

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv orientace vláken na odolnost cementového kompozitu vůči
extrémnímu zatížení

2017

Karel Hurtig

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum

**Vliv orientace vláken na odolnost cementového kompozitu vůči
extrémnímu zatížení**

**The influence of fibre orientation in cementitious composite on
extreme load resistance**

Bakalářská práce

Autor: Karel Hurtig
Vedoucí práce: Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D .
Akademický rok: 2016/2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hurtig Jméno: Karel Osobní číslo: 395686

Zadávací katedra: Experimentální centrum

Studijní program: Stavitelství

Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv orientace vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení

Název bakalářské práce anglicky: The influence of fibre orientation in cementitious composite on extreme load resistance

Pokyny pro vypracování:

Zpracování rešerše, výroba zkušebních vzorků, testování na extrémní zatížení, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

M. Tvarog, Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů, diplomová práce.

VANDEWALLE L., HEIRMAN G., F. VAN RICKSTAL: Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete in: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete. RILEM, 2008.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 15.2.2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Praha, dne 2017

.....

Karel Hurtig

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Romaně Lovichové za její odborné vedení, rady a vstřícný přístup v průběhu zpracování této práce. Rovněž děkuji Ing. Michalu Márovi a Ing. Janu Zatloukalovi, Ph.D. za pomoc a realizaci experimentální části práce.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na odolnost cementového kompozitu vyztuženého ocelovými vlákny, vůči dopadu deformovatelného projektilu vystřeleného z pušky ráže $7,62 \times 39$. Zkoumá se vliv orientace bednění, která je příčinou různé orientace vláken uvnitř betonového vzorku, čímž se dosáhne rozdílných výsledků odolnosti vůči dopadu projektilu. Tato odolnost se vyšetřuje na třiceti deskách vyrobených z ultra vysokohodnotného betonu vyztužených ocelovými vlákny - UHPFRC. Patnáct vzorků s bedněním orientovaným vertikálně a patnáct s bedněním orientovaným horizontálně. Odolnost se klasifikuje dle vizuálního hodnocení a měření lokálního poškození na čelní a zadní straně zkoumaného vzorku. Provedeným experimentem je zjištěn pozitivní vliv na odolnost vůči dopadu projektilu u desek s bedněním orientovaným vertikálně.

Klíčová slova: UHPFRC, poloha bednění, náraz projektilu, lokální poškození

Abstract

This thesis is focused on resistance of steel fibre-reinforced cement composite to impact of the deformable projectile shot from the 7.62×39 caliber. The influence of formwork position, which is the cause of the different orientation of the fibres, is explored. Different result of resistance to impact of the projectile is caused by different orientation of the fibres. The resistance is investigated on 30 slabs made of ultra-high performance steel fibre-reinforced concrete (UHPFRC). Fifteen specimens with vertical orientation and fifteen with horizontal orientation. The resistance is classified according to the visual evaluation and local damage measurement on the front side and the back side of the examined specimens. The experiment has been shown to have a positive influence on the resistance to impact of the projectile on the slabs with vertically oriented formwork.

Key words: UHPFRC, position of formwork, projectile impact, local deformation

Obsah

1	Úvod.....	15
1.1	Motivace.....	15
1.2	Cíl práce	15
2	Teoretická část	16
2.1	Vysokohodnotný beton (HPC).....	16
2.1.1	Složky vysokohodnotného betonu	17
2.1.2	Vysokopevnostní beton (HSC)	22
2.2	Beton vyztužený vlákny	24
2.2.1	Ocelová vlákna	25
2.2.2	Pevnostní třídy vláknobetonu	27
2.3	Reologické vlastnosti cementové směsi.....	29
2.3.1	Newtonská a nenevtonská kapalina	29
2.3.2	Viskozita čerstvého betonu	34
2.4	Orientace ocelových vláken v cementovém kompozitu.....	39
2.4.1	Faktor orientace	39
2.4.2	Efekt stěn bednění.....	40
2.4.3	Orientace tokem viskózního materiálu	41
2.4.4	Měření a vizualizace	44
2.5	Lokální deformace betonu způsobená dopadem projektilu	47
2.5.1	Projektil.....	47
2.5.2	Účinky dopadu projektilu	49
2.5.3	Empirický vztah k vyjádření charakteristik lokální deformace	51
2.5.4	Vyhodnocení odolnosti materiálu vůči zásahu projektilu.....	52
3	Praktická část	55
3.1	Výroba vzorků.....	55
3.2	Testování mechanických vlastností.....	57

3.2.1	Vážení a měření	57
3.2.2	Jednoosá tlaková zkouška	57
3.2.3	Třibodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu.....	59
3.3	Zkouška zásahem projektilu.....	60
4	Závěr	66
5	Citovaná literatura.....	67

Seznam použitých zkratk a značek

UHPCFR	ultra vysokohodnotný beton vyztužený vlákny z anglického: Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete
HPC	vysokohodnotný beton z anglického: High Performance Concrete
HSC	vysokopevnostní beton z anglického: High Strength Concrete
SCC	samozhutnitelný beton z anglického: Self Compacting Concrete
FRC	beton vyztužený vlákny z anglického: Fibre-Reinforced Concrete
UHPC	ultra vysokohodnotný beton z anglického: Ultra-High Performance Concrete
UHSC	ultra vysokopevnostní beton z anglického: Ultra-High Strength Concrete
PVA	polyvinilamid
FMJ	celoplášťová střela z anglického: Full Metal Jacket
TBO	třída balistické odolnosti
C ₃ A	trikalcium aluminát
C ₃ S	trikalcium silikát
C ₂ S	dikalcium silikát
AFt	aluminát ferrit bisulfát
AFm	aluminát ferrit monosulfát
C-A-H	kalcium aluminát hydrát
C-S-H	kalcium silikát hydrát
CuZn 10	slitina mědi a zinku (90 % mědi, 10% zinku)
v/c	vodní součinitel, hmotnostní poměr vody k cementu [-]
v/b	hmotnostní poměr vody k pojivu [-]
f _{ck,cyl}	pevnost v tlaku betonu stanovaná na válcích [MPa]
f _{ck,cube}	pevnost v tlaku betonu stanovaná na krychlích [MPa]
f _{fc,ck,cub}	pevnost v tlaku vláknobetonu stanovaná na krychlích [MPa]
f _{fc,ck}	pevnost v tlaku vláknobetonu stanovaná na válcích [MPa]
f _{fc,tk}	pevnost vláknobetonu v dostředném tahu [MPa]
f _{fc,tk,fl}	pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu [MPa]
f _{fc,tk,sp}	pevnost vláknobetonu v příčném tahu [MPa]
p	normálové napětí [Pa]
dS	elementární plocha v kapalině [m ²]
dF	elementární síla [N]
dF _n	normálová složka elementární síly dF [N]

dF_t	tečná složka elementární síly dF [N]
τ	tečné napětí [Pa]
η	dynamická viskozita [Pa·s]
dy	výška elementárního hranolu [m]
v	rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
dv	přírůstek rychlosti [$m \cdot s^{-1}$]
ν	kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$]
ρ	hustota kapaliny [$kg \cdot m^{-3}$]
du/dy	rychlostní gradient [s^{-1}]
τ_{0d}	dynamická mez toku [MPa]
τ_{0s}	statická mez toku [MPa]
$\eta(T)$	funkce dynamické viskozity [Pa·s]
T	čas [s]
k	látková konstanta [Pa·s]
b	konstanta pro danou kapalinu [K]
Θ	konstanta pro danou kapalinu [K]
$\eta(p)$	funkce dynamické viskozity [Pa·s]
p	tlak [Pa]
α_T	koeficient závislý na teplotě [-]
φ	úhel pootočení válce viskozimetru [°]
k_p	konstanta přístroje – viskozimetru
ω	úhlová rychlost [s^{-1}]
τ_0	mez toku [MPa]
μ_p	plastická viskozita [Pa·s]
γ	smyková rychlost [s^{-1}]
c	konstanta regrese
n	odchylka od newtonského chování
K	konzistence
μ_∞	zdánlivá viskozita
α_t	koeficient závislý na čase
n_f	počet vláken
α	faktor orientace [-]
V_f	procentuální zastoupení vláken v celkovém objemu [-]
A_f	plocha průřezu vlákna [m^2]

$\Delta\alpha_w$	přírůstek hodnoty faktoru orientace [-]
L	délka vlákna [mm]
B	šířka vlákna [mm]
H	výška zkoumaného prvku [mm]
α_0	faktor orientace v místě neovlivněným stěnovým efektem [-]
φ	úhel mezi vláknem a osou kolmou ke smykové rovině [°]
θ	úhel mezi průmětem vlákna na smykovou rovinu a směrem toku [°]
C φ	konstanta závislá na počáteční orientaci vlákna
θ_0	úhel θ v čase $t = 0$ s [°]
φ_0	úhel φ v čase $t = 0$ s [°]
V_0	úst'ová rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
V_{100}	rychlost střely po 100 metrech [$m \cdot s^{-1}$]
V_{200}	rychlost střely po 200 metrech [$m \cdot s^{-1}$]
V_{300}	rychlost střely po 300 metrech [$m \cdot s^{-1}$]
E_0	energie střely po opuštění hlavně [J]
E_{100}	energie střely po 100 metrech [J]
E_{200}	energie střely po 200 metrech [J]
E_{300}	energie střely po 300 metrech [J]
x	hloubka penetrace [m]
e	mez perforace [m]
h_s	mez scabbingu [m]
M	hmotnost projektilu [kg]
d	průměr projektilu [m]
f_c	pevnost betonu v tlaku [Pa]
V_0	rychlost projektilu při nárazu [$m \cdot s^{-1}$]
N	faktor tvaru projektilu [-]
V_{BL}	minimální úst'ová rychlost střely pro dosažení perforace [$m \cdot s^{-1}$]

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: ČÁSTICE CEMENTU VE FLOKULOVANÉM STAVU [3]	19
OBRÁZEK 2: SCHÉMA ČERSTVÝCH CEMENTOVÝCH PAST S RŮZNOU HODNOTOU VODNÍHO SOUČiniteLE [3]	19
OBRÁZEK 3: ZAPLNĚNÍ PROSTORŮ MEZI ZRNY CEMENTU KŘEMIČITÝM ÚLETEM [3]	20
OBRÁZEK 4: TYPY DISPERGUJÍCÍCH ČINIDEL [3]	21
OBRÁZEK 5: VLIV VLÁKEN NA PRŮHYB BETONU V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ V TAHU OHYBEM [3]	25
OBRÁZEK 6: VLÁKNO PŘÍMÉHO TVARU, KRUHOVÉHO PRŮŘEZU [10]	26
OBRÁZEK 7: KONCOVÁ ÚPRAVA DVOJNÁSOBNÝM OHNUTÍM [10]	26
OBRÁZEK 8: ZPLOŠTĚLÁ A ROZŠÍŘENÁ KONCOVÁ OBLAST [10]	26
OBRÁZEK 9: KONCOVÁ ÚPRAVA VE TVARU KOMOLÉHO KUŽELE [10]	27
OBRÁZEK 10: VLÁKNA ZVLNĚNÁ, S RŮZNOU DÉLKOU VLNY [10]	27
OBRÁZEK 11: OCELOVÝ DRÁTEK S PERIODICKÝMI VTISKY A KONCOVOU ÚPRAVOU OHNUTÍM [10]	27
OBRÁZEK 12: KONCOVÁ ÚPRAVA SILOVÝM ÚČINKEM STRÍHANÍ OCELOVÉHO PÁSKU [10]	27
OBRÁZEK 13: MIKROVLÁKNA PŘÍMÉHO TVARU S UPRAVENÝM POVRCHEM [12]	27
OBRÁZEK 14: OCELOVÁ MIKROVLÁKNA O PRŮMĚRU 0,15MM A DÉLKY 6 MM [13]	27
OBRÁZEK 15: ZÁVISLOST TEČNÉHO NAPĚTÍ A ZDÁNĹIVÉ VIZKOZITY NA RYCHLOSTNÍM GRADIENTU [15]	31
OBRÁZEK 16: ODEZVA TIXOTROPNÍHO MATERIÁLU NA KOMPLEXNÍ MINULOST SMYKOVÝM NAMÁHÁNÍM [16]	32
OBRÁZEK 17: TOKOVÉ KŘIVKY PRO TIXOTROPNÍ A REOPEKTICKÝ SYSTÉM [15]	32
OBRÁZEK 18: CHOVÁNÍ ANIZOTROPNÍCH ČÁSTIC PŘI TOKU [15]	33
OBRÁZEK 19: ROTAČNÍ VIZKOZIMETRY (A) COUETTŮV TYP - DVA VÁLCE, (B) SEARLEŮV TYP - KUŽEL/DESKA [15]	34
OBRÁZEK 20: CHOVÁNÍ TIXOTROPNÍ TEKUTINY. (A) SNÍŽENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ, (B) ZVÝŠENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ [19]	36
OBRÁZEK 21: STATICKÁ A DYNAMICKÁ MEZ TOKU [20]	37
OBRÁZEK 22: ZVÝŠENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ, PO DOBĚ KDY BYLA CEMENTOVÁ PASTA V KLIDU [19]	37
OBRÁZEK 23: TIXOTROPNÍ SMYČKA, JAKO VÝSLEDEK ZVYŠOVÁNÍ A SNÍŽOVÁNÍ SMYKOVÉ RYCHLOSTI VIZKOZIMETRU [19]	38
OBRÁZEK 24: FAKTOR ORIENTACE V ZÁVISLOSTI NA ČASE [22]	40
OBRÁZEK 25: STĚNOVÝ EFEKT VE VZDÁLENOSTI POLOVINY DÉLKY VLÁKNA [22]	40
OBRÁZEK 26: SCHÉMA ORIENTACE VLÁKEN VLIVEM TOKU [23]	41
OBRÁZEK 27: ORIENTACE VLÁKEN VLIVEM RYCHLOSTI PROUDĚNÍ U STĚN BEDNĚNÍ [24]	41
OBRÁZEK 28: IDEÁLNÍ SMYKOVÝ TOK MEZI DVĚMA STĚNAMI [22]	42
OBRÁZEK 29: ÚHLY POPISUJÍCÍ ORIENTACI VLÁKNA [22]	42
OBRÁZEK 30: ORIENTACE VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA ČASE [22]	43
OBRÁZEK 31: LITÍ BETONOVÉ SMĚSI S VOLNÝM POVRCHEM A MEZI DVĚMA STĚNAMI [22]	44
OBRÁZEK 32: ORIENTACE PVA VLÁKEN (0,5%) VLIVEM TOKU [26]	45
OBRÁZEK 33: VERTIKÁLNÍ ŘEZ VZORKU UHPFRC [26]	45
OBRÁZEK 34: HORIZONTÁLNÍ ŘEZY VZORKU UHPFRC [26]	46
OBRÁZEK 35: PODÉLNÉ ŘEZY VZORKU C Z EXPERIMENTU [27]	46
OBRÁZEK 36: VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ STŘEL [28]	48

OBRÁZEK 37: TVAR A ROZMĚRY NÁBOJE 7,62×39 [32].....	49
OBRÁZEK 38: ÚČINKY DOPADU STŘELY NA BETONOVÝ CÍL [33]	50
OBRÁZEK 39: VERTIKÁLNÍ BEDNĚNÍ	56
OBRÁZEK 40: HORIZONTÁLNÍ BEDNĚNÍ	56
OBRÁZEK 41: FORMA NA VZORKY PRO ZKOUŠKU V TAHU ZA OHYBU [34]	56
OBRÁZEK 42: MÍCHAČKA S NUCENÝM OBĚHEM [35]	56
OBRÁZEK 43: HISTOGRAM ČETNOSTI PEVNOSTI V TLAKU TESTOVANÝCH VZORKŮ	57
OBRÁZEK 44: ČASOVÉ ROZLOŽENÍ VÝSLEDNÝCH PEVNOSTÍ V TLAKU	58
OBRÁZEK 45: HISTOGRAM ČETNOSTI PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU TESTOVANÝCH VZORKŮ	59
OBRÁZEK 46: TLAČNÝ PŘÍPRAVEK BTP 300 [36]	59
OBRÁZEK 47: OHYBOVÝ PŘÍPRAVEK BOP 15 [36]	59
OBRÁZEK 48: TESTOVACÍ SESTAVA	60
OBRÁZEK 49: 7,62 × 39 FMJ S OLOVĚNÝM JÁDREM.....	60
OBRÁZEK 50: CELKOVÝ PRŮSTŘEL UHPFRC DESKY Č. 13L.....	62
OBRÁZEK 51: KRÁTER PO ZÁSAHU ČELNÍ STRANY UHPFRC DESKY Č. 10L	62
OBRÁZEK 52: VYTRŽENÍ MATERIÁLU ZE ZADNÍ STRANY DESKY Č. 6L VLIVEM TAHOVÉHO NAPĚTÍ	62
OBRÁZEK 53: ZADNÍ STRANY DESKY Č. 10L, KDE ZŮSTAL MATERIÁL PŘICHYCEN	63
OBRÁZEK 54: PROJEKTIL, UVÍZNUTÝ V UHPFRC DESCE Č. 3.....	64
OBRÁZEK 55: KRÁTER PO ZÁSAHU ČELNÍ STRANY UHPFRC DESKY Č. 4.....	64
OBRÁZEK 56: ZADNÍ STRANA DESKY Č. 4, KDE ZŮSTAL MATERIÁL PŘICHYCEN.....	65

Seznam tabulek

TABULKA 1: TŘÍDY VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU [3].....	17
TABULKA 2: HODNOTY EFEKTIVNÍ LOMOVÉ ENERGIE V ZÁVISLOSTI NA OBSAHU VLÁKEN [9]	24
TABULKA 3: PEVNOSTNÍ TŘÍDY VLÁKNOBETONU V TAHU NA MEZI VZNIKU MIKROTRHLINY	28
TABULKA 4: PEVNOSTNÍ TŘÍDY VLÁKNOBETONU V TLAKU STANOVENÉ DLE ZKOUŠEK PEVNOSTI NA KRYCHLÍCH	29
TABULKA 5: PARAMETRY NÁBOJE 7,62 × 39 [31]	49
TABULKA 6: ČSN 39 5360 - KLASIFIKACE A POŽADAVKY NA TESTOVÁNÍ S PISTOLEMI A PUŠKAMI.....	53
TABULKA 7: EN 1522 - KLASIFIKACE A POŽADAVKY PRO TESTOVÁNÍ S PISTOLEMI A PUŠKAMI.....	54
TABULKA 8: ÚČINKY DEFORMOVATELNÉ STŘELY NA DESKY Z UHPFRC – BEDNĚNÍ HORIZONTÁLNĚ	61
TABULKA 9: ÚČINKY DEFORMOVATELNÉ STŘELY NA DESKY Z UHPFRC - BEDNĚNÍ VERTIKÁLNĚ.....	63

1 Úvod

1.1 Motivace

Beton je jeden z nejběžnějších stavebních materiálů a jeho vlastnosti závisí na mnoha faktorech. Pro zlepšení mechanických vlastností je možné přidat do betonové směsi mimo jiné i aditiva v podobě vláken různých materiálů. Jedním z materiálů do takto vyztuženého betonu jsou ocelová vlákna a takový beton nazýváme drátkobeton. V mnoha pracích bylo prokázáno, že nejen pouhá přítomnost vláken ale také jejich orientace má vliv na mechanické vlastnosti [1]. Způsobem, jak u jednoho plošného prvku dosáhnout různé orientace vláken, může být různá poloha bednění při ukládání betonové směsi.

Betonové konstrukce či části konstrukcí mohou sloužit jako ochrana proti extrémním zatížením jako například zásah projektilu či šrapnelu. Odolnost proti takovému extrémnímu zatížení je zvyšována použitím ultra vysokohodnotných betonů vyztužených ocelovými vlákny, které sníží křehkost a zvýší duktilitu materiálu. Je nutné se tomuto tématu věnovat, protože pozitivní výsledky by mohly vést k zavedení těchto materiálů do stavební praxe. Zejména do konstrukcí vyžadující funkci ochrany proti střelbě nebo výbuchům.

1.2 Cíl práce

Cílem této práce je ověřit, zda má tvar a poloha bednění, tj. je-li bednění uloženo horizontálně nebo vertikálně, vliv na orientaci ocelových vláken v cementovém kompozitu, a tím pádem i vliv na mechanické vlastnosti, touto orientací vláken zapříčiněnou. Budou zde proto shrnuty dosavadní znalosti o ultravysokohodnotném betonu vyztuženém vlákny (UHPFRC), o lokálních deformacích způsobených zásahem projektilu a o vlastnostech cementové pasty, které jsou jednou z příčin konečné orientace vláken.

Součástí práce je také výroba třiceti vzorků, na kterých bude zkoušena odolnost vůči zásahu projektilu a vyhodnocení vlivu polohy bednění. Patnáct vzorků s ukládáním směsi do bednění uloženého horizontálně a patnáct do bednění uloženého vertikálně.

2 Teoretická část

V teoretické části se tato práce zabývá vlastnostmi vysokohodnotného betonu a betonu vyztuženého vlákny. Rozebrána je reologie cementové směsi a orientace vláken v cementovém kompozitu. Nakonec je popsána lokální deformace způsobená dopadem projektilu.

2.1 Vysokohodnotný beton (HPC)

Beton je kompozitní materiál, který se skládá z plniva, pojiva, vody, příměsí a přísad. Nejběžněji se jedná o kamenivo pojené cementem. Důležitá je při výrobě betonu voda, která je spolu s cementem vstupním faktorem hydratace. V závislosti na poměru vody k cementu, jinak také vodním součiniteli (v/c), se mění mechanické vlastnosti betonu. Příměsi jsou práškovité látky, které se přidávají do betonu, aby zlepšily některé vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Rozeznáváme dva typy příměsí a to takové, které se účastní procesu hydratace, nazýváme je latentně hydraulické, a takové, které se procesu hydratace nezúčastňují a ty nazýváme inertní. Přísady jsou chemické látky přidávané do betonu v řádu několika procent, které se do betonu přidávají také pro zlepšování vlastností betonu. [2]

Vysokohodnotný beton je takový beton, jehož vlastnosti převyšují vlastnosti běžných betonů. Těmi jsou například vysoká pevnost v tlaku, vysoký modul pružnosti, lepší zpracovatelnost, rychlejší dotvarování, menší spotřeba cementu a kameniva, možnost menších rozměrů prvků v konstrukci a další. [2] Těchto vlastností, se dosahuje snížením vodního součinitele, tedy použitím menšího množství záměsové vody, použitím kameniva s co největší shodou s ideální křivkou zrnitosti a cementu s vhodným složením a vysokou pevnostní třídou. Snížení množství vody má ale hranici a tou je minimální množství vody pro hydrataci cementu. Uvádí se hodnota vodního součinitele kolem 0,20. Se snížením vodního součinitele také souvisí zpracovatelnost cementové směsi. Dobrou zpracovatelnost směsi společně s nízkým vodním součinitelem můžeme zajistit s použitím vhodné přísady, kterou jsou plastifikátory, superplastifikátory a zpomalovače tuhnutí a tvrdnutí. [3]

Vysokohodnotné betony jsou zaříděny do pěti tříd s přírůstkem 25 MPa. Uvedená tlaková pevnost je měřena na vzorcích stáří 28 dní na válcích 100 x 200 mm.

Tabulka 1: Třídy vysokohodnotného betonu [3]

Pevnost v tlaku [MPa]	50	75	100	125	150
Třída vysokohodnotného betonu	I	II	III	IV	V

Mezi vysokohodnotné betony patří například beton vysokopevnostní (HSC), samozhutitelný (SCC), vlákny vyztužený (FRC), ultravysokohodnotný (UHPC), ultravysokopevnostní (UHSC) nebo ultravysokohodnotný vyztužený vlákny (UHPFRC). [3]

2.1.1 Složky vysokohodnotného betonu

Stejně jako běžný beton, tak i vysokohodnotný beton má velké množství receptur závislých od konečného využití. Dále bude tedy zmíněno složení směsi, jež bylo předmětem experimentu a které se ujalo jako konečný návrh složení.

Kamenivo

S rostoucí tlakovou pevností betonu se kamenivo stalo nejslabším článkem, a proto mu musí být věnována patřičná pozornost. Vhodným kamenivem pro výrobu vysokohodnotných betonů je takové, které obsahuje vysoké množství SiO_2 , s maximální velikostí zrna okolo 1 mm. Pro zajištění vysoké hutnosti ztvrdlého betonu je důležité, aby se granulometrie co nejvíce přibližovala ideální křivce zrnitosti. Jinak řečeno, chceme dosáhnout co nejmenší mezerovitosti, protože při této zrnitosti a požadované zpracovatelnosti betonu, se při daném množství cementu, spotřebuje minimální množství vody. [3]

Proto je vhodným kandidátem čistý křemičitý písek o velikosti zrna od 0,1 do 1,2 mm se střední velikostí zrna d_{50} okolo $500\mu\text{m}$.

Cement

Nejvhodnějším typem cementu podle jeho složení je cement CEM I (ČSN EN 197-1). Jde o tzv. portlandský cement, jehož hlavními složkami jsou portlandský slínek a síran vápenatý ve formě sádrovce, hemihydrátu, anhydritu nebo jejich směsí. Velký vliv na konečnou pevnost betonu má jemnost mletí cementu. Čím jemnější cement vyrobíme, tím vyšší bude pevnost. Pro výrobu vysokohodnotných betonů se využívá pevnostních tříd 42,5 a 52,5 s dalším rozdělením podle počáteční doby tuhnutí na typy N a R, tedy s normální nebo vysokou počáteční pevností. [3]

Smícháme-li portlandský cement s vodou, nastane tzv. proces hydratace. Směs začne tuhnut a dále tvrdnout po dobu několika týdnů. Je to velmi komplexní děj, proto jej shrňme jen jako schéma postupných kroků onoho procesu. Počátek tuhnutí je způsoben reakcí mezi vodou, sádrou a C_3A (trikalcium aluminát). Vznikají krystalické hydráty kalcium-alumino-hydrát (C-A-H), ettringit (AFt - aluminát ferrit trisulfát) a monosulfát (AFm - aluminát ferrit monosulfát). Následné vytvrzování a vznik kohezních sil je důsledkem reakcí vody s C_3S (trikalcium silikát) za vzniku amorfního hydrátu, který se označuje jako C-S-H gel (kalcium-silikátový-hydrát). Hydratace C_2S (dikalcium silikát) probíhá mnohem pomaleji než uvedené reakce. Nárůst pevnosti je nejrychlejší během prvních sedmi dnů, potom nastává vytvrzování. [4] Zkoušky pevnosti dle ČSN EN 12390 se provádějí po 28 dnech.

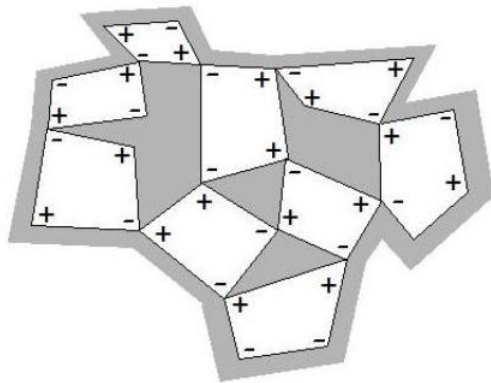
Voda

Voda má při výrobě betonu dvě hlavní funkce - fyzikální a chemickou. Fyzikální funkcí je dosažení požadovaných reologických vlastností. O chemické funkci mluvíme v souvislosti s hydratací cementu, kde je voda jeden ze vstupních faktorů tohoto procesu. Smícháním vody a pojiva nastává proces hydratace, což je velmi komplexní děj, kde postupnými chemickými procesy vzniká z čerstvé pasty cementu a vody, tvrdá pevná hmota.[3]

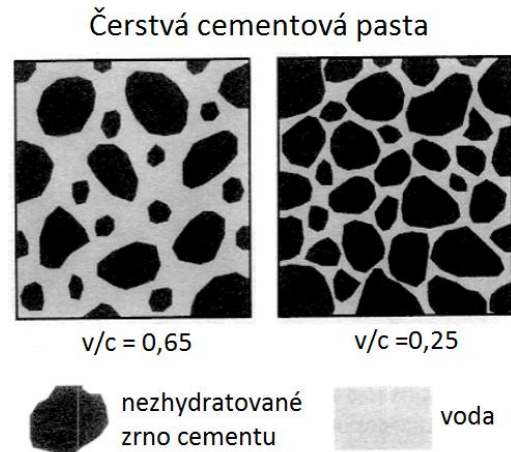
Více než sto let už je známo, že čím méně vody použijeme, tím vyšších pevností betonu dosáhneme. Zavedl se tedy pojem vodní součinitel (v/c), což je poměr vody k cementu. Jelikož se ale při výrobě betonu čím dál víc používají příměsi jako např. popílek, přírodní pucolány, strusku, křemičité úlety, mletý křemen nebo vápenec, bylo by vhodné zavést nový pojem, kde by byla v poměru voda k množství jemných částic, poskytujících betonu jeho pevnost. Dle Aitcina tato charakteristika pojmenována jako poměr voda/pojivo, označená v/b (b-binder). [3]

Ideálním betonem tedy může být takový, který při obsahu vody potřebným pro dosažení reologických vlastností k zhutnění, dosáhne maximální pevnosti. Cementová zrna jsou ale náchylná k flokulaci a v této flokulované struktuře zachycují část vody, která je nutná k ztekucení směsi (obr. 1). Abychom nemuseli dodávat více vody kvůli zpracovatelnosti betonu, musí se do směsi dodávat chemické látky, které brání flokulaci a tím snižují množství záměsové vody. [3]

Při nízké hodnotě vodního součinitele se částice cementu v cementové pastě dostávají blíže k sobě (obr. 2) a proto dochází k rychlejšímu vzniku vazeb mezi jednotlivými zrny a tím pádem k rychlejšímu vývoji počátečních pevností. [3]



Obrázek 1: Částice cementu ve flokulovaném stavu [3]



Obrázek 2: Schéma čerstvých cementových past s různou hodnotou vodního součinitele [3]

Příměsi

Cement jako pojivo se často nahrazuje jednou nebo kombinací více minerálních příměsí z důvodu nejen ekonomického ale také kvůli reologii betonové směsi. Tyto příměsi nazýváme pucolány. Patří mezi latentně hydraulické látky, to znamená, že sami o sobě nehydratují, ale pokud jsou součástí cementové směsi, kde propukla hydratace, vybudí se u nich také schopnost hydratovat, jejímž výsledkem je podpora tvrdnutí této směsi. Příměsi mají společný rys a tím je obsah křemičitanů, které při smíchání s vodou tvoří s vápnem kalcium-silikát-hydráty, stejně jako vznikají při hydrataci cementu. [3]

Při hydrataci portlandského cementu se uvolní velké množství vápna. Vzniklý portlandit nepřispívá k pevnosti ztvrdlého betonu a díky jeho lehkému vylouhování je viníkem pórovitosti cementové směsi. Při použití pucolánů může být toto vzniknuté vápno využito na přeměnu do C-S-H gelu, nikdy však zcela kompletně. [3]

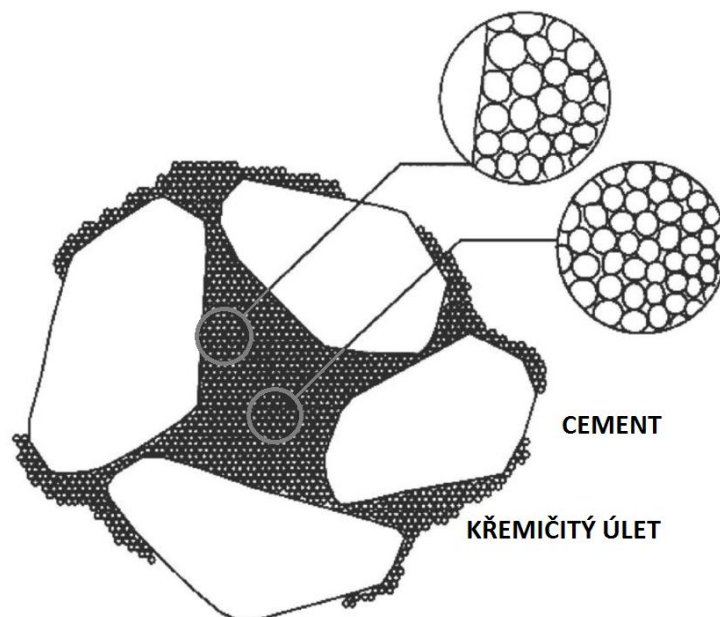
Mikrosilika

Mikrosilika, jinak také označována jako křemičitý úlet nebo anglicky silica fume, vzniká jako vedlejší produkt při výrobě ferosilicia, ferosilikochromu, ferosilikomanganu, krystalického křemíku nebo silikokalcia. Obsahuje až 98% amorfního křemene. Obsah SiO_2 v křemičitém úletu klesá v závislosti na typu

produkované slitiny. Částice mikrosiliky jsou stokrát menší než částice cementu, tedy o rozměrech 0,1 - 1 μm s měrným povrchem 15 - 25 tisíc $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. [3]

Na mechanické vlastnosti betonu nemá vliv jen rychlá pucolánová reakce křemičitého úletu ale také jeho schopnost vyplňovat mezery mezi zrny cementu a tudíž mít funkci tzv. filleru (obr. 3). Tato funkce je ale podmíněna použitím superplastifikátoru, který částice mikrosiliky dobře disperguje. Účinek filleru je nezbytný pro zvýšení zpracovatelnosti cementových směsí s velmi nízkým vodním součinitelem. Křemičitý úlet má ztekucující účinek, jehož důvod není zcela objasněn. Někteří přirovnávají účinky jemných kuliček mikrosiliky k účinkům kuličkových ložisek. Zrna mikrosiliky také vytěsňují vodu z mezer mezi flokulovanými zrny cementu a tím se zvyšuje množství vody pro ztekucení cementové směsi, což by také mohlo být důvodem ztekutujícího účinku. [3]

Spojením těchto různých způsobů působení mikrosiliky v betonu vede k velmi souvislé mikrostruktuře, kvůli které se zlepšují pevnostní charakteristiky hlavně mezi 7 a 28 dny. [3]



Obrázek 3: Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem [3]

Křemičitá moučka

Tato přísada vzniká jemným mletím křemičitých písků, čímž vzniká velmi jemné kamenivo s až 98,5% obsahem SiO_2 , které lze nazývat jako křemenný filler. Plní funkci mikroplniva, jehož částice jsou menší než cementová zrna. Kvalita křemičité moučky je ovlivněna granulometrií a jemností mletí. Čím lepší granulometrická

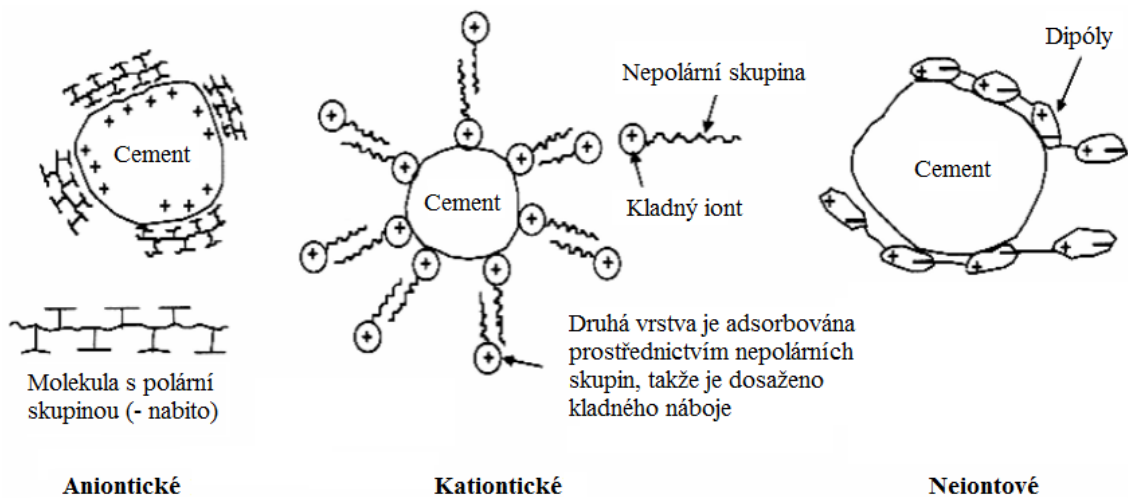
skladba, tím víc může moučka přispívat k vyšším pevnostem betonu, jelikož vyplní mezery mezi cementovými zrny a dalšími jemnými složkami. [3]

Přísady

Přísady jsou látky, které se přidávají do betonové směsi pro zajištění námi požadovaných vlastností. Obsah těchto látek je v řádu jednotek procent z celkového objemu betonové směsi.

Plastifikátory a superplastifikátory

K redukci flokulace neutralizací povrchových nábojů na povrchu zrn cementu se používají organické látky, které nazýváme plastifikátory a superplastifikátory. Dělíme je dle povahy na kationtické, aniontické a ne-iontové (obr. 4). Kationtické a aniontické plastifikátory jsou tvořeny molekulami, jejichž řetězce mají na konci výrazný náboj a ten neutralizuje opačné elektrické náboje na povrchu cementových částic. Plastifikátory ne-iontové povahy působí svými molekulami jako dipóly, obklopující zrna cementu. [3]



Obrázek 4: Typy dispergujících činidel [3]

Typy superplastifikátorů:

- sulfonované soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydu.
- sulfonované soli polykondenzátů melaninu a formaldehydu.
- lignosulfonáty s velmi nízkým obsahem sacharidů.
- polyakryláty (polykarboxyláty).

Je nutné zmínit, že dosud neexistuje teorie vysvětlující vzájemné působení superplastifikátoru s cementem při míchání betonu a na počátku hydratace. Je známo,

že superplastifikátory zasahují mimo hydrataci cementu také do rozpustnosti síranů a poměru $\text{SO}_4^{2-}/\text{Al}_2\text{O}_3$, kde hodnota tohoto poměru má vliv na ztrátu zpracovatelnosti. Platí ale, že čím jemnější cement použijeme, tím větší je nutné množství superplastifikátoru pro dosažení dané zpracovatelnosti. Platí tedy určitá úměra mezi měrným povrchem cementu a množstvím použitého superplastifikátoru. [3]

Velkou roli má přítomnost síranu vápenatého, který se ke slínku přidává kvůli regulaci tuhnutí cementu. Za přítomnosti síranu vápenatého vzniká z C_3A ettringit., jehož povlak je nepropustný a zamezuje další hydrataci C_3A . Této periodě se říká dormantní (mrtvá) a během ní se zachovává zpracovatelnost betonové směsi. Cement může obsahovat i další sírany, které se do něj dostanou při výrobě, a ty pak reagují se síranem vápenatým, přičemž ovlivňují hydrataci C_3S . Za přítomnosti superplastifikátorů může být ovlivněna rovnováha mezi rozpouštěním síranu vápenatého a C_3A . Důsledkem je potom falešné nebo rychlé tuhnutí, v závislosti na obsahu síranu vápenatého v cementu, který stanovuje výrobce. Musíme tedy dbát na kompatibilitu cementu s plastifikátorem, protože i když oba splňují normy na výrobu, nemusí být spolu slučitelný. [3]

Odpěňovací přísady

Tato přísada se využívá pro pohledový beton, kde se požaduje hladký povrch. Díky přidání do betonové směsi se vytěsňují vzduch během míchání a ukládání a tím se zvýší hutnost ztvrdlého betonu. Nejčastěji se uplatňuje v betonové směsi, kde se jako superplastifikátor použije polykarboxylát a kde se do této směsi při míchání vnáší velké množství vzduchu, které je nutné odstranit. Odpěňovací přísady také snižují viskozitu a brání rozměšování betonové směsi. Mohou být v kapalně nebo pevně formě a vyrábějí se z látek na bázi mastných kyselin, polyglykolů nebo esterů minerálních kyselin. [5]

2.1.2 Vysokopevnostní beton (HSC)

Vysokopevnostní beton jen podmnožinou betonu vysokohodnotného. Onou zlepšenou vlastností je tlaková pevnost.

Zatvrdlá betonová směs, bez přidaných ocelových vláken, použitá v experimentální části, lze charakterizovat jako vysokopevnostní.

Podle kritérií tabulky 7 normy ČSN EN 206-1 se obyčejný a těžký beton podle pevnosti v tlaku rozděluje do tříd pevnosti, která se udává ve formě značky C pro beton

(C jako concrete) a dvěma hodnotami pevnosti v MPa. První z hodnot je pevnost v tlaku $f_{ck,cyl}$ stanovená na válcích o průměru 150 mm a délce 300 mm a druhá z hodnot je pevnost v tlaku $f_{ck,cube}$ stanovená na krychlích s hranou o délce 150 mm. Obě hodnoty jsou stanoveny ve stáří 28 dní testovaných vzorků. [6]

Betony normálních pevností dosahují hodnot válcové pevnosti 50 MPa u vysokopevnostních se dostávají až do hodnoty 150 MPa. [3] Norma ČSN EN 206-1 uvádí jako nejvyšší pevnostní třídu C100/115. [6]

Tento beton vyniká jednorodostí struktury, kde porušení na mezi pevnosti nenastává v zóně mezi plnivem a pojivem, ale vznik poruchy nastává v zrnech kameniva. Tohoto zlepšení je dosaženo použitím velmi jemného kameniva a dalších přísad, které vyplní póry a vstřebají vodu nutnou pro zpracování čerstvé směsi. [7]

Nevýhodou vysokopevnostního betonu je jeho velká křehkost a malá duktilita, proto se přidává rozptýlená výztuž v podobě ocelových, skelných nebo polypropylenových vláken. V tahu za ohybu má HSC více než 8 MPa. [7]

Ultravysokopevnostní beton (UHSC) má velmi vysoký obsah cementu. Jelikož je záměsová voda méně než by byla potřeba na hydrataci všech cementových zrn, nehydratovaný cement tvoří plnivo betonové směsi.

Možnosti zajištění vlastností vysokopevnostního betonu [8]:

- použitím kameniva o maximálním rozměru zrna 1 mm. Při použití hrubého kameniva často vznikají vlivem různých mechanických a fyzikálních vlastností mikrotrhliny v zóně mezi maticí a kamenivem a těm tímto opatřením zabráníme,
- přidáním přísad jako je např. mikrosilika. Ta reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Výsledkem je vyplnění prázdných míst. Dávkuje se až do 25% hmotnosti cementu,
- snížením vodního součinitele,
- zvýšením hustoty betonové směsi dalšími jemnými částicemi,
- tepelným zpracováním zlepšit mikrostrukturu betonu,
- cement dávkovat v rozmezí 500 – 900 kg/m^3 ,
- přidáním vláken (ocelová, skelná, polypropylenová) v řádu jednotek procent objemu,
- přidáním superplastifikátorů pro snížení vodního součinitele a zároveň zajištění dobré zpracovatelnosti.

Zatřídění vysokohodnotného betonu vyztuženého vláknem je shrnuto v kapitole 2.2.2.

2.2 Beton vyztužený vlákny

Pro materiály pojené cementem je použití vláken tím nejlepším řešením, jak zamezit růstu trhlin, které vznikají kvůli existenci tahového napětí. Stejně tak je zvýšena rázová pevnost. [3]

Vlákna se dle chemického složení dělí na polymerní, skelná a ocelová. Jelikož polymerní ani skelná vlákna nejsou součástí této práce, nebudou zahrnuty ani v teoretické části a dále budou popsány jen ocelová vlákna – drátky.

Drátky se dají charakterizovat poměrem délky k průměru, tvarem a jejich obsahem v betonu vyjádřeným v kg/m^3 . Kovová vlákna zvyšují houževnatost, rázovou pevnost a tažnost betonu. [3]

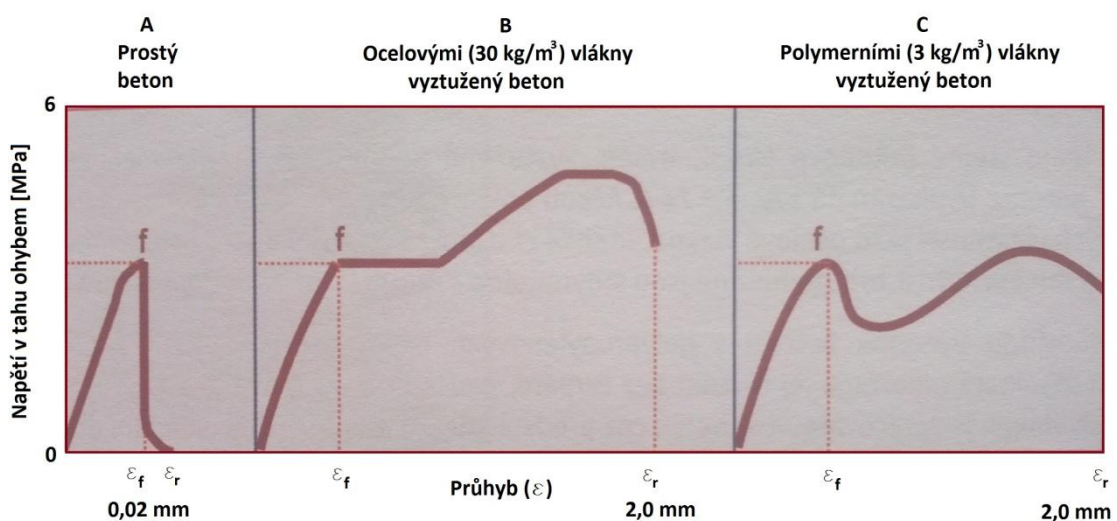
Beton vyztužený ocelovými vlákny se v tahu chová velmi podobně jako prostý beton až do doby, kdy u nevyztuženého betonu dochází k dosažení meze pevnosti. Po vzniku trhliny nedochází u vyztuženého betonu ke kolapsu, ale po určité plastické prodlevě napětí v betonu dále roste s následným postupným poklesem (obr. 5). Takto vyztužený beton vykazuje tažnost, která je úměrná deformaci. Další vlastností vláknobetonu je houževnatost, kterou interpretujeme jako celkovou energii spotřebovanou během lomu. V pracovním diagramu betonu vyztuženého ocelovými vlákny je možné houževnatost vyčíslit pomocí plochy omezené vytvořenou křivkou a osou deformace. Tvar křivky je přímo závislý na množství použitých vláken. Houževnatost betonu dodává materiálu odolnost proti rázu. [3] Hodnoty lomové energie v závislosti na obsahu vláken v cementovém kompozitu jsou v tab. 2. [9]

Tabulka 2: Hodnoty efektivní lomové energie v závislosti na obsahu vláken [9]

Obsah vláken [%]	Efektivní lomová energie [J/m^2]
0	80
0,5	3000
1	11000
2	17000
3	22000

U běžného betonu, kde vazba mezi cementovou maticí a povrchem vlákna není tolik silná, dochází při napětí v tahu k vytažení onoho vlákna. V průběhu vytahování uděluje vlákno materiálu houževnatost. Ve vysokohodnotném betonu je vazba natolik

silná, že síla nutná k vytažení vlákna je větší než tahová pevnost materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno. V tom případě dochází k přetržení vlákna. Beton je sice pevnější ale stále křehký. Chceme-li tedy vyztužit vysokohodnotný beton vlákny, musíme je nějakým způsobem modifikovat. Buďto zvýšíme pevnost oceli nad hodnotu, při které nedojde k přetržení vlákna, nebo ponecháme typ oceli, ale změním geometrii vlákna. Při zkrácení a zmenšení průměru snížíme napětí potřebné k vytržení vlákna z matrice pod hodnotu pevnosti oceli. Jelikož s přidáním vláken do cementové směsi souvisí zpracovatelnost, je druhá varianta mnohem přijatelnější. Použijeme-li menší vlákna, zvýšíme počet vláken na jednotku objemu a tím i zlepšíme homogenitu výsledné směsi. [3]



Obrázek 5: Vliv vláken na průhyb betonu v závislosti na napětí v tahu ohybem [3]

2.2.1 Ocelová vlákna

Výroba vláken

Existuje několik postupů jak drátky zhotovit. Pět nejčastějšími způsoby výroby jsou tyto [10]:

- stříhání „nekonečného“ ocelového drátu,
- stříhání ocelového pásku,
- frézování ocelového bloku,
- odstředování z taveniny,
- lití.

Vlákna mohou být ze surové oceli bez povrchové úpravy nebo s povrchovou úpravou pocínováním nebo pozinkováním. Ocelové drátky musí splňovat požadavky

normy ČSN EN 14889-1 a také se musí dát zatřídit do jedné z následujících skupin a tvarů [11]:

Skupina - rozhoduje základní materiál a způsob jeho zpracování

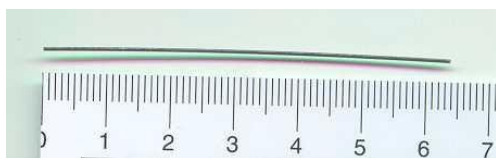
- Skupina I: Za studena tažený drát
- Skupina II: Vlákna stříhaná z plechu
- Skupina III: Vlákna oddělovaná z taveniny
- Skupina IV: Vlákna protahovaná z drátu taženého za studena
- Skupina V: Vlákna frézovaná z ocelových bloků

Tvar - přímá nebo tvarovaná ocelová vlákna s možnou přípustnou odchylkou

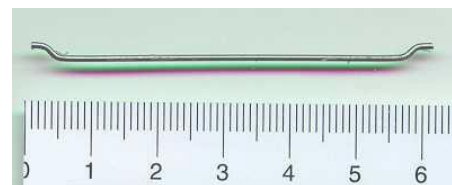
Existuje řada úprav tvaru a úprav zakončení vlákna. Mezi nejčastější tvarové úpravy patří zvlnění (obr. 10) nebo periodické vtisky (obr. 11). Průřez je kruhový, čtvercový či obdélníkový. Koncovými úpravami jsou například ohnutí jedno či dvojnásobné (obr. 7), zploštění a rozšíření (obr. 8), tvarem komolého kužele (obr. 9), úprava silovým účinkem stříhání (obr. 12) aj. [10]

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2, pro vysokohodnotný beton není možné použít běžná ocelová vlákna. V tomto případě vlákna velkých rozměrů nahrazují vlákna, někdy označována jako mikrovlákna (obr. 11, obr. 14) o jmenovitém průměru v řádu desetin milimetru a délce do 20 mm. Tyto délkové charakteristiky ale nemůžeme brát jako konečné a jasně dané, jelikož vždy závisí na návrhu složení směsi, jenž bude drátky vyztužena.

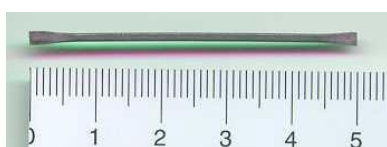
Tvary a zakončení ocelových vláken:



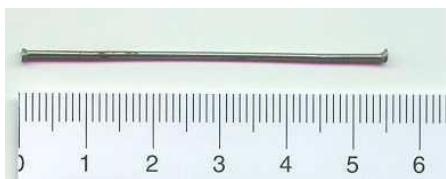
Obrázek 6: Vlákno přímého tvaru, kruhového průřezu [10]



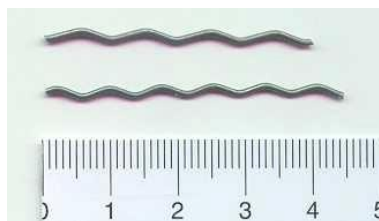
Obrázek 7: Koncová úprava dvojnásobným ohnutím [10]



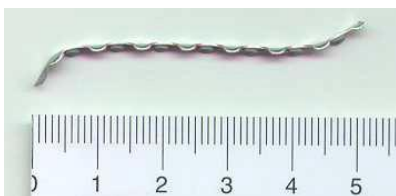
Obrázek 8: Zploštělá a rozšířená koncová oblast [10]



Obrázek 9: Koncová úprava ve tvaru komolého kužele [10]



Obrázek 10: Vlákna zvlněná, s různou délkou vlny [10]



Obrázek 11: Ocelový drátek s periodickými vtisky a koncovou úpravou ohnutím [10]



Obrázek 12: Koncová úprava silovým účinkem stříhání ocelového pásu [10]



Obrázek 13: Mikrovlákna přímého tvaru s upraveným povrchem [12]



Obrázek 14: Ocelová mikrovlákna o průměru 0,15mm a délky 6 mm [13]

2.2.2 Pevnostní třídy vláknobetonu

Pro zařazení do pevnostních tříd se postupuje podle TP FC-1-1, což jsou technické podmínky pro zkoušení a navrhování vláknobetonových konstrukcí. Z důvodu kompatibility TP FC-1-1 s ČSN EN 1992 1-1 a ČSN EN 206-1 je požadováno zachování značení pevnostních tříd v tlaku pro vláknobeton s rozdílem, že symbol označení betonu C je nahrazen symbolem FC pro vláknobeton.

Klasifikace do pevnostních tříd se provádí dle pevností zjištěných průkazními zkouškami na normových zkušebních tělesech, které mohou být buď tvaru krychle o velikosti hrany 150 mm, nebo válce o výšce 300 mm a průměru 150 mm. Pevnost naměřená na krychlích se označuje jako $f_{fc,ck,cub}$ a pevnost naměřená na válcích jako $f_{fc,ck}$.

Hodnoty pevnosti jsou uváděny v MPa. Zkušební tělesa se vytváří dle normy ČSN EN 12390-3 s možnou toleranční odchylkou dle ČSN EN 12390-1. Pevnostní třídy vycházejí z pěti procentního kvantilu charakteristické hodnoty pevnosti v tlaku ve stáří vláknobetonu 28 dní. Zařazení do příslušné třídy se pak provádí podle tabulky 4.

Pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu se používají vzorky o rozměrech 150 x 150 x 500 mm se čtyřbodovým zatížením. Charakteristická pevnost v dostředném tahu $f_{fc,tk}$ je odvozena ze zkoušky charakteristické pevnosti v tahu za ohybu $f_{fc,tk,fl}$ a charakteristické pevnosti v příčném tahu $f_{fc,tk,sp}$. Hodnoty těchto pevností jsou uvedeny v tabulce 3. Uvedené pevnostní třídy lze použít i pro lehký vláknobeton.

Tabulka 3: Pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku mikrotrhliny

Pevnostní třída v dostředném tahu $f_{fc,tk}$ [MPa]	Charakteristická pevnost v tahu za ohybu $f_{fc,tk,fl}$ [MPa]	Charakteristická pevnost v příčném tahu $f_{fc,tk,sp}$ [MPa]
0,9	1,3	1,1
1,1	1,6	1,3
1,3	1,9	1,5
1,5	2,2	1,8
1,8	2,6	2,1
2,0	2,9	2,4
2,2	3,2	2,6
2,5	3,6	2,9
2,7	3,9	3,2
2,9	4,2	3,4
3,0	4,4	3,5
3,1	4,5	3,6
3,2	4,6	3,8
3,4	4,9	4,0
3,5	5,1	4,1
3,6	5,2	4,2
3,7	5,4	4,4
3,8	5,5	4,5
3,9	5,7	4,6
4,0	5,8	4,7
4,1	5,9	4,8
4,2	6,1	4,9
4,3	6,2	5,1
atd.	atd.	atd.

Tabulka 4: Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanovené dle zkoušek pevnosti na krychlích

Pevnostní třída v tlaku	Charakteristická válcová pevnost $f_{fc,ck}$ [MPa]	Charakteristická krychelná pevnost $f_{fc,ck,cube}$ [MPa]
FC 9/10	9	10
FC 13/15	13	15
FC 18/20	18	20
FC 22/25	22	25
FC 27/30	27	30
FC 33/37	33	37
FC 40/45	40	45
FC 45/50	45	50
FC 50/55	50	55
FC 60/67	60	67
FC 67/75	67	75
FC 75/85	75	85
FC 85/95	85	95
FC 95/105	95	105

2.3 Reologické vlastnosti cementové směsi

Reologie je vědní obor zabývající se studiem působení vnějších sil a vnitřních reakcí látek těmito síly vyvolaných. Zejména jde o neformovatelnost a tokové vlastnosti. Rozdělujeme mikroreologii a makroreologii. Mikroreologie se zabývá souvislostmi mezi reologickými vlastnostmi a mikrostrukturou látky a makroreologie bere kapalinu jako kontinuum a vytváří zákonitosti viskózního toku. [14]

Základními reologickými veličinami jsou viskozita, mez toku a modul pružnosti. Matematicky lze tokové vlastnosti kapalin vyjádřit pomocí reologických stavových rovnic, které vyjadřují vztah mezi deformačním smykovým napětím τ (tečným, vazkým) a deformací kapaliny. Graficky lze toto matematické vyjádření zaznamenat do tokových křivek. [14]

2.3.1 Newtonská a nenewtonská kapalina

Mimo dělení kapalin na reálné a ideální, existuje také dělení na newtonské a nenewtonské kapaliny. Newtonské kapaliny (např. voda), je taková, při níž je viskozita za dané teploty a tlaku konstantní. Viskozita nenewtonské kapaliny (např. emulze, směsi pevných látek a kapalin) není za žádných podmínek konstantní. [14]

Normálové napětí

Normálové napětí je tlak s jednotkou pascal (Pa). Protože nelze v kapalině vyvolat tahové napětí, měříme tlak jako kladný. Normálové napětí je dáno podílem normálové síly a velikosti dané plochy:

$$p = \frac{dF_n}{dS}, \quad (1)$$

kde uvažujeme elementární plochu dS v kapalině, na kterou působí elementární síla dF , kterou lze rozložit na normálovou složku dF_n a tečnou složku dF_t . Normálová složka působí kolmo nauvažovanou plochu, tečná složka vyvolává posun částic v kapalině.

Tečné napětí

Tečné napětí vyvolává posun částic v kapalině. Isaac Newton odvodil vztah pro elementární hranol o výšce dy , jehož spodní stěna se pohybuje rychlostí v a horní stěna rychlostí $v + dv$ takto:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (2)$$

kde η je dynamická viskozita a poměr dv ku dy je rychlostní spád, označován jako smyková rychlost.

Dynamická viskozita

Dynamická viskozita je tedy konstantou úměrnosti ve vztahu pro tečné napětí. Její jednotkou je Pa·s, což odpovídá $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Závisí na teplotě (s rostoucí teplotou klesá) a na tlaku (závislost je zanedbatelná). V případě newtonských kapalin se dynamická viskozita nemění v závislosti na tečném napětí, naopak u nenewtonských kapalin je závislá na tečném napětí a rychlostním spádu. [14]

Kinematická viskozita

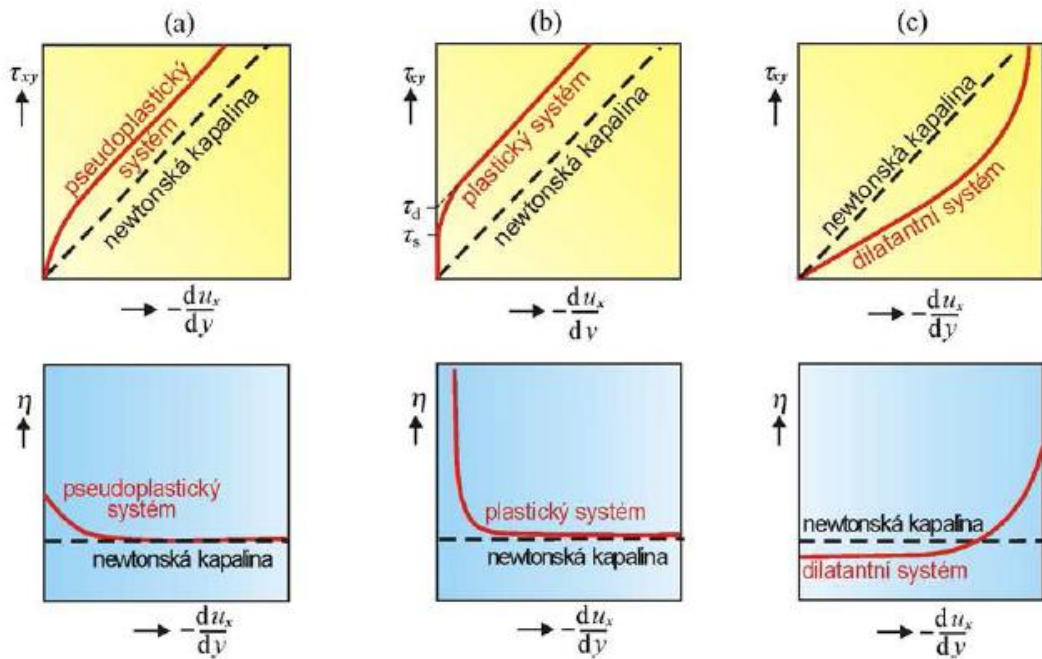
Kinematickou viskozitu získáme podle vztahu:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (3)$$

kde ρ je hustota kapaliny a η je dynamická viskozita. Jednotkou kinematické viskozity je $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Tuto viskozitu je vhodné užívat při popisu dějů, které závisí na viskozitě i na hustotě (např. popis hydrodynamiky kapalin). [14]

Viskozita podle druhu kapalin

Viskozita je závislá na druhu kapaliny a je definována za předpokladu laminárního proudění. Jejím projevem je odpor proti pohybu částic kapaliny. [14] U některých kapalin jsou pozorovány odchylky od newtonského toku, tzv. viskozitní anomálie. Směrnici závislosti tečného napětí na $-du_x/dy$ označujeme jako zdánlivou viskozitu. Ta může s rostoucím gradientem rychlosti vzrůstat nebo klesat. Hlavní typy nenewtonského chování jsou znázorněny na obr. 15. [15]



Obrázek 15: Závislost tečného napětí a zdánlivé viskozity na rychlostním gradientu [15]

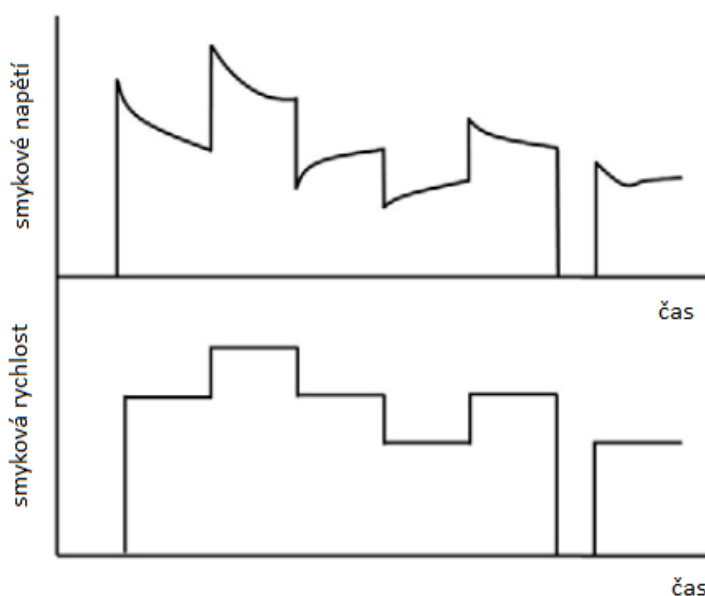
Newtonské kapaliny – viskozita závisí na teplotě, platí přímá úměrnost mezi smykovým napětím a gradientem rychlosti. [15]

Nenewtonovské kapaliny se rozlišují na kapaliny:

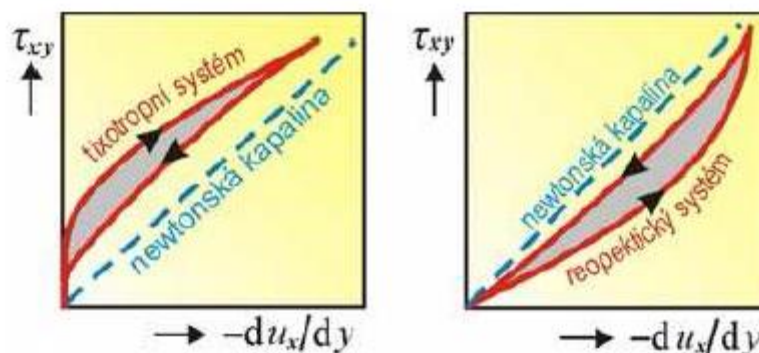
- pseudoplastické – zdánlivá viskozita klesá s rostoucím rychlostním gradientem, viskozita systému klesá se zvyšujícím se smykovým natětím
- dilatantní – při malých napětích tečou jako newtonské kapaliny, gradient rychlosti úměrně roste s napětím, viskozita je konstantní. Při větších napětích nastává vzrůst viskozity a gradient rychlosti zůstává se zvyšováním napětí konstantní.
- Binghamské (plastické) – vůči malým napětím se chovají jako tuhá tělesa a deformují se elasticky. Dosažením statické meze toku τ_s , se struktura začne rozrušovat a dochází k trvalé deformaci a rychlostní

gradient nabývá konečných hodnot. Hodnota napětí odečtena jako průsečík přímkové části s osou se označuje jako Binghamova (dynamická) mez toku τ_d .

- tixotropní – některé pseudoplastické a plastické systémy podrobeny smykovému namáhání, jeví zpočátku vysokou zdánlivou viskozitu, která s časem klesá. Ponechá-li se systém v klidu, původní struktury se postupně obnovují a viskozita se asymptoticky blíží povodní vysoké hodnotě (obr. 17).
- reopektické – u dilatantních systémů lze pozorovat jev opačný k tixotropnímu. Zdánlivá viskozita roste s dobou, po kterou působí smykové napětí. Ponechá-li se systém v klidu, viskozita se postupně vrátí na původní nízkou hodnotu. [15]



Obrázek 16: Odezva tixotropního materiálu na komplexní minulost smykovým namáháním [16]



Obrázek 17: Tokové křivky pro tixotropní a reopektický systém [15]

Závislost viskozity na teplotě lze vyjádřit vztahem:

$$\eta(T) = k \cdot e^{\frac{b}{T+\theta}}, \quad (4)$$

kde k je konstanta o rozměru viskozity (Pa.s), b a θ jsou konstanty charakteristické pro danou kapalinu s jednotkou kelvin. [14]

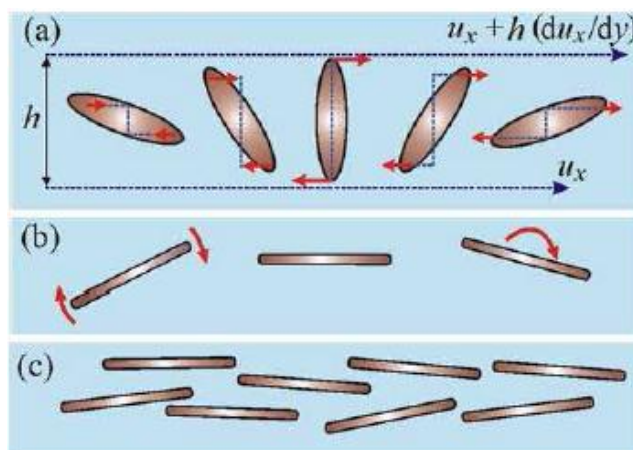
Závislost viskozity na tlaku lze vyjádřit vztahem:

$$\eta(p) = \eta_0 e^{\alpha p}, \quad (5)$$

kde α je koeficient závislý na teplotě. [14]

Vliv tvaru částic na viskozitu

Jsou-li částice silně anizometrické (např. vlákna ve vláknobetonu), je jejich rotační pohyb při toku mnohem intenzivnější než u částic izometrických. Pro udržení tohoto pohybu je zapotřebí další energie a viskozita vzrůstá. Otáčivý moment částice závisí na její orientaci relativně ke směru toku. Moment a také úhlová rychlost jsou největší, pokud je částice uložena kolmo ke směru toku a nejmenší, je-li uložena paralelně (obr. 18a). Jak roste poměr os, roste změna úhlové rychlosti s orientací. I když tedy částice pokračuje v rotaci, stráví většinu času v paralelní orientaci (obr. 18b) a její rotace spočívá v příležitostných obrazech o 180 stupňů. [15]



Obrázek 18: Chování anizotropních částic při toku [15]

Měření viskozity

Kapilární viskozimetr – Pro průtok kapaliny kapilárou platí Poiseuillova rovnice. Potřebný rozdíl tlaků je vytvořen hydrostatickým tlakem kapaliny ve svislé kapiláře.

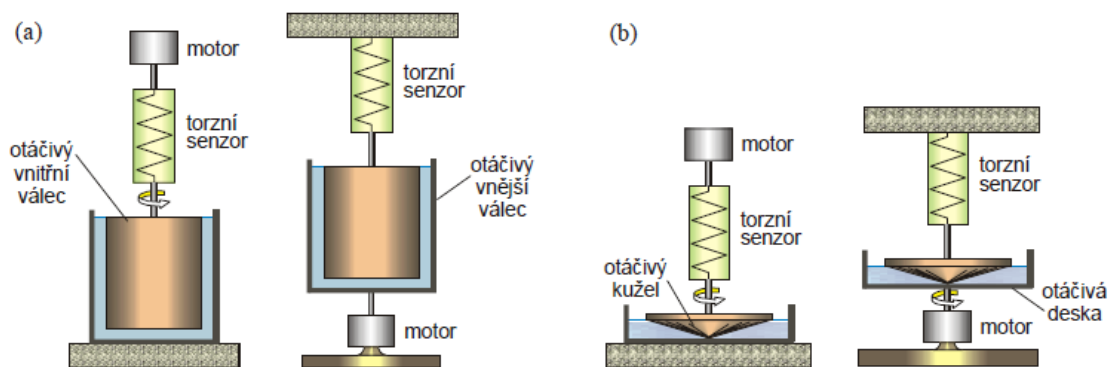
Měří se čas, za který proteče kapilárou určitý objem kapaliny. Kapilární viskozimetry nemohou být použity pro neneutonské kapaliny, protože rychlostní gradient roste se vzdáleností od osy kapiláry, tedy není konstantní. [15]

Höpplerův (kuličkový) viskozimetr – Měření je založeno na Stokesově vztahu pro pád koule ve viskózním prostředí. Měří se srovnávací metodou, stejně jako u kapilárního viskozimetru. Trubice je naplněna měřenou a následně standardní kapalinou. Tento viskozimetr je vhodný pro kapaliny o větší hustotě a viskozitě ale může být použit jen pro průhledné newtonské kapaliny.[15]

Rotační viskozimetr – Jeho součástí jsou dva soustředné válce nebo kužel a deska (obr. 19). Jedna ze součástí se otáčí konstantní úhlovou rychlostí. Vnitřním třením kapaliny se otáčivý moment přenáší na druhý válec, zavěšený na torzním vlákně. Po ustavení rovnováhy se měří úhel pootočení φ válce od původní polohy, který je úměrný úhlové rychlosti ω a viskozitě kapaliny η :

$$\varphi = k \cdot \eta \cdot \omega \quad (6)$$

Rotační viskozimetry jsou vhodné ke studiu neneutonských kapalin, jelikož umožňují měřit úhel pootočení (úměrný napětí) v závislosti na rychlosti otáčení (úměrná rychlosti deformace). [15]



Obrázek 19: Rotační viskozimetry (a) Couettův typ - dva válce, (b) Searleův typ - kužel/deska [15]

2.3.2 Viskozita čerstvého betonu

Viskozita čerstvého betonu je zajištěna cementovou suspenzí, která má různou úroveň koheze v závislosti na vodním součiniteli. Při nízkém vodním součiniteli se suspenze chová jako sypká látka s nízkou soudržností. Čím víc zvyšujeme vodní součinitel, tím voda postupně zaplňuje víc dutin mezi zrný cementu, tedy začnou klesat kapilární síly a suspenze má nižší viskozitu. Toto chování je závislé na velikosti částic.

Jsou-li zrna menší, kohezní síly se zvětšují. Se zvyšujícím se měrným povrhu a stejným vodním součiniteli vzrůstá viskozita cementové suspenze. Snížit viskozitu cementového tmele můžeme několika způsoby. Buďto zvýšením záměsové vody, tím se ale snižuje výsledná pevnost, působením vibrací, čímž zvýšíme gradient rychlosti, nebo přidáním různých přísad. Přísadou mohou být superplastifikátory, které snižují povrchové napětí, ovlivňují totální smáčení zrn nebo obklopí zrna cementu a svým záporným nábojem odpuzují molekuly vody a tím omezí jejich flokulaci. [7]

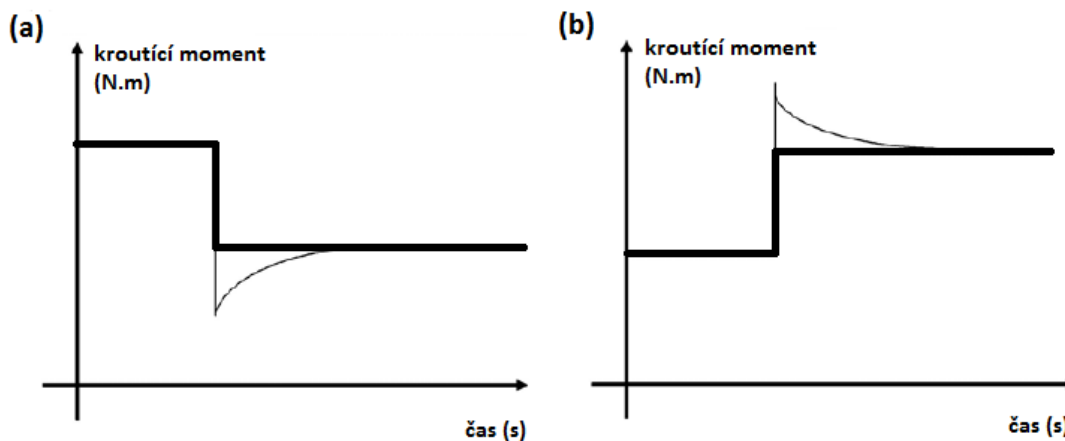
Existuje řada výpočetních modelů, pro popis vztahu mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Z prací [17], [18] vyplývá, že záleží na mnoha faktorech, které ovlivňují jejich použití. Mezi základní reologické modely patří tyto:

<i>Bingham:</i>	$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma,$
<i>Modifikovaný Bingham:</i>	$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma + c \gamma^n,$
<i>Herschel-Bukley:</i>	$\tau = \tau_0 + K \gamma^n,$
<i>Casson:</i>	$\tau = \tau_0 + \mu_\infty \gamma + 2\sqrt{\tau_0 \mu_\infty} \sqrt{\gamma},$
<i>De Kee:</i>	$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma e^{-\alpha \gamma},$

kde τ_0 je mez toku, μ_p je plastická viskozita, γ je smyková rychlost, c je konstanta regrese, index n reprezentuje odchylku od neronského chování (pro pseudoplastické chování je index n menší než jedna), K je konzistence, μ_∞ je zdánlivá viskozita při velmi vysoké smykové rychlosti, α je parametr závislý na čase.

Tixotropní chování cementové pasty

Pro beton, jehož tekutou složkou je právě čerstvá cementová pasta, je tixotropní chování charakteristické. Dokládá to i mnoho prací, například Roussel uvádí měření z rotačního viskozimetru, kde se měřil krouticí moment v závislosti na rychlosti otáčení, a sledovalo se, jak se krouticí moment změní, pokud se rychlost otáčení reometru sníží nebo zvýší. Výsledek dokládá obrázek 20, tučnou čarou je naznačeno chování kapaliny, kde by okamžité snížení či zvýšení otáček reometru znamenalo okamžitou změnu krouticího momentu, který by však byl konstantní. Tenkou čarou je znázorněno reálné chování cementové pasty, kde se projevuje časová odezva materiálu. [19]



Obrázek 20: Chování tixotropní tekutiny. (a) snížení rychlosti otáčení, (b) zvýšení rychlosti otáčení [19]

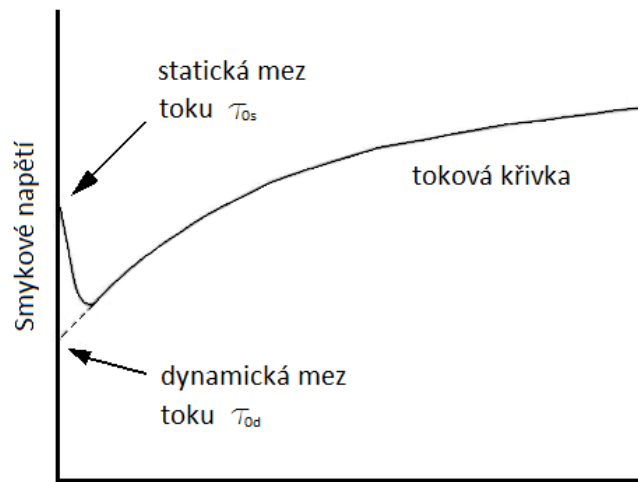
Víme, že proces hydratace začíná ihned, jak smícháme cement s vodou. Zdanlivá viskozita materiálu se tedy neustále mění. V krátkém časovém měřítku dominuje proces flokulace (vločkování) a deflokulace, což je hlavním důvodem tixotropního chování. Naopak v delším časovém horizontu, kdy dominuje hydratační proces, dochází k nevratným změnám ve struktuře cementové pasty. Ta se postupně stává pevnou látkou a ztrácí schopnost tečení. [19]

Fyzikálně lze tixotropii vysvětlit na příkladu částic, které spolu vzájemně působí. V případě cementové pasty je to interakce mezi koloidními částicemi. Tato síla určuje potenciální energetickou jámu. Na to, aby se vazba mezi částicemi přetrhala a tím se z potenciální jámy dostala, musí částice překonat určitou energii E . Pokud je dodaná energie nižší než požadovaná, částice se z jámy nedostane a vrátí se do původní pozice. To se navenek interpretuje jako elastické chování materiálu. Je-li energetická bariéra překonána, dojde k přetrhání vazeb a materiál se stává tekutým. V případě tixotropního chování cementové pasty se tato energetická potenciální jáma s časem, kdy je látka v klidu, zvětšuje. Potřebná energie na opuštění této energetické jámy se tedy stále zvyšuje. V případě, kdy je dodána částici dostatečně vysoká energie na opuštění této jámy, částice jámu opouští a jáma se vrací na počáteční energetickou hodnotu. [19]

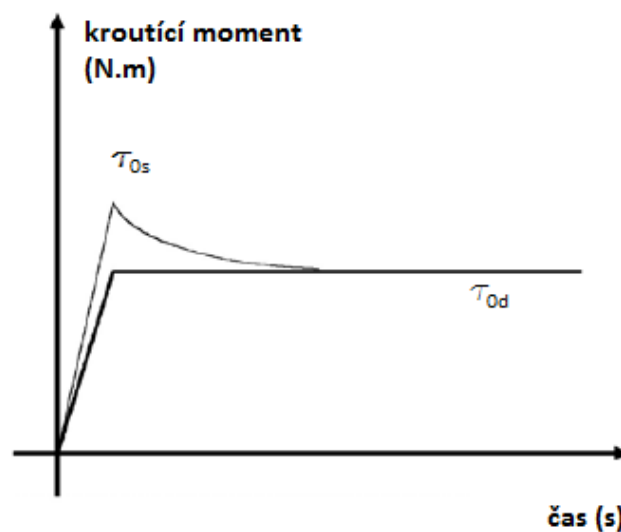
Statická a dynamická mez toku

Jak již bylo zmíněno v přehledu neneutonských kapalin, tak u Binghamských kapalin, do kterých se cementová pasta řadí, rozlišujeme statickou a dynamickou mez toku. Statická mez je hodnota smykového napětí potřebná k uvedení cementové pasty

do pohybu – toku. Naopak dynamická mez toku je limitní hodnota smykového napětí, kdy cementová pasta přestává téct. Je to také hodnota získaná extrapolací křivky ustáleného stavu toku, která je závislostí smykového napětí na smykové rychlosti, jak je vidět na obrázku 21. [20]. Rousselův test ukazuje pomalou odezvu cementové pasty na zvýšení rychlosti otáčení reometru, po určité době, po kterou byla v klidu. Na obrázku 22 je vidět elastické chování materiálu až do hodnoty statické meze toku τ_{0s} . Ta se zvyšuje s časem, kdy je cementová pasta v klidu. Dynamická mez toku τ_{0d} , odpovídající ustálenému stavu toku, nezávisí na předchozím uvedení do stavu toku ani na době, kdy byla cementová pasta v klidu, než byla opět uvedena smykovým napětím do pohybu. [19]



Obrázek 21: Statická a dynamická mez toku [20]

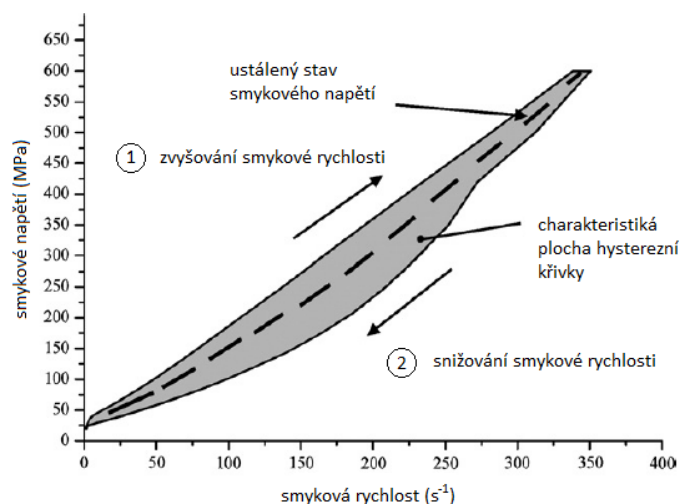


Obrázek 22: Zvýšení rychlosti otáčení, po době kdy byla cementová pasta v klidu [19]

Hysterezní křivka

Tuto křivku dostaneme jako výsledek zkoušky tixotropní látky v reometru. Zkouška spočívá v systematickém zvyšování a snižování smykové rychlosti od nuly až po maximální hodnotu. Změna rychlosti může být nepřetržitá, nebo jako řada malých kroků. Když se data vynesou do grafu závislosti smykového napětí a rychlosti deformace. Vzniklá křivka má hysterezní chování. To je takové, kdy výstupní veličina nezávisí jen na nezávisle proměnné vstupní veličině, ale i na předchozím stavu systému. Můžeme to označit jako paměťový efekt systému, v případě cementové pasty jde o předchozí deformaci vyvolané tokem směsi. Při pomalejším provádění experimentu bude rozdíl mezi vzestupnou a sestupnou křivkou menší, jelikož mikrostruktura látky má více času na přiblížení se rovnovážnému stavu. Oblast uzavřená touto křivkou může být charakteristikou tixotropie. Její velikost a tvar se mohou lišit podle zkoumaného materiálu. U konkrétního materiálu závisí tvar křivky na zkušebních podmínkách, jako je maximální smyková rychlost, rychlost zrychlení a smykové namáhání materiálu před zahájením experimentu. [19]

Typický výsledek viskózních vlastností je na obrázku 23. Během zvyšování smykové rychlosti započne deflokulace. Ta ale není tak rychlá, aby se dosáhlo ustáleného stavu smykového napětí. Naměřené napětí je vždy větší, než jaké by se dosáhlo za ustáleného stavu. Na druhé straně, při snižování smykové rychlosti nastane opětovný proces flokulace ale opět ne dostatečně rychle k dosažení ustáleného stavu. Jsou naměřeny hodnoty napětí nižší, než za stavu ustáleného. Plocha vymezená křivkami charakterizuje vykonanou práci za jednotku času a objemu cementové pasty, k přerušení počátečních vazeb. [19]



Obrázek 23: Tixotropní smyčka, jako výsledek zvyšování a snižování smykové rychlosti viskozimetru [19]

2.4 Orientace ocelových vláken v cementovém kompozitu

Orientace vláken je zapříčiněna mnoha faktory. Těmi jsou například tok čerstvé betonové směsi a její reologické vlastnosti, metoda plnění bednění, geometrie bednění a vibrace. [21]

Nabízí se otázka, co považujeme za nejvýhodnější konečnou orientaci vláken ve vlákny vyztuženém cementovém kompozitu. Z tahových vlastností ocelového vlákna vyplývá, že nejlepší orientace, za které by se přeneslo největší zatížení, je totožné se směrem hlavního tahového napětí. Nicméně více než o dosažení vysoké pevnosti materiálu, nám u vlákny vyztuženého cementového kompozitu, jde hlavně o zvýšení duktility. Jinak řečeno, ocelová vlákna svými tahovými vlastnostmi zvyšují energii nutnou k rozvoji vzniklé trhliny. Tato vlastnost se zvyšuje, pokud vlákna nejsou zcela kolmá na vzniklou trhlínu. [22]

Z výsledků testování otevírání trhliny testovacího prvku vyrobeného z ultra vysokopevnostního betonu vyztuženého vlákny vyplývá, že vlákna můžeme považovat za plně orientovaná, pokud jsou odchýleny o $\pm 20^\circ$ od směru toku. [22]

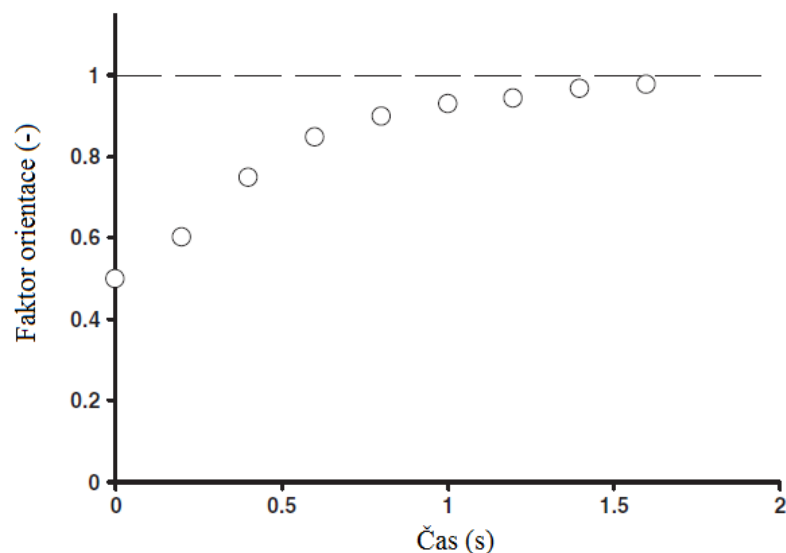
Orientace vláken v cementovém kompozitu je zapříčiněna dvěma hlavními jevy. Tím je tok viskózní směsi a efekt stěn bednění. [22]

2.4.1 Faktor orientace

Martinie a Roussel [22] zavedli vztah pro počet vláken n_f , které procházejí skrz vzniklou trhlínu zkoumaného prvku, za předpokladu, že cementový kompozit vyztužený vlákny je v celém svém objemu homogenní:

$$n_f = \alpha \frac{V_f}{A_f}, \quad (7)$$

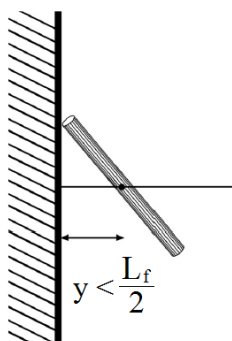
kde n_f je počet vláken na jednotku plochy, V_f je procentuální zastoupení vláken v celkovém objemu cementového kompozitu, A_f je průřez jednoho vlákna a α je faktor orientace. Pokud $\alpha = 0$, zkoumaným řezem materiálu neprochází žádná vlákna (vlákna jsou orientována rovnoběžně s řezem), pokud $\alpha = 1$, všechna vlákna prochází skrz řez (jsou k němu kolmá) a pro případ, kdy můžeme tvrdit o materiálu, že je izotropní, je $\alpha = 0,5$. Na obrázku 24 je znázorněn vývoj faktoru orientace v řezu kolmo na směr toku (jednoduchý 2D tok) se smykovou rychlostí 5 s^{-1} , kde se za nulový stav bere izotropní látka. [22]



Obrázek 24: Faktor orientace v závislosti na čase[22]

2.4.2 Efekt stěn bednění

Z geometrického hlediska je jasné, že není možné, aby bylo vlákno v blízkosti stěn bednění orientováno k této stěně kolmo, a to do vzdálenosti poloviny délky vlákna jak je vidět na obrázku 25. Takto orientovaná vlákna nezávisí na toku ani průběhu lití cementové směsi. [22]



Obrázek 25: Stěnový efekt ve vzdálenosti poloviny délky vlákna [22]

U běžných konstrukcí, kde se tloušťka pohybuje v řádech desítek centimetrů, se efekt stěn bednění pohybuje kolem několika málo procent. Jinak je to u tenčích konstrukcí, vyrobených z ultra vysokopevnostního betonu vyztuženého vlákny, kde změna faktoru orientace, díky stěnovému efektu, může dosáhnout až 10%. [22]

Laranjeira a kol. [21] odvodil přírůstek hodnoty faktoru orientace $\Delta\alpha_w$, způsobený stěnovým efektem, pro samozhutnitelný beton vztahem:

$$\Delta\alpha_w = \frac{L}{B} (0,677 - 0,730\alpha_0) \quad (8)$$

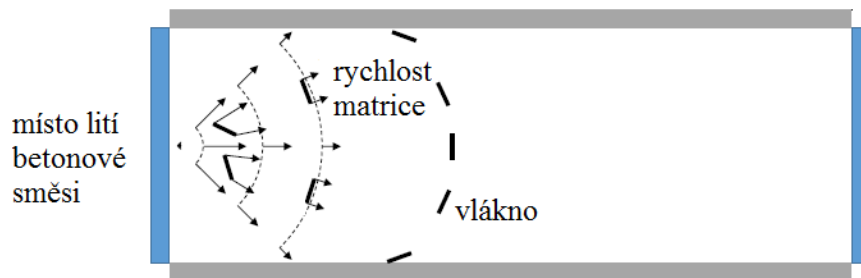
a pro běžný beton:

$$\Delta\alpha_w = \frac{L^2}{BH} \left[\frac{B+H}{L} (0,465 - 0,730\alpha_0) + 0,533\alpha_0 - 0,127 \right], \quad (9)$$

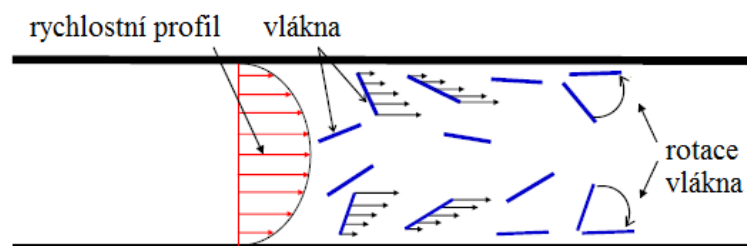
kde $\Delta\alpha_w$ je přírůstek hodnoty faktoru orientace, L je délka vlákna, B je šířka betonového prvku, H je výška betonového prvku a α_0 je faktor orientace vláken v místě neovlivněným stěnovým efektem.

2.4.3 Orientace tokem viskózního materiálu

U betonových prvků, kde je jejich šířka několikanásobně větší než délka vlákna a mezi stěnami bednění je tedy velký prostor těmito stěnami neovlivněný, se vlákna orientují podle schématu (obr. 26). [23]. Naopak u tenkých prvků, kde je větší rozdíl mezi rychlostmi v jednotlivých místech proudění vlivem stěn bednění, se vlákna orientují podle schématu (obr. 27).



Obrázek 26: Schéma orientace vláken vlivem toku [23]

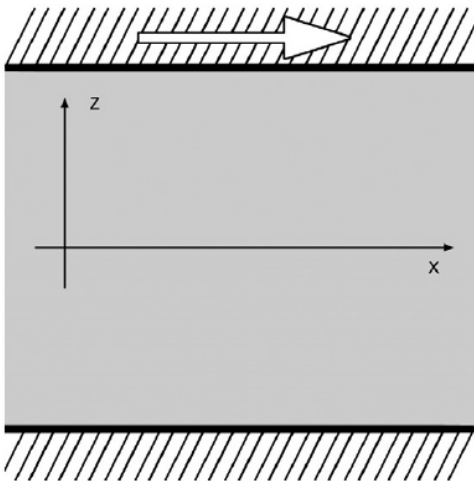


Obrázek 27: Orientace vláken vlivem rychlosti proudění u stěn bednění [24]

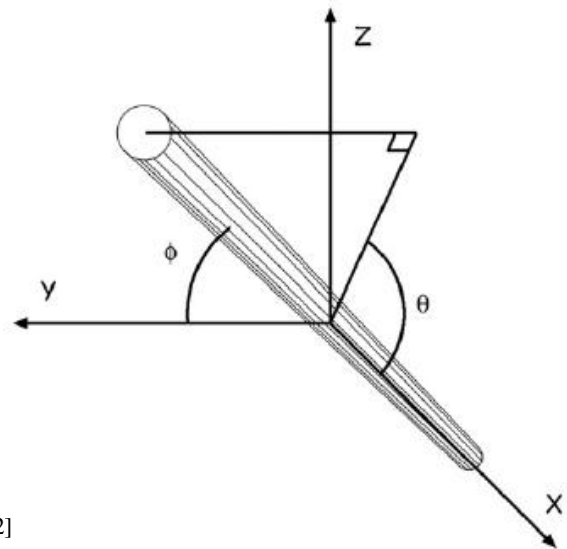
V případě viskózního materiálu, jako je např. čerstvá cementová pasta, dochází uvnitř materiálu, při tečení, ke smykovému pohybu mezi jednotlivými vrstvami.

Martinie a Roussel v práci [22] uvádějí matematický model, z něhož lze tuto orientaci s určitou chybou předpovědět. Model je založen na toku s konstantní

smykovou rychlostí mezi dvěma nekonečnými stěnami (obr. 28). V tomto namodelovaném smykovém toku je orientace vláken popsána úhlem φ , což je úhel mezi vláknem a osou kolmou ke smykové rovině (osa y) a úhlem θ , který odpovídá úhlu mezi kolmým průmětem vlákna na smykovou rovinu (rovina xz) a směrem toku (osa x), jak je vidět na obrázku 29). [22]



Obrázek 28: Ideální smykový tok mezi dvěma stěnami [22]



Obrázek 29: Úhly popisující orientaci vlákna [22]

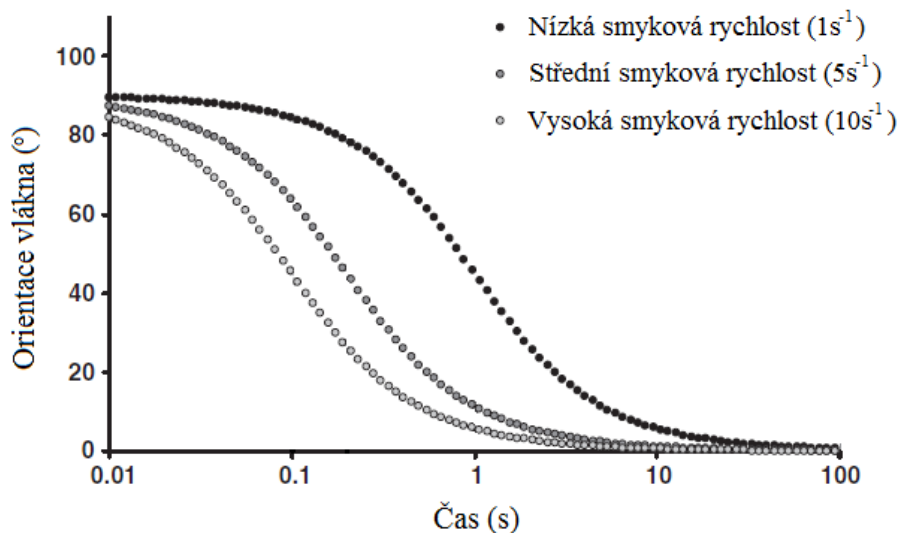
Orientace vlákna v takto namodelovaném toku, resp. závislost velikosti popsaných úhlů v čase, je odvozeno dle teorie [25] takto:

$$\tan(\theta) = \frac{1}{\gamma t + \cot(\theta_0)}, \quad (10)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{C_\varphi}{\sin(\theta)}, \quad (11)$$

kde C_φ je konstanta, závislá na počáteční orientaci vlákna, tj. na hodnotě θ_0 a φ_0 , t je čas a γ je smyková rychlost.

V práci [22] je odvozeno, že čas potřebný k orientaci je v řádu $1/\gamma$. Ve většině případů se v praxi smyková rychlost pohybuje kolem 1 až 10 s^{-1} . Závislost úhlu θ , u kterého bereme počáteční hodnotu 90° (vlákno je kolmé ke směru proudění), na čase, je zobrazena na obrázku 30. Jak je vidět, orientace pod úhlem 20° je docíleno mezi časem 0,5 s při vysoké smykové rychlosti a 5 s při nízké smykové rychlosti. Z toho lze vyvodit, že v časovém měřítku běžného procesu lití betonové směsi, nastává konečná orientace vlákna okamžitě. Proto při řízeném usměrňování vláken tokem směsi není důležitý celkový proces lití, ale až konečná fáze, kdy v posledních vteřinách dostávají vlákna svoji konečnou orientaci. [22]



Obrázek 30: Orientace vláknů v závislosti na čase [22]

Materiály s mezí toku

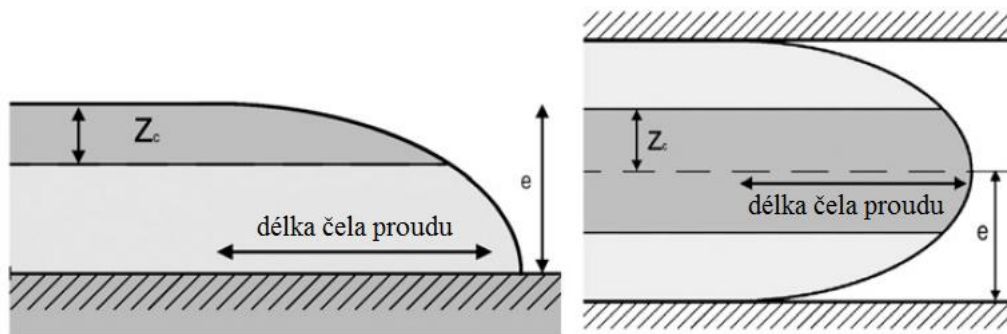
Jak již bylo řečeno, čerstvá cementová pasta, se chová jako Binghamská kapalina, která se vyznačuje tixotropním chováním. To znamená, že začne téct za předpokladu, že je působící napětí větší, než limitní hodnota, kterou nazýváme mez toku. Toto chování má vliv na orientaci vláken, způsobenou tokem cementové pasty.

V takovéto látce mohou vznikat místa, kde není dosaženo hodnoty meze toku. Vyskytnou se tedy oblasti, které jsou pouze unášeny s proudem nebo nejsou v pohybu vůbec. Je jasné, že za takových podmínek v těchto statických částech, nedochází k usměrnění vláken. [22]

Jelikož se také často stává, že ne v celém objemu je zajištěna stejně vysoká smyková rychlost, vznikají místa, kde orientace tokem cementové pasty nastává rychleji. V oblastech stěn bednění, je navíc orientace vlivem toku ovlivněna stěnovým efektem. [22]

Lití betonu můžeme rozdělit do dvou kategorií: lití s volným povrchem (např. ŽB stropní desky) a lití mezi dvěma stěnami (např. ŽB stěny). Martinie a Roussel ve své práci [22] pro popis toku betonové směsi zavádějí veličinu e , což je výška tekoucí směsi v případě lití s volným povrchem nebo polovina vzdálenosti mezi dvěma stěnami v případě lití mezi stěny bednění. Dále zavádějí veličinu z_c , která odpovídá rozměru části proudu, kde není dosaženo meze toku (obr. 31). Pokud je vzdálenost z_c menší než vzdálenost e , pak je beton schopen téct. Vzdálenost z_c je řádově kolem $2\tau_0/\rho g$

pro běžný beton a $5\tau_0/\rho g$ pro samozhutnitelný beton, kde τ_0 je mez toku, ρ je objemová hmotnost betonu kolem 2500 kg/m^3 a g je gravitační zrychlení. [22]



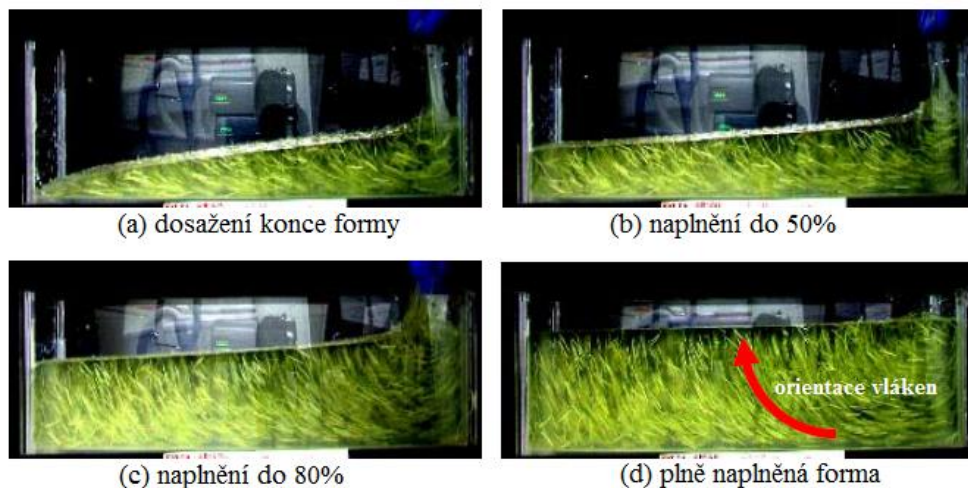
Obrázek 31: Lité betonové směsi s volným povrchem a mezi dvěma stěnami [22]

I když v místech, kde je smykové napětí nižší než mez toku, nemá dojít k orientaci vláken, je popsán fenomén, kdy se v těchto zónách, účinkem jiného napětí, vlákna orientují. Jejich orientace není souběžně s proudem ale kolmo k němu. Tento jev se objevuje u vlákny vyztužených cementových materiálů. Musí se tedy brát v potaz, že v místech volného povrchu, kde je smykové napětí velmi malé, může tento způsob orientace dominovat. [22]

2.4.4 Měření a vizualizace

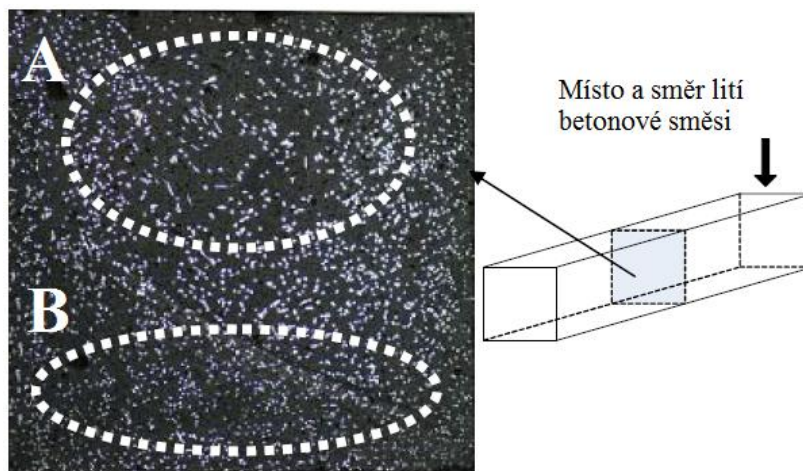
Nejjednodušší metodou ke sledování orientace vláken v betonu je pozorování řezů, které jsou provedeny na konkrétních místech vyrobených vzorků. Dále je také možné, získávat informace o orientaci vláken, nedestruktivní metodou, jako je rentgen, nebo 3D výpočetní tomografie. Nicméně, tyto metody vyžadují kvalifikovaný personál, což dělá tyto metody zbytečně složité. [26]

V práci Zhou a Uchida [26] je nejprve modelována orientace PVA a ocelových vláken tokem průhledné látky a následně vyroben vzorek UHPFRC se 2% ocelových vláken. Byly provedeny řezy a zhodnotil se výsledný stav orientace vláken. Na obrázku 32 je vidět, jak při plnění formy u jednoho okraje dosáhne nejprve proud opačného konce a následně začne celkové plnění, přičemž PVA vlákna se orientují vertikálně. Stejný výsledek byl zaznamenán i s ocelovými vlákny.



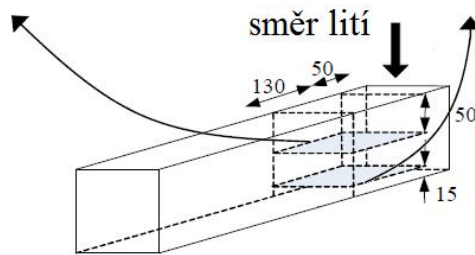
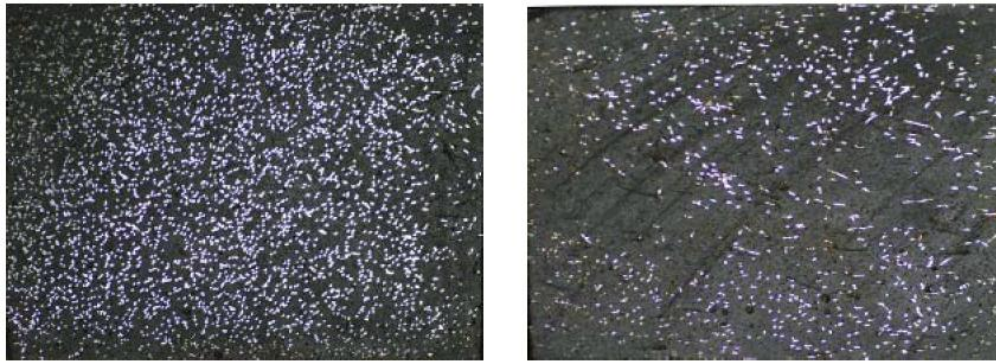
Obrázek 32: Orientace PVA vláken (0,5%) vlivem toku [26]

Obrázek 33 ukazuje, jakým způsobem jsou vlákna přerušena a jaká z toho plyne jejich orientace. Je vidět, že v oblasti A jsou vlákna přerušena dlouhým řezem a je jich méně, naopak v oblasti B řezem krátkým a ve velkém počtu. Z toho vyplývá, že ve spodní části bednění se vlákna orientovala horizontálně (rovnoběžně s délkou prvku) a v horní části téměř nebo zcela vertikálně.



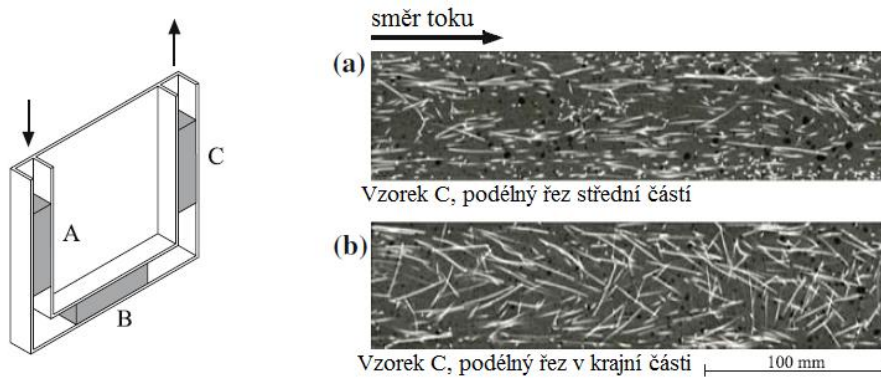
Obrázek 33: Vertikální řez vzorku UHPFRC [26]

Stejně tak lze interpretovat obrázek 34. Z výsledků lze usoudit, že se vlákna při lití cementového kompozitu chovala stejně jako průhledný materiál při vizualizaci, tedy, že v horním řezu jsou vlákna orientovaná vertikálně, souběžně se směrem proudění. Z dolního řezu je z délek řezů jednotlivých vláken vidět, jak se vlákna začala natáčet podle směru toku.



Obrázek 34: Horizontální řezy vzorku UHPFRC [26]

V experimentu [27] byla zkoumána orientace vláken v betonu za použití formy tvaru písmene U, která byla plněna jedním otvorem (obr. 35 vlevo). Na podélných řezech vzorku C je jasně viditelný efekt stěn bednění (obr. 35 vpravo).



Obrázek 35: Podélné řezy vzorku C z experimentu[27]

2.5 Lokální deformace betonu způsobená dopadem projektilu

V této kapitole se práce věnuje popisu projektilu, účinků dopadu projektilu na cíl, empirickému vztahu k odhadu parametrů lokálních deformací, vyvolaných dopadem projektilu, a normám, popisujícím podmínky testování odolnosti materiálu a vyhodnocení výsledků zkoušek.

2.5.1 Projektil

Projektil neboli střela je dle zákona č. 119/2002 Sb. definována jako předmět vystřelený ze střelné zbraně, určený k zasažení cíle nebo vyvolání jiného efektu.

Balistický výkon střeliva

Balistický výkon je dán počáteční kinetickou energií střely. Jeho úroveň ovlivňuje jak dostřel zbraně a účinky střely v cíli, tak i chování zbraně při výstřelu. Minimální hodnota dopadové energie střely pro vyřazení živého cíle se zpravidla považuje 80 – 100 J. Avšak toto kritérium vychází z účinku puškových střel ráže kolem 8 mm a hmotnosti kolem 10 g, proto není vhodné pro hodnocení účinků střel menších ráží, vystřelovaných většími rychlostmi. [28]

Rozlišujeme střelivo nízkého, středního a vysokého balistického výkonu. Pistolové a revolverové náboje řadíme ke střelivu nízkého balistického výkonu, dosahující zpravidla hodnot do 600 J. Střelivo puškové řadíme ke střelivu středního (ústřevná energie střely od 600 do 2000 J) nebo vysokého (energie nad 2000 J) balistického výkonu. [28]

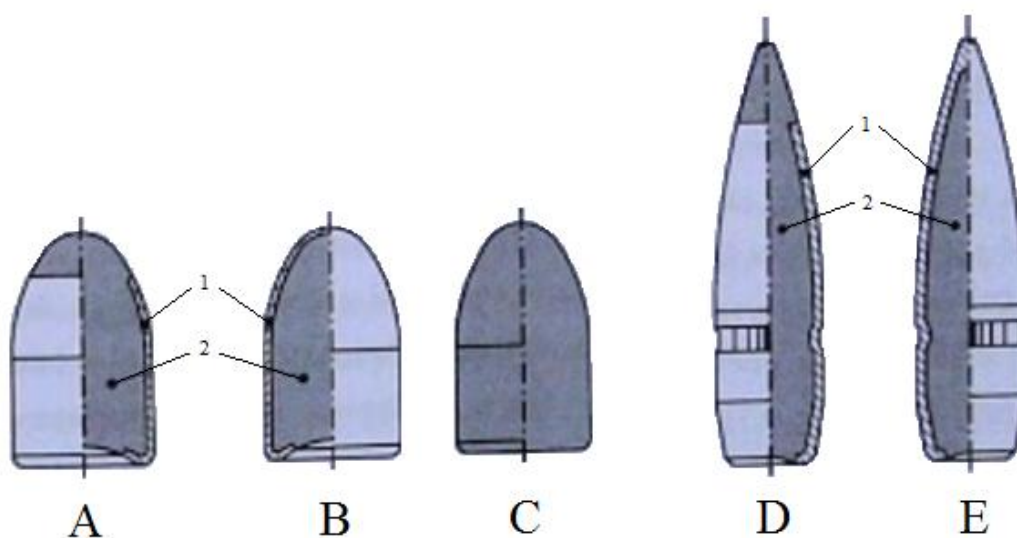
Konstrukce střel

Základní konstrukční charakteristikou střely je její ráže. Je to smluvní údaj, který se volí podle ráže hlavně, pro kterou je střela konstruována a neodpovídá maximálnímu vnějšímu průměru střely. Nejběžnější ráže pro ruční zbraně se pohybuje v rozmezí 5,6 mm až 12,7 mm. V zemích, kde se používají imperiální jednotky, se ráže vyjadřuje v setinách nebo tisícinách palce. Tedy uvedené rozmezí v milimetrech má ekvivalent .22' až .50'. [28]

Tvar střely závisí na rychlosti, jakou budou vystřeleny. Podle tvaru dělíme střely na monoogivální a biogivální. Monoogivální střela má zadní část válcovou a biogivální

kuželovitou. Dále pak existuje mnoho variant, jak upravit tvar špičky střel. Vnitřní uspořádání je voleno podle požadavků na účinek střeli v cíli. Podle vnitřního uspořádání se dělí střely na homogenní a nehomogenní. Na obrázku 36 je znázorněno vnitřní uspořádání střel. [28]

- A – poloplášťová střela (SP)
 - B – celoplášťová střela (FMJ)
 - C – homogenní neplášťovaná střela (SP-FN)
 - D – poloplášťová střela (PSP)
 - E – celoplášťová střela
- 1 – plášť střely, 2 – olověná výplň (jádro střely)



Obrázek 36: Vnitřní uspořádání střel [28]

(A, B, C – monoogivální pistolové střely, D, E – biogivální puškové střely)

Převážná většina střel je tvořena pouze kovovými materiály a to zejména olovem a jinými kovy (ocel a barevné kovy). Olovo je vhodné pro jeho vysokou hustotu a mechanické vlastnosti (je měkké, tažné, lehce neformovatelné a netříštivé). Naopak zbytky vystřelených olověných střel představují velkou ekologickou zátěž kvůli vysoké toxicitě olova. [28]

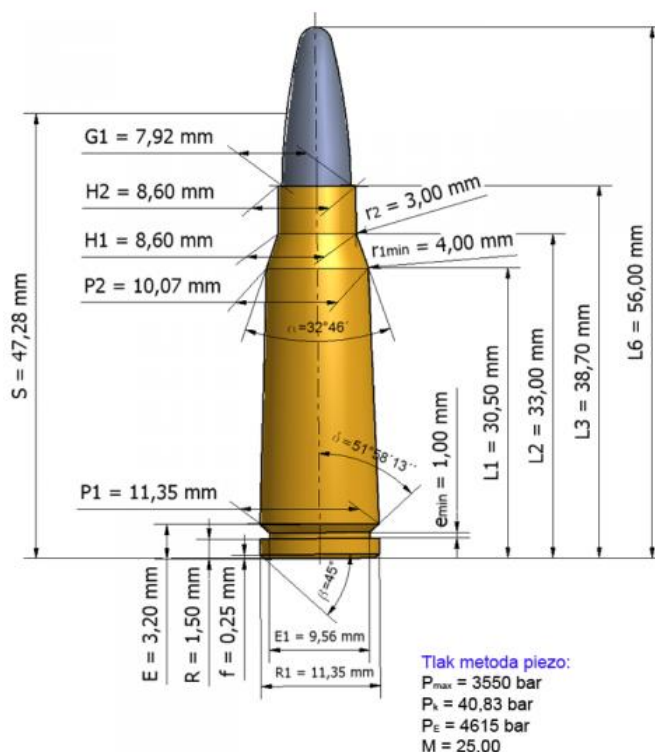
Náboj 7,62×39

Jak již bylo zjištěno v prácích[29],[30], vzorky testované v praktické části jsou schopny, způsobem uvedeným dále, odolávat účinkům nárazu střely ráže 7,62

s olověným jádrem. Tato ráže také patří mezi nejrozšířenější vojenské puškové ráže v celosvětovém měřítku. Používá se převážně pro útočné pušky, např. AK-47 nebo samopal vzor 58. Střela náboje 7,62 × 39 je celoplašťová (označení FMJ – z anglického full metal jacket). Její rozměry jsou uvedeny na obrázku 37 a parametry v tabulce 5.

Tabulka 5: Parametry náboje 7,62 × 39 [31]

Parametry náboje 7,62 × 39		
Střela	Číslo	2907
	Typ	FMJ
	Hmotnost	124 grs 8 g
Materiál pláště		CuZn 10
Náboj	Hmotnost	17,5 g
	Délka	56 mm
Rychlost	V_0	738 m/s
	V_{100}	633 m/s
	V_{200}	543 m/s
	V_{300}	466 m/s
Energie	E_0	2179 J
	E_{100}	1603 J
	E_{200}	1179 J
	E_{300}	867 J



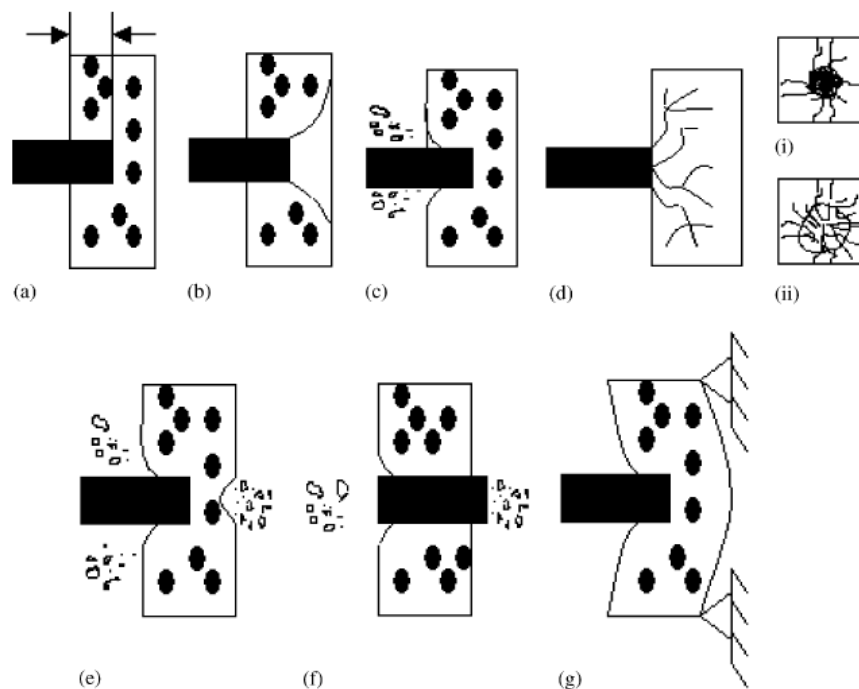
Obrázek 37: Tvar a rozměry náboje 7,62×39 [32]

2.5.2 Účinky dopadu projektilu

Je popisováno sedm jevů, spojených s porušením od nárazu střely [33]. Těmi jsou:

- **Penetrace:** Vniknutí projektilu do materiálu. Vzdálenost, do které projektil vnikne, se nazývá hloubka penetrace (obr. 38a)
- **Kónické trhliny a smykové vyražení:** Při penetraci působí střela na zadní stranu cíle, kde mohou vzniknout smykové trhliny. Pokud je hloubka penetrace dostatečně velká, dojde k smykovému vyražení materiálu na zadní straně cíle. (obr. 38b)
- **Spalling:** Porušení, které se projeví jen na přední straně zasaženého cíle, způsobené vysokými tlaky při dopadu střely. (obr. 38c)

- **Radiální trhliny:** Při nárazu projektilu mohou vzniknout trhliny, které se radiálně šíří z místa dopadu. (obr. 38d) Vznikne-li trhлина skrz celou tloušťku konstrukčního prvku, účinek se projeví i na zadní straně zasaženého cíle. (obr. 38d (ii))
- **Scabbing:** Pokud je velikost tahového napětí, které je šířeno tlakovou vlnou po dopadu střely, větší než tahová pevnost betonu, pak dojde k odražení materiálu na zadní straně konstrukčního prvku. (obr. 38e)
- **Perforace:** Střela prostřelí materiál a dále pokračuje se zbytkovou energií ven ze zadní části zasaženého cíle. (obr. 38f)
- **Celkové porušení konstrukce:** Deformace celého konstrukčního prvku, způsobená ohybovými a smykovými účinky nárazem střely. (obr. 38g)



Obrázek 38: Účinky dopadu střely na betonový cíl [33]

Pro kvantitativní určení míry lokální deformace jsou definovány tyto čtyři veličiny:

Hloubka penetrace (x): Hloubka betonové konstrukce, do které projektil vnikne, aniž by došlo k perforaci.

Mez scabbingu (h_s): Minimální tloušťka materiálu, při které nedojde k efektu nazývaný scabbing.

Mez perforace (e): Minimální tloušťka materiálu nutná k zamezení celkového průstřelu konstrukčního prvku.

Balistický limit (V_{BL}): Minimální počáteční rychlost střely, potřebná k dosažení perforace.

2.5.3 Empirický vztah k vyjádření charakteristik lokální deformace

Existuje řada metod, jak empiricky vyjádřit veličiny popisující lokální deformace, avšak podle studie [33] se nejvíce přibližuje experimentálním výsledkům modifikovaný vztah, který již v 50. letech 20. století předložila americká organizace National Defense Research Committee.

Modifikovaný NDRC vztah:

Tento vztah dostaneme rovností funkce:

$$G = \frac{180 \cdot N \cdot M}{d \sqrt{f_c}} \cdot \left(\frac{V_0}{1000 \cdot d} \right)^{1,8} \quad (\text{imperiální jednotky}), \quad (12)$$

$$G = 3,8 \times 10^{-5} \cdot \frac{N \cdot M}{d \sqrt{f_c}} \cdot \left(\frac{V_0}{d} \right)^{1,8} \quad (\text{jednotky SI}) \quad (13)$$

a funkce x/d , tj.

$$G = \left(\frac{x}{2d} \right)^2 \quad \text{pro } \frac{x}{d} \leq 2, \quad (14)$$

$$G = \frac{x}{d} - 1 \quad \text{pro } \frac{x}{d} > 2 \quad (15)$$

nebo

$$\frac{x}{d} = \sqrt{2G} \quad \text{pro } G \geq 1, \quad (16)$$

$$\frac{x}{d} = G + 1 \quad \text{pro } G < 1, \quad (17)$$

kde x je hloubka penetrace, M je hmotnost projektilu, d je průměr projektilu, f_c je pevnost betonu v tlaku, V_0 je rychlost projektilu při nárazu a N je faktor tvaru špičky projektilu (roven 0,72; 0,84; 1,0 a 1,14 pro plochou, zakulacenou, tupou a velmi ostrou špičku)

Mez scabbingu (h_s) a mez perforace (e) může být odhadnuta podle vztahu:

$$\frac{e}{d} = 3,19 \cdot \left(\frac{x}{d} \right) - 0,718 \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^2 \quad \text{pro } \frac{x}{d} \leq 1,35 \text{ nebo } \frac{e}{d} \leq 3, \quad (18)$$

$$\frac{e}{d} = 1,32 + 1,24 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) \quad \text{pro } 1,35 < \frac{x}{d} < 13,5 \text{ nebo } 3 < \frac{e}{d} < 18 \quad (19)$$

a

$$\frac{h_s}{d} = 7,91 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) - 5,06 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \text{pro } \frac{x}{d} \leq 0,65 \text{ nebo } \frac{h_s}{d} \leq 3, \quad (20)$$

$$\frac{h_s}{d} = 2,12 + 1,36 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) \quad \text{pro } 0,65 < \frac{x}{d} \leq 11,75 \text{ nebo } 3 < \frac{h_s}{d} \leq 18, \quad (21)$$

kde e je mez perforace, h_s je mez scabbingu, d je průměr projektilu, x je hloubka penetrace

2.5.4 Vyhodnocení odolnosti materiálu vůči zásahu projektilu

Pro hodnocení odolnosti materiálu vůči zásahu projektilu se využívá zatřídění do několika skupin. Ve světě existuje řada norem, které udávají podmínky testování materiálu, druh zbraně, kalibr náboje a parametry střely. Na základě těchto podmínek a následku dopadu projektilu, se určí, zda materiál vyhověl požadavkům daných těmito normami a pokud ano, materiál se zatřídí do příslušné kategorie.

Mezi tyto normy patří např.:

- ČSN EN 1522 (746006) - Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Požadavky a klasifikace (evropská norma)
- ČSN 39 5360 - Zkoušky odolnosti ochranných prostředků. Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním. Technické požadavky a zkoušky (česká norma)
- NIJ Standard - 0101.04 - Ballistic Resistance of Personal Body Armor (norma USA)
- AEP – 55 vol 1 - Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles (norma NATO)
- VPAM KDIW 2004 - Stab and Impact Resistance - Requirements, classifications and test procedures (německá norma)

Jako příklad uvádím tabulku 6, české normy ČSN 39 5360, která uvádí 7 tříd balistické odolnosti (TBO) pro klasifikaci ochrany proti účinkům střel. Tato norma dále

uvádí požadavky pro hodnocení TBO na střelivo, měření rychlosti a uchycení zkoušeného vzorku. Jsou zde popsány provozní podmínky zkoušky, podmínky na zkušební sestavu a zkušební vzorek.

Ochrana proti účinkům střel je podle normy ČSN 39 5360 nevyhovující pokud nastane některá z alternativ:

- úplné proniknutí střely nebo její části vzorkem,
- proniknutí uváznuté střely nebo její části zadní části vzorku,
- vznik a oddělení výtrže od vzorku,
- vznik a oddělení výtrže na zadní straně složené ochrany tvořené balisticky odolnými skly a jiným průhledným materiálem,
- vtisk v podkladovém materiálu hloubky větší než 25 mm nebo o objemu většího než 8 ml pro zkoušky na danou vzdálenost,
- vtisk v podkladovém materiálu hloubky větší než 40 mm nebo o objemu většího než 13 ml pro zkoušky na dotyk,
- průsvit v ochranné desce.

Tabulka 6: ČSN 39 5360 - Klasifikace a požadavky na testování s pistolemi a puškami

TBO	Ráže	Střela	Rychlost V _{2.5} [m/s]	Hmotnost m [g]
1	.22LR	Pb/O	300 ± 10	2,6
2	9mm Luger	CP/Pbj./O	410 ± 10	8
2 CZ	7,62 x 25	CP/Pbj./O	470 ± 10	5,5
3	.357 Magnum	CP/Pbj./KK	430 ± 10	10,2
3 CZ	9mm Luger	CP/Fej./O	440 ± 10	6,45
4	.44 Magnum	CP/Fej./KK	440 ± 10	15,6
4 CZ	7,62 x 25	CP/Fej./O	550 ± 10	5,5
5	.223 Rem.	CP/Pbj.	920 ± 10	4
5 CZ	7,62 x 39	CP/Fej.	710 ± 10	8
6	7,62 x 51	CP/Pbj.	830 ± 10	9,5
6 CZ	.223 Rem.	CP/Fej.	950 ± 10	3,95
7	7,62 x 51	CP/Fej.	820 ± 10	9,8
7 CZ	7,62 x 54 R	CP/Fej.	860 ± 10	9,75
CP celoplášť Fej. ocelové jádro Pbj. olověné jádro O ogivál KK komolý kužel				

Dalším příkladem je hodnocení dle tabulky 7, z evropské normy EN 1522. Výsledky zkoušky podle normy EN 1523 se dělí podle toho, jestli je vzorek prostřelen nebo nikoliv. Pokud nedojde k průstřelu, rozlišujeme kategorii NS, kdy se na zadní straně neodtrhl žádný materiál a kategorii S, kdy se na zadní straně materiál po dopadu střely odtrhnul.

Tabulka 7: EN 1522 - Klasifikace a požadavky pro testování s pistolemi a puškami

Třída	Typ zbraně	Kalibr	Střela		Testovací podmínky																																														
			Typ	Hmotnost [g]	Vzdálenost [m]	Rychlost střely [m/s]																																													
FB1	puška	22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10																																													
FB2	pistole	9 mm Luger	FJ ⁽¹⁾ /RN/SC	8,0 ± 0,1	5 ± 0,5	400 ± 10																																													
FB3	pistole	357 Mag.	FJ ⁽¹⁾ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10																																													
FB4	pistole	357 Mag.	FJ ⁽¹⁾ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10																																													
	pistole	44 Rem. Meg.	FJ ⁽²⁾ /FN/SC	15,6 ± 0,1	5 ± 0,5	440 ± 10																																													
FB5	puška	5,56 x 45	FJ ⁽²⁾ /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10																																													
FB6	puška	5,56 x 45	FJ ⁽²⁾ /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10																																													
	puška	7,62 x 51	FJ ⁽¹⁾ /PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10																																													
FB7	puška	7,62 x 51	FJ ⁽²⁾ /PB/HC1	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10																																													
<table border="0"> <tr> <td>L</td> <td>olověná střela</td> <td></td> <td>FJ⁽¹⁾</td> <td>celoplášťová střela (ocel)</td> </tr> <tr> <td>CB</td> <td>střela s kuželovou přední částí</td> <td></td> <td>FJ⁽²⁾</td> <td>celoplášťová střela (slitina mědi)</td> </tr> <tr> <td>FJ</td> <td>celoplášťová střela</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FN</td> <td>střela s plochou špičkou</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>HC1</td> <td>tvrdé ocelové jádro, hm. (3,7 ± 0,1) g tvrdost více než 63 HRC</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PB</td> <td>špičatá střela</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RN</td> <td>střela s kulovitou špičkou</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SC</td> <td>měkké jádro (olověné)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SCP1</td> <td>měkké jádro (olověné) s ocelovým hrotem (typ SS109)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>							L	olověná střela		FJ ⁽¹⁾	celoplášťová střela (ocel)	CB	střela s kuželovou přední částí		FJ ⁽²⁾	celoplášťová střela (slitina mědi)	FJ	celoplášťová střela				FN	střela s plochou špičkou				HC1	tvrdé ocelové jádro, hm. (3,7 ± 0,1) g tvrdost více než 63 HRC				PB	špičatá střela				RN	střela s kulovitou špičkou				SC	měkké jádro (olověné)				SCP1	měkké jádro (olověné) s ocelovým hrotem (typ SS109)			
L	olověná střela		FJ ⁽¹⁾	celoplášťová střela (ocel)																																															
CB	střela s kuželovou přední částí		FJ ⁽²⁾	celoplášťová střela (slitina mědi)																																															
FJ	celoplášťová střela																																																		
FN	střela s plochou špičkou																																																		
HC1	tvrdé ocelové jádro, hm. (3,7 ± 0,1) g tvrdost více než 63 HRC																																																		
PB	špičatá střela																																																		
RN	střela s kulovitou špičkou																																																		
SC	měkké jádro (olověné)																																																		
SCP1	měkké jádro (olověné) s ocelovým hrotem (typ SS109)																																																		

3 Praktická část

V praktické části se práce věnuje výrobě testovaných vzorků, popisu mechanických zkoušek v tlaku a tahu za ohybu a jejich výsledkům. Dále je vyhodnocen experiment, při kterém byly zkušební desky ostřelovány puškou, za užití náboje $7,62 \times 39$.

3.1 Výroba vzorků

Součástí této práce je také experimentální ověření předpokladu zmíněného v teoretické části. Z toho důvodu bylo vyrobeno 30 vzorků. Jedná se o desky z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženým ocelovými vlákny o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm. Patnáct z nich bylo vyrobeno s bedněním uloženým horizontálně a patnáct s bedněním uloženým vertikálně. S deskami byly také vyrobeny trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Ty se ve stáří 28 dní podrobily zkoušce na tlak a tříbodové zkoušce v tahu za ohybu.

Materiálové složení betonové směsi

Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu – 42000 g

Voda – 4255 g

Ocelová vlákna – 2387 g

$v/c = 0,3$

Použitý stroj

Míchačka s nuceným oběhem

Postup výroby vzorků

Nejprve jsme si sestavili bednění, které se v případě uložení vertikálně (obr. 39) sestávalo z dvou ocelových plechů a mezilehlými U profily a v případě uložení horizontálně (obr. 40) z dřevotřískové desky a čtyřmi úhelníky o výšce 50 mm. Na bednění jsme aplikovali odbedňovací přípravek. Dalším krokem byla příprava a navážení jednotlivých komponent betonové směsi. Na elektronické váze jsme s přesností na gramy navážili suchou směs, ocelová vlákna a vodu. Poté jsme připravili míchačku (obr. 42) a navlhčili stěny a lopatky, aby se zamezilo vstřebání námi navážené

vody. Do připravené míchačky jsme vložili všechnu naváženou suchou směs a nechali dvě minuty míchat. Po uplynulém čase jsme přidali téměř všechnu vodu. Nechali jsme sedm minut míchat. Dále jsme přistoupili k aplikaci ocelových vláken. Vkládali jsme je do směsi rovnoměrně a po malém množství aby došlo k homogenizaci směsi a zamezilo se potenciálnímu vzniku ježků. Přidali jsme zbývající vodu a nechali míchat dalších sedm minut. Po celkovém rozmíchání betonové směsi jsme směs vylili do nádoby, ze které jsme poté plnili připravené bedně. Součástí byla i příprava trámeček o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které se vylili do připravených forem (obr. 41), dělané právě pro tyto účely. Vylité vzorky a zhotovené trámečky jsme podrobili vibraci na vibračním stole, aby došlo k zhutnění směsi. Nakonec jsme na povrch vystavený okolnímu vzduchu aplikovali folii, aby nedocházelo k nadměrnému odpařování vody. Zhotovené vzorky jsme odbednili následující den a nechali stárnout, aby mohli být dále podrobena připravovanému experimentu.



Obrázek 39: Vertikální bedně



Obrázek 40: Horizontální bedně



Obrázek 41: Forma na vzorky pro zkoušku v tahu za ohybu [34]



Obrázek 42: Míchačka s nuceným oběhem [35]

3.2 Testování mechanických vlastností

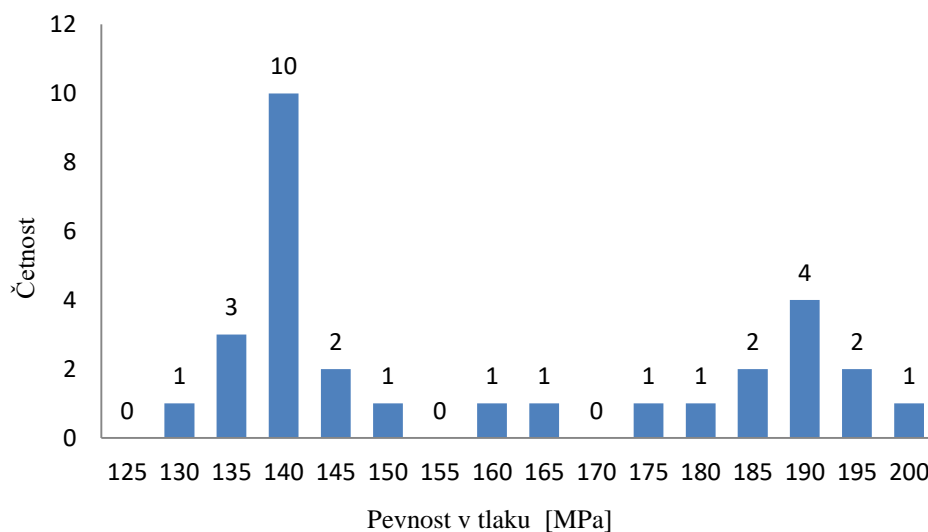
Součástí výroby desek určených k testování v rámci této práce, byla také výroba zkušebních těles ve tvaru trámečků, které byly zváženy a změřeny pro určení objemové hmotnosti a následně podrobeny zkoušce v tlaku a zkoušce v tahu za ohybu.

3.2.1 Vážení a měření

Pro určení objemové hmotnosti byly vzorky zváženy na elektronické váze s přesností na setinu gramu a změřena výška tělesa posuvným měřítkem s digitálním ukazatelem délky. Vzorky byly zaměřeny ve třech místech a určena výsledná hodnota výšky tělesa aritmetickým průměrem těchto hodnot. Průměrná velikost objemové hmotnosti vyšla 2373 kg/m^3 . Konkrétní hodnoty jednotlivých vzorku jsou zapsány v tabulce.

3.2.2 Jednoosá tlaková zkouška

Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebních těles až do porušení ve zkušebním lisu. Zkoušena byla tělesa o rozměrech $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$, která byla zatěžována konstantní rychlostí $0,6 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Zatěžovací plocha byla dána plochou lisu o rozměrech $40 \times 40 \text{ mm}$ (obr. 46). Výsledkem zkoušky byla zaznamenaná síla na mezi pevnosti vláknobetonu v tlaku. Podle vztahu pro výpočet jednoosého tlaku ($\sigma = F/A$) byla vypočítána pevnost v tlaku v MPa. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v grafu histogramu četnosti (obr. 43)

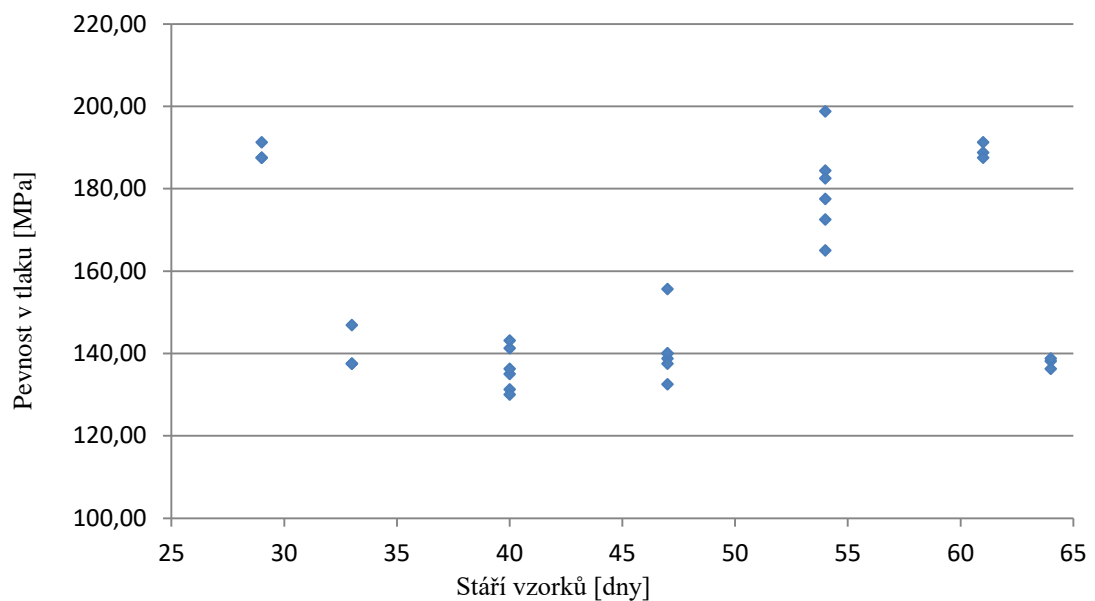


Obrázek 43: Histogram četnosti pevnosti v tlaku testovaných vzorků

Jak je vidět, výsledky tlakové zkoušky jsou silně nekonzistentní. Navzdory tomu, že se testované vzorky vyráběly z připravené suché směsi, která by měla obsahovat vždy stejné množství jednotlivých komponent s určitou akceptovatelnou odchylkou, se očekávaly jednotné výsledky. Tyto odchylky mohou mít několik příčin.

Jednou z příčin může být rozdílný vodní součinitel. I malý rozdíl, v řádu setin hodnoty vodního součinitele, je schopen ovlivnit výslednou pevnost ztvrdlé betonové směsi. Je tedy možné, že stěny a lopatky míchačky byly buďto moc nebo málo navlhčené, a tím došlo k ovlivnění vodního součinitele.

Další možností rozdílných hodnot je stáří vzorků, ve kterém byly vzorky testovány. Jak víme, pevnost betonu se s časem zvětšuje. Ačkoliv byl rozdíl ve stáří vzorků až 35 dní, naměřené hodnoty právě u tohoto největšího rozdílu, vykazovaly výsledek nejméně očekávaný. U vzorků stáří 64 dní, byla naměřena pevnost v tlaku 136 MPa, u stáří 29 dní pevnost 188 MPa. Jde tedy o rozdíl 52 MPa (obr. 44).



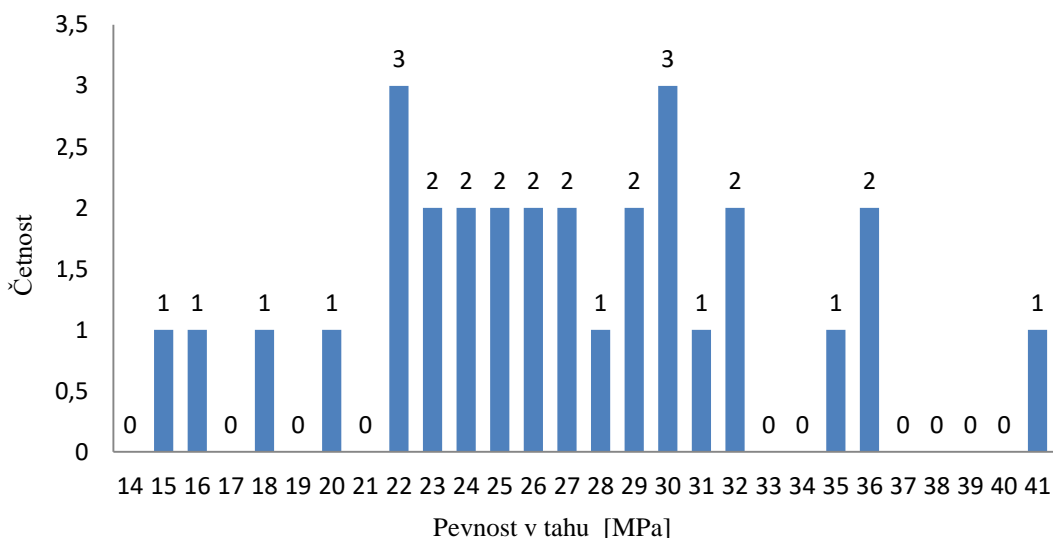
Obrázek 44: Časové rozložení výsledných pevností v tlaku

Do příčin takového rozptylu hodnot můžeme zařadit i novou výrobní šarži suché směsi určené k výrobě UHPFRC. Je možné, že se do směsi dostal částečně zhydratovaný cement, nebo došlo k přidání většího či menšího obsahu mikrosiliky, která má také nezanedbatelný vliv na pevnost ztvrdlého betonu.

Skutečnost však bude pravděpodobně taková, že došlo ke kombinaci těchto ovlivňujících faktorů, které ve výsledku zapříčinily takovýto rozptyl hodnot.

3.2.3 Třibodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Podstatou zkoušky je, stejně jako ve zkoušce v tlaku, zatěžování zkušebních těles až do porušení ve zkušebním lisu (obr. 47). Zkušebními tělesy byly trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, zatěžované konstantní rychlostí 0,05 MPa.s⁻¹. Výsledkem zkoušky je síla na mezi pevnosti vláknobetonu v tahu. Podle vztahu pro pevnost v tahu ($\sigma = M/W$) byla vypočítána pevnost v tahu za ohybu v MPa. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v grafu histogramu četnosti (obr. 45).



Obrázek 45: Histogram četnosti pevnosti v tahu za ohybu testovaných vzorků

Zde je opět patrný rozptyl hodnot od 15 do 41 MPa. Můžeme tvrdit, že jsou výsledky rovnoměrně rozprostřeny mezi hodnotami od 22 do 32 MPa. Berme v úvahu stejnou kombinaci faktorů, které ovlivnily výsledky pevnosti v tlaku.



Obrázek 46: Tlačný přípravek BTP 300 [36]

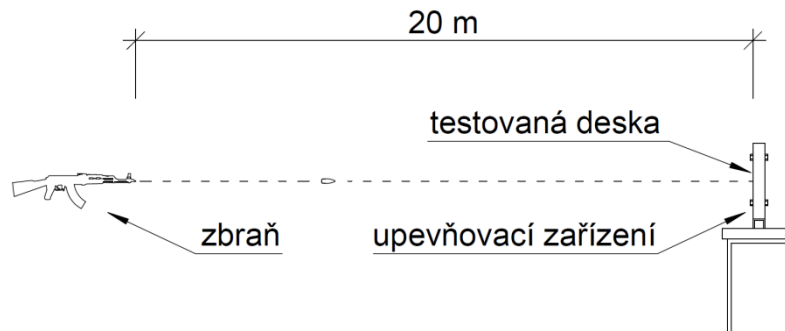


Obrázek 47: Ohybový přípravek BOP 15 [36]

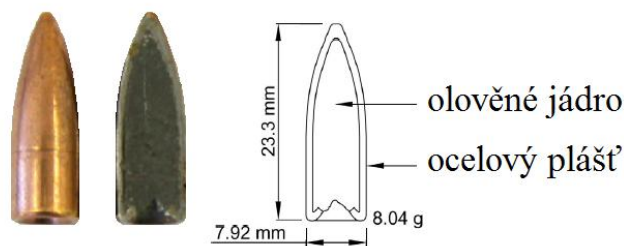
3.3 Zkouška zásahem projektilu

Hlavním experimentem této práce je zkouška odolnosti UHPFRC desek, vůči dopadu projektilu. Na střelnici bylo testováno celkem 30 desek, z nichž polovina byla vyrobena v bedněni uloženém horizontálně a druhá polovina v bedněni uloženém vertikálně. Výsledkem je ověření, zda poloha bedněni při výrobě vzorků má vliv na odolnost vůči extrémnímu zatížení, jako je zásah projektilu.

Byl proveden experiment za použití zkušební sestavy (obr. 48), za použití deformovatelného projektilu náboje $7,62 \times 39$ FMJ s olověným jádrem (obr. 49). Desky byly uchyceny do upevňovacího zařízení ve vzdálenosti 20 metrů od hlavně testovací zbraně. Každá deska byla zasažena pouze jednou a to do středu. Dále byl zdokumentován stav desky po obdržení zásahu.



Obrázek 48: Testovací sestava



Obrázek 49: $7,62 \times 39$ FMJ s olověným jádrem

Vyhodnocení účinku dopadu projektilu je na základě kritérií, která použil v práci Vossoughi a kol. [37]. Účinky se dělí do čtyř kategorií: P – průstřel (celý projektil prošel vzorkem), PL - projektil zůstal uvíznutý ve vzorku, PB – projektil vytvořil otvor, ale odrazil se zpět a UP – vzorek byl zasažen a střela se odrazila. Pozorované účinky na jednotlivé desky jsou v tabulce 8 pro uložení bedněni horizontálně a tabulce 9 pro uložení bedněni vertikálně.

Tabulka 8: Účinky deformovatelné střely na desky z UHPFRC – bednění horizontálně

Vzorky vyrobené v bednění uloženém horizontálně							
Datum výroby vzorku	Označení vzorku	Průměrná pevnost trámečků v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost trámečků v tahu za ohybu [MPa]	Účinek dopadu projektilu	Šířka kráteru přední strana [mm]	Šířka kráteru zadní strana [mm]	Vyražení materiálu na zadní straně
2.3.2017	4L	174	37	UP	45	120	NE
	2L			UP	55	120	ANO
	1L			UP	50	80	ANO
9.3.2017	3L	142	20	UP	75	75	NE
	12L			UP	55	90	ANO
	8L			UP	60	100	NE
16.3.2017	7L	138	27	UP	65	100	ANO
	6L			UP	55	100	ANO
	5L			UP	50	125	ANO
	9L			UP	55	105	ANO
	10L			UP	60	120	NE
	11L			UP	60	125	ANO
27.3.2017	13L	189	27	P	75	100	ANO
	14L			UP	70	100	NE
	15L			PB	55	100	ANO
Průměrná šířka kráteru [mm]:					59	104	

Z tabulky vyplývá, že pouze v jednom případě došlo ke kompletnímu průstřelu desky (obr. 50) a v jednom případě došlo ke vzniku otvoru, přičemž se střela odrazila. Jelikož jsou oba tyto případy z jedné série, dá se předpokládat, že při výrobě došlo k nějaké chybě, která se následně tímto chováním projevila. V ostatních případech došlo k odražení střely za vzniku kráteru na přední (obr. 51) a zadní straně desky. Průměrná šířka kráteru na přední straně je 59 mm a na zadní straně 104 mm. V některých případech, došlo na zadní straně desky ke scabbingu, tedy k vytržení materiálu účinkem tahového napětí (obr. 52). Jak je vidět z tabulky, došlo k tomu v 66 % případů. Ve zbylých případech došlo také k poruše způsobené tahovým napětím, ale struktura a větší tahová pevnost materiálu zapříčinila pouhé odchlípnutí hmoty a vzniku dutiny uvnitř zkoumané desky (obr. 53).



Obrázek 50: Celkový průstřel UHPFRC desky č. 13L



Obrázek 51: Kráter po zásahu čelní strany UHPFRC desky č. 10L



Obrázek 52: Vytržení materiálu ze zadní strany desky č. 6L vlivem tahového napětí



Obrázek 53: Zadní strany desky č. 10L, kde zůstal materiál přichycen

Tabulka 9: Účinky deformovatelné střely na desky z UHPFRC - bednění vertikálně

Vzorky vyrobené v bednění uloženém vertikálně							
Datum výroby vzorku	Označení vzorku	Průměrná pevnost trámečků v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost trámečků v tahu za ohybu [MPa]	Účinek dopadu projektilu	Šířka kráteru přední strana [mm]	Šířka kráteru zadní strana [mm]	Vyražení materiálu na zadní straně
23.2.2017	5	189	30	UP	60	105	NE
	9			UP	60	80	ANO
	12			UP	55	95	NE
2.3.2017	11	186	29	UP	55	80	NE
	6			UP	60	100	NE
	7			UP	55	115	NE
9.3.2017	10	139	18	UP	75	80	NE
	2			UP	60	115	NE
	4			UP	70	115	NE
16.3.2017	3	135	25	PL	55	100	NE
	8			UP	55	75	NE
	1			UP	55	75	NE
23.3.2017	13	141	26	UP	55	115	NE
	15			UP	55	60	NE
	14			UP	60	75	NE
Průměrná šířka kráteru [mm]:					59	92	

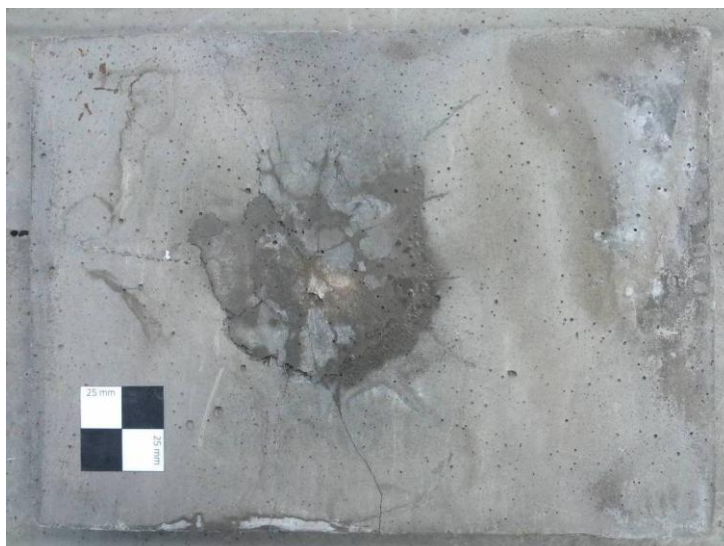
V případě bednění uloženého vertikálně došlo pouze v jednom případě k uvíznutí projektilu v desce (obr. 54). U ostatních případů, střela po dopadu na cíl vytvořila kráter (obr. 55) a odrazila se. Vzniklé krátery na přední a zadní straně mají průměrnou šířku 59 mm a 92 mm. Stejně jako u desek uložených do bednění horizontálně, také v tomto případě došlo na zadní straně k projevu tahového napětí, šířeného tlakovou vlnou po dopadu střely. Z tabulky je zřejmé, že k vyražení materiálu došlo pouze v jednom případě, tedy v 93 % případů zůstal materiál stále přichycen (obr. 56).



Obrázek 54: Projektil, uvíznutý v UHPFRC desce č. 3



Obrázek 55: Kráter po zásahu čelní strany UHPFRC desky č. 4



Obrázek 56: Zadní strana desky č. 4, kde zůstal materiál přichycen

V kapitole 3.2.2 byla popsána různorodost výsledku tlakových zkoušek, prováděných na zkušebních tělesech. Jelikož byly tyto zkušební vzorky vyrobené ze stejného materiálu jako testované UHPFRC desky, očekávala se jistá korelace mezi pevností v tlaku, či tahu za ohybu, a účinkem dopadu projektilu. Jak je ale vidět v tabulce 8 a tabulce 9, není evidentní žádný vztah mezi pevnostmi a účinkem dopadu střely.

Ačkoliv nebyly splněny přesné podmínky testování dle zmíněných norem, můžeme alespoň, vzhledem k použitému typu náboje, určit třídu, do které by mohl být materiál začleněn, pokud by test dopadl úspěšně.

Dle normy ČSN 39 5360 by nevyhověla ani jedna testovaná deska, jelikož pokaždé došlo ke vzniku nebo oddělení výtrže od vzorku, což je jeden z bodů pro nevyhovění ochrany proti účinkům střel. Pokud by ale nedošlo ke vzniku nebo vytržení materiálu na zadní straně testované UHPFRC desky, mohli bychom materiál začlenit do páté třídy balistické odolnosti

Podle normy EN 1522, která předepisuje typ náboje a testovací podmínky a normy EN 1523, která mimo jiné vyhodnocuje výsledky účinku dopadu střely na cíl, bychom tyto účinky na testované UHPFRC desky vyhodnotily jako typ S – střela nepenetrovala cíl, ale na zadní straně testovaného vzorku se materiál, po dopadu střely, odtrhnul. V tabulce 1, normy EN 1522, zmíněné v teoretické části, sice nenajdeme náboj $7,62 \times 39$, nicméně norma tento typ náboje uvádí v tabulce 2, což jsou možná alternativa pro použití jiných typů nábojů než v tabulce 1. Dle typu použitého náboje, bychom tedy mohli odolnost materiálu, začlenit do třídy FB5.

4 Závěr

Cílem práce bylo prokázat, zda má tvar a poloha bednění vliv na odolnost desek z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny - UHPFRC, vůči extrémnímu zatížení. Proto bylo vyrobeno patnáct vzorků s bedněním orientovaným vertikálně a patnáct orientovaným horizontálně. V rámci výroby těchto desek byla také vyrobena zkušební tělesa, která se podrobila zkouškou v tahu za ohybu a v tlaku. Z vyhodnocení zkoušek byly získány následující výsledky:

- U UHPFRC desek s bedněním orientovaným horizontálně, došlo k vytržení materiálu na zadní straně v 66 % případů.
- U UHPFRC desek s bedněním orientovaným vertikálně, došlo k vytržení materiálu na zadní straně, pouze v jednom případě z patnácti.
- Průměrná šířka kráteru na čelní straně UHPFRC desky je u obou typů orientace bednění stejná. Její hodnota činí 59 mm.
- Průměrná šířka kráteru na zadní straně UHPFRC desky je u desek s bedněním orientovaným vertikálně o 12 mm menší.

Z výsledků vyplývá značně pozitivní vliv orientace bednění na odolnost vůči extrémnímu zatížení, které je v této práci docíleno dopadem projektilu z pušky ráže $7,62 \times 39$. Orientace bednění nemá téměř žádný vliv na odolnost čelní strany UHPFRC desky. Naopak u desky s bedněním uloženým vertikálně, nedochází na zadní straně k vytržení materiálu. To je zapříčiněno lepším přenesením tahového napětí, vyvolaném tlakovou vlnou po dopadu střely.

Ze zatěžovacích zkoušek jsme dostali hodnoty tlakové pevnosti od 130 MPa do 199 MPa a hodnoty pevnosti v tahu za ohybu od 15 MPa do 41 MPa. Z výsledků testování UHPFRC desek na odolnost vůči dopadu projektilu je ale zřejmé, že pevnosti v těchto rozmezích nemají viditelný vliv.

Na základě této práce je doporučeno, užívat pro desky vyrobené z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny, bednění orientované vertikálně. V návaznosti na tuto práci by mohl být výzkum vlivu tloušťky desky, nebo různého obsahu ocelových vláken., což by mohlo vést k větší odolnosti vůči extrémnímu zatížení. Dále by mohlo být probráno téma pevností (v tlaku a tahu za ohybu), nutných k výsledné odolnosti vůči tomuto typu zatížení. Mohla by být navržena jiná směs, s menšími pevnostmi, což by vedlo k nižším nákladům.

5 Citovaná literatura

1. Tvarog, Michal. Diplomová práce. *Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů*. 2016.
2. Katedra materiálového inženýrství a chemie, ČVUT v Praze. *VYSOKOPEVNOSTNÍ A VYSOKOHODNOTNÝ BETON*. Praha : ČVUT Fakulta stavební.
3. Aïtcin, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha : Informační centrum ČKAIT, červen 2005. ISBN 978-80-86769-39-4.
4. Ostrava, Vysoká škola báňská — Technická univerzita. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_c.6.pdf.
5. Vetchý, Ing. Jan. Betonové výrobky a beton. *www.mct.cz*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>.
6. Pevnost betonu v tlaku. *ebeton*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku>.
7. *Speciální betony*. Praha : SEKURKON Praha, 2002. ISBN 80-86604-00-4.
8. H. Schneider, J. Ma. Creep of Ultra-High-Performance Concrete under compressive stresses, Leipzig Annual Civil Engineering Report, No.8, 2003.
9. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 6. *Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu*. Česká republika. Užité vzor CZ 30 170 U1 20.12.2016.
10. Trtík, Karel. Vyztužování struktury betonu ocelovými vlákny. *Tanger*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/304.pdf.
11. Ocelová vlákna do betonu. *ebeton*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] <http://www.ebeton.cz/pojmy/ocelova-vlakna-do-betonu>.
12. BĚLORUSKÝ METALURGICKÝ ZÁVOD. *Ocelová vlákna do betonu (Steel fiber)*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] <https://www.belsteel.cz/produkty/ocelova-vlakna-do-betonu>.
13. *Rindler GmbH*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] www.rindler-gmbh.at/data-rindler/.../T-FM_015_9_messing.pdf.
14. Holubová, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin*. 2014. mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf. ISBN 978-80-244-4178-8.
15. Bartovská, Lidmila a Šišková, Marie. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Praha : VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X.

16. Mewis, Jan a Wagner, Norman J. *Thixotropy*. 2008.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868608001735>.
17. Yahia, A. a Khayat, K.H. *Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout*. 2001. 731-738.
18. Güllü, Hamza. *Comparison of rheological models for jet grout cement mixtures with various stabilizers*. 2016. 0950-0618.
19. Roussel, Nicolas. *A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications*. 2006.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606001657>. 1797-1806.
20. Steffe, James F. *Rheological methods in food process engineering*. 1992.
<http://eva.sepyc.gob.mx:8383/greenstone3/sites/localsite/collect/ciencia1/index/assoc/HASH3578.dir/23990015.pdf>. ISBN 0-9632036-1-4.
21. Laranjeira, F., a další. *Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy*. 2012.
www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884612000415.
22. Martinie, L. a Roussel, N. *Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice*. 2011. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611001608>.
23. Zhou, Bo a Uchida, Yuichi. *Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC*. 2017.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884616304197>.
24. Boulekbache, Bensaid, a další. *Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical*. 2010.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810000681>.
25. Jeffery, G.B. *The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid*. 1922. <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/102/715/161>.
26. Zhou, Bo a Uchida, Yuichi. *Fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its visualization*.
27. Stähli, Patrick, Custer, Rocco a van Mier, Jan G.M. *On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC*. 2007.
<http://link.springer.com.ezproxy.techlib.cz/article/10.1617%2Fs11527-007-9229-x>.
 ISSN 1359-5997.
28. Komenda, Jan. *Střelivo loveckých, sportovních a obraných zbraní*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1254-1.

29. Lovichová, Romana, Mára, Michal a Fornůsek, Jindřich. *Effect of Placement Method on Projectile Impact Resistance of UHPFRC*. 2016. <https://www.scientific.net/KEM.722.316>. ISSN 1662-9795.
30. Máca, Petr, Sovják, Radoslav a Konvalinka, Petr. *Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact*. 2013. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X13001589>.
31. 7,62 × 39, kulové náboje. *Sellier & Bellot*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] <http://www.sellier-bellot.cz/produkty/kulove-naboje/kulove-naboje/seznam-produktu/detail/132/>.
32. Náboj 7,62x39 (Rusko a jeho státy) a jeho varianty. *Naboje.org*. [Online] [Citace: 15. 5 2017.] <https://naboje.org/node/7587>.
33. Li, Q.M., a další. *Local impact effects of hard missiles on concrete targets*. 2005. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X05000692>.
34. Dreifachform. *ratiotec.com*. [Online] <http://www.ratiotec.com/72-me-und-prfgerte/formen-zement/239-dreifachform-nach-en-196>.
35. Míchačky s nuceným oběhem – řada M. *Filamos*. [Online] <http://www.filamos.cz/stavebni-stroje/michacky/michacky-s-nucenym-obechem/>.
36. Přípravky. *Brio Hranice*. [Online] <http://briohranice.cz/pripravky>.
37. Vossoughi, Fariborz, a další. *Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact*. 2006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606002146>.