti dle Binhamova modelu

Stanovení reologie čerstvého betonu lze provádět v laboratořích pomocí reometru, viz kap 5.2.1. Pro stanovení na stavbě lze využít především nepřímé metody uvedené v kapitole 5.2.2.

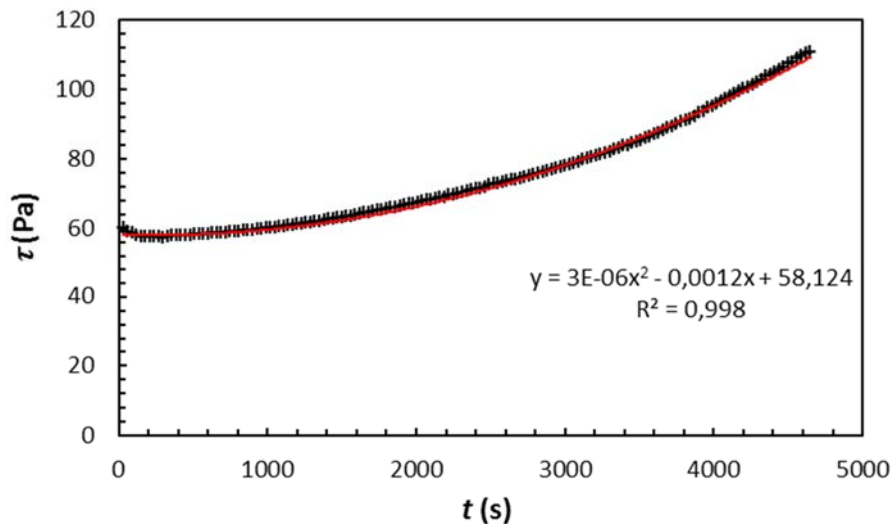
5.2.1 Měření viskozity UHPC reometrem RC20

K určení reologických vlastností čerstvé směsi použili pracovníci Fakulty strojní, ČVUT v Praze nekonvenční metodu stanovení viskozity s kovovým míchadlem umístěného v nádobě s vnitřním průměrem 70 mm. Tato metodika je založena na principu, který popsali Metzner a Otto, kdy se při měření zaznamenávají otáčky míchadla a točivý moment potřebný pro otáčení. Měření provádějí pracovníci pomocí reometru RC20, viz Obr. 38.

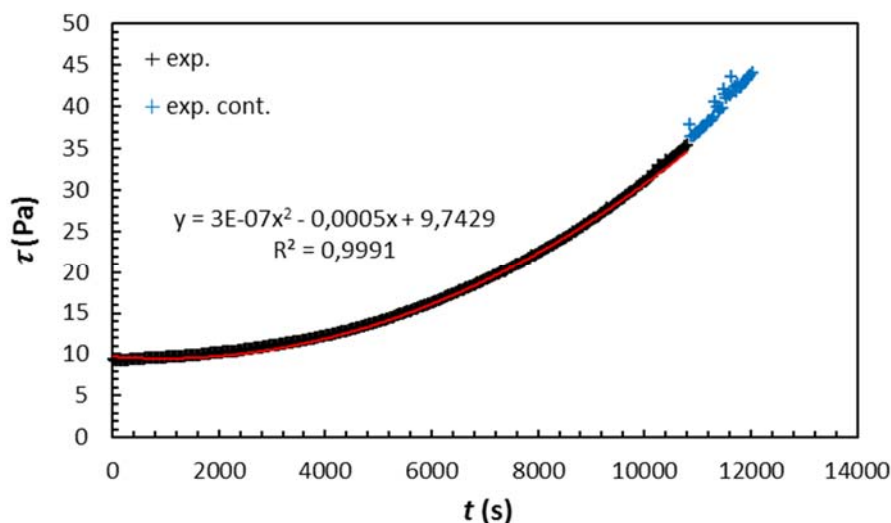


Obr. 38: Schéma reometru RC20 (vlevo) a schéma uspořádání měření (vpravo)

Na následujících ilustrativních grafech je zobrazena závislost smykového napětí na čase pro jemnozrnnou cementem pojenou recepturu UHPC bez disperzní výztuže a pro recepturu do které bylo přidáno 30 kg/m³ vody, která byla měřena pomocí reometru RC20.



Graf 4: Záznam měření reologie pomocí reometru RC20 jemnozrnné matrici UHPC bez vláken



Graf 5: Záznam měření reologie pomocí reometru RC20 jemnozrnné matrici bez vláken při dávkě vody vyšší o 30 kg/m³

Na uvedených grafech jsou černě zobrazeny měřené body smykového napětí v daném čase, kterými je proložena červená polynomická křivka, kterou je možné zapsat rovnicemi uvedenými v jednotlivých grafech. Modré body, které uvádí Graf 5, byly měřeny po ukončení doby měření, která byla původně nastavena na cca 3 hodiny. Z uvedených grafů je patrné, že přidáním vody do směsi se snížilo tečné napětí a směs jako taková je více tekutější. Vyšší tekutost směsi nepříznivě ovlivňuje distribuci vláken po výšce průřezu.

5.2.2 Nepřímé měření viskozity

Stanovení viskozity čerstvé směsi lze kromě přímého měření provádět i pomocí zkoušek konzistence, které jsou popsány v kapitole 5.1. Pro zkoušky sednutí-rozlitím dle ČSN EN 12350-8 [80] a V-nálevkou dle ČSN EN 12350-9 [81] publikovali autoři Hajime Okamura a Masahiro Ouchi v článku věnujícímu se samozhutnitelnému betonu [87] následující Rov 12 a Rov 13.

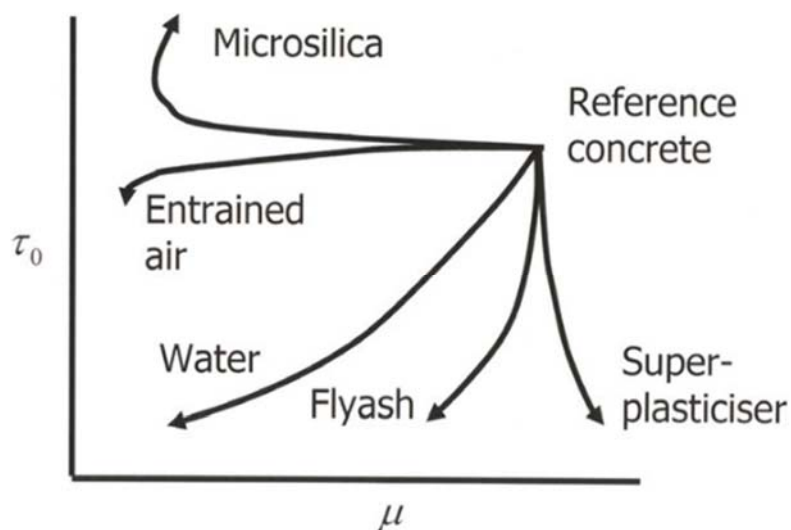
$$\Gamma_c = \frac{(Sfl_1 \cdot Sfl_2 - Sfl_0^2)}{Sfl_0^2} \quad (\text{Rov 12})$$

$$R_c = \frac{10}{t} \quad (\text{Rov 13})$$

Kde: Γ_cdeformovatelnost směsi
 Sfl_1, Sfl_2měřené hodnoty sednutí-rozlitím [mm]
 Sfl_0průměr spodní podstavy kužele [mm]
 R_csoučinitel viskozity směsi
 tčas, za který proteče směs V-nálevkou

Dalšími nepřímými metodami jsou zkouška L-truhlíkem dle ČSN EN 12350-10 [82] a J-kroužkem dle ČSN EN 12350-12 [83].

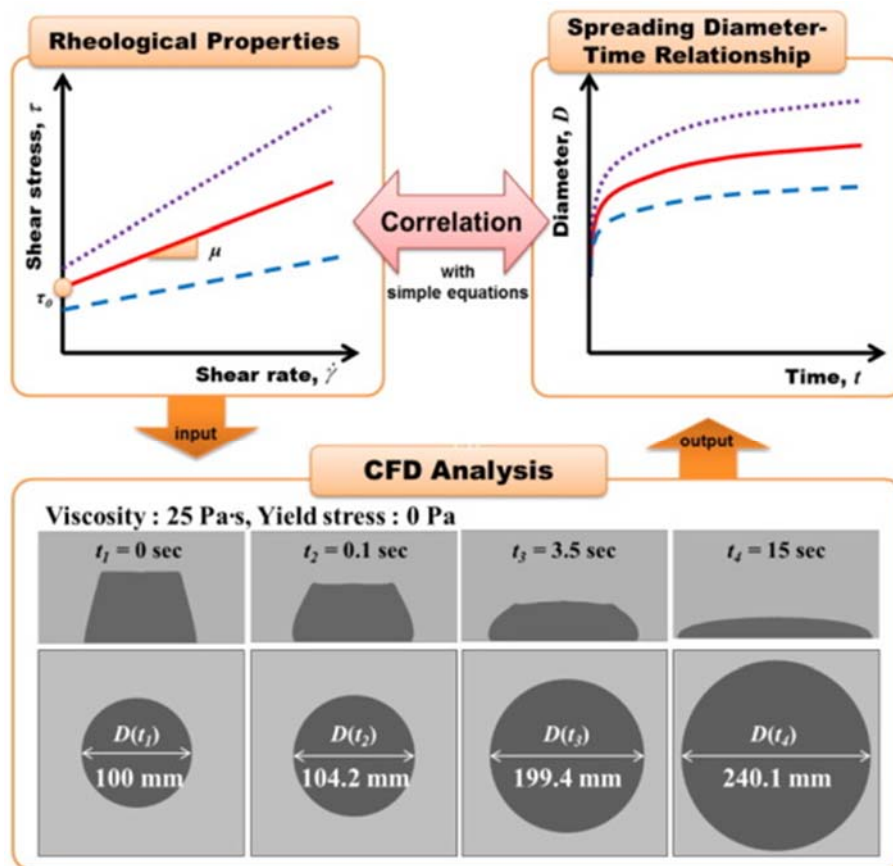
Pro stanovení závislosti mezi viskozitou čerstvé směsi a typem provedené zkoušky je potřeba vždy provést validaci vztahů, viz [86, 88–92]. Stanovení závislosti viskozity na konzistenci je dále ovlivněno samotným složením směsi, jak ukazuje následující Obr. 39.



Obr. 39: Závislost změny reologie čerstvé směsi v závislosti na jednotlivých složkách matrice – převzato z [93]

Závislost viskozity UHPC a výsledků „mini slump flow“ testu publikoval v článku *Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test* M.S. Choi [86]

a jeho výsledky jsou uvedeny na následujícím Obr. 40. Autor ve svém článku porovnává hodnotu rozlité směsi v závislosti na čase s výsledky zkoušek viskozity pomocí CFD analýzy.



Obr. 40: Porovnání závislosti výsledků zkoušky sednutí rozlitém a zkoušek viskozity – převzato z [86]

6 VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO UHPC

Vzhledem k absenci normových podkladů pro výrobu a zkoušení UHPC v České republice je nutno při zkouškách vycházet zejména z platných norem pro zkoušení ztvrdlého betonu ČSN EN 12390, ČSN EN 14651+A1 [94], ČSN EN 14488-3 [95] a ČSN EN 14488-7 [96]. V následujících kapitolách jsou stručně popsány jednotlivé typy zkoušek vlastností ztvrdlého UHPC.

6.1 PEVNOST V TLAKU

Pevnost UHPC v tlaku, je stejně jako u běžného betonu, je jedním z charakterizujících parametrů UHPC. Ve francouzském doporučení AFGC byla udávána pevnost v tlaku v mezích $150 \leq f_{ck} \leq 250$ MPa [7]. Tato hodnota je stanovena na válcových tělesech průměru 110 mm a výšky 220 mm, která byla po dobu 3 dnů od výroby ošetřována v prostředí nasyceném vodní parou při teplotách 80 – 90°C. V německém doporučení Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [8] je pevnost v tlaku, pohybující se v intervalu $150 \leq f_{ck} \leq 200$ MPa, stanovena na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm.

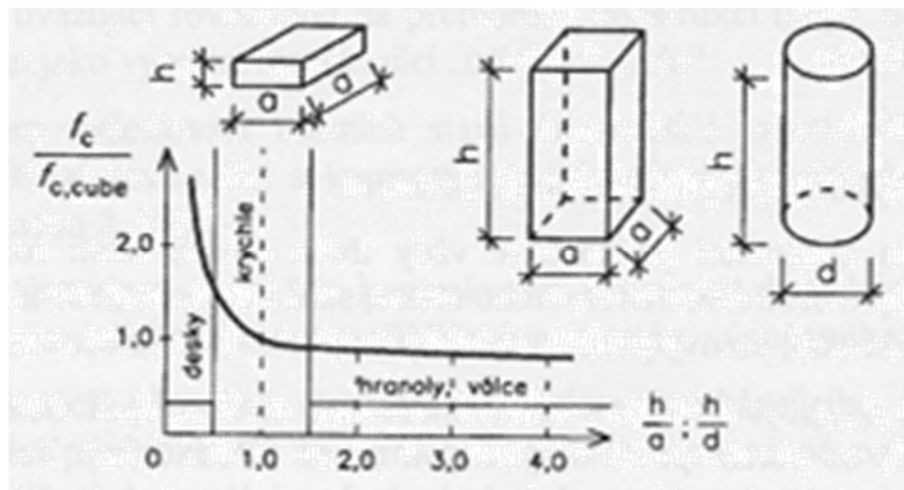
V japonském doporučení JSCE [9] je pevnost v tlaku stanovena na válcích průměru 100 mm a výšce 200 mm. Vzhledem k absenci hrubého kameniva připouští japonské doporučení stanovení pevnosti v tlaku i na válcích průměru 50 mm a výšce 100 mm. Dle Metodiky 1 [11], vydané v České republice v roce 2015, by měla být zkouška pevnosti v tlaku provedena na válci průměru 150 mm a výšce 300 mm. Dle Metodiky 2 [12], která je v souladu s dokumentem fib Model Code, dosahuje UHPC pevnosti v tlaku, stanovené na výše uvedených válcích, hodnot v rozmezí $110 \leq f_{ck} \leq 180$ MPa.

Jak je patrné, celosvětově není sjednocen pohled na zkoušení tohoto typu materiálu. Vysoká pevnosti v tlaku a jemnozrná matrice kladou velmi vysoké nároky nejen na kapacitu zkušebních zařízení, ale také na přesnost a preciznost prováděných zkoušek.

Výsledná pevnost UHPC v tlaku je mimo velikost zkušebního vzorku také závislá na několika dalších parametrech, které by měly být uvedeny při prezentaci výsledků. Mezi tyto vlivy patří tepelné ošetřování směsi při teplotách od 70 do 90°C v počátečních dnech tuhnutí a tvrdnutí, dále uložení a ošetřování vzorku, úprava tlačných ploch a rychlost zatěžování.

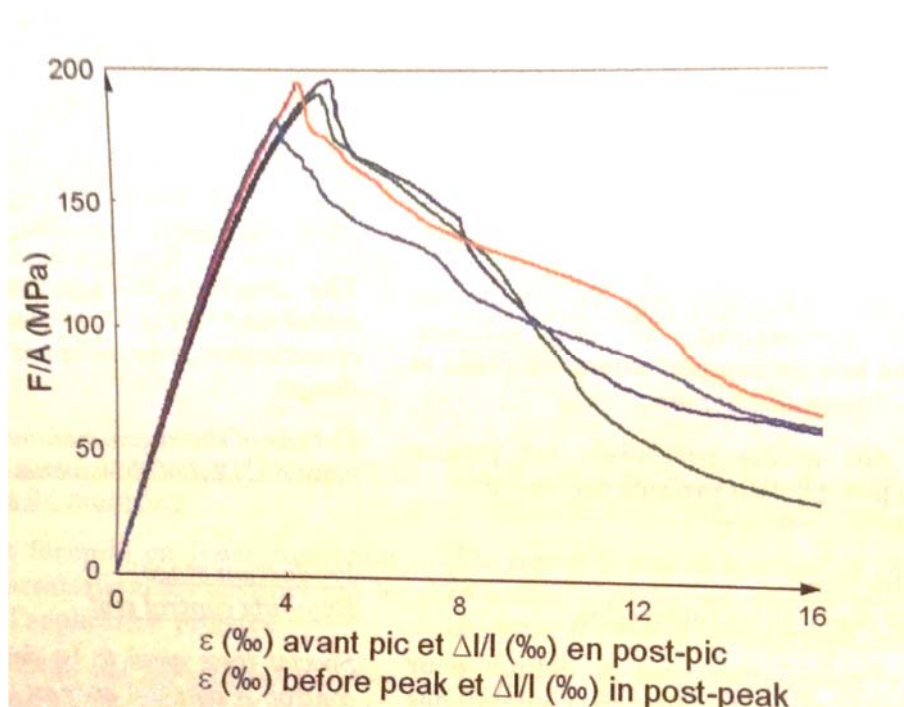
Vzhledem k výše uvedenému by zkušebními tělesy měly být krychle, hranoly, válce nebo vývrty, které budou splňovat požadavky norem ČSN EN 12390-1 [97], ČSN EN 12390-2 [98] a ČSN EN 12504-1 [99]. Tlaková pevnost běžně používaných betonů je v České republice zkoušena na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm, což odpovídá i referenčnímu tělesu v dokumentu fib Model Code [10], a na krychlích o hraně 150 mm dle ČSN EN 12390-3 [25].

Další tělesa, která pro stanovení pevnosti v tlaku připouští ČSN EN 12390-1 [97], jsou krychle, válce a hranoly menších rozměrů než u uvedených referenční těles. Při odběru jádrových vývrtů z konstrukce dle ČSN EN 12504-1 [99], odpovídá průměr vývrtu rozměrům jádrové korunky s diamantovými segmenty. Pokud vezmeme v úvahu i dikci normy ČSN EN 13791 [100] pak při zkoušce vývrtu o průměru 100 mm a štíhlostním poměru 1:1 odpovídají pevnosti betonu v tlaku stanovené na vývrtech $f_{ck, is}$ zkouškám na krychlích o hraně 150 mm. Při zkoušce vývrtu průměru 100 mm a štíhlostním poměru délky k průměru 2:1 jsou získané výsledky korespondující s výsledky na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm. Zkušebními tělesy mohou být dále hranoly o rozměru 40 x 40 x 160 mm splňující požadavky normy ČSN EN 196-1 [101] pro zkoušení cementu. Na následujícím Obr. 41 je znázorněna závislost pevnosti běžného betonu v tlaku na tvaru zkušebního tělesa.



Obr. 41: Poměr pevnosti betonu v tlaku k pevnosti krychelné v závislosti na štíhlosti zkušební tělesa – převzato z [102]

Při zkoušce UHPC, ať na krychlich, tak na válcích, je nutno sledovat také způsob porušení zkušební tělesa zda nedošlo k usmyknutí či porušení příčným tahem. U válcových těles je dále nutné sledovat, zda nedošlo k porušení v tlaku za ohybu. Zkouška by měla být řízena konstantním přírůstkem síly až do porušení. Pokud je sledována pevnost i po porušení, je nutno zkoušku řídit posunem pístu hydraulického válce. Typický diagram tlakové zkoušky je na následujícím Obr. 42.



Obr. 42: Typický průběh napětí na deformaci UHPC – převzato z [7]

Kromě velikosti zkušební tělesa a rychlosti zatěžování je dále nutné provést úpravu tlačných ploch. Referenčním způsobem úpravy tlačných ploch je broušení povrchu vzorku pro dosažení patřičné rovinnosti a rovnoběžnosti jednotlivých ploch. Dalšími možnými úpravami tlačných ploch kromě broušení, je koncování směsí

křemenného písku a vysokopevnostní síry, vyrovnaní povrchu cementovou maltou, použití pryžové, nebo jinak pružné, hmoty (například sololit). Tyto alternativní způsoby lze využít za předpokladu, kdy bude stanovena závislost mezi danou úpravou a broušeným povrchem. V případě krychlí vyrobených do ocelové formy, u které byla zkontrolována rovinnost a kolmost lze tlačné povrchy ponechat bez kontroly.

6.2 ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI

Hodnota modulu pružnosti UHPC je závislá nejen na složení matrice, ale také na okrajových podmínkách během tuhnutí a tvrdnutí, velikosti a tvaru zkušební tělesa, jeho stáří a na dalších technologických vlivech při provádění samotné zkoušky. Vzhledem k jemnosti struktury UHPC je kladen veliký důraz i na přesnost centrování zkušební tělesa při samotné zkoušce. Jednotlivé technologické vlivy během výroby a zkoušení modulu pružnosti popisuje Petr Huňka ve své disertační práci [103]. Níže jsou uvedeny dvě metody stanovení modulu pružnosti UHPC, které jsou použity v experimentální části.

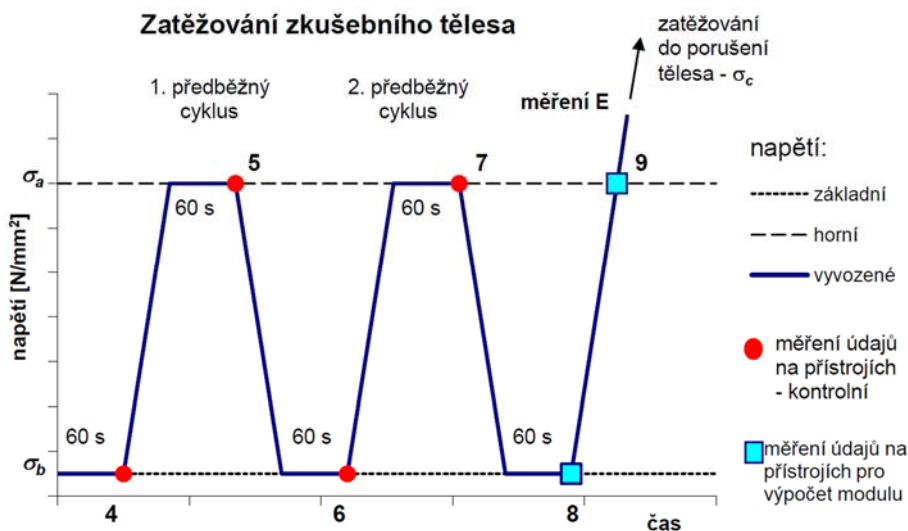
6.2.1 Statický modul pružnosti v tlaku

Stanovení hodnoty statického modulu pružnosti UHPC v tlaku není v České republice ani ve světě normováno. Při zkoušce však lze využít normativní základnu pro stanovení modulu pružnosti pro běžný beton. Pro stanovení hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku lze využít normu ČSN ISO 1920-10 [104], která nahradila normu ČSN ISO 6784 [105]. Dle dikce této normy odpovídá hodnota modulu pružnosti těživovému modulu přetvoření, jestliže je zkušební těleso zkoušeno mezi 0,5 MPa a $f_c/3$.

Základním zkušebním tělesem pro stanovení modulu pružnosti jsou válce s poměrem výšky k průměru 2:1. Minimální počet zkušebních těles dle ČSN ISO 1920-10 [104] by měl být 5, přičemž tři zkušební tělesa se použijí pro stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [25] a zbylá dvě tělesa se použijí pro stanovení modulu pružnosti. Z hlediska vyhodnocení výsledků je počet dvou těles na stanovení modulu pružnosti nevyhovující zejména v případě, když se jednotlivé hodnoty budou od sebe značně lišit. Zkušební tělesa by dle ČSN ISO 1920-10 [104] měla mít nejmenší rozměr roven 100 mm nebo čtyřnásobek velikosti použitého kameniva a poměr délky k průměru by se měl pohybovat v rozmezí 2 až 4, přičemž doporučený poměr je $L/d = 2$.

Před samotnou zkouškou je nutno každé zkušební těleso zakoncovat. U betonu běžných pevnostních tříd lze pro koncování využít směs křemenného písku, popílku a síry. Tato metoda koncování ovšem není použitelná pro vysokopevnostní materiály. U materiálů typu UHPC je doporučeno provést koncování tlačných ploch broušením.

Na následujícím Obr. 43 je znázorněn průběh zkoušky statického modulu pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 1920-10 [104].



Obr. 43: Grafický průběh zkoušky stanovení modulu pružnosti – převzato z [103]

Hodnota modulu pružnosti v tlaku se pak spočítá dle následující Rov 14.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (\text{Rov 14})$$

Kde: E_cstatický modul pružnosti v tlaku [GPa]

σ_ahorní zatěžovací napětí, $\sigma_a = f_c/3$ [MPa]

σ_bdolní / základní zatěžovací napětí, $\sigma_b = 0,5$ [MPa]

ε_aprůměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-]

ε_bprůměrné poměrné přetvoření při dolním zatěžovacím napětí [-]

6.2.2 Dynamický modul pružnosti

Principem zkoušky dle ČSN 731371 [106] je stanovení rychlosti šíření UZ vlnění v materiálu. Ze stanovené rychlosti šíření UZ vlnění lze určit fyzikálně mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi rychlostí šíření UZ vlnění a sledovanými vlastnostmi betonu.

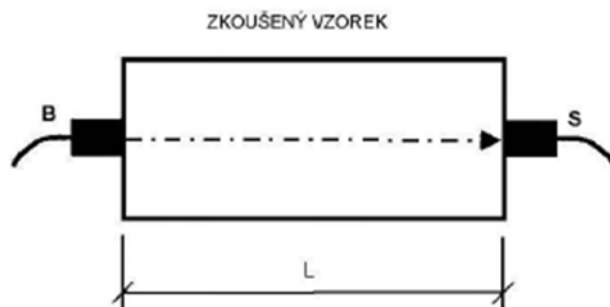
Hodnota dynamického modulu pružnosti E_{cu} se určí dle vztahu Rov 15.

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (\text{Rov 15})$$

Kde: E_{cu}dynamický modul pružnosti [MPa]

v_Limpulzová rychlost podélného UZ vlnění [km.s⁻¹]

ksoučinitel rovnoměrnosti prostředí



Obr. 44: Schéma uspořádání měření dynamického modulu pružnosti

6.3 PEVNOST V TAHU

Pevnost v tahu je, stejně jako u pevnosti v tlaku, závislá na několika vnějších faktorech, které ovlivňují nejen samotnou zkoušku, ale také její výsledky. Výsledky zkoušky jsou závislé na velikosti zkušebního tělesa a na uspořádání zkoušky. Z hlediska uspořádání lze hovořit o zkoušce v prostém (osovém) tahu, příčném tahu a o zkoušce tahu za ohybu. Pro definici UHPC jsou rozhodující zkoušky v osovém tahu a v tahu za ohybu, ze kterých lze stanovit materiálové charakteristiky pro návrh prvků z UHPC.

U prováděných zkoušek je zároveň důležité provádět zatěžování kontinuálním nárůstem síly, posunu příčniku nebo deformací, aby bylo možné získat celý pracovní diagram tahové zkoušky. V normě ČSN 731318 [107] je uveden převodní vztah, Rov 16, pro stanovení pevnosti v osovém tahu při zkoušce v tahu za ohybu v uspořádání čtyřbodové zkoušky.

$$f_{ct} = 0,65 \times f_{ct,f} \quad (\text{Rov 16})$$

Kde: f_{ct}pevnost v osovém tahu [MPa]

$f_{ct,f}$pevnost v tahu ohybem [MPa]

V doporučení fib Model Code [10] lze pevnost v tahu ohybem převést na pevnost v osovém tahu dle následujících rovnic Rov 17 a Rov 18, které jsou uvedeny v kapitole 5.1.5.1 dokumentu fib Model Code [10].

$$f_{tm} = A_{fl} \times f_{tm,fl} \quad (\text{Rov 17})$$

Kde: f_{tm}průměrná pevnost v osovém tahu [MPa]

A_{fl}součinitel převodu mezi pevnostmi [-]

$$A_{fl} = \frac{\alpha_{fl} \cdot h_b^{0,7}}{1 + \alpha_{fl} \cdot h_b^{0,7}} \quad (\text{Rov 18})$$

Kde: h_bvýška zkušebního tělesa (výška oslabeného průřezu) [mm]

α_{fl}převodní součinitel uvažovaný hodnotou 0,06 [-]

6.3.1 Zkouška pevnosti v tahu ohybem

Z hlediska normativních podkladů v České republice lze zkoušku pevnosti v tahu za ohybu provádět dle následujících předpisů:

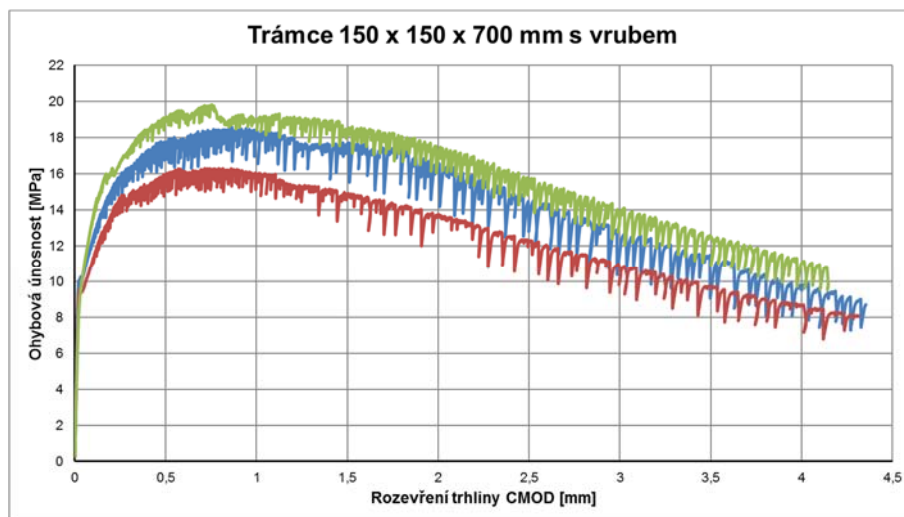
- ČSN EN 14651+A1 [94] uspořádáním zkoušky třibodového ohybu na trámcích rozměru 150 x 150 x 700 mm s vrubem, jehož hloubka je $h/6$. Vzdálenost podpor je 500 mm a během zkoušky se měří hodnota rozevření trhliny CMOD, případně průhyb.
- ČSN EN 14488-3 [95] uspořádáním zkoušky čtyřbodovým ohybem na trámcích 75 x 125 x 500 mm při rozponu 450 mm. Zkouška je řízena konstantní rychlostí posunu pístu hydraulického válce 0,25 mm/min a kromě síly je měřen i průhyb.
- ČSN 731318 [107] uspořádáním zkoušky čtyřbodovým ohybem na hranolech 150 x 150 x 600 mm případně na trámcích 100 x 100 x 400 mm nebo trámech rozměru 200 x 200 x 800 mm.
- ČSN EN 12390-5 [108] uspořádáním zkoušky čtyřbodovým i třibodovým ohybem na zkušebních tělesech splňující požadavky normy ČSN EN 12390-1 [97] bez vrubu, kterými jsou hranoly o průřezu 100 x 100 mm, dále 150 x 150 mm, 200 x 200 mm, 250 x 250 mm a 300 x 300 mm. Vzdálenost podpor je pro oba typy uspořádání $l = 3 \cdot d$.
- ČSN P 732452 [109] uspořádáním zkoušky čtyřbodovým ohybem na hranolech 150 x 150 x 700 mm se vzdáleností podpor 600 mm. Zkouška je řízena konstantní rychlostí posunu pístu hydraulického válce 0,2 mm/min a kromě síly je měřen i průhyb.
- ČSN EN 196-1 [101] uspořádáním zkoušky trojbodovým ohybem na trámečcích 40 x 40 x 160 mm.

Během zkoušek pevnosti v tahu za ohybu je v podmínkách České republiky dále využívána zkouška na trámcích 150 x 150 x 700 mm v uspořádání zkoušky trojbodovým ohybem na tělesech s vrubem, kdy vzdálenost podpor je 500 mm. Tento zkušební postup je popsán v dokumentu fib Model Code [10].

Výsledky zkoušek pevnosti tahu za ohybu jsou závislé na rozměru zkušebních těles a uspořádání zkoušky. Pevnosti zjištěné na trámečcích 40 x 40 x 160 mm jsou o 50 až 100 % vyšší oproti výsledkům na trámcích 150 x 150 x 700 mm. Tento vysoký rozdíl mezi výsledky zkoušek lze vysvětlit například pomocí stěnového efektu, viz kapitola 7.

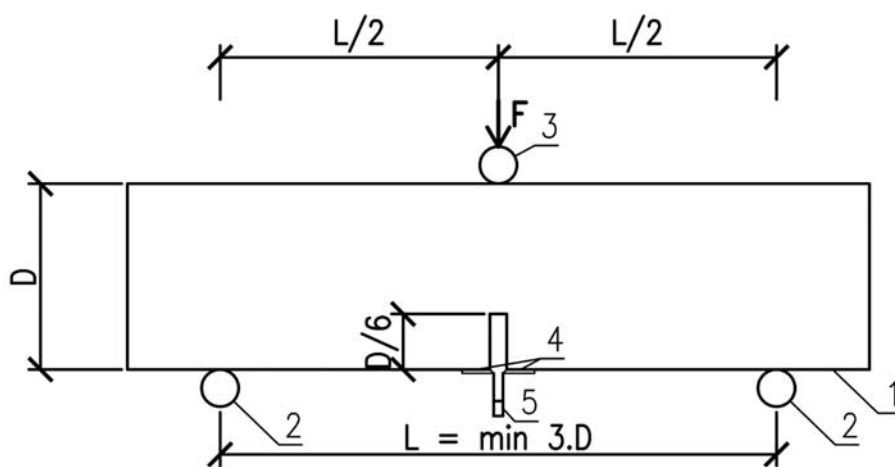
6.3.1.1 Zkouška trojbodovým ohybem na tělesech s vrubem

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu na tělesech s vrubem dle ČSN EN 14651 + A1 [94] prováděna na hranolech 150 x 150 x 700 mm. Uspořádání zkoušky odpovídá trojbodovému ohybu, kdy působící síla je ve středu rozpětí. Typický záznam závislosti působící síly na rozevření trhliny CMOD je na následujícím Obr. 45.



Obr. 45: Příklad záznamu zkoušky v uspořádání trojbodovým ohybem na trémčích 150 x 150 x 700 mm s vrubem hloubky 25 mm dle ČSN EN 14651+A1 [94]; data ze zdroje autora, Kloknerův ústav

Podstatou zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651+A1 [94] na tělesech s vrubem je popis chování materiálu, u kterého se mimo jiné posuzují hodnoty zbytkové pevnosti v tahu za ohybu pro dané hodnoty rozevření trhliny *CMOD*. Uspořádání zkoušky je patrné na následujících Obr. 46 a Obr. 47.



Obr. 46: Schéma uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651+A1 – převzato z [94]; D – výška průřezu; L – vzdálenost mezi podporami; F – působící síla; 1 – zkušební těleso; 2 – podpůrné válečky; 3 – zatěžovací váleček



Obr. 47: Fotografie provedené zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651+A1 [94], kromě měření rozevření trhliny sledován i průhyb ve středu rozpětí, zkouška provedena autorem ve spolupráci s pracovníky laboratoře Kloknerova ústavu, ČVUT v Praze

Zkouška dle ČSN EN 14651+A1 [94] je řízena konstantním nárůstem rozevření trhliny rychlostí 0,05 mm/min až do hodnoty rozevření trhliny $CMOD = 0,1$ mm. Po této hodnotě je rychlost zvýšena na hodnotu 0,2 mm/min. V případě, kdy je zkouška řízena konstantním zvyšováním průhybu, je nutno provést převod hodnot $CMOD$ na parametry průhybu dle Rov 19.

$$\delta = 0,85 \times CMOD + 0,04 \quad (\text{Rov 19})$$

Kde: δhodnota průhybu [mm]

$CMOD$hodnota rozevření trhliny měřená na spodním líci [mm]

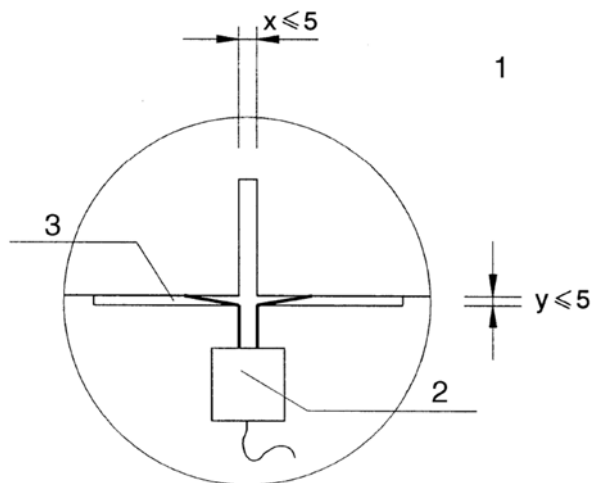
Vzhledem ke skutečnosti, že umístění snímače je posunuto maximálně o 5 mm pod spodní hranu prvku je nutno hodnotu $CMOD$ upravit dle vztahu Rov 20.

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{h}{h+y} \quad (\text{Rov 20})$$

Kde: $CMOD_y$hodnota rozevření trhliny měřená mimo spodní líc [mm]

hcelková výška prvku [mm]

yvzdálenost mezi spodním lícem a místem měření dle Obr. 48



Obr. 48: Detail umístění snímače CMOD při měření rozevření trhliny posunutého mimo spodní líc prvku; převzato z normy ČSN EN 14651+A1 – převzato z [94]

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu na tělesech s vrubem poskytuje kontroverznější výsledky z hlediska chování materiálu v konstrukci oproti zkoušce čtyřbodovým tahem za ohybu na tělesech bez vrubu, která je popsána v následující kapitole 6.3.1.2.

Při vyhodnocení zkoušky je stanovena mez úměrnosti dle Rov 21 a dále zbytkové pevnosti v tahu za ohybu dle Rov 22.

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (\text{Rov 21})$$

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (\text{Rov 22})$$

Kde: $f_{ct,L}^f$mez úměrnosti [N/mm²; MPa]

F_Lzatížení na mezi úměrnosti [N]

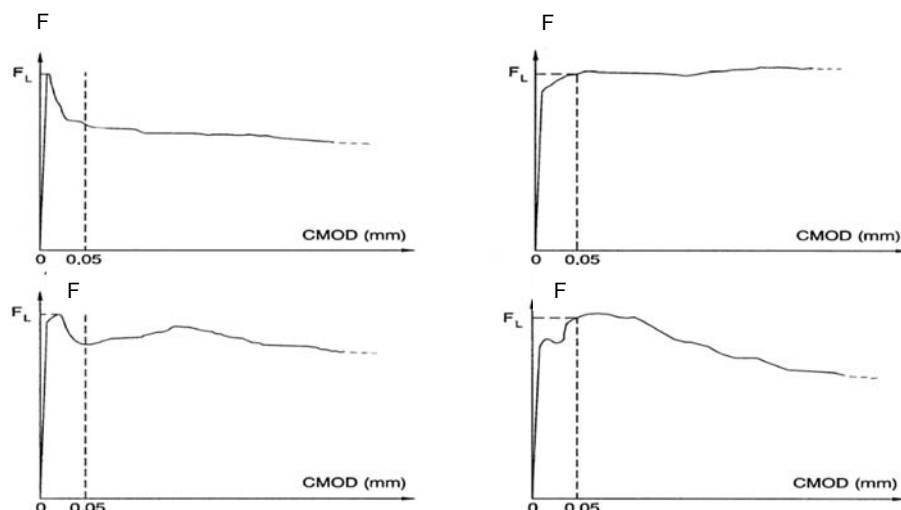
F_jzatížení odpovídající rozevření trhliny [N]

lvzdálenost podpor [mm]

bšířka zkušebního tělesa [mm]

h_{sp}výška oslabeného průřezu [mm]

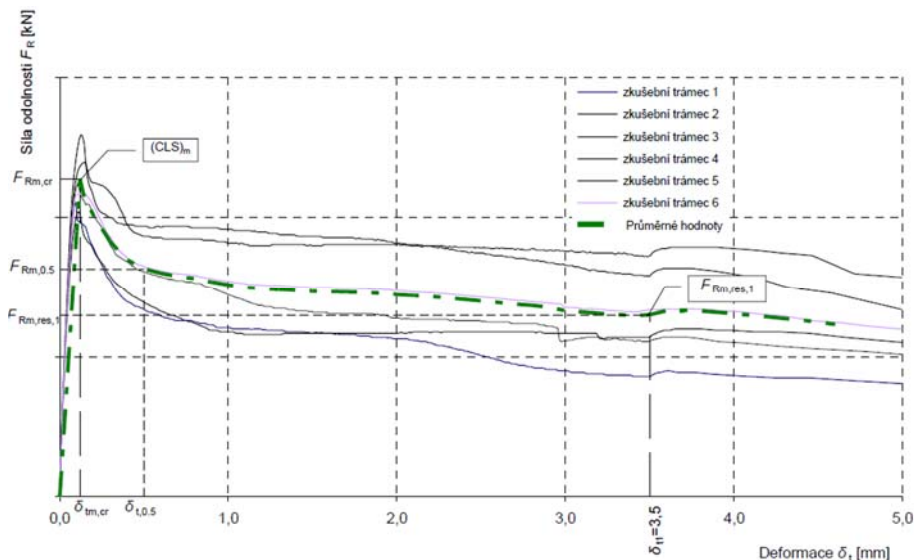
Hodnota zatížení na mezi úměrnosti se stanoví jako maximální velikost působící síly v intervalu rozevření trhliny CMOD 0 až 0,05 mm dle následujícího Obr. 49, který byl převzat z ČSN EN 14651+A1 [94].



Obr. 49: Vyhodnocení síly F_L na mezi únosnosti; mez únosnosti je stanovena jako maximální hodnota v intervalu CMOD od 0 do 0,05 mm; převzato z ČSN EN 14651+A1 – převzato z [94]

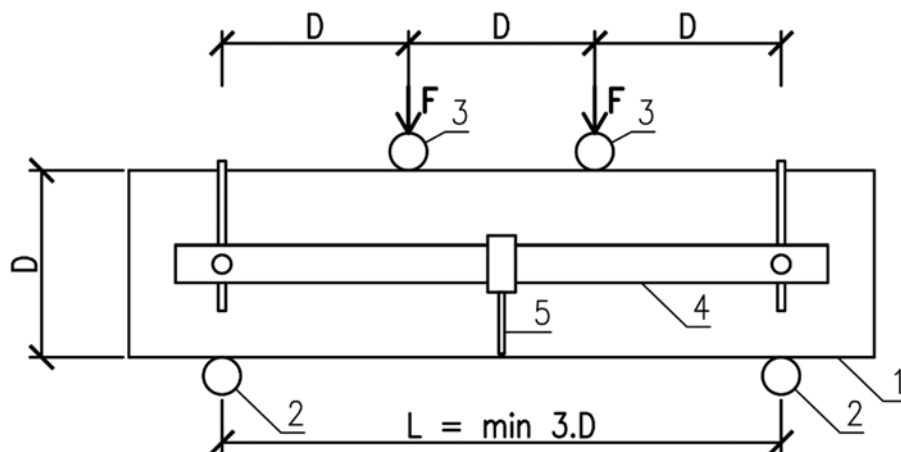
6.3.1.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem na tělesech bez vrubu

Zkoušku pevnosti v tahu za ohybu v uspořádání zkoušky čtyřbodového ohybu lze provádět na trámčích 150 x 150 x 700 mm dle ČSN P 732452 [109]. Na rozdíl od zkoušky na tělesech s vrubem nelze u ohybové zkoušky dle ČSN P 732452 [109] stanovit typický průběh závislosti zatížení na průhybu nosníku měřeného ve středu rozpětí. Záznam průměrných hodnot je na Obr. 50.



Obr. 50: Záznam zkoušky pevnosti v tahu za ohybu v uspořádání čtyřbodovým ohybem na trámčích 150 x 150 x 700 mm – převzato z [109]

Podstatou zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN P 732452 [109] na tělesech bez vrubu je popis chování materiálu, který blíže odpovídá chování materiálu v konstrukci. Uspořádání zkoušky je patrné na následujících Obr. 53 a Obr. 69.



Obr. 51: Uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN P 732452 – převzato z [109]; D – výška průřezu; L – vzdálenost mezi podporami; F – působící síla; 1 – zkušební těleso; 2 – podpůrné válečky; 3 – zatěžovací váleček; 4 – přípravek pro umístění snímače; 5 – potenciometrický snímač posunutí



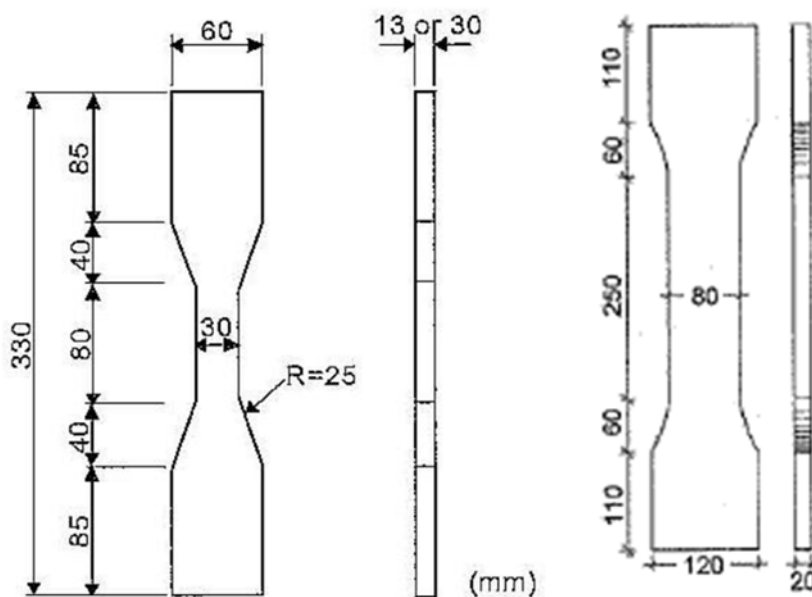
Obr. 52: Fotografie provedené zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN P 732452 [109], sledován průhyb ve středu rozpětí a posun válce, zkouška provedena autorem ve spolupráci s pracovníky laboratoře Kloknerova ústavu, ČVUT v Praze

6.3.2 Zkouška pevnosti osovým tahem

Provedení zkoušky v osovém tahu je z hlediska technického složité. Při osazení snímačů posunutí či extenzometrů lze získat celý pracovní diagram závislosti působící síly na poměrném přetvoření. V českých normách je zkouška osovým tahem popsána v ČSN 731318 [107] na hranolech průřezu 100 x 100 mm nebo na válcích o průměru 100 mm a délky minimálně 300 mm.

Při provedení zkoušky dle normy ČSN 731318 [107] vyvstává problém s uchycením zkušební vzorku do zatěžovacího stroje tak, aby došlo k porušení vzorku pouze osovým tahem nikoliv tahem za ohybem, který může vzniknout excentrickým osazením vzorku do zkušebního stroje. Při tahových zkouškách betonu jsou na dosedací plochy lepeny ocelové terče pomocí dvousložkového lepidla, jehož únosnost nedosahuje pevnosti UHPC v tahu. Pro použití tohoto postupu by bylo nutné provádět lepení epoxidovými lepidly, jejichž pevnost je vyšší než pevnost UHPC v osovém tahu.

V japonském doporučení JSCE [9] a v německém dokumentu Deutscher ausschuss für stahlbeton [8] je zkouška v tahu prováděna na tělesech, která svým tvarem korespondují s tělesy využívanými pro tahovou zkoušku oceli. Tvar zkušební tělesa je na následujícím Obr. 53.



Obr. 53: Tvar zkušební tělesa pro zkoušku v osovém tahu dle doporučení: JSCE [9] (vlevo) a Německé doporučení vpravo [8]

6.3.3 Zkouška pevnosti příčným tahem

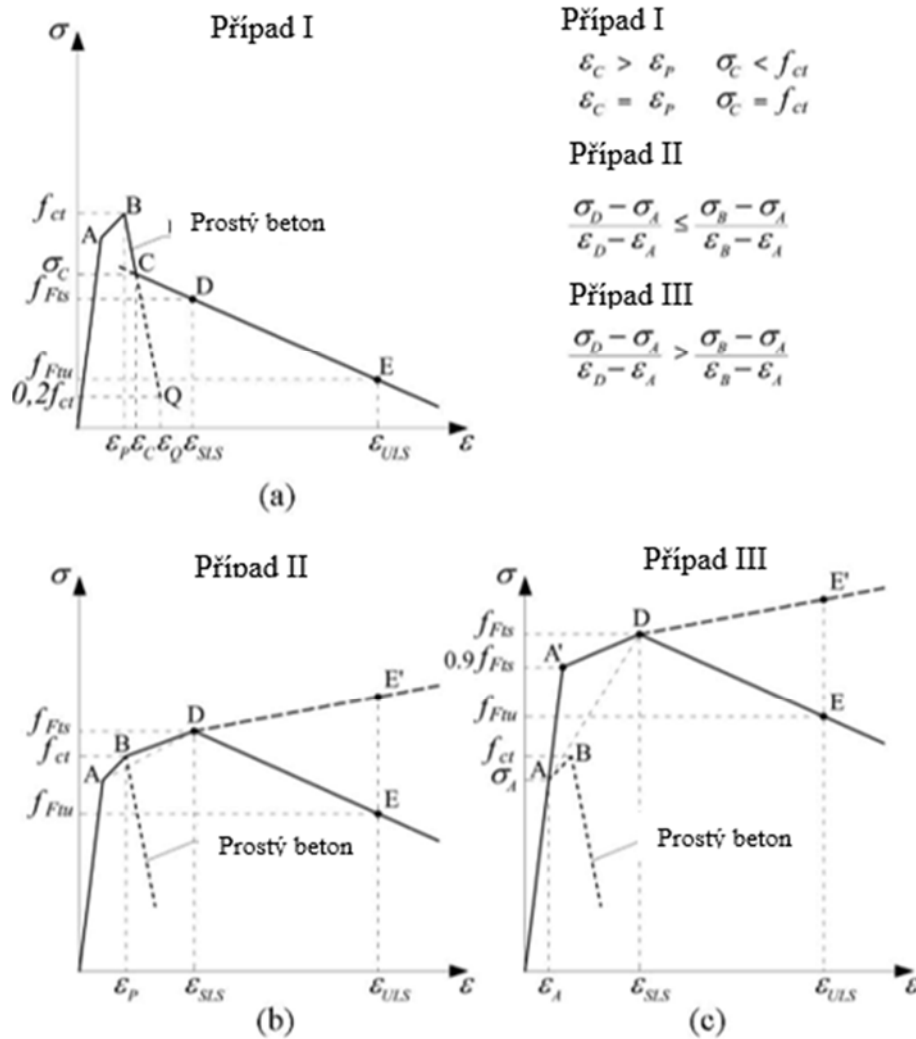
Zkouška pevnosti v příčném tahu je pro zkoušení UHPC zkouškou spíše okrajovou. V doporučení AFGC [7] nebo v německém doporučení [18] není tento typ zkoušky uveden. Uspořádání zkoušky v příčném tahu lze nalézt v normě ČSN 731318 [107], kde je jako referenční těleso použito krychle o hraně 150 mm a dále v evropské normě ČSN EN 12390-6 [110], kde je jako zkušební těleso uveden válec průměru 150 mm a délky 300 mm. Obecně lze zkoušku pevnosti příčným tahem provádět na libovolných prismatických či válcových tělesech.

6.3.4 Tahové chování UHPC

Chování UHPC v tahu je u jemnozrnných cementem pojených kompozitních materiálů v pružné oblasti obdobné, jako u betonů běžných pevnostních tříd. Závislost napětí na poměrném přetvoření je lineární do vyčerpání tahové pevnosti matrice, která není vyztužena disperzní výztuží. U matrice nevyztužené disperzní výztuží dochází stejně jako u prostého betonu ke kolapsu prvku vlivem vyčerpání tahové únosnosti matrice a vzniku první trhliny. Pro přenos tahových napětí vznikajících v běžném betonu je průřez vyztužován konvenční výztuží přenášející působící tahové namáhání. U jemnozrnných cementem pojených kompozitních materiálů je tahové napětí přenášeno všesměrně orientovanou disperzní výztuží – vlákny. Pro zajištění duktilního chování po vzniku trhliny jsou nejčastěji využívány kovové drátky. Při vhodném tvaru, materiálu a množství vláken je UHPC schopno přenášet působící zatížení i po vzniku trhliny. Charakter porušení soudržnosti vláken s matricí, případně porušení vláken, závisí na mechanických vlastnostech matrice, tvaru a typu vláken.

Skleněná vlákna nejsou pro zajištění duktilního chování vhodná, jelikož mají vysokou soudržnost s cementovou matricí a při působícím tahovém namáhání dochází k jejich křehkému porušení. Při použití polymerních PP nebo PVA vláken dochází k postupnému přetrhávání vláken. Průřez vyztužený polymerními vlákny již není schopen přenášet tahová napětí. Jedinými vlákny schopnými přenášet působící tahové napětí jsou ocelové drátky. S postupným rozevíráním trhliny dochází k aktivaci jednotlivých vláken a jejich vytahávání z matrice.

Z výše uvedených informací vyplývá, že chování materiálu po vzniku trhliny je závislé nejen na vlastnostech matrice, ale především na vlastnostech vláken, jejich typu a tvaru. V případě, kdy není matrice dostatečně vyztužena disperzní výztuží, dochází ke vzniku jedné makrotrhliny a porušení konstrukčního prvku. Toto chování je podobné jako u běžných vláknobetonů. V případě vyztužení cementové matrice větším množstvím disperzních vláken, zejména PVA vláken, může v tahu docházet ke vzniku většího množství mikrotrhlin, které je v publikacích označováno pojmem „*multile-cracking*“. Takový prvek není schopen již přenášet další zatížení a narůstá u něj deformace. Toto chování lze popsat jako „*pseudo strain hardening*“ [14]. Sestupná větev pracovního diagramu pak odpovídá tahovému změkčení „*strain softening*“. V případě vyztužení matrice drátky lze po vzniku trhliny pozorovat u prvků z UHPC tahové zpevnění různé úrovně [7]. Příklady chování matrice po vzniku trhliny jsou uvedeny na následujícím Obr. 54.



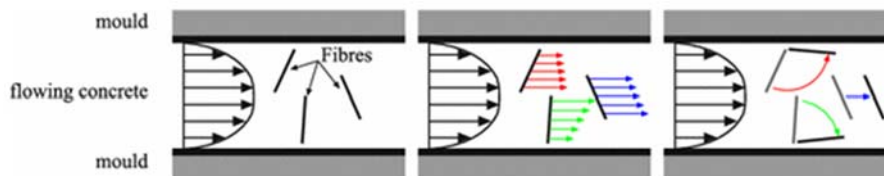
- εpoměrné přetvoření materiálu pro různé úrovně napětí
- σ_{A-D}napětí na mezi definované pracovním diagramem
- $\sigma_A (\sigma_{A'})$napětí na mezi pružnosti
- σ_Bnapětí na mezi vzniku trhliny – tahová pevnost matrice; dochází k aktivaci vláken
- σ_cnapětí při aktivaci vláken při tahovém změkčení
- $\sigma_D (\sigma_{E'})$napětí na mezi pevnosti
- f_{ct}napětí na mezi vzniku trhliny matrice
- Případ I.....tahové změkčení
- Případ II a III...tahové zpevnění

Obr. 54: Případ tahového chování cementem pojeného kompozitního materiálu vyztuženého disperzní výztuží dle fib Model Code [10]– převzato z [11]

7 VLIV DISTRIBUCE VLÁKEN NA CHOVÁNÍ A SLOŽENÍ UHPC

Chování UHPC v čerstvém stavu i v ztvrdlém stavu je závislé nejen na jednotlivém složení směsi, ale také na použité rozptýlené výztuži a technologickém způsobu výroby prvků z UHPC. Z hlediska technologie výroby je snaha omezit hutnění prvků vibrací, aby nedocházelo k sednutí a shlukování vláken v určité oblasti. Nejen kovové drátky, ale i polymerní a skleněná vlákna ovlivňují reologii a zpracovatelnost čerstvé směsi. Nehomogenita distribuce vláken a jejich případné shlukování se v určitých oblastech vede k dalším problémům při výrobě konstrukčních prvků. Mezi tyto problémy lze zařadit oblasti s minimálním (nebo dokonce žádným) obsahem disperzní výztuže, což vede ke vzniku dalších mechanismů a poruch, které ve finále vedou k ovlivnění únosnosti celého prvku. Kromě tahové vlastnosti je ovlivněn také vznik trhlin a deformace prvku.

Orientace vláken ve viskózní fázi odpovídá směru tečení čerstvé směsi, který je ovlivněn oblastí podél bedně (formy), kde jsou vlákna rovnoběžně orientována se stranami bedně (formy) [111]. Orientace vláken podél stran bedně je zobrazena na následujícím Obr. 55. Z obrázku je patrné, že oblast, ve které dochází k stěnovému efektu je rovna délce drátků.



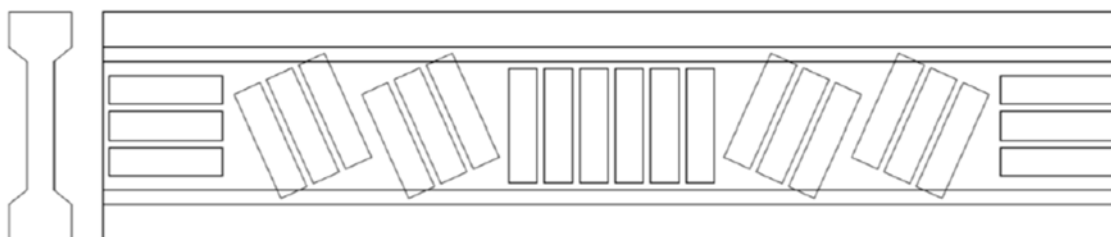
Obr. 55: Schéma orientace vláken podél bedně, které vlivem toku čerstvé směsi mění svoji orientaci; převzato z [112]

Mocnost této oblasti je rovna délce použitých vláken. Rovnoběžná orientace vláken se stranami bedně je nazýván stěnovým efektem. Při vhodně zvoleném způsobu lití směsi do formy respektující finální polohu a zatížení prvku je možno částečně ovlivnit tok drátků tak, aby jejich poloha a orientace korelovala se směry hlavních napětí. Toto uspořádání by dále mohlo ušetřit náklady na výrobu a dopravu prvků, spolu s optimalizací transportního procesu a procesu ukládání prvku. Díky vhodnému návrhu složení směsi, rozměru prvku, technologie výroby, dopravy a ukládání prvků z UHPC lze využít celý potenciál tohoto jemnozrnného cementem pojeného kompozitního materiálu a tím uspořit i finanční náklady a snížit energetickou náročnost celého procesu.

Vliv rozptýlení a orientace disperzní výztuže v objemu prvku je jednou z problematik, kterou nelze při návrhu prvků z tohoto materiálu zanedbat. Z tohoto důvodu je potřeba porozumět vztahům mezi návrhem směsi a vlastnostem čerstvé směsi na jedné straně a distribucí vláken na straně druhé. Vliv distribuce vláken ve ztvrdlém stavu na výsledné vlastnosti je značný a je nutné stanovit vhodnou metodu pro její kontrolu při vývoji receptury a prvků, aby bylo pro danou recepturu možné predikovat její vlastnosti po přidání daného množství rozptýlené výztuže.

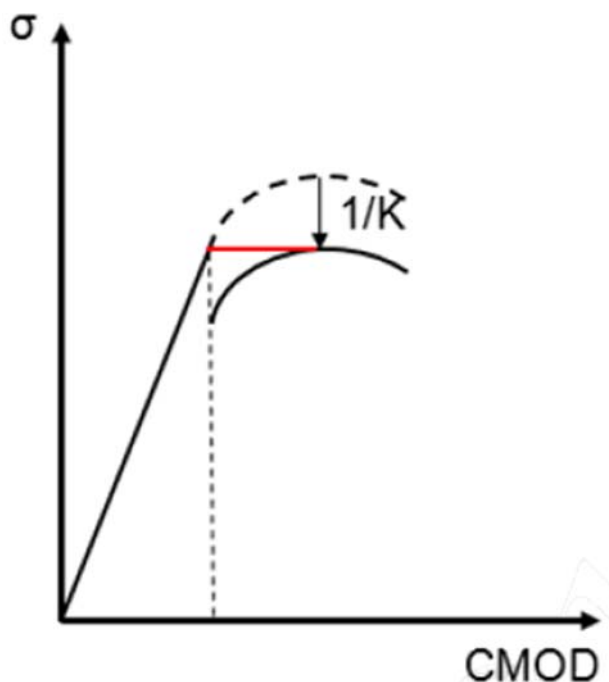
Homogenita distribuce vláken v objemu prvku, včetně orientace vláken ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti ztvrdlého UHPC, kterými jsou pevnost v tlaku, modul pružnosti a především pevnost v tahu a reziduální pevnost v tahu. Ovlivnění výsledků mechanických vlastností může být jak příznivé [113], tak i nepříznivé [34]. Vliv homogenity distribuce drátků má u masivnějších průřezů menší vliv, než u průřezů subtilnějších. V rámci vývoje prvků z UHPC je jedním způsobem řešení distribuce vláken použití funkčně vrstvených materiálů tak, aby vlákna byla v tahové oblasti. Takovýmto způsobem je možné ovlivnit cenu výroby prvků, jelikož vlákna, jakožto nejdražší komponenta, jsou maximálně využita. Vzhledem k cenové náročnosti a ovlivnění výsledků mechanických zkoušek je vliv homogenity distribuce vláken jedním z technologických aspektů, který je nutné při návrhu receptury a prvku z UHPC zohlednit.

Vliv distribuce vláken v průřezu na výsledné mechanické vlastnosti je zásadní a je nutné jej řešit již v rámci vývoje a návrhu konstrukčního prvku. Ve francouzském doporučení AFGC je tento vliv popisován hodnotou K-faktoru, který je nutno stanovit z řady ohybových testů na zkušebních tělesech, která jsou vyřezána z různých částí prvku a v různém směru. Návrh rozložení zkušebních těles je na následujícím Obr. 56.



Obr. 56: Příklad těles vyřezaných z nosníku pro určení K-faktoru v různé orientaci – převzato z [10]

Pro stanovení návrhové hodnoty pevnosti v tahu a duktilního chování je rozhodující nejnížší celková hodnota K-faktoru. Hodnota lokálního faktoru K_{local} reprezentuje oblasti s požadující dobrou distribucí vláken, jako jsou oblasti tažené části průřezu nebo kotevní oblasti předpínací výztuže, kde dochází k vysoké koncentraci napětí. Hodnota K_{global} postihuje zbývající část konstrukce v oblastech neovlivněných lokálním porušením, jako jsou oblasti smykového a ohybového napětí u deskových a skořepinových prvků. Pro každou zkoumanou oblast je vhodné provést minimálně 3 zkoušky. Hodnota K -faktoru je dále zavedena do výpočtu po redukci hodnot reziduálních tahových napětí, dle následujícího Obr. 57.



Obr. 57: Ilustrace zavedení a významu hodnoty K -faktoru na výslednou pevnost v tahu dle doporučení AFGC [7]; hodnotou K -faktoru upravena tahová pevnost po dosažení meze úměrnosti

Obecně lze hodnotu K -faktoru stanovit jako podíl maximálně dosaženého ohybového momentu k nejvyšší hodnotě z minimálních hodnot ohybového momentu dle následující rovnice Rov 23, která je převzata z dokumentu fib Model Code [10].

$$K = \frac{M_{max}}{\max(M_{min})} \quad (\text{Rov 23})$$

Kde: M_{max} maximálně dosažený ohybový moment
 M_{min} minimální hodnota ohybového momentu

7.1 NÁVRH SLOŽENÍ RECEPTURY UHPC

Návrh složení směsi UHPC je založen na koncepci vytvoření hutné struktury, která bude v ztvrdlém stavu splňovat mechanicko-fyzikální parametry. Výsledné chování a vlastnosti lze ovlivnit výběrem vhodných a dostupných surovin a dále volbou vhodného typu a množství rozptýlené výztuže. Pro zajištění duktilního chování po vzniku trhliny to jsou především vlákna kovová. Výsledná směs musí splňovat požadavky na stabilitu vůči segregaci vláken tak, aby výsledný produkt vyhovoval finálním požadavkům.

Složení směsi vychází z požadavků na plnivo a na pojivo. Hrubá frakce plniva je u UHPC kompozitů tvořena především pískem s maximálním zrnem do 4 mm, které musí splňovat požadavky uvedené v kapitole 4.2. Jemnou frakci plniva tvoří příměsi typu I a příměsi typu II, na které jsou kladeny požadavky uvedené v kapitole 4.3. Pojivová složka UHPC je primárně tvořena cementem, který musí splňovat podmínky uvedené v kapitole 4.1, sekundárně je využíváno latentní hydraulicity mikrosiliky, elektrárenského popílku a mleté vysokopecní strusky. Zajištění duktilního chování je pak

dosaženo použitím kovových vláken dle kapitoly 4.6. Pro vytvoření zpracovatelné pasty je dávkováno malé množství vody, splňující požadavky uvedené v kapitole 4.5, a dále je dávkován plastifikátor splňující požadavky dle kapitoly 4.4.1.

Procentuální podíl jednotlivých složek směsi je volen tak, aby byla čerstvá směs dobře zpracovatelná. Zpracovatelnost čerstvé směsi je dána plasticitou a viskozitou směsi. Čerstvá směs musí být nejen dobře zpracovatelná, ale také odolná vůči segregaci tuhých částic, kterými jsou hrubá zrna kameniva a kovové drátky. K segregaci dochází nejen technologickými vlivy, ale také vlivem gravitace. Z tohoto důvodu je nutné k návrhu složení směsi přistupovat jako k závislosti reologie čerstvé směsi na distribuci velikosti zrn jednotlivých komponentů (maximální velikost zrna kameniva, obsah vzduchu, apod.) a hustotě ztvrdlého UHPC. Typ použitého plastifikátoru je nutno volit s ohledem na plasticitu směsi a podíl hrubých a jemných složek tak, aby nedošlo k odměšování jemných částic.

Při vyztužení pevné, ale zároveň křehké matrice, kovovými vlákny je nutno provést další optimalizaci směsi s ohledem na použitý typ a dávku vláken. Ve francouzském doporučení AFGC [7] je doporučená dávka vláken v rozmezí $V_f = 1 - 3 \%$.

V publikaci „*Packing of ternary mixtures of non-spherical particles*“ [114] je proveden návrh ekvivalentního průměru těles, která se nepodobají kouli tak, aby bylo možné s těmito složkami pracovat i v rámci optimalizace směsi z hlediska obsahu vzduchových pórů a skladby jednotlivých položek. Tvar a velikost nesférických těles lze převést na fiktivní kulová tělesa daného průměru tak, aby tato fiktivní část nezvyšovala hustotu směsi obsahující další částice kulovitého tvaru (cement, mikrosilika, popílek, jemné kamenivo, mletý křemen apod.). Pro válcová tělesa, kterými jsou i drátky, lze stanovit průměr ekvivalentního kulového tělesa d_p dle rovnic, které jsou uvedeny v [114]:

$$d_p = \left(3,1781 - 3,6821 \cdot \frac{1}{\psi} + 1,5040 \cdot \frac{1}{\psi^2} \right) \cdot d_v \quad (\text{Rov 24})$$

$$d_v = 1,145 \cdot \left(\frac{L_f}{d_f} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_f \quad (\text{Rov 25})$$

$$\psi = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 = 2,621 \cdot \frac{(L_f/d_f)^{2/3}}{1+2 \cdot (L_f/d_f)} \quad (\text{Rov 26})$$

Kde: d_pekvivalentní průměr kulovité částice pro drátky

ψpoměr plochy kulovité částice s ekvivalentním objemem k ploše válcovitého tělesa – drátku; vychází se z předpokladu, že objem ekvivalentní kulovité částice je shodný s objemem drátku

d_vprůměr kulovité částice, která má stejný objem jako drátek

L_fdélka drátku

d_fprůměr drátku

d_sprůměr kulovité částice, jejíž plocha je shodná s plochou drátku

Další publikací, ve které lze najít informace ohledně vlivu drátků na kompozici směsi vyztužené štíhlými drátky, je kniha „*Concrete mixture proportioning: A scientific approach*“ [115], ve které de Larrard popisuje koncepci „oblasti porušení“ ve svém modelu pro stanovení kompozice dávkování jednotlivých směsí. Koncepci tuhých vláken přirovnává ke koncepci vyplnění prostoru zrny kameniva a stěnovému efektu ovlivňující uspořádání zrn. U štíhlých drátků je oblast, ve které dochází k perturbaci, menší, ale její intenzita je vyšší. Model vychází z předpokladu existence univerzálního koeficientu k_f jakožto poměru velikosti oblasti v závislosti na velikosti částic. Oblast perturbace je zobrazena na Obr. 58. Dalším předpokladem, který de Larrard uvažuje je délka vláken, která je menší než zrno kameniva, což v koncepci UHPC neplatí, nicméně dále stanovuje, že celková délka vlákna nemůže narušit kompaktnost směsi. Dalším předpokladem, který de Larrard stanovuje je výpočet délky podílející se na objemu perturbace dle Rov 27.

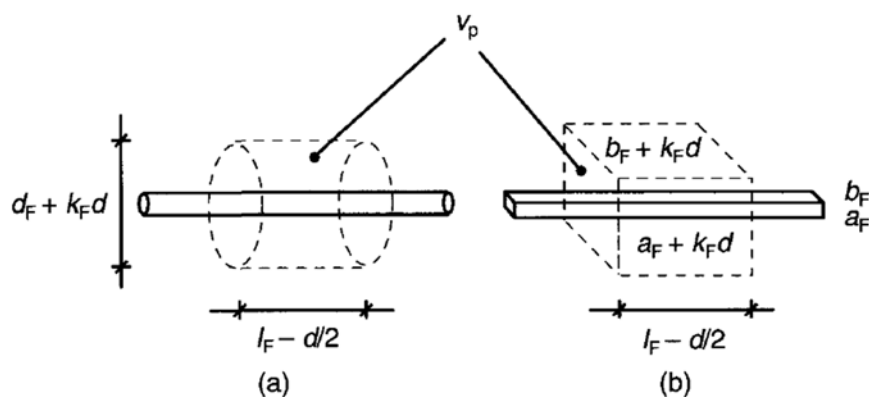
$$l_f - \frac{d}{2} \geq 0 \quad (\text{Rov 27})$$

Kde: l_fdélka vláken
 dprůměr vlákna

Hustotu směsi vyztužené vlákny lze popsat následující Rov 28.

$$\bar{\alpha} = (1 - \phi_f - N_f \cdot v_p) \cdot \alpha \quad (\text{Rov 28})$$

Kde: Φ_fobjemové množství vláken
 N_fpočet vláken na jednotku objemu
 v_pobjem perturbace [%]
 αhustota nevyztužené matrice



Obr. 58: Narušený objem („*perturbed volume V_p* “) pro vlákna kruhového tvaru (a) a vlákna obdélníhového tvaru (b) dle de Larrarda ($k_f = 0,065$) – převzato z [115]

Ferrara ve své publikaci „*A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete*“ [116] převádí rozměr drátků na ekvivalentní částici, se kterou je dále

uvažováno při sestavování optimální křivky zrnitosti. Velikost ekvivalentní částice je stanovena dle následující rovnice Rov 29:

$$d_{eq\ fiber} = \frac{3 \cdot L_f}{1 + 2 \cdot \frac{L_f}{d_f}} \cdot \frac{\gamma_{fiber}}{\gamma_{aggregate}} \quad (\text{Rov 29})$$

Kde: L_fdélka vláken [mm]

D_fprůměr vláken [mm]

γ_{fiber}měrná hmotnost vláken [kg/m³]

$\gamma_{aggregate}$měrná hmotnost kameniva [kg/m³] – pro různé typy kameniva uvažována průměrná hodnota

Přepočet drátků na zrno kameniva je dle Ferrery [116] důležitý pro stanovení optimálního smykového napětí a viskozity cementového tmelu, tak aby byla dosažena požadovaná konzistence. Konzistenci Ferrera popisuje jako závislost rozlití a hustoty tmelu, případně hustoty tmelu s plnivem. Tento koncept zohledňuje prostřednictvím průměrné vzdálenosti mezi zrny plniva d_{ss} , kterou lze vyjádřit rovnicí Rov 30. Graficky je vzdálenost d_{ss} zobrazena na Obr. 59

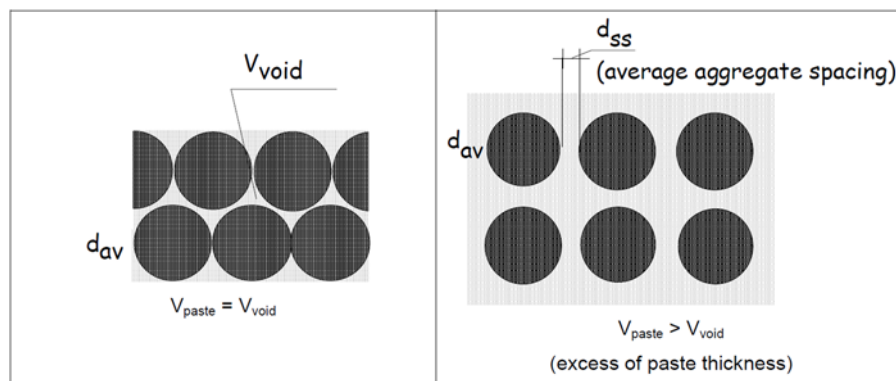
$$d_{ss} = d_{av} \left[\sqrt[3]{1 + \frac{V_{paste} - V_{void}}{1 - V_{paste}}} \right] \quad (\text{Rov 30})$$

30)

Kde: d_{av}průměrná velikost částic dle Rov 31 [mm]

$$d_{av} = \frac{\sum_i d_i \cdot m_i + d_{eq\ fibers} \cdot m_{fibers}}{\sum_i m_i + m_{fibers}} \quad (\text{Rov 31})$$

Kde: \sumsuma zrnitosti jednotlivých komponent dle jejich distribuce částic



Obr. 59: Průměrné vyplnění prostoru směsí, na levém obrázku vyplňuje tmel volný prostor, na obrázku vpravo je pro vyplnění stejného prostoru potřeba většího množství tmelu – převzato z [117 s. 13]

7.2 METODY KONTROLY HOMOGENITY DISTRIBUCE DISPERZNÍ VÝZTUŽE

Kontrola homogenity distribuce vláken může být prováděna jak u čerstvé směsi, tak u ztvrdlého UHPC pomocí série destruktivních a nedestruktivních metod. Typ provedených zkoušek závisí na době od přidání vody do směsi a na způsobu, jakým je metoda prováděna. V následujících kapitolách 7.2.1 a 7.2.2 jsou jednotlivé metody popsány.

7.2.1 Kontrola distribuce vláken v čerstvém UHPC

Stanovení distribuce vláken po výšce průřezu v čerstvé směsi UHPC je problematické. U čerstvé směsi lze provést vizuální kontrolu shlukování drátků při zkouškách konzistence, viz kapitola 5.1, a dále využít některé z metod, které jsou popsány v kapitolách 7.2.1.1 až 7.2.1.4.

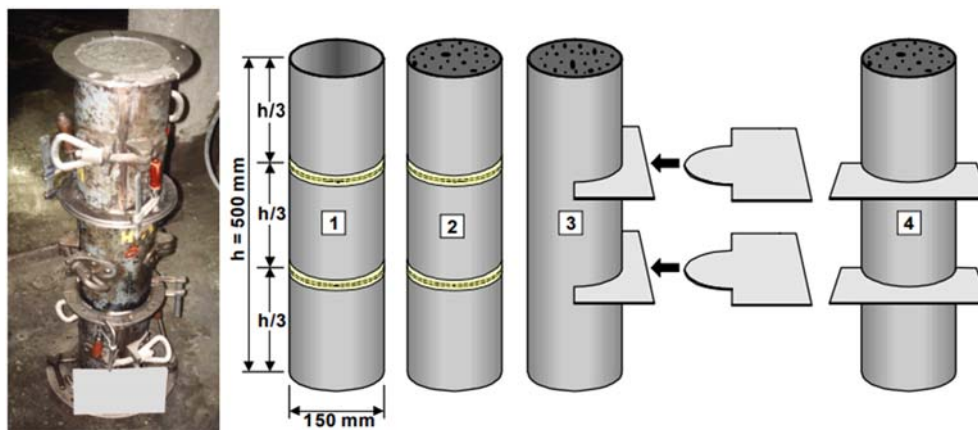
7.2.1.1 Metoda odplavování jemných částic dle ČSN EN 14488-7

Mezi další metody kontroly distribuce rozptýlené výztuže u čerstvého betonu lze využít postup odplavování jemných částic a prosévání přes síta s následným oddělením pomocí magnetu. Tento postup, kromě oddělení magnetem, je uveden i v normě ČSN EN 14488-7 [96].

Principem zkoušky odplavování jemných částic je odstranění cementu a kameniva proudem vody přes vzorek umístěný na síte s následným oddělením a zvážením separovaných drátků. Tento postup je poměrně zdlouhavý a proto není tak často využíván ani u běžných betonů s drátky, což ve finále vede k problémům průmyslových podlah s nižším obsahem vláken, než které stanovuje projekt. Této problematice se podrobněji věnuji v článku [118].

7.2.1.2 Metoda odplavování jemných částic dle DIN 1045

V německém předpisu DIN 1045 [8] pro samozhutnitelný beton je uvedena možnost sledování segregace kameniva v trojdílné formě, která je plněna v celém objemu a následně je rozdělena na tři stejné části, viz Obr. 60. Každá část je následně zvážena a daná směs je promyta přes síto [119]. Tento princip by se v kombinaci s metodou uvedenou v kapitole 7.2.1.1 dal po úpravě použít i pro receptury UHPC. Upraven by musel být zejména tvar zkušební formy, jelikož vymývání cca 3 litrů čerstvé směsi z každé části by bylo časově náročné, což by negativně ovlivnilo vymývání poslední vrstvy.



Obr. 60: Trojdílnná forma pro zkoušku segregace kameniva dle DIN (vlevo) a postup zkoušky (vpravo) [8]

7.2.1.3 Magnetická metoda

Další obdobnou metodou je využití přístroje dosometer [120], který pracuje na principu magnetu a je zachycen na Obr. 61. Do nálevky opatřené permanentním magnetem se nalije minimálně 10 litrů čerstvé směsi. Drátky se následně zachytí na styku s magnetem a zbylá směs protéká do nádoby pod nálevkou. Následně je magnet odklopen a vlákna se zachytí do připravené nádoby. Po jejich opláchnutí se vlákna propláchnou vodou, osuší a zváží. Dle Rov 32 se stanoví množství drátků v daném objemu čerstvé směsi. Tímto způsobem lze zkoušku opakovat a získat tak obraz o rovnoměrnosti, či nerovnoměrnosti, distribuce drátků v čerstvé směsi po jejím zamíchání.

$$C_f = \frac{m_f \cdot 10^3}{V_d} \quad (\text{Rov 32})$$

Kde: C_fmnožství disperzní výztuže v čerstvé směsi [kg/m^3]

m_fmnožství drátků zachycených magnetem [g]

V_dobjem vzorku betonu [m^3]



Obr. 61: Pohled na dosometer, který pracuje na principu magnetu – fotografie vložena z interních zdrojů KÚ

7.2.1.4 Zkoušky konzistence UHPC

Kontrolu distribuce vláken v čerstvém stavu lze provádět také v rámci zkoušek konzistence popsaných v kapitole 5.1. Během zkoušek lze provádět vizuální kontrolu zejména shlukování drátků do útvarů, které svým tvarem připomínají ježky. Během zkoušek konzistence čerstvé směsi pomocí L-truhlíku dle ČSN EN 12350-10 [82], nebo pomocí J-kroužku dle ČSN EN 12350-12 [83], lze vizuálně hodnotit i schopnost matrice vyztužené disperzní výztuží protékat kolem překážek nebo úzkými mezerami. Na základě výsledků měření konzistence lze upravit složení směsi a dávkování jednotlivých složek. Operativnost zkoušky konzistence sednutí rozlitím dovoluje provádět zásahy do složení směsi zejména s ohledem na dávku vody a plastifikační přísady. Vliv přidání vody a plastifikační přísady na distribuci vláken je ilustrativně zobrazen na následujících obrázcích Obr. 62 a Obr. 63.



Obr. 62: Vliv přidání vody na distribuci vláken po výšce průřezu; a: původní receptura; b: +10 kg/m³; c: +20 kg/m³; d: +25 kg/m³; e: +30 kg/m³ – použito z archivu autora



Obr. 63: Vliv zvýšené dávky plastifikátoru na distribuci vláken po výšce průřezu; a: původní receptura; b: +2 kg/m³; c: +4 kg/m³; d: +6 kg/m³; e: +8 kg/m³ – použito z archivu autora

Z uvedených obrázků jednoznačně vyplývá negativní vliv přidání vody na distribuci vláken po výšce průřezu. Vliv segregace je pozorovatelný již od zvýšení dávky vody o 10 kg/m³ (zvýšení dávky vody o cca 6%). Vyšší dávkování plastifikátoru nemá zásadní vliv na distribuci vláken.

7.2.2 Kontrola homogenity distribuce výztuže u ztvrdlého UHPC

U ztvrdlého kompozitu lze provádět kontrolu homogenity distribuce vláken nejen pomocí destruktivních zkoušek, ale také pomocí zkoušek nedestruktivních. Množství použitelných zkoušek je u ztvrdlého UHPC širší než u čerstvého UHPC. Destruktivní zkoušky doporučuji provádět vždy se zkouškami nedestruktivními pro verifikaci nedestruktivních metod. V případě vývoje prvku z UHPC doporučuji provést zkušební model, na kterém se provedou experimentální testy spolu s testy na vyrobených zkušebních tělesech.

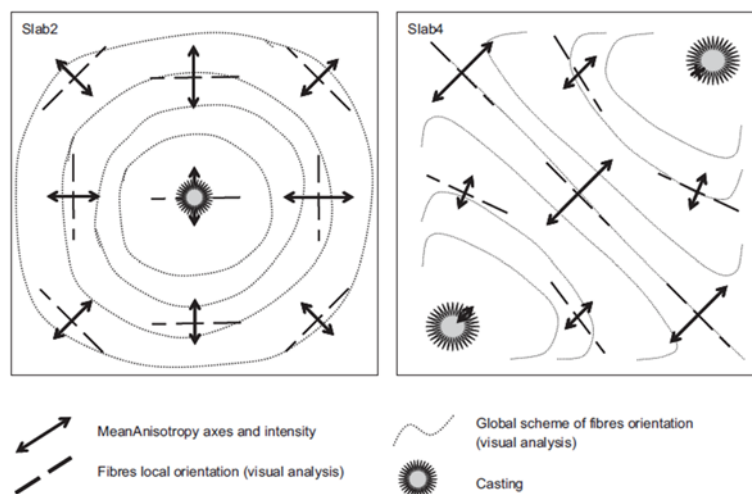
7.2.2.1 Kontrola distribuce vláken dle ČSN EN 14488-7

Norma ČSN EN 14488-7 [96] popisuje nejen možnosti stanovení množství vláken v čerstvé směsi, ale také u ztvrdlého betonu. Tato metoda je účinná pro zkoušku běžných vláknobetonů a drátkobetonů, jelikož předpokládá provedení vývrtu Ø50 až 100 mm a délky 75 až 150 mm. U tloušťek prvku nižších než 75 mm by měl být poměr délky k průměru 1:1. Díky potenciálu vyrábět z UHPC velmi subtilní konstrukce je nutno z konstrukce odebrat taková tělesa, aby jejich minimální objem byl alespoň $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Odběr vzorku betonu by měl probíhat dle ČSN EN 14488-1 [121] nebo dle ČSN EN 12504-1 [99].

Odebraný vzorek ztvrdlého UHPC se nejprve změří a zváží, aby bylo možné stanovit jeho objem před drcením. V případě, kdy má odebraný vzorek nepravidelný tvar je nutno provést stanovení objemu dle ČSN EN 12390-7 [122]. Následně je možné vzorek podrtit ve zkušebním lisu a dále ručně dodrtit, aby bylo možno ze vzniklého prachovitého vzorku pomocí magnetu separovat kovová vlákna. Následný postup stanovení množství vláken je shodný jako u metody pro čerstvý beton, která je popsána v kap. 7.2.1.1.

7.2.2.2 Elektrické odporové metody

Stanovení polohy a orientace vláken pomocí měření elektrického odporu popisuje například J. F. Lataste ve svém článku „*Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements*“ [123], kdy provedl měření orientace vláken u dvou deskových prvků, kdy jedna deska byla plněna do středu formy a druhá deska byla plněna ze dvou protilehlých rohů. Použitou maticí byl jemnozrný Ductal® s $V_f = 2\%$ ocelových drátků. Použitá metoda měření elektrického odporu je závislá nejen na množství a typu použitých drátků, ale také na množství elektrolytu v uzavřených pórech ve struktuře UHPC. Získané výsledky z tohoto měření jsou shrnuty na následujícím Obr. 64, na kterém je zachycen vliv ukládání směsi na výslednou orientaci vláken.

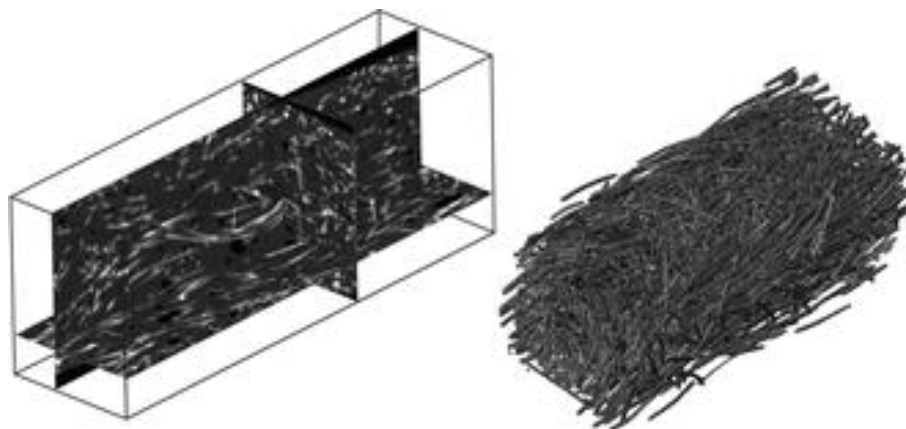


Obr. 64: Výsledky měření polohy a orientace vláken u desek s rozdílným způsobem plnění formy; na levém obrázku plnění ze středu, na pravém obrázku plnění ze dvou protilehlých rohů – převzato z [123]

Z výše uvedeného obrázku je patrný vliv orientace vláken s ohledem na způsob plnění formy rozměru 60 x 60 x 3 cm. Nevýhodou této metody je její nižší vypovídající hodnota z hlediska kvantitativního množství vláken v dané oblasti. Výsledky získané touto metodou jsou optimální pro stanovení orientace vláken v elementu. Z uvedených výsledků, porovnaných s vizuálním hodnocením, je zřejmé, že vlákna jsou orientována jako tečny ke směru rozlití směsi. Jako další nevýhodu této metody bych uvedl nutnost kalibrace měření pro každou směs, dávku a typ vláken.

7.2.2.3 Výpočetní tomografie

Další možností zobrazení polohy, orientace a distribuce vláken v prvku je využití výpočetní tomografie, která bývá někdy označována jako počítačová tomografie vycházející z anglického názvu „*Computer tomography*“. Výpočetní tomografie, známa též pod zkratkami CT nebo X-Ray CT, využívá rentgenové záření umožňující zobrazení polohy a distribuci vláken v prvku ve 3D, viz následující Obr. 65.



Obr. 65: Výsledky výpočetní tomografie na trámci rozměru 70 x 70 x 280 mm vyřezaného z formy tvaru U – obrázky převzaty z [112]

Díky přesnosti počítačové tomografie využívající rentgenové záření lze dosáhnout věrohodného zobrazení polohy a orientace vláken v daném prvku, ale pro následnou práci a hodnocení je potřeba provést vyhodnocení v řezné ploše (úrovni). Výhodou této metody je možnost vybrání konkrétních řezů, i na sebe kolmých, bez toho, aniž by došlo k porušení vzorku. Nevýhoda této metody spočívá v její ceně, případně v nárocích na zabudování přístroje do laboratoře.

Další publikací využívající výpočetní tomografii pro hodnocení distribuce vláken je „*Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements*“ [124] jejímž autorem je L. Ferrara. Autor zde popisuje důležitost vlivu výběru velikosti jádrového tělesa, na kterém je distribuce vláken stanovena. Kromě výpočetní tomografie pro zobrazení distribuce a orientace vláken autor dále provedl stanovení množství drátků ve vývrtnu pomocí destruktivní metody popsané i v normě ČSN EN 14488-7 [96]. Množství vláken, které bylo použito v experimentu, bylo 35, 50 a 70 kg/m³.

7.2.2.4 Optická kontrola na lomové ploše

Další metodou, pro kterou není potřeba žádné zařízení, je vizuální kontrola distribuce drátků na lomové nebo řezné ploše. Díky této metodě je možné rychle zkontrolovat distribuci vláken, ale množství vláken v příslušné oblasti je těžko kvantifikovatelné. Tuto metodu jsem používal primárně při kontrole lomové plochy drátkobetonových segmentů ostění použitých při stavbě tunelu Ejpovice. V receptuře ostění bylo $40 - 60 \text{ kg/m}^3$ drátků ($V_f = 0,38 - 0,75\%$). Toto množství drátků, a také jejich velikost, bylo možné i spočítat. Při vyšším dávkování a menšímu rozměru drátků je jejich kvantifikace do určité oblasti problematické viz Obr. 66 a Obr. 67.



Obr. 66: Lomová plocha vláknobetonu s dávkou vláken 40 kg/m^3 , na lomové ploše počítatelné množství kovových drátků – fotografie z databáze autora

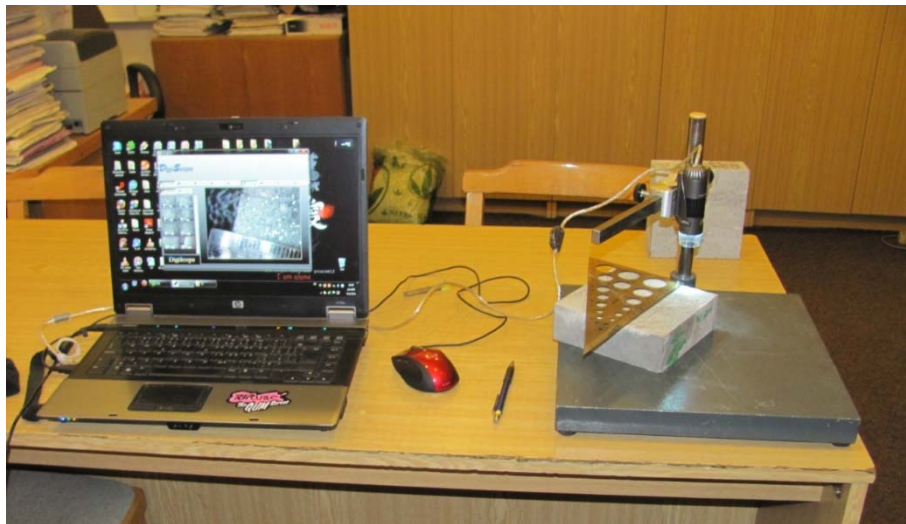


Obr. 67: Lomová plocha trámce $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$ z UHPC s dávkou vláken 120 kg/m^3 , z fotografie je patrné velké množství všesměrně orientovaných drátků, jejichž kvantifikace je početně problematická – fotografie z databáze autora

Z výše uvedených obrázků je patrné, že provedení kontroly distribuce vláken na lomové ploše prvku z UHPC je problematické. Vizuálně lze stanovit pouze hrubý odhad zastoupení vláken v jednotlivých částech prvku. Zhodnocení míry segregace na lomové ploše je možné pouze hrubým odhadem.

7.2.2.5 Optická metoda na řezné ploše

Optickou metodu kontroly distribuce vláken na řezné ploše ztvrdlého UHPC jsem poprvé použil v diplomové práci, kdy pomocí této metody byla kontrolována distribuce vláken na zkušebních krychlich o hraně 150 mm. Distribuce vláken byla kontrolována pomocí optického mikroskopu připojeného k počítači. Na následujícím Obr. 68 je zachycena kontrola distribuce vláken po výšce průřezu krychle, u které byl sledován vliv složení směsi na distribuci vláken.



Obr. 68: Kontrola distribuce drátků po výšce průřezu zkušební krychle o hraně 150 mm, u které byla provedena kontrola distribuce vláken po výšce průřezu při optimalizaci složení směsi stabilní vůči segregaci vláken ke dnu formy

Distribuce vláken byla na zkušebních krychlich sledována zejména s ohledem na vliv jednotlivých složek matrice. Výsledky kontroly distribuce vláken pro jednotlivé receptury jsou uvedeny v diplomové práci [125].

D. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cíle disertační práce jsou uvedeny v kapitole B takto:

- a) Stanovení distribuce krátkých rozptýlených drátků (disperzní výztuže) po výšce průřezu prvků z UHPC a vliv distribuce na ohybovou únosnost zvoleného prvku z UHPC.
- b) Ověření možnosti přípravy prvku z UHPC s řízeným vytvořením vrstev s různým objemovým dávkováním drátků V_f a porovnání s prvkem vyrobeným běžným způsobem.
- c) Analýza technologických vlivů na chování ztvrdlého UHPC v tahu za ohybu po vzniku trhliny, zejména s přihlédnutím na zpracovatelnost směsi a dávky rozptýlené výztuže.
- d) Analýza vlivu reologie a konzistence čerstvé směsi UHPC na stabilitu směsi vůči rozměšování a sedání ocelových drátků ke dnu formy.

K řešení cílů disertační práce byla provedena řada experimentů, v jejichž rámci byly využity experimentální metody a vyhodnocovací postupy popisované v předchozích kapitolách. K hodnocení distribuce vláken v zatvrdlé směsi byla využita optická metoda pomocí přesného mikroskopu, která je popsána v kapitole 7.2.2.5. Tuto metodu jsem v rámci řešení disertační práce zdokonalil nejen z hlediska samotného provádění, ale také s ohledem na následné vyhodnocení vlivu distribuce vláken na pevnost v tahu za ohybu.

Disperzní výztuž a její distribuce po průřezu ovlivňuje výsledné lomové parametry UHPC. Ovlivnění výsledků mechanických vlastností může být jak příznivé [113], tak i nepříznivé [34]. Vliv distribuce vláken na výsledné vlastnosti je jednou z náplní experimentální části. Ve světě existuje řada metod a studií stanovení distribuce disperzní výztuže v UHPC, ale většina z těchto metod je použitelná na akademické půdě. V dokumentu fib Model Code [10] a ve francouzském doporučení AFGC [7] je uvedena koncepce *K-hodnoty* regulující pevnost v tahu za ohybu a residuální pevnosti po dosažení meze úměrnosti.

V rámci vlastní činnosti jsem se zaměřil na využití optické metody kontroly distribuce vláken na řezné ploše u série zkušebních těles. Získané výsledky distribuce vláken jsem konfrontoval s výsledky mechanických zkoušek pro zhodnocení vlivu distribuce vláken na výsledné lomové vlastnosti. Jak již bylo předesláno v rešeršní části má distribuce vláken zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu jsem se kromě kontroly distribuce vláken na řezné ploše věnoval také výrobě prvků s nehomogenní distribucí vláken po výšce průřezu tak, aby bylo dosaženo lepších výsledků než u těles s homogenním zastoupením vláken v objemu.

V závěru experimentální části je provedeno zhodnocení vlivu množství disperzní výztuže na výsledné mechanické parametry ve dvou rovinách. V první části je zachováno složení směsi a ve druhé části je upravována dávka vody s cílem zachování stejné konzistence pro různé dávky vody. Vlivy distribuce vláken na zpracovatelnost a množství vody na segregaci vláken jsou provedeny u série receptur. Vliv vody je dále konfrontován s viskozitou směsi a výsledky kontroly distribuce vláken u jemnozrné matrice.

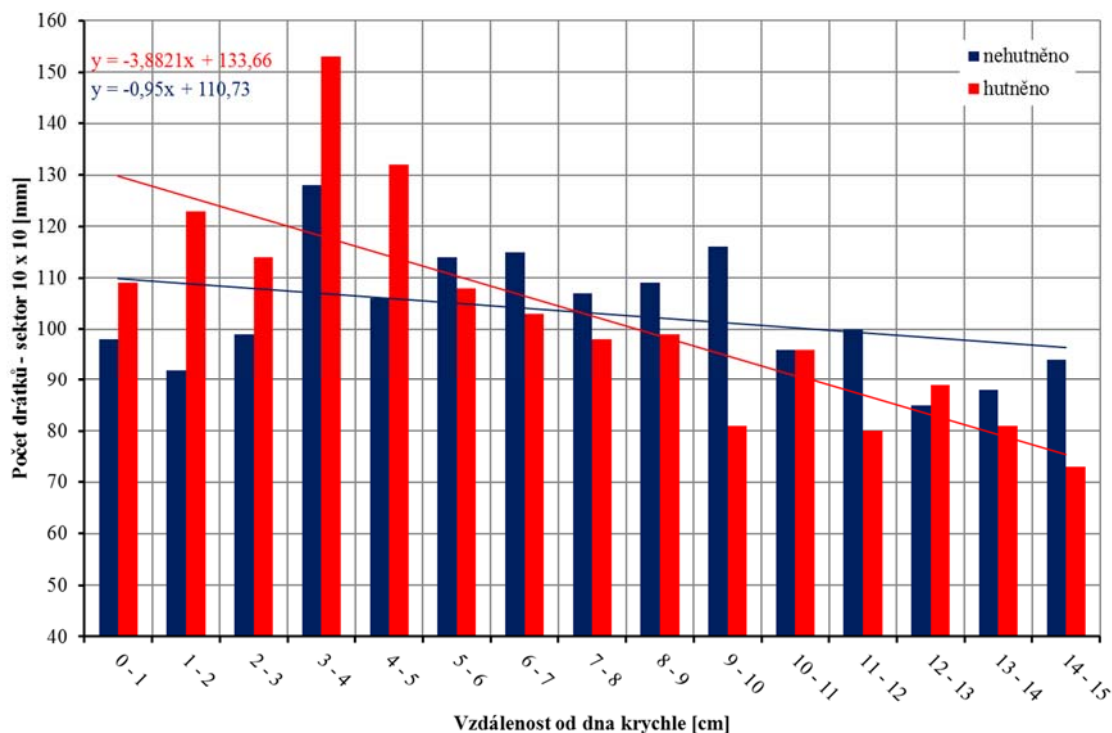
8 KONTROLA DISTRIBUCE VLÁKEN OPTICKOU METODOU

V kapitole 7 byl popsán vliv distribuce vláken na tahové parametry UHPC a možnosti kontroly distribuce v čerstvém a v ztvrdlém stavu. Náročnost provádění uvedených zkoušek vedla k vývoji a optimalizaci kontroly distribuce kovových vláken optickou metodou pomocí přesného mikroskopu na řezné ploše ztvrdlého UHPC. S touto metodou jsem poprvé přišel do kontaktu již v rámci magisterského studia, kdy jsem na zkušebních krychlích z rozdílných receptur prováděl kontrolu distribuce vláken a sledoval vliv složení receptury na její náchylnost k segregaci vláken. Tuto metodu jsem si v průběhu svého působení v Kloknerově ústavu osvojil a provedl jsem nejen její optimalizaci, ale také jsem si osvojil metodiku vyhodnocení segregace vláken ke dnu formy u různých směsí a prvků z jemnozrnného cementem pojeného kompozitního materiálu typu UHPC.

Optická metoda kontroly distribuce na řezné ploše je vhodná nejen pro optimalizaci složení směsi odolné vůči segregaci vláken, ale také pro kontrolu homogenity distribuce vláken po mechanických zkouškách a zpětnému zhodnocení vlivu distribuce vláken na výsledky zkoušek.

Při kontrole stability směsi je možné zkoušku provést nejen na standardních zkušebních tělesech, kterými jsou krychle a válce, ale také na nejružnějších odlitcích. Zkušební tělesa pro optickou kontrolu pomocí mikroskopu jsou připravena řezáním pilou s diamantovým kotoučem. Řezná plocha je dále rozčleněna na sektory, jejichž velikost je závislá na tloušťce prvku a úrovni kontroly. Tyto sektory jsou snímány mikroskopem a zobrazovaná data jsou ukládána do PC. Následně jsou pořízené snímky graficky zpracovány a je provedeno hodnocení distribuce vláken.

Pro vlastní hodnocení distribuce vláken po výšce průřezu, po zpracování nasnímaných dat, jsem zvolil použití jednoduché lineární závislosti, kdy naměřenými hodnotami jsem proložil lineární přímku, kterou lze popsat parametrickou rovnicí. Koeficient lineární regrese (odklonu křivky od rovnoběžné polohy s vyhodnocovací osou) pak vypovídá a míře segregace a sednutí vláken ke dnu formy, jak je ilustrativně zobrazeno na následujícím grafu Graf 6 popisující rozdíl vlivu hutnění vybrané receptury na míru segregace vláken ke dnu formy. Popis experimentu pro uvedenou závislost je uveden v diplomové práci [125] bez hodnocení míry segregace pomocí koeficientu lineární regrese.



Graf 6: Ilustrativní zobrazení vyhodnocení segregace vláken pomocí lineární závislosti u zkušebních krychlí – data použita z [125]

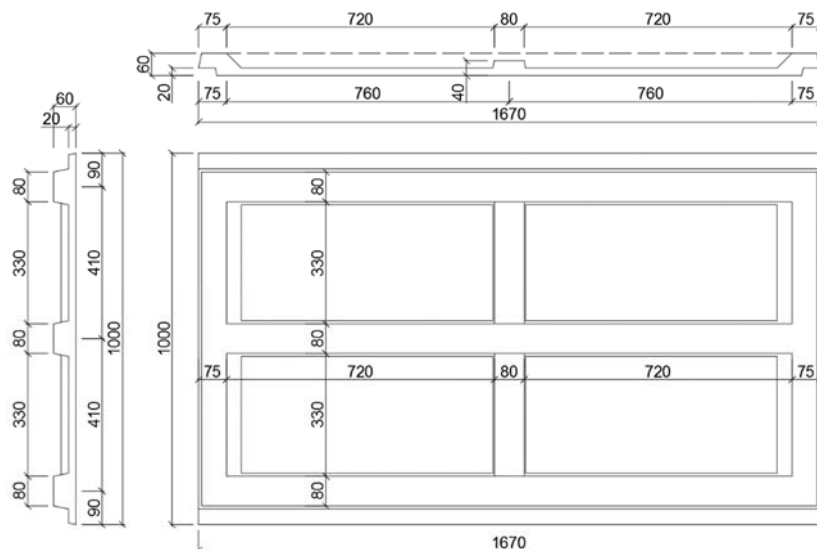
U zkušební krychle, která nebyla během výroby vibrována, je koeficient lineární regrese roven hodnotě -0,95 a pro vibrovanou krychli pak -3,88. S narůstající hodnotou koeficientu lineární regrese a zvyšuje se míra segregace vláken ke dnu formy.

Tímto způsobem lze provést kontrolu také u vyrobených zkušebních těles a prvků po zatěžovacích zkouškách. V případě těles po zkouškách je hodnocení vlivu distribuce provedeno v blízkosti vzniku makrotrhliny, ve které došlo k porušení vzorku. V případě vzniku většího množství trhlin doporučuji provést kontrolu nejen v místě makrotrhliny, ale také v místě vzniku první trhliny, pakliže je její poloha odlišná od trhliny, ve které došlo k porušení vzorku.

9 ANALÝZA VLIVU DISTRIBUCE VLÁKEN NA NOSNOST DESEK ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ

9.1 ZKOUŠKY DESEK ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ

V rámci rekonstrukce silničního mostu ev. č. 272-008 na silnici II. třídy č. 272 přes dříve rychlostní komunikaci R10, nyní přes dálnici D10 byla stávající konstrukce snesena a nahrazena konstrukcí novou. Nosná konstrukce je tvořena ocelovými nosníky, na jejichž horní pásnici jsou uloženy desky ztraceného bednění z UHPC půdorysného rozměru 1,0 x 1,67 m tloušťky 20 mm. Desky byly vyráběny v závodě společnosti Skanska a.s. – Štětí. Na následujícím Obr. 69 je půdorysný tvar desky a příčné řezy. Tvar desky ztraceného bednění a ověření na numerickém modelu provedla společnost Pontex, s.r.o.. Desky ztraceného bednění byly při výrobě otočeny žebry směrem dolů.



Obr. 69: Schéma desky ztraceného bednění; schéma použito z interních zdrojů KÚ

Vzhledem ke skutečnosti, že se jednalo o most přes rychlostní komunikaci, která byla během výstavby provozována, musely desky ztraceného bednění vyhovět nejen v montážním stavu, který počítal s pohybem dělníků po položené konstrukci, ale museli také vyhovět přitížení čerstvým betonem a pohybem osob. Toto posouzení bylo provedeno v programu LUSAS. Pro sériovou výrobu a kontrolu desek byl zpracován technologický předpis a každá vyrobená deska musela být zkontrolována pomocí zatěžovací zkoušky, jejíž parametry byly stanoveny na základě výsledků zkoušek v laboratoři Kloknerova ústavu. Pro pružné chování byla stanovena hodnota zatížení 13 kN při průhybu cca 4,1 mm. Velikost zkušebního zatížení bylo o cca 30% větší než provozní zatížení [33].

9.1.1 Parametry UHPC zkoušených desek

Během výroby desek byly prováděny i materiálové průkazní zkoušky na zkušebních tělesech splňujících požadavky norem ČSN EN. Výsledky průkazních zkoušek byly v průběhu výroby desek ztraceného bednění průběžně kontrolovány ověřovacími zkouškami. Pro průkazní i ověřovací zkoušky byl prováděn odběr čerstvého UHPC a dále byla vyráběna série zkušebních těles pro ověření mechanických vlastností UHPC. V rámci výroby zkušebních těles byla provedena kontrola konzistence dle ČSN EN 12350-8 [80] a dále byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [126]. Abychom zabránili nadměrnému odpařování vody, byla vyrobená tělesa postříkána prostředkem proti odpařování vody. Současně s postřikem proti odpařování vody byl povrch zkušebních těles upravován ocelovým hladítkem po dobu, po kterou se na jeho vzdušném povrchu objevovali vzduchové bubliny. Následně byla zkušební tělesa překryta fólií a ponechána 24 hodin ve formě v závodě. Po 24 hodinách byla tělesa převezena do laboratoře Kloknerova ústavu, kde bylo provedeno jejich odformování, popsání a uložení do vodní lázně na následujících 28 dní, nebo do termínu zkoušek. Uložení těles bylo provedeno dle ČSN EN 12390-2 [98].

V rámci ztvrdlého UHPC bylo provedeno stanovení válcové pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [25]. Statický modul pružnosti UHPC v tlaku jsem stanovoval na válcových tělesech \varnothing 150 mm a výšky 300 mm dle normy ČSN ISO 6784 [105], jejíž platnost byla zrušena 1. 1. 2015 a byla nahrazena normou ČSN ISO 1920-10 [104]. Zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a stanovení reziduálních pevností jsem prováděl dle ČSN EN 14651+A1 [94] na trámčích 150 x 150 x 700 mm a na trámčích 100 x 100 x 400 mm. Uspořádání zkoušek odpovídalo tříbodovému ohybu na tělesech, u kterých byl pod zatěžovacím břemenem proveden vrub. Stejně velká tělesa jsem zkoušel také v uspořádání čtyřbodového ohybu, kdy v tělesech nebyl proveden vrub dle ČSN EN 14488-3 [95]. V následující Tab. 5 jsou uvedeny průměrné dosažené výsledky z průkazní zkoušky UHPC materiálu použitého pro výrobu desek ztraceného bednění. Výsledky průkazní zkoušky použitého UHPC třídy C110/130 byly publikovány v odborném časopise Beton TKS [34].

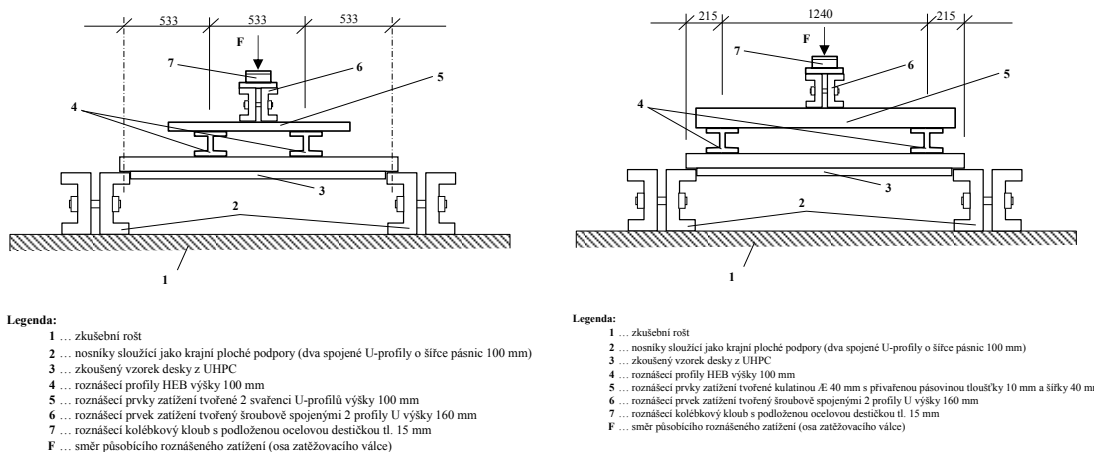
Tab. 5: Výsledky průkazní zkoušky UHPC použitého při výrobě desek ztraceného bednění

Zkouška	Příslušná norma	Průměrná hodnota
Konzistence sednutí – rozlívání v čase 25 min	ČSN EN 12350-8	810 mm
Objemová hmotnost čerstvého betonu	ČSN EN 12350-6	2450 kg/m ³
Válcová pevnost v tlaku po 28 dnech	ČSN EN 12390-3	125,0 MPa
Válcová pevnost v tlaku po 28 dnech – po zkoušce modulu pružnosti	ČSN EN 12390-3	127,0 MPa
Modul pružnosti po 28 dnech	ČSN ISO 6784	45,0 GPa
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech – trámce 150 x 150 x 700 mm se zářezem	ČSN EN 14651+A1	13,9 MPa
Reziduální pevnost v tahu za ohybu σ_1 po 28 dnech pro $CMOD_1 = 0,5$ mm	ČSN EN 14651+A1	9,5 MPa
Reziduální pevnost v tahu za ohybu σ_4 po 28 dnech pro $CMOD_4 = 3,5$ mm	ČSN EN 14651+A1	4,9 MPa
Hloubka průsaku tlakovou vodou	ČSN EN 12390-8	0,5 mm
Odpad při odolnosti proti CH.R.L. – metoda C, 125 cyklů	ČSN 72 1326	18,0 g/m ²

9.1.2 Zkoušky desek ve čtyřbodovém ohybu

9.1.2.1 Uspořádání zkoušky

Výroba desek probíhala v reverzní poloze, než je naznačeno na Obr. 69, tzn. žebry dolů. U desek ztraceného bednění byla zkoušena nejen ohybová, ale i smyková únosnost. Při ohybové únosnosti byly desky zkoušeny v uspořádání čtyřbodového ohybu se vzdáleností podpor 1,6 m a břemeny umístěnými ve třetině rozpětí, u smykových zkoušek byla vzdálenost břemen 1,24 m. Uspořádáním zkoušky ve smyku byla ověřena únosnost ozubu desky. Uspořádání zkoušek je na následujícím obrázku.



Obr. 70: Uspořádání zkoušek desek ztraceného bednění; na obrázku vlevo zkouška v ohybu; na obrázku vpravo zkouška ve smyku

9.1.2.2 Postup zkoušek

Vyrobené desky byly před zkouškou zváženy a dále byly stanoveny jejich základní geometrické rozměry pomocí svinovacího metru a posuvného měřítka. Poté byly desky položeny na pevné ploché podpory, které byly tvořeny dvojicí sešroubovaných profilů U 300. Tyto podpory byly spojeny se zkušebním roštem závitovými tyčemi tak, aby nedošlo k jejich posunutí nebo pootočení. Vzhledem k tomuto uspořádání se jedná o 1x staticky neurčitou konstrukci, jelikož v místě uložení bylo deskám zabráněno svislým a vodorovným posunům, ale nebylo zabráněno jejich pootočení v místě uložení.

Na položené desky byly poté položeny dva roznášecí profily HEB 100, přičemž váha jednoho profilu byla 21 kg. Vyrovnání nerovností bylo provedeno pomocí sádry. Vzdálenost nosníků byla u ohybové zkoušky 533 mm. Kolmo na roznášecí profily byly položeny 2 roznášecí kulatiny s \varnothing 40 mm, ke kterým byla přivařena plochá pásová ocel šířky 40 mm a tloušťky 10 mm. Celková hmotnost těchto prvků byla 26 kg (13 kg / roznášecí prvek). Všechny tyto profily byly převázány šroubově spojenou dvojicí profilů U 160 mm o hmotnosti 27 kg. Mezi pístem hydraulického válce a roznášecími břemeny byl vložen roznášecí kolébkový kloub, jehož váha je cca 5 kg. Celková hmotnost roznášecích břemen u ohybové zkoušky byla 100 kg.

Pro sledování deformace byly následně na desky umístěny potenciometrické snímače posunutí nad podporami, ve středu rozpětí a ve vzdálenosti 0,46 - 0,48 m od krajní

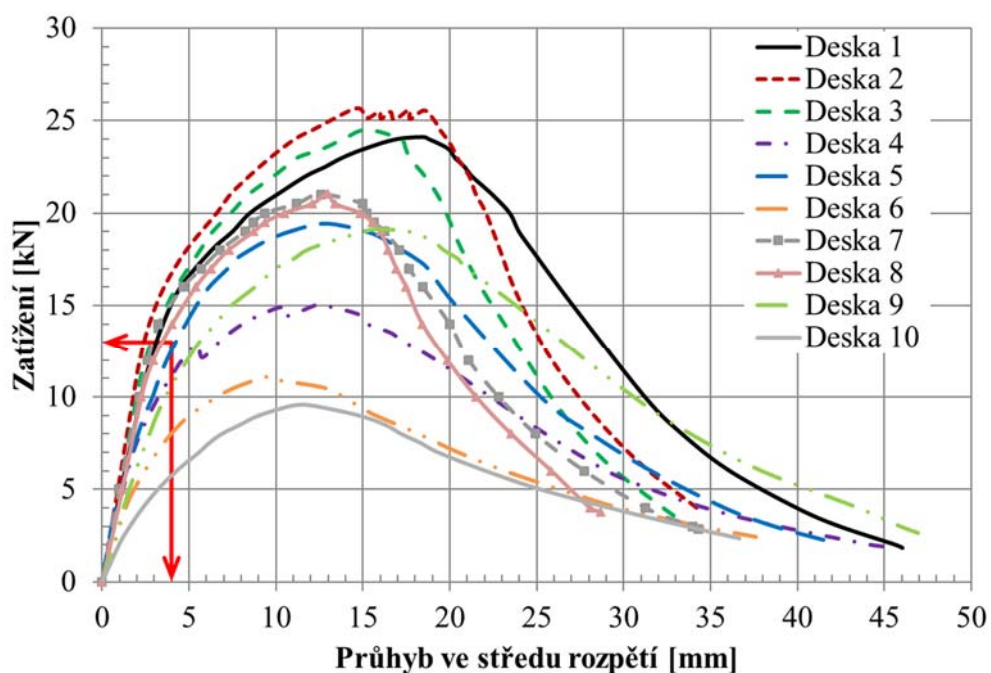
podpory. Celkem bylo na desce zkoušené v ohybu umístěno 7 snímačů, které byly připojeny k řídicímu systému FlexTest40, aby bylo možno kontinuálně sledovat průběh deformací.

Přenos síly z hydraulického válce byl řízen kontinuálním posunem válce rychlostí 0,01 mm/s do vzniku první trhliny. Následně byla rychlost zatěžování zvyšována až na finální hodnotu 0,03 mm/s.

9.1.2.3 Výsledky vybraných ohybových zkoušek

Během průkazných zkoušek v období od ledna 2012 do dubna 2012 bylo celkem v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze odzkoušeno 23 desek. Během ohybových zkoušek bylo dosahováno rozdílných hodnot maximální dosažené síly ve válci. Tyto hodnoty se pohybovaly od 8 do 28,3 kN. Tento rozptyl měl vliv nejen na optimalizaci výroby, kvalitu formy, technologický postup, ale byl i základem pro vytvoření kontrolního mechanismu vyrobených desek tak, aby je bylo možno bezpečně použít při rekonstrukci mostu přes rychlostní komunikaci bez použití skruže a při zachování provozu.

Následující Graf 7 zobrazuje závislost průhybu desek ve středu rozpětí (na vodorovné ose), po odečtení hodnot naměřených v místě uložení desek, na působícím zatížení na svislé ose.

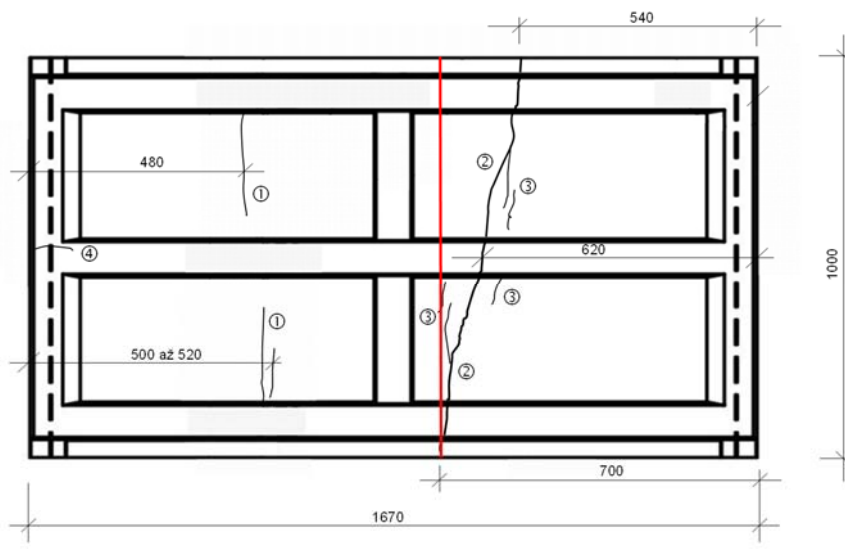


Graf 7: Závislost průhybu desky uprostřed rozpětí na velikosti působící síly; červenou čarou se šipkou vyznačena limitní hodnota stanovená projektantem

Na uvedeném grafu je červenou čarou se šipkou stanovena limitní hodnota deformace pro požadovanou úroveň zatížení, která byla stanovena projektantem. Pro zatížení 13 kN byl maximální přípustný průhyb 4 mm. Z vybraných desek jsou čtyři desky nevyhovující. Při explicitním posouzení je deska č. 5 (zobrazena v grafu modrou čárkovanou čarou) také nevyhovující, jelikož při zatížení $F = 13$ kN byl měřen průhyb 4,23 mm. Rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou průhybu je 5,75%.

9.1.3 Hodnocení distribuce drátků na vybraných deskách

Z původních 23 desek bylo u 6 provedeno vyhodnocení vlivu segregace vláken. Kontrola homogenity distribuce vláken byla provedena po statických zatěžovacích deskách v ohybu. Kontrolu jsem prováděl na řezné ploše, která byla umístěna v těsné blízkosti trhliny, u které došlo k porušení, dle níže přiloženého schématu, viz Obr. 71.

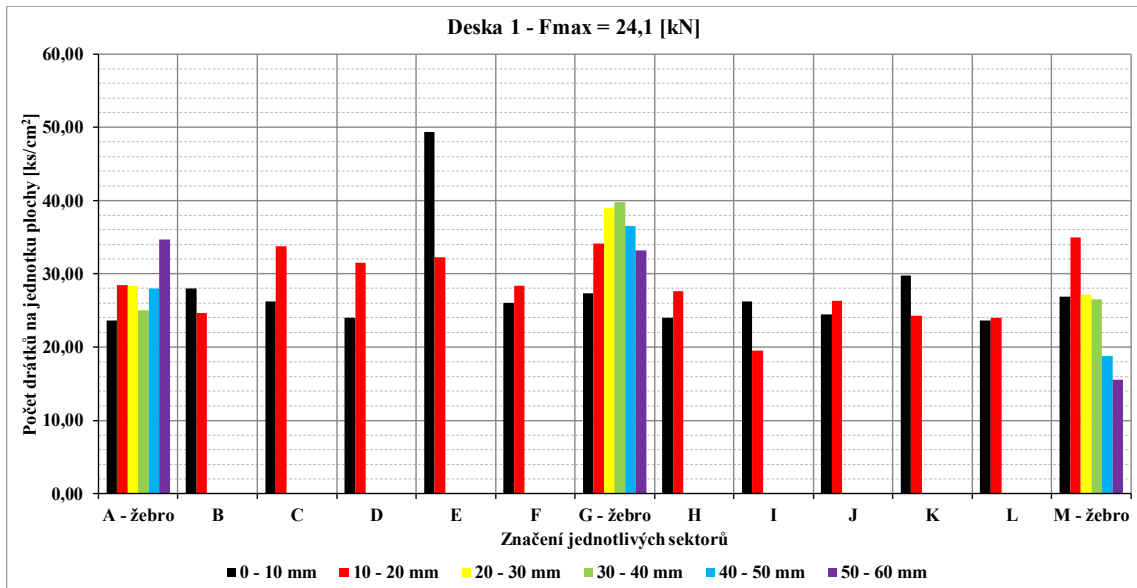


Obr. 71: Schématická poloha řezu (červenou čarou), ve které byla kontrolována homogenita distribuce rozptýlené výztuže

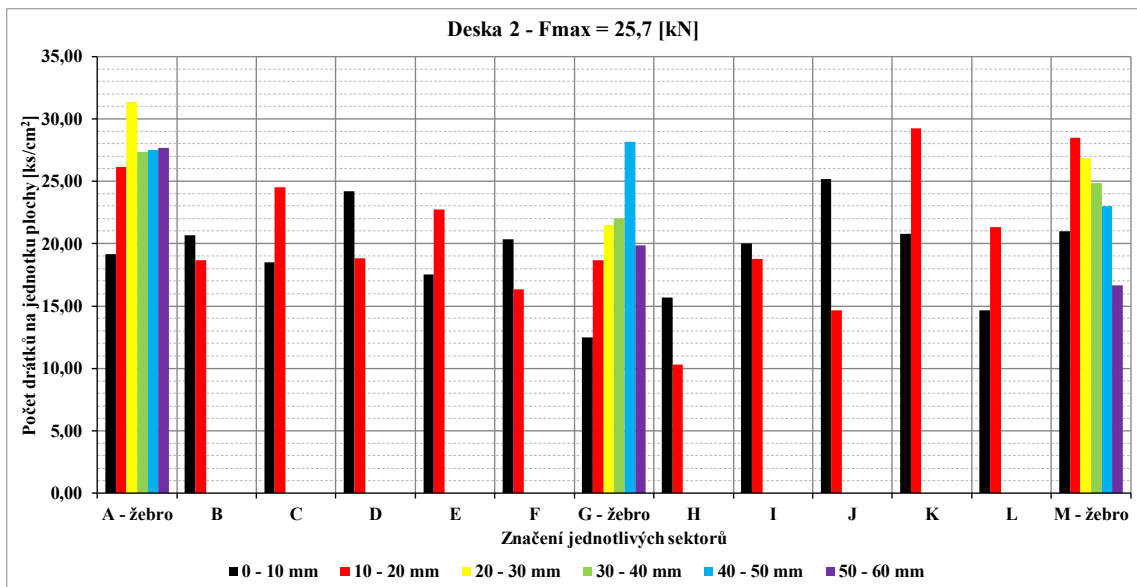
Na vzniklé řezné ploše bylo vytvořeno celkem 13 různě velkých oblastí, ve kterých byla kontrolována distribuce vláken. Oblasti byly rozmístěny tak, aby postihovaly typické části průřezu, kterými jsou ztužující žebra, deska tloušťky 20 mm mezi žebry a přechod mezi žebrem a deskou. Schéma dělení oblastí je na následujícím Obr. 72. Celkově bylo vyhodnocení provedeno na cca 2/3 řezné plochy optickou metodou pomocí přesného mikroskopu, viz kapitola 8. Pro každou oblast a vzdálenost od taženého líce byl stanoven celkový počet drátků, který byl následně převeden na počet drátků na jednotku plochy, jelikož plocha jednotlivých oblastí byla odlišná. Výsledky zkoušek jsou uvedeny na následujících grafech, kdy na svislé ose je uveden počet drátků na jednotku plochy příslušné oblasti.



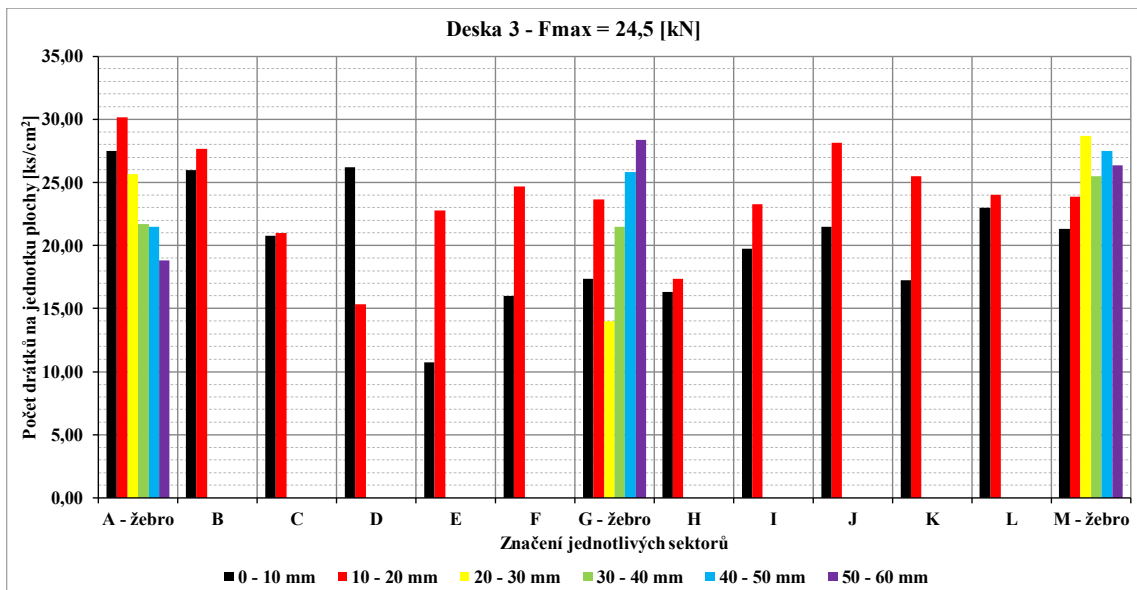
Obr. 72: Schéma značení oblastí pro vyhodnocení distribuce vláken po výšce průřezu; orientace průřezu odpovídá orientaci ve formě; při zkoušce v ohybu byly desky ztraceného bednění zkoušeny obráceně, tzn. černě vybarvené oblasti byly při zkoušce v ohybu v tažené části průřezu



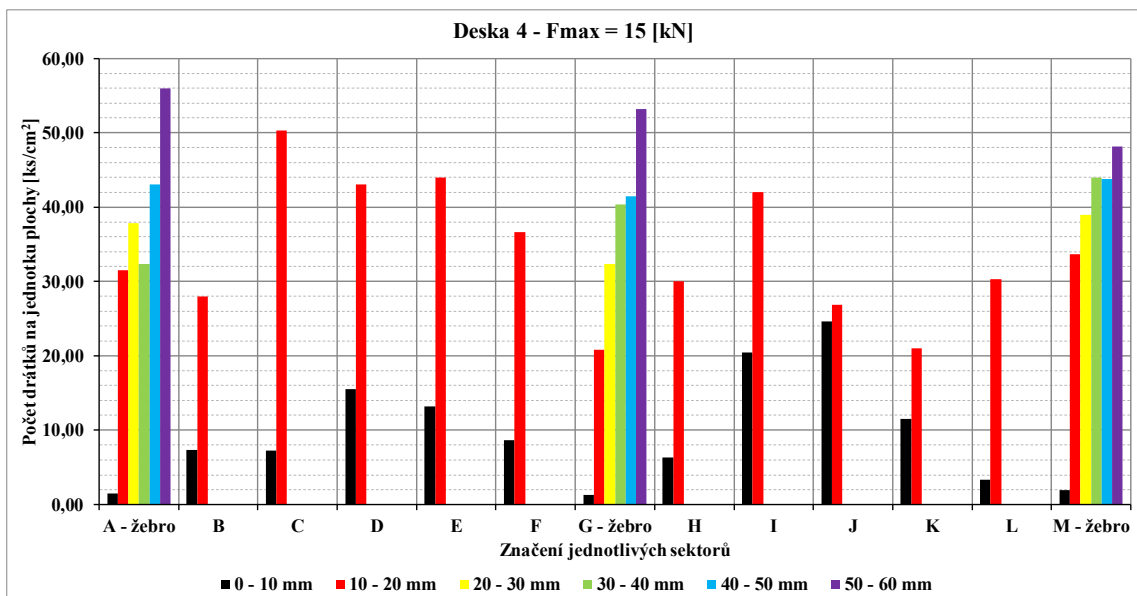
Graf 8: Vyhodnocení distribuce vláken u desky 1; maximální zatížení ve válci $F = 24,1$ [kN]; z grafu patrné rovnoměrné rozmístění drátků v celé zkoumané ploše vyjma oblasti „E“



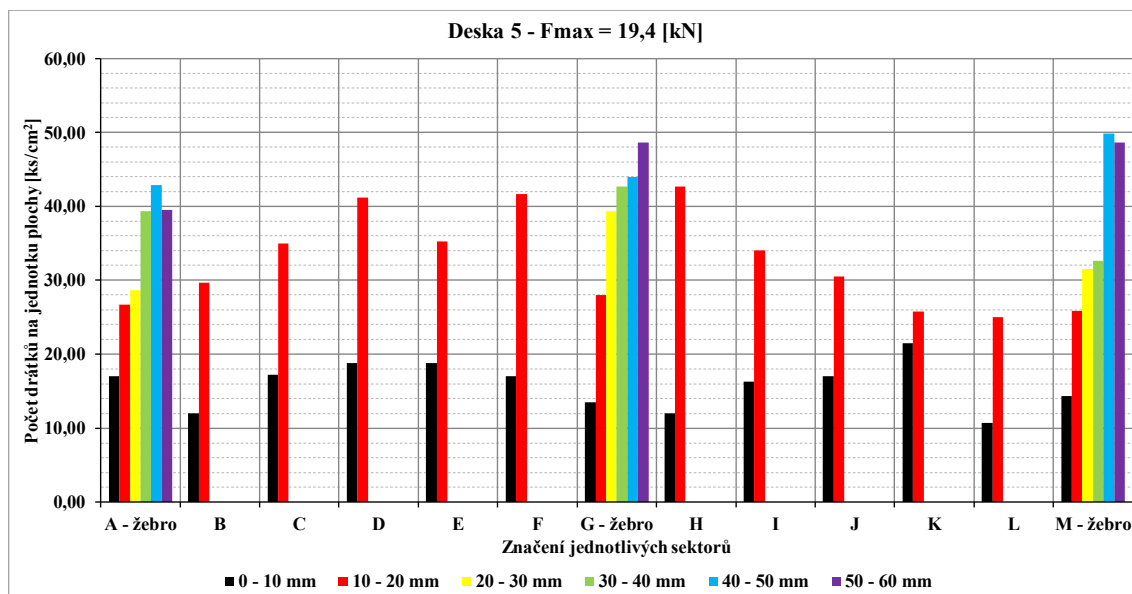
Graf 9: Vyhodnocení distribuce vláken u desky 2; maximální zatížení ve válci $F = 25,7$ [kN]; z grafu patrné rovnoměrné rozmístění drátků v celé zkoumané ploše



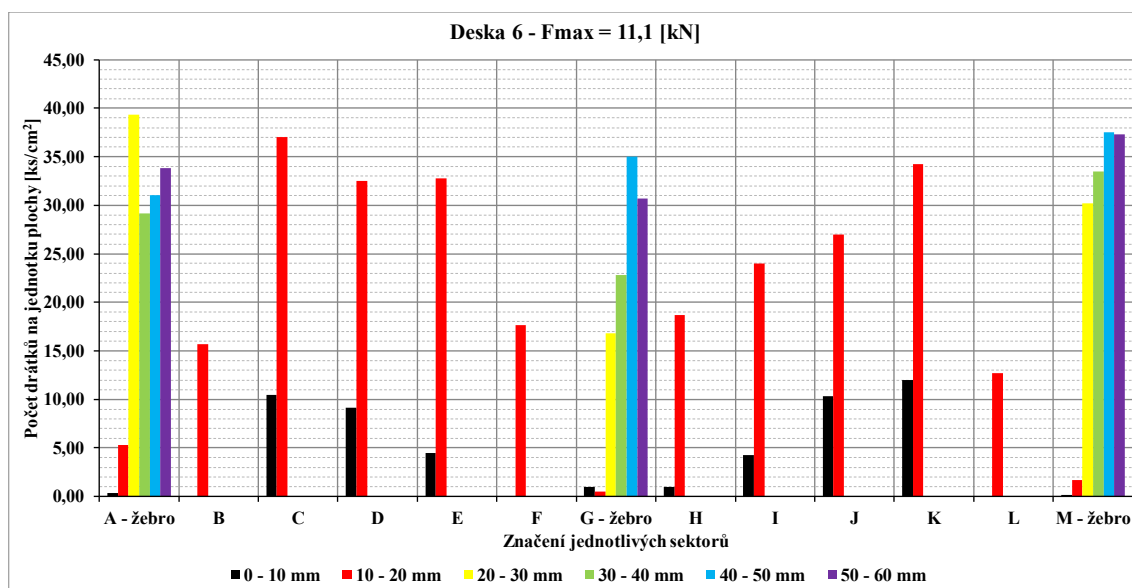
Graf 10: Vyhodnocení distribuce vláken u desky 3; maximální zatížení ve válci $F = 24,5$ [kN]; z grafu patrné rovnoměrné rozmístění drátků v celé zkoumané ploše



Graf 11: Vyhodnocení distribuce vláken u desky 4; maximální zatížení ve válci $F = 15$ [kN]; z grafu patrné, že si drátky sedli ke dnu formy a v tažené oblasti (reprezentovaná černou barvou) je pouze zlomek drátků



Graf 12: Vyhodnocení distribuce vláken u desky 5; maximální zatížení ve válci $F = 19,4$ [kN]; z grafu patrné nižší zastoupení drátků v tažené oblasti (reprezentovaná černou barvou)



Graf 13: Vyhodnocení distribuce vláken u desky 6; maximální zatížení ve válci $F = 11,1$ [kN]; z grafu patrné, že si drátky sedli ke dnu formy a v tažené oblasti (reprezentovaná černou barvou) je pouze zlomek drátků; oblasti *B*, *F* a *L* obsahovali drátky pouze ve vzdálenosti 10 – 20 mm od spodního líce desky

V následující tabulce Tab. 6 je provedeno shrnutí získaných výsledků z kontroly homogenity distribuce kovových drátků u vybraných desek ztraceného bednění. Z tabulky a z průběhu výše uvedených grafů je patrná závislost mezi ohybovou únosností a distribucí vláken. U desek 4 a 6 došlo k výrazné segregaci ke dnu formy, čemuž odpovídá i nízká ohybová únosnost. U desky 5 je patrné také klesnutí drátků ke dnu formy, nicméně deska má požadovanou ohybovou únosnost díky většímu množství

drátků v tažené oblasti, která je reprezentována černou barvou ve výše uvedených grafech.

Tab. 6: Souhrn výsledků kontroly homogenity distribuce vláken u vybraných desek ztraceného bednění optickou metodou pomocí přesného mikroskopu pomocí na řezné ploše ztvrdlého UHPC

Vlastnost	Jednotka	Označení desek					
		1	2	3	4	5	6
Hmotnost desky	[kg]	122,5	144,5	143,5	128,5	140,5	141,5
Průhyb ve středu rozpětí při zatížení 13[kN] dle požadavku návrhu	[mm]	3,13	2,43	2,86	5,46	4,23	9,5 ¹⁾
Splnění požadavku návrhu ²⁾	[-]	Ano			Ne		
Maximální síla ve válci	[kN]	24,1	25,7	24,5	15	19,4	11,1
Průměrná únosnost desek ³⁾	[kN]	24,8			15,2		
Pevnost v tahu za ohybu při vzniku trhliny f_{ct}	[MPa]	16,1	17,2	16,4	10,0	13,0	7,4
Celkový počet drátků ve vyhodnocované oblasti	[ks]	5391	4135	4291	5565	5710	3625
Celkový počet drátků ve spodní vrstvě (0 – 10 mm od spodního líce)	[ks]	1590	1133	1201	557	934	254
Celkový počet drátků ve spodní vrstvě (0 – 10 mm od spodního líce)	[ks]	1308			582		
Podíl drátků ve vzdálenosti 0 - 10 mm k celkovému počtu drátků	[%]	29,5	27,4	28,0	10,0	16,4	7,0
Průměrný počet drátků ve spodní vrstvě v sektorech	[ks]	122	87	92	43	72	20
Směrodatná odchylka distribuce drátků v první vrstvě	[ks]	40	36	41	42	27	24
Variační koeficient v první vrstvě	[%]	33,0	40,8	44,2	97,8	37,4	120,4
Koeficient lineární regrese	[-]	-0,072	0,7306	0,7175	6,9882	5,5235	5,5012

Poznámka: ¹⁾ Hodnota průhybu při maximálním zatížení

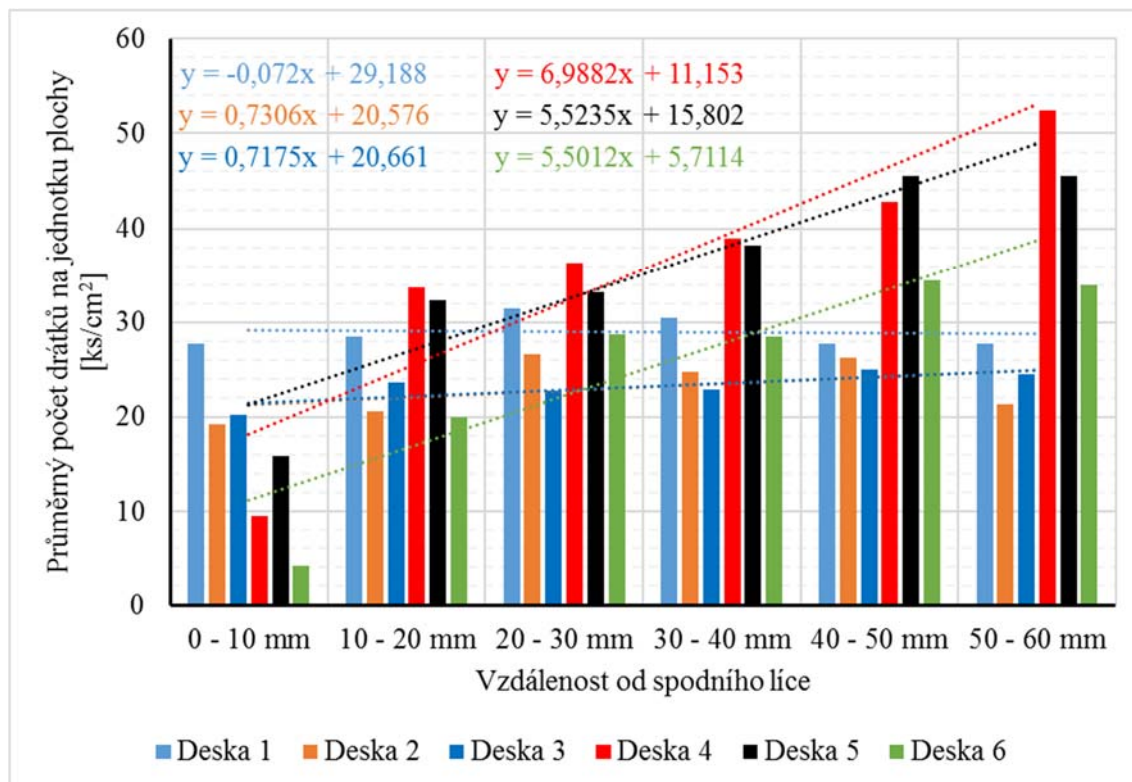
²⁾ Pro zatížení 13 kN byl stanoven limitní průhyb ve středu rozpětí 4 mm [34]

³⁾ hodnoty stanoveny jako průměr maximální dosažené síly ve válci

Z výše uvedené tabulky je patrná závislost mezi únosností desek ztraceného bednění (maximální dosaženou silou ve válci) a celkovým počtem drátků ve spodní vrstvě ve vzdálenosti 0 – 10 mm od spodního líce. Uvedená vrstva tvořila při výrobě desek horní

hlazený povrch a v předchozích grafech je tato oblast reprezentována černou barvou sloupcových grafů.

Z průměrného počtu drátků přepočteného na jednotku plochy dané oblasti jsem stanovil koeficient lineární regrese, díky kterému lze popsat homogenitu distribuce vláken po výšce průřezu. Graf 14 zobrazuje stanovení koeficientu lineární regrese pro jednotlivé desky.



Graf 14: Stanovení koeficientu lineární regrese pro zhodnocení míry segregace vláken po výšce průřezu; barva sloupcového grafu, přímky a uvedené rovnice je shodná pro jednotlivé desky

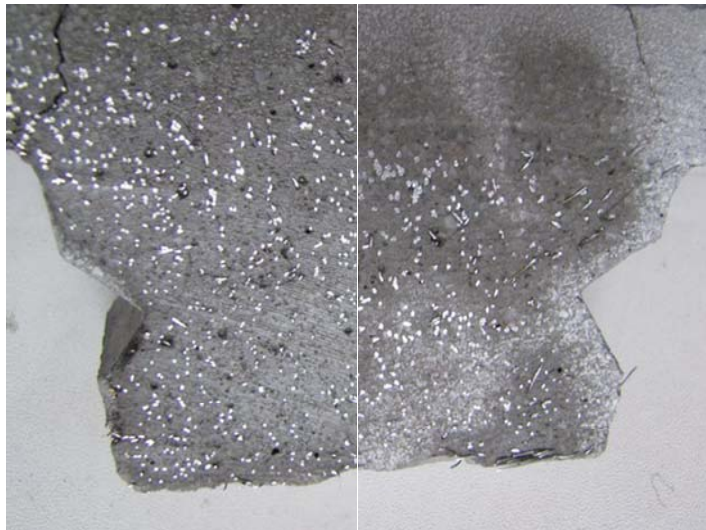
Výše uvedený graf zobrazuje na svislé ose průměrné množství disperzní výztuže přepočtené na velikost dané oblasti. Průměrný počet byl stanoven pro všechny oblasti (dané vzdálenosti od dna formy), které jsou reprezentovány vodorovnou osou. Získané hodnoty průměrného množství byly proloženy lineární křivkou (zobrazeno tečkovanou přímkou), kterou lze zapsat parametrickými rovnicemi uvedenými v grafu. Lineární člen parametrického zápisu rovnice pak popisuje sklon přímky, který koresponduje se segregací vláken ke dnu formy.

Obecně lze říci, že čím je koeficient lineární regrese nižší, jsou drátky rovnoměrněji rozmístěny po výšce průřezu. Se vzrůstajícím lineárním koeficientem regrese je patrná klesající hodnota únosnosti / síly ve válci.

Tato závislost neplatí u desek 5 a 6, mezi kterými je nízký rozdíl v koeficientu regrese, avšak rozdíl v dosažené síle je 8,3 [kN]. V tomto případě je nutno kromě koeficientu regrese vzít v potaz i množství disperzní výztuže v tažené oblasti, kdy u desky 5 je celkem 934 ks a u desky 6 je v tažené oblasti pouze 254 ks drátků a také hodnotu limitního

průhybu, která je u obou desek vyšší než projektantem stanovená maximální hodnota průhybu.

Následující Obr. 73 zobrazuje dvojici žeber z vyhodnocovaných desek s různou distribucí vláken.



Obr. 73: Porovnání distribuce drátků v místě žebra u desky s rovnoměrnou distribucí vláken po celé výšce průřezu (na levém obrázku) a desky, u které došlo při výrobě k výrazné segregaci vláken ke dnu formy (na pravém obrázku)

Na základě získaných zkušeností s optickou metodou a dosaženými výsledky u prvků ztraceného bednění lze konstatovat:

- Dle očekávání se potvrdilo, že distribuce vláken ovlivňuje výsledné mechanické parametry testovaných tenkých desek [34]. V prezentovaném případě tenkých desek ztraceného bednění s výztužnými žebry je tento vliv velmi výrazný, a rozhoduje o tom, zda je možné použít desky pro účely ztraceného bednění či nikoliv.
- Rozhodující vliv na únosnost testovaných desek má první vrstva tl. 10 mm od taženého dolního líce při zatěžovací zkoušce (horní hlazený povrch během výroby). V případě kdy došlo k segregaci a sednutí vláken, došlo k výraznému poklesu únosnosti.
 - Nejvýraznější rozdíl je mezi deskami 2 ($F_{\max} = 25,7$ kN) a 6 ($F_{\max} = 11,1$ kN), kdy je rozdíl mezi maximálními silami 43%.
 - Rozdíl mezi únosnosti desek 2 a 6 je 57%.
- Ohybovými zkouškami a kontrolou homogenity bylo potvrzeno, že pakliže se během výroby podařilo zajistit homogenní rozmístění vláken a nedošlo k jejich sednutí ke dnu formy (do žeber), bylo dosaženo velmi dobrých výsledků v únosnosti desek a napjatosti ve spodních tažených vláknech při porušení na úrovni $f_{ct} = 16 - 17$ MPa. Současně se podařilo také naplnit požadavek projektanta na průhyb 4 mm při zatížení 13 kN.
- V tomto konkrétním případě desek ztraceného bednění vyplývá, že podíl vláken ve spodní vrstvě 0 – 10 mm, která je ve výše uvedených grafech reprezentována černou

barvou, tvořící více jak 25% z celkového počtu drátků ve vyhodnocované oblasti zajistí bezpečně požadavek návrhu na únosnost a deformační chování desek.

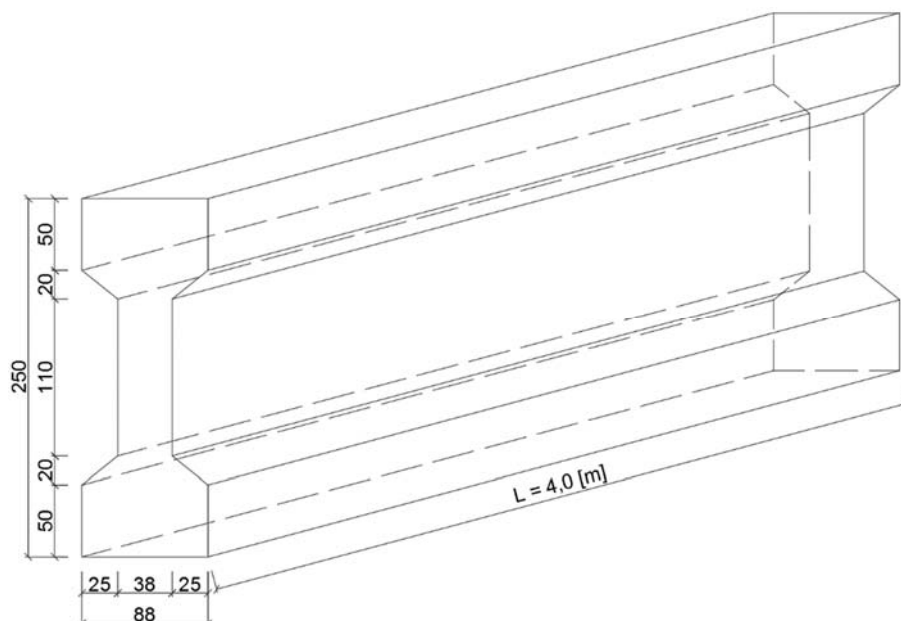
- U desky 5 bylo požadavku projektanta téměř dosaženo i při výrazně nižším poměru vláken ve spodní vrstvě, ve které bylo cca 16% z celkového počtu drátků (5710), který byl nejvyšší ze všech desek. Díky tomuto vysokému obsahu vláken byl i počet drátků ve spodní vrstvě relativně vysoký (934 ks). Toto množství je cca 71,4% z průměrného množství drátků ve spodní vrstvě desek 1 až 3, který je 1308 ks.
 - U desek 4 a 2 byl podíl drátků k průměrnému množství drátků pro desky 1 až 3 výrazně nižší. U desky 4 je tento poměr 42,6% a u desky 6 pouze 19,4%.
 - Únosnost desky 4 je 60,6% z průměrné únosnosti desek 1 až 3, u desky 5 je únosnost 78,3% a u desky 6 je únosnost 44,8%.
- Optickou metodou pomocí přesného mikroskopu se prokázalo, že variabilita četností vláken v měřených sektorech v oblasti porušení je mezi jednotlivými deskami velmi vysoká. Kritéria pro hodnocení distribuce vláken musí být nejen relativní porovnání, ale také hodnocení absolutních četností. Například v tomto konkrétním příkladu desek ztraceného bednění se ukazuje, že minimální množství vláken ve vrstvě 0 – 10 mm od taženého okraje, pro dosažení vyhovujícího chování, je v absolutní četnosti cca 1 000 ks drátků.

Na základě výše popsaného experimentu lze konstatovat, že použitá mikroskopická metoda kontrola distribuce vláken na řezné ploše ztvrdlého UHPC přináší relevantní informace o distribuci vláken a je možno statistickým zpracováním stanovit limity pro objektivní zhodnocení vlivu distribuce vláken na mechanické chování konkrétního prvku. Tato metoda je vhodná pro vývoj nových prvků z UHPC a hodnocení postupů betonáží, které zásadně ovlivňují orientaci i distribuci a rovnoměrnost rozložení vláken.

Současně z výsledků lze vyslovit i hypotézu, že kdyby se podařilo technologií výroby provést pouze vrstvu 0 – 10 mm s odpovídajícím množstvím vláken, významně by se uspořilo v dávkování vláken a tedy i v ceně případného prvku.

9.2 ZKOUŠKY NOSNÍKŮ TVARU I

Dalšími prvky, na kterých jsem stanovoval závislost distribuci vláken po výšce průřezu, byly nepředepnuté nosníky tvaru I o výšce 250 mm, šířce pásnic 88 mm a tloušťce stojiny 38 mm, délka nosníku byla 4 m, viz Obr. 74.



Obr. 74: Příčný tvar nosníků tvaru I

Výroba nosníků byla provedena v závodě společnosti Skanska a.s. – Štětí. Celkem bylo vyrobeno a odzkoušeno 6 nosníků ze dvou různých receptur R1 a D1, jejichž složení je uvedeno v Tab. 7. Z každé receptury byly vyrobeny tři nosníky, které byly plněny jako běžné trámce, tzn. shora dolů. Receptury byly vyvinuty v laboratoři Kloknerova ústavu. Dávka jednotlivých složek matrice je uvedena jako celkový podíl složky k objemu. Skladba matrice receptury D1 se liší typem použitého kameniva a vyšší dávkou cementu, díky které u ní vychází nižší hodnota vodního součinitele.

Tab. 7: Skladba receptur R1 a D1; v tabulce uvedeny podíly vztažené k dávce cementu

Receptura \ Složka	R1	D1
CEM II A-S 42,5R	22%	23%
Struska	3%	3%
Mikrosilika	5%	5%
Drátky	1,5%	1,5%
Kamenivo 1	49%	-
Kamenivo 2	-	47%
Superplastifikátor	4%	4%
Voda	16%	16%
w/c	0,23	0,22
w/b	0,23	0,22

9.2.1 Materiálové parametry

Spolu s nosníky byla vyrobena série zkušebních těles, která byla 24 hodin uložena ve formách, které byly zakryty polyethylenovou fólií, aby bylo zabráněno odparu vody. Po 24 hodinách byla tělesa převezena do laboratoře Kloknerova ústavu, kde bylo provedeno jejich odformování, popsání a uložení do vodní lázně na následujících 28 dní, nebo do termínu zkoušek. Uložení těles bylo provedeno dle ČSN EN 12390-2 [98].

V rámci zkoušek ztvrdlého UHPC byl pro každou recepturu stanoven vývoj pevnosti UHPC v tlaku a vývoj statického modulu pružnosti v tlaku. Dále byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a ohybová únosnost. Vývoj pevností a modulů v čase byl stanoven v 7, 28 a 409 a 410 dnech dle ČSN EN 12390-3 [25] na krychlích o hraně 150 mm a 100 mm, dále na trámech o rozměru 100 x 100 x 400 mm a válcích Ø 150 mm a výšky 300 mm. Poslední sadou byly malé trámečky 40 x 40 x 160 mm. Na hranolech a válcích byla zkouška v tlaku provedena po zkoušce modulu v tlaku dle dnes již neplatné normy ČSN ISO 6784 [105]. U trámečků byla zkouška v tlaku provedena na zlomcích po zkoušce pevnosti v tahu ohybem dle ČSN EN 196-1 [101].

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno na trámech 100 x 100 x 400 mm a 150 x 150 x 700 mm a to v uspořádání zkoušky trojbodovým ohybem na tělesech s vrubem dle ČSN EN 14651+A1 [94] a čtyřbodovým ohybem dle ČSN EN 14488-3 [95].

Výsledky mechanických zkoušek pro recepturu R1 a D1 jsou uvedeny v následující Tab. 8.

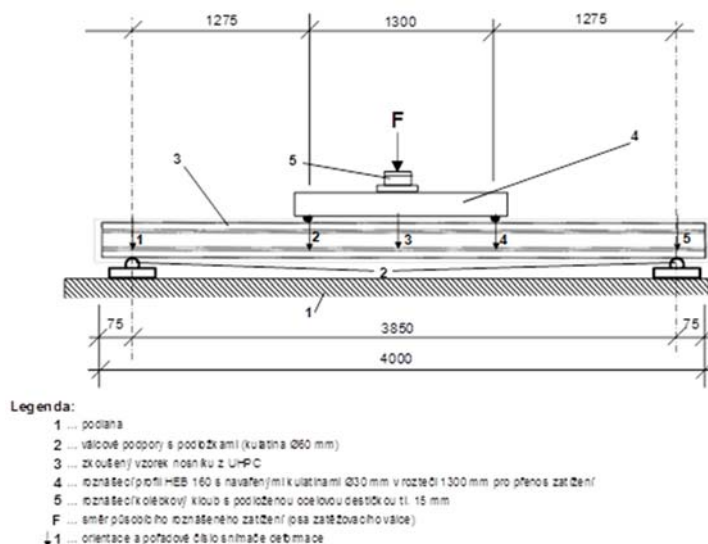
Tab. 8: Vybrané výsledky zkoušek UHPC použitého při výrobě nosníků tvaru I na tělesech odpovídající svými rozměry dle norem na zkoušení ztvrdlého betonu

Zkouška	Příslušná norma	Průměrná hodnota	
		R1	D1
Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech	ČSN EN 12390-3	99,6 [MPa]	110,2 [MPa]
Válcová pevnost v tlaku po 28 dnech – po zkoušce modulu pružnosti	ČSN EN 12390-3	107,2 [MPa]	105,1 [MPa]
Modul pružnosti po 28 dnech	ČSN ISO 6784	45,6 [GPa]	40,9 [GPa]
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech – trámce 150 x 150 x 700 mm se zářezem	ČSN EN 14651+A1	15,0 [MPa]	14,6 [MPa]
Reziduální pevnost v tahu za ohybu σ_1 po 28 dnech pro $CMOD_1 = 0,5$ mm	ČSN EN 14651+A1	14,7 [MPa]	13,4 [MPa]
Reziduální pevnost v tahu za ohybu σ_4 po 28 dnech pro $CMOD_4 = 3,5$ mm	ČSN EN 14651+A1	7,1 [MPa]	5,6 [MPa]

9.2.2 Zkoušky nosníků ve čtyřbodovém ohybu

9.2.2.1 Uspořádání zkoušky

Zkoušky nosníků tvaru I, jejichž příčný řez je na Obr. 74, byly prováděny v uspořádání zkoušky čtyřbodovým ohybem při vzdálenosti podpor 3,85 m. Vzdálenost břemen od podpor byla 1,275 m a vzdálenost mezi podporami byla 1,3 m. Grafické schéma uspořádání ohybové zkoušky je na následujícím Obr. 75.



Obr. 75: Schéma uspořádání zkoušky únosnosti ve čtyřbodovém ohybu zkoušených nosníků z UHPC, jejichž matrice je vyztužena disperzní výztuží

9.2.2.2 Postup zkoušky

Postup ohybové zkoušky je obdobný jako u desek ztraceného bednění, kdy byly nosníky nejprve změřeny a zváženy a poté byly umístěny na válečkové podpory tvořené ocelovým kolébkovým ložem a ocelovými válci Ø 60 mm volně položenými na ocelové desce a zkušební rošt. Na umístěný nosník bylo poté položeno roznášecí břemeno, které se skládalo z kulatin Ø 30 mm s osovou vzdáleností 1,3 m a dále z nosníku HEB 160. Celková hmotnost tohoto přípravku byla 70 kg.

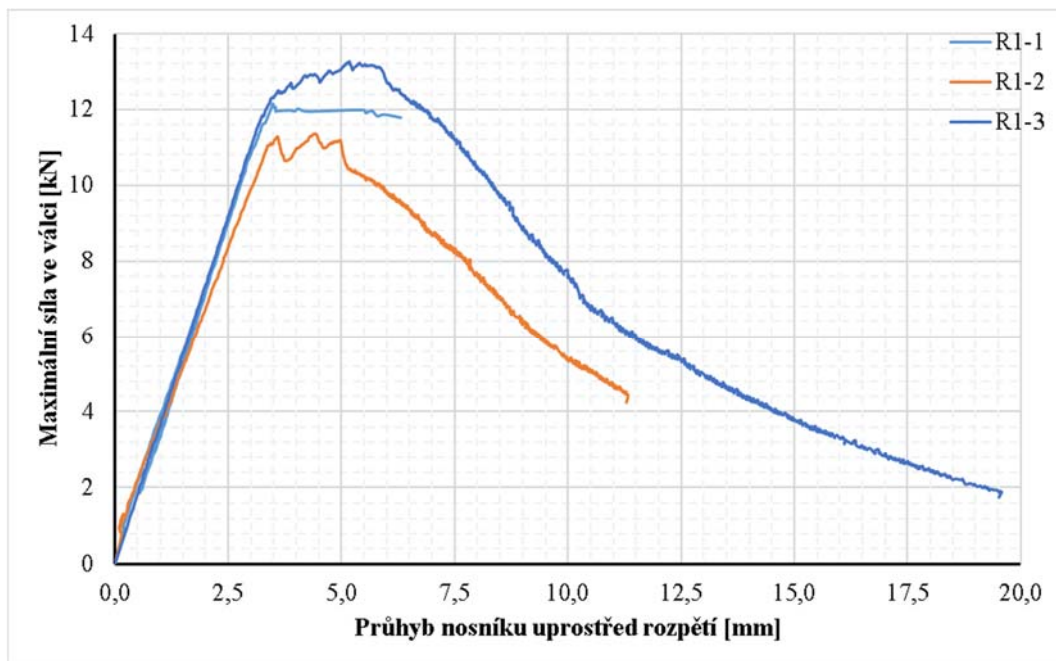
Mezi pístem hydraulického válce a roznášecím břemenem byly vloženy roznášecí kolébkový kloub, jehož váha je cca 4,5 kg, a ocelový válec Ø100 mm a výšky 60 mm o celkové váze 5,4 kg. Celkem byly nosníky zatíženy 80 kg.

Pro sledování deformace byly následně na nosníky umístěny potenciometrické snímače posunutí nad podporami, ve středu rozpětí a pod každým břemenem. Celkem bylo na nosnicích umístěno 5 potenciometrických snímačů posunutí, které byly připojeny k řídicímu systému FlexTest40. Díky tomuto zapojení bylo možno kontinuálně sledovat průběh deformací.

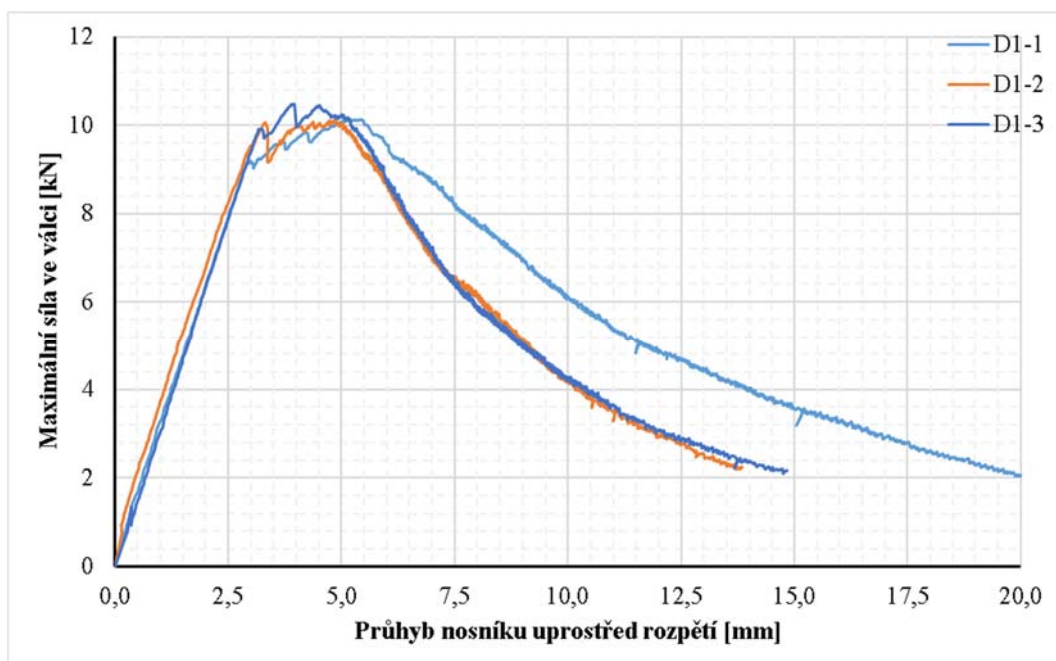
U nosníku bylo dle požadavků projektanta požadavek na 3 stupně zatěžování nárůstem síly 0,1 kN/s a následně kontinuální zatěžování řízené rychlostí posunu válce až do porušení. Po každém dosaženém stupni zatěžování mělo být provedeno odlehčení nosníku pro stanovení trvalých deformací. U nosníku R1-1 došlo při výdrži druhého kroku k rozlomení vzorku. Z tohoto důvodu bylo od stupňovitěho způsobu zatěžování upuštěno a ostatní nosníky byly zkoušeny kontinuálním posunem válce s rychlostí 0,01 mm/s do vzniku první trhliny. Následně byla rychlost zatěžování zvyšována až na finální hodnotu 0,03 mm/s.

9.2.2.3 Výsledky ohybových zkoušek nosníků

Výsledky ohybových zkoušek nosníků jsou rozděleny dle použité receptury na dva samostatné soubory, viz Graf 15 a Graf 16.



Graf 15: Výsledek ohybové zkoušky nosníků délky 4 m z receptury R1; nosník R1-1 zkoušen nejprve stupňovitě s řízeným nárůstem přírůstku síly o 0,1kN/s, ostatní nosníky zkoušeny kontinuálním posunem pístu hydraulického válce



Graf 16: Výsledek ohybové zkoušky nosníků délky 4 m z receptury D1; u všech nosníků D1-1 až D1-3 byl zvolen kontinuální způsob zatěžování řízený posunem příčnicku rychlostí 0,01 mm/s

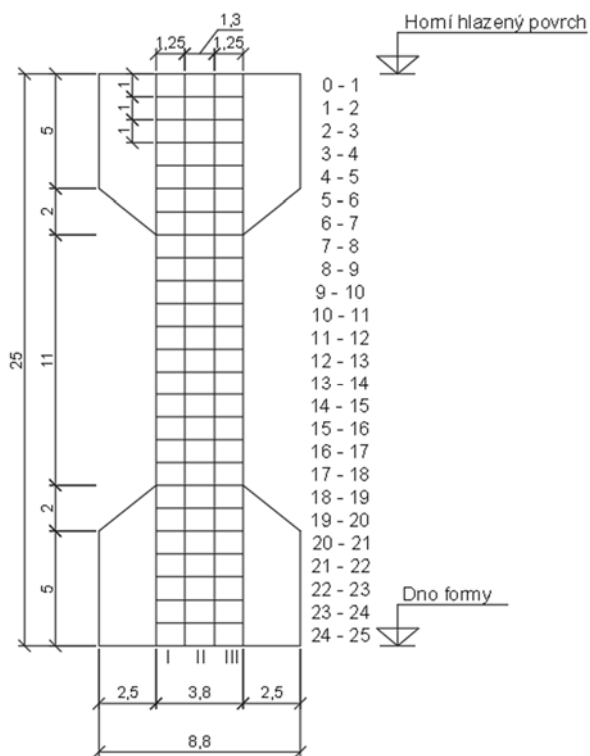
9.2.3 Hodnocení distribuce drátků na nosnících

Podobně jako u desek ztraceného bednění byla kontrola homogenity distribuce vláken provedena vždy po statické zatěžovací zkoušce. Kontrolu distribuce vláken jsem provedl na řezné ploše vždy v blízkosti makrotrhliny. Poloha provedeného řezu je patrná na následujícím Obr. 76.

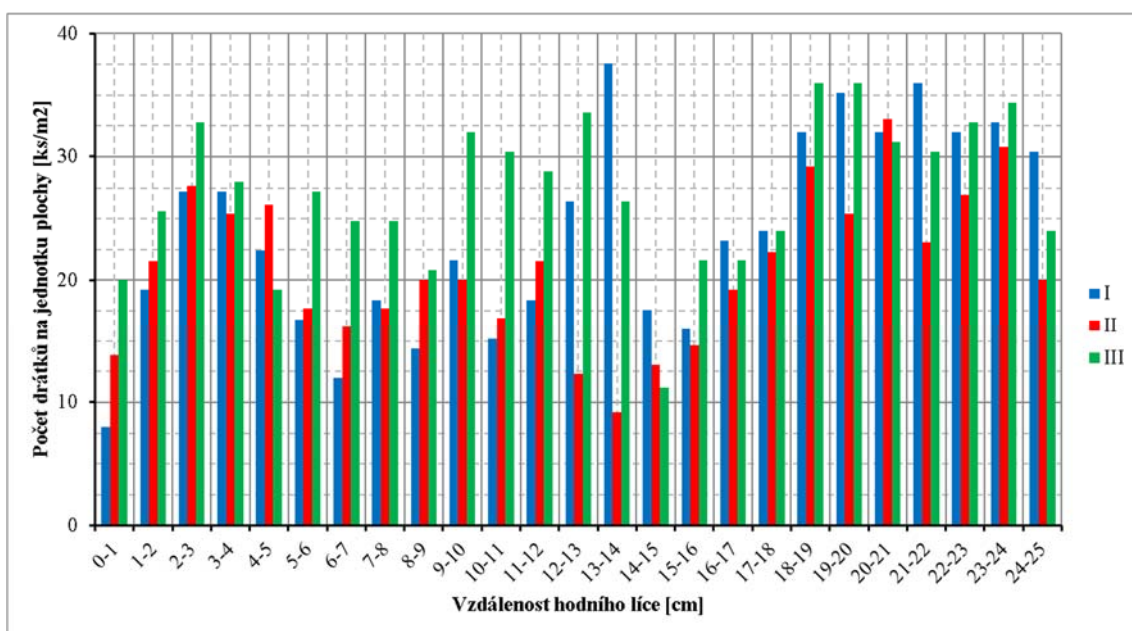
Na vzniklé ploše, obsahující pás o šířce stojiny, byla vyhotovena síť sektorů, ve kterých byla optickou mikroskopickou metodou kontrolována distribuce vláken (podrobně viz kapitola 7.2.2). Po průřezu bylo vytvořeno celkem 75 sektorů, jejichž šířka byla 1,25 mm u krajů, respektive 1,3 mm uprostřed. Schéma dělení sektorů je na následujícím Obr. 77. Celkově bylo vyhodnocení provedeno na cca 2/3 řezné plochy. Pro každý sektor a vzdálenost od dolního líce byl stanoven celkový počet drátků, který byl následně převeden na počet drátků na jednotku plochy. Výsledky optické kontroly distribuce drátků jsou uvedeny na následujících grafech Graf 17 až Graf 22 a v tabulce Tab. 9.



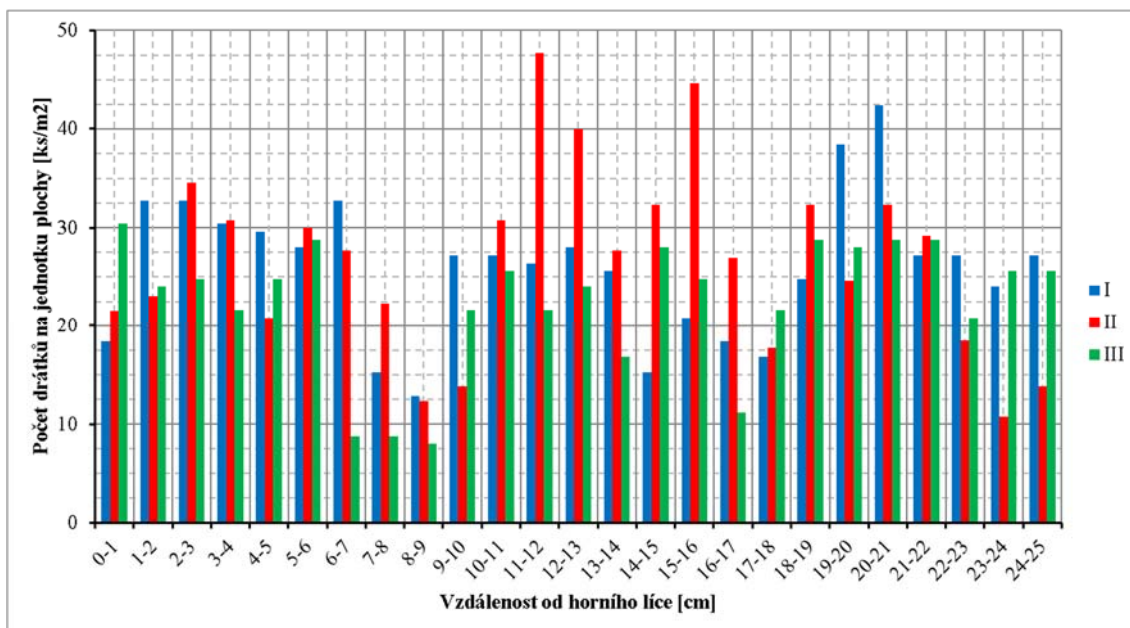
Obr. 76: Výřez nosníku R1 v místě makrotrhliny; šipkou označena řezná plocha, na které byla stanovena distribuce drátků



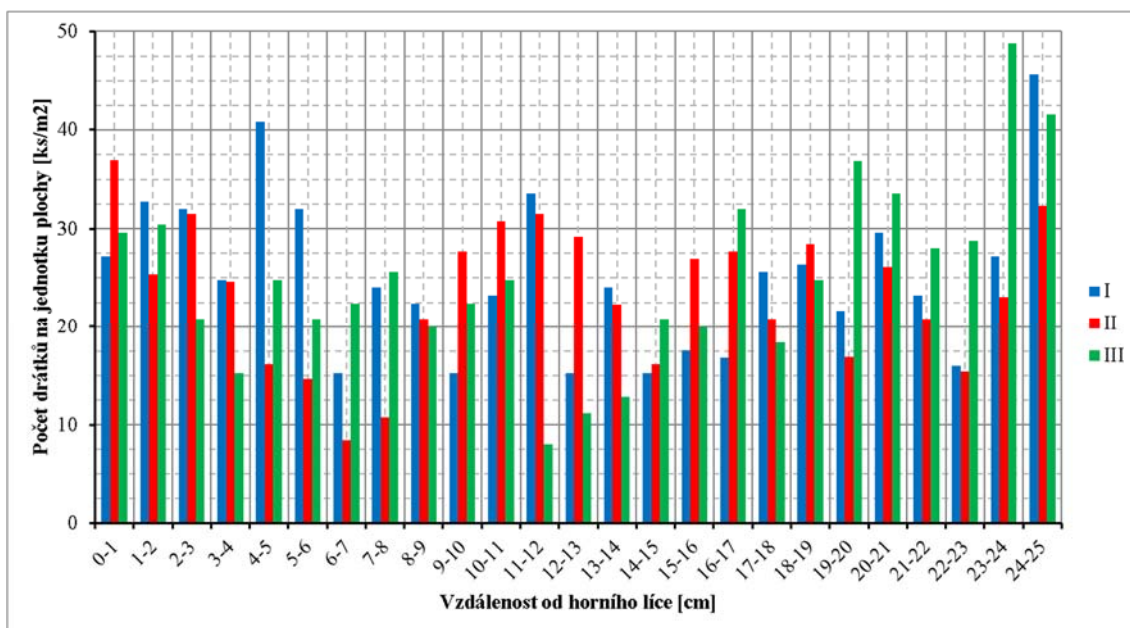
Obr. 77: Schéma značení sektorů na nosníku tvaru I; hodnocení provedeno na cca 60% plochy nosníku



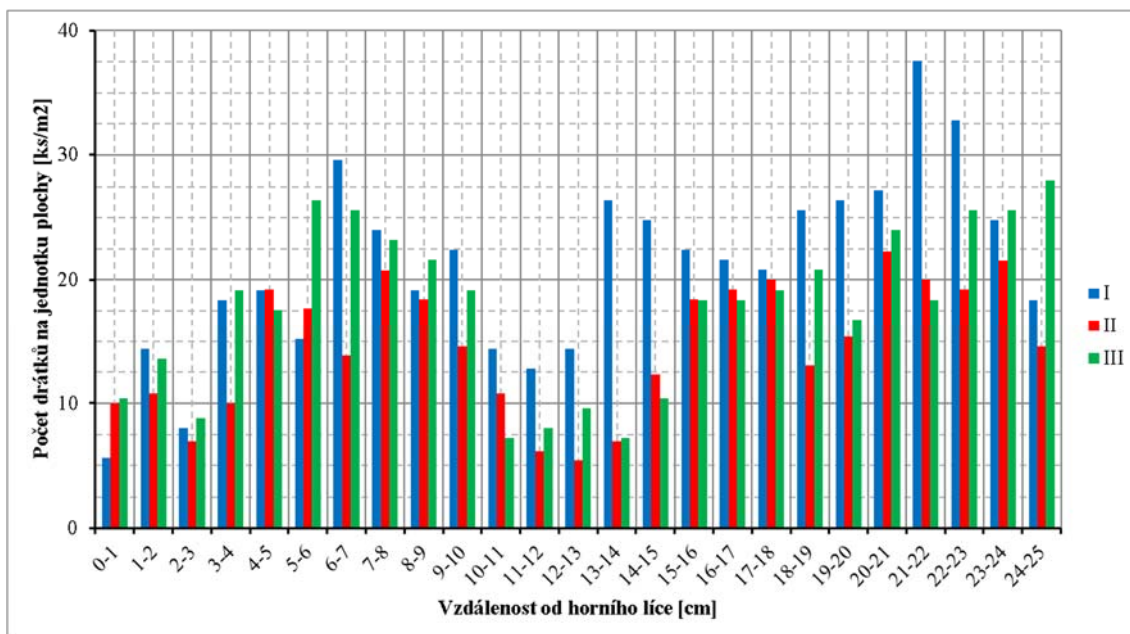
Graf 17: Výsledky kontroly distribuce vláken u nosníku R1-1; maximální zatížení ve válci $F = 12,2$ [kN]; z grafu je patrná relativně homogenní distribuce vláken po výšce průřezu s částečnou segregací ke dnu formy



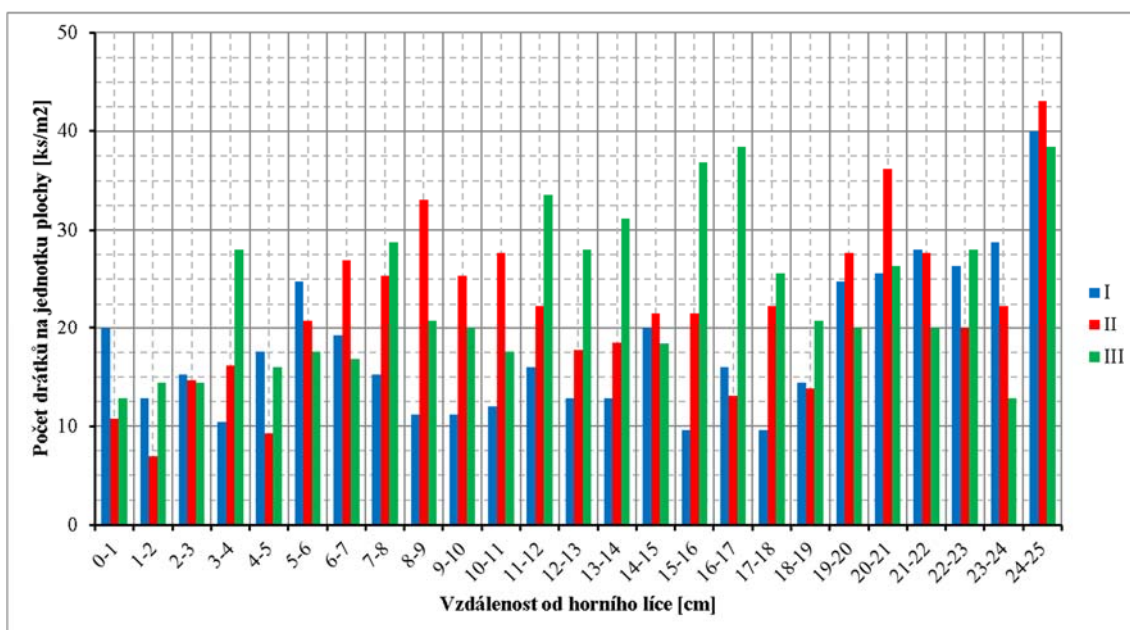
Graf 18: Výsledky kontroly distribuce vláken u nosníku R1-2; maximální zatížení ve válci $F = 11,4$ [kN]; z grafu je patrná relativně homogenní distribuce vláken po výšce průřezu s částečnou segregací ke dnu formy



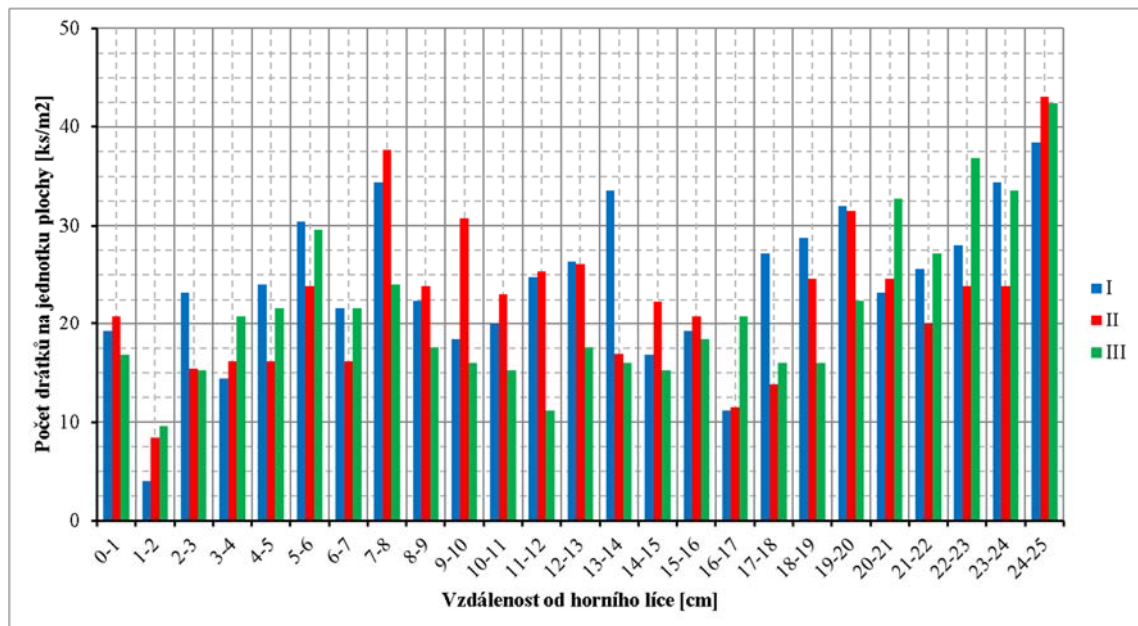
Graf 19: Výsledky kontroly distribuce vláken u nosníku R1-3; maximální zatížení ve válci $F = 13,3$ [kN]; z grafu je patrná relativně homogenní distribuce vláken po výšce průřezu s výraznější segregací ke dnu formy



Graf 20: Výsledky kontroly distribuce vláken u nosníku D1-1; maximální zatížení ve válci $F = 13,3$ [kN]; z grafu patrná segregace vláken ke dnu formy



Graf 21: Výsledky kontroly distribuce vláken u nosníku D1-2; maximální zatížení ve válci $F = 10,1$ [kN]; z grafu patrná segregace vláken ke dnu formy



Graf 22: Výsledky kontroly distribuce vláken u nosníku D1-3; maximální zatížení ve válci $F = 10,5$ [kN]; z grafu patrná segregace vláken ke dnu formy

V následující Tab. 9 je provedeno shrnutí výsledků stanovení distribuce kovových drátků u 6 nosníků tvaru I, které byly vyrobeny ze dvou receptur R1 a D1. Uvedené receptury se lišily v typu použitého kameniva a množství cementu a s ním související i hodnotou vodního součinitele. Nosník R1-1 byl zkoušen cyklickým zatížením. Z tabulky a výše uvedených grafů je patrná závislost mezi únosností a distribucí vláken. U nosníku R1-2 došlo k shluku drátků ve střední části průřezu. Tento shluk disperzní výztuže ovlivnil výsledky regrese po výšce průřezu.

Tab. 9: Souhrn výsledků kontroly homogenity distribuce vláken u nosníků tvaru I

Vlastnost	Jednotka	Označení nosníků					
		R1-1	R1-2	R1-3	D1-1	D1-2	D1-3
Hmotnost nosníku	[kg]	136	137	138	131	132	131
Maximální síla ve válci	[kN]	12,0	11,4	13,3	10,1	10,1	10,5
Průměrná únosnost nosníků R a D	[kN]	12,2			10,2		
Pevnost v tahu za ohybu při vzniku trhliny f_{ct}	[MPa]	9,1	8,6	10,1	7,6	7,6	8
Celkový počet drátků v měřeném průřezu	[ks]	2273	2380	2273	1690	2008	2149
Průměrný počet drátků nosníků R a D	[ks]	2309			1949		

Tab. 9 – pokračování: Souhrn výsledků kontroly homogenity distribuce vláken u nosníků tvaru I

Vlastnost	Jednotka	Označení nosníků					
		R1-1	R1-2	R1-3	D1-1	D1-2	D1-3
Celkový počet drátků ve spodní pásnici (vrstvy 18 25 cm)	[ks]	814	707	814	604	691	776
Průměrný počet drátků ve spodní pásnici (vrstvy 18 – 25 cm) nosníků R a D	[ks]	778			690		
Podíl drátků v dolní pásnici k celkovému počtu drátků ve vyhodnocované oblasti	[%]	35,8	29,7	35,8	35,7	34,4	36,1
Směrodatná odchylka distribuce drátků v dolní pásnici	[ks]	5,3	8,9	5,3	7,3	10,6	9,1
Variační koeficient v dolní pásnici	[%]	13,7	26,3	13,7	25,5	32,3	24,5
Lineární koeficient regrese po výšce průřezu	[-]	0,4047	0,0116	0,1469	0,4283	0,5332	0,5233

Z výše uvedených výsledků únosnosti a distribuce drátků, které jsou shrnuty v Tab. 9 lze konstatovat:

- Nosníky vyrobené z receptury D1 dosahovali v průměru cca o 16,4% nižší únosnosti než nosníky z receptury R1, tj. $F_{\max} = 10,2$ kN proti $F_{\max} = 12,2$ kN. Tento výsledek koresponduje jednak s průměrně nižším množstvím měřených drátků v dolní pásnici (ve vrstvách vzdálených 18 až 25 cm od horního hlazeného okraje) o cca 12% (viz Tab. 9), ale také s nižší reziduální pevností (viz Tab. 8) o cca 8%, která signalizuje nižší soudržnost ocelových vláken s matricí receptury typu D1.
- Z výsledků ohybových zkoušek nosníků a mikroskopické kontroly distribuce vláken po výšce průřezu je dále patrný vliv složení materiálu a tedy jednoznačný vliv použitého typu a granulometrie kameniva, který byl jediným rozdílem ve složení receptury R1 a D1, viz Tab. 7. Rozdíl únosností mezi recepturami je 16,4%.
- Měření distribuce vláken optickou metodou pomocí přesného mikroskopu ukázalo u měřených I nosníků relativně velmi dobrou homogenitu. Přičemž se ukázalo, že receptura R1 je méně náchylná na segregaci vláken ve srovnání s recepturou D1.
- Celkově se v rámci srovnávacího experimentu ukázalo, že receptura R1 vykazuje vhodnější chování nejen z hlediska mechanických parametrů, ale i z hlediska distribuce vláken.

I v rámci tohoto výše popsaného experimentu lze konstatovat, že použitá mikroskopická metoda kontroly distribuce vláken na řezné ploše přináší relevantní informace o distribuci vláken, a že tato metoda je vhodná pro kontrolu rovnoměrnosti distribuce při návrhu, vývoji a testování prvků z UHPC. Zásadní je hodnocení vlivu postupů betonáží, které zásadně ovlivňují orientaci i distribuci a rovnoměrnost rozložení vláken.

10 PŘÍPRAVA A ANALÝZA TĚLES VYTVOŘENÝCH Z VRSTEV S PŘEDEM DEFINOVANÝM OBJEMEM VLÁKEN

Vzhledem k poznatkům vlivu distribuce na ohybovou únosnost desek ztraceného bednění, kdy segregace vláken zásadním způsobem ovlivnila výsledky ohybových zkoušek (viz kapitola 9.1), a výsledkům ohybových zkoušek nosníků tvaru I délky 4 m (viz kapitola 9.2) jsem v laboratořích Kloknerova ústavu vybral jednu z používaných receptur pro UHPC s objemovou dávkou vláken $V_f = 1,5\%$. Tuto recepturu, jejíž mechanické parametry jsou uvedeny v Tab. 5, v kapitole 9.1.1, jsem modifikoval rozdílnou objemovou dávkou drátků. Objemové množství drátků se pohybovalo v rozmezí od 0% do 3%. Vzhledem k úpravě množství disperzní výztuže bylo nutné upravit také dávku ostatních komponent a upravit dávkování vody a plastifikátoru tak, aby byla zachována obdobná zpracovatelnost. Takto upravených vzniklo celkem 5 směsí, které jsou dále označeny Mix 1 až Mix5.

Z jednotlivých směsí byly vyrobeny zkušební tělesa, na kterých byly stanoveny pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [25] a dle ČSN EN 196-1 [101], dynamický modul pružnosti dle ČSN 731371 [106] a pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651+A1 [94] a dle cementářské normy ČSN EN 196-1 [101]. Tato vyrobená tělesa lze označit, vzhledem ke způsobu výroby, jako tělesa homogenní.

Pro výrobu nehomogenních těles, tedy těles s řízenou distribucí vláken, byly použity receptury upravené receptury s rozdílnou dávkou vláken a korekcí dávek ostatních složek. Z těchto směsí byly vyrobeny vrstvené trámce 100 x 100 x 400 mm, u kterých bylo průměrné objemové zastoupení vláken $V_f = 1,5\%$, stejně jako u základní receptury označené jako Mix 3. Vrstvená tělesa, i tělesa z receptury Mix 3, byla zkoušena čtyřbodovým ohybem dle ČSN EN 14488-3 [95].

10.1 VÝROBA HOMOGENNÍCH A VRSTVENÝCH TĚLES

10.1.1 Složení matrice

Podkladem pro výchozí složení matrice se stala skladba matrice použitá pro výrobu desek ztraceného bednění, která obsahovala 1,5% drátků. Na následujícím Obr. 78 jsou zobrazeny jednotlivé komponenty základní receptury Mix 3.



Obr. 78: Pohled na jednotlivé složky receptury Mix 3; na fotografiích zleva mletý křemen, hrubé kamenivo s $D_{\max} = 2$ mm, jemné kamenivo s $D_{\max} = 0,5$ mm, cement CEM I 52,5 R, struska, mikrosilika, ocelové drátky

Toto složení bylo modifikováno do dvou základních variant, které se od sebe lišily použitím typu cementů CEM II/A-S 42,5 R a CEM I 52,5 R. Oba použité cementy byly od jednoho výrobce. Následně byla upravena dávka jednotlivých komponent s ohledem na množství vláken ve směsi. Složení jednotlivých receptur je uvedeno v následující Tab. 10. Objemové zastoupení komponent je stejné jak pro recepturu se směsným cementem CEM II/A-S 42,5 R, tak i pro recepturu s portlandským cementem CEM I 52,5 R.

Tab. 10: Složení matic použitých pro homogenní i vrstvená tělesa

Receptura \ Složka	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
Cement	22,9%	22,7%	22,6%	22,5%	22,2%
Příměsi fungující jako mikroplnivo (f)					
Vysokopeční struska	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%
Mikrosilika	4,6%	4,6%	4,5%	4,5%	4,5%
Mletý křemen	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%
Celkový objem příměsí (f)	9,5%	9,4%	9,3%	9,3%	9,2%
Drátky	0,0%	1,0%	1,5%	2,1%	3,1%
Směs kameniva	47,9%	47,4%	47,2%	47,0%	46,4%
Superplastifikátor typu PCE	3,9%	3,8%	3,8%	3,8%	4,7%
voda	16,2%	16,1%	16,0%	15,9%	15,8%
w/c	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
w/b	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24

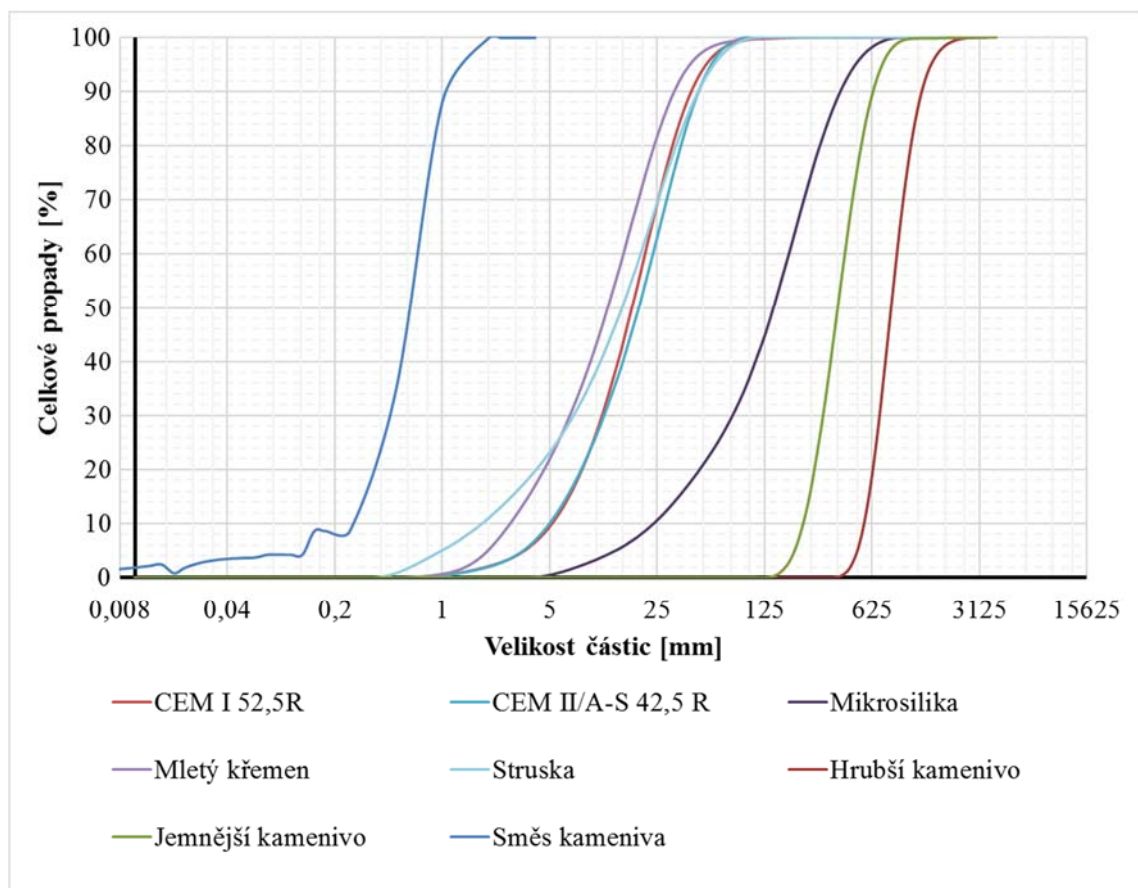
Pojivový součinitel w/b byl stanoven dle Rov 6, která je uvedena v kapitole 4.5. V následující Tab. 11 jsou uvedeny základní parametry použité disperzní výztuže.

Tab. 11: Vlastnosti použité disperzní výztuže – kovových drátků

Typ	Materiál	L_f [mm]	D_f [mm]	E_f [GPa]	f_t [MPa]
BASF Masterfiber® 482	ocel ¹⁾	13	0,2	200	≥ 2200

Poznámka: ¹⁾ povrchová úprava drátků tvořená mosazí

Kamenivo bylo složeno ze dvou frakcí v poměru 66:34. Hrubší kamenivo mělo maximální velikost zrna 2 mm, jemnější kamenivo mělo maximální velikost zrna 0,5 mm. V obou případech se jednalo o tříděný křemenný sklářský pytlovaný písek, který byl dodán stejným dodavatelem. Následující Graf 23 zobrazuje křivky zrnitosti použitých materiálů, kdy na svislé ose jsou uvedeny celkové propady v [%] a na vodorovné ose v logaritmickém měřítku je zobrazena velikost částic.

**Graf 23:** Křivka zrnitosti použitých materiálů

10.1.2 Postup míchání

Do laboratorní míchačky byla nejprve dávkována směs kameniva, dále cement, mikrosilika, struska a mletý křemen. Všechny suché směsi byly následně promíchány po dobu 3 minut. Po homogenizaci suchých složek byla přidána voda a plastifikátor a míchání pokračovalo dalších 5 minut. Dávkování vody a plastifikátoru probíhalo současně po dobu cca 30 sec. Od přidání vody do směsi probíhalo míchání 5 minut.

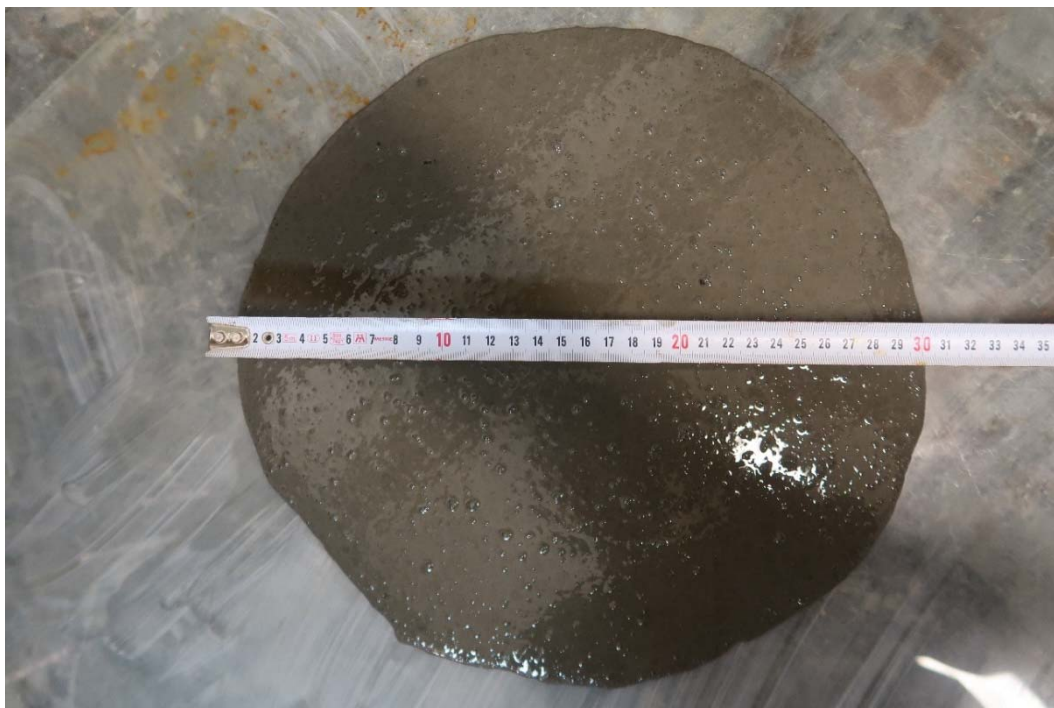
Po této době byla směs ručně promíchána tak, aby byly odstraněny jemné částice, které se zachytily na lopatkách a na stěně nádoby. Následně probíhalo míchání směsi, do které se dávkovaly ocelové drátky. Pro recepturu Mix 1 a Mix 2 trvalo míchání 2 minuty, pro zbylé receptury bylo míchání prodlouženo na 3 minuty z důvodu vyššího dávkování drátků, které byly vsypávány do míchačky ručně tak, aby netvořily shluky.

10.1.3 Výsledky konzistence čerstvé směsi dle ČSN EN 1015-3

Stanovení konzistence čerstvé směsi UHPC bylo provedeno pomocí Haggermanova kužílku, viz kapitola 5.1.2. Kužílek byl umístěn na skleněnou desku, která byla předem namočená malým množstvím vody. Po naplnění kužílku jsem zarovnal povrch a plynulým pohybem svisle vzhůru jsem kužel zvedl. Materiál, který byl na stěnách kužílku, jsem pomocí špachtle odstranil. Měření konzistence proběhlo po 60 sekundách od naplnění kužílku (měření proběhlo v čase od 10 do 11 minut od přidání vody a plastifikátoru do směsi). Výsledky konzistence pro jednotlivé typy cementů a receptury jsou uvedeny v následující Tab. 12 a na následujícím Obr. 79 je zachycen výsledek zkoušky konzistence stanovené pomocí metody sednutí-rozlítím pomocí Haggermanova kužílku pro recepturu bez vláken.

Tab. 12: Průměrné hodnoty rozlití čerstvé směsi UHPC s rozdílnou dávkou vláken; zkouška provedena Haggermanovým kužílkem

Receptura	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
Dávka vláken	0%	1%	1,5%	2%	3%
CEM II/A-S 42,5R	295	280	270	275	225
CEM I 52,5R	275	260	250	230	190



Obr. 79: Výsledek měření konzistence čerstvé směsi bez vláken (Mix 1); zkouška provedena malým Haggermanovo kužílkem

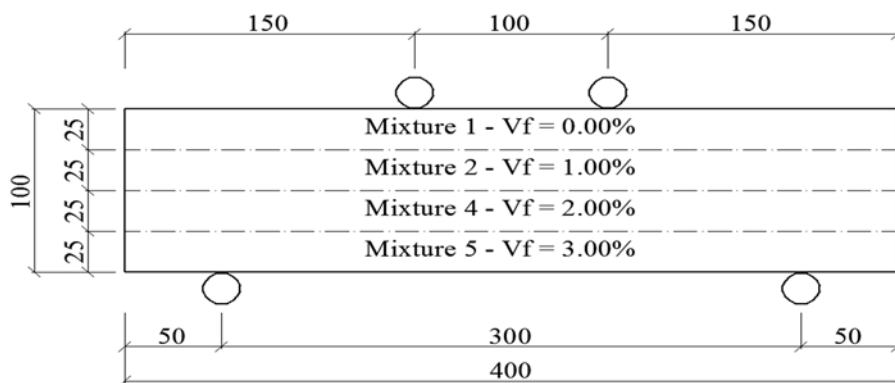
Z výše uvedené tabulky Tab. 12 vyplývá, že konzistence čerstvé směsi UHPC s rostoucím objemovým zastoupením vláken klesá. Tento vliv byl očekáván a vedl k další experimentální činnosti věnující se vlivu disperzní výztuže na konzistenci směsi a výsledné parametry. Popis experimentu je uveden v kapitole 11.

10.1.4 Výroba zkušebních těles

Z uvedených receptur byla vyrobena homogenní tělesa, tedy tělesa, která měla v celém objemu pouze jednu recepturu a dále byla vyrobena tělesa vrstvená. Při výrobě homogenních těles byla také sledována zpracovatelnost směsi pomocí Haggermanova kužilku a v případě, kdy výsledky rozlití neodpovídaly předpokladům, byla upravena dávka vody a plastifikátoru tak, aby pro receptury Mix 1 až Mix 4 byla dodržena stejná konzistence. U receptury Mix 5 byla dávka vody a plastifikátoru upravována v několika krocích, kdy byla sledována nejen výsledná konzistence čerstvé směsi, ale také stabilita směsi vůči segregaci vláken a odměšování vody s jemnými částicemi. Z těchto důvodů nebyla výsledná dávka vody a plastifikační přísady upravována pro dosažení obdobné konzistence jako u receptur Mix 1 až Mix 4.

Vrstvená tělesa byla vyrobena ve formě trámců 100 x 100 x 400 mm. Výroba probíhala postupným litím jednotlivých směsí ve vrstvách vysokých 25 mm. Do tažené oblasti trámce byla použita směs Mix 5 ($V_f = 3\%$), dále pak následovala směs Mix 4 ($V_f = 2\%$), Mix 2 ($V_f = 1,5\%$) a u horního povrchu byla použita receptura bez vláken, čili Mix 1. Průměrné objemové i hmotnostní množství použité disperzní výztuže u vrstvených těles odpovídalo množství u referenční sady Mix 3. Tato optimalizace byla zvolena především z hlediska finančních nákladů, kdy disperzní výztuž je jednou z nejdražších komponent, která je do směsi přidávána.

Mezi jednotlivými vrstvami byl dodržován interval 20 až 25 minut, čili interval odpovídající možností výroby záměsí z UHPC v běžném provozu betonáren. Souběžně s tímto neméně důležitým parametrem, je zaručena nejen dobrá zpracovatelnost směsi, ale také u směsi nedochází k zavadnutí povrchu. Lze tedy říci, že jednotlivé směsi byly ukládány do čerstvé předchozí směsi a bylo tak zajištěno i spolupůsobení mezi jednotlivými vrstvami. Schéma vrstvených těles je uvedeno na následujícím Obr. 80.



Obr. 80: Schéma vrstveného trámce a jednotlivých vrstev

Tělesa byla vyráběna do ocelových forem bez jakékoliv vibrace. Horní povrch byl upraven ocelovým hladítkem a následně ošetřen prostředkem proti nadměrnému odparu vody. Po zavaznutí povrchu byla vyrobená a ošetřená tělesa přikryta PE fólií. Vyrobené vzorky byly ponechány 24 hodin zakryté ve formách v normálním laboratorním prostředí. Po 24 hodinách zrání bylo provedeno vyjmutí vzorků z ocelových forem. Popsané vzorky byly dále uloženy po dobu 27 dní do vodního prostředí dle ČSN EN 12390-2 [98].

10.2 ZKOUŠKY HOMOGENNÍCH A VRSTVENÝCH TĚLES

V rámci mechanických zkoušek byla stanovena u homogenních těles pevnost UHPC v tlaku na krychlích o hraně 100 mm vyrobených do forem a dále na krychlích, po zkoušce pevnosti v ohybu, které vznikly odřezáním pilou s diamantovým kotoučem z koncové oblasti trámce rozměru 100 x 100 x 400 mm. Zkoušky pevnosti v tlaku byly provedeny dle ČSN EN 12390-3 [25]. Po zkoušce v ohybu na malých trámečcích rozměru 40 x 40 x 160 mm byla provedena zkouška pevnosti v tlaku dle normy na zkoušení cementu ČSN EN 196-1 [101]. Výsledky pevnosti v tlaku pro oba typy použitého cementu jsou shrnuty v následující Tab. 13.

Tab. 13: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku f_c [MPa] pro receptury s různou dávkou vláken a různým typem cementu

Typ cementu	CEM II/A-S 42,5 R			CEM I 52,5R		
	krychle o hraně 100 mm	zlomek trámce o hraně 100 mm	zlomek trámečku o hraně 40 mm	krychle o hraně 100 mm	zlomek trámce o hraně 100 mm	zlomek trámečku o hraně 40 mm
Mix 1	113,3	108,5	114,1	99,7	92,1	108,1
Mix 2	0,0	0,0	145,8	0,0	0,0	126,9
Mix 3	144,7	146,0	155,5	118,3	114,3	129,0
Poměr Mix 3 / Mix 1	1,28	1,35	1,36	1,19	1,24	1,19
Mix 4	0,0	0,0	166,6	0,0	0,0	145,0
Mix 5	168,3	166,1	185,4	127,1	130,0	148,6
Poměr Mix 5 / Mix 1	1,49	1,53	1,62	1,27	1,41	1,37

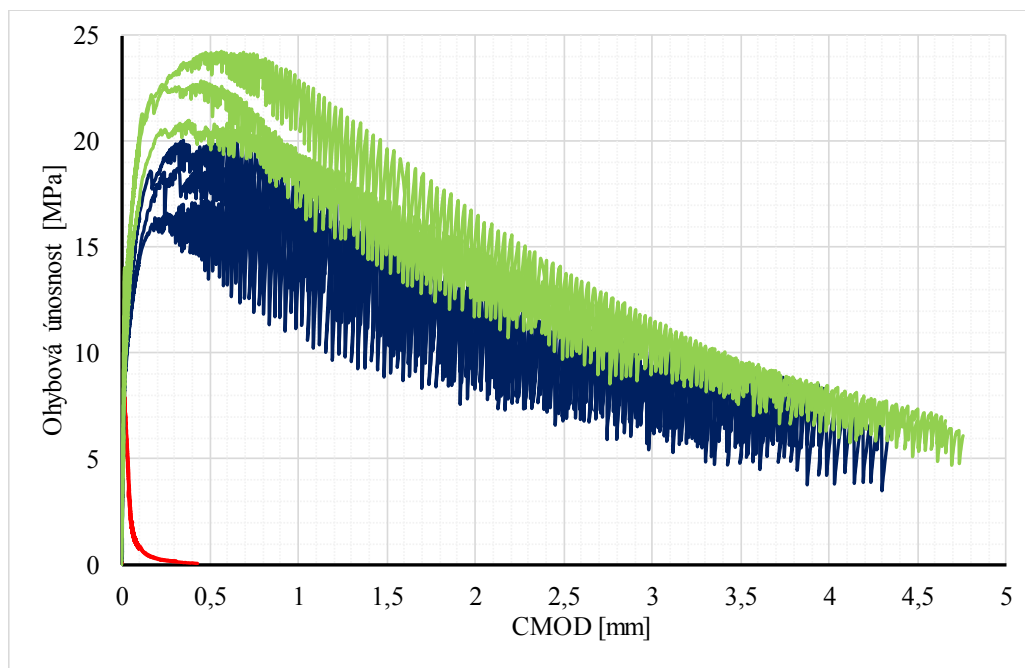
Z uvedených výsledků je patrný nejen vliv velikosti zkušebního tělesa na výsledky zkoušky pevnosti v tlaku, ale také vliv typu cementu na výslednou pevnost. U směšného cementu CEM II/A-S 42,5 R bylo dosaženo vyšších pevností v tlaku. Dále je patrný vliv velikosti zkušebního tělesa, kdy rozdíl mezi pevností v tlaku stanovenou na krychli o hraně 100 mm a zlomku trámečku o hraně 40 mm pro referenční recepturu Mix 3 pohybuje kolem 8%.

Další mechanická vlastnost, která byla ověřována, byla pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 14651+A1 [94]. Zkoušky pevnosti v tahu ohybem byly provedeny na trámcích 100 x 100 x 400 mm a na trámečkách 40 x 40 x 160 mm. Na obou typech těles byl proveden vrub do hloubky $h_0 = h/6$. Uspořádání jednotlivých zkoušek je popsáno v kapitole 6.3.1. Vzdálenost podpor byla 300 mm pro velké trámece a 120 mm pro malé trámečky. Zatěžování velkých trámů bylo řízeno pomocí snímače rozevřením trhliny CMOD, kdy do rozevření trhliny CMOD = 0,1 mm byla rychlost 0,05 mm/min a po této hodnotě rozevření se rychlost zvedla na 0,2 mm/min. U malých trámečků neumožňoval stroj řízení zkoušky pomocí CMOD snímače, ale pouze posunem příčnicku. Z tohoto důvodu byly hodnoty rychlosti zatěžování přepočteny dle vztahů Rov 19 a Rov 20, které jsou uvedeny v kapitole 6.3.1.1. Graf 24 a Graf 25 uvádějí výsledky ohybových zkoušek na vybraných trámcích 100 x 100 x 400 mm. V následující Tab. 14 jsou shrnuty výsledky ohybových zkoušek.

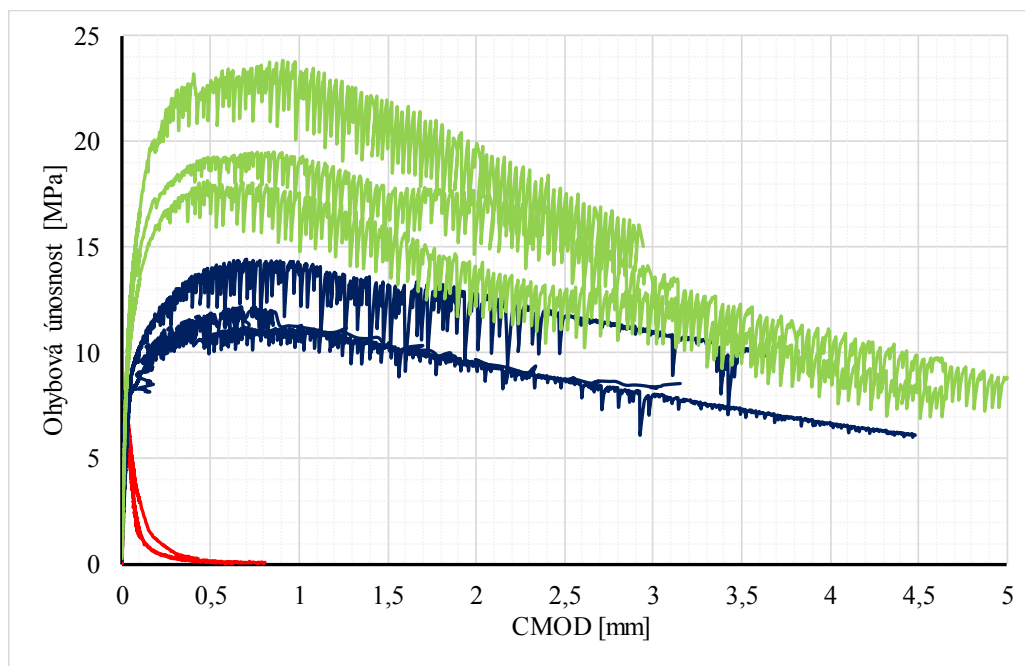
Tab. 14: Výsledky zkoušek pevnosti v tahu ohybem f_{ct} [MPa] na tělesech s vrubem

Typ cementu Receptura	CEM II/A-S 42,5 R		CEM I 52,5R	
	trámec	trámeček	trámec	trámeček
Mix 1	7,1	12,5	8,0	15,3
Mix 2	0,0	15,1	0,0	21,9
Mix 3	12,7	26,2	18,7	23,3
Poměr Mix 3 / Mix 1	1,79	2,10	2,34	1,52
Mix 4	0,0	33,9	0,0	32,8
Mix 5	16,2	35,9	22,9	34,5
Poměr Mix 5 / Mix 1	2,28	2,87	2,86	2,25

Z uvedených výsledků je patrný nejen očekávaný nárůst pevnosti v tahu za ohybu, ale také vliv použitého typu cementu, kdy u malých těles, pro jejichž výrobu byl použit portlandský cement CEM I 52,5 R bylo dosaženo vyšších hodnot ohybových pevností.



Graf 24: Vybrané výsledky ohybové zkoušky trámců 100 x 100 x 400 mm; zkouška provedena dle ČSN EN 14651+A1 [94]; tělesa vyrobená z cementu CEM II/A-S 42,5 R; červená barva – receptura Mix 1 (bez vláken); modrá barva – receptura Mix 3 ($V_f = 1,5\%$); zelená barva – receptura Mix 5 ($V_f = 3\%$)



Graf 25: Vybrané výsledky ohybové zkoušky trámců 100 x 100 x 400 mm; zkouška provedena dle ČSN EN 14651+A1 [94]; tělesa vyrobená z cementu CEM I 52,5 R; červená barva – receptura Mix 1 (bez vláken); modrá barva – receptura Mix 3 ($V_f = 1,5\%$); zelená barva – receptura Mix 5 ($V_f = 3\%$)

Před provedením vrubu na malých trámečcích byl stanoven dynamický modul pružnosti pomocí ultrazvukové impulsové metody dle ČSN EN 731371 [106]. Měření proběhlo pomocí ultrazvukového přístroje Matest se sondami, jejichž vysílací

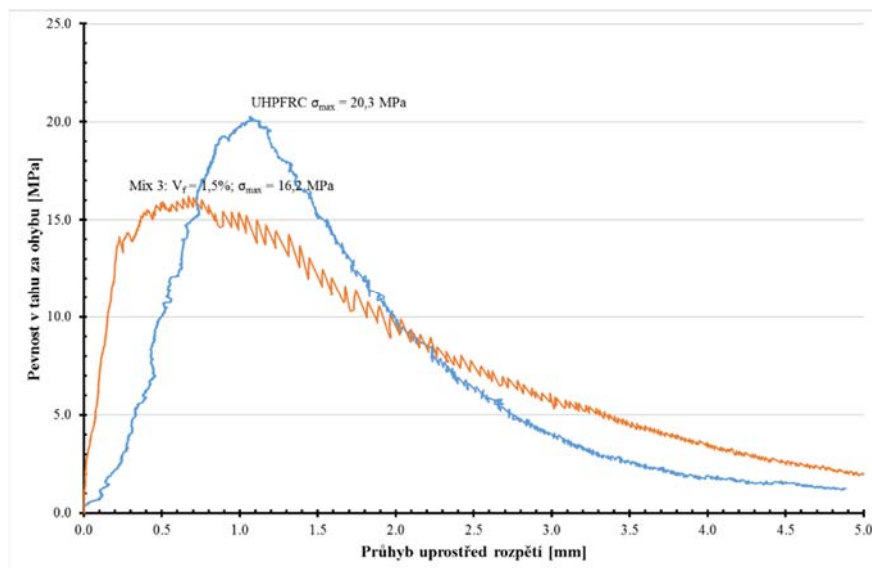
a přijímací frekvence je 55 kHz. Výsledkem měření ultrazvukovou metodou pomocí ultrazvuku Matest je doba průchodu UZ paprsku zkušebním tělesem. Měření probíhalo na tělesech, která byla vyjmuta z vodního ošetřování a povrchově osušena. Následně byly pomocí posuvného měřítka změřeny rozměry trámečků a následně byly trámečky zváženy. Z naměřené hmotnosti a získaných rozměrů byla stanovena objemová hmotnost. Sondy byly přikládány vždy na čela trámečků o hraně 40 mm. Umístění sond je ilustrativně zobrazeno na Obr. 44 v kapitole 6.2.2. Pro každý trámeček byla provedena tři měření doby průchodu UZ paprsku a jednotlivé hodnoty byly zaznamenány. Ze získaných hodnot byl stanoven dynamický modul E_{cu} dle Rov 15 v kapitole 6.2.2. Výsledky stanovení dynamického modulu jsou uvedeny v následující Tab. 15.

Tab. 15: Výsledky stanovení dynamického modulu E_{cu} [MPa] ultrazvukovou impulsovou metodou

Typ cementu	CEM II/A-S 42,5 R		CEM I 52,5R	
	Dynamický modul E_{cu} [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Dynamický modul E_{cu} [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Mix 1	52 600	2 390	51 800	2 290
Mix 2	52 700	2 410	54 200	2 390
Poměr Mix 2 / Mix 1	100,2	100,8	104,6	104,4
Mix 3	52 600	2 420	52 300	2 370
Poměr Mix 3 / Mix 1	100,0	101,3	101,1	103,5
Mix 4	53 900	2 470	55 100	2 440
Poměr Mix 4 / Mix 1	102,5	103,3	106,4	106,6
Mix 5	55 100	2 490	54 100	2 480
Poměr Mix 5 / Mix 1	104,8	104,2	104,4	108,3

Pro stanovení součinitele rovnoměrnosti prostředí k , který vstupuje do výpočtu dynamického modulu pružnosti je potřeba znát Poissonovu konstantu, která se pro UHPC pohybuje kolem hodnoty $\nu = 0,2$ [-] [7, 127]. Z uvedených výsledků dynamického modulu je patrná závislost dávky vláken a hodnot E_{cu} , kdy se vzrůstající dávkou vláken narůstá i hodnota dynamického modulu. Hodnota dynamického modulu stanovená pomocí ultrazvukové metody má informativní charakter a ve statických výpočtech se s ní běžně neuvažuje.

U vrstvených těles byla stanovena pevnost v tahu ohybem dle ČSN P 732454 [109], dále pevnost v tlaku na zlomcích trámů po ohybové zkoušce dle ČSN EN 12390-3 [25]. Při zkoušce pevnost v tahu ohybem byla vzdálenost podpor 300 mm a síly byly umístěny ve třetinách rozpětí. Při ohybové zkoušce byla tělesa do zkušebního lisu umístěna shodně s postupem výroby, tzn. v tažené oblasti byla použita receptura Mix 5 s dávkou vláken $V_f = 3\%$. Průměrné výsledky ohybových zkoušek těles s řízeným nehomogenním zastoupením vláken po výšce trámů a homogenních trámů zobrazuje Graf 26, který byl publikován na konferenci doktorského studia Juniorstav 2015 [128].



Graf 26: Graf závislosti pevnost v tahu za ohybu a průhybu uprostřed rozpětí pro vrstvené trávce označené jako UHPFRC a homogenní trávce z receptury Mix 3 ($V_f = 1,5\%$) s cementem CEM II/A-S 42,5 R

Na základě získaných výsledků mechanických zkoušek, které jsou uvedeny v této kapitole lze konstatovat tyto závěry:

- V rámci výše popsaného experimentu se podařilo vytvořit a odzkoušet prvek (trávce) s vrstvami jemnozrnného materiálu typu UHPC. Ukazuje se, že vytváření takto vrstvených prvků je realizovatelné.
- Vytvořenými pracovními spárami mezi jednotlivými vrstvami neprocházejí vlákna. V rámci experimentů se však neprokázal vliv na riziko delaminace prvků v těchto spárách [129, 130].
- Při stejném celkovém průměrném objemu dávkování vláken v prvku složeném z vrstev s různou dávkou vláken a prvku konvenčně vyrobeném s homogenní dávkou vláken, které odpovídalo receptuře Mix 3, se podařilo zvýšit výslednou pevnost v tahu ohybem přibližně o 25%. Uspořádání zkoušky odpovídalo uspořádání čtyřbodovému ohybu (viz kap. 6.3.1.2).
- Výsledky pevností v tlaku a v tahu závisí nejen na dávce vláken, ale také na velikosti zkušebního tělesa a typu použitého cementu. Zvýšení pevnosti v tlaku zvýšením objemového zastoupení vláken byl jedním z očekávaných výstupů zkoušek. Dávkování vláken $V_f = 1,5\%$ objemu (Mix 3) zvýšilo pevnosti v tlaku dle typu cementu a tvaru zkušebního tělesa 1,2 až 1,4 x ve srovnání s matricí bez vláken (Mix 1). Dávkování vláken $V_f = 3\%$ objemu (Mix 5) zvýšilo pevnosti v tahu za ohybu dle typu cementu a tvaru zkušebního tělesa 1,3-1,6 x ve srovnání s matricí bez vláken (Mix 1) viz Tab. 13.
- Zvýšení pevnosti v tahu za ohybu zvýšením objemového zastoupení vláken byl jedním z očekávaných výstupů zkoušek. Dávkování vláken $V_f = 1,5\%$ objemu (Mix 3) zvýšilo pevnosti v tahu za ohybu dle typu cementu a tvaru zkušebního tělesa 1,5 až 2,3 x ve srovnání s matricí bez vláken (Mix 1). Dávkování vláken $V_f = 3\%$ objemu (Mix 5)

zvýšilo pevnosti v tahu za ohybu dle typu cementu a tvaru zkušebního tělesa 2,3-2,9 x ve srovnání s matricí bez vláken (Mix 1) viz Tab. 14.

- S vyšší dávkou krátkých drátků BASF Masterfiber ®482 je u těles s homogenním zastoupením disperzní výztuže dosahováno nejen vyšších tahových a tlakových pevností, ale také je dosaženo vyšších hodnot objemových hmotností a tedy i dynamického modulu. Poměrově dochází ke zvýšení v řádu několika procent (viz Tab. 15).

Souhrnně lze tedy konstatovat, že technologie vrstvení UHPC s různou dávkou vláken je proveditelná a při vhodném uspořádání je možné uspořít dávkování vláken při zachování a dosažení požadovaných mechanicko-fyzikálních parametrů.

11 TECHNOLOGICKÉ VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ ZPRACOVATELNOST SMĚSI A DISTRIBUCI VLÁKEN

Ve výše uvedené kapitole 10 byl popsán vliv distribuce disperzní výztuže na výsledné lomové parametry UHPC. U desek ztraceného bednění (kapitola 9.1) bylo prokázáno, že segregace vláken ke dnu formy má zásadní vliv na ohybovou únosnost. V souvislosti s tímto závěrem byl sledován také vliv množství disperzní výztuže na zpracovatelnost čerstvé směsi UHPC a dále byl zkoumán vliv množství vody a plastifikační přísady na homogenitu distribuce vláken.

11.1 KONZISTENCE ČERSTVÉ SMĚSI

Zpracovatelnost čerstvé směsi UHPC ovlivňuje způsob výroby prvků a jejich dimenze díky svému tekutému chování, které je obdobné i pro samozhutnitelné betony. Díky vysoké tekutosti směsi lze vyrábět subtilní a strukturální konstrukce a konstrukční prvky. Jako příklad jsou v práci uvedeny Stéla urnové kobky (kapitola 2.2.2), lávka pro pěší ve Vrapicích (kapitola 2.1.6), zastřešení atletického stadionu Jean Bouin Stadium's (kapitola 3.3.2) a fasádní prvky Muzea evropských a středozemních civilizací MuCEM (kapitola 3.3.4). Tekutost směsi je ovlivněna zejména složením receptury a množstvím a typem disperzní výztuže. V následujících kapitolách 0 a 11.1.2 je popsán vliv kovových vláken na zpracovatelnost směsi. Složení receptury vycházelo z receptury Mix 3 s objemovou dávkou $V_f = 1,5\%$ ocelových vláken BASF Masterfiber ® 482, které je uvedeno v předcházející kapitole 10.1.1. Oproti uvedené receptuře byla zvýšena dávka vody o 6% a dávka plastifikátoru o 25%. Zkoušky byly provedeny pouze se směsným cementem CEM II/A-S 42,5 R.

Experimentální část je rozdělena do dvou částí. První část se věnuje vlivu konzistence čerstvé směsi přidáváním disperzní výztuže a druhá část se věnuje ovlivnění výsledků pevností při zachování obdobné konzistence i u vyšších dávek vláken.

11.1.1 Vliv množství disperzní výztuže na zpracovatelnost (SF)

Ve výše uvedené kapitole 10 je popsán a prokázán vliv množství disperzní výztuže na výsledné mechanické vlastnosti UHPC. Tyto výsledky byly podnětem k dalšímu zkoumání vlivu množství disperzní výztuže nejen na pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu, ale také v souvislosti s vlivem na zpracovatelnost čerstvé směsi, která ovlivňuje tvar bednění a způsob výroby prvků. V této části kapitoly je popsán vliv množství disperzní výztuže na zpracovatelnost čerstvé směsi a výsledné parametry.

Základní recepturou, u které byl sledován vliv disperzní výztuže byla receptura Mix 3, jejíž složení je uvedeno v kapitole 10.1. V rámci práce byl použit směsný cement CEM II/A-S 42,5 R, se kterým bylo dosaženo sice nižších ohybových únosností [131], ale vyšších tlakových pevností. V níže uvedené

Tab. 16 jsou označeny receptury SF0 až SF270, které byly v rámci práce připraveny, a u kterých byla stanovena závislost dávky vláken na zpracovatelnost čerstvé směsi a výsledné mechanické parametry.

Tab. 16: Označení zkoumaných receptur (SF) včetně dávky vláken

Označení receptury	SF0	SF30	SF60	SF90	SF120	SF150	SF180	SF210	SF240	SF270
Dávka vláken [kg/m ³]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
Objemová dávka vláken V _f [%]	0,0%	0,4%	0,8%	1,1%	1,5%	1,9%	2,3%	2,7%	3,1%	3,4%
Dávka PCE k hm. cementu	7,9%									
w/c [%]	23,8%									

Všechny uvedené receptury se lišili pouze dávkou ocelových drátků, ostatní komponenty, včetně dávky vody a plastifikační přísady, zůstaly beze změny. Oproti receptuře Mix 3 byla vyšší dávka vody a plastifikační přísady.

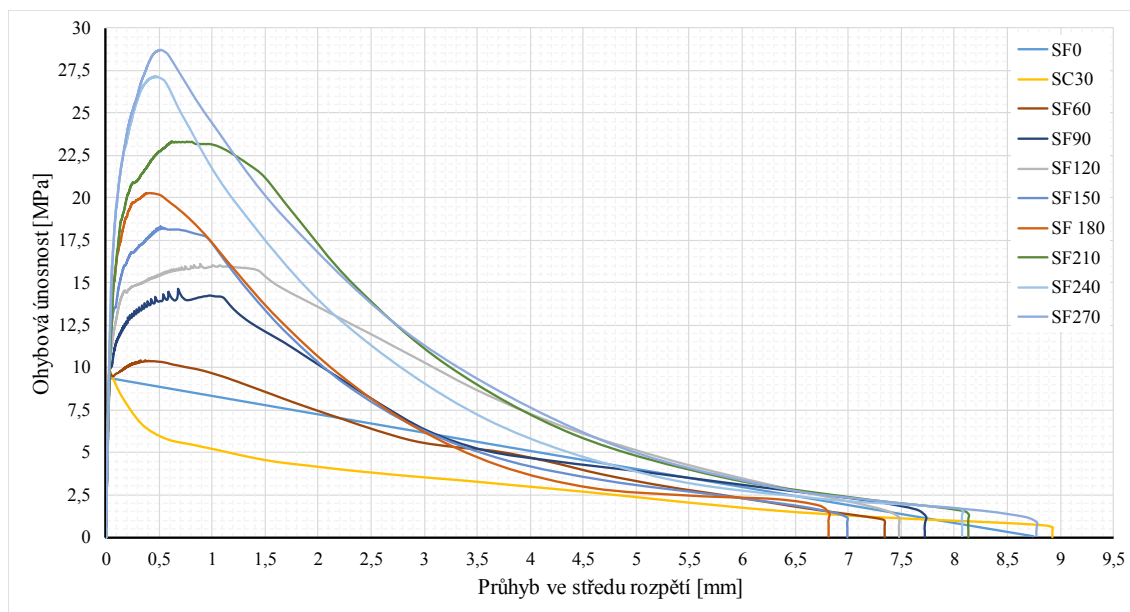
V následující tabulce Tab. 17 jsou uvedeny výsledky pevnosti v tahu ohybem, v tlaku a objemové hmotnosti ztvrdlého UHPC stanovené na trámečcích 40 x 40 x 160 mm, dále výsledky maximální ohybové únosnosti trámů 70 x 70 x 300 mm a výsledky měření konzistence čerstvé směsi UHPC. Na trámečcích byly zkoušky provedeny dle ČSN EN 196-1 [101] a na trámečcích dle ČSN P 73245 [109].

Tab. 17: Výsledky stanovení konzistence pomocí Haggermanova kuželu a vlastností ztvrdlého UHPC po 28 dnech

Označení receptury	SF0	SF30	SF60	SF90	SF120	SF150	SF180	SF210	SF240	SF270
Pevnost v tahu ohybem na trámečcích f_{ct} [MPa]	18,7	18,9	20,0	23,8	26,0	29,7	32,1	33,9	35,6	37,2
Změna oproti SF0	1,00	1,01	1,07	1,28	1,39	1,59	1,72	1,82	1,91	1,99
Pevnost v tahu ohybem na velkých trámčích f_{ct} [MPa]	9,4	9,9	10,4	14,6	16,1	18,3	20,3	23,3	27,2	28,7
Změna oproti SF0	1,00	1,05	1,11	1,55	1,71	1,95	2,16	2,48	2,89	3,05
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	117,5	118,4	135,2	144,1	139,9	152,2	157,2	150,7	164,2	168,5
Změna oproti SF0	1,00	1,01	1,15	1,23	1,19	1,30	1,34	1,28	1,40	1,43
Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	2280	2340	2330	2330	2350	2390	2380	2440	2410	2470
Změna oproti SF0	1,00	1,03	1,02	1,02	1,03	1,05	1,04	1,07	1,06	1,08
Průměrné hodnoty rozlití SF [mm]	315	300	315	300	290	270	275	260	220	205
Změna oproti SF0	1,00	0,95	1,00	0,95	0,92	0,86	0,87	0,83	0,70	0,65

Z tabulky vyplívá, že s vyšší dávkou vláken je dosahováno vyšších mechanických vlastností, ale zároveň klesá zpracovatelnost stanovovaná pomocí Haggermanova kužilku. U receptury SF270 byla pozorována tvorba shluků disperzní výztuže.

Následující Graf 27 popisuje závislost ohybové únosnosti na průhybu trámčů rozměru 70 x 70 x 300 mm. Zkouška byla provedena dle ČSN P 732452 [109], tedy v uspořádání čtyřbodového ohybu se vzdáleností podpěr 210 mm a zatěžovacími břemeny umístěnými ve třetinách rozpětí.



Graf 27: Ohybová únosnost trámců 70 x 70 x 300 mm

Z grafu je patrný pozitivní vliv vyšších dávek drátků na ohybovou únosnost. Při bližším zkoumání lze zjistit, že ohybová únosnost je obdobná pro receptury SF0, SF30 a SF60. Z výsledků ohybových zkoušek trámců 70 x 70 x 300 mm je patrné, že únosnost receptury bez vláken je 9,3 MPa, u receptury SF 120 je maximální únosnost 18,7 MPa a při dávce 270 kg/m³ je ohybová únosnost 28,7 MPa.

11.1.2 Zachování zpracovatelnosti při vyšší dávce vláken (SFR)

Další experimentální částí bylo stanovit vliv konstantní zpracovatelnosti při různé objemové dávce vláken na výsledné mechanické vlastnosti. Jako konstantní hodnota rozliti byla zvolena hodnota 300 mm. Složení směsi bylo stejné jako u receptury Mix 3 s tím rozdílem, že dávka plastifikační přísady byla zvýšena o 10% a dále byla konzistence upravována dávkou vody. Dávka drátků, vody a plastifikátoru je uvedena v následující Tab. 18.

Tab. 18: Označení receptur, dávek vláken, vody a plastifikační přísady

Označení receptury	SFR0	SFR60	SFR120	SFR180	SFR240	SFR300
Dávka vláken [kg/m ³]	0	60	120	180	240	300
Objemová dávka vláken V_f [%]	0,0%	0,8%	1,5%	2,3%	3,1%	3,8%
Dávka PCE k hm. cementu	8,6%	8,6%	8,6%	8,6%	8,6%	8,6%
Změna dávky vody oproti receptuře SFR0 [%]	0	3,0	6,1	9,1	18,2	27,3
w/c [%]	23,6%	24,3%	25,0%	25,7%	27,9%	30,0%

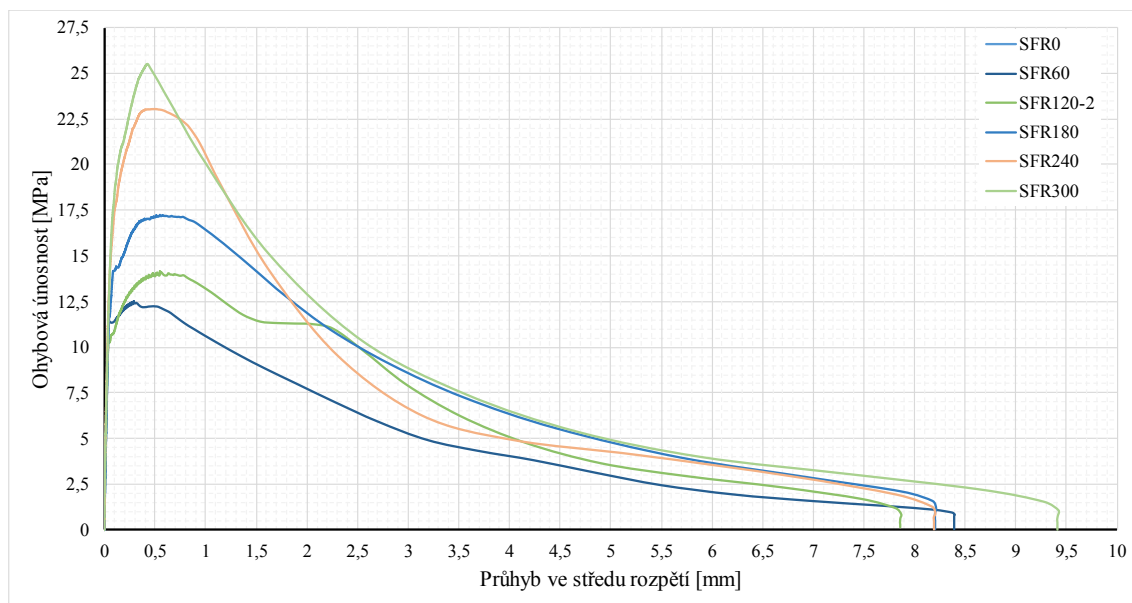
V následující tabulce Tab. 19 jsou uvedeny výsledky pevnosti v tahu ohybem, v tlaku a objemové hmotnosti ztvrdlého UHPC ve stáří 28 dní od výroby stanovené na malých trámečcích 40 x 40 x 160 mm, dále výsledky maximální ohybové únosnosti velkých trámů 70 x 70 x 300 mm a výsledky měření konzistence čerstvé směsi UHPC s různým objemovým zastoupením drátů. Na trámečcích byly zkoušky provedeny dle ČSN EN 196-1 [101] a na trácích dle ČSN P 73245 [109].

Tab. 19: Výsledky vlastností ztvrdlého UHPC na malých trácích při konstantní zpracovatelnosti

Označení receptury	SFR0	SFR60	SFR120	SFR180	SFR240	SFR300
Pevnost v tahu ohybem na trámečcích f_{ct} [MPa]	21,2	23,2	29,6	33,1	33,3	38,0
Poměr k SFR0	1,00	1,10	1,40	1,56	1,57	1,80
Pevnost v tahu ohybem na velkých trácích f_{ct} [MPa]	9,1	12,5	14,2	17,2	23,0	25,5
Poměr k SFR0	1,00	1,37	1,56	1,89	2,53	2,80
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	107,8	130,1	141,8	153,2	161,9	168,3
Poměr k SFR0	1,00	1,21	1,31	1,42	1,50	1,56
Objemová hmotnost ρ [kg/m³]	2265	2300	2360	2390	2410	2490
Poměr k SFR0	1,00	1,02	1,04	1,06	1,06	1,10
Průměrné hodnoty rozliti SF [mm]	300	300	300	300	300	270

Z tabulky vyplývá, že s vyšší dávkou vláken je dosahováno vyšších mechanických vlastností i při zachování konstantní zpracovatelnosti kolem 300 mm. Při dávce vláken v množství 300 kg/m³ nebylo i při přidávání vody možno dosáhnout rozliti 300 mm. Při vyšších dávkách vody docházelo k odplavování jemných podílů a drátky tvořily shluky.

Následující Graf 28 popisuje závislost ohybové únosnosti na průhybu trámů rozměru 70 x 70 x 300 mm. Zkouška byla provedena dle ČSN P 732452 [109], tedy v uspořádání čtyřbodového ohybu se vzdáleností podpor 210 mm a zatěžovacími břemeny umístěnými ve třetinách rozpětí.



Graf 28: Ohybová únosnost trámců 70 x 70 x 300 mm

11.1.2.1 Vliv množství vody na distribuci vláken

V kapitole 11.1.2 byl proveden experiment jehož cílem bylo zachovat konstantní konzistenci pro různé objemové dávky vláken. Jak bylo uvedeno v kapitole 7.2.1.4 má množství přidané vody vliv i na distribuci vláken po výšce průřezu. Tento vliv byl ověřen i pro výchozí recepturu Mix 3 ($V_f = 1,5\%$) do které bylo přidáno o 20 kg/m^3 vody více. Z původní směsi a upravené směsi byla vyrobena zkušební tělesa, která byla tvořena kelímky o objemu 0,5 a 0,3 l. Po zatvrdnutí směsi byla tělesa přeříznuta pilou s diamantovým kotoučem a následně byl povrch zabroušen, jelikož při řezání došlo k vytrhávání vláken a hrubších zrn kameniva. Porovnání vlivu množství přidané vody je patrné na následujících obrázcích.



Obr. 81: Porovnání segregace vláken na výchozí směsi (obrázek vlevo) a při zvýšené dávce vody o 20 kg/m^3 na zkušebních tělesech tvořených kelímky o objemu 0,5 l



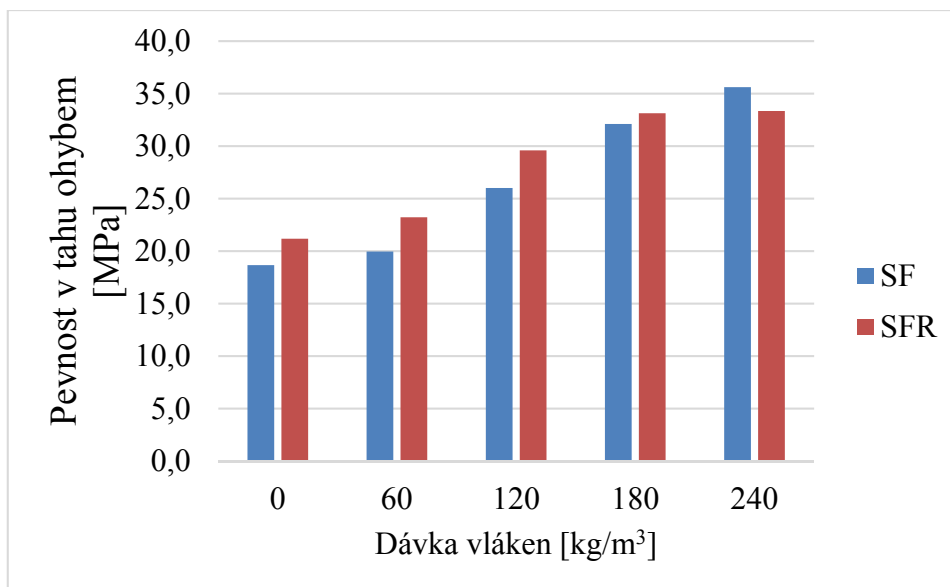
Obr. 82: Porovnání segregace vláken na výchozí směsi (obrázek vlevo) a při zvýšené dávce vody o 20 kg/m^3 na zkušebních tělesech tvořených kelímky o objemu $0,3 \text{ l}$

Výše uvedené obrázky potvrdily předpoklad z kapitoly 7.2.1.4, kdy po přidání 20 kg/m^3 vody (zvýšení dávky vody o 11%) do výchozí receptury došlo k sednutí vláken ke dnu formy. Při vizuální kontrole segregace drátků na řezné ploše je na zkušebních vzorcích patrné rozhraní mezi částí průřezu s minimálním množstvím kovových drátků. Toto rozhraní je na obrázcích zobrazeno červenou čárkovanou čarou.

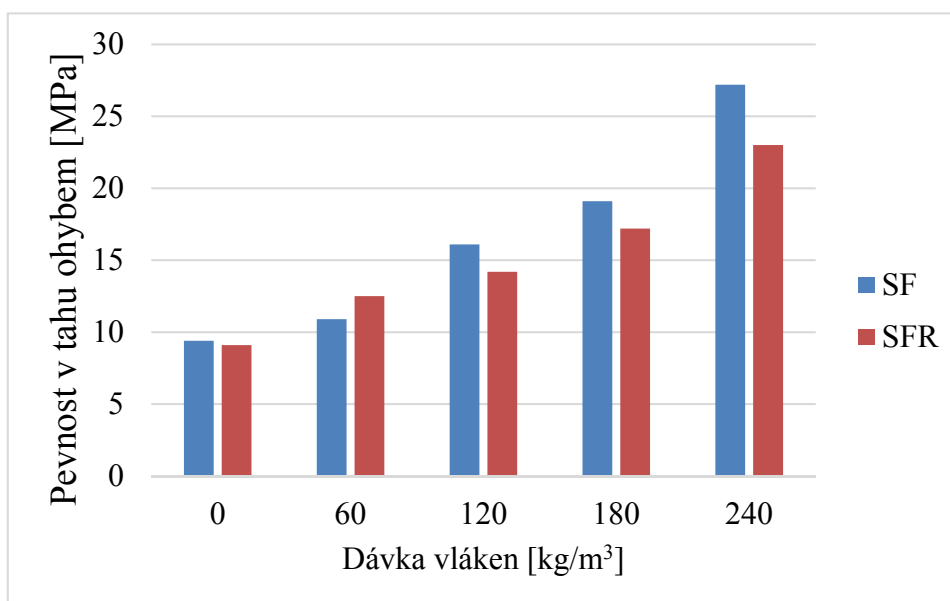
11.1.3 Porovnání získaných výsledků

V předchozích kapitolách 0 a 11.1.2 byly uvedeny výsledky zkoušek konzistence čerstvé směsi pro recepturu UHPC, jejíž složení vycházelo z receptury Mix 3, jejíž složení je uvedeno v kapitole 10.1.1. Oproti tomuto složení byla upravena výchozí dávka vody a plastifikační přísady. U vody došlo k navýšení o 8% a u plastifikátoru o 25%. V rámci experimentální činnosti byl sledován jednak vliv množství disperzní výztuže na konzistenci čerstvé směsi UHPC a dále na mechanické parametry (uvedené výsledky jsou označeny jako SF) a dále byly jednotlivé receptury s dávkou vláken upravovány tak, aby byla zachována konstantní hodnota rozlití směsi. Tato modifikace probíhala vždy přidáváním vody a její výsledky jsou označeny jako SFR.

Na následujících grafech je provedeno porovnání výsledků zkoušek pevnosti v tahu ohybem na malých trámečcích $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ zkoušených uspořádáním zkoušky trojbodovým ohybem se vzdáleností podpor 100 mm dle ČSN EN 196-1 [101] a dle ČSN P 732452 [109] na velkých trámčích $70 \times 70 \times 300 \text{ mm}$ zkoušených v uspořádání čtyřbodového ohybu se vzdáleností podpor 210 mm a zatěžovacími břemeny umístěnými ve třetinách rozpětí. Porovnání je provedeno pouze pro výsledky se stejným dávkováním disperzní výztuže.



Graf 29: Porovnání ohybové únosnosti v uspořádání zkoušky odpovídajícímu trojbodovému ohybu na malých trámečcích 40 x 40 x 160 mm bez vrubu dle ČSN EN 196-1 [101]



Graf 30: Porovnání ohybové únosnosti v uspořádání zkoušky odpovídající čtyřbodovému ohybu na trámcích 70 x 70 x 300 mm bez vrubu dle ČSN P 732452 [109]

Z provedených experimentů lze konstatovat:

- Dávkování použitých vláken BASF významně ovlivňuje zpracovatelnost směsi UHPC, která byla měřena pomocí Haggermanova kuželu dle kapitoly 5.1.2.
 - Při objemovém dávkování vláken do $V_f = 1,5 \%$ je snížení zpracovatelnosti ne zcela významné. Měřená hodnota rozlivu kotouče byla o cca do 10 %.
 - Objemová dávka vláken $V_f = 3,1 \%$ již zpracovatelnost ovlivní významně a to snížením rozlivu o cca 30 %.

- Měření opět potvrdila výrazný vliv dávky vláken na zvyšování konečných mechanických parametrů matrice bez vláken.
- Při dávkování vláken $V_f = 1,5$ % objemu u směsi SF i SFR se zvýšila pevnost v tlaku o cca 19 % (receptura SF) resp. o cca 31 % (receptura SFR). Při dávce vláken $V_f = 3,1$ % objemu u směsi SF i SFR se zvýšila pevnost v tlaku o cca 40 resp. 50 %
- Při dávkování vláken $V_f = 1,5$ % objemu u směsi SF i SFR se zvýšila pevnost v tahu za ohybu při měření na trámcích 70x70 mm o cca 71 % (receptura SF) resp. 56 % (receptura SFR). Při dávce $V_f = 3,1$ % objemu u směsi SF i SFR se zvýšila pevnost v tahu za ohybu při měření na trámcích 70x70 mm na cca 290 % resp. 250 % původní hodnoty receptury bez vláken.
- Z měření pevností v tahu za ohybu vyplývá, že přidání vody do směsi za účelem zachování zpracovatelnosti nemá jednoznačný vliv na výslednou pevnost v tahu za ohybu. Vzhledem k poměrně malým rozdílům se projeví zejména vlivy variability plynoucí z výroby směsi a tvaru těles

E. DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚRY PRÁCE

Pro naplnění cílů disertační práce, které jsou uvedeny v kapitole B, byla provedena rešeršní část zahraniční a české literatury věnující se problematice vysokohodnotných cementem pojených kompozitních materiálů typu UHPC – „*Ultra High Performance Concrete*“. Do této skupiny jsou zahrnuty i prvky s disperzní výztuží, které bývají označovány zahraniční literaturou jako UHPFRC – „*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*“.

V experimentální části byla popsána metoda kontroly distribuce vláken na řezné ploše u ztvrdlého UHPC a navržená metoda hodnocení míry segregace vláken ke dnu formy pomocí koeficientu lineární regrese. Optickou metodou kontroly distribuce vláken pomocí přesného mikroskopu byla stanovena distribuce vláken u tenkých desk ztraceného bednění a nosníků s průřezem tvaru I. Získané výsledky jsou pak porovnány s výsledky ohybových zkoušek a je stanovena závislost segregace vláken ke dnu formy na výslednou pevnost v tahu za ohybu. V další experimentální části je provedena a posouzena možnost výroby vrstvených těles a porovnání takto vyrobených vrstvených těles s tělesy vyráběnými běžným způsobem. V poslední kapitole experimentální části se věnují vybraným technologickým vlivům, které mají vliv na vybrané mechanicko-fyzikální vlastnosti UHPC.

Cíle práce byly stanoveny následovně:

- a) Stanovení distribuce krátkých rozptýlených drátků (disperzní výztuže) po výšce průřezu prvků z UHPC a vliv distribuce na ohybovou únosnost zvoleného prvku z UHPC.
- b) Ověření možnosti přípravy prvku z UHPC s řízeným vytvořením vrstev s různým objemovým dávkováním drátků V_f a porovnání s prvkem vyrobeným běžným způsobem.
- c) Analýza technologických vlivů na chování ztvrdlého UHPC v tahu za ohybu po vzniku trhliny, zejména s přihlédnutím na zpracovatelnost směsi a dávky rozptýlené výztuže.
- d) Analýza vlivu reologie a konzistence čerstvé směsi UHPC na stabilitu směsi vůči rozměšování a sedání ocelových drátků ke dnu formy.

Na základě provedených experimentů na tenkých deskách ztraceného bednění (tloušťka desky bez žebra 20 mm) a nosnicích tvaru I byla po zatěžovacích zkouškách provedena kontrola distribuce vláken po výšce průřezu optickou metodou pomocí přesného mikroskopu dle kapitoly 8. Získanými daty četnosti drátků v jednotlivých vrstvách byly proloženy lineární křivky, které bylo možno popsat pomocí parametrických rovnic. Koeficient lineární regrese pak poukazuje na odklon křivky od vodorovné / osy.

U desk ztraceného bednění bylo prokázáno, že požadavky projektanta (maximální průhyb 4 mm při zatížení 13 kN [34]) splnily 3 desky s průměrnou únosností 24,8 kN a maximálním průhybem 3,13 mm při zatížení 24,1 kN u desky 1. Zbývající tři desky tomuto požadavku nevyhovují, i když deska 5 má dostatečnou ohybovou únosnost

($F_{\max} = 19,4$ kN), nicméně tato deska nespĺňuje požadavek projektanta na limitní prŮhyb při zatížení $F = 13$ kN o cca 5,4%. U vyhovujících desek je koeficient lineární regrese menší než 1, kdežto u nevyhovujících desek ej tento koeficient větší než 1.

Na základě získaných výsledků se potvrdilo, že distribuce vláken u tenkých desek ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti a to především v tažené části průřezu, která je u desek reprezentována oblastí výšky 10 mm od spodního taženého líce. V případě, kdy došlo k segregaci a sedimentaci vláken ke dnu formy došlo k výraznému poklesu únosnosti desek. Nejvýraznější rozdíl ohybové únosnosti, mezi deskou 2 ($F_{\max} = 25,7$ kN) a deskou 6 ($F_{\max} = 11,1$ kN), je 57%. Deska 4 dosahovala 60,6% průměrné únosnosti vyhovujících desek 1 až 3, deska 5 dosahovala 78,3% průměrné únosnosti a deska 6 dosahovala 44,8% průměrné únosnosti desek 1 až 3.

Nosníky tvaru I byly vyrobeny ze dvou receptur D1 a R1, které se lišili v typu a granulometrii použitého kameniva, ostatní komponenty včetně dávkování zůstali beze změny. Na základě výsledků optické kontroly homogenity distribuce vláken pomocí přesného mikroskopu u nosníků tvaru I se prokázal vliv složení materiálu na výslednou pevnost v tahu za ohybu. Rozdíl mezi výsledky ohybové únosnosti je u nosníků 16,4%.

Optickou metodou pomocí mikroskopu se prokázala relativně dobrá homogenita distribuce vláken po průřezu pro recepturu R1 i D1, jejichž složení je uvedeno v Tab. 7, přičemž receptura R1 je méně náchylná na segregaci vláken ke dnu formy. V rámci srovnávacích testů mechanických vlastností se ukázalo vhodnější chování, nejen z hlediska distribuce vláken, ale i z hlediska výsledných parametrů, receptury R1. Nižší hodnoty reziduálních pevností v tahu za ohybu stanovených na trácích 150 x 150 x 700 mm zkoušených dle ČSN P 732452 [109] o cca 8% signalizují nižší soudržnost ocelových vláken s matricí D1.

V rámci experimentů se podařilo vyrobit a odzkoušet prvek (trávec) s vrstvami z jemnozrnného cementem pojeného kompozitního materiálu typu UHPC s různým objemovým zastoupením krátkých ocelových vláken BASF. Během výroby vrstvených trámů nebyla přidávána do vzniklých pracovních spár žádná výztuž, která by tyto vrstvy propojovala. V rámci prováděných experimentů se neprojevil vliv delaminace vrstev před vyčerpáním únosnosti prvku v těchto pracovních spárách [129, 130].

V práci jsem prověřil a odzkoušel možnost provádět vrstvené prvky z UHPC s rozdílnou dávkou vláken v každé vrstvě. Při zachování stejného objemového zastoupení vláken u vrstvených trámů 100 x 100 x 400 mm a u stejně velkých trámů vyrobených běžným způsobem z receptury Mix 3 ($V_f = 1,5\%$), se podařilo zvýšit výslednou pevnost v tahu ohybem vrstveného prvku přibližně o 25%. Výsledky mechanických parametrů závisí nejen na objemové dávce vláken, ale také na velikosti zkušebních těles a dalších okrajových podmínkách, které byly v rámci experimentální činnosti minimalizovány.

U tohoto experimentu se potvrdil výrazný vliv přídavku vláken na pevnosti matrice UHPC. Matrice UHPC vyztužená disperzní výztuží (Mix 3, $V_f = 1,5\%$) dosahuje o 20 % až 40 % vyšších tlakových pevností oproti referenční receptuře bez vláken (Mix 1). Při dávce drátků $V_f = 3\%$ došlo ke zvýšení tlakové pevnosti o 30 % až 60 % oproti referenční receptuře Mix 1 bez vláken. Pevnost v tahu za ohybu se u receptury Mix 3 ($V_f = 1,5\%$) zvýšila o 50 % až 130 % oproti referenční nevyztužené receptuře Mix 1.

Navýšení pevnosti v tahu ohybem o 130 % až 190 % bylo zaznamenáno při porovnání výsledků receptury Mix 5 ($V_f = 3\%$) s výsledky referenční receptury. Rozdíl pevnosti v tahu za ohybu mezi recepturou Mix 5 a Mix 3 se pohybuje v rozmezí 20 % až 50 %.

V poslední kapitole 11 experimentální části práce je provedeno hodnocení vlivu množství disperzní výztuže na zpracovatelnost čerstvé směsi a na výslednou pevnost v tlaku, tahu za ohybu a na zpracovatelnost čerstvé směsi. Experimentální zkoušky potvrdily, že množství disperzní výztuže zvyšuje pevnost v tahu za ohybu a tlaku, ale zároveň snižuje konzistenci čerstvé směsi a tím ovlivňuje i zpracovatelnost a reologii směsi.

Tímto experimentem byl potvrzen výrazný vliv přídavku vláken na pevnosti UHPC matrice. Při objemové dávce vláken do 1,5% (120 kg/m^3) je vliv množství drátků na výsledné hodnoty rozlití kužele do 10%. Při objemové dávce vláken $V_f = 3,4\%$ (receptura SF270, hmotnostní dávka vláken 270 kg/m^3) je rozlití kužele o 35% nižší než oproti receptuře bez vláken SF0. Úpravou množství vody lze dosáhnout obdobné konzistence pro různé dávky vláken (receptury SFR), která byla v rámci experimentů zvolena hodnotou rozlití Haggermanova kužele 300 mm. Pro zachování konzistence bylo u receptury SFR120 ($V_f = 1,5\%$) nutno zvýšit dávku vody o 6,1% a u receptury SFR240 ($V_f = 3,1\%$) o 18,2%. U receptury SFR300 ($V_f = 3,8\%$) se nepodařilo dosáhnout požadované konzistence i při zvýšení dávky vody o 30%. Při takto vysoké dávce vody došlo ovšem k jejímu odměšování a odplavování jemných částic z matrice a tvorbě shluků drátků.

Při objemové dávce vláken $V_f = 1,5\%$ se zvýšila pevnost v tlaku stanovená dle ČSN EN 196-1 [101] o 20% u receptury SF120 (průměrné rozlití 290 mm) a o 31% u receptury SFR120 (průměrné rozlití 300 mm). Při objemové dávce vláken $V_f = 3,1\%$ se pevnost v tlaku zvýšila o 40% u receptury SF240 (průměrné rozlití 220 mm) a o 50% u receptury SFR240 (průměrné rozlití 300 mm).

Zvýšení mechanických parametrů lze sledovat i u pevnosti v tahu za ohybu, kdy u receptury SF120 došlo k navýšení pevnosti v tahu za ohybu o 40% u malých trámečků zkoušených dle ČSN EN 196-1 [101] a u receptury SFR120 o také o 40%. Výraznější rozdíl je pak u receptur SF240 a SFR 240, kdy u receptury SF došlo k navýšení únosnosti o 91% a u receptury SFR pouze o 57%. Podobný trend je i u velkých trámů zkoušených dle ČSN P 732452 [109], kdy u receptury s dávkou vláken $V_f = 1,5\%$ objemu došlo k navýšení o 71% (receptura SF) a o 56% (receptura SFR). Při dávce $V_f = 3,1\%$ objemu došlo k nárůstu pevnosti v tahu za ohybu o 189 % (receptura SF) a o 153% (receptura SFR).

V rámci prováděných zkoušek byl vizuálním zhodnocením na řezné ploše zhodnocen vliv množství přidané vody na homogenitu distribuce vláken ke dnu formy zkušebních těles, kterými byly kelímky o objemu 0,5 a 0,3l. Optickou kontrolou byl prokázán vliv přidané vody na segregaci vláken ke dnu formy u receptury s objemovou dávkou vláken BASF $V_f = 1,5\%$ a modifikované receptury, do které bylo přidáno o 20 kg/m^3 více vody (zvýšení dávky vody o 11% oproti původní dávce).

Provedenými experimenty bylo celkem jednoznačně ověřeno, že materiál typu UHPC či UHPFRC je v jak podmínkách laboratoře, tak i v provozních podmínkách možno připravit bez nějakých zásadních nároků na výrobní a zpracovatelské technologie.

Z provedených experimentů a jejich závěrů lze říci, že testované směsi UHPC a UHPFRC dosáhly velmi zajímavých a vysokých mechanických parametrů. Složení receptury UHPC, množství disperzní výztuže a technologická kázeň při výrobě prvků jednoznačně a významně ovlivňují výsledné mechanicko-fyzikální parametry jemnozrnného cementem pojeného kompozitního materiálu typu UHPC a prvků z něj vyrobených. Ve své práci jsem potvrdil řadou experimentů, že homogenita distribuce vláken je ovlivněna nejen složením směsi, ale také technologickou kázní při výrobě a ukládání směsi do bednění, tj. způsoby betonáží. Ukazuje se, že při vývoji prvků z UHPC a optimalizaci složení matrice UHPC je kontrola distribuce vláken v zatvrdlé směsi a případně hodnocení rizika sedání (segregace) ke dnu formy velmi důležitou operací. Jako vhodnou, přesnou a rychlou metodou poskytující relevantní informace o distribuci vláken jsem ověřil optickou metodu na řezné ploše ztvrdlého UHPC pomocí přesného optického mikroskopu v kombinaci se snímáním digitálního obrazu. Navrhnul jsem možný statistický způsob při vyhodnocení množství disperzní výztuže v jednotlivých oblastech včetně lineární regresní analýzy.

V oblasti dalšího sledování a hodnocení vlivů na distribuci a sedání vláken se jeví jako velmi zajímavé a vhodné dále rozpracovat metodu založenou na měření viskozity čerstvé směsi viskozimetrem nebo reometrem. Bylo by tak možno objektivizovat vliv variabilního dávkování vody, příměsí a přísad na změnu konzistence a stanovit tak např. hraniční oblasti, kdy ještě směs má dostatečnou zpracovatelnost a nedochází k sedání a segregaci vláken. Měření viskozity čerstvé směsi by také mohlo poskytnout zajímavé informace i z hlediska případné čerpatelnosti směsi UHPC.

F. SEZNAMY LITERATURY

12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SVOBODA, Luboš, Zdenka BAŽANTOVÁ, Milan MYŠKA, Jaroslav NOVÁK, Zdeněk TOBOLKA, Roman VÁVRA, Alena VIMMROVÁ a Jaroslav VÝBORNÝ. *Stavební hmoty* [online]. 3. vydání. 2013. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH3v1.pdf>
- [2] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, Antonínská 1, Brno, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [3] *Příručka technologa - BETON - Suroviny - Výroba - Vlastnosti* [online]. B.m.: Českomoravský beton, a.s., 2010. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/15775808/beton-prirucka-technologa-2010-heidelbergcement>
- [4] AĚTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, Sokolská 15, Praha 2, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [5] NEZNÁMÝ. *Precast Elements Made of UHPC – From Research to Application* [online]. [vid. 2018-12-29]. Dostupné z: http://www.set.eesc.usp.br/2enpppcpm/apresentacoes_pdf/Palestras.pdf/UHPC.pdf
- [6] ABBAS, S, M L NEHDI a M A SALEEM. Ultra-High Performance Concrete : Mechanical Performance , Durability , Sustainability and Implementation Challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**(3), 271–295. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0157-4
- [7] AFGC. *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Comcretes, Recommendations*. Paříž, Francie: Association Francaise de Génie Civil (AFGC), 2013.
- [8] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON - DAFSTB. SVB-Richtlinie DAfStb-Richtlinie - Selbstverdichtender Beton. *Regelwerk, Bau&Planung* [online]. 2007 [vid. 2019-01-12]. Dostupné z: https://www.umwelt-online.de/recht/bau/din/svbrl_ges.htm
- [9] RUOTSALAINEN, J J, M U KAIKKONEN, M NIITTYKOSKI, M W MARTIKAINEN, C G LEMAY, J COX, N S DE SILVA, A KUS, T J FALLS, J-S DIALLO, F LE BOEUF, J C BELL, S YLÄ-HERTTUALA, A E HINKKANEN a M J VÄHÄ-KOSKELA. *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPRCC)* [online]. 2015. ISBN 9784810606409. Dostupné z: doi:10.1038/gt.2014.83
- [10] FIB. *fib Model Code for Concrete Structures 2010* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. ISBN 9783433604090. Dostupné z: doi:10.1002/9783433604090
- [11] KOLÍSKO, Jiří, Petr BOUŠKA, David ČÍTEK, Petr HUŇKA, Milan RYDVAL a Miroslav VOKÁČ. *Metodika 1 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*. 2015.
- [12] KALNÝ, Milan, Jan KOMANEC, Václav KVASNIČKA, Jiří KOLÍSKO a Petr TEJ. *Metodika 2 - Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. 2015.
- [13] NAAMAN, Antoine E a Kay WILLE. The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress. *Proceedings of HiperMat 2012 (Kassel, March 7-9, 2012)* [online]. 2012, 3–15. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(72\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90073-7)

- [14] LI, Victor C a Hwai-Chung WU. Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Applied Mechanics Reviews*. 1992, **48(8)**, 390–398. ISSN 0003-6900.
- [15] CHOI, Jung-Taek. *Strengthening RC beams with Ultra High Performance Concrete* [online]. B.m., 2016. Seoul National University. Dostupné z: http://www.iasem.org/publication_conf/structures16/7.ICAC16/T2B.2.CC505_0807F1.pdf
- [16] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA-HRT-11-038: Ultra-High Performance Concrete. 2011, 1–8.
- [17] TICHÝ, Jan, Jiří KOLÍSKO, Miroslav VOKÁČ, David ČÍTEK, Vladislav TREFIL a Milan KALNÝ. *Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. 2015.
- [18] FEHLING, Ekkehard, Michael SCHMIDT, Joost WALRAVEN, Torsten LEUTBECHER a Susanne FRÖHLICH. *Beton-Kalender 2013* [online]. Weinheim, Německo: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. ISBN 9783433602591. Dostupné z: doi:10.1002/9783433602591
- [19] ACI COMMITTEE 239, ed. *ACI 239R-18 Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology report*. B.m.: American Concrete Institute, 2018. ISBN 9781641950343.
- [20] RUSSEL, G, H. Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community [online]. 2013, (June), 176. Dostupné z: doi:FHWA-HRT-13-060
- [21] GRAYBEAL, Benjamin A. *Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections* [online]. 2014. ISBN 2024933122. Dostupné z: doi:FHWA-HRT-14-084
- [22] FHWA. Publication No. FHWA-HRT-06-115: Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders. 2006, **207**(August).
- [23] ČSN EN 206 + A1. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [24] TICHÝ, L, V MRÁZ a J SLÁMA. *Vysokohodnotné betony pro mosty PK - TP 226*. Česká republika: Ministerstvo dopravy -odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [25] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [26] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokó 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2006.
- [27] ČSN EN 1992-2. *Eurokód 2 - Navrhování betonových konstrukcí - Část 2 - Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2007.
- [28] ČSN EN 1994-1-1. *Eurokó 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [29] ČSN EN 1994-2. *Eurokó 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí - Část 2: Obecná pravidla a pravidla pro mosty*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2007.
- [30] ČSN EN 13670. *Provádění betonových konstrukcí*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [31] KALNÝ, Milan. *Experience with UHPFRC applications in the Czech republic* [online]. Dostupné z: <http://site.abcic.org.br/pdf/Eng.Milan.Kalny.pdf>

- [32] TEJ, Petr, Jiří KOLÍSKO, Petr BOUŠKA, Miroslav VOKÁČ a Jindřich ČECH. Prestressed I-Beams of 12 m Span Made of Ultra-High Performance Concrete for Construction of Railway Bridges. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, **587–589**, 776–778. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1593
- [33] KOLÍSKO, Jiří, Jan TICHÝ, Milan KALNÝ, Petr HUŇKA, Petr HÁJEK a Vladislav TREFIL. Vývoj ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR. *BETONOVÉ KONSTRUKCE 21. STOLETÍ - BETONY S PŘIDANOU HODNOTOU*. 2012, (7/2012), 50–56. ISSN 1213 - 3116.
- [34] RYDVAL, Milan a Jiří KOLÍSKO. Ohybová únosnost desek ztraceného bednění vyrobených z UHPFRC a vliv distribuce ocelových vláken. *Beton TKS* [online]. 2015, (2/2015), 34–37. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_2-15.pdf
- [35] VÍTEK, Jan L a Robert BROŽ. Lávka přes Labe V Čelákovících – První nosná konstrukce z UHPC V ČR. *Beton TKS*. 2014, (4/2014), 10–18. ISSN 1213-3116.
- [36] TICHÝ, Jan a Jan KOMANEC. Unikátní lávka pro pěší z UHPC v obci Čeperka. *Beton TKS*. 2016, (4/2016), 21–25. ISSN 1213-3116.
- [37] KŠ PREFA. *Modernizace mostů přes tratě SŽDC v Přerově, ul. Dluhonská* [online]. 2018. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/portfolio/modernizace-mista-krizeni-mosty-pres-trate-szdc-v-prerove-ul-dluhonska/>
- [38] KOLÍSKO, Jiří, Petr TEJ, Lukáš VRÁBLÍK, Jan MAREK, David ČÍTEK, Jan MOUREK a Marek BLANK. Návrh a výroba segmentové předepnuté lávky z UHPFRC v Příboře. In: *25. Betonářské dny (2018)*. B.m.: ČBS Servis, s.r.o., 2018. ISBN ISBN 978-80-906759-6-4.
- [39] KŠ PREFA. *Lávka přes řeku Lubinu v Příboře* [online]. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/portfolio/lavka-pres-reku-lubinu-v-pribore/>
- [40] KOLÍSKO, Jiří, David ČÍTEK, Petr TEJ a Milan RYDVAL. Production of footbridge with double curvature made of UHPC. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **246(1)**. ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/246/1/012009
- [41] TÁBORSKÝ DENÍK. *Unikátní nová lávka pro pěší a cyklisty u Černých mostů už je na místě Unikátní nová lávka pro pěší a cyklisty u Černých mostů už je na místě*. [online]. 2018. Dostupné z: https://taborsky.denik.cz/zpravy_region/unikatni-nova-lavka-pro-pesi-a-cyklisty-u-cernych-mostu-uz-je-na-miste-20180908.html
- [42] KŠ PREFA. *Lávka pro pěší a cyklisty v Táboře-Černých mostech* [online]. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/portfolio/lavka-pro-pesi-a-cyklisty-v-prostoru-cernych-mostu-v-tabore/>
- [43] SLABÝ, O., J. VAŠKOVÁ a V. VESELÝ. Application of UHPC thin-walled elements for multi-purpose use table. In: *FIBRE CONCRETE 2017 - IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017. ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/246/1/012023
- [44] VESELÝ, Vladimír. *Pingpongový stůl z vysokohodnotného betonu* [online]. 2017 [vid. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/aktuality/pingpongovy-stul>
- [45] BROŽ, Václav a Zdeněk RUFFER. Stéla urnové kobky na lesním hřbitově. *Beton TKS*. 2016, (2/2016), 14–17. ISSN 1213-3116.
- [46] FHWA. *North American Deployments of UHPC in Highway Bridge Construction* [online]. 2018. Dostupné z: <https://highways.dot.gov/bridges-and-structure/ultra-high-performance-concrete/deployments>
- [47] VOO, Yen Lei, Stephen J. FOSTER a M. Faiz A. HASSAN. The Current State of

- Art of Ultra-High Performance Concrete Bridge Construction in The Current State of Art of Ultra-High Performance Concrete Bridge Construction. *Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Engineering and Technology 2014*. 2015, (August 2014).
- [48] DENISIEWICZ, Arkadiusz a Mieczyslaw KUCZMA. Two-Scale Numerical Homogenization of the Constitutive Parameters of Reactive Powder Concrete. *International Journal for Multiscale Computational Engineering* [online]. 2014, **12**(5), 361–374. ISSN 1543-1649. Dostupné z: doi:10.1615/IntJMultCompEng.2014010181
- [49] ARCHMARATHON AWARDS. *Pont de la République* [online]. Dostupné z: <http://www.archmarathon.com/2015/pont-de-la-republique/>
- [50] MAZZACANE, Patrick, Resp Développement BFUP a Romain RICCIOTTI. La passerelle des Anges Résumé. In: [online]. Marseille: AFGC, 2009, s. 1–11. Dostupné z: http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/2UHPFRC-20091117-18_Marseille_cle07c191.pdf
- [51] RESPLENDINO, Jacques a Francois TOUTLEMONDE. The UHPFRC revolution in structural design and construction. In: *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013*. Marseille: AFGC, 2013, s. 791–804. ISSN 00194565.
- [52] ŠRŮMA, Vlastimil. *Výškové budovy a vysokohodnotný beton* [online]. 2009. Dostupné z: https://www.casopisstavbnictvi.cz/vyskove-budovy-a-vysokohodnotny-beton_A2358_I31
- [53] MANDRUP, Dorte. *Malmö Live* [online]. Dostupné z: <http://www.dortemandrup.dk/work/malmo-live>
- [54] HOLCIM TECHNOLOGY LTD. *Ductal* [online]. [vid. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.ductal.com/en>
- [55] RUDY RICCIOTTI ARCHITECTURE. *Stade Jean Bouin* [online]. 2007. Dostupné z: <https://rudyr Ricciotti.com/projet/stade-jean-bouin#!/rudyr Ricciotti.com/wp>
- [56] ČSN EN 197-1. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [57] ČSN EN 196-6. *Metody zkoušení cementu - Část 6 - Stanovení jemnosti mletí.pdf*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [58] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2008. ISBN 8590963823171.
- [59] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, Sokolská 15, Praha 2, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [60] ČSN EN 206-1 + ZMĚNA Z3. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2008.
- [61] TERZIJSKI, Ivailo. Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky – Část I. Úvod a složky vysokopevnostního betonu. *Beton TKS*. 2011, (1/2011). ISSN 12133116.
- [62] ČSN EN 933-10. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 10: Posouzení jemných částic - Zrnitost fileru (prosévání proudem vzduchu)*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [63] SHI, Caijun, Zemei WU, Jianfan XIAO, Dehui WANG, Zhengyu HUANG a Zhi FANG. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and

- mixture design. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **101**, 741–751. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088
- [64] ČSN EN 13263-1+A1. *Křemičitý úlet do betonu - Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [65] LOTHENBACH, Barbara, Karen SCRIVENER a R. D. HOOTON. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, **41**(12), 1244–1256. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2010.12.001
- [66] EUROPEAN SILICA FUME COMMITTEE. *Properties of Silica Fume related to its applications* [online]. [vid. 2019-01-05]. Dostupné z: [http://www.microsilicafume.eu/web/properties of silica fume related to its applications/1011306087/list1187970075/fl.html](http://www.microsilicafume.eu/web/properties%20of%20silica%20fume%20related%20to%20its%20applications/1011306087/list1187970075/fl.html)
- [67] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [68] GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. Fracture Toughness of Concrete Containing Fly Ash Fracture Toughness of Concrete Containing Fly Ash [online]. nedatováno. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.69405
- [69] BIRICIK, Hasan a Nihal SARIER. Comparative study of the characteristics of nano silica - , silica fume - and fly ash - incorporated cement mortars. *Materials Research* [online]. 2014, **17**(3), 570–582. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:10.1590/S1516-14392014005000054
- [70] ČSN EN 15167-1. *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2007.
- [71] DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING. *Design and Control of Concrete Mixtures - Chapter 03 - Fly ash, slag, silica fume, and natural pozzolans* [online]. B.m., 1996. University of Memphis. Dostupné z: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap03.pdf
- [72] ČSN 721220. *Mleté vápence*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 1983.
- [73] ČSN EN 12878. *Pigmenty pro vybarvování stavebních materiálů na bázi cementu a/nebo vápna - Specifikace a zkušební postupy*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [74] ČSN EN 934-1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Společné požadavky*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2008. 72 2326.
- [75] ČSN EN 934-2+A1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [76] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2003.
- [77] ČSN EN 14889-1. *Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2007.
- [78] SCHNEIDER, U., R. FELICETTI, G. DEBICKI, U. DIEDERICHS, J. M. FRANSEN, U. M. JUMPPANEN, G. A. KHOURY, S. LEONOVICH, A. MILLARD, W. A. MORRIS, L. T. PHAN, P. PIMIENTA, J. P.C. RODRIGUES,

- E. SCHLANGEN, P. SCHWESINGER a Y. ZAYTSEV. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures-modelling and applications: PGeneral presentation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. 2007, **40**(9), 841–853. ISSN 13595997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-007-9285-2
- [79] RYDVAL, Milan, Ivo ŠIMŮNEK a Jiří KOLÍSKO. Testing of Compressive Strength of Lightweight Concrete At High Temperature. In: *4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*. Leipzig: MFPA Leipzig GmbH, 2015, s. 263–268. ISBN 978-3-9814523-6-5.
- [80] ČSN EN 12350-8. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [81] ČSN EN 12350-9. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 9: Samozhutnitelný beton - Zkouška V-nálevkou*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [82] ČSN EN 12350-10. *Zkouška čerstvého betonu - Část 10: Samozhutnitelný beton - Zkouška L-truhlíkem*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [83] ČSN EN 12350-12. *Zkouška čerstvého betonu - Část 12: Samozhutnitelný beton - Zkouška J-kroužkem*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [84] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím sřásacího stolku)*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2000.
- [85] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [86] CHOI, Myoung Sung, Jung Soo LEE, Keum Seong RYU, Kyung Taek KOH a Seung Hee KWON. Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **106**, 632–639. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.106
- [87] OKAMURA, Hajime a Masahiro OUCHI. Samozhutnitelný beton. *Beton TKS*. 2006, **5**, 28–32.
- [88] SAAK, Aaron W., Hamlin M. JENNINGS a Surendra P. SHAH. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, **34**(3), 363–371. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2003.08.005
- [89] DILS, J., V. BOEL a G. DE SCHUTTER. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **41**, 455–463. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.050
- [90] GRAM, Annika, Johan SILFWERBRAND a Björn LAGERBLAD. Obtaining rheological parameters from flow test - Analytical, computational and lab test approach. *Cement and Concrete Research* [online]. 2014, **63**, 29–34. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2014.03.012
- [91] GRAM, Annika a Björn LAGERBLAD. Obtaining Rheological Parameters from Slump Flow Test for Self-Compacting Concrete. *International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3*. 2013. ISSN 25153056.
- [92] HU, Chong a François DE LARRARD. The rheology of fresh high-performance

- concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 1996, **26**(2), 283–294. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(95)00213-8
- [93] BANFILL, P F G. *Rheology of Fresh Cement and Concrete* [online]. 1991. ISBN 978-0-203-24017-5. Dostupné z: doi:10.4324/9780203473290
- [94] ČSN EN 14651+A1. *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny - Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2008.
- [95] ČSN EN 14488-3. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2006.
- [96] ČSN EN 14488-7. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2006.
- [97] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, Rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [98] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [99] ČSN EN 12504-1. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [100] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných dílcích*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2007.
- [101] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2005.
- [102] PROCHÁZKA, Jaroslav, Petr ŠTĚPÁNEK, Jiří KRÁTKÝ, Alena KOUHOUTKOVÁ a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových konstrukcí 1*. Praha, Česká republika: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2007. ISBN 978-80-903807-5-2.
- [103] HUŇKA, Petr. *Modul pružnosti betonu - možnosti stanovení, technologické a zkušební vlivy*. B.m., 2014. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [104] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [105] ČSN ISO 6784. *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha, Česká republika: Technický a zkušební ústav stavební Praha, 1993.
- [106] ČSN 731371. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [107] ČSN 731318. *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. Praha, Česká republika: Úřad pro normalizaci a měření, 1986.
- [108] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [109] ČSN P 732452. *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [110] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [111] FERRARA, Liberato, Nilufer OZYURT a Marco DI PRISCO. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: The role of „casting-flow induced" fibre orientation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. 2011, **44**(1), 109–128. ISSN 13595997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-010-9613-9
- [112] STÄHLI, Patrick, Rocco CUSTER a J. G M VAN MIER. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. 2008, **41**(1), 189–196. ISSN 13595997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-007-9229-x
- [113] RYDVAL, Milan, Petr HUŇKA a Jiří KOLÍSKO. Production and properties of functionally graded UHPFRC beams. In: *Advanced Materials Research* [online]. 2015, s. 156–159. Advanced Materials Research. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.156
- [114] YU, Ai-Bing -B, Rui-Ping -P ZOU a Nicholas STANDISH. Packing of Ternary Mixtures of Nonspherical Particles. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 1992, **75**(10), 2765–2772. ISSN 15512916. Dostupné z: doi:10.1111/j.1151-2916.1992.tb05502.x
- [115] DE LARRARD, Francois. *Concrete mixture proportioning - A scientific approach*. B.m.: CRC Press, 1999. ISBN 0419235000.
- [116] FERRARA, Liberato, Yon Dong PARK a Surendra P. SHAH. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2007, **37**(6), 957–971. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2007.03.014
- [117] REGIONALE, Polo a D I COMO. *Robustness of self consolidating steel fiber reinforced concrete*. B.m., 2010. Politecnico di Milano.
- [118] RYDVAL, Milan, Jiří KOLÍSKO a Vítězslav VACEK. Stanovení obsahu rozptýlené výztuže v průmyslových podlahách - praktické výsledky. In: *Technologie betonu 2013*. Jihlava: ČBS Servis, s.r.o., 2013. ISBN 978-80-87158-33-3.
- [119] BRAMESHUBER, Wolfgang a Stephan UEBACHS. Sedimentationsstabilität von Selbstverdichtenden Betonen. nedatováno, 1–10.
- [120] VLASÁK OLDŘICH. *Kontrola množství drátků v betonové směsi na stavbách průmyslových podlah z drátkobetonu* [online]. 2009 [vid. 2013-07-11]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/kontrola-mnozstvi-dratku-v-betonove-smesi-na-stavbach-prumyslovych-podlah-z-dratkobetonu_101475.html
- [121] ČSN EN 14488-1. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 1: Odběr vzorků čerstvého a ztvrdlého betonu*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2006.
- [122] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [123] LATASTE, J. F., M. BEHLOUL a D. BREYSSE. Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT and E International* [online]. 2008, **41**(8), 638–647. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2008.03.008
- [124] FERRARA, Liberato a Alberto MEDA. Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Materials and Structures* [online]. 2007, **39**(4), 411–420. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-005-9017-4
- [125] RYDVAL, Milan. *Technologie a vlastnosti UHPC - Hodnocení homogenity materiálu a analýza pevnosti pro návrhové účely na základě experimentů*. B.m.,

2011. České vysoké učení technické v Praze.
- [126] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [127] HENDERSON, Gary. *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*. B.m.: U.S. Department of Transportation, 2006.
- [128] RYDVAL, Milan, Jiří KOLÍSKO, Tomáš MANDLÍK, Tomáš BITTNER a Šárka NENADÁLOVÁ. Functionally graded beams. In: *Juniorstav 17. odborná konference doktorského studia, fakulta stavební*. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-214-5091-2.
- [129] KABELE, Petr, Tereza SAJDLOVÁ, Milan RYDVAL a Jiří KOLÍSKO. Modeling of High-Strength FRC Structural Elements with Spatially Non-Uniform Fiber Volume Fraction [online]. 2015, **13**(6). Dostupné z: doi:10.3151/jact.13.311
- [130] KABELE, Petr, Tereza SAJDLOVÁ, Milan RYDVAL, Jiří KOLÍSKO a Michal SOMR. DIC analysis of shear failure in functionally graded cementitious composite beams. In: [online]. 2016. Dostupné z: <http://isit.si/das2016>
- [131] RYDVAL, Milan, Jiří KOLÍSKO, Petr HUŇKA a Tomáš MANDLÍK. Experimental testing of layered UHPFRC beams. In: *Advanced Materials Research* [online]. 2014, s. 346–351. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.346

13 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

PUBLIKACE V RECENZOVANÝCH ČASOPISECH

- [1] KABELE, Petr, SAJDLOVÁ, Tereza, RYDVAL, Milan a KOLÍSKO, Jiří. *Modeling of High-Strength FRC Structural Elements with Spatially Non-Uniform Fiber Volume Fraction* [online]. 2015, 13(6). Dostupné z: doi:10.3151/jact.13.311
- [2] KABELE, Petr, SAJDLOVÁ, Tereza, RYDVAL, Milan, KOLÍSKO, Jiří a SOMR, Michal. *DIC analysis of shear failure in functionally graded cementitious composite beams*. In: [online]. 2016. Dostupné z: <http://isit.si/das2016>
- [3] RYDVAL, Milan, ČÍTEK, David, BITTNER, Tomáš, NENADÁLOVÁ, Šárka a KOLÍSKO, Jiří. Mechanical Properties of Functionally Double Layered Thin Slabs. In: *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* [online]. 2017, 2017(6), 164–167. ISSN 2319-6009. Dostupné z: doi:10.18178/ijscer.6.3.164-167
- [4] BITTNER, Tomáš, BOUŠKA, Petr, NENADÁLOVÁ, Šárka a RYDVAL, Milan. High-Performance Textile Concrete Structural Element Loaded by Bending Moment. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 2017, 2017(Volume 6, No. 2), 89–92. ISSN 2319-6009.
- [5] RYDVAL, Milan a KOLÍSKO, Jiří. *Ohybová únosnost desek ztraceného bednění vyrobených z UHPFRC a vliv distribuce ocelových vláken*. *Beton TKS* [online]. 2015, (2/2015), 34–37. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betonTKS.cz/sites/default/files/BETON_2-15.pdf

PUBLIKACE V NERECENZOVANÝCH ČASOPISECH

- [6] RYDVAL, Milan. Kontrola homogenity rozptýlení ocelových vláken u prvků z UHPC materiálů po výšce průřezu. *Lafarge Cement Journal*. 2013, 2, 10–13.

UPLATNĚNÉ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

- [7] KOLÍSKO, Jiří, BOUŠKA, Petr, ČÍTEK, David, RYDVAL, Milan, VOKÁČ, Miroslav, TICHÝ, Jan a KALNÝ, Milan. Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky. 2015. Dostupné z <http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Metodika-1-N%C3%A1vrh-a-zkou%C5%A1en%C3%AD-UHPC.pdf>

PUBLIKACE V DATABÁZI SCOPUS a WoS

- [8] KOLÍSKO, Jiří, ČÍTEK, David, TEJ, Petr a RYDVAL, Milan. Production of footbridge with double curvature made of UHPC. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. B.m.: Institute of Physics Publishing, 2017. ISSN 17578981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/246/1/012009
- [9] KOLÍSKO, Jiří, HUNKA, Petr, RYDVAL, Milan a KOSTELECKA, Michaela. Development of UHPC from materials available in Czech Republic. In: *CESB 2013 PRAGUE - Central Europe Towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations* [online]. Prague: Czech

- Technical University in Prague, 2013, s. 385–388. ISBN 9788024750187.
Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84906556635&partnerID=40&md5=8b556be5b07087a6ebe7e17ebd868969>
- [10] RYDVAL, Milan, BITTNER, Tomáš, KOLÍSKO, Jiří a NENADÁLOVÁ, Šárka. Impact of Steel Fibers on Workability and Properties of UHPC. In: [online]. 2016. Solid State Phenomena - Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.249.57
- [11] RYDVAL, Milan, ČÍTEK, David, KOLÍSKO, Jiří, NENADÁLOVÁ, Šárka a BITTNER, Tomáš. Functionally layered thin slabs made from UHPC and ECC composites. In: [online]. 2017. Solid State Phenomena. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.259.90
- [12] BITTNER, Tomáš, BOUŠKA, Petr, NENADÁLOVÁ, Šárka, RYDVAL, Milan a VOKÁČ, Miroslav. Effect of Temperature Increasing on Deformation Properties of TRC. In: [online]. 2017. Solid State Phenomena. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.259.75
- [13] RYDVAL, Milan, KOLÍSKO, Jiří a NENADÁLOVÁ, Šárka. Development of cement based composites with PVA fibers. In: [online]. 2016. Solid State Phenomena - Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.249.62
- [14] ČÍTEK, David, RYDVAL, Milan a KOLÍSKO, Jiří. Determination of volumetric changes of the UHPC matrix. In: *Experimental Stress Analysis 2015*. 2015, s. 60–65. ISBN 978-80-01-05734-6.
- [15] KOLÍSKO, Jiří, RYDVAL, Milan a Petr HUŇKA. UHPC - Assessment of Steel Fibre Distribution and Matrix Homogeneity.
- [16] BITTNER, Tomáš, BOUŠKA, Petr, Šárka NENADÁLOVÁ, RYDVAL, Milan a David ČÍTEK. Experimental Tests of I Profile Made from UHPC Reinforced with Textile Glass Fibres. In: [online]. 2016. Solid State Phenomena. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.249.261
- [17] BITTNER, Tomáš, BOUŠKA, Petr, Michaela KOSTELECKÁ, Šárka NENADÁLOVÁ, RYDVAL, Milan a Miroslav VOKÁČ. Determination of Mechanical Properties of Non-Conventional Reinforcement. In: [online]. 2015. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.662.249
- [18] RYDVAL, Milan, KOLÍSKO, Jiří, MANDLÍK T. a D ČÍTEK. MECHANICAL PROPERTIES OF FUNCTIONALLY GRADED THIN SLABS MADE FROM ECC AND UHPC. In: 2016. 1st edition, Prague, June 2016, Complete edition - printed version + Flash disk with full paper version.
- [19] ČÍTEK, David, RYDVAL, Milan, J FOŘT, Petr POKORNÝ, Zbyšek PAVLÍK a KOLÍSKO, Jiří. Residual material properties of high strength fibre reinforced concrete exposed to elevated temperatures. In: [online]. 2017. Solid State Phenomena. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.259.85

- [20] RYDVAL, Milan, KOLÍSKO, Jiří a Ivo ŠIMŮNEK. Lightweight concrete with different content of PP fibers exposed to high temperature. In: [online]. 2017. Key Engineering Materials. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.722.33
- [21] RYDVAL, Milan, David ČÍTEK, KOLÍSKO, Jiří a Zbyšek PAVLÍK. UHPC Reinforced by Hybrid Fibers and its Resistance to High Temperature Loading. In: [online]. 2018. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.272.209
- [22] RYDVAL, Milan, KOLÍSKO, Jiří, Petr HUŇKA a Tomáš MANDLÍK. Experimental testing of layered UHPFRC beams. In: [online]. 2014. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.346
- [23] RYDVAL, Milan, Petr HUŇKA a KOLÍSKO, Jiří. Dependence of load bearing capacity and homogeneity of the steel fiber distribution. In: *52nd International Conference on Experimental Stress Analysis 2014* [online]. 2014. ISBN 978-80-231-0377-6. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84906283180&origin=inward&txGid=5a10c5021a4486255f68e23c08a873bf>
- [24] RYDVAL, Milan, David ČÍTEK, KOLÍSKO, Jiří a Zbyšek PAVLÍK. UHPC Reinforced by Hybrid Fibers and its Resistance to High Temperature Loading. *Solid State Phenomena* [online]. 2018, **272**, 209–213. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.272.209