



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Experimentální centrum**

**Experimentální vyšetřování orientace vláken
v cementovém kompozitu**

**Experimental Investigation of Fibre Orientation
in Cementitious Composites**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Romana Lovichová

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství
Školitel: doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.

Praha, 2020



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Romana Lovichová
Název disertační práce: Experimentální vyšetřování orientace vláken
v cementovém kompozitu

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracovala samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Jiřího Litoše Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

Studentské grantové soutěže č. SGS15/060/OHK1/1T/11, SGS16/064/OHK1/1T/11,
SGS17/069/OHK1/1T/11, SGS18/057/OHK1/1T/11, SGS19/049/OHK1/1T/11,
SGS19/143/OHK1/3T/11 a SGS20/054/OHK1/1T/11.

Grantové agentury České republiky č. GBP105/12/G059 a GA20-00624S.

Ministerstva průmyslu a obchodu č. FV10547.

V Praze dne

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mi pomohli při realizaci mé disertační práce. Zejména děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. za odborné vedení, všestrannou pomoc, cenné rady, připomínky a zároveň za trpělivost a ochotu při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce. Velké poděkování patří rovněž Ing. Jindřichu Fornůskovi, Ph.D. za podporu, důvěru, podnětné rady a čas, který mi věnoval nejen při zpracování této práce, ale i v průběhu mého doktorského studia. Poděkování za spolupráci a pomoc patří i všem kolegům a přátelům z Experimentálního centra, Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Stejně tak bych ráda poděkovala i kolegům z Katedry elektrotechnologie, Fakulty elektrotechnické, ČVUT v Praze, za hodnotnou spolupráci.

Poděkování patří také Studentské grantové soutěži, Grantové agentuře České republiky a Ministerstvu průmyslu a obchodu České republiky za podporu projektů, bez kterých by tento výzkum nebyl možný.

Na závěr bych chtěla vyjádřit obrovské díky své rodině a nejbližším, kteří mi byli oporou po celou dobu mého studia a bez kterých bych tuto práci nemohla dokončit.



Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na uspořádání a orientaci ocelových vláken v čerstvé směsi vysokopevnostního betonu a na možnosti záměrné orientace vláken ve směsi.

Rešeršní část se věnuje podstatě, vzniku a popisu viskózního chování tekutin, seznamuje s problematikou v oblasti měření viskozity viskoelastických látek a nalezením vhodné metody pro měření viskozity čerstvého betonu. Pozornost je zde především zaměřena na neneutonské kapaliny, jejich vlastnosti, typy, teoretické způsoby výpočtu viskozity a srovnání s newtonskými tekutinami. Dále práce obecně popisuje a přibližuje definici cementu a cementových kompozitů. Následuje podrobnější popis cementových kompozitů vyztužených ocelovými vlákny s důrazem na orientaci vláken.

V experimentální části práce jsou obsaženy materiálové zkoušky, které zahrnovaly experimentální měření konzistence a viskozity tekuté směsi a mechanické zatěžování zralých betonových vzorků. Prostřednictvím zkoušky pevnosti v tahu ohybem byl pro vzorky z cementové směsi s vlákny experimentálně ověřován vliv směru ukládání směsi do bednění na výslednou orientaci vláken. Ověření bylo provedeno ukládáním směsi do bednicích forem v navzájem kolmých směrech. Z výsledků zkoušek tahové pevnosti v ohybu byly dále dopočítány hodnoty specifické lomové energie. Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno i pro pevnost v tlaku.

Část práce je zároveň pro srovnání věnována simulaci ukládání směsi pomocí průhledné hmoty s konzistencí podobnou čerstvému betonu. Do průhledného bednění byl ukládán sonogel s rozptýlenou ocelovou výztuží, čímž bylo možné velmi dobře vizuálně zkoumat uspořádání a orientaci ocelových vláken ve směsi.

Balistické zkoušky rozšiřují zkoumané vlastnosti kompozitu o odolnost materiálu v extrémních podmínkách. Provedené experimenty zaměřené na cílenou orientaci vláken ve směsi jsou doplněny o možnosti vyrovnávání ocelových vláken v čerstvé cementové směsi prostřednictvím působení magnetického pole.

Klíčová slova:

Cementový kompozit, ocelová vlákna, orientace vláken, uspořádání vláken, viskozita, pevnost v tahu ohybem, směr ukládání, sonogel, magnetické pole.



Abstract

The doctoral thesis focuses on the arrangement and orientation of steel fibres in a fresh mixture of high-strength concrete and the possibilities of targeted orientation of the fibres in the mixture.

The search section looks at the nature of the viscous behaviour of liquids, familiarises the issues of measuring viscosity of viscoelastic substances, and finds a suitable method for measuring the viscosity of fresh concrete. The attention is mainly focused on non-Newtonian liquids, their properties, types, theoretical ways of calculating viscosity and comparisons with Newtonian liquids. Further, the work broadly describes and interprets the definition of cement and cement composites, followed by a more detailed description of steel-fibre reinforced cement composites with an emphasis on fibre orientation.

The experimental part of the work includes material tests, which comprise experimental measurements of the viscosity and determining the consistency of the liquid mixture and various types of mechanical loading of concrete samples. The influence of the direction of mixture casting into the formwork on the resultant orientation of the fibres was experimentally verified through the bending tensile strength test. The tests were performed by pouring the mixture into the formworks in two perpendicular directions. Specific fracture energy values were further calculated from the results of the bending strength tests. The measurement data evaluation was also done for the pressure strength.

Part of the work, for comparison, is devoted to simulating the deposition of the mixture using a transparent substance with a dispersed steel fibre reinforcement. A sonogel with a consistency similar to fresh concrete was poured into the transparent formwork. In this way, the arrangement and orientation of the steel fibres in the mixture can be very well visually examined.

Ballistic testing extends the studied properties of the composite by the material resistance under extreme conditions. Experiments carried out for the targeted orientation of the fibres in the mixture are amended by the possibility of aligning steel fibres in a fresh cement mixture by the action of a magnetic field.

Keywords:

Cementitious composite, steel fibres, fibre orientation, fibre arrangement, viscosity, tensile strength by bending, casting direction, ultra-sound gel, magnetic field.



Obsah

1	Úvod.....	17
I.	TEORETICKÁ ČÁST	19
2	Reologie, viskozita a tixotropie tekutin	21
2.1	Viskozita.....	21
2.1.1	Fyzikální podstata viskozity	21
2.1.2	Newtonské tekutiny – Newtonův zákon viskozity	22
2.1.3	Nenewtonské kapaliny	24
2.1.4	Měření viskozity	25
2.1.5	Viskozimetry	25
2.2	Reologie a reogramy	30
2.2.1	Typy nenewtonských tekutin.....	31
2.2.2	Mocninová rovnice toku.....	36
2.2.3	Reologické modely.....	36
2.2.4	Vnitřní struktura během toku.....	37
2.3	Tixotropie	38
3	Cementové kompozity	43
3.1	Cement.....	43
3.2	Cementové kompozity	44
3.3	Cementové kompozity vyztužené vlákny	46
3.4	Ocelová vlákna	49
3.4.1	Rozdělení ocelových vláken.....	49
3.4.2	Vlastnosti a výhody použití ocelových vláken	50
3.5	Orientace vláken v kompozitu	52
3.5.1	Faktor orientace	53
3.5.2	Vliv toku směsi.....	53
3.5.3	Efekt stěn bednění a vliv geometrie vlákna.....	56
3.5.4	Vliv tloušťky vrstvy	58
3.5.5	Vliv magnetického pole.....	59
II.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	63
4	Materiálové vlastnosti.....	65
4.1	Složení betonové směsi	65
4.2	Sonogel	68
4.3	Experimentální měření konzistence a viskozity	68
4.3.1	Střásací stolek.....	69



4.3.2	Rotační viskozimetr	71
4.3.3	Alternativní způsoby měření.....	73
5	Vliv orientace bednění na mechanické vlastnosti	77
5.1	Simulace ukládání směsi.....	78
5.1.1	Hranolové prvky	78
5.1.2	Deskové prvky	81
5.2	Mechanické zatěžování hranolových prvků.....	83
5.2.1	Pevnost v tahu ohybem	84
5.2.2	Pevnost v tlaku.....	85
5.2.3	Specifická lomová energie.....	86
5.2.4	Výsledky a vyhodnocení.....	88
5.3	Mechanické zatěžování deskových prvků.....	90
5.3.1	Pevnost v tahu ohybem.....	93
5.3.2	Specifická lomová energie.....	98
5.3.3	Výsledky a vyhodnocení deskových sad	99
5.3.4	Zkušební trámečky.....	100
6	Balistické zkoušky	103
6.1	Účinky dopadu projektilu	104
6.2	Vliv orientace bednění	105
6.2.1	Skenování kráteru	111
6.3	Vliv tloušťky prvku.....	116
6.4	Vliv množství vláken	120
6.5	Vyhodnocení.....	123
7	Cílená orientace vláken	125
7.1	Magnetické pole.....	126
7.2	Modely k orientování vláken	127
7.2.1	Magnetový model	128
7.2.2	Cívkový model	130
7.3	Magnetické orientování ocelových vláken v sonogelu	131
7.4	Orientování ocelových vláken ve směsi UHPFRC pomocí magnetického pole	132
7.4.1	Nedestruktivní zkoušky	132
7.4.2	Destruktivní zkoušky	135
7.5	Vyhodnocení, další výzkum.....	137
8	Shrnutí a závěr.....	141
	Bibliografie.....	147



Seznam obrázků

Obr. 1 Vznik smykového napětí v tekutině podle Isaaca Newtona	22
Obr. 2 Reogram (toková křivka) a průběh zdánlivé viskozity newtonské kapaliny.	24
Obr. 3 Kapilární viskozimetry.....	26
Obr. 4 Výtokové viskozimetry	27
Obr. 5 Höpplerův typ viskozimetru	27
Obr. 6 Schéma rotačních viskozimetrů	28
Obr. 7 Měření konzistence rozlivem.....	29
Obr. 8 Reogramy vybraných neneutonských kapalin	30
Obr. 9 Porovnání pseudoplastické a newtonské kapaliny	31
Obr. 10 Porovnání tixotropní a newtonské kapaliny.....	32
Obr. 11 Porovnání dilatantní a newtonské kapaliny.	32
Obr. 12 Schématické vysvětlení dilatace podle Reynoldse.....	33
Obr. 13 Porovnání reopektické a newtonské kapaliny.....	33
Obr. 14 Porovnání Binghamovy a newtonské kapaliny.	34
Obr. 15 Porovnání plastické a newtonské kapaliny.	35
Obr. 16 Zdánlivá viskozita vybraných neneutonských kapalin	35
Obr. 17 Jednoduché a složené mechanické modely reologického chování látek.....	36
Obr. 18 Vliv toku na uspořádání částic v neneutonské kapalině.....	37
Obr. 19 Chování kapaliny během míchání rotujícím míchadlem	37
Obr. 20 Únik částice z potenciálové jámy	39
Obr. 21 Příklady přechodného chování toku.....	39
Obr. 22 Základní dělení kompozitů	47
Obr. 23 Nejčastější tvarové úpravy ocelových vláken.....	50
Obr. 24 Reorientace vláken rotací a posunem.....	54
Obr. 25 Vizualizace toku betonu s vlákny v jednoduše uloženém rozlivu.....	54
Obr. 26 Orientace PVA vláken v transparentní směsi pohyblivým naplňováním formy.....	55
Obr. 27 Orientace PVA vláken v transparentní směsi ukládané do formy z pravé strany	55
Obr. 28 Zvýrazněná orientace pomocí obarvených PVA vláken při ukládání ze strany	55
Obr. 29 Dvě různé metody ukládání betonové směsi.....	56
Obr. 30 Efekt stěn (<i>wall effect</i>) pro vlákno délky L_f ve vzdálenosti stěny $y < L_f/2$	56
Obr. 31 Dvě kategorie toku z průmyslové praxe	57
Obr. 32 Efekt stěn pro vlákno délky L_f v konstrukčním prvku šířky L	57
Obr. 33 Schéma orientace vláken vlivem toku bez efektu stěn.....	58
Obr. 34 Experimentální zařízení pro vyrovnání ocelových vláken v betonu	59



Obr. 35 Síly působící na ocelové vlákno v čerstvém betonu při rovnání magnetickým polem ..	60
Obr. 36 Uspořádání ocelových vláken v zorientovaném (a) a nezorientovaném (b) vzorku	60
Obr. 37 Orientace vláken v prasklé části vzorku.....	61
Obr. 38 Vysokopevnostní ocelová mikrovlákná.	66
Obr. 39 Univerzální robotický míchač jemnozrnných směsí	67
Obr. 40 Cyklonová míchačka s nuceným oběhem	67
Obr. 41 Střásací stolek.....	69
Obr. 42 Zkouška konzistence čerstvé cementové směsi na střásacím stolku	70
Obr. 43 Srovnání směsí sonogelu.....	71
Obr. 44 Zkouška konzistence sonogelové hmoty pomocí střásacího stolku	71
Obr. 45 Rotační viskozimetr	72
Obr. 46 Průběh měření dynamické viskozity čerstvé směsi cementu	72
Obr. 47 Schéma tvorby domnělé kontaktní zóny řidší směsi v okolí vřetena.	73
Obr. 48 Lopatková vřetena.....	74
Obr. 49 Rotační viskozimetr s válcovitými vřeteny pro jednorázové malé vzorky	74
Obr. 50 Mez kluzu a plastická viskozita čerstvého betonu	74
Obr. 51 Zkušební nastavení přístroje pro slump test.....	75
Obr. 52 Příprava směsi sonogelu s vlákny.	78
Obr. 53 Schéma plnění hranolového bednění směsí „vláknosonogelu“	79
Obr. 54 Vodorovně (a) a svisle (b) orientované transparentní bednění.....	80
Obr. 55 Schematické čárové vykreslení hlavních orientací vláken v sonogelu	80
Obr. 56 Schéma plnění deskového bednění směsí „vláknosonogelu“	81
Obr. 57 Pohled na uspořádání vláken ve směsi sonogelu s drátky.....	82
Obr. 58 Schéma plnění vodorovných (vlevo) a svislých (vpravo) forem směsí UHPFRC	83
Obr. 59 Srovnání maximálních dosažených zatížení F_{max}	85
Obr. 60 Pracovní diagram podobných konstrukcí různé velikosti	87
Obr. 61 Způsob dopočtu funkce zatížení do předpokládaného kolapsu.....	88
Obr. 62 Schéma lití směsi UHPFRC do speciálního ocelového bednění	90
Obr. 63 Typy použitých bednění	90
Obr. 64 UHPFRC desky během procesu řezání	91
Obr. 65 Schéma šesti sad desek pro experimentální program	92
Obr. 66 Zkouška tříbodovým ohybem na mechanickém zatěžovacím rámu.....	93
Obr. 67 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 1.	94
Obr. 68 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 2.	95
Obr. 69 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 3.	96
Obr. 70 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 4.	96
Obr. 71 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 5.	97



Obr. 72 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 6.	98
Obr. 74 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí s průměrnými křivkami pro sady 1 až 6..	100
Obr. 73 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí zkušebních trámečků.	101
Obr. 75 Účinky nárazu střely na betonovou konstrukci.....	105
Obr. 76 Schéma testovací sestavy na střelnici.	106
Obr. 77 Umístění desky během balistické zkoušky.	106
Obr. 78 Deformovatelný projektil 7,62×39 FMJ s olověným jádrem.....	107
Obr. 79 Perforace UHPFRC desky projektilem.....	108
Obr. 80 Kráter po dopadu projektilu na přední straně UHPFRC desky.....	108
Obr. 81 Vytržený materiál na zadní straně UHPFRC desky.....	109
Obr. 82 Přichycený materiál na zadní straně UHPFRC desky.....	109
Obr. 83 Projektil uvíznutý v UHPFRC desce	109
Obr. 84 Kráter po dopadu projektilu na přední straně UHPFRC desky.....	109
Obr. 85 Zadní strana UHPFRC desky, kde materiál zůstal po zásahu přichycen.....	110
Obr. 86 Zadní strana UHPFRC desky, kde došlo ke scabbingu.	110
Obr. 87 Kompaktní lineární laserový skener optoNCDT 1302.....	112
Obr. 88 Skenovaný profil vytvořeného kráteru v desce.....	112
Obr. 89 Kuželovitý kráter na přední straně UHPFRC desky	113
Obr. 90 Porušení bez scabbingu na zadní straně UHPFRC desky	113
Obr. 91 Kráter s uvíznutým projektilem na přední straně UHPFRC desky.....	113
Obr. 92 Částečný scabbing na UHPFRC desce s projektilem uvíznutým uvnitř.....	113
Obr. 93 Přední strana UHPFRC desky, kde došlo k perforaci.....	114
Obr. 94 Zadní strana UHPFRC desky, kde po perforaci došlo ke scabbingu.	114
Obr. 95 Porovnání průměrné hloubky kráteru	115
Obr. 96 Porovnání průměrného objemu kráteru.....	115
Obr. 97 Deska tloušťky 3 cm po zásahu ráží 9×19 mm Luger	118
Obr. 98 Zadní strana desky tloušťky 4 cm s krátery po zásahu kalibrem 7,62×39 mm.....	118
Obr. 99 Přední strana desky tloušťky 5 cm s krátery po zásahu kalibrem 7,62×39 mm.....	119
Obr. 100 Zadní strana desky tloušťky 6 cm s krátery od ráže 7,62×54R mm FMJ	119
Obr. 101 Odchlípující se část zadní strany desky tloušťky 7 cm.....	119
Obr. 102 Deska tloušťky 8 cm s krátery od střel ráže 7,62×54R mm FMJ	119
Obr. 103 Proces „lití“ do bednění	121
Obr. 104 Od shora zásahy kalibry 7,62×51 mm s olověným jádrem, 7,62×54R mm s ocelovým jádrem a 7,62×51 mm s ocelovým jádrem.....	123
Obr. 105 Od shora zásahy kalibry 7,62×51 mm s olověným jádrem, 7,62×54R mm s ocelovým jádrem a 7,62×51 mm s ocelovým jádrem.....	123
Obr. 106 Schéma siločar magnetického pole cívky	128



Obr. 107 Schéma konstrukce magnetického systému se vzorkem	129
Obr. 108 Schéma průchodu vzorku magnetickým polem	129
Obr. 109 Konstrukční systém cívky s pohyblivým pásem	130
Obr. 110 Vzorek sonogelu s náhodně rozptýlenými vlákny	131
Obr. 111 Vzorek sonogelu se zorientovanými vlákny	131
Obr. 112 Plastová forma na výrobu UHPFRC vzorků	132
Obr. 113 CT sken řezu UHPFRC trámečku s 1,5 % zastoupením neuspořádaných ocelových vláken	135
Obr. 114 CT sken řezu UHPFRC trámečku s 1,5 % zastoupením magneticky uspořádaných ocelových vláken.....	135
Obr. 115 Model na principu cívky soužící k magnetické orientaci vláken	138
Obr. 116 Úspěšné otestování funkčnosti většího cívkového modelu.....	138



Seznam tabulek

Tab. 1 Složení směsi UHPC použité k výrobě vzorků.....	66
Tab. 2 Složení původní směsi UHPC.....	83
Tab. 3 Maximální dosažená zatěžovací síla F_{max} , ohybové napětí σ_y a specifická lomová energie G_f	89
Tab. 4 Porovnání průměrných hodnot pevnosti v tlaku.	89
Tab. 5 Výsledné hodnoty maximální pevnosti v tahu $\sigma_{y,max}$, lomové energie G_f a jejich příslušné průměry ($\sigma'_{y,max}$ a G_f') pro každou sadu.	99
Tab. 6 Výsledné hodnoty maximální pevnosti v tahu $\sigma_{y,max}$, lomové energie G_f a pevnosti v tlaku σ_c pro zkušební trámečky.	102
Tab. 7 Účinky nárazu deformovatelného projektilu na desky z UHPFRC.	108
Tab. 8 Zatřídění podle evropské normy ČSN EN 1522	111
Tab. 9 Hloubka a objem kráteru svisle a vodorovně litých desek.....	116
Tab. 10 Hodnoty průměrných pevností v tlaku a v tahu za ohybu.....	121
Tab. 11 Výsledné zatřídění desek	124



1 Úvod

Svět se nepřetržitě vyvíjí a technický pokrok postupuje rychlejším tempem než přirozená evoluce. Stavební průmysl je v neustálém vývoji a pestrost stavebních materiálů je opravdu bohatá. Každý materiál má své výhody a nevýhody a významný vliv na rozhodování při výběru má také cena. Statistiky však mluví jasně, přes všechna různá kritéria, přínosy i nedostatky, ve stavebnictví vládne beton. Beton a cementové kompozity neustále doprovází požadavky na zlepšování jejich vlastností. S tím pochopitelně souvisejí návrhy nových postupů výroby a zdokonalování samotných cementových kompozitů.

Reologické chování a vymezení odpovídajících funkčních vlastností patří beze sporu mezi významné charakteristiky cementových kompozitů. Důvodem je typický viskoelastický charakter tohoto materiálu. Vědecká disciplína analýzy a popisu reologických vlastností patří v oblasti studia a specifikace pojiv a směsí mezi nejmladší. Její počátky jsou spojeny s postupným zaváděním experimentálních postupů zaměřených na vymezení deformačního chování pomocí různých modulů a s metodami a analýzou únavového chování. Výraznější rozšíření praktického využívání funkčních charakteristik založených na sledování reologických vlastností materiálů z různých oborů stavebního průmyslu je spojeno s americkým výzkumným programem v oblasti dopravních staveb z přelomu 80. a 90. let 20. století [1]. Značná část práce je proto věnována teoretickému pojetí viskozity, její fyzikální podstatě, popisu chování látek, reologickým modelům a způsobům měření viskozity. Poznatky jsou dále využity při hledání transparentní hmoty simulující čerstvou směs a jejímu praktickému využití při specifických experimentech.

Důležitým předpokladem pro úspěšný návrh receptury vysokopevnostních betonů je správný výběr jednotlivých složek betonu, zejména s ohledem na jejich vzájemné spolupůsobení. Především dobrá kompatibilita cementu, superplastifikační přísady a jemnozrnných příměsí na bázi druhotných surovin je nezbytná pro zajištění bezproblémového reologického chování cementových pojiv a čerstvého betonu. Ultra-vysokohodnotný beton (UHPC; z anglického *Ultra-High Performance Concrete*) je vysoce kvalitní stavební materiál s velkým potenciálem a možností pro jeho použití stále přibývá.

V současné době jsou vlákna v prvcích vlákniny vyztužených betonů (FRC; z anglického *Fibre-Reinforced Concrete*) považována jako rovnoměrně rozptýlená, což není přesné. Poloha



a orientace vláken v matrici je ovlivněna mnoha parametry – zejména velikostí a tvarem bednění, geometrií vláken, tekutostí směsi, interakcí vláken s matricí, metodou lití a případně zhutněním. Zásadní otázkou, kterou řeší tato disertační práce, je proto uspořádání a orientace ocelových vláken v čerstvé směsi jemnozrnného vysokopevnostního betonu s drobným kamenivem do velikosti 1 mm.

Strukturální aplikace FRC jsou v současné době v rychlém vývoji. Příklad přidavek ocelových vláken do betonové směsi zajišťuje vyšší tahovou pevnost za ohybu a snižuje křehkost materiálu. Použití tohoto materiálu spočívá především v betonáži průmyslových podlahových vrstev, základových desek, chodníků, stěnových panelů, prefabrikovaných dílců střešních konstrukcí, dálnic, letištních ploch, mostních konstrukcích, často také u vodohospodářských staveb nebo ve formě prefabrikovaného i stříkaného betonu u ostění tunelů [2]. V nadcházejících letech se předpokládá, že ultra-vysokohodnotný beton vyztužený rozptýlenými vlákny (UHPFRC; z anglického *Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*) bude právě díky duktilitě přidaných vláken komerčně využíván v různých aplikacích v ještě širším pojetí [3]. Nicméně izotropie takového kompozitu je těžko dosažitelná. Tok čerstvé směsi může výrazně ovlivnit preferovanou orientaci vláken, a tím i jejich účinek na výsledné mechanické vlastnosti. Pokud není známa přesná poloha a orientace vláken, nelze přesně předvídat výsledné mechanické vlastnosti kompozitu, jejichž znalost je nezbytná pro správný návrh stavebních konstrukcí. Všechny tyto aspekty jsou proto důvodem pro zkoumání orientace vláken v cementovém kompozitu.



I. TEORETICKÁ ČÁST



2 Reologie, viskozita a tixotropie tekutin

Reologie je vědní obor mechaniky kontinua zabývající se deformací a tokem materiálů. Reologie (z řeckého *rheos*, což je řeka, tok, proudění, a *logos*, což znamená slovo, nauka, věda) je v doslovném překladu věda o toku. Tato vědní disciplína se však neomezuje pouze na charakteristiky tokového chování kapalin, ale i na deformaci tuhých těles, které za jistých okolností (v závislosti na čase, dlouhodobém zatížení) také tečou. Deformační vlastnosti látek udává zejména závislost deformace, napětí a času. Za základní veličinu je v reologii považována viskozita, která určuje míru vnitřního odporu materiálu proti zatížení vnějšího prostředí, čili odpor proti toku [4].

2.1 Viskozita

Viskozita je jednou ze základních fyzikální a reologických vlastností tekutin. Základním projevem viskozity a předpokladem k jejímu zjišťování je pohyb kapaliny.

2.1.1 Fyzikální podstata viskozity

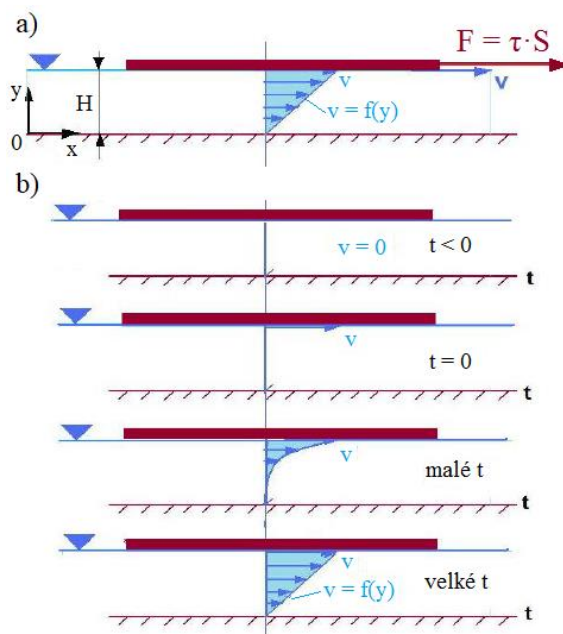
Viskozita vyjadřuje vlastnosti kapalných nebo plynných látek, u kterých dochází k nevratné změně tvaru či objemu vlivem působení vnější síly. Viskozita určuje vnitřní tření kapaliny a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi, ovlivňuje pohyb těles uvnitř kapaliny a rychlost tečení. Tření se projeví, když se vrstva tekutiny přivede k pohybu ve vztahu k jiné vrstvě. Čím větší je tření, tím větší je síla potřebná k vyvolání tohoto pohybu. Tzv. ideální kapalina viskozitu nevykazuje, poněvadž v ní neexistují smyková napětí. Totéž by platilo i pro skutečnou tekutinu pouze v případě, že by se nepohybovala. Pokud tekutina proudí, její elementární objemy (jednotlivé molekuly) se vůči sobě pohybují a dvě sousední vrstvy tak mají různou rychlost. Na rozhraní těchto vrstev potom mezi nimi dochází ke tření a vzniku smykového (tečného, tangenciálního) napětí. Příčina popsaného jevu se nazývá viskozita tekutiny. Tato veličina tedy udává velikost vnitřního tření v kapalině a někdy bývá mylně zaměňována s hustotou [5], [6]. Podle druhu zatížení se rozlišuje smyková a elongační viskozita. Podle způsobu měření jsou rozlišovány dynamická a kinematická viskozita, které se určují pomocí měření na viskozimetrech

a jsou vzájemně závislé. Zdánlivá viskozita vyjadřuje poměr okamžité hodnoty smykového napětí a smykové rychlosti. Plastická viskozita je jedním z modelů viskózního chování a také představuje sklon přímky proložené tokovou křivkou v plastickém Binghamově modelu. Plastické viskozitě plastických látek odpovídá směrnice této přímky [4], [7].

Kapaliny s nízkou hodnotou viskozity snadno tečou (např. voda), vysoce viskózní kapaliny jsou obtížně tekuté (např. med, oleje, tuky nebo čerstvá betonová směs) [5]. V případě betonu má viskozita zásadní vliv na jeho kvalitu v čerstvém i ztvrdlém stavu. Výzkumy bylo zjištěno, že zvýšení vodního součinitele snížilo zdánlivou i plastickou viskozitu cementové suspenze. Pokud je viskozita příliš nízká (vysoká tekutost), obsahuje matrice více vody, než je k hydratačním reakcím potřeba, a směs může protékat bedněním. Přidáním polymerní přísady dochází naopak ke snížení vodního součinitele, a tím ke zvýšení zdánlivé i plastické viskozity cementové suspenze. Také zvýšení teploty zvýšilo zdánlivou i plastickou viskozitu cementové kaše. Typ a množství obsahu polymerní přísady, poměr vody a cementu a teplota tudíž mohou ovlivnit hydratační reakce [7].

2.1.2 Newtonské tekutiny – Newtonův zákon viskozity

Pro smykové napětí laminárního proudění, kdy jsou jednotlivé proudnice rovnoběžné, a tekutina se nepromíchává, definoval Isaac Newton zákon, podle kterého je smykové napětí v tekutině úměrné dynamické viskozitě a gradientu rychlosti. Ke smyku dochází vždy, když je kapalina fyzicky přemísťována, například při nalévání, roztírání, stříkání, míchání atd. Vysoce viskózní kapaliny proto vyžadují pro pohyb větší sílu než méně viskózní materiály. Vysvětlující experiment zmiňovaného jevu je znázorněn na Obr. 1 a popsán níže [5], [8].



Obr. 1 Vznik smykového napětí v tekutině podle Isaaca Newtona [5].



Jedná se o dvě velké rovnoběžné roviny oddělené vzdáleností H , mezi kterými je tenká vrstva tekutiny (viz Obr. 1a). Spodní rovina je statická a horní o ploše S se pohybuje po vrstvě tekutiny (případně se mohou obě roviny pohybovat stejným směrem a různou rychlostí v_1 a v_2). V čase $t = 0$ s se horní deska rozpohybuje vnější silou F konstantní rychlostí v ve směru x . Dále se předpokládá, že částice tekutiny vzhledem k pevnému povrchu roviny se nepohybují, relativní rychlost tekutiny vzhledem k povrchu desky je tedy nulová. Postupně se hybnost tekutiny zvětšuje a vytváří se rychlostní profil, po čase se vyvine úplný lineární rychlostní profil (Obr. 1b). K pohybu horní roviny je zapotřebí síla, jejíž velikost je podle Newtona formulována rovnicí

$$F = \tau \cdot S = \eta \frac{v}{H} \cdot S. \quad (1)$$

Odkud tangenciální (smykové) napětí [Pa] je vyjádřeno jako

$$\tau = \eta \frac{v}{H}. \quad (2)$$

Rovnici lze napsat také v diferenciálním tvaru

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \cdot j, \quad (3)$$

kde η je dynamická viskozita [Pa·s] a $j = \frac{dv}{dy}$ je gradient rychlosti (smyková rychlost, rychlost smykové deformace) v [s⁻¹].

Rovnice popisuje Newtonův zákon viskozity. Z rovnice vyplývá, že smykové napětí je úměrné dynamické viskozitě a gradientu rychlosti. Rychlostní gradient $\frac{dv}{dy}$, je měřítkem změny rychlosti, jakou se mezilehlé vrstvy navzájem pohybují. Newton předpokládal, že všechny materiály mají při dané teplotě viskozitu nezávislou na smykové rychlosti. Jinými slovy, dvojnásobná síla by posunula tekutinu dvakrát rychleji. Newton však měl pravdu jen částečně. Tento typ chování, který Newton předpokládal pro všechny kapaliny, je pouze jeden z několika typů tokového chování. Dnes se tyto kapaliny nazývají newtonské, jejich chování vyhovuje rovnici (3) a řídí se Newtonovým zákonem viskozity. Tímto způsobem se chovají všechny plyny a většina běžných kapalin, typickým příkladem newtonských kapalin jsou voda a řídké motorové oleje.

V případě, že chování kapaliny rovnici (3) neodpovídá, jedná se o kapalinu neneutonskou, kam se řadí např. suspenze, vyšší polymery, asfalt, čerstvý beton a další [5], [8].

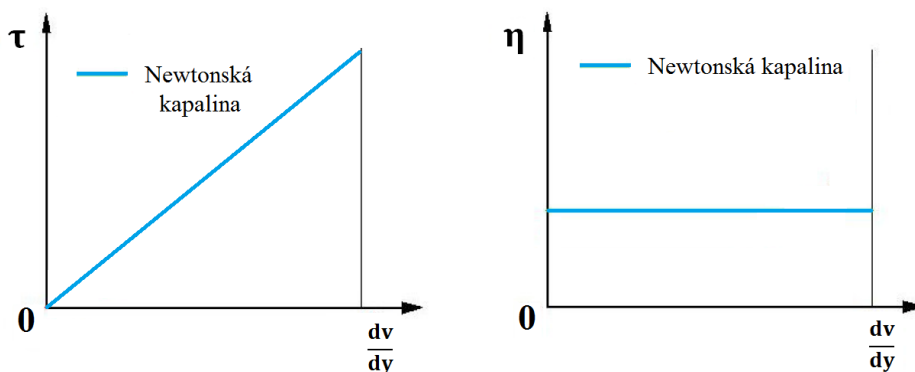
Z praktických důvodů byla zavedena tzv. kinematická viskozita, která je dána rovnicí

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

a jejíž jednotkou je [m²·s⁻¹]. Mezi dynamickou viskozitou η a kinematickou viskozitou ν existuje vztah závislý na hustotě látky ρ . Jak kinematickou, tak i dynamickou viskozitu lze měřit

za pomoci viskozimetrů. Odborná literatura uvádí hodnoty viskozity pro většinu známých tekutin v závislosti na tlaku a teplotě. Dynamická viskozita newtonských tekutin je konstantní látkový parametr, který charakterizuje tekutinu v závislosti na poměru jejího smykového napětí a smykové rychlosti, viz rovnice (3) [5].

Newtonská tekutina je graficky znázorněna na obrázku níže (Obr. 2). Graf vlevo potvrzuje, že závislost smykového napětí τ na smykové rychlosti j je přímka. Graf vpravo ukazuje, že viskozita kapaliny zůstává konstantní, když smyková rychlost se mění [8].



Obr. 2 Reogram (toková křivka) a průběh zdánlivé viskozity newtonské kapaliny.

2.1.3 Neneutonské kapaliny

Neneutonskými tekutinami se označují látky, jejichž viskózní chování nelze popsat Newtonovým zákonem viskozity. Řadí se sem některé kapalné látky a žádné plynné látky, proto označení kapaliny. Obdobně jako existuje pro newtonské tekutiny rovnice (3) popisující Newtonův zákon viskozity, zde platí analogická rovnice

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy} = \eta_a \cdot j, \quad (5)$$

kde η_a je zdánlivá viskozita. Ta je definovaná rovnicí

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} = \frac{\tau}{j}. \quad (6)$$

Zavedená zdánlivá viskozita neneutonských kapalin je proměnnou veličinou, nikoliv konstantním látkovým parametrem, jak tomu bylo u newtonských. Zdánlivou viskozitu nelze používat k fyzikálnímu hodnocení konzistence neneutonských kapalin, protože její okamžitá hodnota se mění v závislosti na smykovém napětí. K popisu neneutonské kapaliny při daném smykovém napětí se používá i tzv. diferenciální viskozita, která je daná rovnicí

$$\eta_{\Delta} = \frac{d\tau}{dj}. \quad (7)$$



Pro fyzikální hodnocení neneutonských kapalin je nutné uvádět jejich závislost na smykovém napětí, protože jak zdánlivá, tak diferenciální viskozita nejsou pro tyto kapaliny konstantní. Důležitou roli zde hrají reologické modely, tzn. určení závislosti tečného napětí na rychlostním gradientu [5].

2.1.4 Měření viskozity

Jak už je popsáno v předcházejícím textu, rozlišují se newtonské a neneutonské tekutiny. Viskozita newtonských tekutin je látkový parametr, který závisí na tlaku a teplotě, měření viskozity je tedy snadnější a k jejímu stanovení lze použít prakticky všechny níže uvedené způsoby. K newtonským tekutinám se řadí rovněž všechny plyny, pro měření jejich viskozity se hodí zejména kapilární viskozimetry. Viskozita neneutonských kapalin (např. cementová kaše, asphalt) není látkový parametr, proto se musí změřit celá toková křivka (reogram), a tím stanovit závislost mezi tečným napětím a gradientem rychlosti pro zkoumaný vzorek kapaliny. Zjišťování je obtížné především u nestabilních suspenzí, kde se viskozita prakticky nedá změřit, protože během krátké doby nastává rozvrstvení látky. Pro měření viskozity neneutonských kapalin se běžně používají rotační viskozimetry a speciální kapilární viskozimetry, které umožňují charakterizovat dostatečně jejich tokovou křivku [8].

2.1.5 Viskozimetry

Pro viskozimetry je vydána řada norem a předpisů, k měření viskozity tekutin a měření tokových křivek se používají různé způsoby a přístroje. Existuje mnoho technik pro měření viskozity, každá je vhodná pro konkrétní okolnosti a materiály. Výběr správného viskozimetru z řady dostupných nástrojů, které splňují potřeby dané aplikace, není jednoduchý. Konstrukce a přístroje k tomu určené se rozdělují do několika následujících kategorií: kapilární a výtokové viskozimetry, kuličkové (tělískové) viskozimetry, rotační viskozimetry, vibrační viskozimetry, ultrazvukové viskozimetry, plovákové viskozimetry a jiné. Podrobněji jsou jednotlivé typy popsány níže [4], [5], [9].

Kapilární viskozimetry

Měření viskozity kapilárním viskozimetrem vychází z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici kruhového průřezu (kapiláře). Při laminárním toku měrnou kapilárou se známými geometrickými rozměry je dynamická viskozita úměrná objemovému průtoku Q a tlakovému spádu mezi začátkem a koncem kapiláry. Dynamickou viskozitu lze potom vypočítat z následující rovnice pro objemový průtok

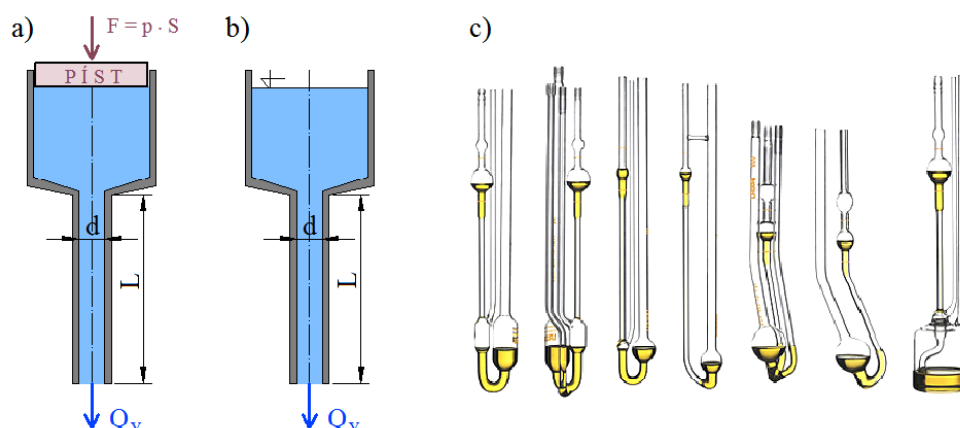
$$Q_v = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot v_s = \frac{\pi \cdot p_z \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot L} = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (8)$$

a z ní dynamickou viskozitu určí vztah

$$\eta = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{p_z \cdot d^4}{Q \cdot L} = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot Q \cdot L} = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4 \cdot \tau}{8 \cdot V \cdot L}, \quad (9)$$

kde d označuje průměr kruhového průřezu kapiláry, R poloměr kruhového průřezu kapiláry, v_s je rychlost výtoku z kapiláry, p_z tlak, L značí délku kapiláry a V je objem tekutiny.

Nejčastější provedení kapilárních viskozimetrů je s konstantním tlakovým spádem a měří se objemový průtok kapaliny (Obr. 3). Tlakový spád je zde tvořen sloupcem měřené kapaliny, jehož výška se mění v několika polohách, nebo tlakem inertního plynu na hladinu (buď pomocí pístu, nebo bez něj) – tzv. výtlačné (vysokotlaké) viskozimetry. Složitější a méně časté je provedení s konstantním objemovým průtokem. Různé typy nízkotlakých skleněných kapilárních viskozimetrů (Ostwaldův, Ubbelohdeho, Vogel-Ossagův, Cannon-Fenskeův) se liší svou složitostí, tokovým polem, či možností korigovat tokové poruchy. Pro tzv. Ostwaldovo provedení výtok měřené kapaliny z kapiláry vytéká do prostředí vyplněného kapalinou. V případě tzv. Ubbelohdova provedení kapalina vytéká do volného prostoru, který je speciálním otvorem spojen s atmosférou.



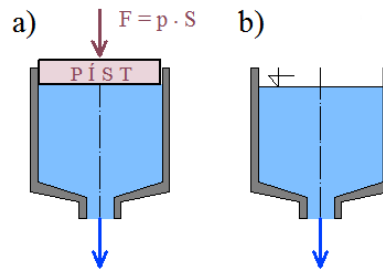
Obr. 3 Kapilární viskozimetry, a) s pístem, b) tlakový spád vlastní tíhou kapaliny, c) různá provedení skleněných kapilárních viskozimetrů [5], [10].

Výtokové viskozimetry

Výchozím principem výtokových viskozimetrů je také Hagen-Poiseuilleův zákon pro laminární proudění tekutiny v kruhovém potrubí. Viskozimetry jsou rovněž založeny na měření objemového průtoku měřené kapaliny trubicí definovaných rozměrů, ale délka kapiláry je v porovnání s jejím průměrem krátká. Značná část tlakové nebo polohové energie se proto spotřebuje ztrátami vtokem a výtokem na kinetickou energii a tvorbu parabolického rychlostního profilu v kapiláře. Výpočet pro stanovení této energie je velmi složitý, z toho důvodu se změří doba výtoku definovaného objemu referenční kapaliny (např. vody) při dané teplotě a potom doba výtoku měřené kapaliny při stejné teplotě. Viskozita se určí relativně jako poměr dvou naměřených časů. Měření se



prakticky provádějí pomocí tlaku pístu nebo plynu na hladinu měřené kapaliny nebo, což je častější, se výtok uskuteční vlastní tíhou testované kapaliny (Obr. 4).



Obr. 4 Výtokové viskozimetry, a) s výtokem tlakem pístu nebo plynu, b) s výtokem vlastní tíhou.

Kuličkové (tělískové) viskozimetry

Měření viskozity pomocí padající kuličky patří k nejstarším metodám v reologii. Tuto metodu zavedl George Gabriel Stokes už v roce 1851. Jedná se o jednoduchý, ale velice přesný způsob měření viskozity průhledných tekutin od plynů po kapaliny s nízkou až střední viskozitou. Princip spočívá v měření rychlosti pádu nebo naopak vystoupání k hladině zkušebního tělesa ve zkoumané tekutině. Obvykle je tělískem hladká skleněná nebo ocelová kulička, ale může ji nahradit i vzduchová bublina. Toto kulovité tělísko obtékané kapalinou popisuje Stokesův zákon při laminárním obtékání kuličky. Na pohybující se těleso působí tíhová síla G , vztlaková síla F_V , odporová síla F_O a setrvačná síla F_S je nulová, protože se předpokládá rovnoměrná pádová rychlost. Pro rovnováhu sil potom platí $G = F_V + F_O$. Nejčastější variantou je viskozimetr Höpplerův (Obr. 5). Kulička se valí skleněnou trubicí skloněnou v úhlu 10° , o daném vnitřním průměru, naplněnou měřenou kapalinou, obklopenou temperačním pláštěm. Měří se čas potřebný k průchodu kuličky mezi horní a spodní ryskou. Obvykle se zkouška provádí srovnávacím způsobem s referenční kapalinou. Existuje i viskozimetr s elektromagneticky ovládanou kuličkou.



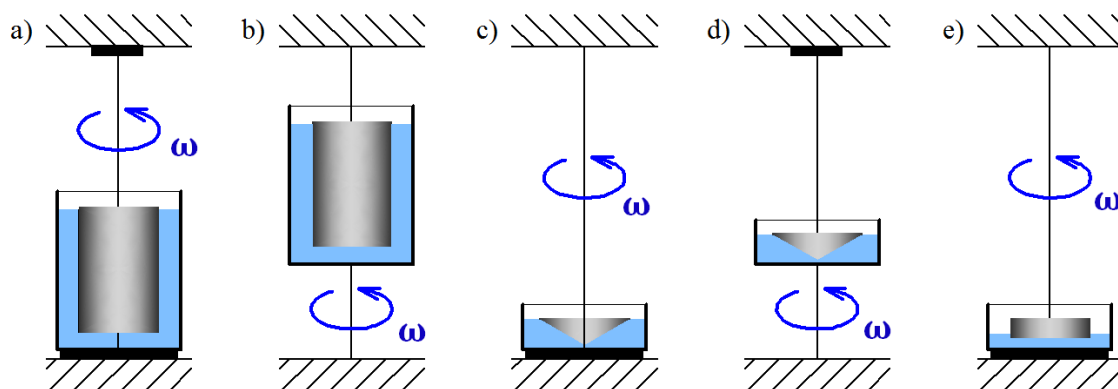
Obr. 5 Höpplerův typ viskozimetru na principu padající kuličky pro jednoduché a přesné měření dynamické viskozity průhledných Newtonovských tekutin [11].

Zásadní nevýhodou je měření pouze pro ideálně viskózní (newtonské) materiály, u kterých se nemění viskozita v závislosti na rychlosti smykové deformace či čase, a využitelnost jen pro transparentní materiály, protože měření jsou prováděna vizuálně.

Rotační viskozimetry

Tato metoda stanovení viskozity se soustavu dvou sousých válců, které se otáčejí kolem společné osy, se nejméně blíží pomyslnému Newtonovu pokusu se dvěma nekonečnými rovnoběžnými plochami popisovanými v úvodní části. Zároveň se jedná o nejsložitější skupinu přístrojů. Přístroje kromě viskozity umožňují měřit i jiné reologické vlastnosti (smykové napětí, rychlost smykové deformace). Hlavní pracovní část rotačního viskozimetru (reometru) tvoří dvě části geometrie: pohyblivá (rotor) a statická (stator), mezi kterými je umístěn testovaný materiál. Podstatou je měření torzního momentu síly, který vyvozuje rotující kapalina a element zavěšený na torzním vlákně se jí snaží překonat. Jeden z elementů se otáčí konstantní úhlovou rychlostí ω a druhý se brání proti pohybu přenášeného kapalinou od prvního válce, který na něj přenáší kroučící moment skrz vnitřní tření kapaliny. Přímo měřitelné veličiny u rotačních viskozimetrů jsou úhlová rychlost nebo počet otáček za jednotku času ustáleného pohybu a údaje o odporu kapaliny proti smykovému namáhání zapříčiněného vznikem gradientu rychlosti. Tento odpor se projevuje jako torzní moment.

Rotační viskozimetry se nejčastěji používají ve třech provedeních: dva sousé válce (jeden statický, druhý se otáčí), kužel – deska (kužel se obvykle otáčí a deska stojí, ale lze i opačně) nebo dvě desky. Každá geometrie je vhodná pro jiné konzistence zkoušených materiálů a různé druhy měření. Pro rotační viskozimetry platí Couettovo proudění – v mezikruží dvou sousých navzájem se otáčejících válců. Viskozimetry kuželové jsou zvláštní případ Couettova proudění ve štěrbině mezi deskou a rotujícím kuželem. V současnosti existuje na trhu rozsáhlá řada rozmanitých konstrukcí rotačních viskozimetrů (schematicky Obr. 6), které se liší především provedením pohonu otáčejícího se elementu, způsobem měření kroučícího momentu a možným počtem dalších veličin.



Obr. 6 Schéma rotačních viskozimetrů,
a) rotace vnitřního válce, b) rotace vnějšího válce (nádoby),
c) rotace kužele, d) rotace nádoby, e) rotace desky.



Rychlost smykové deformace se počítá z úhlové rychlosti rotující části a smykové napětí je dáno kroutícím momentem. V zásadě existují dva systémy, na kterých tyto reometry mohou fungovat. Buď je nastaveno smykové napětí a úměrně tomu se měří rychlost smykové deformace (*Controlled Stress*) nebo je naopak nastavena rychlost smykové deformace a měří se smykové napětí (*Controlled Rate*). Podle toho, která část geometrie pracuje, se měřicí systémy rozdělují na Couettův (otáčí se vnější válec, případně dolní deska) a Searlův měřicí systém (pohybuje vnitřní válec, horní deska geometrie). Druhá varianta bývá častější a rovněž byla experimentálně využita v kapitole 4.3.2.

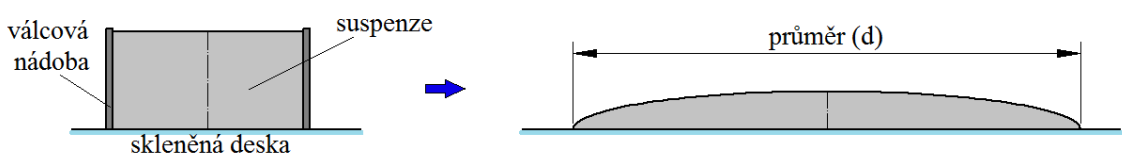
Vibrační viskozimetry

Princip vibračních viskozimetrů je odvozený z tlumeného kmitání tělesa ve vazké tekutině. Základem vibračních viskozimetrů je studium šíření nízkofrekvenčního vlnění s poměrně vysokou amplitudou v kapalině a měření útlumu kmitání. Případ nevynuceného i vynuceného kmitání lze popsat rovnicí se součinitelem tlumení. Metoda využívá tlumících schopností tekutiny jako důsledek její viskozity.

Další možnosti zjišťování viskozity

Ultrazvukové viskozimetry jsou z části principiálně podobné vibračním, liší se zejména v tom, že se jedná o jednoznačně akustické měření na vysokých frekvencích a nízkých amplitudách. Plovákové viskozimetry jsou založeny na unášení plováku proudící kapalinou. Výtokové pohárky (kelímky) patří k nejjednodušším zařízením sloužícím ke stanovení viskozity kapalných vzorků. Metodu lze použít k měření relativní viskozity, neboť její hodnota je udávána v sekundách. Měří se čas potřebný k vyprázdnění obsahu nádoby naplněné zkoumanou kapalinou. Vyrábí se nádoby různých provedení, které jsou dány normami (např. ISO), velikost, geometrie a materiálové provedení se mohou lišit dle návrhů výrobců nádob.

Měření konzistence rozlivem je metoda k určování relativní viskozity. Metoda je vhodná pro newtonské kapaliny, kde je obtížné, nemožné či časově náročné měření viskozity a zjišťování reogramu. Válcová nádoba bez dna se postaví na hladkou a odmaštěnou skleněnou plochu, naplní se konstantním množstvím zkoumané látky o známé teplotě a po naplnění se nadzvedne. Měřená látka se po skleněné desce rozlije, viz Obr. 7. Měřítka konzistence je průměr rozlitého obrazce, případně čas, za který došlo k určenému rozlivu.



Obr. 7 Měření konzistence rozlivem.

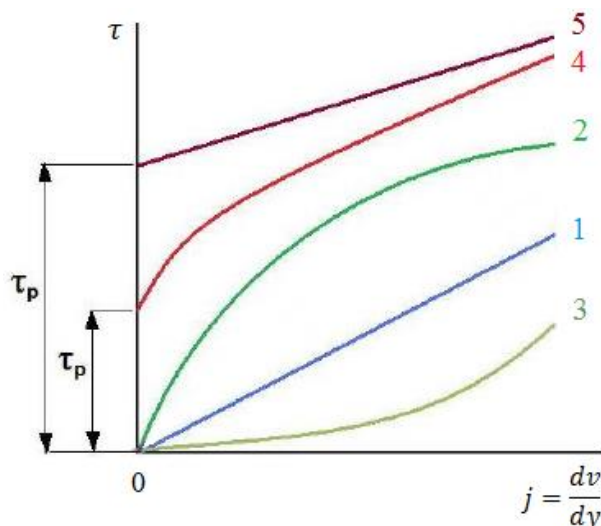
2.2 Reologie a reogramy

Reologie se zabývá tokem a deformací materiálu, zkoumá pohyb kapalin a přetváření materiálů, které nejsou dokonale elastické, ani zcela plastické, ale vyznačují se různou kombinací těchto vlastností. K toku dochází vlivem působení vnější síly, kterou definuje součin smykového napětí a smykové plochy. Reologie studuje vztahy a vzájemnou závislost mezi smykovým napětím a deformací, její rychlostí a velikostí [4].

Reogramy neboli tokové křivky (viz Obr. 8) jsou grafickým znázorněním rovnic, které popisují závislosti tečného napětí na rychlostním gradientu. Pro vykreslení reogramů se tedy nejčastěji souřadnicové osy popisují jako τ na j nebo logaritmy těchto proměnných. Uvedenou závislost popisují většinou empirické rovnice. Některými z nich jsou např. rovnice pro funkce lineární, parabolické, logaritmické, hyperbolické, nebo podle autorů – Ostwaldova či Binghamova rovnice toku. Reogramy bez inflexních bodů si vystačí s jednoduššími rovnicemi o dvou parametrech, tzv. reologický model zahrnuje pouze dva parametry. Popis reogramů s inflexním bodem se většinou provádí pomocí tříparametrových rovnic. Parametry některých látek těchto modelů uvádí literatura.

Základními reologickými prvky jsou: tuhá látka (Euklidova hmota), tekutá kapalina (Pascalova kapalina), pružná látka (Hookova hmota), vazká kapalina (Newtonova kapalina), tvárná látka (St. Venantova látka) a výčet případně může doplňovat tzv. vláčná látka. Z nich nejvýznamnější složené reologické modely jsou Kelvinův pružnovazký model a Maxwellův vazkopružný model [4], [5], [12].

Reogramy pro dvouparametrové modely některých neneutronovských kapalin jsou uvedeny na Obr. 8 [5].

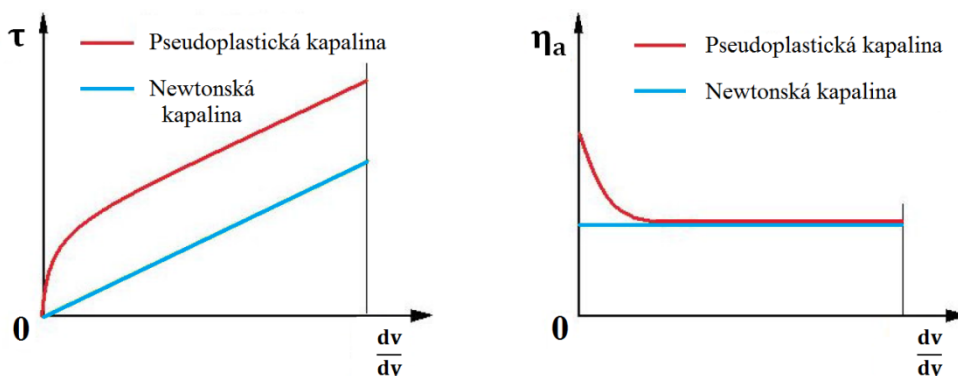


Obr. 8 Reogramy vybraných neneutronovských kapalin [5].
1- newtonská kapalina, 2- pseudoplastická kapalina, 3- dilatantní kapalina,
4- skutečná plastická kapalina, 5- Binghamova – ideálně plastická kapalina.

2.2.1 Typy neneutronských tekutin

Cementové kompozity v tekutém stavu se řadí jednoznačně mezi neneutronské kapaliny, které se vyznačují nepřímou úměrou mezi deformací a napětím. Rozlišuje se několik typů neneutronských kapalin. Podle průběhu viskozity v závislosti na rychlostním gradientu j se rozlišují kapaliny pseudoplastické a plastické, jejichž viskozita s rostoucím j klesá, a dilatantní, jejichž viskozita s rostoucím j roste. Pokud je viskozita neneutronských kapalin časově závislá, pseudoplastické a plastické kapaliny mohou být tixotropní a dilatantní mohou být reopektické. Podrobnější popis těchto kapalin je následující [4], [5], [8].

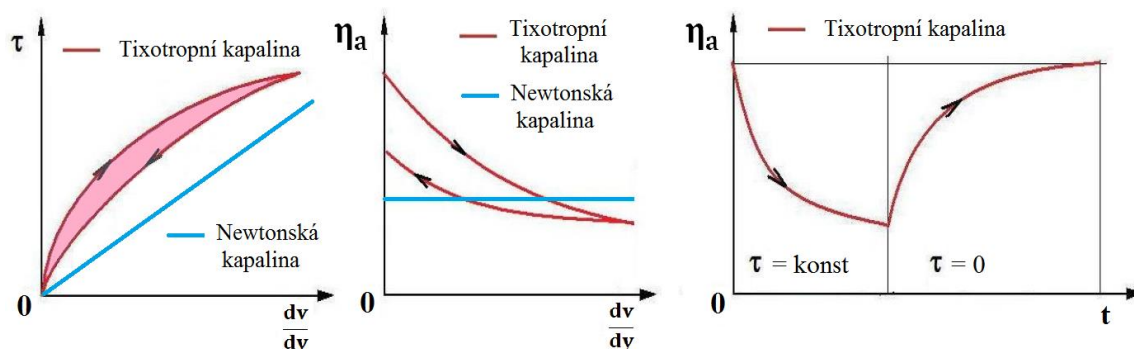
Pseudoplastické kapaliny se vyznačují snížením počátečních hodnot zdánlivé viskozity při stoupajícím smykovém napětí (Obr. 9). Při vyšších hodnotách gradientu rychlosti je viskozita pseudoplastické kapaliny srovnatelná s newtonskou. Tyto kapaliny, které řidnou a tečou i při minimálním napětí, jsou pravděpodobně nejběžnější z neneutronských tekutin. Tento typ chování se také někdy nazývá smykové ředění. Pseudoplasticita je z technického hlediska ceněnou vlastností, protože snižuje energetickou náročnost při proudění kapalin potrubím nebo při jejich míchání. Mezi pseudoplastické tekutiny patří např. suspenze nesouměrných částic, suspenze papíru, některé koloidní roztoky, kaly, pasty, taveniny a roztoky polymerů, kaučuky, latexy, barvy, emulze, mazadla apod. V klidovém stavu jsou částice uspořádány náhodně, při pohybu, s rostoucím rychlostním gradientem, se nesouměrné částice postupně vyrovnávají a orientují hlavními osami do směru pohybu. Hypotéza pseudoplastického chování předpokládá, že změna struktury (tj. orientace částice) nastává ve chvíli, kdy začne působit smykové napětí, nebo v době tak krátké, že je použitím běžných viskometrických metod tento časový úsek nezjistitelný. Pokud změna struktury nenastane okamžitě, ale její vytvoření je časově měřitelné, kapaliny se nazývají tixotropní.



Obr. 9 Porovnání pseudoplastické a newtonské kapaliny.
Toková křivka (vlevo), průběh zdánlivé viskozity (vpravo) [5].

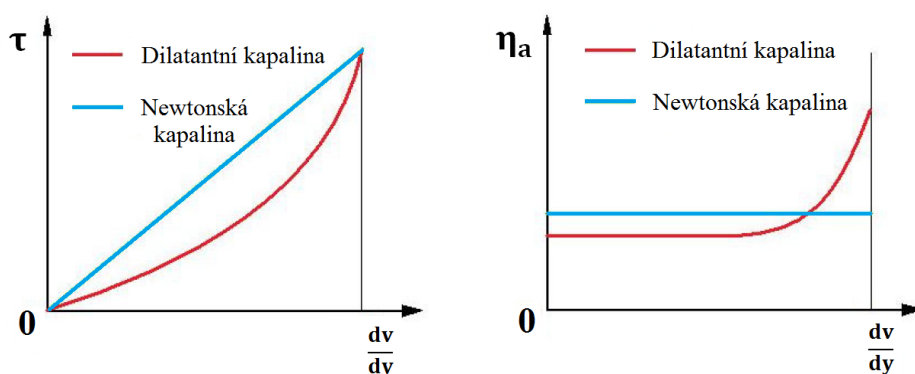
Tixotropní (řidnouce) kapaliny jsou takové pseudoplastické nebo plastické kapaliny, pro které platí, že pokud jsou zatíženy smykovým namáháním (např. míchání, třepání), jejich zdánlivá

viskozita je nejprve vysoká, ale s rostoucím časem se zmenšuje. Jsou-li tyto kapaliny opět v klidu, jejich původní struktura se obnoví a zdánlivá viskozita většinou vzroste k původní hodnotě (Obr. 10 vpravo). Tixotropie je často pozorována u tuků a nachází uplatnění v průmyslu barev, kdy je vhodné, aby byla barva tekutá pouze v průběhu natírání a po nanesení vrstvy nestékala. Do této kategorie se řadí i některé směsi betonu, v závislosti na jeho jednotlivých složkách. Toková křivka těchto kapalin (Obr. 10 vlevo) zachycuje tzv. hysterézní smyčku, což znamená, že průběh tokové křivky se při zvyšování napětí neshoduje s jejím průběhem při snižování napětí. Hysterézní smyčka zde probíhá ve směru hodinových ručiček.



Obr. 10 Porovnání tixotropní a newtonské kapaliny.
Toková křivka s hysterézní smyčkou (vlevo), průběh zdánlivé viskozity v závislosti na gradientu rychlosti (uprostřed) a na čase při změně napětí (vpravo) [5].

Dilatantní kapaliny jsou houstnoucí. Charakteristický je pro ně růst zdánlivé viskozity s rostoucím tečným napětím a s rychlostí deformace (Obr. 11). Dilatace je reciprokým jevem k pseudoplasticitě. I když je vzácnější než pseudoplastičita, je dilatance často pozorována u tekutin obsahujících vysoké hladiny deflokulovaných pevných látek, jako jsou jílové kaše, cukrovinky, škrobové suspenze (např. kukuřičný škrob ve vodě), směsi písku a vody, různá rozpouštědla barev a některé nátěrové a tiskařské barvy. V technické praxi je výskyt dilatantních tekutin velmi malý. Dilatance se také označuje jako smykové zahušťování.



Obr. 11 Porovnání dilatantní a newtonské kapaliny.
Toková křivka (vlevo), průběh zdánlivé viskozity (vpravo) [5].

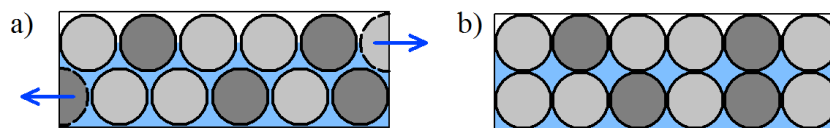


Při malých napětích tyto kapaliny svým chováním připomínají newtonské kapaliny – gradient rychlosti stoupá úměrně s napětím, zdánlivá viskozita je konstantní a platí

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy} = \eta_a \cdot j. \quad (10)$$

Větší síly způsobují náhlé zvýšení zdánlivé viskozity, ale gradient rychlosti zůstává s dalším růstem napětí téměř konstantní, tedy $\frac{dv}{dy} = konst.$

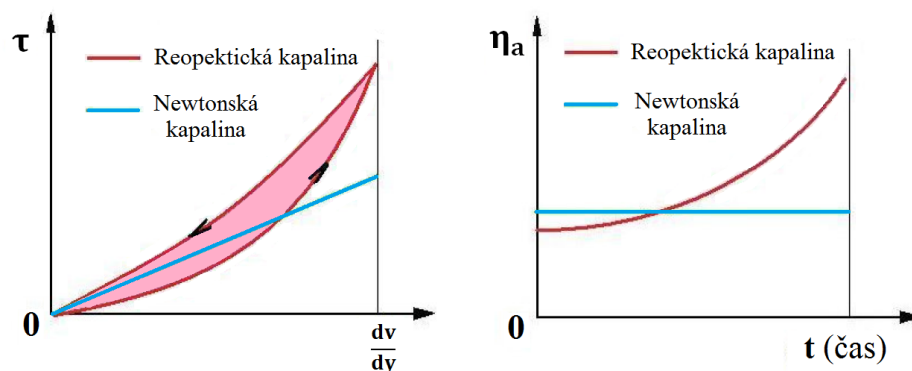
Takový jev lze vysvětlovat pomocí změny uspořádání částic, ke které v suspenzi dochází během pohybu kapaliny (Obr. 12).



Obr. 12 Schématické vysvětlení dilatace podle Reynoldse – uložení kulovitých částic v suspenzi, a) klidové uspořádání částic s minimálním objemem dutin mezi nimi, b) vrstvitě uspořádání částic při pohybu s rostoucím objemem dutin – suspenze dilatuje [5].

V klidu tekutina právě dostačuje k vyplnění mezer mezi částicemi. Jakmile se však suspenze začne pohybovat s nízkým rychlostním gradientem, napětí jsou malá a kapalina se mezi částicemi chová jako mazivo. S vyššími hodnotami rychlostního gradientu se těsné uspořádání částic mění na vrstvy, objem dutin se zvýší a suspenze se nepatrně roztáhne (dilatuje). Kapaliny v takovém případě začíná být nedostatek a tangenciální napětí je vyšší. Dilatace způsobuje rychlý vzrůst zdánlivé viskozity při rostoucím rychlostním gradientu. Pokud výše popsaný jev probíhá s časovým zpožděním, označuje se jako reopexie.

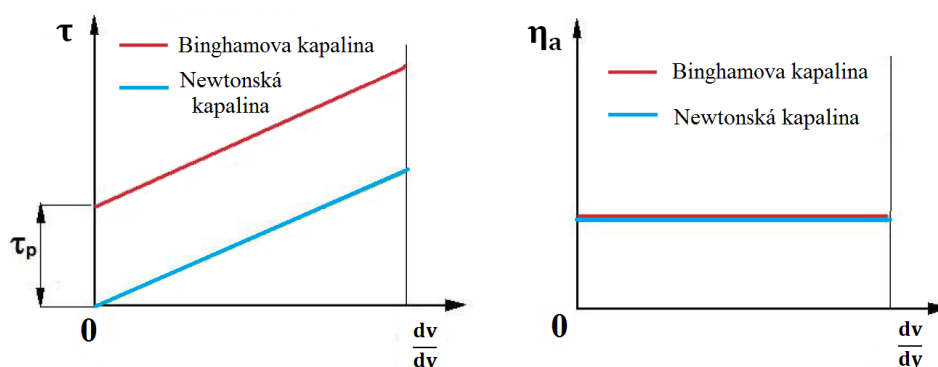
Reopektické (reopexní) kapaliny jsou zvláštním případem dilatantních. Jestliže jsou vystaveny smykovému namáhání (např. míchání, třepání) jejich zdánlivá viskozita je nejprve nízká a s dobou působení napětí postupně roste. Pokud jsou kapaliny v klidu, jejich původní struktura se obnoví a zdánlivá viskozita se přiblíží původní hodnotě (Obr. 13).



Obr. 13 Porovnání reopektické a newtonské kapaliny. Toková křivka s hysterezní smyčkou (vlevo), průběh zdánlivé viskozity v závislosti na čase (vpravo) [5].

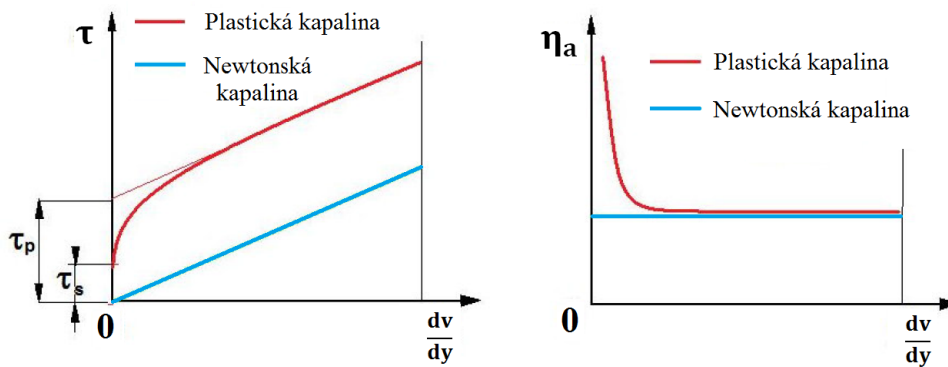
Reopexie je v podstatě opak tixotropního chování. Příkladem kapalin mohou být sádrové hmoty a tiskařské inkousty. Toková křivka reopetických kapalin se vyznačuje hysterezní smyčkou – při zvyšování napětí se průběh tokové křivky neshoduje s průběhem při snižování napětí. Smyčka probíhá proti směru hodinových ručiček.

Binghamova (ideálně plastická) kapalina je typická tím, že v klidu má trojrozměrnou strukturu s tuhostí schopnou vzdorovat jakémukoli napětí, které je menší než napětí na mezi deformace τ_p (tzv. počáteční smykové napětí, mez kluzu či dynamická mez toku). Po překročení τ_p se struktura rozpadne a látka se začne chovat jako newtonská kapalina – je schopna téci. Po dalším poklesu napětí pod tuto kritickou hodnotu se vnitřní struktura hmoty opět obnoví (Obr. 14). Patří sem především koncentrované kašovité a zrnité suspenze, průmyslové, odpadní, vrtné a stokové kaly, bahno, řídké kaše, pasty, plastické gely, olejové barvy apod. Většinou se do této kategorie zařazují také cementové směsi v čerstvém tekutém stavu.



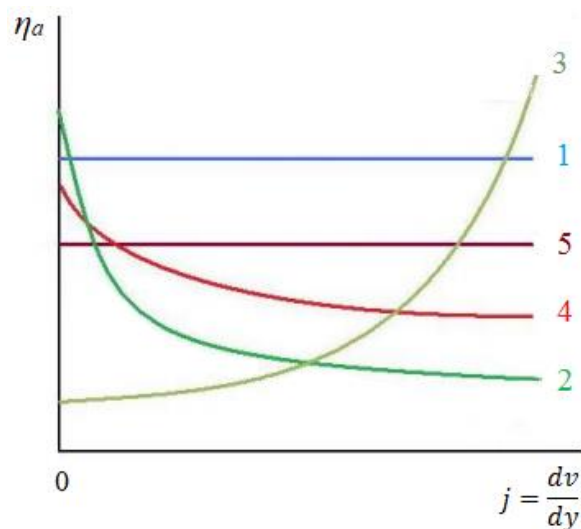
Obr. 14 Porovnání Binghamovy a newtonské kapaliny. Toková křivka (vlevo), průběh zdánlivé viskozity (vpravo) [5].

Skutečná plastická kapalina má v klidu rovněž trojrozměrnou strukturu s tuhostí, která má schopnost vzdorovat libovolnému napětí menšímu než napětí na mezi deformace τ_s (tzv. počáteční smykové napětí, statická mez toku). Po překročení této mezní hodnoty napětí se struktura rozpadne a látka teče jako newtonská kapalina. Po opětovném poklesu napětí pod tuto kritickou hodnotu se vnitřní struktura kapaliny zase obnoví. Zdánlivá viskozita je pro malé gradienty rychlosti vysoká a s rostoucím gradientem její hodnoty klesají, při dalším zvýšení zůstává konstantní (Obr. 15). Za statických podmínek se tento typ kapalin chová jako pevná látka. Pro vyvolání jakéhokoli toku musí na tekutinu působit určitá síla. Běžným příkladem tekutiny tohoto typu je kečup. Jeho mez deformace často znemožňuje nalití z láhve, dokud není lahev zatřesená. Jakmile je tato mezní hodnota překročena a dojde k toku, mohou plastické kapaliny vykazovat newtonovské, pseudoplastické nebo dilatační charakteristiky tečení.



Obr. 15 Porovnání plastické a newtonské kapaliny.
Toková křivka (vlevo), průběh zdánlivé viskozity (vpravo) [5].

Souhrnné zobrazení tokových křivek (reogramů) a průběhu zdánlivé viskozity v závislosti na rychlostním gradientu pro základní typy nenewtonských kapalin je na Obr. 8 a Obr. 16.



Obr. 16 Zdánlivá viskozita vybraných nenewtonských kapalin [5].
1- newtonská kapalina, 2- pseudoplastická kapalina, 3- dilatantní kapalina,
4- skutečná plastická kapalina, 5- Binghamova – ideálně plastická kapalina.

Tattersall a Baker [13] měřili reologické vlastnosti vibrovaného čerstvého betonu pomocí gravitového reometru na vibračním stole. Výsledky ukázaly, že při aplikaci vibrací na čerstvý beton, tokové vlastnosti již neodpovídaly jednoduchému lineárnímu Binghamovu modelu, ale přibližovali se vlastnostem pseudoplastické kapaliny. Při nízkých hodnotách smykového napětí a za dalších praktických okolností se choval čerstvý beton pod vibracemi jako newtonovská kapalina, což by vysvětlovalo, proč teče pod vlivem vlastní tíhy [14]. Hu a Larrard [15] nesouhlasili s výše uvedenými závěry Tallersalla a Bakera, měřili tokové křivky betonů a zjistili, že betony pod vibracemi zůstaly binghamovské. Při nízkých hodnotách smykového napětí byl vibrovaný čerstvý beton Binghamovou kapalinou, někdy dokonce až newtonskou, pokud byla doba vibrování dostatečně dlouhá [16].

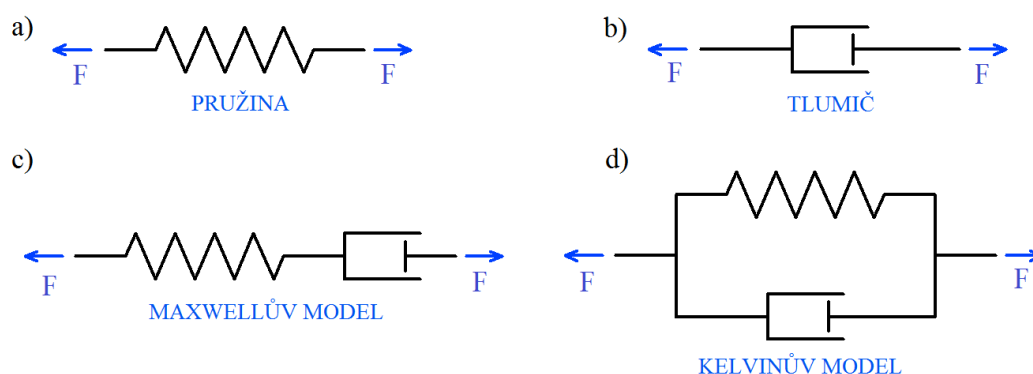
Podle většiny autorů [15], [17], [18] se beton a cementové pasty v tekuté formě řadí mezi Binghamovy kapaliny s prvky tixotropie, což je specifický případ pseudoplasticity s časovou závislostí. Jelikož tečou až po překročení meze kluzu a jejich viskozita klesá s působením síly.

2.2.2 Mocninová rovnice toku

Mocninové funkce jsou nejstarším analytickým vyjádřením závislosti smykové rychlosti na tečném napětí pro newtonovské kapaliny. Nejčastější je formulace Ostwalda a de Waelea, kde zdánlivá a diferenciální viskozita opět závisí na rychlostním gradientu, proto nejsou látkovými parametry. Mocninové funkce jsou pouze interpolačními rovnicemi, jelikož nebyly odvozeny z žádného fyzikálního modelu vnitřní struktury kapalin. Jejich používání bylo často kritizováno, nicméně i přesto velmi dobře vystihují většinu skutečných tokových křivek. Nedostačují pouze pro kapaliny, jejichž reogramy obsahují inflexní body. Možným řešením je použít mocninovou funkci s dostatečnou přesností pro část tokové křivky [5].

2.2.3 Reologické modely

Smykové napětí viskózních kapalin je při nulové rychlosti vždy nulové. Elastické (pružné) látky při nulovém napětí vykazují vždy nulovou deformaci a po ukončení působení napětí se vrací do původního nezatíženého stavu. U dokonale pružných kapalin závisí napětí v každém okamžiku pouze na velikosti deformace, kdežto u kapalin viskózních napětí závisí na rychlosti deformace. Napětí viskoelastických látek závisí proto na celém průběhu předchozí deformace, nikoliv pouze na velikosti nebo pouze na rychlosti deformace. Po ukončení toku u těchto kapalin napětí typicky nedosáhne okamžitě nulové hodnoty, napětí se bude k této hodnotě snižovat postupně. Příklady základních mechanických modelů viskoelastických látek schematicky uvádí Obr. 17.



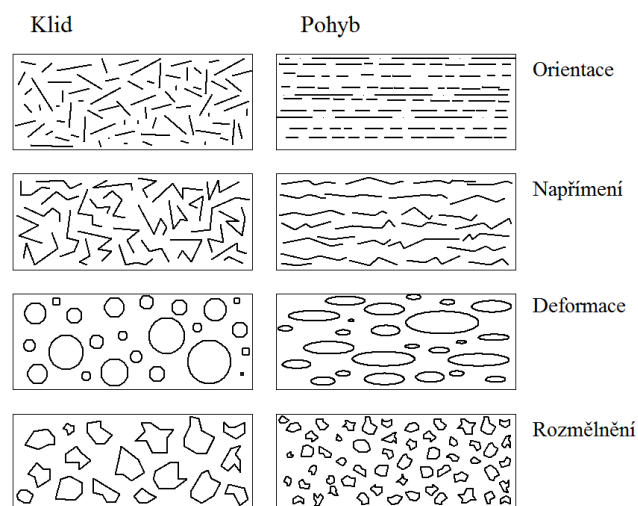
Obr. 17 Jednoduché a složené mechanické modely reologického chování látek, a) hookovská elastická látka, b) newtonovská viskózní kapalina, c) model viskoelastické látky, d) model elasticko-viskózní látky [19].



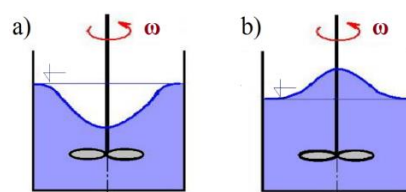
Cementový kompozit je z hlediska modelování a popisu reologického chování považován za viskoelastický, jelikož sdružuje vlastnosti pružných a viskózních látek. Přetvoření betonu může být pružné i plastické (trvalé). Dlouhodobé deformace vyvolané viskoelastickými vlastnostmi betonu mají vliv na dotvarování. Viskoelastickou látku v tomto případě nejčastěji zjednodušeně reprezentuje Maxwellův reologický model (Obr. 17c), který je založen na sériovém zařazení Hookovy pružiny (pružná látka) a Newtonova pístu (viskózní látka) [5], [19], [20].

2.2.4 Vnitřní struktura během toku

Pokud v důsledku toku dochází během proudění kapaliny ke změně její vnitřní struktury, pak vykazuje neneutonské chování (Obr. 18). K deformaci dochází vlivem silového působení. Deformace se vyznačuje změnou vzájemné polohy různých bodů látky oproti původnímu stavu a je způsobena změnou tvaru, objemu nebo kombinací. Mez toku, kterou lze pozorovat u binghamských látek, je určena počátečním napětím. Při jeho překročení začíná soustava, která se zatím chovala jako pružné těleso, téci. Pružnost (elasticita) je materiálová vlastnost, která po ukončení působení nebo snížení napětí umožňuje materiálu obnovit svůj původní nedeformovaný tvar a velikost. Tok je nevratná deformace probíhající v čase. Postupný pokles napětí za konstantní deformace je označován jako „relaxace napětí“. Mimo jiné jsou neneutonské kapaliny charakteristické i svým anomálním chováním při míchání rotačním tělesem, které se uvnitř hmoty otáčí, kapalina totiž stoupá nahoru po hřídeli míchadla, viz Obr. 19 [5].



Obr. 18 Vliv toku na uspořádání částic v neneutonské kapalině [5].



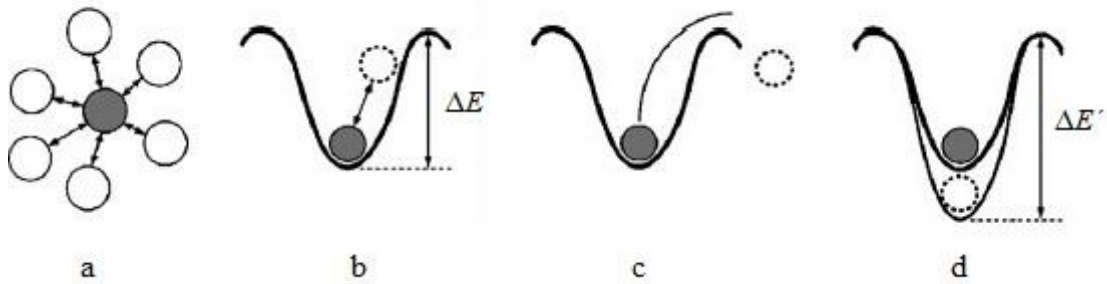
Obr. 19 Chování kapaliny během míchání rotujícím míchadlem, a) viskózní kapaliny, b) viskoelastické kapaliny [5].

2.3 Tixotropie

Některé tekutiny vykazují změnu viskozity v závislosti na čase a konstantním smykovém napětí. V úvahu přichází dvě kategorie chování – tixotropie a reopexie. Tixotropní tekutina podléhá poklesu viskozity v čase při vystavení neustálému smykovému napětí. Reopexie je v podstatě opak chování tixotropních látek v tom, že viskozita tekutiny se zvyšuje s dobou působení konstantního smykového napětí. Jak tixotropie, tak reopexie se mohou vyskytnout v kombinaci s některým z dříve popsaných tokových chování, nebo pouze při určité hodnotě smykového napětí. Prvek času je extrémně proměnlivý, za podmínek konstantního smykového napětí některé tekutiny dosáhnou konečné hodnoty viskozity během několika sekund, zatímco u jiných to může trvat až několik dní. Tixotropie se v materiálech vyskytuje často, k výskytu reopektických tekutin dochází vzácně. Tixotropního chování se snaží dosáhnout zejména výrobci barev a laků. Tixotropní nátěr se po delším rozmíchání štětcem snáze roztírá a po ukončení natírání nestéká [8].

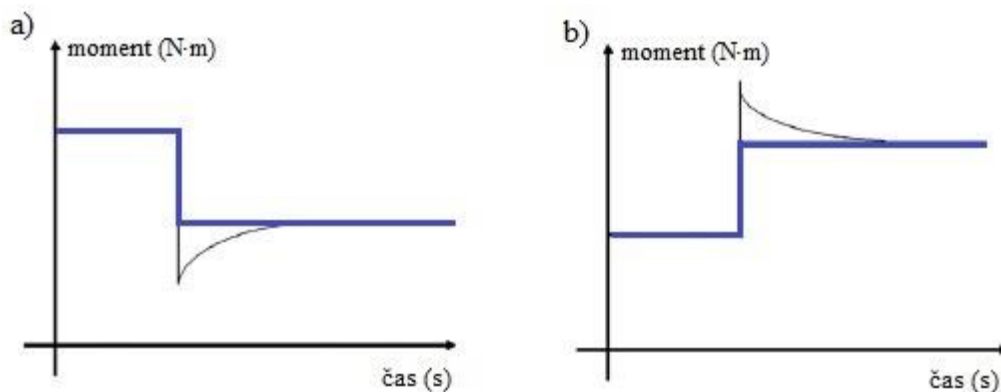
Tok může vyvolat vratné a nevratné strukturální změny. Analýza účinků toku na mikrostrukturu a reologii zůstává jedním z nejnáročnějších problémů. Reologickým projevem strukturálních změn vyvolaných tokem je proměnná viskozita. Pokud jsou změny reverzibilní a časově závislé, efektem je tixotropie. Průběh tokové křivky při zvyšování napětí se neshoduje s jejím průběhem při snižování napětí, reogram těchto kapalin proto obsahuje hysterezní smyčku (Obr. 10 vlevo).

Tixotropii lze pozorovat u plastických a pseudoplastických kapalin. Jelikož písek a štěrk jsou inertní nekolidní částice, je cement jediným možným zdrojem tixotropie v betonu. Proto většina výsledků získaných zkoumáním betonu, cementových past nebo malty vykazuje podobné reologické přechodné chování. Tixotropie je fyzikální jev, který lze zjednodušeně vysvětlit pomocí Obr. 20, kde vzájemné interakční síly částic (koloidní interakce v případě cementových past) určují pro každou částici potenciální energii, která je znázorněna energetickou potenciálovou jámou. Pro každou částici existuje rovnovážná poloha, pro kterou je její energie minimální (Obr. 20a). Pokud je energie dodávaná systému menší, než je energie potřebná pro opuštění potenciálové jámy ΔE , částice v jámě zůstane uvězněna (Obr. 20b). Po přerušení dodávky takové energie se částice vrátí do své původní polohy (elastická látka). Když je do systému dodávána energie vyšší, než je nutná k opuštění potenciálové jámy, dojde k jejímu opuštění a nastane tok směsi (Obr. 20c). Tixotropní chování se v systému vyznačuje tím, že se hloubka potenciálové jámy v čase zvětšuje, pokud je směs v klidu (Obr. 20d), příčinou je Brownův pohyb a možný vývoj koloidních interakcí. Energie potřebná pro únik z této zvětšené energetické jámy vzroste na hodnotu $\Delta E'$. V momentě, kdy ji částice opustí, její hodnota („hloubka“) se vrátí na původní ΔE [18].



Obr. 20 Únik částice z potenciálové jámy – jednoduché fyzikální vysvětlení tixotropního chování cementových materiálů na mezi kluzu. [18].

Chování betonu v tekutém stavu, dokud je dosaženo ustáleného toku, lze popsat pomocí tzv. modelu na mezi kluzu (*Yield Stress Model*). Model popisuje chování betonu jako lineární. Mezi dvěma po sobě následujícími ustálenými stavy však existuje přechodný režim, během kterého tento model pro popis chování betonu nedostačuje. Při typickém měření velikosti torzního momentu reometrem lze zjistit, že při snížení (Obr. 21a) a při zvýšení (Obr. 21b) rychlosti otáčení je rozdíl v chování mezi předpokládaným „modelovým“ a reálným chováním v betonu. Rozdíl je zapříčiněn tixotropním chováním testovaného betonu, což vede ke zpoždění odezvy v materiálu na tuto změnu [18], [21].



Obr. 21 Příklady přechodného chování toku. Předpokládané chování dle Yield Stress Modelu (modrá přímá čára) a reálné chování betonu (černá čára), a) snížení rychlosti otáčení, b) zvýšení rychlosti otáčení [18].

Cementové materiály není jednoduché popsat, co se týče jejich vlastností a chování, jelikož proces hydratace začíná, jakmile se cement a voda smísí. Od stejného okamžiku se neustále vyvíjí i viskozita, která má vliv na chování betonu. Bylo prokázáno, že v krátkých časových intervalech dominují flokulační a deflokulační procesy, které vedou k rychlým avšak vratným tixotropním účinkům. Zatímco ve větších časových intervalech dominují hydratační procesy, které vedou k nevratnému vývoji chování. Tyto dva efekty mohou ve skutečnosti působit kdykoli, ale podle výše uvedeného schématu se zdá, že mají velmi odlišné charakteristické časy. V důsledku toho se lze domnívat, že existuje přechodné období, pro které nezvratné účinky procesů ještě nejsou

významné. Modelovat tixotropii by tedy mělo být možné pouze ve velmi krátkých časových intervalech několika minut (do asi 30 minut), během nichž lze nevratný vývoj betonu zanedbávat.

Protože je tixotropní chování vratné, je třeba si určit referenční stav pro studium reologického chování. Z teoretického hlediska lze uvažovat o dvou potenciálních referenčních stavech: stav úplné flokulace (srážení, vločkování) materiálu nebo úplně deflokulační stav. V praxi však nelze nikdy dosáhnout žádného z těchto stavů. Na jedné straně materiál v klidu stále flokuluje, ale ireverzibilní změny v důsledku hydratace zabraňují měření jedinečného referenčního stavu pro daný materiál. Na druhou stranu maximální smyková rychlost aplikovaná na beton v míchacím zařízení se může velmi lišit (pohybuje se mezi 10 a 60 s⁻¹), a tím modifikovat dosažený stav flokulace materiálu i jeho reologické vlastnosti. Nicméně žádné zařízení není dostatečně silné na to, aby dosáhlo mícháním nebo čerpáním zcela deflokulovaného stavu směsi, protože tohoto stavu je z teoretického hlediska dosaženo pouze pro nekonečné smykové rychlosti.

Pokud dochází dostatečně rychle k flokulaci, beton se považuje za tixotropní. Když je čerstvá směs v klidu, stává se více tekutější. Po několika sekundách už se tekutější nestává a naopak vlivem hydratace dochází k nevratnému tuhnutí. V důsledku toho je nejvhodnějším referenčním stavem pro daný beton stav flokulace bezprostředně po smíchání, což je v historii toku směsi nejdosažitelnější deflokulovaný stav [18].

Tixotropní chování lze pozorovat zejména u samozhutnitelných betonů (SCC; z anglického *Self-Compacting Concrete*). V průběhu ukládání se čerstvý SCC chová jako kapalina. Když ukládání probíhá dostatečně pomalu nebo se přeruší, dojde k flokulaci. V betonu se pak vytvoří vnitřní struktura, která má schopnost odolat zatížení působícího nad touto vrstvou bez přenesení bočního zatížení do bednění. Tuto vlastnost lze využít při betonování větších dílců, pro následný povrch konstrukce bez spár. Ukládání po vrstvách umožňuje spodní vrstvě, aby na jejím povrchu došlo k flokulaci před uložením další vrstvy. Jelikož v případě SCC není umožněna vibrace, může nastat případ, kdy se obě vrstvy nepromísí, a vznikne pracovní spára mezi těmito vrstvami, pokud je flokulace příliš silná. Tímto způsobem může dojít ke ztrátě ohybové pevnosti až o více než 40 % [18].

Tok cementové pasty je ovlivněn zejména vodním součinitelem, jelikož cementová pasta je vysoce koncentrovaná suspenze cementu ve vodě. Další parametry, které mohou tok ovlivňovat, souvisí s povahou cementu, patří k nim především chemické složení cementu a tvar částic. Z těchto parametrů je nejnárodněji modifikovatelný právě vodní součinitel a jemnost mletí cementu, jemuž odpovídá specifický povrch. Specifický povrch cementu má vliv na reologické vlastnosti. Reologické vlastnosti směsi jsou ovlivněny částicemi menšími než 100 μm. S jednotným vodním součinitelem a rostoucím specifickým povrchem cementu hodnota smykového napětí a plastické viskozity lineárně vzrůstá. Lapasin a kol. ve svém výzkumu zkoumali tixotropní chování čerstvých portlandských cementových past na základě přechodových napětí stanovených při konstantní smykové rychlosti. Během experimentů zjistili, že při stejném



vodním součinitelem roste viskozita s jemností mletí cementu a při zachování jednotného typu mletí cementu viskozita roste s klesajícím vodním součinitelem [22].

Ačkoliv se tixotropií betonu a obecně cementových kompozitů zabývají odborníci po celém světě, jedná se o jev, který stále není dostatečně probádán. Mikrostrukturální změny v důsledku proudění jsou poměrně složité a nejsou plně pochopeny. Další zkoumání reologických projevů a možných postupů měření by mohlo zajistit lepší uplatnění reologických vlastností při návrhu nejrůznějších cementových směsí, které se v současnosti těší poměrně velké oblibě. Budoucí experimenty by mohly objasnit, jaké složky, jejich poměry a jaké procesy ovlivňují tixotropii v čerstvém betonu. Při hlubším prozkoumání a pochopení tohoto jevu by bylo možné jej lépe využívat, a to zejména u samozhutnitelných betonů či při 3D tisku betonových konstrukcí, kde je v současnosti velmi uplatňován UHPC [23].



3 Cementové kompozity

Beton je nejznámější a nejpoužívanější kompozitní stavební materiál, sestává z pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí. Vynález a využití kompozitních stavebních materiálů sahají hluboko do historie. První zmínky ke stavebnímu pojivu lze hledat v Mezopotámii, kdy se jako pojivo používal jíl. Ve starověkém Egyptě se jako pojivo užívala sádra. Počátek používání hydraulického betonu, podobného tomu dnešnímu, s pojivy na bázi hydraulických vápen, přírodního nebo portlandského cementu, se datuje do období starověkého Říma (kolem roku 200 př. n. l.). Pro výrobu pojiva se tehdy používal sopečný produkt – pucolán, což je přírodní hydraulický cement s vynikajícími vlastnostmi [24].

3.1 Cement

Cement je práškové pojivo na hydraulické bázi. Látka, která má schopnost spojovat jiné materiály. Vyrábí se prakticky ze stejných surovin jako přírodní hydraulické vápno, ale za vyšších teplot. Cement vzniká v cementárnách společným vypalováním vápence a jílu při teplotách kolem 1450 °C. Surovina jemně umletá a promísená se pálí v šachtových nebo otáčivých pecích nebo na slinovacích rostech. Záměrem procesu je vytvoření tzv. slínkových minerálů.

Tento jemně mletý šedivý prášek anorganického původu po smíchání s vodou tuhne a tvrdne následkem hydratačních reakcí. Jeho vlastnost pojit i sypké látky umožňuje významné využití ve stavebnictví, nesoudržné látky mění v soudržnou kompaktní hmotu. Používá se jako hlavní složka betonových a maltových směsí. Cement tuhne i pod vodní hladinou a svou pevnost je schopen si zachovat po zatvrdnutí i pod vodou. Tvrdnutí probíhá zpočátku intenzivně, později se zpomaluje, až se po několika letech ustálí. Největší přírůstek pevnosti nastává do 28 dnů. Tato pevnost se považuje za základní, stoprocentní, další nárůst pevnosti je velmi pomalý. Velikost přírůstku pevnosti ovlivňuje prostředí a množství jednotlivých složek v cementu.

Za počátek moderního cementářství je považován patent č. 5022 britského zedníka Johna Aspdina z roku 1824. Spolu se svým synem pak započal průmyslovou výrobu cementu. Aspdin sám údajně chápal cement především jako pojivo k výrobě umělých kamenných prvků

nahrazujících kvalitní stavební kámen z Portlandu. Odtud název portlandský cement, který se dodnes používá pro tzv. cement jednosložkový (mletý slínek bez dalších hydraulických příměsí).

Cement se řadí mezi tzv. hydraulické maltoviny. Tato hydraulická látka musí sestávat nejméně ze dvou hmotnostních třetin ze silikátů vápenatých, ve zbytku obsahu z oxidu hlinitého, železného a dalších oxidů. Při teplotách 1300–1400 °C, když dochází ke slnutí, začínají uvnitř materiálu probíhat výraznější chemické změny, jejichž důsledkem je zejména vznik trikalciumsilikátu a dalších složek. Vypalováním a postupným nabalováním práškové násady následně vznikají valounky o rozměru několika centimetrů. Po vychladnutí a rozdrcení se s přísadou 2–6 % sádrovce mele na finální produkt – vzniká jednosložkový portlandský cement.

Cementové slínky jsou směsí různých vápenatých křemičitanů, hlinitanů, železitanů a dalších fází. Portlandský cement je tvořen z více než pětadvaceti minerálních fází, přičemž přibližně z 90 % to jsou čtyři hlavní slínkové minerály, které mají rozhodující význam pro vlastnosti cementu. Jsou jimi:

- trikalciumsilikát $(3CaO \cdot SiO_2, \text{zkráceně } C_3S)$,
- dikalciumsilikát $(2CaO \cdot SiO_2, \text{zkráceně } C_2S)$,
- trikalciumaluminát $(3CaO \cdot Al_2O_3, \text{zkráceně } C_3A)$,
- tetrakalciumaluminátferit $(4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3, \text{zkráceně } C_4AF)$.

Mimo tyto ryze minerální fáze se ve slínku rozlišují ještě tzv. technické minerály – alit, belit a celit. V technické praxi se často používá rovnost mezi C_3S a alitem, C_2S a belitem a C_4AF a celitem, mineralogicky však tyto technické fáze obsahují i jiné složky.

Výsledné vlastnosti cementu ovlivňuje každá složka rozdílně a úpravou jejich poměru při výrobě je možné docílit požadovaných vlastností finálního produktu. Cementy pro obecné použití podle normy ČSN EN 197-1 jsou rozděleny do pěti hlavních skupin označených římskou číslicí I až V. Základem těchto cementů je portlandský slínek, který je spojován méně nebo více složkami, které mají vliv na vlastnosti cementu. Evropský cement musí být označován druhem cementu a hodnotou normalizované pevnostní třídy. Dále může označení obsahovat údaje o složení (případných příměsích). Například označení (podle ČSN EN 197-1) pro „CEM I 52,5 R“ norma uvádí, že se jedná o cement portlandský s pevností v tlaku za 28 dní 52,5 MPa, tj. s pevnostní třídou 52,5 a vysokou počáteční pevností cementu [24], [25], [26].

3.2 Cementové kompozity

Obecný význam kompozitu je složenina, tedy složený materiál vzniklý umělým propojením (složením) jednodušších materiálů. Prostý beton tedy odpovídá definici kompozitní látky, jelikož vzniká sloučením a ztvrdnutím jeho základních složek, jimiž jsou cement jako pojivo, kamenivo jako plnivo a voda. Po zatuhnutí pojiva vzniká pevný umělý slepenec.



Kvalitní betonový kompozit se kromě základních složek neobejde ani bez vhodných přísad a příměsí. Výběr vhodných přísad a příměsí může výrazně vylepšit vlastnosti směsi, zajistit vyšší pevnost ztvrdlého betonu, kratší dobu tuhnutí, lepší zpracovatelnost a odolnost proti vnějším vlivům okolního prostředí. Velmi důležitý je správný návrh směsi, který z technologického hlediska může být velmi náročný, ale umožňuje znatelně vylepšit parametry běžného cementového kompozitu.

Betony z kategorie UHPC jsou moderní kompozitní stavební materiály na bázi cementů, jsou charakteristické velmi vysokou kvalitou a trvanlivostí. Vynikajících fyzikálních a mechanických vlastností je v současnosti průmyslově využíváno především pro mostní konstrukce. Unikátní lávky a mosty z UHPC, lze vidět nejen v zahraničí, ale i v České republice. Příkladem kvalitního a elegantního řešení mostovky může být zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících [27].

Vysokohodnotné betony se vyznačují především použitím vykosopevnostních tříd cementů, jemnozrnných kameniv a výběrem vhodných příměsí a chemických přísad. Vodní součinitel těchto směsí je velmi nízký, zpravidla bývá nastaven na hodnotu 0,15 až 0,3. Některé metodiky pro výrobu UHPC uvádějí dokonce jen do 0,25 [28]. Při nízkém vodním součiniteli nehydratuje 100 % pojiva a zbylé nezhydratované pojivo potom plní funkci plniva. Do vysokohodnotných betonů se obecně dává cement ve větším množství, někdy až dvojnásobném, oproti běžným betonům.

Jako příměsí jsou nejčastěji využívány mikrosilika (křemičitý úlet), křemičitá moučka a popílek. Velikost zrna mikrosiliky bývá v rozsahu od 0,1 do 2 μm , což je desetkrát méně než u cementu, proto mikrosilika tvoří tzv. *filler*, když zaplňuje prostor mezi cementovými zrny. Optimální množství mikrosiliky v UHPC je okolo 25 %, z finančních důvodů se však dává obvykle 10 %. Popílek vzniká jako nejjemnější frakce (do 1 mm) při spalování uhlí, kde je zachytáván v odlučovačích. Hlavní nevýhodou může být možný obsah těžkých kovů, který závisí na typu spalovaného uhlí. Křemičitá moučka se zrnitostí do 0,2 mm je další jemnozrnnou přísadou vyráběnou mletím suchého křemičitého písku [25].

Kamenivo bývá v UHPC slabým článkem, protože díky nízkému vodnímu součiniteli a použití mikrosilik má cementová pasta vyšší pevnost než běžně používané kamenivo. Běžně se pro UHPC používá pouze kamenivo jemnozrnné (písek) do 1 mm a křemičitý písek se zrnem do 0,6 mm. Hrubé kamenivo se zrny do 4 mm se přidává výjimečně a šterk frakce 8–16 mm se téměř nepoužívá [25], [28], [29].

V posledních letech bylo věnováno mnoho výzkumů stanovení základních mechanických vlastností vysokopevnostních betonů a také technických charakteristik konstrukčních prvků vyrobených z tohoto materiálu [30]. Zvyšování pevnosti betonu je cílem, který různí vědci hledají pomocí různých metod. K výrobě vysokopevnostního betonu se používají speciální přísady, v čele stojí plastifikátory a superplastifikátory výrazně snižující obsah vody [31], [32], [33].

Superplastifikátory ovlivňují vlastnosti jako zpracovatelnost, pevnost v tlaku, pórovitost, absorpci vody, propustnost a počáteční absorpci povrchu [34]. Některými výzkumy bylo zjištěno, že návrhové metody s obsahem popílku významně ovlivnily vývoj pevnosti konstrukčního betonu [35]. Při převládajících poměrech popílkové náhrady byla pozorována změna pevnosti o 20 % [36]. Jiní vědci použili popílek a popílek v kombinaci s oxidem křemičitým [37], [38], nebo studovali pevnost epoxidového polymeru i polymerního betonu [39]. Při použití recyklovaného vlákna, které pocházelo z recyklace suchým mechanickým zpracováním odpadního papíru (např. časopis), bylo pozorováno zlepšení tuhosti, což mohlo být zapříčiněno působením jemných částic v recyklovaných vláknech [40]. Použití vláken jako rozptýlené výztuže v betonové směsi jednoznačně vede ke zvýšení pevnosti betonu v tahu.

Zejména pro zlepšení tahové pevnosti cementového kompozitu může být přidána výztuž. Možnou variantou je klasická betonářská výztuž pro železobetonové konstrukce. Další možností je drobná rozptýlená výztuž v podobě vláken přímo vmíchaných do čerstvé směsi betonu. Vlákna jsou vyráběna z různých materiálů a mohou mít různé tvary a rozměry. Přídavkem vláken vzniká tzv. vláknobeton, který může být vyráběn jako prefabrikát i jako monolitický. Pro zajištění homogenity směsi je základním předpokladem a požadavkem rovnoměrného rozložení vláken ve struktuře betonu.

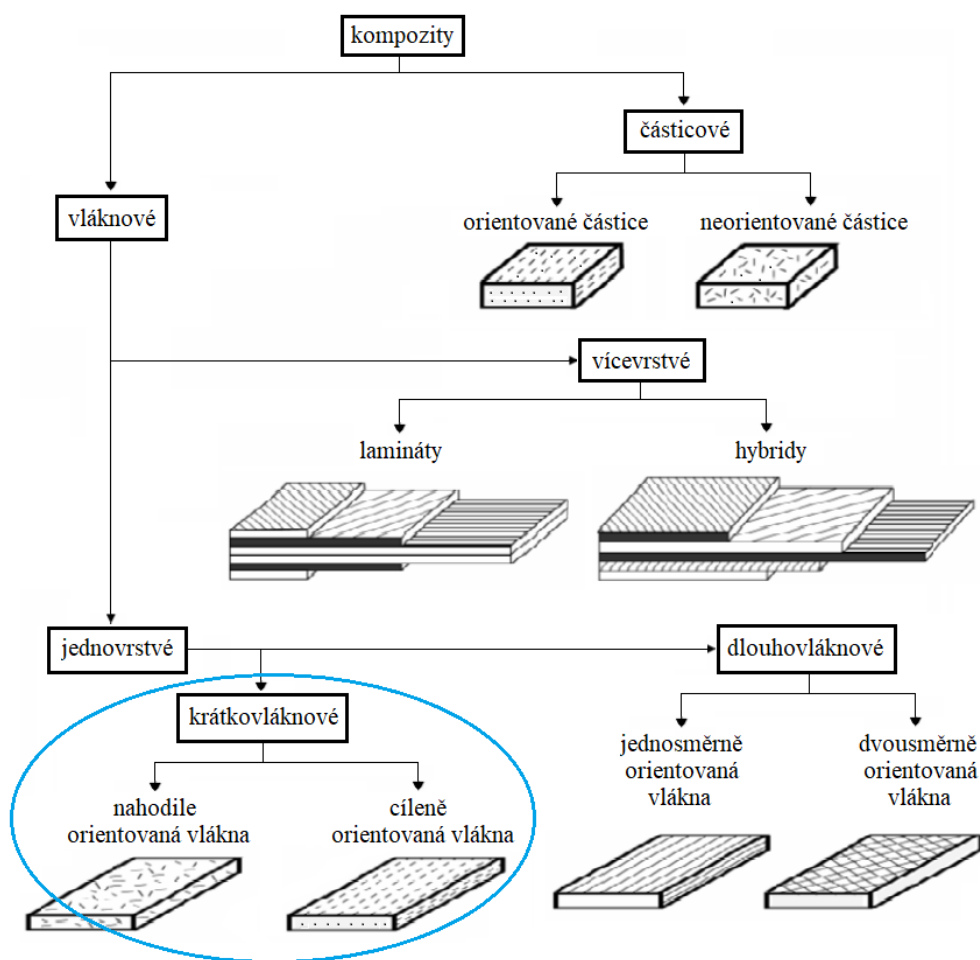
3.3 Cementové kompozity vyztužené vlákny

Prostý beton je křehký materiál s nízkou pevností v tahu a deformační kapacitou. Významným způsobem, jak lze dosáhnout vyšších hodnot pevností v tahu a smyku zejména u subtilních konstrukcí, je vyztužení kompozitu. Rovnoměrné rozptýlení vláken ve struktuře cementového kompozitu může významným způsobem ovlivnit některé jeho vlastnosti. Vláknobeton (vlákny vyztužené betony) se vyznačují především schopností lépe odolávat účinkům objemových změn vlivem smršťování při tunutí a tvrdnutí betonu a vlivem působení okolního prostředí. Nicméně klasická betonářská výztuž je v obecném povědomí více známá. Použití krátkých, nespojitých výztužných prvků je relativně nové.

Azbestová vlákna byla používána už před 4500 lety k posílení hliněných pilířů. Význam geometrie vláken a potřeba vylepšovat jeho tvar pro získání adekvátní vazby vláken s matricí byly rozpoznány na počátku 20. století [41]. Výroba vláken vyztužených betonů, které známe dnes, sahá ke konci 60. let 20. století, takže je vzhledem ke klasické receptuře betonů poměrně novinkou. V současnosti bývá použití vláken více v obecném povědomí, protože rozsah využití FRC poměrně roste a v některých případech může být vyztužení různými druhy a typy vláken užitečnější. Vlákna ztužují strukturu betonu a zlepšují houževnatost betonu, omezují negativní účinky objemových změn, zejména vliv smrštění, vznik mikrotrhlin a brání křehkému lomu konstrukce. Tímto způsobem vlákna eliminují hlavní slabiny nevyztužených cementových

kompozitů, jako jsou křehkost a pevnost v tahu za ohybu, a přispívají ke zvýšení bezpečnosti konstrukce [24].

Betony s rozptýlenou výztuží bývají ekonomicky méně výhodnou variantou oproti klasickému železobetonu. Vlákna zatím ani nelze využít jako běžnou náhradu ocelové výztuže do železobetonu, ale lze je vhodně kombinovat s betonářskou výztuží pro vylepšení vlastností finálního kompozitu. Kromě vyšší tahové pevnosti v ohybu vlákna zvyšují odolnost konstrukce i vůči zemětřesení. V minulosti bylo použití betonu vyztuženého vlákny poměrně omezené a uplatnění nacházelo především u průmyslových betonových podlah, nyní se využívá více také u konstrukcí pozemních a dopravních staveb, kde umožňuje výrobu výrazně subtilnějších konstrukcí, než při použití pouze běžné betonářské výztuže.



Obr. 22 Základní dělení kompozitů dle vyztužení se zvýrazněním typu, který byl použit a zkoumán v rámci této práce [2].

Základní rozdělení cementových kompozitů podle typu vláknového vyztužení je znázorněno na Obr. 22. Betony se zabudovanými relativně krátkými, oddělenými a nespojitými vlákny se řadí mezi běžně nejpoužívanější „vláknobetony“. Do UHPFRC se zpravidla přidávají kovová vlákna o délce 12 až 20 mm. Pro experimenty popisované v této práci byla použita krátká (13 mm) ocelová vlákna a byly zkoumány vlastnosti těchto krátkovláknových cementových kompozitů.

Pozornost byla věnována vzájemné poloze vláken, rovnoměrnému rozptýlení a cílené orientaci vláken. Na základě provedených experimentů bylo zjišťováno, zda se vlákna různými vlivy vyrovnávají nebo je jejich orientace nahodilá.

Nejčastěji se ke zlepšení mechanických vlastností používají vlákna ocelová, dále pak skleněná, polymerová, uhlíková a jiná. Zdokonalení vlastností cementových kompozitů vlákny je ovlivněno materiálem použitým pro výrobu vláken, jejich délkou, tvarem a případnou povrchovou úpravou. Pro každý materiál existuje určitá oblast použití. Základní výčet druhů vláken dle materiálu s krátkým popisem je následující [2], [24].

- **Ocelová** vlákna se uplatňují především v průmyslových podlahách a jako doplnění klasické výztuže pozemních a dopravních staveb.
- **Polymerní** (např. polypropylenová, nylonová, polyethylenová) se aplikují jako ochrana proti odstřelování betonu při požáru (dochází k rozpuštění vláken). Vyznačují se také vysokým modulem elasticity.
- **Skleněná** vlákna slouží k zamezení vzniku trhlin a zvýšení pevnosti v tahu za ohybu a rázu. Vyrábějí se ze skelné taveniny ve formě spletených pramenů či samostatných vláken.
- **Uhlíková** (karbonová) jsou elektricky vodivá, mají vysoký modul elasticity a pevnost v tahu. Tlumí vibrace a jsou velmi odolná proti mechanickému, tepelnému a chemickému namáhání. Nevýhodou je jejich vysoká cena.
- **Aramidová** vlákna jsou textilie z polyamidů. Vyznačují se absolutní nehořlavostí, vysokým modulem elasticity a pevností v tahu. Nevýhodou je opět vysoká cena.
- **Celulózová** vlákna mají vysokou pevnost v tahu a slouží jako náhrada azbestových vláken.
- **Azbestová** se vyznačují vysokou pevností s vysokou korozní a abrazní odolností. Ze zdravotních důvodů se již nepoužívají.

Ocelová, alkalickovzdorná skleněná, uhlíková (a dříve i azbestová) vlákna se vyznačují vysokou pevností, ohybovou tuhostí a vysokou hodnotou modulu pružnosti. Zlepšují pevnost ztvrdlého betonu v tahu (přibližně o 50 až 100 %) a částečně i pevnost v tlaku (přibližně o 10 %), a tím omezují nebo zabraňují vzniku trhlin. Tato vlákna také snižují riziko křehkého lomu ztvrdlého betonu, a tudíž zvyšují odolnost při dynamickém zatížení. Organická vlákna přírodní (např. celulózová, ale i juta a kokosové vlákno) nebo syntetická (nejčastěji polypropylenová) vykazují obvykle malou mechanickou pevnost a nízký modul pružnosti, na druhou stranu ale efektivně zvyšují odolnost tuhnutí betonu proti vzniku a šíření smršťovacích trhlin [24], [42].

Do směsí UHPC se z důvodů zvýšení pevnosti v tahu přidávají kovová nebo polymerní vlákna v minimálním objemovém zastoupení 1 %. Do běžných vláknobetonů se přidává obvykle množství 0,1 až 3 % kovových vláken v celkovém objemu. Použití vláken nad 4 % není příliš časté a z hlediska zpracovatelnosti směsi velmi nepraktické.



Zvláštní skupinou jsou vláknobetony s extrémně vysokým obsahem vláken (SIFCON; z anglického *Slurry Infiltrated Fibre Concrete*). V podstatě se jedná o organizované shluky zpravidla ocelových vláken slepené jemnozrnnou cementovou kaší [24]. Tato nová technologie by podle Hameeda a kol. [43] měla získat na důležitosti při opravách a dodatečném posílení poškozených budov. Jejich výzkum si kladl za cíl prozkoumat mechanické vlastnosti SIFCON a jeho roli při zlepšování životnosti normálního betonu. Výsledky ukázaly, že pevnost v ohybu kompozitu SIFCON s 6% obsahem ocelových vláken se zvýšila až na 600 % v porovnání s hodnotami zaznamenanými u referenční směsi bez vláken a o 200 % v porovnání s hodnotami směsi s 1,5 % ocelových vláken. Ve výzkumu Farmana a kol. [44] se dokonce podařilo do směsi vysokopevnostního betonu vmíchat až 10 % ocelových vláken. Podle jejich výsledků se zvyšováním objemu vláken zvyšuje houževnatost, absorpce energie a Poissonova konstanta. Tak vysoký obsah vláken může způsobit, že se beton bude chovat jako plastický materiál.

3.4 Ocelová vlákna

Nejpoužívanější rozptýlenou výztuží přidávanou do malt a cementových kompozitů jsou ocelová vlákna. Vlákna se vmíchávají do jinak kompletní směsi čerstvého betonu v míchačce a po ztvrnutí směsi je výsledným produktem tzv. drátkobeton. Takto vyztužená směs může mít různé užití v praxi. Lze ji použít do prefabrikátů, monolitických betonových konstrukcí a stejně tak i do stříkaných betonů. Ocelová vlákna přidávaná do betonu musí splňovat požadavky normy ČSN EN 14889-1 – Vlákna do betonu [45]. Výběr vhodného typu vláken určuje především účel aplikace.

3.4.1 Rozdělení ocelových vláken

Ocelová vlákna přidávaná do cementových kompozitů s rozptýlenou výztuží se liší způsobem výroby, mechanickými vlastnostmi, tvarem a povrchovou úpravou. Záleží na konkrétním výrobcí, požadavcích zákazníka a plánovanému použití. Ocelová vlákna mohou být tvářena z taveniny nebo oddělována z jiného ocelového produktu. Způsob výroby ovlivňuje chování kompozitního materiálu při zatěžování (mechanickém i teplotním) a celkovou odolnost materiálu. Následující typy ocelových vláken se v souladu s ČSN EN 14889-1 rozlišují podle různých postupů výroby, kterými jsou [24], [45]:

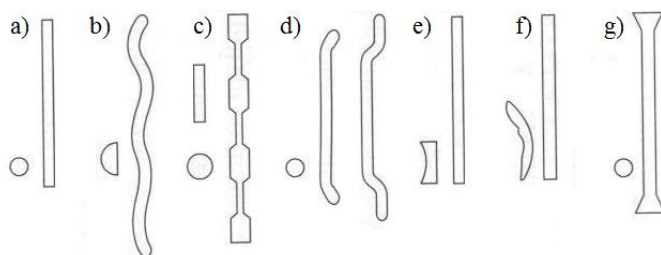
- sekání tenkého hladkého drátu za studena taženého z horké taveniny,
- stříhání z fólie, plechu,
- oddělování z taveniny,
- protahování z drátu taženého za studena,
- frézování z ocelových bloků.

Jednotlivá vlákna lze takto vyrobit do různých tvarů a velikostí s možnou přípustnou odchylkou. Na trhu existuje celá řada tvarových úprav a zakončení. Od různých výrobců jsou k dispozici drátky různých délek (12 až 60 mm) a průřezů. Mezi nepoužívanější patří vlákna přímá (Obr. 23a) a zvlněná (Obr. 23b) nebo s periodickými vtisky (Obr. 23c). Běžná jsou vlákna s kruhovým, čtvercovým, případně obdélníkovým průřezem o průměru nebo délce hrany od 0,4 do 2 mm, ale vyskytují se i vlákna jinak zaobleného nebo mnohoúhelníkového průřezu. Průřez vlákna se také po jeho délce může měnit nebo existují vlákna větvená. Koncovými úpravami bývá ohnutí (jednoduché či dvojnásobné, Obr. 23d), zploštění a rozšíření tvarem komolého kužele (Obr. 23g) nebo podobná úprava silovým účinkem stříhání.

Tvar a velikost doplňuje povrchová úprava vláken, která je chrání v prostředí cementové matrice a zlepšuje soudržnost vláken s okolní směsí. Z hlediska povrchové úpravy mohou být vlákna ze surové oceli (tj. bez povrchové úpravy) nebo, což je častější a trvanlivější varianta, s povrchovou úpravou pocínováním nebo pozinkováním. Uvedená dělení podle tvaru a úpravy vláken nejsou výčetem všeho, co se nachází na trhu. V dnešní době se vlákna vyrábějí téměř v neomezených tvarech a úpravách podle potřeby a žádosti zákazníka.

Zvláštním typem rozptýlené výztuže jsou nerezová kovová vlákna s amorfní strukturou. Jejich výroba vyžaduje prudké zchlazení roztavené chromové oceli bohaté na křemík a fosfor. Jedná se o úzké pásky o délce 5–30 mm, šířce 1–1,5 mm a tloušťce 20–30 μm . Amorfní struktura a vysoký obsah chromu zaručují korozní odolnost. Jsou vhodnou přísadou stříkaných betonů.

Drátky jsou distribuovány volně případně spleené do plochých svazečků a uloženy v pytlicích nebo kartonech po několika kilech [24], [46].



Obr. 23 Nejčastější tvarové úpravy ocelových vláken, a) přímá, b) zahnutá na koncích, c) nepravidelná, d) deformovaná, e) zvlněná, f) leptaná, g) pádlovitá [2].

3.4.2 Vlastnosti a výhody použití ocelových vláken

Vlastnosti cementových kompozitů jsou dány vlastnostmi jednotlivých složek kompozitu, zejména jejich vzájemným spojením a spolupůsobením. Mechanické vlastnosti vlákniny vyztužených betonů závisí nejen na složení cementové matrice, ale především také na vláknech. Konkrétně na jejich množství, průřezu, délce, tvaru a v neposlední řadě také oceli, ze které jsou vyrobeny. Zásadní je rovněž jejich rozptýlení v cementové matrici, duktilita, interakce vláken s cementovou matricí (daná povrchovou úpravou vláken) a samotná orientace vláken. Vlákna jsou



přidávána zejména z důvodu zvýšení tahové pevnosti kompozitu. Důležitou roli hraje pevnost jednotlivých vláken, která je určena volbou oceli a úpravou při výrobě (např. legování). Všechny tyto faktory stanovující výsledné vlastnosti a měly by být známé pro správný návrh a statické posouzení finálních prvků [46].

Vlákna v cementových kompozitech zvyšují tahovou pevnost, pevnost v tahu za ohybu a smykovou pevnost. Zlepšují také houževnatost betonu, zachycují tahové napětí a zabraňují vzniku trhlin, případně je přemostují a zamezují jejich následnému šíření nebo spojování. Trhliny mohou zvyšovat propustnost betonu a tvořit preferenční cestu pro vniknutí vody, plynu a agresivních iontů do betonu [47]. Pevnost v místě první trhliny mírně roste se zvyšujícím se obsahem vláken. Nejvyšší nárůst byl pozorován při vysokém obsahu vláken o délce 50 mm [48].

Vylepšené mechanické vlastnosti vláken poskytují vyzrálému betonu vyšší odolnost při zatížení. Nejvhodnější jsou ocelová vlákna s vysokým modulem pružnosti, která po smíchání s betonem vedou k výrobě materiálu s požadovanými strukturními vlastnostmi. Existují ocele různé kvality a různých pevností (různý modul pružnosti) určené pro výrobu rozptýlené výztuže. K dispozici jsou například ocelové drátky z nízkouhlíkové oceli s pevností 900 až 1350 MPa, ocelové drátky vyrobené z ocelového pásu o pevnosti 500 MPa nebo vlnité ocelové drátky z oceli s pevností 1000 až 1475 MPa. Velmi příznivé jsou mechanické vlastnosti nerezových kovových vláken s amorfni strukturou, kdy vlákna vykazují tahovou pevnost v rozsahu 1400–2300 MPa [24].

Běžná pevnost vláken v tahu se pohybuje od 400 do 1050 MPa, tato vlákna se používají především do FRC, kde zabraňují vzniku významnějších trhlin. Do směsí UHPFRC jsou přidávána obvykle vysokopevnostní vlákna s pevností v tahu přesahující 2000 MPa, která zaručují zvýšení pevnosti v tahu, zabraňují vzniku mikrotrhlin a křehkému lomu [46].

Naleptání a tvarování umožňuje vláknům lépe držet v matrici, protože se zvyšuje vzájemné tření a síla potřebná k vytržení vlákna. Z hlediska soudržnosti je toto řešení přínosné, ale jejich výroba může být nákladnější a zpracování takových vláken do betonu může velmi komplikované, zejména při větším množství. Tendence vláken shlukovat se by totiž komplikovala homogenizaci směsi výrazněji než u přímých vláken a nerovnoměrné rozmíchání vláken by eliminovalo jejich přínos.

Při návrhu a výrobě vláknobetonu je důležité zvolit optimální množství vláken pro dosažení požadovaných vlastností kompozitu. Stejně tak je zásadní odpovídajícím způsobem zvládnout technologii výroby. Vysoká hustota vláken, vyšší než hustota zrn kameniva, může způsobit segregaci vláken a nehomogenitu po zabudování do konstrukce. Homogenitu může ovlivnit i špatný návrh betonu nebo nedodržení technologických zásad. Efekt nakypření kameniva ocelovými vlákny se může projevit zejména při větším maximálním zrnu kameniva, což je u UHPFRC nepravděpodobné. Při návrhu směsi kompozitu je nutno uvážit, že vlákna zhoršují

zpracovatelnost směsi tvorbou shluků (tzv. ježků), snižují tekutost směsi a zhoršují konzistenci [24], [49], [50].

Vhodně upravená ocelová vlákna mohou být dnes i součástí žáruvzdorných betonů, jak uvádí alžírský výzkum [48]. Žáruvzdorné betony obvykle selhávají v důsledku tvorby trhlin, které jsou vyvolané nejprve smrštěním, vysycháním a poté působením tepelných napětí. Ačkoli se ocelová vlákna v žáruvzdorném betonu již používají, je k dispozici velmi málo informací o výběru nejvhodnějšího složení slitiny oceli, geometrii vláken a obsahu vláken pro konkrétní aplikace. Abdelaziz a kol. ve svém výzkumu zkoumali vliv přidávání vláken z patentované odlévatelné slitiny na bázi hlinitanu vápenatého s teplotním zatížením 1400 °C. Výsledky uvádějí, že pokud je zlepšení houževnatosti považováno za dobrý indikátor odolnosti proti odprýskávání žáruvzdorných betonů, nejlepší volbou by měl být průměr v rozmezí od 0,5 mm do 0,6 mm.

3.5 Orientace vláken v kompozitu

V současné době bývají vlákna považována v návrhu vlákniny vyztužených betonů za rovnoměrně rozptýlená a náhodně orientovaná, což ve skutečnosti není přesné, a proto se materiál nemusí vždy chovat jako homogenní. Orientace vláken je však velmi složitý jev. Poloha a orientace vláken jsou ovlivněny mnoha parametry: tvar a velikost vlákna, tvar a velikost použitého bednění, reologické chování a tekutost směsi, způsob lití do bednění a mnoho dalších. Zajištění izotropie takového kompozitu bývá prakticky nemožné. Pokud není známa poloha a orientace vláken, nelze přesně určit výsledné mechanické vlastnosti kompozitu, což je pro vlastní návrh konstrukcí nezbytnost.

Kromě zmíněných mechanických vlivů, jako je geometrie vláken či bednění nebo tok směsi, lze ovlivňovat orientaci vláken vibracemi [51] nebo smykem. Martinie a Roussel [52] tvrdí, že orientace vláken smykem (stříhem) je v časovém měřítku typického procesu ukládání téměř okamžitá. Dále zdůrazňují skutečnost, že smykem vyvolaná orientace je mnohem výraznější v případě tekutých materiálů, jako jsou samozhutnitelné betony. Dalším způsobem, jak upravovat orientaci ocelových vláken, je vnějšími vlivy, např. pomocí magnetického pole [53], [54].

Autoři některých výzkumů tvrdí, že viskozita má vliv na rozmístění vláken, ale neovlivňuje jejich orientaci. Orientace je údajně ovlivněna mezi kluzu, kdy při nižší mezi kluzu lze orientovat snadněji [55], [56]. Experimentální výsledky kanadského výzkumu určovaly příznivou, průměrnou a nepříznivou orientaci vláken na pevnost v tahu. O pozitivním vlivu orientace vláken ve směru hlavního tahového napětí na tahovou pevnost není pochyb. Výzkumem trhlin bylo navíc zjištěno, že pro vysokohodnotné betony má orientace vláken významnější dopad na omezení propustnosti vody než na mechanické chování [47].

Při výrobě vlákniny vyztuženého kompozitu je podstatné prvotní určení, zda je záměrem výroby dosažení homogenních vlastností vlákniny vyztuženého kompozitu, což je prakticky



nemožný úkol, nebo je to snaha docílit umístění vláken do směru hlavního tahového napětí výsledného prvku. Od toho se odvíjí volba vláken, receptura směsi, směr a způsob ukládání směsi a další možné úpravy v závislosti na velikosti bednění nebo místu betonáže. Všechny zmíněné parametry spolu úzce souvisí.

3.5.1 Faktor orientace

Faktor orientace α je pravděpodobnost, že vlákno bude procházet daným úsekem. Získává se z počtu vláken procházejících jednotkovou plochou n_f a celkového počtu vláken na jednotku objemu podle rovnice (11). Faktor orientace vychází z předpokladu, že koncentrace vláken v celém prvku je homogenní a počet vláken na jednotku objemu je poměrem mezi plochou průřezu vlákna A_f a objemovým podílem vláken V_f . Udává počet vláken, která procházejí oblastí trhliny, a vypovídá o chování betonu po vzniku trhliny. V reálném kompozitu se složitě kontroluje a je obtížné ho předvídat [57], [58].

Podle definice je faktor $\alpha = 1$ v případě, že orientace všech vláken je kolmá na rovinu řezu, tj. všechna vlákna prochází skrz něj. Pokud je $\alpha = 0$, vlákna jsou orientována rovnoběžně s řezem, zkoumaným řezem tudíž neprochází žádná vlákna. Pro jakkoli jinak natočená vlákna je hodnota faktoru orientace mezi 0 a 1. Materiál lze považovat za izotropní, když je hodnota $\alpha = 0,5$ [52], [54], [59]. Výpočet pro stanovení faktoru orientace vláken vycházející z počtu vláken na jednotku plochy zarovnaných v určitém směru (zpravidla ve směru tahu) je [57]:

$$\alpha_i = n_f \cdot \frac{A_f}{V_f}, \quad (11)$$

kde α_i je faktor orientace vláken ve směru i , n_f je počet vláken procházejících rovinou porušení (řez, trhlina), V_f je objemový podíl vláken ve směsi (UHP)FRC a A_f plocha průřezu vlákna.

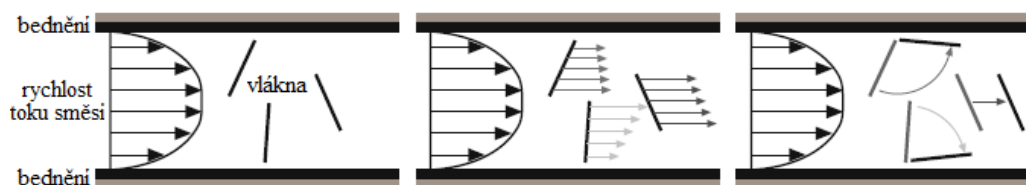
Maximální účinnosti proti vytažení dosahují vlákna při orientaci ve směru působení hlavního napětí. Tato účinnost je z praktického hlediska uvažována v toleranci až do vychýlení o 30 °. Do této hodnoty účinnost klesá mírně, od této hodnoty už klesá výrazně [52].

3.5.2 Vliv toku směsi

Tok je závislý především na reologickém chování materiálu, dále na způsobu lití, geometrii prvku a tzv. efektu stěn [52], [60]. Čerstvá cementová pasta, se chová jako Binghamova kapalina se znaky tixotropního chování. Jinými slovy, při překročení limitní hodnoty napětí (mez kluzu, podle různých autorů také mez deformace nebo mez toku) začíná téci. Na povrchu, kde je menší smykové napětí, může docházet k orientaci vláken kolmo na směr toku, uvnitř proudu směsi bude jejich orientace spíše ve směru toku [52], [61].

Při experimentu s bedněním ve tvaru pravoúhlého písmene „U“ [51] bylo bednění plněno směsí SCC s 3 % vláken dlouhých 30 mm pouze jedním otvorem (jednou „nohou“). Tak bylo docíleno všech základních způsobů vyplnění prostoru bednění. Z atypického vzorku byly následně odřezáním vytvořeny 3 hranoly (bez rohových částí pravoúhlého „U“). Orientace vláken byla sledována prostřednictvím provedených rentgenů a hranoly byly poté zkoušeny na ohybovou pevnost. Poznatky výzkumu zahrnují fakt, že vlákna se orientovala ve směru toku směsi. Ve vodorovných prvcích byla vlákna více vyrovnána ve směru toku, rovnoběžně se dnem, vlákna ve svislých prvcích by se dala považovat spíše za všesměrně orientovaná. Dále bylo zjištěno, že se zvyšující se rychlostí toku, se vlákna ochotněji vyrovnávala.

Tok směsi je schematicky zobrazen na Obr. 24. Uprostřed mezi stěnami, kde je vzdálenost od obou stěn maximální, dosahuje tok směsi nejvyšší rychlosti. Ohybová pevnost roste s rostoucí tekutostí, jelikož dochází k rovnoměrnější orientaci vláken ve směru toku. Shlukování vláken v místech tahového napětí může vést k vyšší ohybové pevnosti, obecně je shlukování však považováno za nežádoucí jev.



Obr. 24 Reorientace vláken rotací a posunem způsobená prouděním toku směsi a ovlivněná stěnami [51].

Někteří autoři využívají ke sledování skutečné polohy vláken různé druhy transparentních viskózních kapalin a simulují tak chování čerstvé cementové směsi [55], [62]. Obr. 25 zobrazuje transparentní model pro vizualizaci toku betonu obsahujícího 3 % PVA (polyvinylalkoholových) vláken o průměru 0,66 mm a délce 15 mm. Vlákna v jednolitě uloženém rozlivu směsi měla tendenci vytvářet soustředné kruhy a disperze vláken byla hodnocena jako uspokojivá. Tento efekt je dále pozorován a potvrzen při experimentech v kapitole 5.1.2.



Obr. 25 Vizualizace toku betonu s vlákny v jednolitě uloženém rozlivu [62].

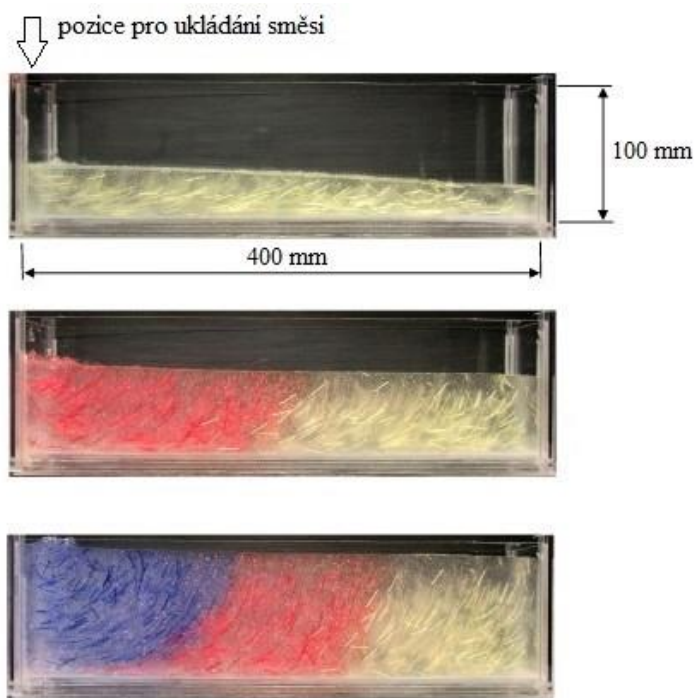
Při tekutější konzistenci by mohla hrát výraznější roli vztlková a gravitační síla a orientovat vlákno do roviny rovnoběžné se dnem bednění. Naopak vysoce viskózní směsi, které jsou obtížně tekuté, by mohl snadno ovlivnit způsob ukládání. Tyto účinky se zjevně týkají zejména vláken nižších hmotností, nicméně u ocelových vláken lze předpokládat podobné chování jako u PVA vláken na Obr. 25, Obr. 26 a Obr. 27 [62]. Experiment byl autory opakován i s obarvenými PVA vlákny (Obr. 28) a vliv směru lití na uspořádání vláken ve směsi byl názorně předveden ukládáním ze strany [63].



Obr. 26 Orientace PVA vláken v transparentní směsi pohyblivým naplňováním formy [62].



Obr. 27 Orientace PVA vláken v transparentní směsi ukládané do formy z pravé strany [62].

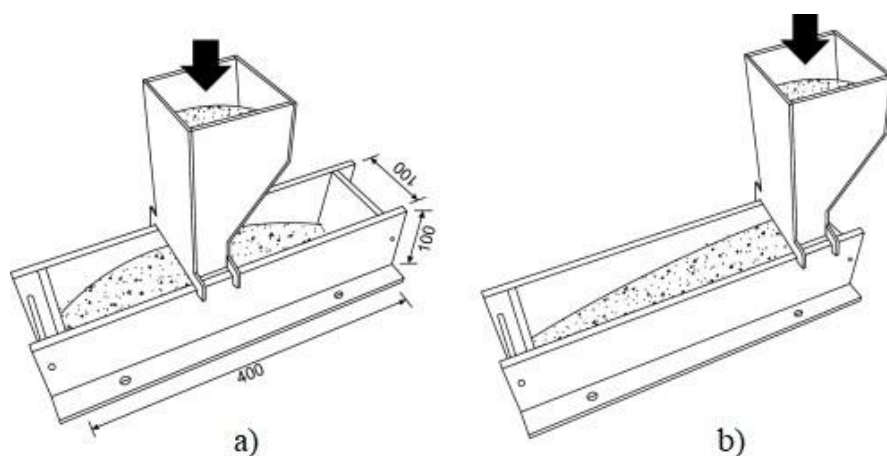


Obr. 28 Zvýrazněná orientace pomocí obarvených PVA vláken při ukládání ze strany [63].

Podobným experimentem se zabývali i další autoři [64], když různými způsoby umísťovali směs UHPFRC s různě dlouhými vlákny ($L_f = 13, 16,3, 19,5$ a 30 mm) do kvádrového bednění. Ukládání směsi probíhalo staticky do jednoho místa, buď do středu bednění, nebo k jeho okraji (viz Obr. 29).

Zjistili, že zvýšením délky vlákna bylo dosaženo vyšší ohybové pevnosti výsledného vzorku, kratší délka vláken zase vykazovala lepší orientaci a disperzi při vyšším počtu vláken v jednotkové ploše. Ukládání směsi ovlivňuje distribuci vláken. Lepší hodnoty pevnosti v ohybu

a rozmístění vláken byly získány pro vzorek s betonem uloženým v oblasti největšího momentu (Obr. 29a). Ferrara a kol. [65] naměřili pomocí nedestruktivní magnetické metody největší koncentraci vláken v místě ukládání.

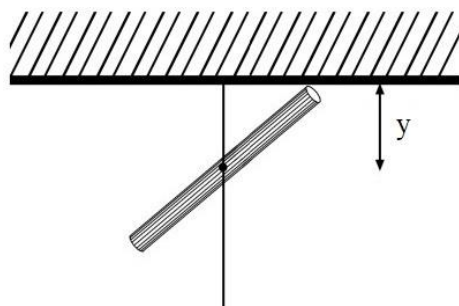


Obr. 29 Dvě různé metody ukládání betonové směsi: do středu (a) a do rohu (b) bednění.

3.5.3 Efekt stěn bednění a vliv geometrie vlákna

Geometrie vlákna je nejvíce zohledňována ve spojitosti s efektem stěn v místech, kde nedochází k vlivu tokem směsi nebo způsobem ukládání. Teoretické úvahy většinou uvažují geometrii přímého vlákna. Z praktického hlediska může být vmíchávání vláken se složitějšími tvarovými úpravami do směsi betonu velmi komplikované, zejména při jejich větším množství. Rovnoměrné rozmíchání vláken a zajištění homogenity takové směsi bude složitějším úkolem než při přidavku vláken přímých. Pravděpodobnost proplétání a shlukování vláken bude větší u složitějších tvarů, ostatní vlivy na orientaci jednotlivých vláken by pak mohly být potlačeny nebo úplně omezeny.

Efekt stěn velice úzce souvisí s tokem směsi a velikostí bednění. Orientace vláken ve směsi závisí jak na reologickém chování materiálu, tak na geometrii litého prvku a na procesu lití. Spolupůsobením toku směsi způsobeného vnějšími silami s povrchem bednění vzniká tření, které ovlivňuje rychlost tečení po šířce profilu. *Wall effect* neboli efekt stěn je založen na tvrzení, že je nemožné, aby se vlákno nacházelo v kolmé pozici v blízkosti stěny bednění do vzdálenosti poloviny jeho délky, jak je vidět na Obr. 30.

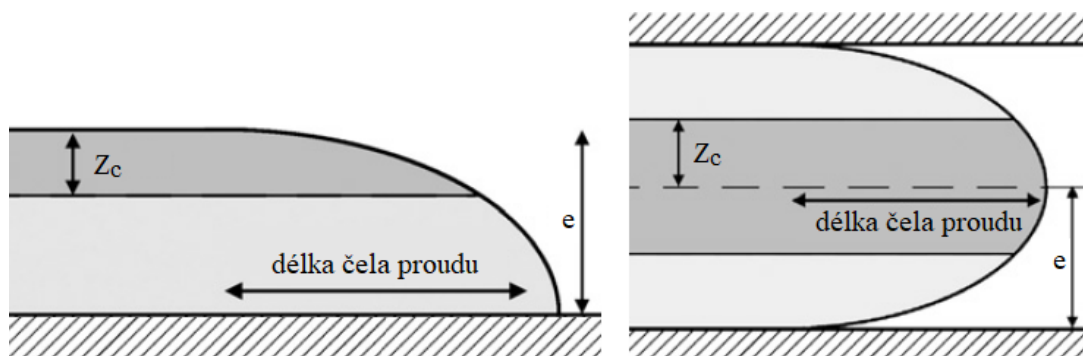


Obr. 30 Efekt stěn (*wall effect*) pro vlákno délky L_f ve vzdálenosti stěny $y < L_f/2$ [52].



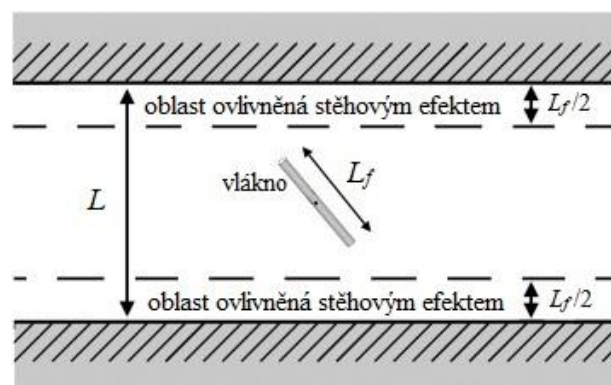
Podle Martinie a Roussela [52] je možné v důsledku efektu stěn odhadnout průměrný faktor orientace α_w pro lití stěnových prvků (tj. tok omezený mezi dvěma hraničními povrchy bednění) a α_s pro ukládání deskových prvků (tj. tok s volným povrchem bednění). Předpokladem je, že volná plocha nevytváří žádný efekt stěny. Obě kategorie zahrnují délku vlákna L_f . K popisu toku betonové směsi je dále zavedena veličina e , která udává výšku tekoucí směsi, pokud se jedná o ukládání s volným povrchem, nebo polovinu vzdálenosti mezi stěnami. Veličina z_c odpovídá části proudu, kde není dosaženo meze toku. Praktické znázornění uvedených veličin je na Obr. 31. Pokud je vzdálenost $z_c < e$, pak je betonová směs schopna téci. Vzorec pro přibližné určení faktoru orientace pro tok mezi stěnami a tok s volným povrchem je následující:

$$\alpha_w = \alpha_s = \frac{1}{2} + \frac{L_f}{20e}. \quad (12)$$



Obr. 31 Dvě kategorie toku z průmyslové praxe: tok s volným povrchem pro lití deskových prvků (vlevo), ohraničený tok pro lití stěnových prvků (vpravo) [52].

Faktor orientace v zóně s vlivem *wall effectu* o šířce poloviny délky vlákna je považovaný za $\alpha = 0,6$ a faktor orientace v ostatních oblastech za izotropní $\alpha = 0,5$ (podle Obr. 32). Délka vláken ve stavebnictví je řádově v desítkách milimetrů a rozměry běžných konstrukcí v řádech alespoň několika desítek centimetrů. Očekává se proto, že odchylky v průměrném faktoru orientace způsobené efektem stěn budou omezeny na pár procent.

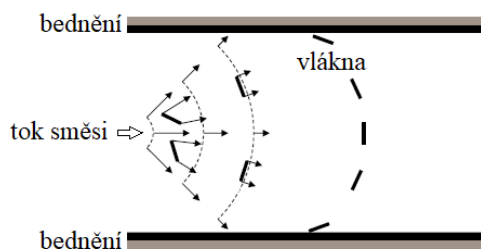


Obr. 32 Efekt stěn pro vlákno délky L_f v konstrukčním prvku šířky L , kde šířka zóny ovlivněné efektem stěny je $L_f/2$ [52].

Ačkoli se nezdá, že by efekt stěn příliš ovlivňoval průměrné vlastnosti průřezu, je třeba brát v potaz, že v blízkosti stěn jsou tyto variace lokálně silnější a že tyto zóny jsou rozhodující pro mechanické chování materiálu z hlediska tvorby trhlin. U tenkých UHPFRC konstrukcí může efekt stěn zapříčinit změnu faktoru orientace až o 10 %. Pokud nedochází k orientaci vláken vlivem toku, vliv stěn bednění je závislý pouze na délce vlákna a geometrii celého bednění [52], [66]. Stěnový efekt v blízkosti dna bednění v pravděpodobném spojení s gravitační přitažlivostí vytváří na spodní straně vzorků (zpravidla deskových prvků) vrstvu s větší koncentrací vláken [67].

3.5.4 Vliv tloušťky vrstvy

Ukládání betonové směsi lze v zásadě rozdělit do dvou kategorií: lití s volným povrchem (např. stropní desky) a lití mezi dvěma povrchy (např. stěny). U vodorovných betonových prvků, kde je jejich šířka mnohonásobně větší než délka vlákna, je mezi hranicemi bednění velký prostor, který není ovlivněn stěnami. Vlákna se v těchto vodorovných prvcích orientují podle schématu na Obr. 33. Malá tloušťka vrstvy vzhledem k délce vlákna může navíc vyvolat vyrovnávání vláken převážně do vodorovné roviny. Naopak u tenkých stěnových prvků, kde je v jednotlivých místech proudění větší rozdíl mezi rychlostmi z důvodu vlivu stěn bednění, se vlákna orientují podle schématu na Obr. 24 [63].



Obr. 33 Schéma orientace vláken vlivem toku bez efektu stěn [63].

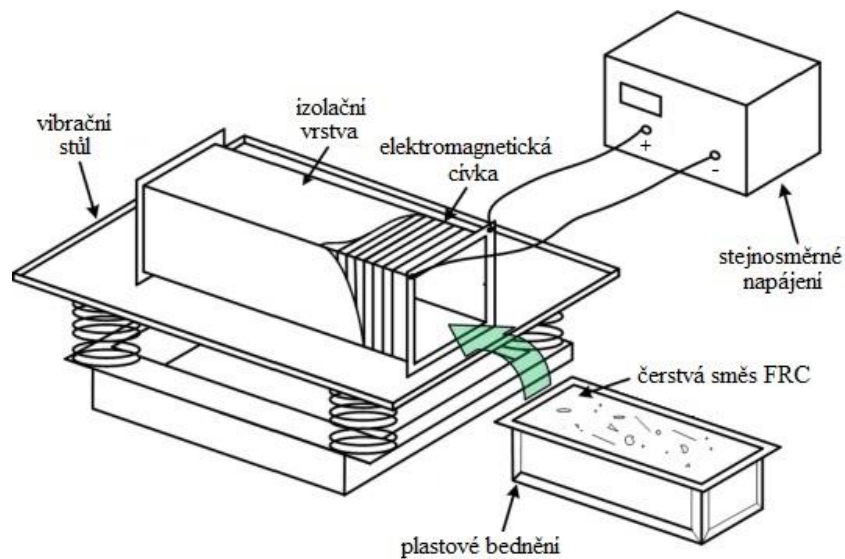
Při vhodné volbě délky vláken a tloušťky betonované vrstvy lze docílit vyrovnání vláken převážně v rovině této vrstvy. Mechanické vlastnosti samotné vrstvy nebudou nijak významné, ale aplikováním více vrstev na sebe a zachováním jejich spolupůsobení je možné zvýšit tahovou pevnost kompozitu.

Tento efekt je v současné době s výhodou využíván při betonáži přímo na stavbě [57]. Jedná se o velmi účinnou výztužnou techniku pro již existující železobetonové desky. Tenká vrstva UHPFRC slouží jako přídavná tahová výztuž pro železobetonovou desku a spolu vytváří složený prvek. Při analýze chování kompozitních prvků je třeba zohlednit vliv orientace vláken na tahovou odezvu v rovině vrstvy UHPFRC. Vrstva UHPFRC zvyšuje tuhost desky, poskytuje přidanou smykovou odolnost, zabraňuje vzniku trhlin a omezuje šíření existujících.

Možné využití lze spatřit také při úplné robotizaci 3D tiskem betonových konstrukcí, které jsou také budovány po vrstvách [68]. Vrstvení 3D tiskem je zatím typické pro beton bez vláken (UHPC) [23], ale do budoucna lze předpokládat inovace, kde se uplatní různé typy vláken. Při současném ukládání betonu 3D tiskem, však tato technologie zatím nijak nezahrnuje spolupůsobení vláken mezi jednotlivými vrstvami.

3.5.5 Vliv magnetického pole

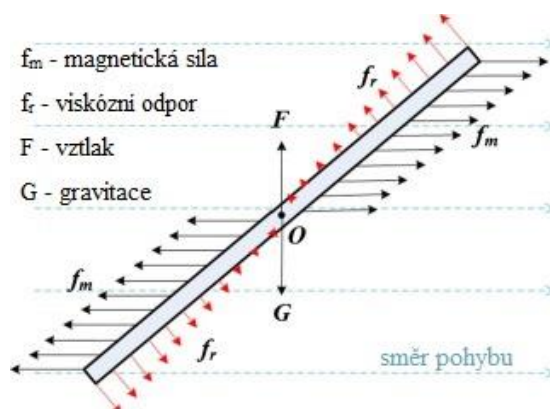
Makroskopicky je na vláknobeton pohlíženo jako na homogenní a izotropní materiál. Vzhledem k náhodné nebo těžko zjistitelné orientaci vláken v cementových kompozitech lze jen těžko s jistotou tvrdit, zda má opravdu izotropní a homogenní vlastnosti. Na rozdíl od železobetonu nebo betonu s předpjatou výztuží, která zůstává na svém místě, nejistota vychází z technologicky netransparentní výroby vláknobetonu, kde je velmi problematické kontrolovat dosažení předem zadaného rovnoměrného rozmístění vláken. Při úspěšném provedení úplného vyrovnání vláken záměrně do jednoho směru pomocí magnetického pole by se dalo hovořit dokonce o ortotropním materiálu.



Obr. 34 Experimentální zařízení pro vyrovnání ocelových vláken v betonu s rovnoměrným magnetickým polem [54].

Kompozitní UHPFRC se ve stavebnictví stále více využívá. Vzhledem k tomu, že mechanické chování materiálu a odolnost konstrukčních prvků může významně záviset na disperzi a orientaci vláken, byl s ohledem na tahová napětí navržen podrobný přístup k vyrovnávání ocelových vláken v cementové směsi pomocí magnetického pole [54], [69]. Jedná se o dodatečné ovlivnění vzorků okamžitě po nalití směsi do bednění, dokud je směs tekutá a umožňuje pohyb vláken uvnitř matrice. Pro vyrovnání ocelových vláken je nezbytná správně navržená magnetická indukce magnetického pole a zpracovatelnost čerstvé cementové směsi. Zařízení pro experimentální testování orientace sestavené čínskými vědci je schematicky

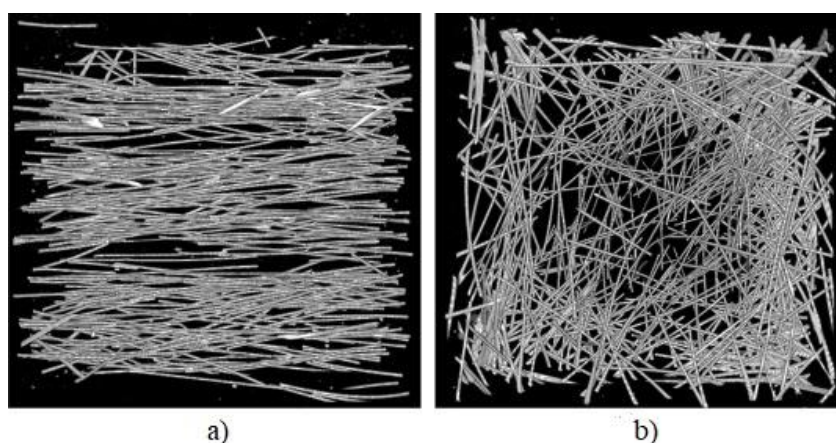
znázorněno na Obr. 34. V jejich experimentu byly testovány vzorky o rozměrech 100×100×400 mm. Na Obr. 35 jsou znázorněny síly, které na vlákna působí během procesu orientování magnetickým polem [54].



Obr. 35 Síly působící na ocelové vlákno v čerstvém betonu při rovnání magnetickým polem [54].

Výsledky rentgenového testu prostřednictvím výpočetní tomografie (CT; z anglického *Computer Tomography*) ukázaly, že ocelová vlákna ve vytvrzené maltě byla vysoce vyrovnaná (Obr. 36a). Na nezorientovaném snímku vpravo (Obr. 36b) lze navíc v pravé části vzorku zřetelně rozpoznat větší koncentraci vláken. Tato strana byla pravděpodobně umístěna při výrobě vzorku u dna bednění.

Prostřednictvím obrazové analýzy (*image analysis*) byl stanoven faktor úspěšné orientace vláken magneticky orientovaných vzorků na 0,9, což je mnohem vyšší hodnota než 0,50 pro vzorky neorientované.



Obr. 36 Uspořádání ocelových vláken v zorientovaném (a) a nezorientovaném (b) vzorku z testu rentgenovým CT [54].

Zkouška čtyřbodovým ohybem potvrdila efektivnost magnetické orientace, část porušeného vzorku s vyčnívajícími vyrovnanými vlákny je vidět na Obr. 37. Pevnost v ohybu FRC s vyrovnanými vlákny, vodním součinitelem 0,36 a objemovými podíly vláken 0,8 %, 1,2 % a 2,0 % se ve srovnání s FRC s neorientovanými vlákny zvýšila o 46,2 %, 89,6 % a 145,6 %



v uvedeném pořadí. V případě FRC s vyrovnanými vlákny, stejnými objemovými podíly vláken (0,8 %, 1,2 % a 2,0 %) ale s vodním součinitelem 0,32 se pevnost v ohybu zvýšila o 100 %, 167 % a 152 %, opět ve srovnání s FRC s neorientovanými vlákny. Nejlepších testovaných výsledků tedy dosáhly vzorky s 1,2 % vláken a vodním součinitelem 0,32. Pokud by se dalo vyvodit nějaký obecný trend, vyšších pevností dosahují vzorky s nižším vodním součinitelem a obsahem vláken do 2 % objemu, případně s vyšším procentem vláken i vyšší hodnotou vodního součinitele [54]. Větší množství vláken je technologicky zpracovatelnější a magneticky orientovatelnější ve směsi s tekutější konzistencí.

Faktor orientace vláken pro vzorky SCC s magneticky vyrovnanými vlákny se pohyboval mezi 0,80 a 0,95, zatímco u běžných UHPFRC vzorků s náhodně rozptýlenými vlákny byl v rozmezí 0,3–0,5. Výsledky zkoušek ukázaly, že ve srovnání s neorientovanou směsí se pevnost v tahu a pevnost v ohybu cementové směsi se zorientovanými vlákny zvyšuje o 40 až 100 % [54], [70].



Obr. 37 Orientace vláken v prasklé části vzorku [54].



II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



4 Materiálové vlastnosti

Pro návrh směsi i výsledného stavebního prvku je důležité znát vstupní a konečné vlastnosti použitého materiálu. Vlastnosti vlákny vyztuženého cementového kompozitu jsou dány složením cementové matrice stejně jako vhodným výběrem vláken a jejich uspořádáním.

Viskozita a tixotropie cementové směsi UHPFRC mají významný vliv na orientaci vláken, zejména v důsledku změn chování při působení vnějších sil. Hodnoty viskozity pro vysokohodnotné betony se pohybují od 68 Pa·s do 530 Pa·s [15]. U méně viskózních betonů jsou vlákna orientovaná snadněji než u betonů s vyšší viskozitou. Pokud není viskozita dostatečná, může dojít k segregaci jednotlivých složek směsi [51].

4.1 Složení betonové směsi

Pro zvolené experimenty byl použit ultra-vysokohodnotný beton vyztužený rozptýlenými vlákny (UHPFRC). V případě zkoušky rozlití na střešacím stolku a pro měření viskozity pomocí rotačního viskozimetru byla použita čerstvá směs UHPC, tedy tentýž ultra-vysokohodnotný beton bez vláken. Jednalo se o již dříve navrženou a vyvinutou recepturu Experimentálního centra ČVUT v Praze [71]. Dle této odzkoušené receptury byly postupně na laboratorních vahách naváženy jednotlivé suroviny. Výsledná vytvořená směs UHPFRC sestávala z portlandského cementu, kameniva v podobě jemných křemičitých písků ve frakcích 0,1–0,6 mm a 0,3–0,8 mm, křemičitého úletu (amorfní mikrosilika), mleté křemičité moučky se střední velikostí zrna 6 μm , superplastifikátorů a vody (podrobněji viz Tab. 1). Poměr vody a cementu byl stanoven na hodnotu 0,29.

Pro funkci rozptýlené výztuže byla použita ocelová vysokopevnostní mikrovlákná přímého tvaru a kruhového průřezu o průměru $d = 0,19$ mm a délce $L_f = 13$ mm (viz Obr. 38). Vlákná jsou vyrobena ze za studena taženého drátu s mosazným povrchem. Tahová pevnost pro tato vlákna je 2400 MPa. Dávkování mikrovláken do směsi probíhalo objemovým zastoupením 1,5 % vláken do směsi UHPC, která se takto změnila v UHPFRC.

Tab. 1 Složení směsi UHPC použité k výrobě vzorků v následujících experimentech. Množství jednotlivých složek je vyjádřené v hmotnostních podílech vzhledem k pojivové složce.

Složky směsi UHPFRC	Hmotnostní poměr složek
Cement CEM I 52,5 R	1
Kamenivo ST06/12	0,4
Kamenivo ST03/08	0,8
Kamenivo ST01/06	0,4
Křemičitý úlet (mikrosilika)	0,1
Křemičitá moučka	0,25
Voda	0,29
Plastifikační přísada	0,01
Odpěňovací přísada	0,001

Jednotlivé složky byly naváženy a ke smíchání odvážených surovin bylo použito míchací zařízení jemnozrnných směsí SPAR SP-200 (Obr. 39), pro výrobu menšího množství směsi, nebo cyklonová míchačka M125 (míchačka s nuceným oběhem, Obr. 40), k výrobě většího množství směsi. Oba tyto přístroje odpovídají normovým požadavkům.



Obr. 38 Vysokopevnostní ocelová mikrovlákná.

Nejprve byla do navlhčeného míchacího zařízení dávkována suchá směs. Nejjemnější a nejhrubší frakce plniva – mikrosilika a hrubší kamenivo byly do míchačky přidány jako první. Poté byla přidána křemičitá moučka a jemnější frakce kameniva, následně cement. Suchá směs byla míchána po dobu tří až pěti minut, aby bylo docíleno dobré homogenity směsi. Za stálého míchání byly do suché směsi přilévány kapalné složky – záměsová voda s plastifikátory. Jako záměsová voda byla použita běžná voda z vodovodní sítě v laboratořích ČVUT v Praze. Směs byla míchána dalších pět až sedm minut, aby došlo k aktivaci superplastifikátorů. Potom bylo zařízení pozastaveno a směs ručně promíchána pomocí zednické lžice z důvodu odstranění případných nehomogenit a nepromíchaných složek, které mohly zůstat usazené u dna nebo na stěnách nádoby. Po manuálním promíchání byla směs ještě mechanicky domíchána v přístroji.



V této fázi byla čerstvá cementová směs UHPC kompletní. Pokud byla směs určena k měření reologických vlastností, byly provedeny potřebné zkoušky, dokud byla směs tekutá. Jestliže měla směs sloužit k výrobě UHPFRC vzorků, scházelo ještě přisypání ocelových vláken. Ta byla vysypávána posupně a rovnoměrně, aby se ve směsi netvořily shluky drátků. Po přidavku vláken a opětovném promíchání, kdy bylo docíleno potřebné homogenizace, byla směs uložena do forem.



Obr. 39 Univerzální robotický míchač jemnozrnných směsí [72].



Obr. 40 Cyklonová míchačka s nuceným oběhem [73].

Pro usnadnění výroby a přesné dodržení předepsaného dávkování jednotlivých složek byla navržena směs později vyráběna i prefabrikovaně. Suchá směs UHPC byla dodávána předem namíchaná v pytlích o hmotnosti 12 kg. Jednalo se o směs cementu, mikrosilik, kameniva i přísad. Po úvodním promíchání suché směsi byla přidána větší část vody a postupně přisypávána ocelová vlákna, aby nedocházelo k tvorbě shluků vláken. Poté byl přidán zbytek záměsové vody. K promíchání jednotlivých složek směsi docházelo ve velmi krátkém čase, čímž bylo dosaženo vysoké kvality výsledné směsi. Hotová směs mohla být umístěna do připravených forem.

Formy byly plněny postupně a uvnitř byly vystříkané nepatrnou vrstvou oleje pro usnadnění odbedňování. Po naplnění většiny směsi následovalo patnáctivteřinové zhutňování vibrováním na vibračním stole, aby došlo k dokonalejšímu vyplnění prostoru formy a odstranění vzduchových bublinek. Následně byla doplněna zbylá výška formy. Hutnění probíhalo při vypnutých stabilizačních magnetech, aby jejich vlivem nedocházelo k přemísťování a reorientaci vláken. Formy byly překryty PE fólií a po následujících 24 hodin ošetřovány a poté odbedněny. Odbedněné vzorky byly vloženy do vodní lázně, kde zrály dalších 28 dní, než byly podrobeny mechanickým zkouškám [50]. Ošetřování proběhlo v souladu s normou ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba o ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti.

4.2 Sonogel

Na základě hledání vhodného materiálu, který by mohl účinně a opakovatelně nahradit finančně nákladné rentgenové experimenty, byl vybrán sonografický gel (sonogel). Poznatky o viskozitě a zjištěné vlastnosti zkoumaných materiálů z předchozích kapitol a také experimenty z kapitol následujících byly následně použity jako vstupní parametry k vytvoření hmoty podobné konzistence, jakou má čerstvý beton. Tento materiál použitý pro účely provedených experimentů je průhledný a bez zápachu a je vyroben čistě na vodní bázi. Jelikož je sonogel na vodě založená viskózní gelová látka, je rozpustný ve vodě a vodou ředitelný, je nehořlavý a za normálních podmínek stabilní. Není vhodné vystavovat jej vysokým teplotám nad 50 °C, nízkým pod -4 °C a přímému slunečnímu záření nebo UV zdrojům. Doporučené skladování je při pokojové teplotě a na tmavém místě. Materiál se běžně používá pro lékařské účely, je zdravotně nezávadný a nedráždí pokožku.

Výrobce sonogelu uvádí hodnotu viskozity v rozmezí 60 až 80 Pa·s (při 25 °C a použití *Brookfield viskozimetr LVF*) a potvrzuje tixotropii materiálu, tudíž bylo možné přistoupit k úpravě konzistence sonogelu, aby odpovídala konzistenci cementové matrice [74].

Všechny zmíněné vlastnosti, v čele s hodnotami viskozity a bezbarvou strukturou složení, dělají ze sonogelu ideální materiál k demonstraci uložení vláken. Finální ředění sonogelu s vodou bylo určeno na základě zkoušky na střešacím stolku a pomocí měření viskozity na rotačním viskozimetru, obě zkoušky jsou popsány dále v kapitole 4.3.

Směs sonogelu s odpovídajícím množstvím ocelových vláken, rovněž v objemovém zastoupení 1,5 %, byla smísena v univerzálním robotickém míchači (Obr. 39). V souvislosti s návrhem a výrobou sonogelové průhledné směsi, bylo zhotoveno i průhledné plastové bednění.

4.3 Experimentální měření konzistence a viskozity

Průzkum z roku 1996 tvrdí, že žádné testování není schopné stanovit plastickou viskozitu čerstvého betonu, i když v moderních betonech má tento parametr rostoucí význam. Pro vysokopevnostní betony se často zavádí kritický parametr, který kontroluje čerpatelnost a obtížnost dokončovacích prací [75].

Zjišťování viskozity a tokových křivek neneutonských kapalin není snadná úloha. Z mnoha vyráběných přístrojů jsou pro měření neneutonských kapalin vhodné pouze ty, kde je geometrie toku přesně a jednoznačně definovaná a u nichž lze určit hodnotu gradientu rychlosti a jemu odpovídající tečné napětí. Je tedy nutné, aby bylo možné měřit laminární proudění, přímo odečítat hodnoty tečného napětí s odpovídající rychlostí tečné deformace a mít definovanou geometrii toku. Takovým podmínkám vyhovují viskozimetry kapilární, po které platí Poiseuillův zákon, a rotační, kde platí Couettovo proudění. V případě cementových kompozitů kapilární



viskozimetry nepřípadají v úvahu z důvodu velmi husté konzistence betonové směsi a obsahu jemného kameniva. Nevhodné jsou i přístroje založené na Stokesově zákoně (přístroje s padajícím tělískem) a ty, kde se viskozita měří podle doby vytékání kapaliny otvorem.

Bohužel také u rotačních viskozimetrů, které jsou nejhodnější k nalezení tokových křivek a změření viskozity neneutonských kapalin, se někdy objevují problémy, co se týče suspenzí, a pro nestabilní suspenze je obecně nelze použít. Další potíže způsobuje nehomogenita měřeného vzorku, jejíž příčinou může být sedimentace pevných částic, a komplikace mohou nastávat také při odštěďování částic suspenze. Měření, kde dochází k některým z nežádoucích jevů, se považují za neplatná [5].

Přesto rotační viskozimetry nejlépe vyhovují našim požadavkům k měření viskozity, provedená měření jsou okomentována níže. Nejprve byla provedena zkouška rozlití na střešacím stolku za účelem úpravy konzistence sonografického gelu podle odpovídající konzistence cementové matrice a poté měření viskozity [76]. Na oba tyto experimenty byly použity směsi bez vláken (UHPC a vodný roztok sonogelu). Oproti tomu mechanické zatěžování bylo samozřejmě provedeno na trácích z kompletní směsi UHPFRC a podobně na simulaci ukládání do bednění byla použita směs sonogelu s vmíchanými ocelovými vlákny.

4.3.1 Střešací stolek

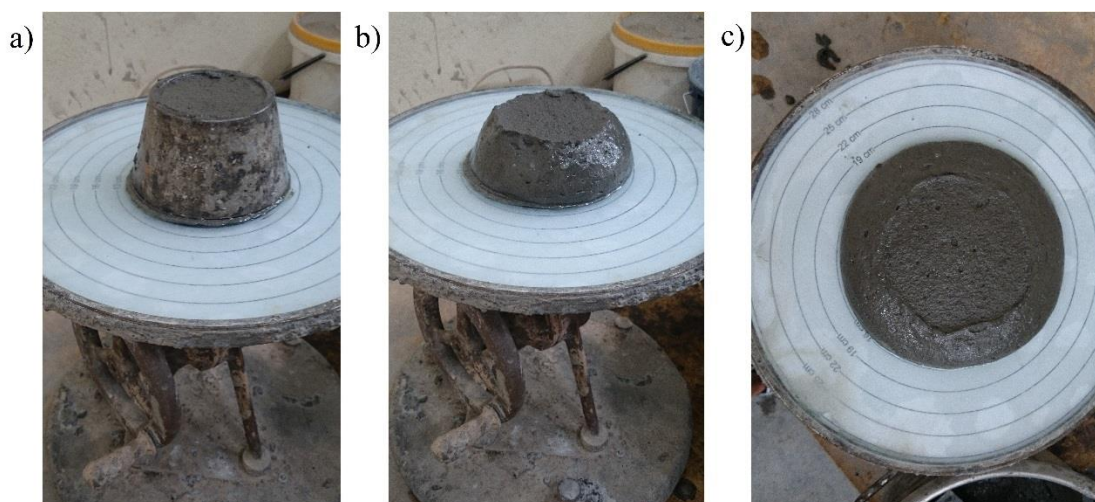
Pro konečné zhotovení průhledné viskózní hmoty, která při experimentech vhodně nahrazuje cementovou matici, a k přibližnému porovnání materiálů byla zvolena zkouška na ručním střešacím stolku, viz Obr. 41.



Obr. 41 Střešací stolek.

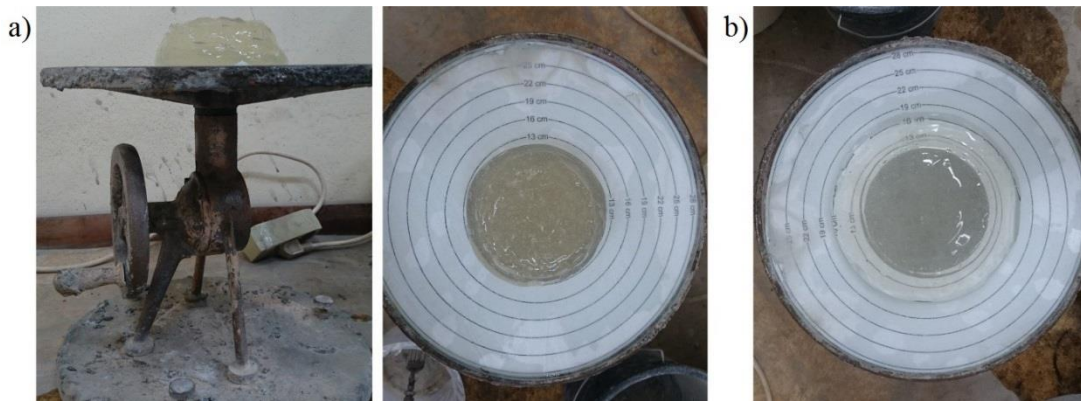
Takovou zkušební metodu popisuje norma ČSN EN 1015-3 s názvem „Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“ [77]. Jedná se o jednoduchý mechanismus založený na rozlití hmoty částečně vlivem gravitace a hlavně

pomocí záměrných svislých poklesů pohyblivého vodorovného stolku se vzorkem. Těchto pádů je potřeba provést předepsaný počet, v tomto případě jich bylo patnáct. Podstata zkoušky spočívá ve stanovení průměru rozlitého zkušebního vzorku čerstvé směsi malty resp. sonogelu. Postup zkoušky byl následující. Nejprve bylo nutné očistit zkušební desku (stolek) o průměru 300 mm a lehce potřít olejem, stejně tak vnitřní plochu kovových kuželů. Poté byl větší kovový kužel s průměry 100 a 70 mm umístěn širší stranou dolů do středu stolku, přidržován na desce a rovnoměrně naplněn připravenou čerstvou směsí UHPC. Pro snadnější plnění lze použít druhý (menší) kužel, a tím si rozšířit hrdlo plněného kužele. Nadbytečná směs přesahující horní hranu kužele byla odstraněna a deska v okolí kužele očištěna. Potom byl kovový kužel svisle vzhůru odejmut a pomocí páčky pod stolkem následovalo patnáct poklesových rázů s frekvencí 1 náraz za sekundu, jak předepisuje norma. Vzniklý „koláč“ se rozlil uprostřed stolku s předepsanou stupnicí v podobě letokruhů, kde se jednoduše odečetl průměr. Důležité momenty zkoušky jsou zachyceny na Obr. 42. Taková měření s čerstvou cementovou směsí proběhla tři a všechna s prakticky shodným výsledkem, a to naměřeným průměrem 16 cm (viz Obr. 42c).



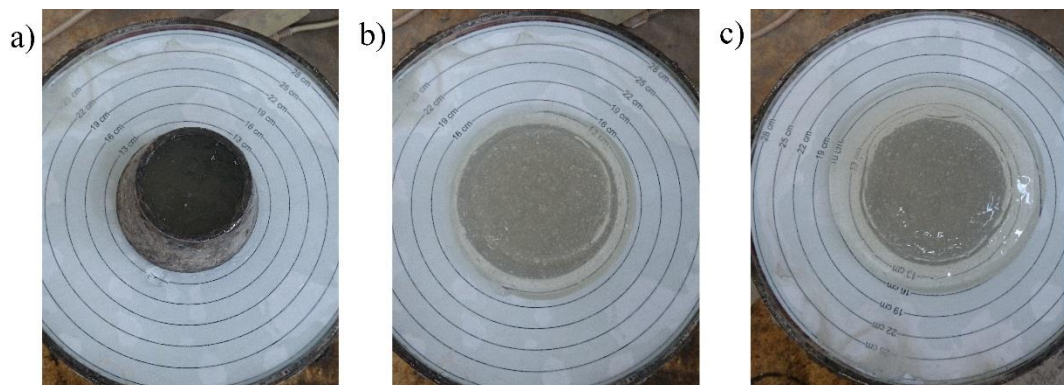
Obr. 42 Zkouška konzistence čerstvé cementové směsi na střešacím stolku dle ČSN EN 1015-3, a) příprava vzorku na experiment, b) vzorek připravený na zkoušku, c) vzorek po provedení zkoušky.

Stejným způsobem byly realizovány zkoušky, kde čerstvou cementovou směs nahradil sonografický gel. První měření se provedlo na vodou nezředěném sonogelu (viz Obr. 43). Potom byly uskutečněny další zkušební rozlivy, kdy byla k sonogelu postupně přidávána voda. Do počátečních 300 g sonogelu byla postupně po 10 g přidávána voda. S každým přídavkem vody následovala další zkouška rozlivu na střešacím stolku, dokud konzistence vzniklé sonogelové hmoty neodpovídala konzistenci čerstvé cementové směsi. Tímto způsobem se zjistilo, že je potřeba přidat 170 g vody, což je více než polovina množství sonogelu.



**Obr. 43 Srovnání směsí sonogelu,
a) sonogel bez přidavku vody, b) sonogel po dodání vody a provedení zkoušky konzistence
s použitím střešacího stolku dle ČSN EN 1015-3.**

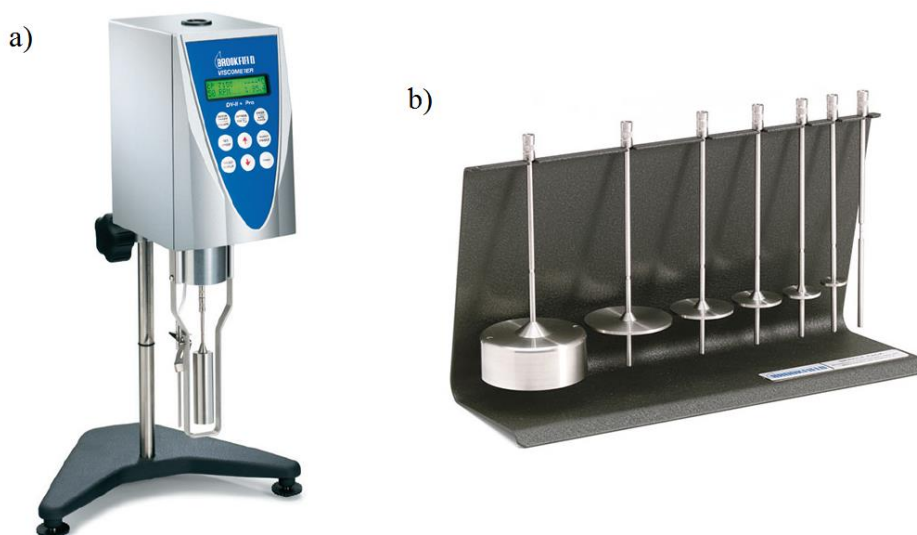
Zkušební vzorky ze sonogelové hmoty tedy sestávaly z 300 g sonogelu a 170 g vody. Důkladně promíchaná vzniklá směs sonogelu s vodou v konečném poměru 1:0,566 byla připravena ke kontrole konzistence. Stejně jako u cementu byly následně identickým způsobem provedeny tři zkoušky, u všech byla naměřena totožná hodnota rozlité opět o průměru 16 cm (viz Obr. 44c). Průběh zkoušky sonogelové hmoty na střešacím stolku je zdokumentován na Obr. 44.



**Obr. 44 Zkouška konzistence sonogelové hmoty pomocí střešacího stolku dle ČSN EN 1015-3,
a) příprava vzorku na experiment, b) vzorek připravený na zkoušku,
c) vzorek po provedení zkoušky.**

4.3.2 Rotační viskozimetr

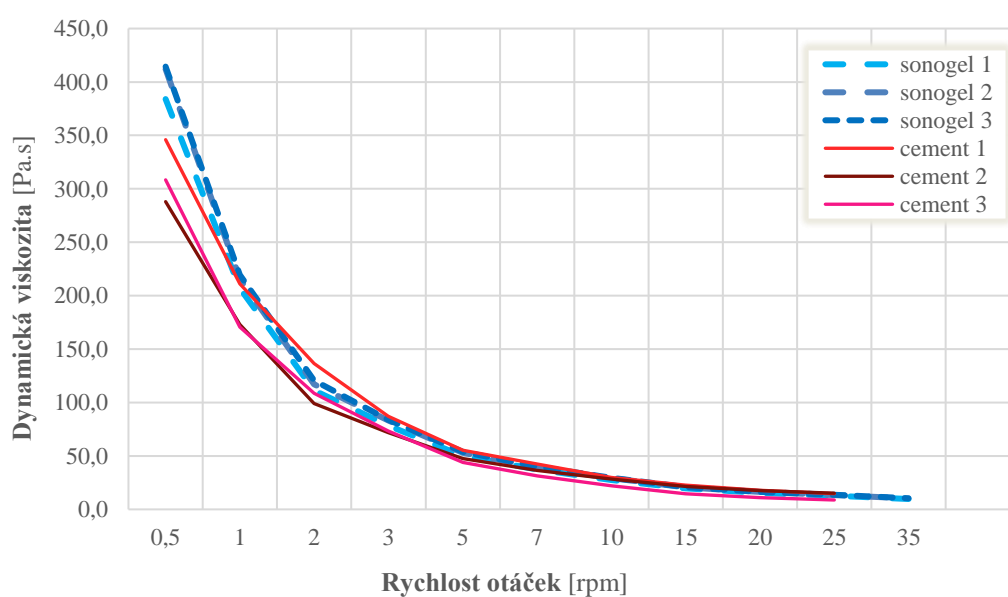
Viskozita je důležitý parametr, který může ovlivňovat rozmístění vláken ve směsi vzorku. Získané vědomosti o viskozitě materiálů a o způsobech měření zde byly využity k praktickému měření. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1, ke zjišťování viskozity cementového kompozitu jako newtonské kapaliny nejlépe vyhovují rotační viskozimetry. Navržená metoda by měla být relativně jednoduchá, vykazovat vysokou vypovídací schopnost a dobrou reprodukovatelnost měření. Popisované měření dynamické viskozity směsi při daných deformačních parametrech bylo provedeno na přístroji od společnosti *Brookfield DV-II+Pro* (Obr. 45a) se základní sadou vřeten (Obr. 45b). Během měření byl současně použit software *Rheocalc* pro sběr dat a jejich analýzu.



Obr. 45 Rotační viskozimetr RVDV II+Pro (a) se sadou základních vřeten (b) [78], [79].

Viskozimetr je založen na principu rotace vřetene ponořeného do vzorku za pomoci kalibrované pružiny. Viskózní vlastnosti kapaliny udává stupeň reflexe pružiny, který je měřen rotačním převodníkem. Obecně platí, že čím větší je kroutící moment pružiny, tím větší je rozsah měření. Naměřená dynamická viskozita materiálu je udávána v Pa·s, dále pak smykové napětí v N/m² (Pa), deformační gradient v s⁻¹ a kroutící moment je vyjádřen v procentech.

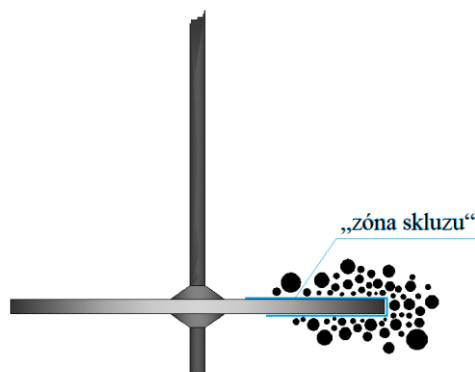
Umíchaná směs čerstvého betonu a podle ní optimalizovaná směs sonogelu s vodou, obě popsané v předchozích kapitolách, byly testovány ve třech měřeních a tato naměřená data jsou téměř shodná. Výsledky měření jsou zobrazeny v grafu na Obr. 46. Teplotní podmínky při provádění zkoušek byly 20 °C, použito bylo vřeteno s označením RV05, které doporučil výrobce viskozimetru.



Obr. 46 Průběh měření dynamické viskozity čerstvé směsi cementu v závislosti na počtu otáček vřetene za minutu.

Průběh dynamické viskozity měl s rostoucím počtem otáček za minutu klesající tendenci. Dynamická viskozita sonogelu se snižovala z přibližně 400 Pa·s až k 10 Pa·s při zvyšování otáček z počátečních 5 na 25 otáček za minutu. Tento trend odpovídá pseudoplasticitě a přesněji i tixotropii. Měření viskozity na přístroji od společnosti *Brookfield* tedy potvrdilo tixotropní chování směsi – dynamická viskozita měla s rostoucím počtem otáček za minutu klesající průběh. Cementová směs se v důsledku různých poměrů v množství jednotlivých složek může přibližovat různým typům neneutonských kapalin, a tudíž i příslušně pozměňovat své chování. Také hodnoty viskozity jednotlivých směsí mohou lišit, pohybují se v rozmezí desítek až stovek Pa·s. Literatura běžně uvádí viskozitu betonu v širokém rozsahu od 20 do 600 Pa·s, v závislosti na složení směsi.

U suspenzí dochází v některých případech k odpuzování mezi stěnou přístroje a částicemi, což může mít příčinu v elektrických nebo povrchových silách. V takových případech vznikne těsně u stěny film čisté kapaliny, bez dispergovaných částic a částice těsně u stěny se nezúčastní přenosu tečného napětí, což přirozeně značně zkresluje výsledky. Tuto nesnáz, která se nazývá skluzem u stěny, lze někdy odstranit změnou materiálu měřícího elementu. Někdy postačí úprava povrchu, tj. odmaštění, vyhlazení nebo naopak zdrsnění stěn, které se suspenzí přichází do styku. Podobné riziko hrozí u rotačního viskozimetru také v okolí vřetene (viz Obr. 47). Na styku vřetene se zkoumanou látkou je zóna, kde by mohlo rovněž vznikat rozhraní s vrstvičkou kluzkého povrchu s vyplavenými částicemi. Rotace tělesa (vřetena) musí být tak pomalá, aby nedocházelo k turbulentnímu proudění. V tomto případě lze rizikovou zónu eliminovat vhodným výběrem vřetena. Zde bylo po konzultaci s výrobcem na jeho doporučení vybráno vřeteno ze základní sady s označením RV05. „“



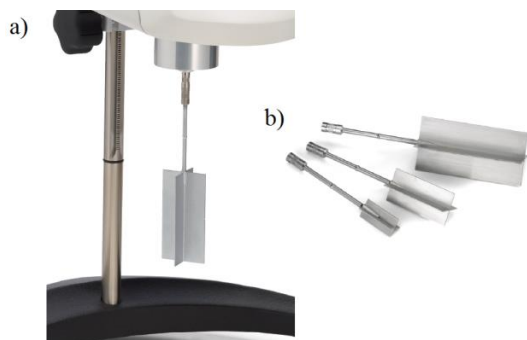
Obr. 47 Schéma tvorby domnělé kontaktní zóny řídkší směsi v okolí vřetena.

4.3.3 Alternativní způsoby měření

Pro porovnání či zpřesnění získaných dat jsou možná i další měření viskozity směsi cementového kompozitu a případně i vodného roztoku sonogelu. Jednalo by se o obdobné měření rotačním viskozimetrem s nově pořízenými typy vřeten nebo tzv. „slump test“ (zkouška rozlité kužele). Pro naše účely však stačil rotační viskozimetr s původní sadou vřeten a jednoduchá srovnávací zkouška pomocí setřásacího stolku.

Rotační viskozimetr s odlišnou sadou vřeten

Dle doporučení odborníků ze společnosti *Brookfield* bylo použito vřeteno RV05 ze základní sady, ale přicházejí v úvahu ještě dva odlišné typy vřeten – lopatkovité nebo válcovité (viz Obr. 48 a Obr. 49). Tím by mohlo být dosaženo přesnějších výsledků a tvorba klzné vrstvy na styku vřetene a zkoumané směsi by měla být lépe eliminována. Další sada vřeten však nebyla z finančních důvodů zatím k dispozici.



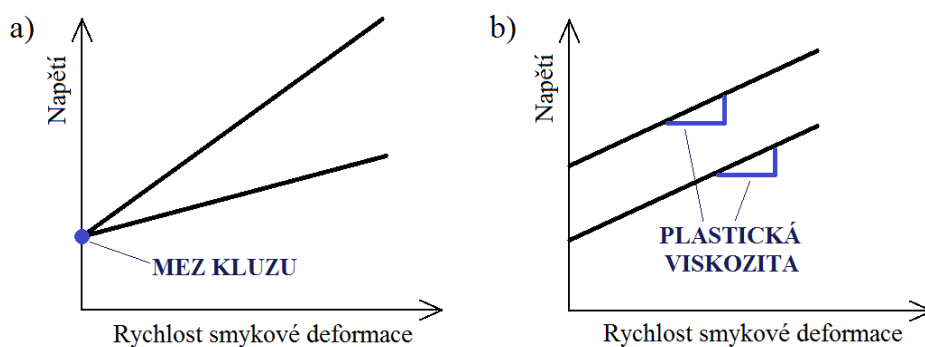
Obr. 48 Lopatková vřetena [80].



Obr. 49 Rotační viskozimetr s válcovitými vřeteny pro jednorázové malé vzorky [80].

Modifikovaný „slump test“ neboli zkouška rozlité kužele

Jedná se o jednoduchou testovací metodu k měření reologických parametrů čerstvého betonu. Metoda byla vyvinuta, aby poskytla vyčíslení dvou Binghamových reologických parametrů (mez kluzu a plastickou viskozitu, Obr. 50). Zkouška rozlité kužele je jednou z nejběžnějších v oblasti testování čerstvého betonu.



Obr. 50 Mez kluzu a plastická viskozita čerstvého betonu,
a) identická mez kluzu, rozdílná plastická viskozita,
b) identická plastická viskozita, rozdílná mez kluzu.

Co se týče klasického testu klesnutí kužele (*standard slump cone test*), prováděná měření jsou funkcí času, a tak mohou tvořit křivku závislosti poklesu na čase, kterou lze simulovat metodou konečných prvků za předpokladu, že čerstvý beton je Binghamova kapalina. Křivka závisí na obou parametrech, mezi kluzu i plastické viskozitě. Pokud konečné klesnutí přímo

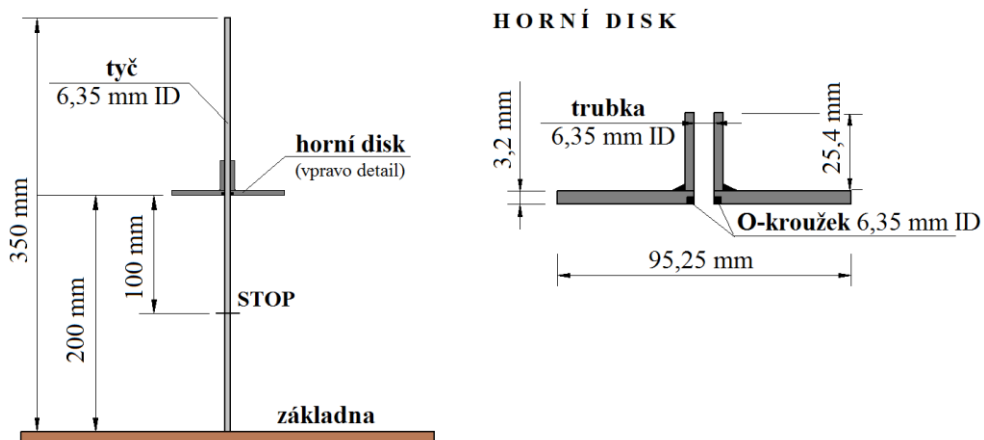


souvisí a je závislé na mezi kluzu, lze předpokládat, že závislost klesání kužele je pravděpodobně řízena plastickou viskozitou.

Cílem modifikace bylo vyvinout zkoušku, která by byla jednoduchá, spolehlivá, jednoduše proveditelná a ne příliš drahá. To by vedlo k praktickému záznamu klesnutí kužele jako funkce času na základě vizuálních kritérií použitím stopky. Pro kompletní záznam by bylo nezbytné použít elektronický sběr dat.

Komponenty potřebné k provedení modifikovaného slump testu jsou horizontální základna, ke které je připevněna tyč, standardní forma pro slump test (ASTM C 143-90), horní disk (talíř sklouzávající dolů po tyči), gumový O-kroužek jako těsnění, tyč, hladítko (lopatka), pravítko a stopky. Jednotlivé části přístroje jsou zobrazeny na Obr. 51.

Pokles kužele se měří v souladu se zkouškou ASTM Test Method C 143-90 kromě toho, že přístroj je navíc opatřen svislou tyčí v ose přístroje a diskem z nerezové oceli, která se může pohybovat dolů po tyči. Tato deska je umístěna na betonový kužel. Měří se čas nezbytný ke klesnutí o 100 mm horního povrchu standardního betonového kuželu. Pro mez kluzu a plastickou viskozitu jsou navrženy poloempirické modely jako funkce konečného poklesu a tomu odpovídajícímu času. Aplikace modifikovaného slump testu pro vyčíslení viskozity je pro betony limitováno hodnotami klesnutí od 120 do 260 mm [75], [81], [82].



Obr. 51 Zkušební nastavení přístroje pro slump test [82].



5 Vliv orientace bednění na mechanické vlastnosti

V této experimentální části práce je cílem prokázat vliv způsobu ukládání čerstvé směsi cementového kompozitu vyztuženého ocelovými vlákny na jejich výslednou orientaci, a tudíž i na mechanické vlastnosti ztvrdlého prvku.

Mechanické vlastnosti betonu vyztuženého ocelovými vlákny závisí na orientaci vláken [83]. Vlákna mají značný přínos v tahové pevnosti betonového prvku, z toho důvodu byla volena především zkouška pevnosti v tahu ohybem pro vyhodnocování experimentu. Předpokladem bylo, že se vlákna orientují ve směru toku ukládání směsi. Proto bylo speciálně pro účely těchto experimentů vyrobeno bednění ve dvou rozměrově totožných provedeních (svisle a vodorovně uložený kvádr či deska) a po provedení zatěžovacích zkoušek tyto dva typy vzorků vzájemně porovnány.

Metoda lití směsi do forem dvojího provedení byla zvolena, protože orientace vláken je ovlivněna tokem směsi do bednění. Tok závisí na reologickém chování materiálu, na geometrii vláken, také na geometrii a tvaru bednění a na vlivu stěn bednění. Když směs proudí kolem stěn, je profil proudění ovlivněn třením způsobeným stěnami bednění [52], [61], [84], [85].

Vlákny vyztužený beton se ukládal shora, tekoucí kompozit se potom ve vodorovném směru rozléval a v tomto směru se primárně orientovala i vlákna, pokud to umožňovat tvar bednění. Tento předpoklad je potvrzen destruktivními zkouškami. Zjištění by bylo možné doplnit také nedestruktivní radiologickou zkouškou každého vzorku před provedením zkoušky mechanické a na pořízených snímcích zkoumat uspořádání vláken v celém vzorku při působení rentgenového záření. Tyto nedestruktivní metody jsou však velmi nákladné, protože by bylo nutné experiment několikrát opakovat, aby byla výpovědní hodnota dostatečně průkazná. Proto je volena nedestruktivní alternativa v podobě průhledné hmoty a průhledného bednění, kde lze orientaci přidaných vláken přehledně a opakovaně pozorovat. K provedení experimentů bylo nutné vyrobít a odzkoušet hmotu s podobnými reologickými vlastnostmi, jako má beton v tekutém stavu (viz kapitola 4.3). Vhodným materiálem pro tyto účely se prokázal být vodný roztok sonogelu.

5.1 Simulace ukládání směsi

Experiment byl proveden za účelem zjištění chování ocelových vláken v čerstvé směsi drátkobetonu během ukládání a uspořádání vláken po uložení směsi do bednění. Simulace se sonogelem byla zvolena především z důvodu jednodušší proveditelnosti, opakovatelnosti a nízké finanční náročnosti oproti využití rentgenového záření.

Čirý sonogel (ultrasonografický gel) představoval náhradu za neprůhledný cementový tmel a tradiční bednění bylo nahrazeno průhledným bedněním z plexiskla. Průhledné bednění bylo stejně jako to klasické pro betonové vzorky vyhotoveno ve dvou geometricky rovnocenných provedeních, a to jak pro hranolové prvky, tak pro deskové prvky. Mechanické zatěžování betonových prvků je popsáno následně.

Do připravené a promíchané hmoty sonogelu a vody v konečném poměru 1:0,566 (viz kapitola 4.3) byla přidána ocelová vlákna o průměru 0,19 mm a délce 13 mm (Obr. 52). Dávka vláken do směsi UHPFRC byla zvolena jako 1,5 % objemu. Stejně objemové množství ocelových vláken bylo proto použito i v experimentu s modifikovaným roztokem ultrazvukového gelu.



Obr. 52 Příprava směsi sonogelu s vlákny.

Po vzájemném kontaktu těchto složek způsobila antikorozi a ochranná mosazná úprava drátků, která je nezbytná do prostředí cementů a malt, patrné zbarvení sonogelových vzorků do oranžova až hněda. Změna barvy může být také částečně způsobena i vlivem slunečního a UV záření v průběhu experimentu s částečným přístupem denního světla do laboratoře.

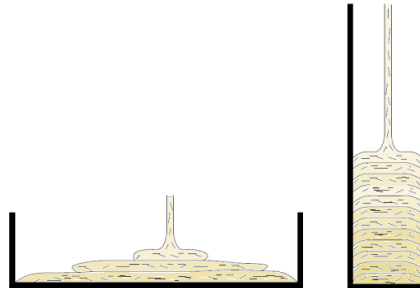
Získaná hmota není tuhnutí oproti klasické cementové směsi, pokus lze tudíž po opětovném rozmíchání opakovat a znovu pozorovat pouhým okem rozdíly uložení vláken v závislosti na způsobu lití směsi do bednění.

5.1.1 Hranolové prvky

Pro názornější představu o poloze vláken uvnitř vzorku jsou mechanické testy z kapitoly 5.2 doplněny o experiment s „vláknosonogelem“. Pro tyto účely bylo navrženo speciální bednění z čirého plexiskla s vnitřními rozměry 100×100×400 mm, což odpovídá velikosti zkoušených vzorků z UHPFRC, jež jsou popsány v kapitole 5.2.



Vytvořená gelová směs s přídavkem ocelových vláken byla shora plněna do středu speciálního transparentního bednění orientovaného do horizontální nebo vertikální polohy, viz schéma na Obr. 53. Orientace vláken byla studována v závislosti na poloze bednění, lití směsi do forem a byl pozorován vliv stěn bednění (tzv. *wall effect*).



Obr. 53 Schéma plnění hranolového bednění směsí „vláknosonogelu“ s očekávanou výslednou orientací vláken.

Na fotografiích níže jsou zobrazena transparentní bednění po naplnění směsí sonogelu s drátky (Obr. 54). Orientace vláken uvnitř průhledného bednění byla přednostně kolmo na směr lití neboli rovnoběžně se dnem nádoby. Svisle uložené bednění tedy více omezovalo prostor pro takové uspořádání, jak je vidět na fotografiích zepředu a z boku.

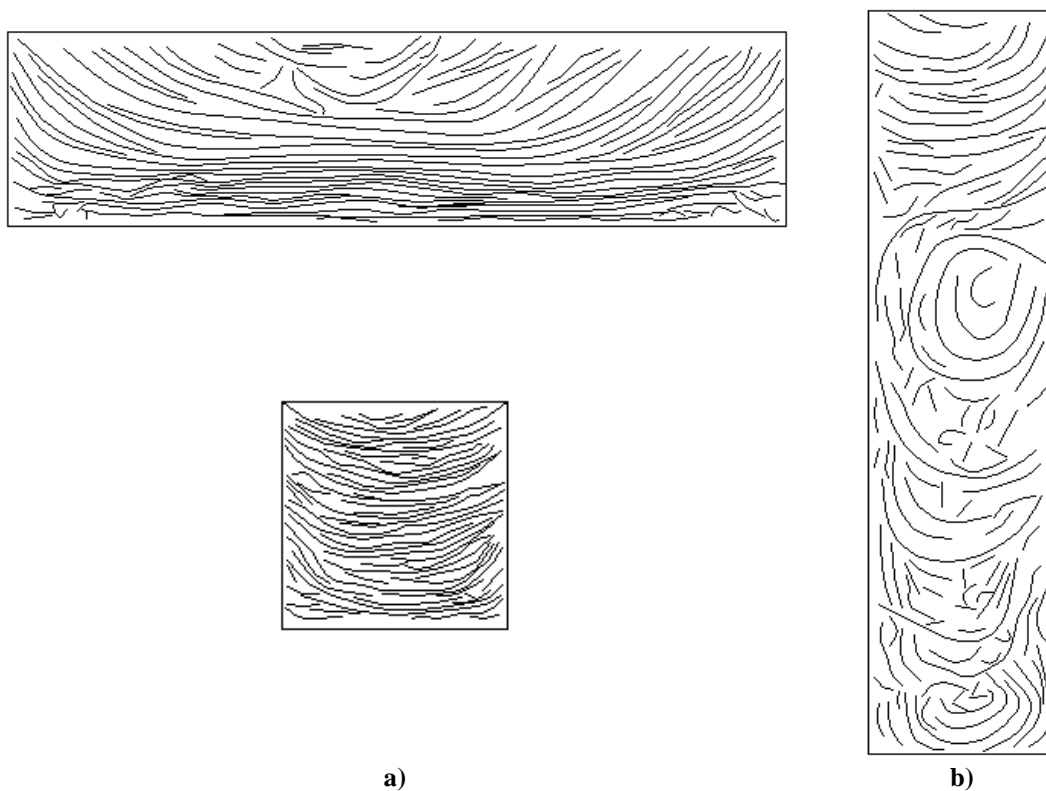
Ve vodorovně umístěném bednění jsou vlákna orientována převážně vodorovně, tj. kolmo ke směru lití (Obr. 54a). Je zde viditelný také vliv stěn bednění. Tento jev je zvláště patrný v bočním pohledu, kde vlákna kopírují hranice formy na dně a do stran (Obr. 54a dole). Ve svisle umístěném bednění byla vlákna uspořádána většinou spíše nahodile (Obr. 54b). Podél stěn bednění byla orientace vláken více ve svislém směru, uprostřed tloušťky hranolu a těsně u dna naopak rovnoběžně se dnem nádoby. Kvůli malé šířce bednění ovlivnily hranice bednění uspořádání vláken téměř po celém průřezu.

Simulace ukládání čerstvé směsi betonu, kterou nahradil transparentní materiál o stejné konzistenci, prokázala vliv geometrie bednění a vliv způsobu ukládání na uspořádání a orientaci ocelových vláken v čerstvé směsi.

Předpokladem bylo, že vlákna jsou orientována kolmo ke směru lití směsi a orientují se tedy především rovnoběžně se dnem bednění. Tento předpoklad byl prokázán. Vlákna jsou orientována ve vodorovném směru, pokud to umožní dostatek okolního prostoru. Orientaci vláken tudíž ovlivnily také stěny bednění, zejména když byla šířka bednění menší, vlákna neměla prostor se preferovaně vyrovnat. Když se tekutým kompozitem naplnilo vodorovné bednění, většina vláken se uspořádala vodorovně a navíc se v blízkosti dna vytvořila hustější vrstva vodorovně orientovaných vláken. Pro lepší ilustraci je pokus doplněn o schematické čárové vykreslení hlavních orientací vláken, viz Obr. 55.



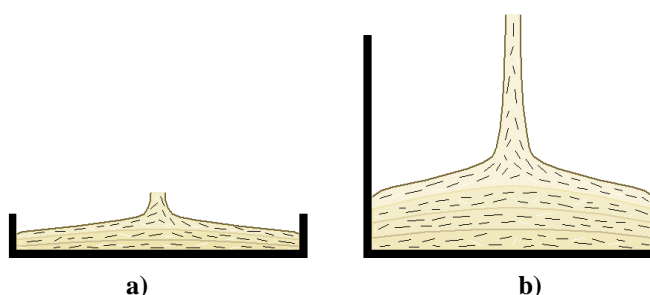
Obr. 54 Vodorovně (a) a svisle (b) orientované transparentní bednění se směsí sonogelu s drátky.



Obr. 55 Schematické čárové vykreslení hlavních orientací vláken v sonogelu uvnitř transparentního vodorovně (a) a svisle (b) orientované bednění. Schéma koresponduje s Obr. 54.

5.1.2 Deskové prvky

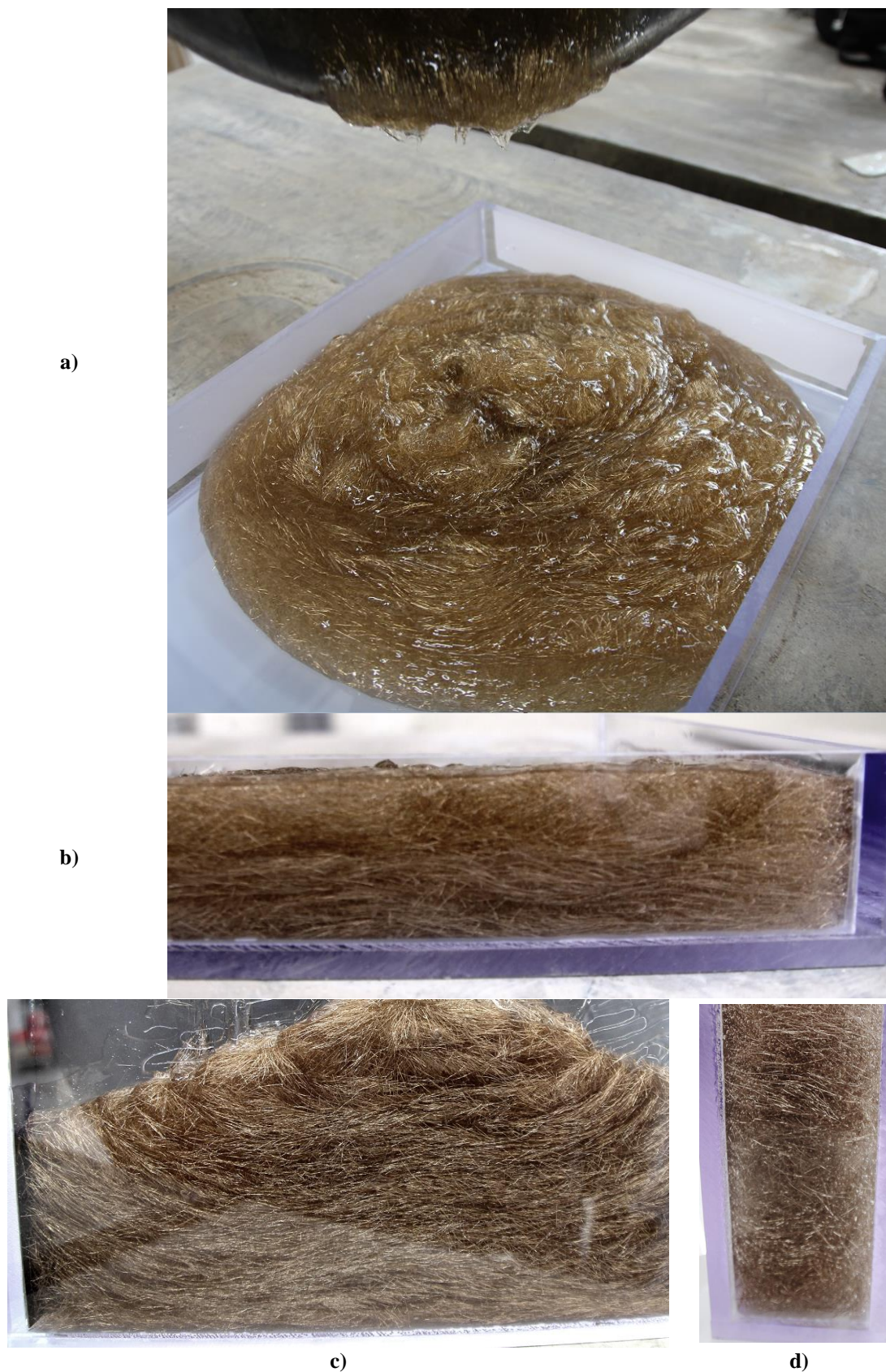
Doplňující experiment byl proveden rovněž pro prvky deskového typu. Za účelem lepšího pochopení chování vláken uvnitř cementové matrice deskového prvku byly plněny dva druhy bednění a pozorovány v závislosti na metodě lití směsi do bednění a na tvaru bednění. Jednalo se o simulační experiment se směsí sonogelu s drátky v průhledném bednění, které rozměrově odpovídalo ocelovému bednění pro výrobu betonových desek (300×400×50 mm). Stejně tak byl zachován stejný způsob lití ve dvou kolmých směrech (podle orientace bednění) jako u cementového kompozitu (viz Obr. 56).



Obr. 56 Schéma plnění deskového bednění směsí „vláknosonogelu“ s očekávanou výslednou orientací vláken.

Směs sonogelu s ocelovými vlákny byla rozmíchána v robotickém míchači jemnozrnných směsí obdobně jako směs UHPFRC. Transparentní deskové bednění v horizontální a vertikální poloze bylo poté shora plněno připravenou směsí, viz Obr. 57a, c. Pozorovaná orientace vláken v sonogelu v důsledku toku směsi a tvaru bednění byla očekávaná i ve směsi UHPFRC.

V horizontálně uloženém bednění byla preferovaná orientace vláken rovnoběžně ke dnu neboli kolmo ke směru lití. Při pohledu z boku je v detailu na Obr. 57b dobře viditelné vodorovné uspořádání vláken v prostoru, pouze v rohu a okolí je ovlivněné stěnami bednění. Když byl při rozlívání směsi do forem k dispozici dostatek místa, vlákna měla tendenci vytvářet soustředné kruhy podél okraje rozlité matrice (Obr. 57a). Ve svislém bednění byla také vlákna orientována většinou kolmo ke směru lití. Orientace vláken byla ve středu desky vodorovná a podél stěn bednění byla vlákna částečně natočená svisle (Obr. 57c). Vzhledem k malé tloušťce bednění byla orientace vláken ovlivněna stěnami bednění téměř po celém průřezu. Všesměrné uspořádání vláken ovlivněné stísněným prostorem mezi stěnami bednění je vidět zejména v detailu boční stěny na Obr. 57d.



Obr. 57 Pohled na uspořádání vláken ve směsi sonogelu s drátky: během plnění horizontální (a) a vertikální (c) formy a v bočních detailech horizontálně (b) a vertikálně (d) uloženého bednění.

5.2 Mechanické zatěžování hranolových prvků

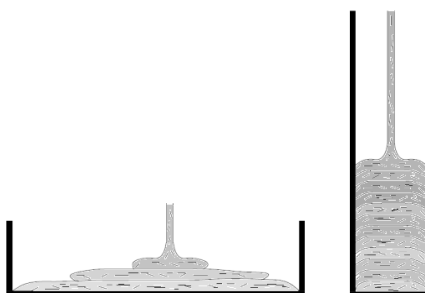
Základní zkoušky ztvrdlého a vyzrálého betonu probíhaly dle normových zkoušek na zkušebních tělesech ve stáří minimálně 28 dní, aby bylo možné výsledky porovnávat s výsledky ostatních výzkumů. Celkem bylo vyrobeno 60 vzorků ze směsi UHPFRC. Všechna zkušební tělesa byla odbedněna po minimálně 24 hodinách a následně ošetřována do doby, kdy byla testována. Po změření a zvážení byla tělesa zkoušena na pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem. Ohybová zkouška byla vybrána jako hlavní parametr pro porovnání výsledků. Ze zatěžovacího diagramu byla dále vypočítána specifická lomová energie.

Pro výrobu těchto vzorků bylo použito mírně odlišné složení směsi, na základě kterého byl později vytvořen „užitný vzor“ pro výrobu suché prefabrikované směsi UHPFRC [71]. Toto prvotní složení je uvedeno v následující Tab. 2. U ostatních experimentů již byla použita zmíněná směs [71], jejíž složení je podrobně rozepsáno v kapitole 4.1.

Tab. 2 Složení původní směsi UHPC.
Množství jednotlivých složek je vyjádřené v hmotnostních podílech vzhledem k pojivové složce.

Složky směsi UHPFRC	Hmotnostní poměr složek
Cement CEM I 52,5 R	1
Kamenivo ST03/08	0,85
Kamenivo ST01/06	0,42
Křemičitý úlet	0,25
Křemičitá moučka	0,25
Voda	0,22
Superplastifikátor SVC 20 Gold	0,03
Superplastifikátor SVC 20 HE	0,02

Tento experiment spojený s výrobou, zkoušením a následným srovnáním vzorků probíhal ve spolupráci s Michalem Tvarogem. Na tuto spolupráci navazuje a doplňuje ji tento výzkum. Betonové kvádry ze směsi UHPFRC o rozměrech 100×100×400 mm byly vyrobeny dvěma způsoby. Oba typy vzorků byly geometricky totožné, odlišný byl pouze způsob ukládání do rozdílně umístěných bednicích forem, viz Obr. 58.



Obr. 58 Schéma plnění vodorovných (vlevo) a svislých (vpravo) forem směsí UHPFRC s očekávanou orientací vláken uvnitř těchto forem v důsledku toku směsi.

Po provedení zatěžovacích zkoušek bylo možné obě skupiny vzorků vzájemně porovnat a získané výsledky rovněž vizuálně srovnat s provedenými simulacemi. K porovnání získaných dat byla navíc ještě vyrobena referenční směs UHPC, a to ze stejného složení jako směs UHPFRC jen bez použití ocelových vláken [50], [86].

5.2.1 Pevnost v tahu ohybem

Protože vlákna mají významný přínos v pevnosti v tahu, byla pro vyhodnocení experimentu zvolena zkouška tahem v ohybu. Na pevnost v tahu ohybem byly zkoušeny nejprve hranoly ze směsi UHPFRC. Pro konvenční tělesa vyráběná ve vodorovném uložení byla použita normová ocelová bednění s vnitřními rozměry 100×100×400 mm, pro tělesa vyrobená ve svislém bednění se nechaly vyrobít ocelové formy stejných rozměrů s otvorem v místě čtvercové stěny.

Zátěžová zkouška pevnosti v tahu byla provedena podle normy ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [87]. Tato evropská norma uvádí metodu pro stanovení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles ze ztvrdlého betonu. Zkušební hranoly byly vystaveny ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím jednoho horního zatěžovacího válečku s možností volného otáčení a dvou dolních podpěrných válečků. Snímače průhybu byly umístěny na rámu ukotveném v ose zkušebního hranolu nad podporami. Uvedený způsob uchycení byl volen pro dosažení přesnějších výsledků, z důvodu eliminace vlivu protlačení podpor a dosedání hlavy zatěžovacího přístroje.

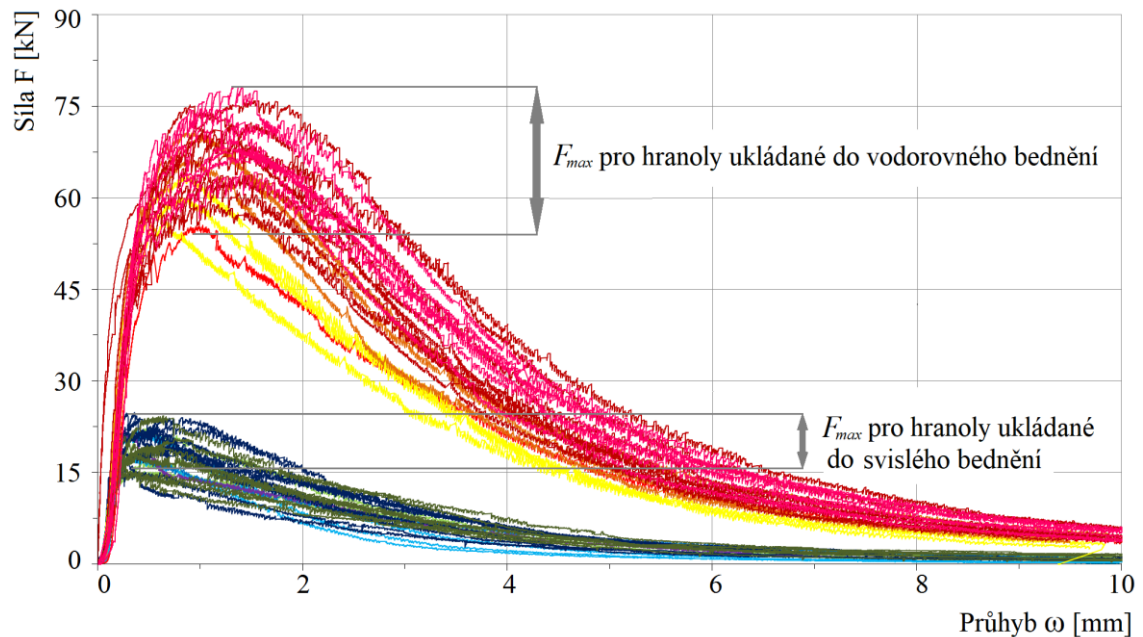
Tělesa byla zatěžována podle normy ČSN EN 12390-4 Zkoušení na zkušebním lisu – Zatěžování jedním břemenem uprostřed [88]. Vznik prvních trhlin byl předpokládán do průhybu 1 mm, a z toho důvodu byla rychlost zatěžování rozdělena na dvě fáze. V první, do průhybu 1 mm, byla nastavena rychlost zatěžování 0,2 mm/min. V druhé fázi, od průhybu 1 mm do průhybu 10 mm, kdy zatěžování bylo ukončeno, byla rychlost zatěžování zvýšena na 1 mm/min. Nižší rychlost v první etapě zatěžování byla volena pro dosažení větší přesnosti získaných dat před a během porušení vzorku [50].

Výsledná hodnota pevnosti v tahu ohybem byla získána dle rovnice (13):

$$\sigma_y = \frac{3F_{max}L}{2b \cdot h^2}, \quad (13)$$

kde σ_y je pevnost v tahu ohybem [MPa], F_{max} maximální zatížení [N], L vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm] a b, h jsou rozměry příčného řezu [mm].

Zatěžování vzorků bylo zaznamenáváno, dokud průhyb nedosáhl hodnoty 10 mm. Průhyb v závislosti na zatěžovací síle pro vodorovně a svisle betonované vzorky z UHPFRC je znázorněn v grafu na Obr. 59. Ze získaných hodnot zatížení bylo následně vypočítáno ohybové napětí.



Obr. 59 Srovnání maximálních dosažených zatížení F_{max} horizontálních a vertikálních hranolů získaných ze zkoušky třibodovým ohybem [50].

Maximální dosažené síly, které byly z přístroje počítačově zaznamenávány, posloužily pro výpočet pevnosti v tahu ohybem σ_y a specifické lomové energie G_f . K ověření vlivu uspořádání vláken byla získaná data porovnána s výsledky referenční směsi. Vodorovně i svisle betonované referenční vzorky z nevyztužené směsi (UHPC) byly zlomeny ve stejném okamžiku, kdy byly vytvořeny první trhliny ve vertikálně vyrobených vzorcích UHPFRC. Toto chování se předpokládalo a potvrdilo se, že vertikálně betonované UHPFRC hranoly měly výrazně méně vláken orientovaných kolmo k oblasti porušení. Vlákná proto nebyla schopna zabránit trhlinám. UHPFRC hranoly ukládané do horizontálního bednění měly mnohem vhodněji orientovaná vlákna a v místech vzniku trhlin vlákna přenášela napětí. Cementová matrice svislých prvků byla více homogenní a orientace vláken více nahodilá. Vodorovné prvky působily komplexněji jako jednotnější kompozit, ocelová vlákna sloužila jako tahová výztuž a zároveň jako plnivo [86].

5.2.2 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena na částech vzorků, které vznikly z hranolů po provedení zkoušky pevnosti v tahu ohybem. Krychelné výřezy o hraně 100 mm byly provedeny z obou polovin vzorků v oblastech bez poškození z předchozího testování. Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [89]. Zkušební tělesa byla zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu, který vyhovuje normě ČSN EN 12390-4 [88]. Pevnost v tlaku výřezů byla zkoušena ve stejném stádiu jako ohybové pevnosti (po odzkoušení ohybové pevnosti).

Zatěžované těleso bylo umístěno do ocelových objímek s pryžovou vložkou, která zajišťovala rovnoměrný roznos zatížení při nerovnostech povrchu vzorků. Tato sestava se vzorkem byla vložena do zatěžovacího lisu. Rozsah stupnice zatížení byl zvolen podle zkoušeného betonu a podle předpokládané maximální hodnoty pevnosti. Automatické ovládání lisu bylo nastaveno na rychlost zatěžování 0,3 mm/min. Po skončení zatěžování, když došlo k rozdrčení zatěžovaného vzorku, byla zapsána maximální dosažená hodnota zatížení F_{max} a z ní byla vypočítána výsledná pevnost betonu v tlaku [50].

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla vypočítána na základě maximálního dosaženého zatížení při porušení zkušebního tělesa ze zatěžovacího zařízení dle vzorce (14):

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A_c}, \quad (14)$$

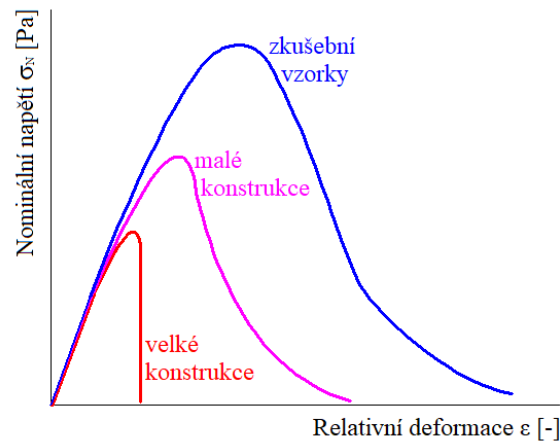
kde σ_c je pevnost v tlaku [MPa], F_{max} maximální zatížení při porušení [N], A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočtená ze jmenovité velikosti tělesa [mm²], viz ČSN EN 12390-1 [90].

5.2.3 Specifická lomová energie

Tuhost, specifická lomová energie a křehkost patří mezi základní lomové charakteristiky betonu a jsou to parametry přednostně uplatňované při vývoji vysokopevnostního a vysokohodnotného betonu. Tuhost a lomová energie charakterizují schopnost materiálu odolat deformaci a porušení. Specifická lomová energie je nejužitečnějším materiálovým parametrem při analýze betonových konstrukcí, kde dochází k tvorbě trhlin. Metoda experimentálního stanovení lomové energie i její samotná definice byla předmětem debaty vědců kvůli její variabilitě s velikostí a tvarem zkušebního vzorku [91]. Guinea a kol. identifikovali několik zdrojů rozptylu energie, které mohou ovlivnit měření specifické lomové energie [92]. Hu a Wittmann se zabývali možností, že specifická lomová energie zkušebního vzorku nemusí být konstantní podél linie trhliny [93].

Specifická lomová energie G_f je z definice energie (práce) potřebná ke zprerhání vazeb materiálu a vytvoření trhliny se dvěma novými oddělenými povrchy. Lomová energie patří k základním lomově-mechanickým vlastnostem kvazikřehkých materiálů. Její určení je nezbytné pro popis lomového chování pokročilých betonových kompozitních konstrukcí, protože kolaps takových konstrukcí je obvykle spojen s tvorbou a šířením trhlin. Tuhost a energie lomu typicky charakterizují schopnost materiálu odolat deformaci a prasknutí. Někteří autoři [91], [94], [95] poukázali na experimentální zkušenost, že hodnota lomové energie závisí na velikosti testovaných vzorků. Důvodem je zřejmě skutečnost, že energie na vytvoření jednotkové plochy trhliny je ovlivněna tvarem lomové procesní zóny a ten je zase ovlivněn volnými okraji vzorku. Hlavní příčiny tzv. rozměrového efektu (*size effect*) mohou být statistické, jelikož u rozměrnějších

konstrukcí je vyšší pravděpodobnost výskytu slabších míst, či deterministické, protože k šíření trhliny je nutná energie a ve velkých napjatých konstrukcích je jí k dispozici více. K selhání velkých konstrukcí dochází při nižší hodnotě nominálního napětí a při nižší hodnotě relativní deformace, viz Obr. 60 [96], [97].



Obr. 60 Pracovní diagram podobných konstrukcí různé velikosti [97].

Základní metoda a nejčastější způsob, jak určit specifickou lomovou energii při lomové analýze betonových konstrukcí, je podle doporučení Výboru pro lomovou mechaniku betonu RILEM pomocí zkoušky tříbodovým ohybem [98].

Pro určení lokální lomové energie betonu, nezávislé na velikosti vzorku, lze použít metodu modelu efektivní trhliny. Výpočet vychází z tříbodového ohybu vzorku, kdy je lomová procesní zóna nahrazena efektivní délkou trhliny. Dalším způsobem zatěžování pro stanovení lomové energie je jednoosá tahová zkouška a *wedge splitting test* neboli zkouška štípání klínem [91], [97], [99], [100].

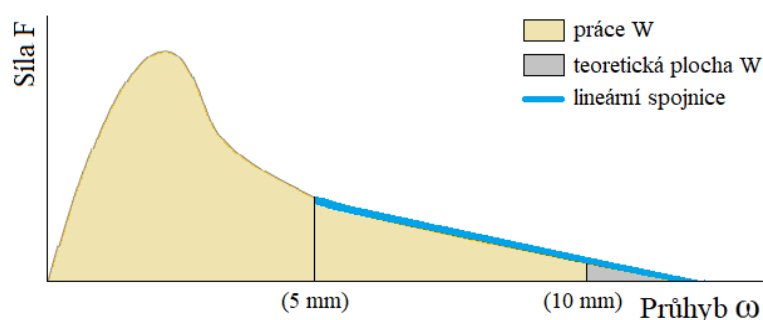
Výpočet hodnot lomové energie probíhal doporučeným postupem podle komise RILEM. Šířením trhliny se spotřebovává energie, při vzniku trhliny dochází k poškození materiálu a ke spotřebě energie v bezprostředním okolí trhliny v tzv. lomové procesní zóně. Tato hodnota energie závisí na velikosti vzorku. Stanovení specifické lomové energie betonu se tak stává úkolem vyžadujícím poměrně málo vzorků stejných rozměrů a tvaru [94], [97], [101]. Specifická lomová energie byla vypočtena z údajů získaných pomocí testů tříbodovým ohybem podle rovnice (15).

$$G_f = \frac{\int_0^{\omega_{max}} F(\omega) d\omega + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot \omega_{max}}{h \cdot b}, \quad (15)$$

kde G_f je specifická lomová energie [J/m^2], $F(\omega)$ funkce zatížení [N], ω průhyb [m], ω_{max} maximální průhyb [m], ve kterém zatěžovací síla $F = 0 \text{ N}$, m hmotnost vzorku [kg], g gravitační zrychlení [m/s^2], h výška vzorku [m] a b šířka vzorku [m].

Data získaná ze zkoušky pevnosti v tahu ohybem obsahovala hodnoty průhybu a hodnoty zatížení, které tento průhyb způsobily. Integrál funkce zatížení byl spočítán pomocí lichoběžníkové metody jako plocha pod křivkou funkce zatížení v závislosti na průhybu [102].

Jelikož zatěžování probíhalo pouze do průhybu 10 mm, funkce zatížení nebyla zaznamenána až do úplného kolapsu trámku a bylo nutné ji dopočítat. Průběh zatížení byl od průhybu přibližně 5 mm téměř lineární, proto od tohoto průhybu byla funkce proložena lineární spojnicí trendu (Obr. 61). Na základě skutečného průběhu a lineární spojnice byla dopočítána specifická lomová energie do teoretického kolapsu trámku, tedy do okamžiku s hodnotou síly $F = 0$ N [50].



Obr. 61 Způsob dopočtu funkce zatížení do předpokládaného kolapsu pro výpočet specifické lomové energie.

5.2.4 Výsledky a vyhodnocení

Výsledky pevnosti v tahu ohybem jsou uvedeny v Tab. 3. Velikost maximální dosažené síly F_{max} a tedy i ohybového napětí σ_y byly u horizontálně betonovaných vzorků v průměru 3,4× vyšší než u vertikálně uložených vzorků. Pevnost v tahu pro vertikálně uložené hranoly byla v průměru 9 MPa, což odpovídá 6,5 % pevnosti těchto vzorků v tlaku. Horizontálně uložené vzorky dosahovaly pevnosti v tahu přes 30 MPa, což je téměř 22 % jejich pevnosti v tlaku. Po porušení následovalo u horizontálních i vertikálních hranolů mírné zpevnění a poté přibližně exponenciální pokles pevnosti. Po ukončení zatěžování (při průhybu 10 mm), měly vodorovné vzorky zbytkovou (reziduální) pevnost v tahu 1,8 MPa a svisle vyrobené vzorky pouze 0,4 MPa.

Tyto rozdíly v pevnostech byly způsobeny především uspořádáním vláken, což potvrzuje i porovnání se sonogelovou simulací ukládání směsi. Vliv orientace vláken na výsledné vlastnosti kompozitu v souvislosti s provedenými simulacemi lze vyhodnotit jako prokázaný. Vodorovná orientace bednění při ukládání směsi měla pozitivní vliv na pevnost v tahu za ohybu a hodnoty specifické lomové energie.

Ve srovnání s referenční směsí UHPC dosahovaly vodorovně ukládané trávky výrazně vyšších pevností. Svisle ukládané hranoly měly do oblasti porušení stejný průběh jako nevyztužený vysokohodnotný beton (UHPC). Vlákna tak u směsi UHPFRC zabraňovala porušení vzorků a umožňovala dosažení vyšší únosnosti.



Průměrná hodnota specifické lomové energie G_f byla 5 559 J/m² pro vzorky lité do vertikálních forem a 25 980 J/m² pro horizontálně uložené vzorky. Při zohlednění efektu stěn bednění do vzdálenosti poloviny délky vlákna od stěny bednění, měl tento efekt vliv na více než 24 % lomové plochy. Rozdíly vzhledem k orientaci bednění během ukládání směsi byly poměrně výrazné. Teoreticky by odstranění vlivu efektu stěn bednění bylo možné docílit vybetonováním těles o rozměrech 150×150×700 mm a následně po vytvrdnutí oříznutím všech hran na rozměry 100×100×400 mm. Takto by bylo možné porovnat pouze vliv směru ukládání směsi [50].

Tab. 3 Maximální dosažená zatěžovací síla F_{max} , ohybové napětí σ_y a specifická lomová energie G_f získané ze zkoušky pevnosti v tahu ohybem.

	F_{max} [kN]	σ_y [MPa]	G_f [kJ/m ²]
Vodorovně ukládané vzorky	67,5	30,4	25,98
Svisle ukládané vzorky	20,1	9,1	5,56
Poměr	3,4	3,4	4,7

Hodnoty pevnosti v tlaku byly měřeny na horní a dolní polovině vertikálně ukládaných vzorků a poté byl mezi nimi vypočítán poměr, viz první řádek Tab. 4. Stejně tak na levé a pravé polovině horizontálně ukládaných vzorků a rovněž byl dopočítán poměr mezi nimi. Tyto hodnoty jsou v druhém řádku Tab. 4. Pevnosti v tlaku pro horní poloviny svisle betonovaných vzorků byly v průměru přibližně o 7 % vyšší než pro dolní poloviny. Předpokladem bylo, že obě poloviny vzorků budou mít přibližně stejnou pevnost v tlaku. Neočekávané naměřené výsledky byly přičítány hlavně nedokonalostem ve směsi. Delší vibrace pravděpodobně způsobila slabší tok směsi ve spodní části bednění. To mohlo vést k úniku cementové pasty v místě netěsnosti, a tudíž k mírnému snížení pevnosti vzorků.

Hodnoty tlakových pevností obou polovin (pravé a levé) vodorovně ukládaných vzorků byly rovněž porovnávány. Pevnosti v tlaku byly prakticky stejné pro levou a pravou polovinu vzorku, což naznačovalo významně lepší hutnění v horizontálním směru. Všechny jednotlivé hodnoty a jejich poměry vycházely srovnatelně. U výjimek se tedy jednalo o nedokonale zhutněný vzorek.

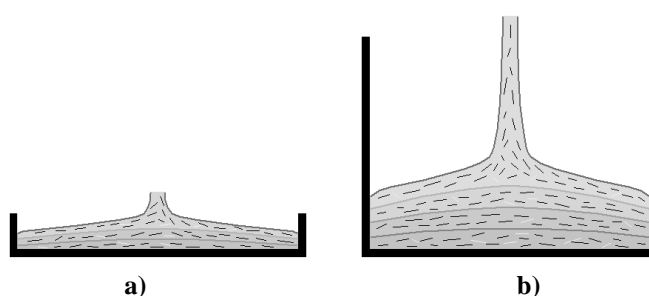
Tab. 4 Porovnání průměrných hodnot pevnosti v tlaku. Horní a dolní (v tomto pořadí) poloviny vzorků svisle odlitých hranolů a levé a pravé (v tomto pořadí) poloviny vodorovně litých hranolů.

	σ_c		Poměr [-]
	1. polovina [MPa]	2. polovina [MPa]	
Vodorovně ukládané vzorky	137,8	128,8	1,07
Svisle ukládané vzorky	151,1	149,2	1,01

5.3 Mechanické zatěžování deskových prvků

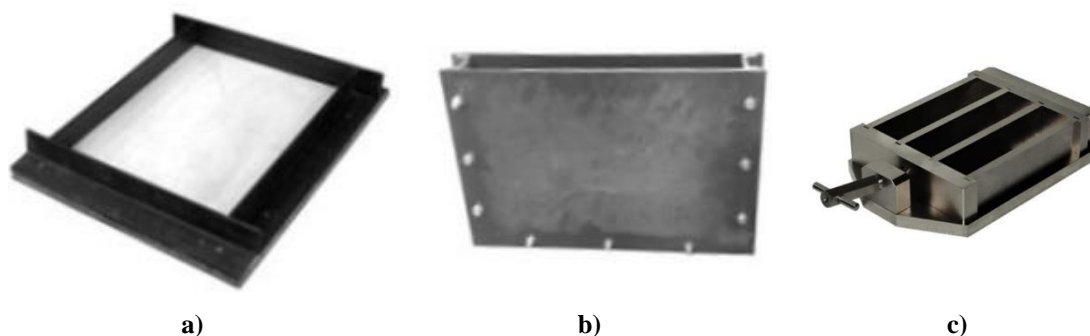
Kromě normových zkušebních těles byly zkouškám podrobeny také desky (přesněji jejich části) a s nimi kontrolní zkušební trámečky. Betonové desky ze směsi UHPFRC o rozměrech 300×400×50 mm byly vyrobeny dvěma způsoby. Oba typy desek měly stejné geometrické proporce, odlišný byl pouze způsob ukládání do rozdílně orientovaných bednicích forem. Proces lití je schematicky znázorněn na Obr. 62.

Testování vodorovně betonovaných deskových prvků bylo navíc oproti hranolovým doplněno o zkoušky vzorků otočených vzhůru nohama. Po provedení mechanických zatěžovacích zkoušek bylo možné skupiny vzorků vzájemně porovnat a získané výsledky rovněž vizuálně srovnat s provedenými simulacemi.



Obr. 62 Schéma lití směsi UHPFRC do speciálního ocelového bednění, a) v horizontální a b) vertikální poloze.

Celkem bylo ze směsi UHPFRC vyrobeno 18 desek, z nichž bylo získáno 63 vzorků. Dvanáct desek bylo odlito do vodorovně umístěného bednění (Obr. 63a) a dalších šest desek bylo odlito do atypického na zakázku vyrobeného vertikálního bednění se stejnými rozměry (Obr. 63b). V klasických vodorovných formách (Obr. 63c) bylo také odlito 6 malých zkušebních trámečků o rozměrech 40×40×160 mm.



Obr. 63 Typy použitých bednění pro vodorovné (a) a svislé (b) desky o rozměrech 300×400×50 mm a pro malé zkušební trámečky s rozměry 40×40×160 mm (c).

Po výrobě byly všechny vzorky ošetřeny a uloženy na dalších 28 dní. Následně byly tyto vzorky zkoušeny na pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku. Z dat získaných při tahové zkoušce tříbodovým ohybem byla vypočítána specifická lomová energie. Cílem experimentu bylo ověřit



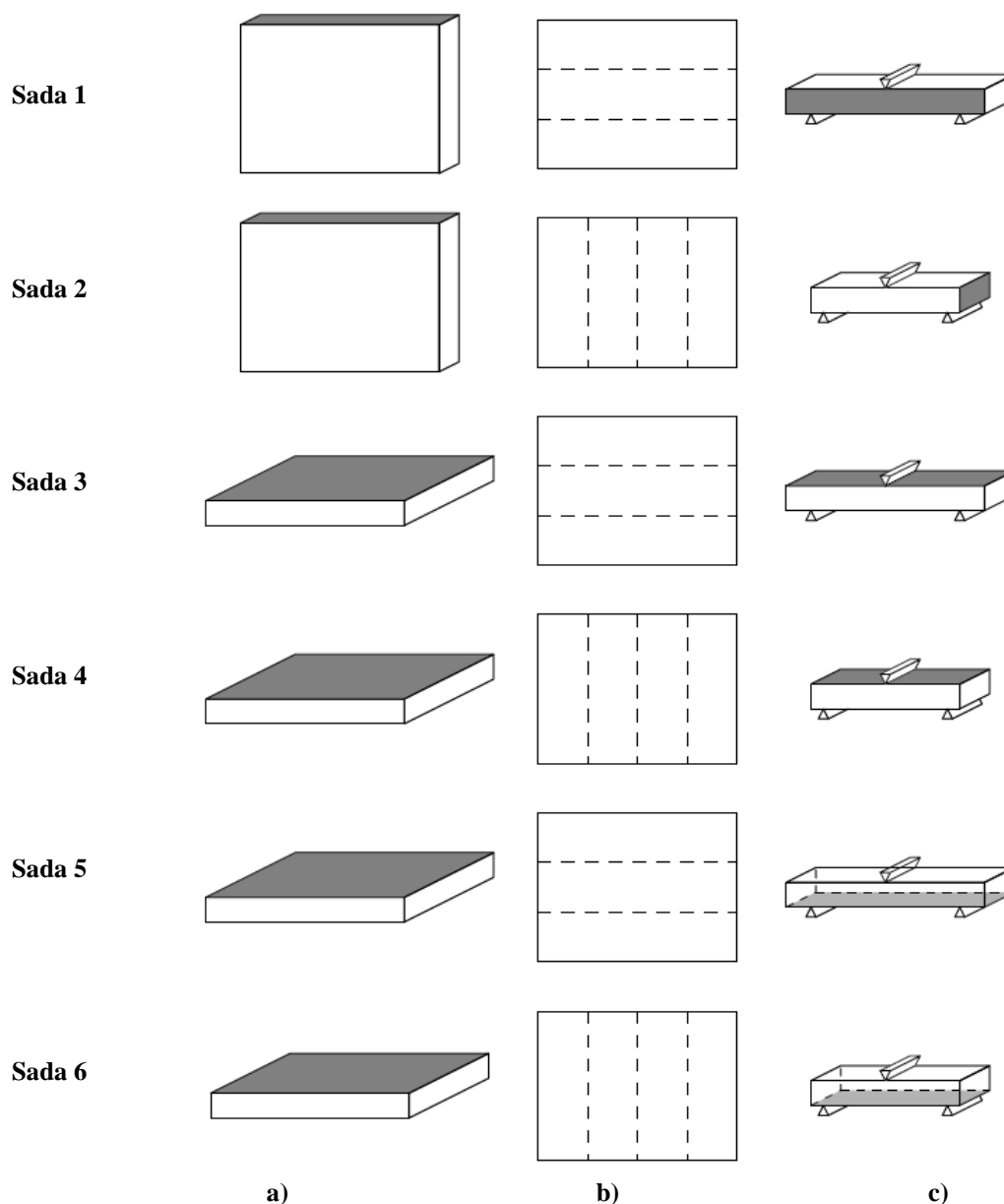
vliv metody lití směsi UHPFRC do speciálního bednění, a tedy i vliv tvaru bednění, na konečnou orientaci vláken a na mechanické vlastnosti ztvrdlého betonového prvku.

Desky byly rozděleny do šesti skupin (sad) po třech deskách, kde každá deska byla rozřezána na 3 nebo 4 kusy. K této výrobě celkem 63 vzorků z původních 18 desek byl použit řezací stroj HILTI, průběh dělení desek je zachycen na Obr. 64. Rozdíl mezi jednotlivými sadami 1 až 6 spočíval v odlišném způsobu lití do bednicích forem nebo v odlišné poloze vzorku během zkoušky pevnosti v tahu. Pozice deskových prvků během ukládání do bednění jsou názorně zobrazeny na Obr. 65 ve sloupci a). Schéma řezu je pak znázorněno na Obr. 65 ve sloupci b). Důvodem pro rozřezání desek na části byly jednak rozměry zkušebního zařízení a zároveň možnost porovnání tahových pevností částí desek související s pravděpodobným množstvím a orientací vláken, které se mohlo v jednotlivých částech lišit.



Obr. 64 UHPFRC desky během procesu řezání, v tomto případě každá na čtyři zkušební vzorky.

Sady 1 a 2 sestávaly z desek odlitých ve svisle orientovaném bednění, kde desky ze sady 1 byly řezány rovnoběžně se dnem a desky ze sady 2 kolmo ke dnu bednicí formy, a tudíž i k předpokládané orientaci vláken. Sady 3, 4, 5 a 6 sestávaly z desek, které pocházely z forem ve vodorovné pozici. Sady 3 a 5 byly řezány podélně (rovnoběžně s delší hranou) a sady 4 a 6 příčně (rovnoběžně s kratší hranou).



Obr. 65 Schéma šesti sad desek pro experimentální program: polohy desek při betonáži jsou zobrazeny na levé straně (a), každá sada obsahovala 3 takové desky, které byly rozříznuty, jak je naznačeno na obrázcích v prostředním sloupci (b) a každý takto odříznutý vzorek byl testován, jak je uvedeno vpravo (c). Šedá oblast označuje horní stranu desky během výroby.

Šest různých poloh konečných vzorků během testování je schematicky znázorněno na Obr. 65c), kde šedá barva označuje horní stranu desky během betonáže. Aby bylo možné zkontrolovat předpoklad, že vlákna procházejí čerstvou směsí směrem dolů, byly vzorky ze sad 5 a 6 záměrně testovány vzhůru nohama. Mechanické vlastnosti materiálu pak byly stanoveny z následujících testů a výpočtů.



5.3.1 Pevnost v tahu ohybem

Zkoušky tříbodovým ohybem, které byly řízeny deformací, byly provedeny na mechanickém zatěžovacím rámu (Obr. 66). Testovacími tělesy byly bloky o rozměrech 400×95×50 mm pro sady 1, 3 a 5 nebo s rozměry 300×95×50 mm pro sady 2, 4 a 6. Z důvodu odřezávání jednotlivých vzorků z UHPFRC desek se jejich rozměry mohly mírně lišit. Všechna tělesa byla zvážena na elektronické váze a změřena posuvným měřidlem s digitálním ukazatelem délky. Rozměrové rozdíly byly jen v několika desetinách milimetrů, případně ± milimetr.

Vzorky byly zatěžovány konstantní rychlostí 1,0 mm/min. Zatěžování zkušebních vzorků pokračovalo až do porušení nebo dokud deformace nedosáhla 30,0 mm. Schéma zatěžování vzorků během zkoušky je zobrazeno v pravém sloupci na Obr. 65. Během testů byla pro každý vzorek zaznamenávána velikost okamžité zatěžovací síly (F) a deformace (ω). Následně byla z naměřených hodnot zatěžovací síly vypočítána pevnost v tahu v ohybu v každém okamžiku pro každý otestovaný vzorek podle rovnice (13), kde L je rozpětí mezi podpěrami, které bylo 300 mm pro sady 1, 3 a 5 a 250 mm pro sady 2, 4 a 6, b je šířka a h je výška průřezu vzorku. Výsledná závislost deformace (průhybu) a pevnosti v tahu jednotlivých vzorků je zobrazena na následujících grafech pro každou sadu. Jelikož chování bylo od určitého bodu deformace téměř lineární, pro lepší vizualizaci byly grafy oříznuty, aby zobrazovaly pouze prvních 10 mm průhybu (deformace).



Obr. 66 Zkouška tříbodovým ohybem na mechanickém zatěžovacím rámu.

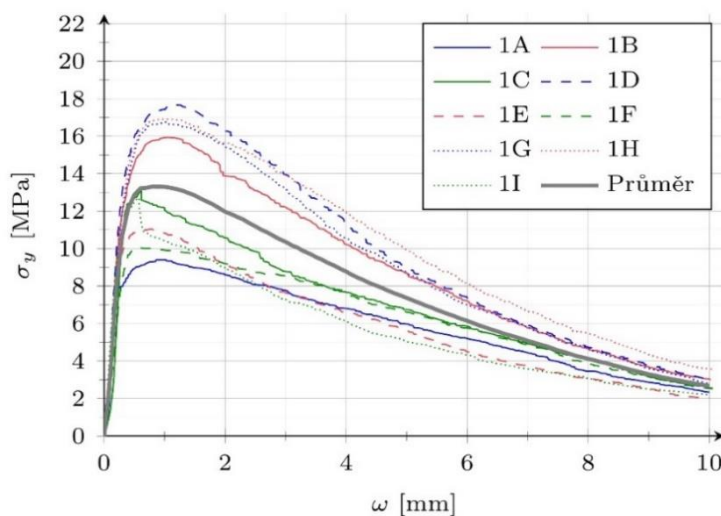
Změřený průhyb v závislosti na dopočtené pevnosti v tahu je zobrazen v grafech na Obr. 67 až Obr. 72, kde každý graf obsahuje křivky pro všechny vzorky z příslušné sady a navíc dopočítanou průměrnou křivku. Průměrné křivky byly vypočteny jako aritmetický průměr

pevností v tahu všech vzorků při stejné deformaci ω . Pro každý vzorek z každé sady jsou v kapitole 5.3.3 v Tab. 5 uvedeny maximální hodnoty pevnosti v tahu ($\sigma_{y,max}$) a energie lomu (G_f) i průměrné hodnoty pevnosti v tahu ($\sigma'_{y,max}$) a energie lomu (G'_f).

Sada 1

Skupina 9 vzorků pro sadu 1 byla vytvořena z 3 desek zhotovených ve svislém bednění. Každá deska byla podélně rozřezána na tři kusy, tj. rovnoběžně se spodní částí bednění (viz Obr. 65). Rozměry vytvořených vzorků byly 400×95×50 mm. Předpokládaná orientace vláken ve vzorcích ze sady 1 by měla být podle Obr. 57c, d a Obr. 62b rovnoběžná se dnem (s delší stranou) vzorku a kolmá k rovině tahové trhliny.

Jak je vidět na Obr. 67, tento způsob ukládání směsi a vedení řezů způsobily orientaci vláken, která u vzorků podpořila pevnost v tahu. Vláknina byla aktivována pomaleji a maximální hodnoty σ_y byly dosaženy při průhybu ω okolo 1,0 mm. Díky lití do svislého bednění byla vláknina rovnoměrněji rozložena přes tloušťku vzorků. Proto jsou křivky závislosti pevnosti v tahu na deformaci hladší a bez výrazných ostrých špiček ve srovnání například se sadami 3, 4 a 6 (Obr. 69, Obr. 70 a Obr. 72), které byly ukládány vodorovně. Celkově vzorky ze sady 1 dosáhly třetí nejvyšší průměrné hodnoty pevnosti v tahu ($\sigma'_{y,max} = 13,31$ MPa) a druhé nejvyšší průměrné hodnoty lomové energie ($G'_f = 10,63$ kJ/m²), viz Tab. 5.



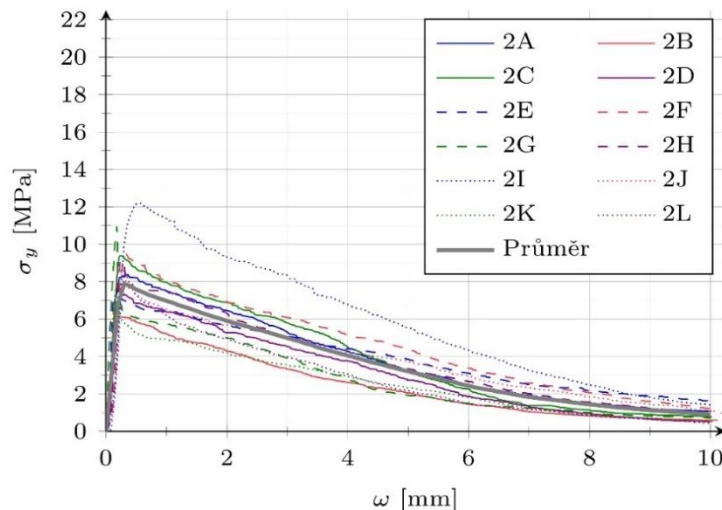
Obr. 67 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 1.

Sada 2

Sada 2 je skupina 12 vzorků z 3 desek odlitých ve svislém bednění. Každá deska byla rozřezána na 4 kusy kolmo ke spodní částí bednění (Obr. 65). Rozměry vytvořených vzorků byly 300×95×50 mm. Protože tyto desky byly odlévány přesně stejným způsobem jako desky ze sady 1, odpovídá orientace vláken také Obr. 57c, d a Obr. 62b. Ovšem kvůli odlišnému směru řezu vzorků byla vlákna v tomto případě orientována paralelně s rovinou trhliny.



Výsledky sady 2 na Obr. 68 ukazují rychle dosažené maximální hodnoty pevnosti v tahu (přibližně při $\omega = 0,25$ mm) a ostře zlomené křivky závislosti deformace na napětí. Tato zjištění naznačují větší křehkost vzorků. Průměrná maximální hodnota pevnosti v tahu ($\sigma'_{y,max} = 7,88$ MPa) a průměrná hodnota lomové energie ($G'_f = 5,47$ kJ/m²) jsou nejnižšími hodnotami ze všech sad (Tab. 5). Všechna tato pozorování ukazují, že zjištěných hodnot pevnosti v tahu bylo dosaženo pravděpodobně jen díky ultra-vysokohodnotnému betonu, ale účinek vláken byl zanedbatelný.



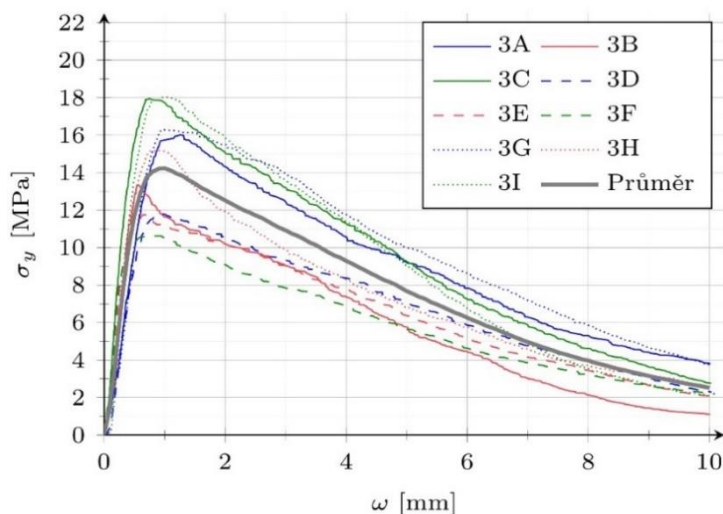
Obr. 68 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 2.

Sada 3

Devět vzorků o rozměrech 400×95×50 mm bylo vytvořeno podélným rozřezáním 3 vodorovně odlévaných desek na tři kusy. Dosažené výsledky korespondují s předpoklady podle provedených simulací uvedených v kapitole 5.1.2, že orientace vláken byla především kolmo ke směru lití směsi, tedy rovnoběžně se dnem bednění (dle Obr. 57b). Vlákná měla navíc mírnou tendenci klesat směsí blíže ke spodní části bednění a vytvářet zde trochu hustší vrstvu. Tento jev se zdá být důvodem, proč sady 5 a 6 dosáhly nižších hodnot σ_y , než sady 3 a 4. Při pohledu shora mají vlákna s dostatečným okolním prostorem tendenci vytvářet v důsledku nalévání soustředné kruhy (Obr. 65a), ale protože vzorky byly vytvořeny rozdělením desek na části, mohla by být orientace vláken v těchto částech považována spíše za všesměrovou.

Výsledky v grafu na Obr. 69 ukazují podobné chování jako vzorky ze sady 1 (Obr. 67). Maximální hodnoty σ_y byly většinou dosaženy mírně před deformací $\omega = 1,0$ mm a na rozdíl od sady 1 jsou vrcholy mírně ostřejší. Vzorky byly testovány na pevnost v tahu ve stejné poloze jako desky vybetonovány (Obr. 65c), tedy s hustší vrstvou vodorovně orientovaných vláken v blízkosti dna, kde byl během testování vytvářen největší tah. Tato skutečnost ovlivnila průměrnou maximální pevnost v tahu ($\sigma'_{y,max}$), která dosáhla hodnoty 14,23 MPa, což je druhá nejvyšší ze všech sad. Průměrná hodnota lomové energie (G'_f) 10,79 kJ/m² je nejvyšší ze všech sad. Nejlepší

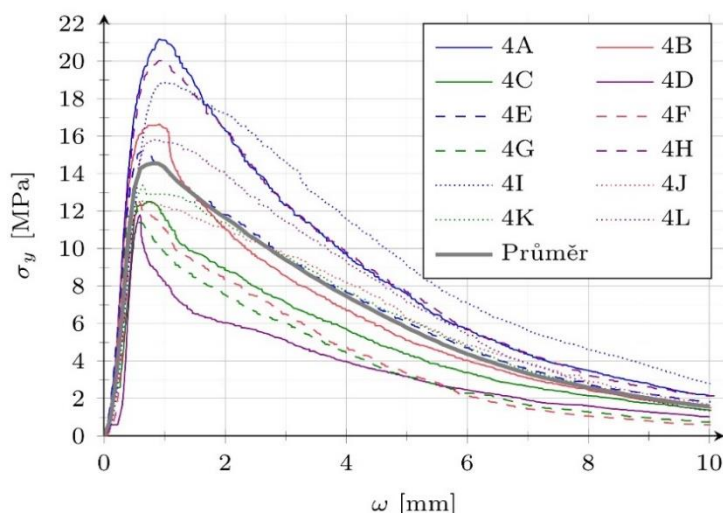
srovnání je se sadou 5 sestávající z identicky vytvořených vzorků, ale testovaných vzhůru nohama.



Obr. 69 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 3. Vzorky byly zkoušeny ve stejné poloze, jako byly betonovány.

Sada 4

Vzorky v sadě 4 byly velmi podobné vzorkům ze sady 3. Desky byly vytvořeny ve vodorovně uloženém bednění, orientace vláken odpovídá popisu pro sadu 3. Rovněž zkouška pevnosti v tahu ohybem byla provedena ve stejné pozici vzorku, jako byly desky odlity, tj. s předpokládanou hustší vrstvou vodorovně orientovaných vláken v blízkosti tažené spodní strany. Jediný rozdíl byl v rozměrech, protože desky byly rozřezány příčně na 4 kusy o rozměrech 300×95×50 mm, což poskytlo celkem 12 vzorků.



Obr. 70 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 4. Vzorky byly zkoušeny ve stejné poloze, jako byly betonovány.

Závislost napětí v tahu a deformace je zobrazena na Obr. 70. Maximální hodnoty pevnosti v tahu byly dosaženy mezi hodnotami průhybu $\omega = 0,5$ a $1,0$ mm. Na křivkách jsou viditelné úzké

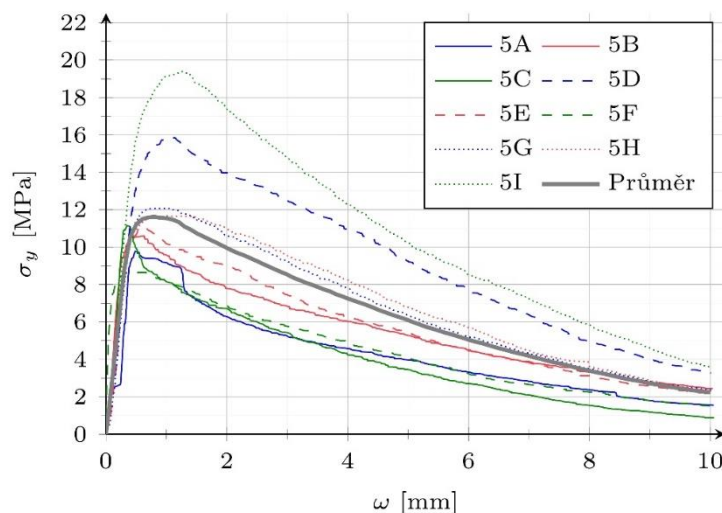


vrcholy. Průměrná hodnota pevnosti v tahu $\sigma'_{y,max} = 14,55$ MPa je nejvyšší ze všech sad a průměrná hodnota lomové energie $G'_f = 10,08$ kJ/m² je druhá nejvyšší. Orientace vláken v půdorysném pohledu by také v těchto vzorcích mohla být považována za všesměrovou a hodnoty $\sigma'_{y,max}$ a G'_f se jen mírně liší od vzorků v sadě 3. Proto lze předpokládat, že řezání desek příčně nebo podélně nemá žádný zásadní účinek na výsledné vlastnosti vodorovně litých desek.

Sada 5

Sada 5 sestává ze skupiny 9 vzorků s rozměry 400×95×50 mm vyrobených z 3 desek odlitých opět v horizontálním bednění. Stejně jako u sad 3 a 4 byla předpokládána orientace vláken zejména rovnoběžně se dnem bednění a spíše všesměrná při pohledu seshora. Vlákná tvořila hustší vrstvu v blízkosti dna, ale na rozdíl od sad 3 a 4 byly vzorky pro zkoušku pevnosti v tahu obráceny vzhůru nohama vzhledem k jejich původní poloze v bednění. Hustší vrstva vláken zde proto nijak nepomáhala ve spodní tažené části, neboť byla na straně horní.

Při pohledu na výsledky v grafu na Obr. 71 je vidět, že maximální hodnota pevnosti v tahu $\sigma_{y,max}$ většiny vzorků a také průměrná hodnota pevnosti v tahu $\sigma'_{y,max}$ je pod 12 MPa ($\sigma'_{y,max} = 11,62$ MPa). To je o více než 2 MPa méně než v případě $\sigma'_{y,max}$ pro sadu 3, kde byly vzorky testovány ve stejné poloze, ve které byly odlity. Průměrná hodnota lomové energie ($G'_f = 8,66$ kJ/m²) je také znatelně nižší ve srovnání se sadou 3.



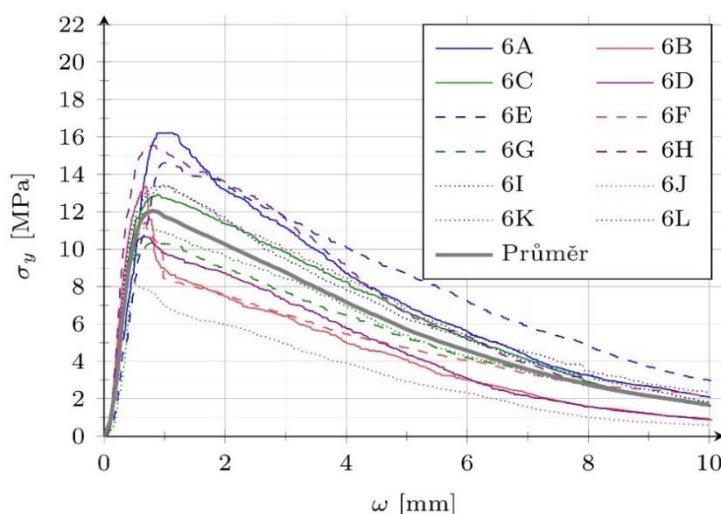
Obr. 71 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 5. Vzorky byly zkoušeny v obrácené poloze, než byly betonovány.

Sada 6

Sada 6 se skládá z 12 vzorků o rozměrech 300×95×50 mm. Vzorky byly také vyrobeny z 3 desek v horizontálním bednění. Pro tuto sadu platí rovněž vše o lítí do bednicích forem a o orientaci vláken, co je zmíněno v předchozích částech pro sady 3, 4 a 5. Pro testování byly tyto vzorky také otočeny vzhůru nohama, stejně jako vzorky sady 5.

Hodnoty pevnosti v tahu (viz Obr. 72) jsou velmi podobné výsledkům pro sadu 5. Průměrná hodnota pevnosti v tahu $\sigma'_{y,max}$ byla rovna 12,04 MPa. Podle očekávání nebylo možné potvrdit vliv směru řezu vzorků na pevnost v tahu. Nižší průměrná pevnost v tahu (ve srovnání se sadami 3 a 4) byla opět způsobena obrácenou polohou vzorků během testování. Pro úplnost hodnota průměrné lomové energie sady 6 je rovna 9,01 kJ/m², což je ve srovnání se sadami 3 a 4 také nižší.

Z těchto výsledků lze odvodit, že vrstva s vyšší koncentrací vláken se skutečně tvoří na spodní straně bednění, a proto vzorky testované vzhůru nohama (sady 5 a 6) dosáhly nižších pevností v tahu.



Obr. 72 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí pro sadu 6. Vzorky byly zkoušeny v obrácené poloze, než byly betonovány.

5.3.2 Specifická lomová energie

Jak již bylo uvedeno dříve, lomová energie je energie potřebná k rozbití vazeb a vytvoření dvou nových povrchů. Pro určení lomové energie z Hilleborgova modelu [103] vypracoval RILEM doporučený postup založený na tříbodovém ohybu [98]. Tato metoda, která je nejčastějším způsobem, jak určit specifickou lomovou energii při lomové analýze betonových konstrukcí, byla použita i tentokrát. Lomová práce je definována jako práce vnější působící síly od počátku zatěžování, až do úplného kolapsu vzorku. Předpokládá se, že veškerá práce se použije na vytvoření trhliny, práce je tedy rovna ploše pod diagramem (viz Obr. 61). Podrobnější popis, definice a způsob výpočtu jsou uvedeny v kapitole 5.2.3.

Specifická lomová energie byla vypočtena z údajů získaných pomocí tříbodových ohybových testů (kapitola 5.3.1) podle rovnice (15). Výpočet byl proveden pro všech 63 vzorků ze všech šesti sad. Jelikož byly vzorky zatěžovány do $\omega = 30$ mm, ω_{max} bylo získáno z lineární interpolace zaznamenaných dat vzhledem k lineární tendenci křivky.



5.3.3 Výsledky a vyhodnocení deskových sad

V Tab. 5 jsou uvedeny maximální hodnoty pevnosti v tahu ($\sigma_{y,max}$) a energie lomu (G_f) a průměrné hodnoty pevnosti v tahu ($\sigma'_{y,max}$) a energie lomu (G'_f) pro všechny vzorky z každé sady. Pátý sloupec Tab. 5 uvádí u $\sigma'_{y,max}$ vždy dvě hodnoty pro každou sadu. Horní hodnota odpovídá maximální hodnotě pevnosti v tahu převzaté z vypočítaných průměrných křivek závislosti a na tuto hodnotu se vždy odkazoval text popisující jednotlivé sady. Dolní hodnota ve složených závorkách odpovídá čistému aritmetickému průměru maximální pevnosti v tahu všech vzorků bez ohledu na příslušný průhyb a tato hodnota je uvedena pouze pro úplnost.

Tab. 5 Výsledné hodnoty maximální pevnosti v tahu $\sigma_{y,max}$, lomové energie G_f a jejich příslušné průměry ($\sigma'_{y,max}$ a G'_f) pro každou sadu.

Sada	$\sigma_{y,max}$ [MPa]	$\sigma'_{y,max}$ [MPa]	G_f [kJ/m ²]	G'_f [kJ/m ²]
Sada 1	1A: 9,39 1B: 15,93 1C: 13,09 1D: 17,70 1E: 11,05 1F: 10,04 1G: 16,77 1H: 16,90 1I: 12,73	13,31 {13,74}	1A: 8,43 1B: 12,31 1C: 9,37 1D: 13,60 1E: 8,27 1F: 9,32 1G: 12,49 1H: 13,68 1I: 8,18	10,63
Sada 2	2A: 8,36 2B: 6,88 2C: 9,38 2D: 7,31 2E: 7,24 2F: 9,45 2G: 10,94 2H: 9,15 2I: 12,21 2J: 8,81 2K: 6,89 2L: 8,30	7,88 {8,74}	2A: 6,28 2B: 3,90 2C: 6,03 2D: 4,58 2E: 6,24 2F: 6,96 2G: 4,21 2H: 5,69 2I: 8,52 2J: 5,70 2K: 3,65 2L: 3,88	5,47
Sada 3	3A: 16,02 3B: 13,34 3C: 17,94 3D: 11,81 3E: 11,76 3F: 10,63 3G: 16,28 3H: 15,18 3I: 18,04	14,23 {14,55}	3A: 12,87 3B: 7,38 3C: 13,48 3D: 9,32 3E: 8,97 3F: 8,45 3G: 14,44 3H: 10,69 3I: 11,53	10,79
Sada 4	4A: 21,16 4B: 16,64 4C: 12,50 4D: 11,78 4E: 15,16 4F: 12,40 4G: 12,44 4H: 20,02 4I: 18,87 4J: 12,58 4K: 13,37 4L: 15,80	14,55 {15,22}	4A: 14,18 4B: 9,97 4C: 8,08 4D: 5,86 4E: 10,41 4F: 6,15 4G: 6,29 4H: 13,81 4I: 14,94 4J: 9,82 4K: 10,67 4L: 10,78	10,08
Sada 5	5A: 9,78 5B: 10,60 5C: 11,15 5D: 15,85 5E: 11,09 5F: 8,66 5G: 12,07 5H: 11,69 5I: 19,38	11,62 {12,25}	5A: 6,07 5B: 7,62 5C: 5,10 5D: 12,18 5E: 7,60 5F: 6,32 5G: 9,46 5H: 8,91 5I: 14,72	8,66
Sada 6	6A: 16,20 6B: 13,35 6C: 12,93 6D: 10,67 6E: 14,62 6F: 11,43 6G: 10,39 6H: 15,56 6I: 13,44 6J: 8,71 6K: 12,12 6L: 13,36	12,04 {12,73}	6A: 11,17 6B: 6,62 6C: 10,53 6D: 7,68 6E: 12,23 6F: 7,17 6G: 7,53 6H: 10,09 6I: 9,94 6J: 4,82 6K: 8,46 6L: 11,92	9,01

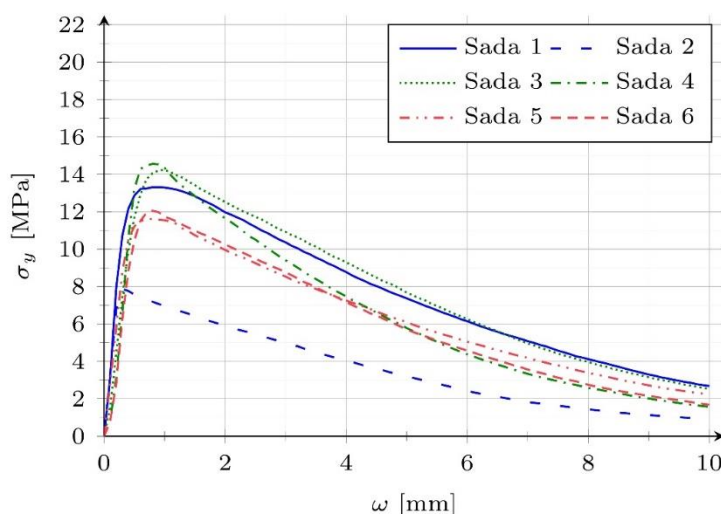
Celkové srovnání průměrných křivek vyjadřujících závislost deformace (ω) a pevnosti v tahu (σ_y) všech sad je zobrazeno v grafu na Obr. 73. Je zřejmé, že sada s nejnižšími hodnotami tahové pevnosti je podle očekávání sada 2. Tyto vzorky byly řezány kolmo na spodní část desek odlitých

ve svislém bednění. Během tahové zkoušky ohybem byla většina vláken orientována paralelně s vyvíjející se trhlinou, a proto nemohla přispět k pevnosti v tahu.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorků vyrobených z vodorovně odlévaných desek, které byly testovány ve stejné poloze jako odlévané. Jedná se o sady 3 a 4, kde byla vlákna orientována většinou paralelně se dnem vzorku a také tvořila hustší vrstvu vláken blízko dna. To lze potvrdit porovnáním se vzorky ze sad 5 a 6, které byly testovány obráceně a dosahovaly nižších hodnot pevnosti v tahu. Je třeba zmínit, že tvorba vrstvy s hustší koncentrací vláken byla pravděpodobně ovlivněna spíše konzistencí a viskozitou směsi než orientací bednění nebo směrem lití.

Téměř stejné průměrné hodnoty pevnosti v tahu jako u sady 3 a 4 bylo dosaženo u vzorků ze sady 1. Vzorky sady 1 byly podélně řezány ze svisle odlévaných desek, proto byla vlákna orientována kolmo na vyvíjející se trhlinu, a tak výrazně zlepšila pevnost v tahu (ve srovnání se sadou 2, kde byly řezy provedeny příčně).

Jak je vidět na Obr. 73, sady 3 a 4 dosáhly téměř stejné průměrné hodnoty pevnosti v tahu, i když vzorky sady 3 byly vytvořeny podélným řezáním desek a vzorky ze sady 4 řezáním desek příčně. To platí také pro sadu 5 a 6. Jen pro sady 1 a 2 je průměrná pevnost v tahu výrazně odlišná. Lze proto odvodit tvrzení, že směr řezu ovlivňuje vzorky ze svislého bednění a neovlivňuje vzorky z vodorovného bednění.

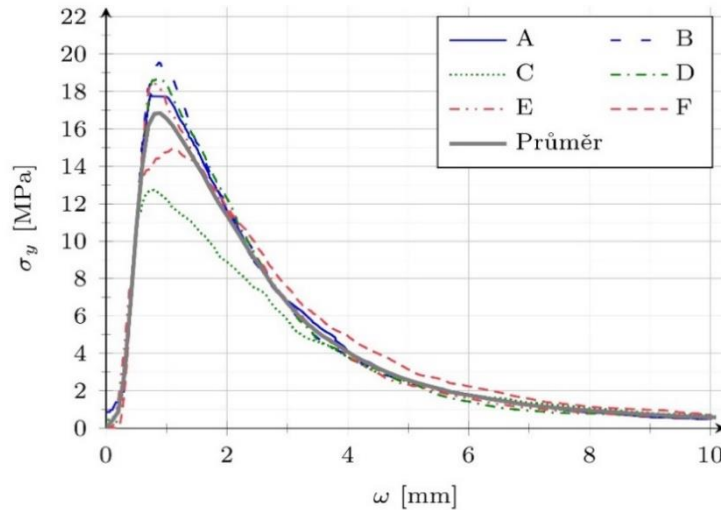


Obr. 73 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí s průměrnými křivkami pro sady 1 až 6.

5.3.4 Zkušební trámečky

Mimo vzorky vytvořené z vodorovně a svisle litých desek byly zároveň ze stejné směsi vyrobeny také malé kontrolní trámečky o rozměrech 40×40×160 mm. Trámečky byly testovány rovněž na pevnost v tahu σ_y , ale hlavně byla zjišťována pevnost v tlaku σ_c . I pro tato tělesa byla vypočítána lomová energie G_f .

Před samotným testováním byly všechny vzorky změřeny a zváženy. Nejprve bylo 6 vzorků (A až F) o rozměrech 40×40×160 mm testováno podle normy [87] třibodovým ohybem na elektromechanickém zátěžovém rámu MTS CriterionTM Model 43. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočítána stejným způsobem, jak bylo uvedeno výše, podle vztahu (13). Výsledky experimentu lze vidět v grafu na Obr. 74 a v Tab. 6.



Obr. 74 Graf závislosti průhybu na tahovém napětí zkušebních trámečků.

Hodnoty naměřené při testování jsou zobrazeny prostřednictvím pevnosti v tahu pro všech šest trámečků v pracovním diagramu. Vynesené křivky závislosti deformace (ω) a pevnosti v tahu (σ_y) v grafu doplňuje dopočítaná průměrná křivka těchto šesti trámečků. Jak je vidět z tohoto pracovního diagramu, křivky trámečků A, B, D a E si jsou velmi podobné v maximálních mezích pevnosti v tahu ($\sigma_{y,max}$) dosažených kolem deformace $\omega = 1,0$ mm. Trámečky F a C dosáhly znatelně nižších hodnot $\sigma_{y,max}$, ale protože všechny trámečky byly vytvořeny a testovány přesně stejným způsobem, je to pravděpodobně jen náhodná výjimka.

Získané hodnoty jsou ve druhém sloupci Tab. 6. Poslední řádek tabulky obsahuje průměrné hodnoty, kde první hodnota odpovídá maximální tahové síle průměrné křivky a hodnota ve složených závorkách je čistý aritmetický průměr. Dosažené hodnoty maximální pevnosti v tahu jsou srovnatelné s hodnotami vzorků ze sad 3 a 4, protože princip ukládání a testování byl stejný.

Po testech třibodového ohybu byly zbývající poloviny trámečků testovány v tlaku ($\sigma_{c,1}$ a $\sigma_{c,2}$). Naměřené hodnoty s celkovou průměrnou hodnotou 103,39 MPa jsou uvedeny v Tab. 6 ve dvou posledních sloupcích. Tato hodnota σ'_c je zapříčiněna hlavně směsí UHPC, protože účinek přidávaných ocelových vláken na pevnost v tlaku je minimální.

Tab. 6 Výsledné hodnoty maximální pevnosti v tahu $\sigma_{y,max}$, lomové energie G_f a pevnosti v tlaku σ_c pro zkušební trámečky.

Trámeček	$\sigma_{y,max}$ [MPa]	G_f [kJ/m ²]	$\sigma_{c,1}$ [MPa]	$\sigma_{c,2}$ [MPa]
A	17,83	14,44	111,25	91,25
B	19,55	14,07	107,50	113,75
C	12,74	13,14	115,00	102,50
D	18,65	14,77	105,63	105,00
E	18,41	13,69	103,75	100,00
F	14,93	14,33	91,25	93,75
Průměr	16,83 {17,02}	14,07	103,39	

Stejně jako u vzorků z deskových sad byla lomová energie (G_f) vypočítána podle rovnice (15), hodnoty jsou ve třetím sloupci Tab. 6. Jelikož byly vzorky zatěžovány do $\omega = 15$ mm, ω_{max} bylo získáno z lineární interpolace zaznamenaných dat vzhledem k lineární tendenci křivky. Všechny trámečky dosáhly téměř stejné hodnoty G_f s průměrnou hodnotou $G'_f = 14,07$ kJ/m². Tyto hodnoty nelze přímo porovnat s hodnotami G_f vzorků ze sad kvůli vlivu efektu velikosti vzorku na výslednou lomovou energii [97]. To potvrzují vyšší hodnoty lomové energie malých trámečků vzhledem k nižším hodnotám větších vzorků ze sad, které byly vyrobeny z naprosto identické směsi.



6 Balistické zkoušky

Současná situace ve světě způsobuje vyšší poptávku po ochranných konstrukcích pro větší pocit bezpečí. Hlavním cílem ochranné konstrukce je zvýšit pravděpodobnost přežití lidí či ochrany jiného obsahu uvnitř konstrukce před ozbrojenou hrozbou z vnějšku. Všechny ochranné stavby jsou základní vrstvou obrany proti ohrožení a každé další vnitřní opatření by selhalo, pokud by ohrožení mohlo proniknout dovnitř. Takové události ani volbu použití zbraňových systémů nebo jejich kombinace nelze předvídat. Využitím informací o objektivním ohrožení a posouzením možných rizik však lze dosáhnout spolehlivých a účinných odhadů takových incidentů a předem se ochránit.

I v dnešní době se stále jako základní ochrana před střelbou z ručních zbraní na vojenské a policejní úrovni a v oblastech ozbrojených konfliktů používají z finančních důvodů zejména pytle s pískem či naplněné jinými sypkými materiály. Konstrukce takových „pytlových stěn“, v některých případech v kombinaci se zákopy, je sice méně nákladná, ale celkově technicky i fyzicky náročná a komplikovaná. Za obvyklých povětrnostních podmínek se takové bariéry relativně rychle rozkládají, poškozené pytle materiál vysypávají, a tím se ochrana snižuje. Stavby se často provádí v nebezpečných oblastech s hrozbou střelby, kde je potřebná rychlá manipulace s obrannými prvky. Odolnost proti extrémnímu zatížení lze zvýšit použitím UHPFRC prvků, které zajišťují snížení křehkosti a zvýšení tažnosti materiálu. Na základě ochranných schopností a uvážení nákladů by měly být konstrukční prvky vyrobené z UHPFRC účinnou ochranou před dopadem střely. Desky z UHPFRC poskytují dobrou balistickou ochranu a jejich relativně nízká hmotnost umožňuje jejich rychlou montáž a demontáž přímo při stavbě ochranných konstrukcí. Navíc vysoce kvalitní výrobky z UHPFRC umožňují dlouhou životnost, i když jsou vystaveny silným povětrnostním podmínkám. Pozitivní výsledky experimentů by mohly vést k zavedení těchto materiálů do stavebních postupů a praxe zejména v konstrukcích vyžadujících ochranu proti střelbě nebo výbuchům [104], [105], [106].

V rámci experimentů byly prováděny balistické zkoušky na deskách z UHPFRC s různou polohou bednění při výrobě. Dále byla zkouška odolnosti vůči dopadu projektilu testována na deskových prvcích z UHPFRC o různé tloušťce a s různým obsahem vláken.

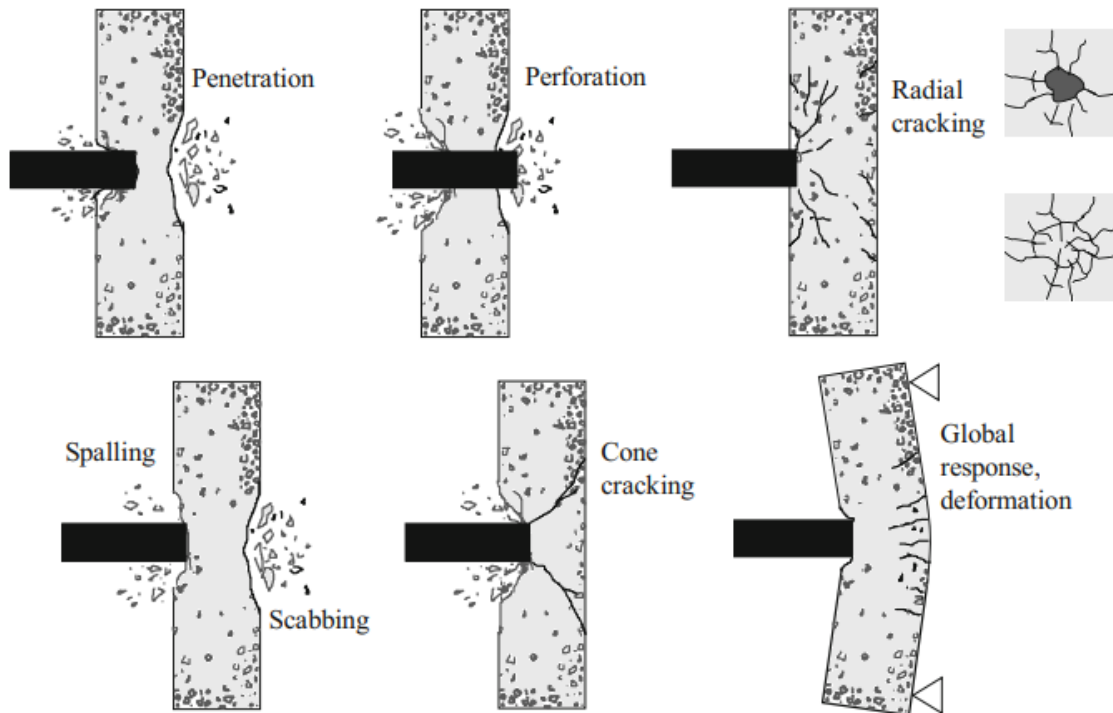
6.1 Účinky dopadu projektilu

Když projektil zasáhne materiál, dojde k tlakové vlně iniciované dopadem. Tato tlaková vlna prochází materiálem k volnému okraji. Vlna se tam odráží a transformuje se do tahové vlny, která se šíří v opačném směru. Dopadající střely lze klasifikovat jako tvrdé nebo měkké podle toho, zda je deformovatelnost střely vzhledem k deformovatelnosti cíle malá nebo velká. U vyztužených betonových konstrukcí, jako jsou ochranné UHPFRC stěny a desky, může nárazové zatížení způsobit jak lokální poškození, tak celkovou dynamickou odezvu konstrukce. Mechanismy lokálního selhání způsobené vysoce koncentrovanou rázovou vlnou bývají pozorovány zejména v první fázi nárazu. Dopad tvrdé střely může dále vést k penetraci a perforaci cíle. Obr. 75 v lokálním i globálním měřítku ilustruje konstrukční následky na betonovém prvku vystavenému nárazu tvrdého projektilu. Tyto následky jsou popsány prostřednictvím jevů spojených s porušením materiálu po nárazu střely. Hlavními poruchovými režimy jsou „*spalling*“ na přední straně a „*scabbing*“ na zadní straně zasaženého prvku [107], [108]. Zmíněné jevy v souvislosti s porušením a poškozením lze charakterizovat následovně [109], [110].

- **Penetrace:** vniknutí projektilu určitou rychlostí do materiálu. Vzdálenost, kterou projektil pronikne do cíle, aniž by došlo k perforaci, se nazývá hloubka penetrace.
- **Perforace:** úplný průchod střely skrz cíl. Střela prostřelí materiál a dále pokračuje se zbytkovou energií ven zadní částí zasaženého cíle. Minimální tloušťka materiálu nutná k zamezení celkového průstřelu konstrukčního prvku se nazývá mez perforace a balistický limit je označení pro minimální počáteční rychlost střely, která je potřebná k dosažení perforace.
- **Paprskovité trhliny (*Radial cracking*):** při nárazu projektilu mohou být výsledkem trhliny, které se radiálně šíří do všech stran. Když střely kolidují s betonovým cílem určitou rychlostí, výsledkem jsou radiální praskliny vznikající z bodu nárazu s cílem a směřující do všech směrů. Při vzniku trhliny skrz celou tloušťku konstrukčního prvku se účinek projeví i na zadní straně zasaženého cíle.
- **Vylupování (*Spalling*):** porušení či vyražení materiálu z nárazové plochy (přední strana zasaženého cíle) po nárazu projektilu. Tvoří se v důsledku překročení lokální pevnosti betonu v tlaku na přední straně. V okolní oblasti nárazu vznikne kráter.
- **Odtrhávání (*Scabbing*):** vyražení materiálu ze zadní strany cíle, které nastává v důsledku odražené vlny způsobující napětí na zadní straně. Minimální tloušťka materiálu, při které nedojde ke scabbingu, se nazývá mez scabbingu.
- **Kuželové trhliny, zátkování a smykové vyražení (*Cone cracking, Plugging*):** během penetrace působí střela na zadní stranu cíle, kde mohou vznikat zakřivené smykové trhliny ve tvaru zvonové zátky. Když střela pokračuje v pronikání skrz, nutí zátku k odstřížení se od

okolního materiálu. Pokud je penetrace dostatečně hluboká, dojde ke smykovému vyražení materiálu na zadní straně.

- **Celková deformace (*Global Response, Deformation*):** celkové porušení konstrukčního prvku, které je způsobeno ohybovými a smykovými účinky od nárazu střely.



Obr. 75 Účinky nárazu střely na betonovou konstrukci [109].

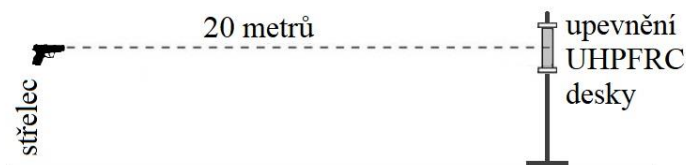
6.2 Vliv orientace bednění

Mechanické zatěžování deskových prvků popsané v kapitole 5.3 bylo doplněno zkouškami balistické odolnosti těchto prvků. Experiment, při kterém byly zkušební desky testovány střelami puškové ráže, je vyhodnocen z hlediska zkoumání vlivu orientace vláken na odolnost cementového kompozitu vůči tomuto extrémnímu zatížení. Součástí výzkumu, který probíhal ve spolupráci s Karlem Hurtigem, je experimentální ověření předpokladu, že uspořádání vláken v deskách vyrobených ve vodorovném nebo svislém bednění se bude lišit, tudíž že budou mít tyto dvě skupiny desek různou odolnost [111].

Pro tuto část experimentálního programu realizovaného na střelnici bylo vyrobeno třicet UHPFRC desek s rozměry 300×400 mm a tloušťkou 50 mm. Patnáct z nich bylo vyrobeno v horizontálně uloženém bednění (viz Obr. 63a) a patnáct ve svislém bednění (viz Obr. 63b). Společně s deskami byly vyrobeny malé kontrolní trámečky 40×40×160 mm pro určení základních mechanických vlastností této směsi. Zátěžové pevnosti zkušebních trámečků po 28

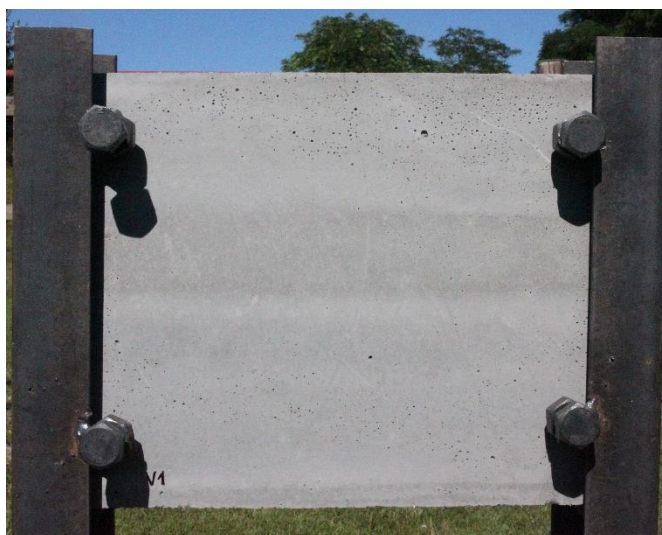
dnech pro pevnost v tlaku se pohybovaly od 130 MPa do 199 MPa a pro pevnost v tahu za ohybu od 15 MPa do 41 MPa [112].

Podmínky testování byly upraveny co nejlíže standardům ČSN EN 1522 [113] a ČSN EN 1523 [114] a přizpůsobeny podle možností střelnice. Deformovatelný projektil náboje s olověným jádrem byl vystřelen z hlavně testovací zbraně ze vzdálenosti 20 m od cílového vzorku, viz zkušební sestava na Obr. 76.



Obr. 76 Schéma testovací sestavy na střelnici.

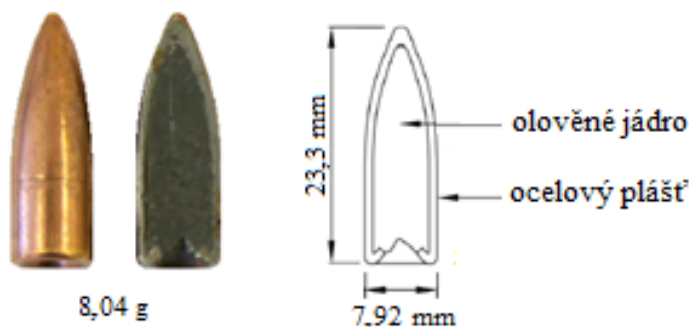
S ohledem na bezpečnost střelce byla mírně navýšena vzdálenost mezi střelcem a cílem oproti normové vzdálenosti, a to z 15 na 20 m. Zanedbatelné snížení dopadové energie střely, ke kterému takto došlo, se pohybovalo pouze v řádech desetin procent. Odolnost betonu proti penetraci byla testována na vzorcích umístěných do speciálního úchytného držáku v ocelové konstrukci se simulací bodových podpěr šrouby v každém rohu (Obr. 77). Deska byla umístěna tak, aby střela desku zasáhla kolmo na její rovinu. Střela tudíž působila na nejmenší možnou hmotu materiálu o tloušťce desky a zatížení tak bylo maximální. Každá deska byla zasažena pouze jednou – do svého středu. Stav desky byl po zásahu zachycen digitálním fotoaparátem a kamerou a následně analyzován [115].



Obr. 77 Umístění desky během balistické zkoušky.

Ve všech případech byly použity celoplášťové střely s ráže 7,62×39 FMJ (z anglického *full metal jacket*) s olověným jádrem (Obr. 78). Projektil o průměru 7,92 mm a hmotností 8 g s počáteční energií až 2208 J dosahuje počáteční rychlosti 743 m/s.

Tento kalibr patří celosvětově mezi nejrozšířenější vojenské puškové ráže. Původem sovětský náboj 7,62 mm vz. 43 byl vyvinutý během 2. světové války. Do výzbroje armády byl však zaveden až po válce, nejdříve pro samonabíjecí pušku SKS a pak pro útočnou pušku AK-47. Po rozpadu východního bloku se začal náboj využívat komerčně i lovecky. Náboj má příznivou balistiku a výhodný výkon, který je vyšší než má většina malých ráží. Další jeho výhodou je minimální citlivost na vnější vlivy odchylovící střelu z její dráhy. Špička projektilu má standardní ogivální tvar. Dnes se používá převážně k lovu a pro útočné pušky, např. AK-47 nebo samopal vzor 58 [116].



Obr. 78 Deformovatelný projektil 7,62×39 FMJ s olověným jádrem [112].

Posouzení dopadu střely bylo založeno na kritériích použitých v práci Vossoughiho a kol. [117]. Účinky jsou rozděleny do následujících čtyř kategorií:

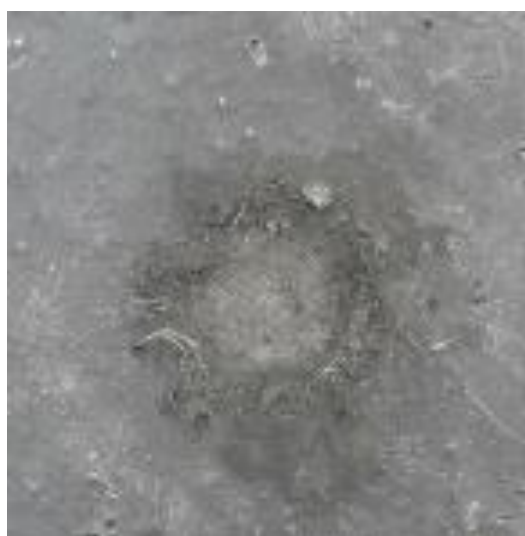
- P – průstřel/perforace (projektil prošel skrz vzorek),
- PL – penetrace, limit perforace (projektil zůstal zaseknutý ve vzorku),
- NP – neperforovaný vzorek (projektil zasáhl vzorek a odrazil se),
- PB – perforovaný a odražený (projektil vytvořil otvor a poté byl odražen nazpět).

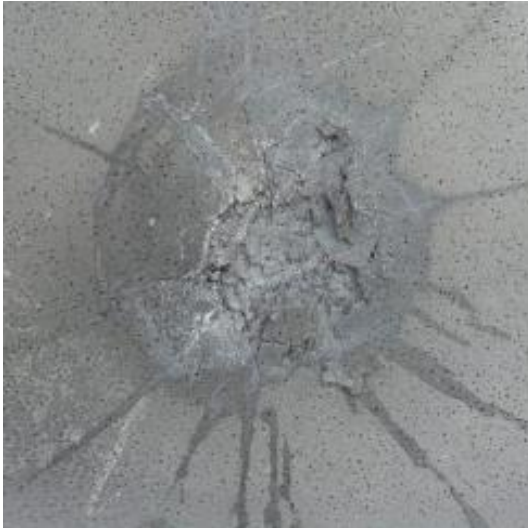
Zjištěné účinky na jednotlivé desky jsou v Tab. 7 [111], [112]. Výsledky pro vzorky z vodorovně uloženého bednění jsou popsány v levé části tabulky a ze svisle uloženého v pravé.

K úplnému průstřelu desky došlo pouze v jednom případě (Obr. 79). Jak je vidět v levé části tabulky, v jednom dalším případě, byl vytvořen otvor, ale projektil se poté odrazil. Vzhledem k tomu, že oba tyto případy pocházejí z jedné výrobní série, lze to považovat za určitý projev vady ve směsi či jinou nedokonalost vzniklou během výroby. V ostatních případech byl projektil po zásahu odražen, ale vytvořil kráter na přední (Obr. 80), případně i na zadní straně desky. V případech, kdy došlo na zadní straně desky k takovému poškození, že materiál byl tahovým namáháním vylomen, se jednalo o tzv. scabbing (Obr. 81). V ostatních případech bylo porušení v důsledku tahového napětí menší. Struktura materiálu a větší pevnost v tahu umožnily pouze deformaci ve formě dutiny. V místě zásahu se v desce tvořily radiální, případně kónické trhliny, ale materiál zůstal přichycen (Obr. 82).

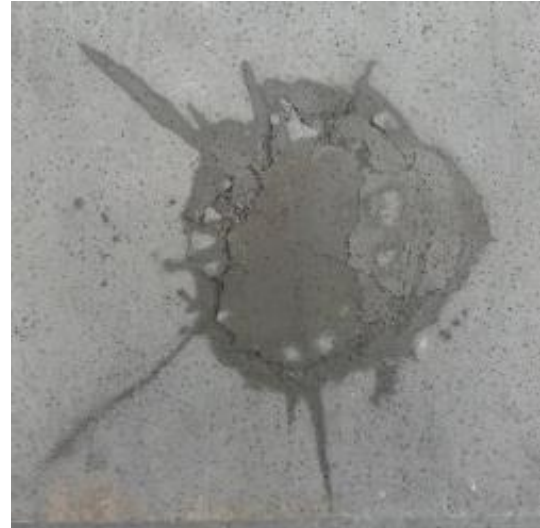
Tab. 7 Účinky nárazu deformovatelného projektilu na desky z UHPFRC.

Horizontálně orientované bednění				Vertikálně orientované bednění			
Účinek střely na desku	Porušení materiálu na zadní straně	Průměrná šířka porušení		Účinek střely na desku	Porušení materiálu na zadní straně	Průměrná šířka porušení	
		Přední strana [mm]	Zadní strana [mm]			Přední strana [mm]	Zadní strana [mm]
NP	×	45	120	NP	×	60	105
NP	✓	55	120	NP	✓	60	80
NP	✓	50	80	NP	×	55	95
NP	×	75	75	NP	×	55	80
NP	✓	55	90	NP	×	60	100
NP	×	60	100	NP	×	55	115
NP	✓	65	100	NP	×	75	80
NP	✓	55	100	NP	×	60	115
NP	✓	50	125	NP	×	70	115
NP	✓	55	105	PL	×	55	100
NP	×	60	120	NP	×	55	75
NP	✓	60	125	NP	×	55	75
P	✓	75	100	NP	×	55	115
NP	×	70	100	NP	×	55	60
PB	✓	55	100	NP	×	60	75
Celkový průměr:		59	104	Celkový průměr:		59	92
Odchylka:		7	12	Odchylka:		4	16


Obr. 79 Perforace UHPFRC desky projektilem [111].

Obr. 80 Kráter po dopadu projektilu na přední straně UHPFRC desky [111].

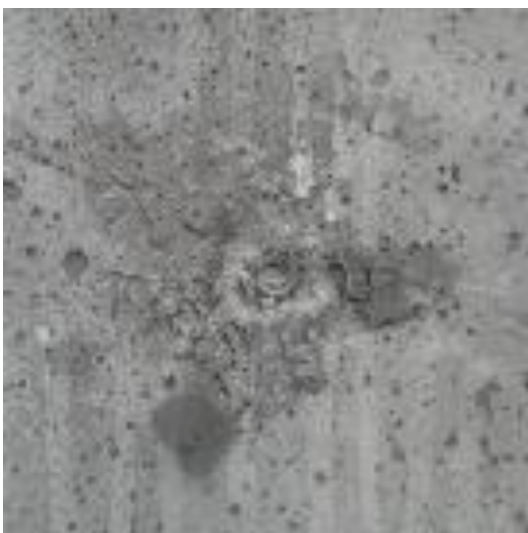


Obr. 81 Vyržený materiál na zadní straně UHPFRC desky [111].

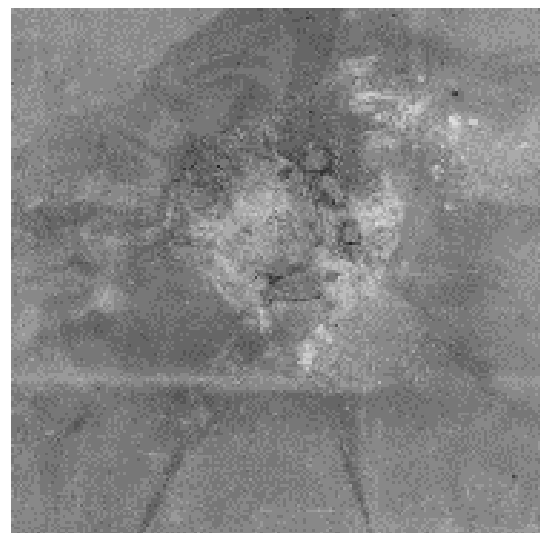


Obr. 82 Přichycený materiál na zadní straně UHPFRC desky [111].

Mezi vzorky vyrobenými ve vertikálně uloženém bednění (pravá strana Tab. 7) došlo k jiné ojedinělé situaci, kdy deska projektil neodrazila a střela uvnitř ní uvázla (Obr. 83). V ostatních případech projektil v desce vytvořil kráter nebo ji jinak viditelně porušil, ale po nárazu se odrazil pryč (Obr. 84). Na zadní straně byly také trhliny (Obr. 85) v důsledku tahového napětí, které bylo způsobeno šířením tlakové vlny po nárazu projektilu stejně jako u horizontálně betonovaných vzorků. K vytržení materiálu na zadní straně těchto desek došlo pouze v jednom případě z patnácti, viz Tab. 7, Obr. 86.



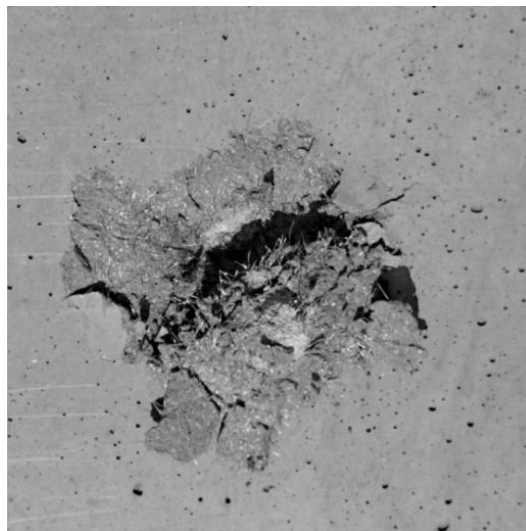
Obr. 83 Projektil uvíznutý v UHPFRC desce [111].



Obr. 84 Kráter po dopadu projektilu na přední straně UHPFRC desky [111].



Obr. 85 Zadní strana UHPFRC desky, kde materiál zůstal po zásahu přichycen [111].



Obr. 86 Zadní strana UHPFRC desky, kde došlo ke scabbingu.

Průměrná šířka kráteru horizontálně ukládaných desek na přední a zadní straně byla 59 a 104 mm. Vytvořené krátery na přední a zadní straně desek vytvořených ve vodorovném bednění měly průměrnou šířku 59 mm a 92 mm. U 34 % horizontálně vyrobených desek materiál na zadní straně zůstal přichycen. Struktura uvnitř materiálu a z ní vyplývající větší tahová pevnost materiálu zapříčinila pouhé odchlípnutí, ale materiál zůstal především vlákny přichycen. Ve zbylých 66 % bylo tahové namáhání na zadních stranách desek nebo ráz způsobený dopadem střely tak významný, že způsobil odtržení. K vytržení materiálu na zadní straně vertikálně vyrobených desek došlo pouze v jednom případě z patnácti vzorků, tj. v 93 % svisle vyrobených desek zůstal materiál stále přichycen na zadní straně desky [111], [112].

V evropské normě ČSN EN 1523 je uveden povinný postup pro přípravu a testování vzorků a následné vyhodnocení výsledků. Zmíněná evropská norma a s ní související norma ČSN EN 1522 stanovují podle jednotlivých tříd (s označením FB 1 až 7) podmínky pro neproniknutelnost nebo odolnost vůči projektilu a vzniku fragmentů. Dle normy ČSN EN 1523 jsou výsledky zkoušky rozděleny podle toho, zda je vzorek prostřelen či nikoliv. Pokud nedojde k průstřelu, rozlišuje se kategorie NS, kdy na zadní straně nedojde k odtržení materiálu, a kategorie S, kdy se na zadní straně materiál po dopadu střely odtrhne. Zkouška je hodnocena jako neúspěšná, pokud po zásahu dojde k perforaci celého vzorku nebo pokud v desce zůstane otvor po kulce způsobený jakoukoli částí vystřelené střely, i když se narušená část znovu uzavře [113], [114], [118].

Při testování nebylo možné komplexně dodržet všechny podmínky dle norem ČSN EN 1522 a ČSN EN 1523, ale vzhledem k použitému typu náboje, lze určit třídu, do které by mohl být materiál zařazen. V normě ČSN EN 1522 (Tab. 8) sice náboj 7,62×39 není uveden, nicméně norma tento typ náboje uvádí v jiné tabulce jako možnou alternativu pro použití jiných typů



nábojů. Pokud by nedocházelo ke vzniku kráteru a vytržení materiálu na zadní straně testované UHPFRC desky, mohl by být materiál začleněn do třídy FB-5 balistické odolnosti.

Celkově provedený pokus ukázal pozitivní vliv vertikálně orientovaného bednění vzhledem k odolnosti desek proti nárazu střely. Vertikálně betonované desky se zde jeví jako vhodnější proti zatížení střelbou, což nebylo prvotním předpokladem experimentu. Nicméně na základě provedeného experimentu lze označit použití UHPFRC desek ze svisle orientovaného bednění jako odolnější proti zásahu projektilem. Z hlediska balistické odolnosti je tedy výhodou všesměrná orientace vláken, která dokáže lépe bránit radiálním trhlinám [111], [112].

Tab. 8 Zatřídění podle evropské normy ČSN EN 1522 [113].

Třída	Druh zbraně	Kalibr zbraně	Střela		Testovací podmínky		
			Druh	Váha [g]	Vzdálenost [m]	Rychlost střely [m/s]	Dopadová energie [J]
FB1	Malorážka	.22LR 5,58 mm	LB/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10	170
FB2	Pistole	9 mm Luger	FJ ¹ /RN/SC	8,0 ± 0,1	5,00 ± 0,5	400 ± 10	640
FB3	Pistole	.357 Magnum	FJ ¹ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940
FB4	Pistole	.357 Magnum	FJ ¹ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940
FB5	Puška	.44 Rem. Mag.	FJ ² /FN/SC	15,6 ± 0,1	5,00 ± 0,5	440 ± 10	1510
FB6	Puška	5,56×45	FJ ² /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10	1800
FB7	Puška	7,62×51	FJ ¹ /PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10	3270
		7,62×51	FJ ² /PB/HC1	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10	3280

- LB – Lead Bullet = olověná střela
- FJ/FMJ – Full Metal Jacket = celokovový plášť souhrnné označení (slitina mědi s niklem, ocelí a vzácně zlatem)
- FJ¹ – Full steel jacket = celokovový plášť ocelový
- FJ² – Full copper alloy jacket = celokovový plášť slitiny mědi
- FN – Flat Nose = plochý hrot střely
- RN – Round nose = ogivální hrot střely
- CB – Cone Bullet = kuželovitý hrot střely
- PB – Pointed Bullet = špička na hrotu střely
- SC – Soft Core (lead) = měkké jádro (olovo)
- SCP1 – Soft core (lead) & Steel Penetrator (type SS109)
- HC1 – Steel hard core (váha 3,7 ± 0,1 g) = tvrdé jádro (ocel)

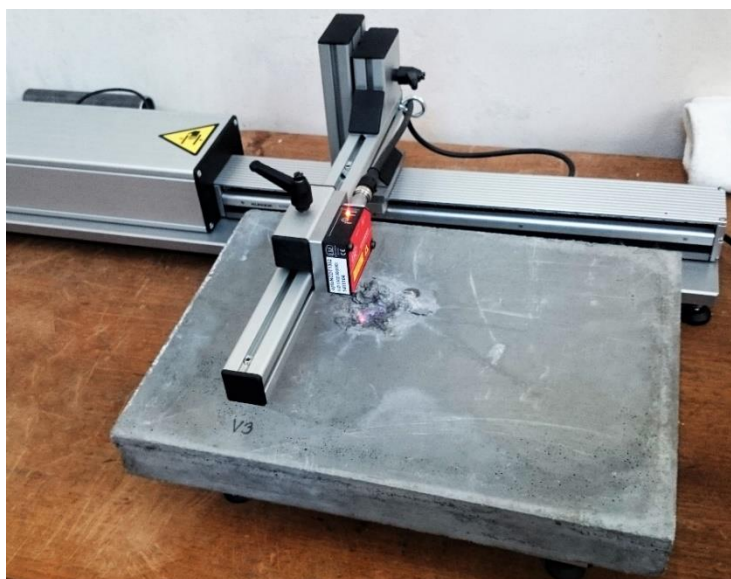
6.2.1 Skenování kráteru

V návaznosti na provedená zjištění byl uskutečněn doplňující experiment. Bylo vyrobeno několik dalších desek horizontálním a vertikálním způsobem a byly opět podrobeny balistickým zkouškám. Oproti původnímu experimentu byla ostřelována spodní strana horizontálně ukládaných desek a projektilem vytvořené krátery byly skenovány liniovým laserovým skenerem.

Pro tento experiment bylo vyrobeno 8 desek z UHPFRC se stejnými rozměry (300×400×50 mm) – čtyři v horizontálním bednění a čtyři ve vertikálním. Vzorky byly umístěny jako v předchozím experimentu do speciálního držáku se simulací bodových podpěr pomocí dvou

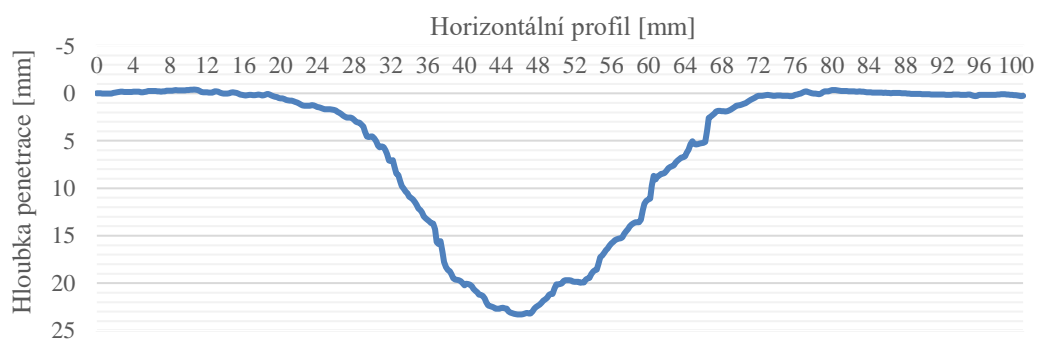
šroubů v každém rohu (Obr. 77). Projektil 7,62×39 FMJ s olověným jádrem (Obr. 78) byl rovněž vystřelen ze vzdálenosti 20 m do středu vzorku (schéma na Obr. 76).

Vyhodnocení bylo provedeno měřením objemu a hloubky kráteru. Měření bylo prováděno pomocí lineárního laserového skeneru složeného z hliníkového rámu a kompaktního laserového skeneru optoNCDT 1302 od společnosti Micro – Epsilon Company (Obr. 87).



Obr. 87 Kompaktní lineární laserový skener optoNCDT 1302 s hliníkovým rámem Kuroda a měření vzorek UHPFRC desky s kráterem po zásahu projektilem.

Měřicí rozsah použitého skeneru je mezi 20–200 mm od vzorku. Maximální rozlišení je počítáno z hodnoty 0,02 % měřícího rozsahu. Pro každou desku byly zaznamenány skeny dvou vzájemně kolmých úseků procházejících středem vytvořeného kráteru na přední straně desky. Z naměřených profilů (Obr. 88) byly zjištěny hloubky průniku a vypočítány objemy kráterů.



Obr. 88 Skenovaný profil vytvořeného kráteru v desce zasažené projektilem 7,62×39 FMJ s olověným jádrem.

Následně byly popsány dva základní způsoby porušení. V prvním případě byl po dopadu střely vytvořen přibližně kuželovitý kráter (Obr. 89) bez scabbingu na zadní straně (Obr. 90). Deska tedy měla v tomto případě dostatečný odpor a podle ČSN EN 1523 lze experiment klasifikovat jako úspěšný.



Obr. 89 Kuželovitý kráter na přední straně UHPFRC desky ze svisle orientovaného bednění.



Obr. 90 Porušení bez scabbingu na zadní straně UHPFRC desky ze svisle orientovaného bednění.

Tento scénář nastal v polovině případů u desek ze svislého bednění a v jednom ze čtyř případů u desek z vodorovného bednění. U jednoho případu vodorovného bednění, kde projektil uvázl uvnitř desky (Obr. 91), byl materiál ze zadní strany sice vytržen, ale stále drátky částečně přichyceny (Obr. 92). Tato situace je však již uvažována jako neúspěch a řadí se mezi ostatní případy, kdy byl vytvořen kráter i na zadní straně (scabbing). U dvou zbylých případů svisle vyrobených desek, kde došlo rovněž ke scabbingu, jsou navíc desky perforovány, viz Tab. 9 (ozn. P), Obr. 93 a Obr. 94.



Obr. 91 Kráter s uvíznutým projektilům na přední straně UHPFRC desky ze svisle orientovaného bednění.



Obr. 92 Částečný scabbing na UHPFRC desce s projektilům uvíznutým uvnitř.

Pokud projektil prošel deskou úplně, měřicí schopnost laseru byla omezená, tento úsek byl mimo rozsah. Zaznamenaná data zde zahrnovala značný skok, který v grafickém znázornění vytvořil přímkou. Hloubku průniku ve vytvořeném kráteru nebylo možné měřit a odpovídala tloušťce vzorku. V Tab. 9 jsou pro tyto dva případy s označením P uvedeny dvě hodnoty hloubky

kráteru. První je pomyslné dno kráteru a druhá hodnota v závorce odpovídá tloušťce desky. Stejným způsobem je popis proveden i v grafu s hloubkou kráteru na Obr. 95. Použitá označení P, PL, NP a PB pro účinek projektilu na desku jsou, jak je zmíněno dříve, inspirována prací Vossoughiho a kol. [117]. Kategorie P opět značí perforaci (projektil prošel skrz vzorek), PL – penetraci (projektil zůstal zaseknutý ve vzorku), NP – odraz (projektil zasáhl vzorek a odrazil se), PB – perforaci a odraz (projektil vytvořil otvor a poté se odrazil).

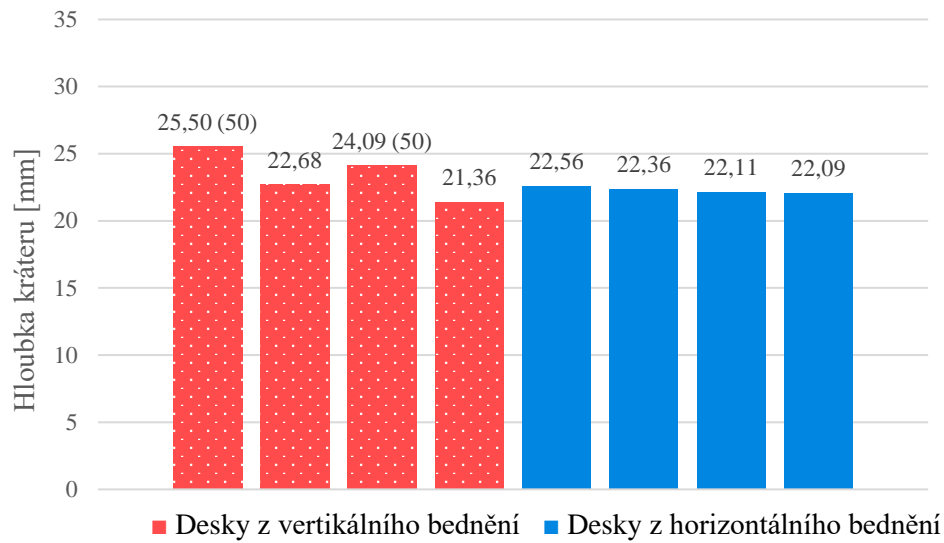


Obr. 93 Přední strana UHPFRC desky, kde došlo k perforaci.

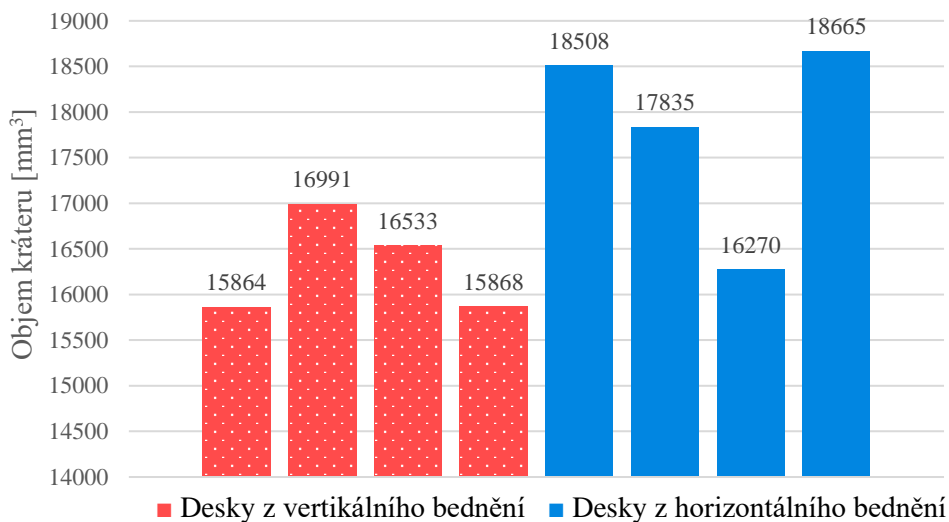


Obr. 94 Zadní strana UHPFRC desky, kde po perforaci došlo ke scabbingu.

Naměřená a dopočtená data znázorněná v grafech na Obr. 95 a Obr. 96 ukazují srovnání svisle a vodorovně betonovaných desek vzhledem k hloubce a objemu vytvořených kráterů. Jak je vidět z Tab. 9, průměrná hloubka kráteru pro svisle lité desky byla 23,41 mm s odchylkou 1,55 mm. Průměrná hloubka kráteru vodorovně litých desek byla 22,28 mm s odchylkou 0,19 mm. Krátery v horizontálně betonovaných deskách dosahovaly v průměru o 1505 mm³ vyšších hodnot objemu než krátery v deskách nalitých do svislého bednění. Toto větší porušení sice značí větší množství ztraceného materiálu, ale znamená to také vyšší množství spotřebované energie. Naopak objemy kráterů ve svisle betonovaných deskách byly menší a zde ušetřená energie pravděpodobně způsobila průnik střely celou deskou. Průměrná hodnota objemu kráteru byla 16314 mm³ s odchylkou 448 mm³ pro svisle odlévané desky a průměrný objem kráteru vodorovně litých desek byl 17819 mm³, odchylka 775 mm³. Výsledky mohou být nekonzistentní i kvůli nehomogenitě betonové směsi, což lze interpretovat případnou segregací kameniva či shluky vláken.



Obr. 95 Porovnání průměrné hloubky kráteru svisle (červená) a vodorovně (modrá) litých desek.



Obr. 96 Porovnání průměrného objemu kráteru svisle (červená) a vodorovně (modrá) litých desek.

Odolnost je klasifikována podle vizuálního vyhodnocení a lokálního měření poškození zkoumaných vzorků. Zdá se, že pokus ukázal opět pozitivní vliv spíše vertikálně orientovaného bednění desek vzhledem k jejich odolnosti proti nárazu střely a množství vyraženého materiálu po zásahu. Použití vodorovného bednění by bylo možné s doporučením, aby desky byly střelám vystaveny hladkou stranou, která při jejich výrobě tvořila dno, z důvodu pravděpodobné hustší vrstvy vláken u spodní strany desky.

Tab. 9 Hloubka a objem kráteru svisle a vodorovně litých desek.

Horizontálně orientované bednění				Vertikálně orientované bednění			
Účinek střely na desku	Porušení materiálu na zadní straně	Hloubka kráteru na před. str. [mm]	Objem kráteru na před. str. [mm ³]	Účinek střely na desku	Porušení materiálu na zadní straně	Hloubka kráteru na před. str. [mm]	Objem kráteru na před. str. [mm ³]
NP	×	22,60	18508	P	✓	25,50 (50)	15864
PL	✓	22,40	17835	NP	×	22,70	16991
NP	✓	22,10	16270	P	✓	24,1 (50)	16533
NP	✓	22,10	18665	NP	×	21,40	15868
Průměrná hodnota:		22,28	17819	Průměrná hodnota:		23,41	16314
Odchylka:		0,19	775	Odchylka:		1,55	448

Na výsledek pokusu se však dá pohlížet ještě z hlediska spotřebované energie. Vlákna jsou orientována především kolmo ke směru lití směsi do bednění a v rovině rovnoběžné se dnem bednění, pokud to tvar a velikost bednění umožňují. Vlákna ve svisle odlévaných deskách mohla být značně ovlivněna stěnovým efektem a po tloušťce desky rozložena všesměrně. Pouze část vláken pak byla umístěna v rovině kolmé k výstřelu. Tvorba menší kráterů a menší množství ztraceného materiálu znamená menší množství spotřebované energie. Některé z těchto svisle odlévaných desek byly projektilem penetrovány přes celou tloušťku.

V deskách odlévaných do horizontálně uloženého bednění byla převážná většina vláken orientována v rovině kolmé na směr výstřelu. Lze předpokládat, že energie potřebná k průniku celou vodorovně betonovanou deskou by byla třeba větší než v případě svisle odlévané, a tím pádem má vodorovný způsob bednění vyšší odolnost proti průniku. Energie zde byla spotřebována k odlupování větších plochých kusů materiálu na přední straně desky, materiál byl vyražen ve většině případů i na zadní straně, ale k úplné perforaci nedošlo. Závěrem by se tedy dalo říci, že rozdíly mezi oběma způsoby bednění se při této balistické zkoušce nikterak výrazně neprojeví.

6.3 Vliv tloušťky prvku

Tato kapitola je zaměřena na experimentální ověření vlivu tloušťky deskových prvků z UHPFRC na odolnost proti nárazu střely pro různé kalibry a tudíž různé energie nárazu. Ovlivnění orientace vláken tloušťkou desky bylo předpokládáno především u tenkých desek, vzhledem k omezenému prostoru a délce vláken. Výsledná klasifikace různých tlouštěk UHPFRC desek, která vychází z výsledků spolupráce s Přemyslem Khemlem [119] byla tříděna podle dostupných evropských norem a vojenských standardů do příslušných stupňů balistické ochrany. Účinnost balistické ochrany testovaných desek byla kontrolována podle standardizovaných testovacích postupů pro osobní balistickou ochranu. Cílem bylo určit potřebnou tloušťku desek,



kteřá zastaví střelu s určitou nárazovou energií, a optimalizaci množství použitého materiálu s ohledem na požadovanou balistickou ochranu. Při zařazení UHPFRC desek o různé tloušťce do jednotlivých stupňů balistické ochrany, bude možné najít různým deskám odpovídající funkci na trhu.

Pro tuto část experimentálního programu uskutečněného na střelnici bylo vyrobeno 24 UHPFRC desek s rozměry 300×400 mm a proměnnou tloušťkou $t = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ a 80 mm. Každá skupina zahrnovala tři vzorky. Společně s deskami byly vyrobeny malé kontrolní trámečky 40×40×160 mm pro určení základních mechanických vlastností této směsi. Průměrné hodnoty zátěžových pevností zkušebních trámečků ve stáří 28 dní byly 122 MPa pro pevnost v tlaku a 14 MPa pro pevnost v tahu za ohybu.

Podmínky testování byly opět přizpůsobeny normě ČSN EN 1522, možnostem střelnice a vybavení. Došlo k úpravě z hlediska použitých střelných zbraní. Z důvodu omezeného výběru v době zkoušek, byly v některých případech použity doplňkové kalibry. S ohledem na bezpečí střelce byla také mírně upravena vzdálenost mezi střelcem a cílem oproti normové vzdálenosti. Pro krátké střelné zbraně bylo zvoleno 6 metrů, tj. o jeden metr více, a pro dlouhé střelné zbraně 20 metrů, tj. navýšení o pět metrů. V obou případech dochází k zanedbatelnému snížení dopadové energie střely pouze v řádech desetin procent. Každá deska byla zasažena třikrát. Jednotlivé výstřely, byly dle normy ČSN EN 1522 mířeny tak, aby zásahy tvořily trojúhelník a vzájemně od sebe byly 10 cm. Seznam použitých zbraní a ráží je uveden níže:

- malorážní samonabíjecí pistole Beretta – střela ráže .22 LR (metrické označení 5,6×15 mm),
- samonabíjecí pistole Glock – střela ráže 9×19 mm Luger,
- revolver Taurus Raging Bull – střela ráže .44 Magnum,
- samonabíjecí pistole Tokarev – střela ráže 7,62×25 mm Tokarev,
- samonabíjecí pistole (samopal) CZ SCORPION EVO 3 A1 – střela ráže 9×19 mm,
- kulovnice – střela ráže .223 Remington,
- samopal vzor 58 (samonabíjecí puška) – střely ráže 7,62×39 mm FMJ s měkkým olověným jádrem nebo s tvrdým ocelovým jádrem,
- samonabíjecí puška FN FAL – střela ráže .308 7,62×51 mm NATO FMJ s měkkým olověným jádrem nebo s tvrdým ocelovým jádrem,
- samonabíjecí puška SVD Dragunov – střela ráže 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem.

Výroba tenčích deskových prvků byla technologicky náročnější, než se předpokládalo, jelikož vlákna ve směsi vytvářela shluky, a tak nebylo možné docílit přesné tloušťky. Zejména u jednocentimetrových a ojediněle i u 2cm desek se proto mohly v rámci prvku a mezi jednotlivými prvky vyskytovat odchylky v rozsahu až ± 5 mm. Desky o stanovené výrobní tloušťce 1 cm této tloušťky při přeměření spíše nedosahovaly. Desky o větší tloušťce vykazovaly pouze nevýznamné odchylky do ± 2 mm.

Nejtenčí zkoušené desky nestačily k zastavení malorážní střely, 1cm desky nezastavily střely ani nejmenší použité ráže .22 o dopadové energii 150 J, nelze je proto zařadit do žádné normové kategorie.

Další série desek o tloušťce 2 cm již bez problému zastavila střely ráže .22, ale střely ráže 9×19 mm Luger s průměrnou tabulkovou energií až 500 J deskami pronikly. Desky o tloušťce 2 cm bylo možné zařadit do kategorie FB-1 dle ČSN EN 1522 (viz Tab. 8).

Ráže 9×19 mm Luger z krátkých ani dlouhých střelných zbraní a dokonce ani ráže 7,62×25 mm Tokarev (650 J) nebyly schopny proniknout 3 cm silnými deskami (viz Obr. 97). Tyto desky zastavily i první střelu kalibru .44 s dopadovou energií přes 1000 J, ale dalším střelám tohoto kalibru už nebyly schopny vzdorovat. Desky tloušťky 3 cm byly proto zařazeny do kategorie FB-3 dle ČSN EN 1522.

Desky o tloušťce 4 cm zastavily s přehledem střely ráže .44, avšak pušky větší ráže s vyšší energií nárazu (kalibr 7,62×39 mm FMJ s olověným jádrem a ráže .223 Remington) snadno pronikly skrz celou tloušťku desky (Obr. 98). Desky tloušťky 4 cm byly zatříděny do kategorie FB-4 dle ČSN EN 1522.



Obr. 97 Deska tloušťky 3 cm po zásahu ráží 9×19 mm Luger na levé straně a dva zásahy od 62×25 mm Tokarev na pravé straně [119].



Obr. 98 Zadní strana desky tloušťky 4 cm s krátery po zásahu kalibrem 7,62×39 mm s olověným jádrem, spodní byl perforován, dva horní nikoli [119].

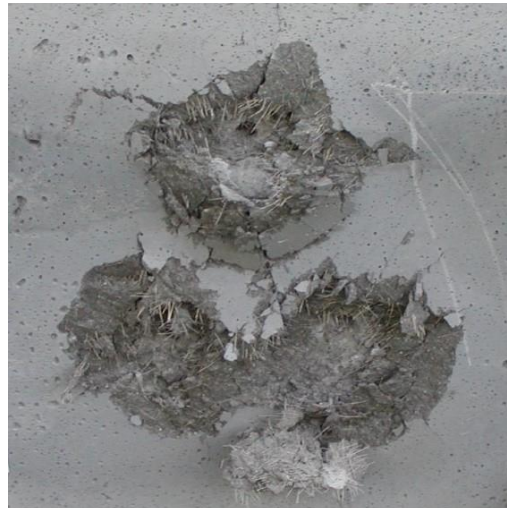
Skupina desek o tloušťce 5 cm byla testována na kalibru 7,62×39 mm s měkkým nebo ocelovým jádrem a civilním kalibrem .223 Remington. Střely ráže 7,62×39 mm FMJ s měkkým jádrem byly zastaveny deskou, ale zadní strana desky byla výrazně poškozena. Stejně tak deska zastavila ráže .223, v tomto případě s mírnějším poškozením na zadní straně. Kalibr 7,62×39 mm FMJ s tvrdým jádrem byl schopen desku prostřelit (Obr. 99). Desky tloušťky 5 cm se zařadily do kategorie FB-5 dle ČSN EN 1522.

Desky silné 6 cm dle očekávání zastavily všechny střely ráže 7,62×51 mm NATO, na zadní straně desky se objevily jen malé trhliny. Střely ráže 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem však

již prošly skrz a zanechaly i krátery na zadní straně desky (Obr. 100). Ani další testovaný kalibr deska nezastavila, ráže 7,62×51 mm NATO FMJ s olověným jádrem deskou prošla bez viditelného odporu. Desky tloušťky 6 cm bylo možné zařadit rovněž do kategorie FB-5 dle ČSN EN 1522.



Obr. 99 Přední strana desky tloušťky 5 cm s krátery po zásahu kalibrem 7,62×39 mm s ocelovým jádrem, spodní byl perforován, dva horní nikoli [119].



Obr. 100 Zadní strana desky tloušťky 6 cm s krátery od ráže 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem [119].

Sedmicentimetrové desky již pohltily všechny zásahy ráže 7,62×51 mm NATO FMJ s olověným jádrem, přičemž na jednom vzorku střely zanechaly jen menší scabbing a na dalším vzorku byla na zadní straně vytvořena větší propojená trhlin bez kráterů (Obr. 101). Všechny výstřely ráže 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem se dostaly skrz zbývající vzorek za vzniku různých kráterů na zadní straně. Desky o tloušťce 7 cm byly dle ČSN EN 1522 zařazeny do kategorie FB-6.



Obr. 101 Odchlipující se část zadní strany desky tloušťky 7 cm po zásahu tří střel ráže .308 [119].



Obr. 102 Deska tloušťky 8 cm s krátery od střel ráže 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem [119].

Od 8cm desky se očekávalo zastavení nejvyššího zvoleného kalibru s energií střely 3850 J. Vzorky těmto zásahům dle očekávání odolaly (viz Obr. 102) a střely ráže 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem byly deskou zastaveny pouze s několika trhlinami na zadní straně. Desky tloušťky 8 cm se tak zařadily do kategorie FB-7 dle ČSN EN 1522.

Experiment lze považovat za úspěšný, jelikož bylo potvrzeno, že desky z UHPFRC poskytují dobrou balistickou ochranu a jejich relativně nízká hmotnost umožňuje rychlou montáž a demontáž. Osoby, kterým je poskytnuta tato ochrana, jsou tak vystaveny menšímu riziku. Vysoká kvalita výrobků UHPFRC umožňuje dlouhou životnost, i když jsou vystaveny silným povětrnostním podmínkám, což umožňuje pro různě silné desky různé užití na trhu podle různých úrovní balistické ochrany.

Lze předpokládat, že policejní aplikace nepotřebují ochranu před vojenskými kalibry, ale je zapotřebí okamžitá montáž a demontáž jakýchkoli zbraní. Proto lze použít desky s nižší tloušťkou (3–5 cm), ale s dostatečnou ochranou proti krátkým zbraním. Případně s možností použít desky lokálně ve více vrstvách. Zatímco vojenské aplikace mohou plně využít potenciál balistické ochrany silnějších (6 cm a více) UHPFRC desek. Většinu desek bylo možné klasifikovat podle ČSN EN 1522 do příslušné kategorie balistické ochrany. Standard ČSN EN 1522 je zaměřen spíše na ruční zbraně než na pušky, kde je několikanásobný rozdíl v dopadové energii. Pro civilní použití by vzhledem k této normě měly stačit desky o tloušťce 5 až 6 cm, které obstály před většinou civilně používaných zbraní. Z hlediska vojenského využití je nevhodnější 8cm deska, která má dle vojenského standardu STANAG balistickou odolnost srovnatelnou s lehkým pancéřovaným vozidlem. Manipulace s takovými prvky je ale mnohem náročnější [111], [112], [119], [120].

Další možnou alternativou ke zvýšení balistické odolnosti je kromě složité úpravy cementové směsi přidávek většího množství ocelových vláken do směsi.

6.4 Vliv množství vláken

Vlastnosti cementových kompozitů vyztužených ocelovými vlákny a stejně tak schopnost materiálu odolávat různému zatížení jsou do značné míry určeny obsahem vláken. Navyšování množství vláken přidaných do cementové směsi je proto dalším zkoumaným parametrem, který by mohl ovlivnit balistickou odolnost deskových prvků. Data k této části experimentálního programu vycházejí ze spolupráce s Michalem Poláčkem [121]. Pro experimenty prováděné na střelnici bylo vyrobeno 12 UHPFRC desek s rozměry 300×400 mm, tloušťkou 50 mm a odlišným obsahem vláken. Testovány měly být deskové prvky s 2, 3, 4 a 5 % vláken v objemu cementové směsi. Avšak jelikož bylo technologicky velmi obtížné docílit 4% obsahu vláken ve směsi a prakticky nemožné vmíchat 5 objemových % vláken do směsi, byly vyrobeny desky s 2, 3, 4 a 4,7% zastoupením ocelových vláken. Pro každou testovací skupinu byly vyhotoveny 3 kusy

vzorků. Poměrně náročné umístění směsi se 4,7 % vláken do připraveného bednění je zobrazeno na Obr. 103.



Obr. 103 Proces „lítí“ do bednění,
a) směs UHPFRC s 4,7 % ocelových vláken po umístění do formy a b) po zavibrování [121].

Společně s deskami byly vyrobeny malé kontrolní trámečky 40×40×160 mm pro určení základních mechanických vlastností každé směsi. Průměrné hodnoty zátěžových pevností zkušebních trámečků jednotlivých směsí v minimálním stáří 28 dní, jsou uvedeny v Tab. 10. Zajímavým zjištěním bylo, že u naměřených hodnot pevností nedochází k přímému nárůstu. Tento jev mohl být způsoben, nedostatečným zavibrováním nebo neúplným smícháním jednotlivých složek. Nebylo možné ani jednoznačně stanovit hranici, kdy může jaké množství vláken mít výraznější vliv na jakou pevnost. S určitostí se dá pouze konstatovat, že i množství nad 2 % přidaných vláken má pozitivní vliv na výsledné mechanické vlastnosti prvku.

Tab. 10 Hodnoty průměrných pevností v tlaku a v tahu za ohybu pro směsi UHPFRC s různým zastoupením vláken [122], [123].

Zastoupení ocelových vláken ve směsi	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
2 %	152	40
3 %	190	45
4 %	162	36
4,7 %	199	34

UHPFRC je pokročilý cementový kompozit s vylepšenými mechanickými vlastnostmi, kde vysoká pevnost v tahu a tažnost materiálu těží hlavně z rozptýlené výztuže. Jak již bylo zjištěno, zvýšení objemového množství vláken má za následek zvýšení jak pevnosti v tahu, tak kapacity rozptylu energie, proto je očekáváno i zvýšení odolnosti proti zásahu projektilem. V podobném

výzkumu [123], kde bylo množství vláken hlavní proměnnou, byly jako parametry poškození stanoveny hloubka penetrace, průměr kráteru, zbytková rychlost, potenciál zbytkové penetrace a trhliny vedoucí ke ztrátě úlomků. Na základě experimentálních pozorování pak bylo zjištěno, že optimální objemový obsah vláken ve směsi UHPFRC s ohledem na uvedené parametry poškození vyvolané nárazem vysokorychlostní střely je okolo 2 %.

K testování balistické odolnosti desek s různým procentuálním zastoupením ocelových vláken byly v provedeném experimentu použity projektily těchto ráží:

- 7,62×39 FMJ s měkkým olověným jádrem (deformovatelný projektil),
- 7,62×39 FMJ s tvrdým ocelovým jádrem (nedeformovatelný projektil),
- 7,62×51 mm NATO FMJ s měkkým olověným jádrem,
- 7,62×51 mm NATO FMJ s tvrdým ocelovým jádrem,
- 7,62×54R mm FMJ s ocelovým jádrem.

Testované desky byly nejprve do svého středu zasaženy „měkkou“ střelou 7,62×39 FMJ, kterou dle ČSN EN 1522 lze zařadit pod FB-5. V případě zadržení či odražení střely deskou byla ráže projektilu navýšena. Každý vzorek byl zasažen maximálně třikrát, jednotlivé zásahy opět tvořily trojúhelník s minimální délkou strany 10 cm. Následně byla vizuálně zkoumána míra lokálního poškození a případný průnik deskou. V případě, že se střela o dané dopadové energii pouze odrazila nebo vytvořila kráter na přední straně desky, případně poškodila stranu zadní, ale neprošla skrz, pokus byl hodnocen jako úspěšný. Podle dané odolnosti vzhledem k porušení a druhu střely, byla vzorkům přidělena příslušná kategorie. Pokud došlo k úplnému průniku a střela desku prorazila, pokus byl hodnocen neúspěšně a vzorek byl zařazen do nižší kategorie. K posouzení experimentu sloužilo zařazení do normové kategorie dle ČSN EN 1522 (Tab. 8). Desky s 2% zastoupením ocelových vláken byly zařazeny do třídy FB-4, přidáním 3 % vláken desky vyhověly třídě FB-5, 4 % vláken FB-6 a desky s množstvím 4,7 % dokázaly zadržet veškeré zásahy (viz Obr. 104 a Obr. 105) a byly zařazeny do kategorie FB-7.

Vyšší obsah rozptýlené výztuže ve formě ocelových vláken může ovlivnit mechanické vlastnosti prvků z UHPFRC. Odolnost vůči nárazu střely vycházející z vysoké pevnosti vysokohodnotného betonu v tlaku se příliš neprojevila. Při zvyšování množství vláken bylo možné zvýšit nejen tahovou pevnost, ale i duktilitu, která je důležitá při zajištění rozptylu energie u nárazu střely plastickou deformací materiálu během zpevnění a otevírání trhliny. Vysoká pevnost v tahu a tlaku cementového kompozitu může být využita výhradně při takovém extrémním zatížení, kdy bude vyloučen křehký lom materiálu, případně když bude zaručeno tahové změkčení.



Obr. 104 Od shora zásahy kalibry 7,62×51 mm s olověným jádrem, 7,62×54R mm s ocelovým jádrem a 7,62×51 mm s ocelovým jádrem na přední straně UHPFRC desky s 4,7 % vláken.



Obr. 105 Od shora zásahy kalibry 7,62×51 mm s olověným jádrem, 7,62×54R mm s ocelovým jádrem a 7,62×51 mm s ocelovým jádrem na zadní straně UHPFRC desky s 4,7 % vláken.

6.5 Vyhodnocení

Počátečním výsledkem je ověření, zda poloha bednění při výrobě vzorků má vliv na odolnost vůči zásahu projektilu. Rozhodující bylo porušení materiálu na zadní straně, které bylo ovlivněno pravděpodobně rozdílným přenosem tahového napětí vyvolaného tlakovou vlnou po dopadu střely. U dvou třetin vodorovně vyrobených UHPFRC desek byl ze zadní strany materiál vytržen, kdežto u svisle litých UHPFRC desek se jednalo pouze o jediný případ z patnácti. Také průměrná šířka porušení trhlinami či kráteru na zadní straně byla u desek z vodorovně orientovaného bednění o 12 mm větší. Průměrná šířka kráteru na přední straně byla pro oba typy desek stejná. V další experimentu, kde byly krátery i skenovány, byly rozdíly v porušení méně významné. K tvorbě scabbingu docházelo u obou typů, i když u vertikálně vyhotovených desek opět v menší míře, ale s větším rizikem perforace.

Z výsledků lze usoudit, že při ostřelování deskových prvků vyrobených ve vodorovném bednění se projevilo efektivněji vystavení té strany desky, která během výroby tvořila dno. Nebo bylo vhodné využít desku, která byla vyrobena svislým způsobem a kde by měly být obě strany rovnocenné. Orientace bednění tedy neměla příliš významný vliv na odolnost UHPFRC desky při jejím zásahu a případném průniku projektilu.

Pokud by měly být desky hodnoceny podle normy ČSN EN 1522, která předepisuje typ náboje a testovací podmínky, a normy ČSN EN 1523, která hodnotí účinky dopadu střely na cíl, vodorovně i svisle vyhotovené desky by byly zaříděny rovnocenně. Účinky na testované UHPFRC desky byly vyhodnoceny jako typ S – střela nepenetrovala cíl, ale po dopadu střely se

na zadní straně testovaného vzorku část materiálu oddělila. Dle typu použitého náboje a odolnosti materiálu byly desky shodně zařazeny do třídy FB-5.

Z hlediska variabilní tloušťky desek lze určit hranici mezi odolností proti krátkým a dlouhým zbraním v deskách o tloušťce 5 cm. Pro civilní účely, kde je nutná velmi rychlá manipulace, jsou vhodné desky do 5 cm. Tenčí 1cm a 2cm desky se neprokázaly být efektivním řešením. Pro vojenské účely lze doporučit tloušťku desek od 6 cm, nejlépe však 8 cm, vše s minimálně 1,5% zastoupením vláken v objemu směsi. Podrobnější rozdělení do kategorií dle ČSN EN 1522 je uvedeno v Tab. 11.

Tab. 11 Výsledné zařazení desek s proměnnou tloušťkou nebo s proměnným zastoupením vláken ve směsi.

Kategorie dle ČSN EN 1522	FB-1	FB-2	FB-3	FB-4	FB-5	FB-6	FB-7
1,5% zastoupení vláken a tl. desky:	-	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm 6 cm	7 cm	8 cm
Desky tl. 5 cm a zastoupení vláken:	-	-	-	2 %	3 %	4 %	4,7 %

Také vyšší procentuální zastoupení vláken ve směsi má pozitivní vliv na absorpci energie při balistické odolnosti, avšak technologické zpracování směsi s vysokým obsahem vláken v objemu je poměrně náročné. Po provedených experimentech a s ohledem na obtížnost technologie zpracování směsi s vyšším zastoupením vláken bylo stanoveno optimální množství vláken na 2–4 % objemu pro prvky z UHPFRC určené k balistické ochraně. Ačkoliv některé zahraniční výzkumy zaměřené na vláknobetony s extrémně vysokým obsahem vláken uvádějí obsah vláken dokonce až 10 % objemu [44]. Tyto speciální směsi pak prakticky tvoří organizovaný shluk vláken slepený jemnozrnným cementovým tmelem. V případě úspěšného vmíchání většího množství vláken do směsi se zajištěním její homogenizace jsou vlákna jednoznačně přínosná. Zařazení desek s různým obsahem vláken dle experimentálních výsledků a kategorií ČSN EN 1522 je rovněž v Tab. 11.



7 Cílená orientace vláken

Vlastnosti cementových kompozitů vyztužených krátkými ocelovými vlákny jsou do značné míry určeny obsahem vláken, geometrií vláken, orientací vláken a vlastnostmi samotné matrice. Nejúčinnější využití kladných vlastností krátkých vláken v cementovém kompozitu je umístěním vláken do místa a směru tahového napětí nebo případně omezením výskytu vláken v tlakové části prvku, kde dominuje tlaková pevnost cementové matrice. Účinnost vláken v kompozitním materiálu klesá ze 100 %, kdy jsou vlákna vyrovnána podél hlavního tahového napětí, až na pouhých 30 %, kdy jsou vlákna rozložena náhodně [52], [124].

Během předchozích experimentů, materiálových zkoušek a také prostřednictvím jiných odborných publikací byl prokázán vliv orientace a uspořádání vláken na výsledné vlastnosti konstrukčních prvků. Z pohledu balistické ochrany nebyl rozdíl nikterak výrazný a poloha bednění zde nehrála tak významnou roli. Naopak při mechanickém zatěžování byl potvrzen značný vliv orientace bednění na orientaci vláken a následně na pevnost vzorků. Následující pokusy byly proto zaměřeny na úmyslnou orientaci vláken do požadovaného směru. Cílem bylo potvrdit, že kromě mechanického způsobu je možné orientovat ocelová vlákna v matici vysokohodnotného cementového kompozitu také magnetickým polem.

Látka je považována za magnetizovanou, když lze její základní molekuly nebo strukturní prvky srovnávat v určitém směru vlivem vnějšího magnetického pole. Předpokladem bylo, že určovat polohu a směr vláken z feromagnetického materiálu lze záměrně pomocí magnetického pole. Tento předpoklad byl podložen několika dřívějšími výzkumy, kde byl podrobně popsán způsob vyrovnávání ocelových vláken v cementových kompozitech prostřednictvím vnějšího stejnoměrného elektromagnetického pole. Obrazovou analýzou rentgenového CT nebo mechanickými zkouškami byla následně zjišťována distribuce ocelových vláken v kompozitu [54], [70], [125]. V některých výzkumných postupech byla magnetická síla doplněna ještě o vibrace k usnadnění otáčení ocelových vláken do požadovaného směru [69], [70].

Pokud je magnetická orientace prováděna prostřednictvím cívky, která je napájena střídavým proudem, je orientace podpořena navíc vibracemi procházejícího střídavého proudu. Metody pro orientování a rozložení ocelových vláken v betonu pomocí elektromagnetů mohou být různé, a tím i ovlivnění koncentrace vláken v kompozitu. Vlákna mohou být vmíchána do čerstvé směsi

před umístěním do bednění, nebo i rozprostřena po povrchu a poté vlivem elektromagnetů vtažena do uložené směsi [125], [126].

Hlavní poznatky uvedených výzkumů zahrnovaly jako nezbytné určení magnetické indukce magnetického pole, zajištění zpracovatelnosti čerstvé směsi a překonání viskózního bránění směsi během rotačního procesu ocelových vláken poháněného magnetickou silou.

7.1 Magnetické pole

Magnetické pole, je vektorové pole, které se vytváří v okolí permanentních magnetů, vodičů, kterými proudí elektrický proud, a kolem jakéhokoli pohybujícího se elektrického náboje. V okolí permanentních magnetů nebo vodičů nesoucích ustálený elektrický proud v jednom směru je magnetické pole stacionární (magnetostatické). Jeho velikost a směr v jakémkoli bodě zůstávají stejné. Magnetické pole v okolí střídavého proudu nebo kolísajícího stejnosměrného proudu neustále mění svou velikost a směr. Pohybující se náboje tedy vytvářejí magnetické pole.

Magnetické pole nutí pohybující se elektricky nabitě částice pohybovat se po určité obloukové dráze. Tento jev reprezentují spojitě silové linie (tzv. magnetické indukční čáry) nebo magnetický tok. Jsou to uzavřené neprotínající se orientované křivky, které vycházejí ze severního magnetického pólu a vstupují do jižního a jejichž tečna v daném bodě má směr vektoru magnetické indukce. Pomocí Ampèrova pravidla pravé ruky lze určit orientaci indukčních čar v okolí elektrického vodiče přímého tvaru. Pokud palec ukazuje sjednaný směr proudu ve vodiči, prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar. Hustota těchto čar udává velikost magnetického pole. V jakémkoli konkrétním bodě v prostoru závisí jak směr magnetické síly, tak její velikost na směru pohybu částice [127], [128].

Magnetické vlastnosti látky jsou dány jejími atomy. O látce lze tvrdit, že je magnetizována, když lze její základní molekuly nebo strukturní prvky srovnat v určitém směru vlivem vnějšího magnetického pole. Feromagnetické látky mají paramagnetické atomy a jejich uspořádání zesiluje magnetické pole. Feromagnetismus je schopnost některých kovů magnetické polarizace ve vnějším magnetickém poli. Pokud je feromagnetický materiál vystaven vnějšímu magnetickému poli, chová se buď dočasně, nebo trvale jako magnet. Pouze feromagnetické látky si mohou zachovat magnetické vlastnosti na atomové úrovni, když je aplikované magnetické pole odstraněno. Všechny permanentní magnety jsou tedy z feromagnetických materiálů. Nejčastěji používanými feromagnetickými prvky jsou železo, kobalt a nikl [129]. Ale také ocelová vlákna přidávaná do betonové směsi jsou feromagnetickým materiálem, proto je možné využít magnetického pole k jejich vyrovnání do požadovaného směru [130], [131].

Ve vědecké komunitě byla určitá pozornost věnována i magnetické úpravě vody. Na toto téma je k dispozici mnoho studií a článků. Zveřejněné účinky magnetické úpravy vody jsou však různé a často si odporují. V mnoha případech vědci uvádějí, že nenalezli žádný významný účinek



magnetické úpravy. V ostatních případech jsou poskytnuty jisté důkazy o účinku. Někteří autoři tvrdí, že je možné ovlivnit konzistenci a tuhnutí betonu magnetizací dipólových molekul záměšové vody, a tím zvýšit jeho pevnost v tlaku a zpracovatelnost, protože magneticky upravená voda má nižší povrchové napětí. Pro většinu takových výzkumů bylo k přípravě magneticky upravené vody použito speciální zařízení [132], [133], [134].

Podle Huchlera a kol. [135] závisí úprava vody pomocí magnetického pole na třech podmínkách, a to hustotě magnetického toku, době vystavení vody magnetickému poli (rychlosti proudu vody) a míře vystavení vody magnetickému poli. Starmer [136] zjistil, že magnetická úprava vody zvýšila rozpustnost iontů ve vodě a ovlivnila pH. Někteří vědci předpokládají, že magnetické účinky ovlivňují povahu vodíkových vazeb mezi molekulami vody a popisují změny ve vlastnostech vody, jako je absorpce světla, povrchové napětí a pH [137], [138]. Další studie naznačují, že magnetická úprava vody pravděpodobně bude mít vliv na tvorbu vodního kamene [139], [140]. Současně se odhaduje, že charakteristická relaxační doba vodíkových vazeb mezi molekulami vody je příliš rychlá a síla aplikovaného magnetického pole příliš malá pro takové trvalé účinky, takže je nepravděpodobné, že by magnetická úprava vody ovlivňovala molekuly vody [141]. Zároveň ale mezi těmi, kteří uvádějí nějaký typ přímého účinku úpravy magnetickou vodou, se zdá být shoda v tom, že účinek je výsledkem interakce aplikovaného magnetického pole s povrchovými náboji suspendovaných částic [141], [142].

Mnozí autoři poukazují také na korozi výztuže vlivem magnetického pole. Korozivzdorné ocele nemusí ovlivnit vůbec. V některých případech může dojít ke zpomalení průběhu koroze v důsledku zadržení paramagnetických iontů u povrchu a zvýšení pasivačního potenciálu. V jiných případech však může působení silného magnetického pole korozi i urychlit [143], [144].

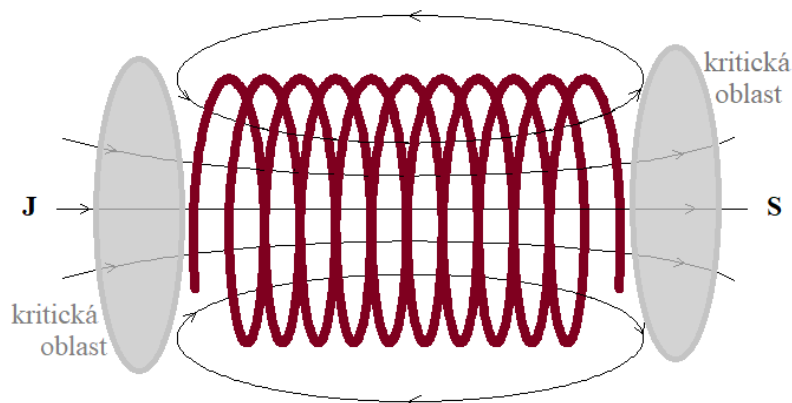
7.2 Modely k orientování vláken

Magnetická orientace vláken závisí především na tvaru magnetického pole. Vlákná se orientují ve směru siločar působícího magnetického pole. Čas potřebný pro požadovanou orientaci vláken ve směsi souvisí s rychlostí, kterou vzorek prochází magnetickým polem a která je rovněž důležitým parametrem. Současně je nutná dostatečná intenzita magnetického pole. Síla působící na vlákno musí být dostatečně velká, aby vlákno překonalo odpor cementové matrice či simulačního sonogelu. Tato odolnost závisí především na viskozitě a mezi kluzu matrice. Nevítanými jevy mohou být shlukování a zbytková remanence vláken, jejichž výskyt hrozí během experimentu. Pokud by vlákna vytvářela shluky nebo se vzájemně přitahovala, což by bylo nežádoucí, bylo by nutné takové chování včas zjistit a zamezit mu. Po magnetizaci může totiž feromagnetické ocelové vlákno působit dočasně jako magnet. To znamená, že si zachová některé z magnetických vlastností a vykazuje tzv. zbytkovou remanenci. Za účelem eliminace všech

nežádoucích aspektů a ověření možnosti orientace v magnetickém poli byly sestrojeny dále popsané jednoduché funkční modely [145], [146].

Jedním ze základních příkladů elektromagnetu je cívka, která je konstruována z mnoha závitů drátu obtočených kolem centrálního jádra. Magnetické pole je přítomno pouze tehdy, když navinutým drátem prochází elektrický proud [132]. Pokud jsou vlákna uvnitř kompozitu orientována průchodem cívky, může nastat následující situace. Magnetické pole je ve středu cívky homogenní, ale na stranách cívky, na okrajích, pole mění svůj směr, viz Obr. 106. Při rovnání vláken v kompozitu pomocí cívky by jak v ultrazvukovém gelu, tak v čerstvé směsi UHPFRC mohla být vlákna orientována do požadovaného směru při průchodu středem cívky, ale po průchodu cívkou by v kritických bočních oblastech hrozila změna orientace vláken do nechtěného směru.

Permanentní magnety nevyužívají elektrický proud, jejich magnetické pole je výsledkem vzájemného vyrovnání velmi malých magnetických polí produkovaných každým z atomů v magnetu. Tato magnetická pole na atomové úrovni vznikají většinou v důsledku rotace a orbitálních pohybů elektronů [129].

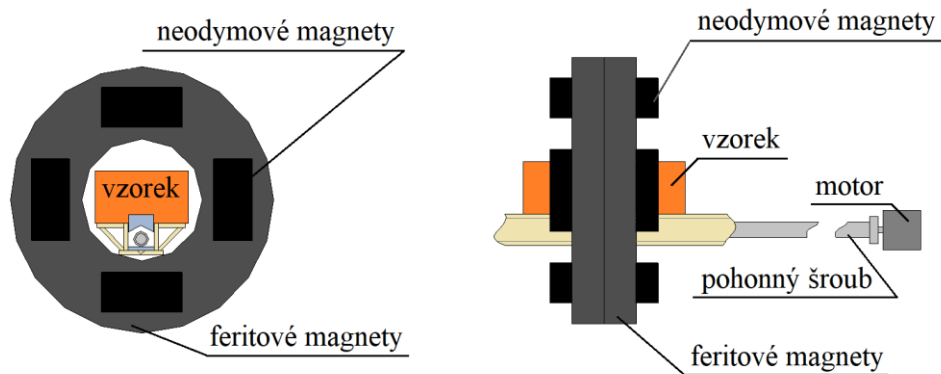


Obr. 106 Schéma siločar magnetického pole cívky korespondující s vyznačenými kritickými oblastmi pro vyrovnávání ocelových vláken.

7.2.1 Magnetový model

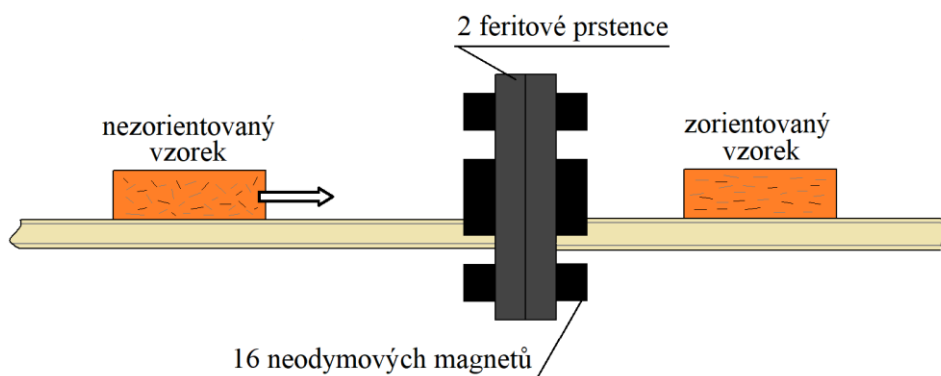
V návaznosti na experimenty se sonogelem v kapitole 5.1 a úspěšně prokázanou možností orientace vláken pod různými vnějšími vlivy (viz výsledky mechanických zkoušek v kapitole 5.2) byl studentkou Kristýnou Takáčovou s pomocí odborníků z Fakulty elektrotechnické ČVUT navržen a zkonstruován jednoduchý prototyp funkčního modelu k orientaci ocelových vláken. Tento funkční model s několika magnety byl sestaven tak, aby zajišťoval rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem a umožnil orientování vláken z feromagnetické látky s malou remanentní magnetizací. Permanentní magnety byly zvoleny pro jejich jednoduchost, trvanlivost a eliminaci nutnosti zajišťovat elektrické napájení oproti cívce. Takový magnetický systém byl schopný generovat podobné magnetické pole jako je magnetické pole generované cívkou

s elektrickým proudem. Míra orientace pohybujícího se vzorku magnetickým polem závisela na rychlosti pohybu, na viskozitě vzorku a na intenzitě magnetického pole. Magnetické pole modelu bylo tvořeno sadou magnetů – dvěma feritovými magnetickými kroužky s vnitřním průměrem 64 mm a vnějším průměrem 140 mm a osmi bloky neodymových magnetů s rozměry 10×20×42 mm (Obr. 107).



Obr. 107 Schéma konstrukce magnetického systému se vzorkem, čelní pohled (vlevo) a boční pohled (vpravo).

Změnou počtu neodymových magnetů bylo možné upravovat magnetickou indukci v oblasti, ve které se vzorky pohybovaly. Vzorky procházely generovaným magnetickým polem po pohyblivém páse středem prstencové soustavy magnetů pomocí umístěného unašeče, pohonného motoru a nemagnetického šroubu. Ocelová vlákna ve směsi byla během průchodu postupně orientována ve vytvořeném magnetickém poli (viz schéma na Obr. 108).

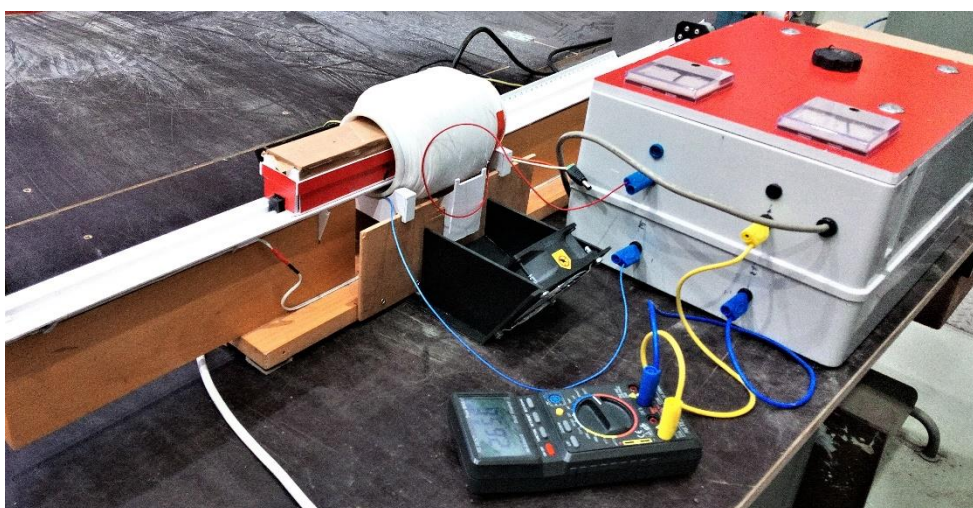


Obr. 108 Schéma průchodu vzorku magnetickým polem

U použitých vláken byla před přidáním do směsi vzorku změřena zbytková remanence, která určuje míru zmagnetizování magnetickým polem po ukončení jeho působení. Naměřená hodnota 1,16 mT je velmi nízká a nemá vliv na používání konstrukcí z magneticky upravených prvků. Rychlost posunu vzorku byla řízena napájecím napětím hnacího motoru. Jednotlivé průchody vzorků magnetickým polem byly zachyceny kamerou pro možnost dalších výpočtů. Rychlost pohybu vzorku byla vyhodnocena ze zaznamenaného času a polohy vzorku [145], [147].

7.2.2 Cívkový model

Při magnetické orientaci vláken cívkou, byl průběh experimentu podobný jako u magnetového modelu. Jediným rozdílem byla náhrada magnetového mezikruží za cívku napájenou střídavým proudem (Obr. 109). Byla použita cívka s vnitřním průměrem 90 mm, vnějším průměrem 130 mm a 1000 závitů měděného drátu o průměru 1,8 mm. K napájení byl použit univerzální zdroj střídavého proudu. Vibrace způsobené napájením cívky střídavým proudem by měly navíc usnadnit vyrovnávání vláken během působení magnetického pole. Vibrováním betonu dochází k poklesu smykového napětí a odpor cementové matrice způsobený pohybem vlákna proto klesá. Během experimentu byla zjišťována ideální frekvence, která by dle předpokladů výrazným způsobem podpořila cílenou orientaci. Frekvence v rozmezí 20–400 Hz byla volena prostřednictvím zdroje, stejně tak byl měněn proud 2–8 A, který ovlivňoval magnetickou indukci. Výsledky měření na sonogelu s vlákny však neprokázaly, že by velikost frekvence pole mohla mít vliv na prováděnou magnetickou orientaci vláken ve směsi. Vzhledem k zanedbatelnému vlivu byla jednoduše ponechána frekvence 50 Hz podle sítě [148].



Obr. 109 Konstrukční systém cívky s pohyblivým pásem pro orientaci vláken v čerstvé směsi UHPFRC.

Podle úspěšnosti experimentální orientace sonogelu s drátky v magnetovém modelu byla prostřednictvím napájení nastavena stejná magnetická indukce o velikosti 55 mT, jejíž dostatečná hodnota byla potvrzena jako hlavní parametr i pro úspěšnou magnetickou orientaci cívkového modelu [53], [148].

Sonogelové vzorky (40×40×160 mm) byly zdokumentovány před a po průchodu magnetickým polem a vliv byl vizuálně potvrzen, viz následující kapitola.

7.3 Magnetické orientování ocelových vláken v sonogelu

Pro experiment byla volena stejná ocelová vlákna o délce 13 mm, jako byla použita do směsi UHPFRC a jsou popsána v kapitole 4.1. Rovněž množství vláken přidávaných do sonogelu zůstalo zachováno, a to objemovým zastoupením 1,5 %. Vlákna byla orientována v prostém sonogelu a ve vodou zředěném sonogelu. Sonogel s přídavkem ocelových vláken byl umístěn do připravených nádob o rozměrech 45×75×23 mm. Tyto vzorky se poté pohybovaly zvolenou rychlostí magnetickým polem. Míra orientace byla pozorována v závislosti na rychlosti pohybu vzorku magnetickým polem, intenzitě magnetického pole a viskozitě vzorku. Bylo vyzorováno, že naměřené rozdíly v hodnotách viskozity zředěného a nezředěného sonogelu (bez vláken) v rozsahu 370 až 450 Pa·s výrazně neovlivňují míru orientace [53]. Jelikož viskozita čerstvé betonové směsi se může při každé výrobě lišit, tyto drobné nuance by při zachování receptury neměly orientování ovlivnit. Výsledná poloha vláken byla hodnocena vůči ose magnetického pole a zároveň směru pohybu. Za úspěšné vyrovnání vláken byla z hlediska praktického využití považována jejich poloha v rozmezí do $\pm 30^\circ$ od osy pohybu [52].

Provedený experiment prokázal funkčnost navrženého modelu úspěšnou magnetickou orientací ocelových vláken v sonogelu. Dosažený výsledek je možné vidět na Obr. 110 a Obr. 111, kde je srovnání vzorku před a po průchodu magnetickým polem. Rychlost 20 mm/s byla experimentálně zjištěna jako nejoptimálnější k vyrovnání vláken.



Obr. 110 Vzorek sonogelu s náhodně rozptýlenými vlákny před průchodem magnetickým polem.



Obr. 111 Vzorek sonogelu se zorientovanými vlákny po průchodu magnetickým polem.

Nejmenší magnetická indukce, která byla dostatečná pro úplnou orientaci vzorků o různé viskozitě, měla hodnotu 55 mT. Jednalo se o úplnou sestavu feritového mezikruží a osmi neodymových magnetů. Tato sestava stačila i pro zorientování vzorku o nejvyšší viskozitě (nezředěný sonogel). Při ponechání pouze feritových magnetů byla intenzita magnetické indukce 30 mT. Soustava feritového mezikruží a 4 neodymových magnetů, vytvářela pole o intenzitě 40 mT až 50 mT. Obavy z reorientace vláken do nežádoucích směrů v krajních oblastech magnetického systému se nepotvrdily [53], [147].

Stejného výsledku bylo dosaženo pro „vláknosonogelové“ vzorky s rozměry 40×40×160 mm na cívkovém modelu. Vlákna byla po průchodu magnetickým polem úspěšně vyrovnána do požadovaného směru.

7.4 Orientování ocelových vláken ve směsi UHPFRC pomocí magnetického pole

Po ověření funkčnosti navržených modelů na sonogelu a potvrzení, že magnetická orientace ocelových vláken pomocí vytvořeného magnetického pole je proveditelná, bylo přistoupeno k testování UHPFRC. Vzorky ze směsi UHPFRC byly vyrobeny v rozměrech 40×40×160 mm a s objemovým zastoupením vláken 0,75 nebo 1,5 %. Vzorky, které byly po nalití do forem z nemagnetického materiálu (Obr. 112) magneticky zorientovány, byly následně porovnány se vzorky, které byly vybetonovány klasickým způsobem do ocelových forem a nebyly vystaveny magnetickému působení. U vzorků s rozdílným procentuálním zastoupením vláken byla vzájemným srovnáním pozorována míra uspořádání vláken a jejich „ochota“ k orientování magnetickým polem.



Obr. 112 Plastová forma na výrobu UHPFRC vzorků určených k magnetické orientaci.

7.4.1 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní monitorování disperze vláken má zásadní význam pro spolehlivé předvídání strukturálních vlastností prvků vyrobených z vláknů vyztužených cementových kompozitů, jejich kontrolu kvality během výroby a možnosti jejich využití [65].



Měření magnetické indukčnosti nebo impedance

Nedestruktivní metody ke zjišťování orientace ocelových vláken v betonu jsou zpravidla založeny na principu rozdílných magnetických vlastností vláken a betonu. Stáří betonu zde nemá na měřené výsledky významný vliv, protože na rozdíl od narůstající pevnosti se uspořádání vláken po ztvrdnutí nemění. Ocelová vlákna jsou feromagnetická a mají tu vlastnost, že mění magnetické pole kolem sebe. Permeabilitu betonu bez feromagnetických vláken lze považovat za shodnou s permeabilitou okolního vzduchu (vakua), magnetické vlastnosti UHPFRC vzorků jsou proto dány obsahem a orientací vláken. Efektivní permeabilita je maximální v případě, že jsou vlákna orientována ve směru siločar magnetického pole, tj. vyrovnaná ve směru pohybu magnetickým prstencem nebo cívkou. Pokud jsou vlákna orientována kolmo na elektromagnetické pole, efektivní permeabilita je minimální. Obdobně pro nahodilé uspořádání neorientovaných vzorků bude permeabilita výrazně menší než pro cíleně orientované vzorky. Nedestruktivní měření orientace (a množství) vláken prakticky spočívá v měření elektrického odporu, magnetické indukčnosti nebo impedance. Vlákna ovlivňují indukčnost senzoru (zpravidla indukční cívky), který je obalen kolem vzorku. Například AC-impedanční spektroskopie může sloužit jako účinný nástroj pro nedestruktivní sledování disperze vláken v čerstvém i ztvrdlém vlákny vyztuženém cementu [149], [150], [151].

Podobná metoda pro detekci hustoty a orientace vláken je založena na použití sondy citlivé na magnetické vlastnosti ocelových vláken. V případně napájení střídavým proudem, záleží na jeho frekvenci. Přítomnost a relativní poloha ocelových vláken modifikují tok spojený s navinutím sondy, což vede ke změně impedance. Průměrnou lokální koncentraci a orientaci vláken lze hodnotit měřením obměněné indukčnosti sondy. Při pokusu bylo zjištěno, že směr, ve kterém byla měřena maximální hodnota indukčnosti, se s největší pravděpodobností shodoval s preferenčním uspořádáním vláken. Výsledky se také zdají být v souladu s předpokládanou kinematikou toku lití, jakož i s účinky způsobenými hranicemi stěn bednění. Metoda se vyznačuje dobrou citlivostí a snadným používáním, protože vyžaduje pouze jednoduché opření sondy o povrch vzorku. Výhodou je vysoký stupeň opakovatelnosti a nízká nejistota měření, a to i např. na svislých prvcích nebo deskách přístupných pouze z jedné strany [65].

Měření činitele jakosti cívky

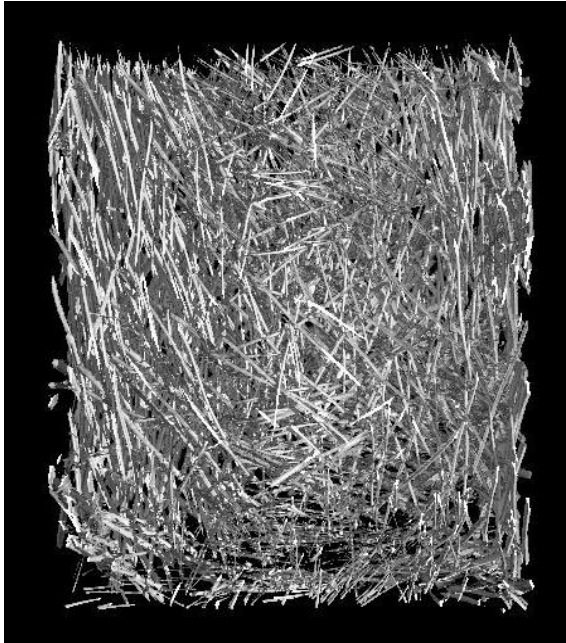
Měření činitele jakosti cívky není v odborné literatuře často používanou metodou ke zjišťování orientace vláken. Ale i tato nepřímá nedestruktivní metoda je založena na magnetických vlastnostech materiálu. Jak již bylo řečeno, permeabilitu UHPFRC ovlivňují ocelová vlákna, jelikož hodnota permeability samotného cementového kompozitu i sonogelu je prakticky shodná s okolním vzduchem. Na trámečcích byl činitel jakosti Q měřen pomocí impedančního analyzátoru Agilent E4991A. K měření byla použita cívka s 27 závitů měděného

drátu o průměru 1,8 mm. Kromě vlastností cívky záleželo při napájení střídavým proudem také na jeho frekvenci. Sledované měření probíhalo v rozsahu 1–3 MHz [147].

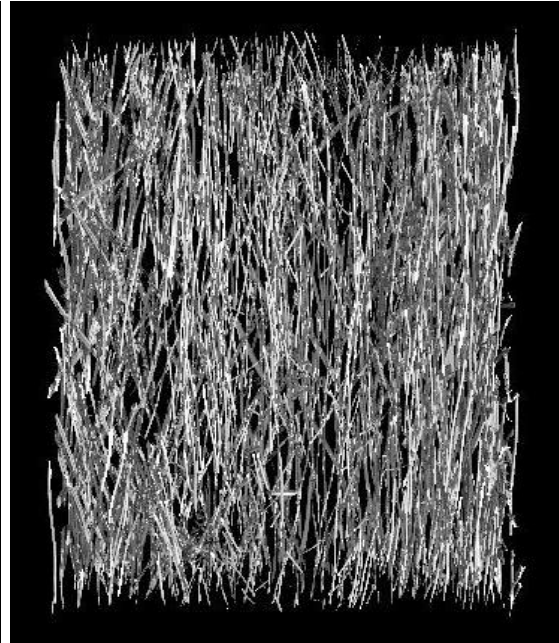
Kompozit s ocelovými vlákny, který během testu tvořil jádro cívky, určoval hodnotu činitele jakosti cívky. Předpokladem bylo, že větší míra uspořádání vláken způsobí větší pokles činitele jakosti cívky. Tento předpoklad byl ověřen. Měření ve směru vláken bylo provedeno na sonogelových a cementových vzorcích s ocelovými vlákny. V obou případech byl se stejným výsledkem ověřen pokles činitele jakosti cívky při zorientovaném stavu vláken, a tím pádem byla potvrzena závislost orientace vláken na činiteli jakosti cívky Q . Hodnoty byly měřeny na krajích a uprostřed trámečků. Závěrem měření bylo zjištění, že ta část, která prošla magnetickým modelem nejprve, obsahovala menší množství vláken, než ta, která vystoupila z magnetického pole nakonec. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena přitažlivými silami, kterými soustava magnetů na ocelová vlákna působila a přitahovala je po průchodu zpět k sobě. K tomuto zjištění patrně dospěli i další autoři, protože u některých podobně popisovaných experimentů nechávali procházet vzorky magnetickým polem tam a zpět, zřejmě tedy kvůli zamezení zmíněného jevu. Pro vzorky s objemovým zastoupením vláken 0,75 % byl zjištěn větší rozdíl poklesu činitele jakosti mezi zorientovanými a nezorientovanými vzorky, než pro obsah vláken 1,5 % objemu. Lze se proto domnívat, že ve větším objemu vláken dochází k omezení pohybu jednotlivých vláken a orientuje se menší počet vláken.

Rentgen a CT

Dalšími možnostmi nedestruktivního zjišťování orientace ocelových vláken v cementových kompozitech jsou diagnostické metody radiologie. Rentgenových paprsků využívá snímání rentgenovým prosvěcováním nebo skenování vzorků prostřednictvím výpočetní tomografie (CT). Pro rentgenové snímání je tloušťka vzorku dána absorpčními vlastnostmi materiálu a výkonem zařízení. Vzhledem k tloušťce prvku se tedy může jednat o destruktivní metodu, jelikož ke snímání relativně tenkých jádrových řezů vzorků by bylo nutné původní těleso řezat na menší části. Získávání kvantitativních dat z rentgenových snímků může být obtížné i kvůli ztrátě třetí dimenze a většímu množství vláken. Solidní 3D vizualizaci uspořádání vláken ve vzorku lze získat skenováním pomocí počítačové axiální tomografie. CT funguje na principu rentgenového záření o velmi nízké síle. Tato radiodiagnostická metoda zobrazuje struktury vyšetřované oblasti vzorku ve vrstvách. Princip je podobný jako u rentgenu, rozdíl je v možnosti pořízení většího počtu snímků za sebou pro zobrazované oblasti. Vzorek je virtuálně nařezaný na tenké plátky [152], [51], [65]. Pro lidské oko jsou jednoznačně neefektivnějšími způsoby zjišťování orientace metody s vizuálním výsledkem. Jedná se tedy především o rentgenové snímky a CT skenování.



Obr. 113 CT sken řezu UHPFRC trámečku s 1,5 % zastoupením neuspořádaných ocelových vláken [148].



Obr. 114 CT sken řezu UHPFRC trámečku s 1,5 % zastoupením magneticky uspořádaných ocelových vláken [148].

S využitím výpočetní tomografie byly skenovány přibližně krychelné výřezy trámečků o hraně 40 mm [145]. Při porovnání Obr. 113, kde vlákna nebyla nikterak ovlivněna, a Obr. 114, kde byla snaha vyrovnat vlákna do jednoho směru prostřednictvím magnetického pole, je rozdíl patrný na první pohled a o úspěšnosti magnetické orientace vláken tak není pochyb. Metody měření činitele jakosti cívky a CT skenu ztvrdlých vzorků prokázaly, že vlákna jsou opravdu vyrovnaná do požadovaného směru.

7.4.2 Destruktivní zkoušky

Nevýhodou destruktivních metod je neopakovatelnost a větší časová náročnost. Při zkoušce ohybem by měla být přítomnost vláken v kompozitu jednoznačně přínosná, jejich orientace může zvýšit hodnoty pevnosti kompozitu až o 70 % [52]. Orientace vláken ve směru hlavního napětí se projevuje až od první trhliny, do té doby orientace vláken nehraje významnou roli. Po vzniku první trhliny vzorky s vyrovnanými vlákny vykazují reziduální tahovou pevnost. Vlákna jsou tedy schopna i po vzniku trhliny dále přenášet zatížení.

Měření obsahu vláken

Mezi přímé metody destruktivního charakteru patří „Měření obsahu vláken v čerstvém a ztvrdlém betonu“ podle ČSN EN 14721+A1 [153]. Norma stanovuje metodu měření pro zjištění obsahu vláken v betonu, neřeší však jejich orientaci. Předpis, který by určoval způsob měření či zjišťování orientace vláken, zatím nebyl vydán. Tato evropská norma určuje dvě metody měření obsahu vláken v betonu s kovovými vlákny. Metoda A měří obsah vláken ve zkušebním tělese ze ztvrdlého betonu. Vzorek (jádrový vrt) je rozdrcen a vlákna jsou pomocí magnetu ze směsi

oddělena a zvážena. Metoda B měří obsah vláken ve zkušebním tělese z čerstvého betonu prostřednictvím techniky vymývání, vlákna je nutné před zvážením očistit a vysušit.

Obrazová analýza

Lidská zraková schopnost je vynikajícím nástrojem a mnoho důležitých aplikací a přístrojů pro analýzu obrazu je inspirováno modely lidského vizuálního vnímání. Počítače jsou ale nepostradatelné pro analýzu velkého množství dat a pro složité výpočty. Obrazová analýza je metoda založená na získávání informací z digitálních obrazů pomocí technik digitálního zpracování a slouží jak pro zjišťování množství, tak i orientace vláken.

Pomocí matematických modelů a počítačové analýzy jsou vyhodnocovány digitální obrazy řezů, je určen obsah vláken a dle řezových ploch jednotlivých vláken i jejich orientace. Řezy vzorků by měly být provedeny ve dvou nebo třech na sebe kolmých směrech a řezové plochy upraveny do hladka pro ideální kontrast cementové matrice a ocelových vláken. Tato metoda je poměrně komplikovaná a vyžaduje pokročilé znalosti v programování. S využitím vhodného softwaru mohou být analýzy obrazu jednoduché jako čtení čárových nebo QR kódů, ale i složité jako rozpoznávání tváře, což digitální technika nedokáže vždy jednoznačně určit, proto i výpovědní hodnota se může lišit [149], [154].

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Původní nedestruktivně zkoušené vzorky s 0,75% a 1,5% obsahem vláken byly zkoušeny v ohybu pro zjištění tahové pevnosti až po 3 letech. K největšímu nárůstu pevnosti betonu dochází v prvních 28 dnech, následně sice pevnost stále roste, ale jen nepatrně. Ohybové zkoušky vzorků potvrdily výsledky nedestruktivních zkoušek, a to že schopnost magnetového modelu vyrovnávat vlákna do jednoho směru byla úspěšná a účinná. Tahová pevnost neorientovaného a orientovaného trámečku s objemovými 0,75 % vláken byla 7,8 MPa a 10,3 MPa. Tahová pevnost neorientovaného a orientovaného trámečku s objemovými 1,5 % vláken byla 11,2 MPa a 15,9 MPa. Trámečky s magneticky vyrovnanými vlákny tedy dosahovaly téměř o třetinu vyšších pevností, a tím byla potvrzena efektivita cílené orientace.

Další série vzorků, jejichž část byla orientována pomocí cívkového modelu, naopak tak průkazné nebyly. Tyto trámečky však byly zkoušeny už po sedmi dnech od výroby, výsledek tudíž mohl být způsoben nedostatečným vytvrdnutím vzorků. Nicméně orientované i neorientované skupiny vzorků byly stejného stáří. Je možné, že nárůst pevnosti po minimálně 28 dnech by rozdíl mezi těmito vzorky prohloubil. Stejně tak je možné, že byl nějaký skrytý nedostatek ve složení směsi nebo nedošlo k dostatečné homogenizaci, jelikož jednotlivé hodnoty se pohybovaly v poměrně širokém rozsahu. Vliv mohl být i na straně cívkového modelu, ačkoliv orientace vláken v sonogelu, jež cementovým vzorkům předcházela, a bylo možné ji přímo vizuálně sledovat, proběhla úspěšně. To poukazuje opět na směs a nedostatečnou magnetickou intenzitu pro překonání odporu cementové matrice k vyrovnání vláken v příliš viskózní směsi.



Tahová pevnost těchto neorientovaných trámečků byla naměřena v rozsahu 12,0 až 16,0 MPa, pro orientované pak 11,3 až 18,3 MPa. V průměru byly tyto hodnoty pro 6 neorientovaných a 5 orientovaných trámečků 13,73 MPa a 14,98 MPa [148]. Naměřené a dopočtené tahové pevnosti z ohybové zkoušky sice v podstatě splnily očekávání, když orientované vzorky dosáhly vyšších hodnot, ale hodnoty pro orientované a neorientované vzorky se lišily jen minimálně, a to v průměru přibližně jen o 1 MPa. Starších vzorků, kde už nedocházelo k dalším nárůstům pevnosti a rozdíl mezi orientovanými a neorientovanými byl podstatný, však nebyl dostatečný počet k průkaznému ověření. Doplňujícím zjištěním bylo, že nedocházelo ke korozi vláken vlivem působení magnetického pole. Nízká pórovitost struktury UHPC navíc zvyšuje odolnost proti průniku cizorodých látek, které by mohly korozi podporovat.

Přídavný pozitivní vliv vibrační střídavého proudu při použití cívkového modelu nebyl potvrzen. Optimální využití elektromagnetického pole doplněného vibracemi k vyrovnání ocelových vláken se zdá být ideálním řešením k využití zejména pro samozhutnitelný beton. Nízká viskozita SCC napomáhá k pravděpodobněji dosažitelnému úspěchu vyrovnání vláken [70].

7.5 Vyhodnocení, další výzkum

Nedestruktivní zkoušky dokázaly potvrdit, že orientace vláken v požadovaném směru je pomocí magnetového modelu proveditelná. Mechanické zkoušky však nedokázaly jednoznačně prokázat, zda je provedená orientace vláken do požadovaného směru vždy efektivním řešením. Je také možné, že i když byla pro oba zkušební modely dodržena stejná hodnota magnetické indukce (55 mT), magnetový model byl účinnější než cívkový, a to i navzdory předpokladům o pozitivním vlivu vibrační střídavého proudu v cívce. Je ale třeba vzít v potaz také další faktory, které mohly být příčinou. Vzorky z cívkového modelu byly zkoušeny už po 7 dnech. Pokud by byla zkouška provedena po minimálně 28 dnech, je možné, že by pevnosti jednak vzrostly a také rozdíl mezi oběma typy vzorků by byly významnější.

Rovněž při srovnání pevností s trámečky vyrobenými prostým uložením do forem bez cíleného orientování magnetickým polem (viz kapitola 5.3.4) byla pevnost „nedozrálých“ orientovaných trámečků nižší. Příčina může být i v konkrétní směsi umíchané pro jednotlivé experimenty. Pro vzorky umístěvané do magnetového modelu byla směs míchána v minimálním množství, a to pro každý vzorek zvlášť, aby bylo docíleno přesného množství vláken ve vzorku. Pro orientaci v cívkovém modelu i pro neorientované vzorky z kapitoly 5.3.4 byla směs míchána ve větším množství společně, i když receptura byla dodržena. Cívkové modely je potřeba ještě experimentálně testovat.

Dále bylo zjištěno, že se zvyšujícím množstvím vláken se pravděpodobně zesiluje magnetická indukce, což je pozitivní jev, který napomáhá a usnadňuje orientaci. Nicméně se zvyšujícím se množstvím vláken je magnetická orientace obtížnější, protože si vlákna spíše překázejí a nemají dost prostoru pro vyrovnání do požadovaného směru.



Obr. 115 Model na principu cívky soužící k magnetické orientaci vláken v čerstvé směsi UHPFRC.

Vzhledem k prokázané možnosti orientace ocelových vláken ve směsi UHPFRC magnetickým polem a úspěšnému provedení prvních pokusů, výzkum nadále pokračuje. V současnosti jsou vzorky orientovány pomocí modelů s konstrukcí cívky vhodného tvaru podle velikosti vzorku.



Obr. 116 Úspěšné otestování funkčnosti většího cívkového modelu pomocí sonogelu s ocelovými vlákny (100×100×400 mm) [148].

Tyto modely cívek protékáných proudem byly rovněž sestaveny v rámci spolupráce s kolegy z Katedry elektrotechnologie Fakulty elektrotechnické pod vedením Ing. Karla Künzela, CSc.



a prof. Ing. Václava Papeže, CSc. a dále jsou testovány [148]. Kromě menšího cívkového modelu na Obr. 109 byl zkonstruován i model cívky pro větší vzorky o průřezu až 150×150 mm a libovolné délky (Obr. 115 a Obr. 116).



8 Shrnutí a závěr

Tato práce vznikla zpracováním většího množství experimentálních dat získaných z několika navazujících výzkumů, podložených rešeršním průzkumem a doplněných dalšími testovacími postupy a experimenty. Cílem práce bylo prokázat, zda se dá rozptýlená ocelová výztuž v UHPFRC považovat za náhodně a rovnoměrně rozmístěnou, nebo jsou vlákna ve směsi nějakým způsobem preferovaně orientovaná a také zda lze toto uspořádání záměrně měnit. Většina předpokladů z teoretické části práce byla provedenými experimenty potvrzena.

Úvodní část práce je věnovaná reologickým vlastnostem neneutonských kapalin ve srovnání s newtonskými tekutinami. V rámci popisu viskózního chování kapalin rešerše shrnuje různé možnosti zjišťování viskozity a vhodnost jednotlivých postupů k praktickému využití pro další experimentální i výpočetní účely (kapitola 2). Na základě těchto teoretických poznatků byla pro viskózní směs cementového kompozitu navržena jeho vhodná transparentní imitace (kapitola 4.2). Vhodnost výběru sonografického gelu (sonogelu) byla posuzována prostřednictvím testování konzistence a měření viskozity na rotačním viskozimetru (kapitola 4.3). Měření viskozity čerstvých cementových směsí je obecně nutné provádět okamžitě po smíchání složek, protože je výrazně komplikováno faktem, že jde o tuhnoucí strukturu kapaliny (suspenze) měnící se v pevnou látku. Provedené měření také potvrdilo tixotropní chování cementové směsi – dynamická viskozita měla klesající průběh. S rostoucím počtem otáček za minutu se naměřená viskozita směsi snižovala. Rovnocenné vlastnosti konzistence navrženého vodného roztoku sonogelu a čerstvé cementové matrice byly potvrzeny srovnatelnými výsledky zkoušek na strásacím stolku a při měření rotačním viskozimetrem pro obě směsi. V praxi se viskozita různých směsí betonu liší v závislosti na složení a pohybuje se v rozsahu desítek až stovek Pa·s. Naměřené hodnoty z provedených experimentů spadaly do obecně uváděného rozpětí.

Získaná data sloužila jako vstupní parametry k vytvoření transparentních vzorků z „vláknosonogelu“ s konzistencí odpovídající UHPFRC. V plexisklovém bednění, které mělo stejný tvar a velikost jako prvky z UHPFRC, bylo možné pozorovat uspořádání a orientaci vláken ve směsi a také zkoumat, do jaké míry lze toto uspořádání ovlivňovat a měnit. Realizovanými simulacemi s průhledným sonogelem (kapitola 5.1) bylo dokázáno, že orientace vláken v cementovém kompozitu je nejen prakticky možná a ovlivnitelná změnou polohy bednění či tokem směsi, ale mohla by být i využitelná v praxi. Provedenými experimenty byla dále odhalena

existence vrstvy s větší koncentrací vláken u dna vodorovně ukládaných vzorků. V této vrstvě se nacházelo větší množství vláken uspořádaných zejména v rovině rovnoběžné se dnem formy. U konstrukčních prvků, které jsou tahově namáhány při svém spodním okraji, by mělo toto koncentrovanější zastoupení vláken příznivě navyšovat tahovou pevnost daného prvku. Tento předpoklad byl následujícími experimenty potvrzen.

Mechanické zkoušky probíhaly na vzorcích několika typů, velké hranolové prvky, deskové prvky a malé trámečky. Z výsledků popsaných v kapitolách 5.2 a 5.3 bylo zjištěno, že hranolové i deskové prvky ukládané do vodorovně orientovaného bednění dosahovaly lepších vlastností než prvky lité do bednění ve svislém směru. Rozdíl v chování mezi vodorovně a svisle ukládanými vzorky je možné vysvětlit jevy popsanými v kapitole 3.5. Při experimentech s "vláknosonogelem" bylo možné všechny tyto teoreticky popsané jevy pozorovat. Vlákna měla tendenci se při ukládání stáčet do roviny rovnoběžné se dnem bednění a kolmé ke směru toku, tj. do vodorovného směru, pokud k tomu měla vlákna dostatek prostoru. Na orientaci vláken měl vliv také tvar a velikost bednění a s tím související efekt stěn bednění. U větších vzorků nebyl efekt stěn bednění tak významný, jelikož stěny ovlivňovaly jen malou část směsi ve svém okolí vzhledem k velikosti vzorku. Rozdíl v orientaci vláken mezi vodorovně a svisle ukládanými vzorky větších rozměrů byl proto pozorován větší. Účinek zmiňovaných jevů bylo možné spatřit i v mechanických vlastnostech testovaných vzorků.

Pomocí příčně a podélně rozdělených deskových prvků popsaných v kapitole 5.3 bylo možné porovnávat tahové pevnosti jednotlivých částí desek, jelikož pravděpodobná orientace vláken a jejich rozmístění se mohly v jednotlivých částech lišit. Přidaná hodnota těchto zkoušek spočívala také v poloze vzorků při zatěžování. Prvky vyrobené z vodorovně uloženého bednění, pokud byly zkoušeny v pozici totožné s pozicí při výrobě, dosahovaly vyšších hodnot ohybové pevnosti a specifické lomové energie, než prvky ze svisle orientovaného bednění. Nicméně u svisle betonovaných prvků hrál významnou roli i směr dělení desek.

U vodorovně ukládaných vzorků zkoušky tříbodovým ohybem potvrdily existenci spodní vrstvy s vyšší koncentrací vláken v rovině rovnoběžné se dnem. Když byly vzorky zkoušeny ve stejné poloze, jako byly betonovány, dosahovaly v průměru vyšších hodnot tahové pevnosti oproti vzorkům, které byly zkoušeny spodní stranou vzhůru. Nejlepších výsledků tahové pevnosti bylo dosaženo, když směr lití odpovídal směru zatížení. Pokud bylo zatížení aplikováno na konstrukční prvky v obrácené poloze, vrstva s vyšší hustotou vláken byla na tlačené straně a bylo dosaženo pouze nižších hodnot pevnosti v tahu.

U UHPFRC prvků ze svisle orientovaného bednění, kde vlákna neměla dostatečný prostor pro orientaci a byla ovlivněna stěnami bednění, je všesměrné uspořádání vláken pravděpodobnější. Ale i v případě vertikálně ukládaných vzorků, má orientace vláken značný vliv na konečnou pevnost v tahu, pokud jsou při zatížení umístěny kolmo ke své výrobní pozici. Jinými slovy, pokud je deskový prvek vyroben ve vertikálním bednění a následně uložen



horizontálně, záleží na vhodném umístění podpor a následných směrech pnutí v desce. Tato problematika byla zkoumána prostřednictvím podélných a příčných řezů desek. Pokud byl řez veden podélně, tj. rovnoběžně se dnem bednění, prvky dosahovaly vyšších hodnot tahové pevnosti než příčné řezy. Tím bylo potvrzeno, že i ve vertikálních deskách byla větší část vláken orientována rovnoběžně se dnem. Proto by se prefabrikované prvky vyrobené z UHPFRC měly v praxi používat ideálně ve stejné poloze, v jaké byly betonovány.

Cílená orientace vláken tudíž má smysl, a to jak mechanickými způsoby (poloha bednění, jeho tvar a velikost), tak například pomocí účinků magnetického pole. Vlákná vyrovnaná v žádoucím směru, kde vzniká tahové napětí, významně podporují účinnost vyztužení kompozitu a zvyšují pevnost a houževnatost prvku. Výše popsaných poznatků získaných z provedených experimentů by bylo možné využít zejména při návrhu tenkostěnných konstrukcí nebo u vodorovných nosníků a desek, kdy by bylo možné docílit požadované orientace vláken pouhým směrem ukládání kompozitu. Zohlednění orientace vláken při navrhování bednění vzhledem k finálnímu zatížení konstrukčních prvků může mít pozitivní vliv na jejich efektivnější využití a tedy i na hospodárnější návrh.

Pro cílenou orientaci vláken do zvoleného směru bylo využito magnetického pole a feromagnetických vlastností ocelových vláken. Elektromagnetická orientace vláken v čerstvé směsi cementového kompozitu byla zkoumána v závislosti na různých faktorech, jako je rychlost pohybu vzorku magnetickým polem, viskozita vzorku nebo tvar a silové účinky magnetického pole. Pro zajištění těchto požadavků byly v rámci spolupráce s odborníky z Fakulty elektrotechnické zkonstruovány jednoduché funkční modely, které umožňovaly konstantní pohyb vzorku magnetickým polem (kapitola 7.2). Magnetická orientace fungovala na principu zmagnetizování feromagnetických ocelových vláken prostřednictvím rovnoměrného průchodu magnetickým polem. Po magnetizaci se vlákno chovalo jako dočasný magnet a mělo tendenci se orientovat ve směru siločar magnetického pole, kterému bylo vystaveno. Pokud magnetické pole působilo na vlákno větší silou, než byl odpor sonogelové hmoty nebo tekuté cementové matrice, kde bylo vlákno umístěno, vlákno se vyrovnalo ve směru magnetických siločar.

Z provedených experimentů bylo vyzorováno, že při větším objemu vláken ve směsi docházelo k omezení pohybu jednotlivých vláken během jejich nucené reorientace, proto je menší počet vláken ve směsi snadněji orientovatelný. Dále byla potvrzena závislost magnetické orientace ocelových vláken na silových účincích magnetického pole, viskozitě materiálu okolo vláken a rychlosti průchodu vzorku magnetickým polem. Dalším zjištěním bylo rozmístění již orientovaných vláken ve vzorku. V části vzorku, která prošla polem jako poslední, se zdála hustota obsažených vláken nepatrně vyšší, což mohlo být způsobeno zpětnými přitažlivými silami od magnetického pole v okamžiku po průchodu. Ze zkoušek byly určeny nutné parametry magnetické indukce a rychlosti průchodu vzorku magnetickým polem, potřebné pro orientaci vláken v sonogelu. Tyto parametry byly úspěšně využity i pro vzorky ze zvolené směsi UHPFRC.

Zároveň nebyly zjištěny žádné negativní projevy po působení magnetického pole na magneticky orientované prvky.

Sonogelové simulace (kapitola 7.3) i nedestruktivní zkoušky UHPFRC (kapitola 7.4) zřetelně potvrdili, že orientace vláken do požadovaného směru je pomocí magnetického pole proveditelná. Mechanické zkoušky zatím neprokázaly, do jaké míry je provedená magnetická orientace vláken do požadovaného směru efektivním řešením pro praktické využití, vzhledem k vynaloženým nákladům. Zkoušek nebyl proveden průkazný počet, nicméně z dosud známých výsledků byl potvrzen pozitivní účinek magnetické orientace na tahovou pevnost. Rozdíly v průměrných hodnotách tahové pevnosti ve stáří 7 dnů pro magneticky orientované a magneticky neovlivněné vzorky byly ve prospěch orientovaných, i když jen minimální. U starších vzorků, kde už nedocházelo k dalším nárůstům pevnosti, byl tento rozdíl mezi orientovanými a neorientovanými vzorky větší (opět ve prospěch orientovaných vzorků).

Mimo odlišného stáří vzorků a způsobu orientace může mít vliv na pevnost i samotná směs. Každá umíchaná směs je svým způsobem originální. Vždy záleží na množství jednotlivých složek a jejich spolupůsobení ve směsi. I při maximální možné snaze zachování všech poměrů složek a postupů se mohou výsledné konzistence a pevnosti jednotlivých vzorků mírně lišit.

Po prokázání účinné využitelnosti magnetické orientace vláken v UHPFRC by mohla tato metoda sloužit k rychlé produkci prefabrikovaných prvků s rozptýlenou výztuží koncentrovanou do požadovaného směru. Zejména nízká viskozita SCC podněcuje k uvažování o těchto směsích jako o vhodných pro posuzovanou techniku nucené reorientace vláken s využitím elektromagnetického pole.

Pro balistickou odolnost neměl směr ukládání nikterak významný vliv (kapitola 6.2). Dalo by se říci, že výhodou byla všesměrná orientace vláken, která byla pozorována spíše u vertikálních desek, protože dokázala lépe bránit šíření radiálních trhlin. Desky z horizontálního bednění měly srovnatelnou odolnost, pouze pokud byly umístěny spodní stranou proti střele. Dle výše popsaných zjištění lze předpokládat, že na této nárazové straně desky byla větší koncentrace vláken orientovaných v rovině kolmé ke směru výstřelu, což napomohlo k lepšímu absorbování nárazu. Vlákná v této vrstvě navíc pravděpodobně tvořila soustředné kruhy, což mohlo účinně bránit v šíření radiálních trhlin. Celkově však lze považovat zvolenou orientaci bednění za srovnatelnou z pohledu balistické odolnosti. Náhodné uspořádání vláken se ukázalo jako dostatečné, mnohem podstatnější roli během experimentů sehrála tloušťka desek (kapitola 6.3) a množství rozptýlené výztuže (kapitola 6.4). Při zvyšování množství vláken narůstala nejen tahová pevnost, ale i duktilita, která je důležitá při zajištění rozptylu energie u nárazu střely a při plastické deformaci materiálu během zpevnění a tvorby trhlin. Naopak balistická odolnost vycházející z vysoké pevnosti v tlaku samotného UHPC se příliš neprojevila.

Účinek konstrukčních prvků s orientovanými vlákny (ať mechanickým či magnetickým způsobem) se projevuje spíše u konstrukcí s běžným zatížením. Uplatnění lze spatřit zejména



v produkci vodorovně ukládaných prvků s využitím vrstvy většího počtu vodorovně orientovaných vláken u dna. Jako příklad lze uvést prostě uložený nosník s vlákny v místě tahového napětí na spodní straně.

Cílená orientace magnetickým polem k usměrnění vláken do jednoho směru nebyla testována pro účely balistické odolnosti, ale pro ověření získaných poznatků by tyto zkoušky mohly být v budoucnu provedeny. Další náměty na navazující nebo související výzkum by mohly být následující. Zajímavé by mohlo být srovnání „vláknosonogelových“ hranolů a desek s rentgenovým CT skutečných betonových vzorků a vyhodnocení věrohodnosti transparentní simulace. Užitečné by bylo i určení efektivní hranice mezi cenou, odolností a zpracovatelností UHPFRC z pohledu množství ocelových vláken, jelikož během vyhodnocování výsledků balistických zkoušek s různým zastoupením vláken byl zaznamenán nepravidelný nárůst tahové pevnosti. Provedené experimenty a naměřená data by mohla být využita jako vstupní hodnoty k vytvoření matematického modelu cementového kompozitu s vlákny. Mohlo by se jednat o modelování jednotlivých stavebních prvků nebo případně celých konstrukcí z UHPFRC s orientovanými či neorientovanými vlákny. Z hlediska ověřování cílené orientace vláken prostřednictvím elektromagnetického pole by bylo možné v rámci pokračujícího experimentálního výzkumu testovat větší konstrukční prvky při různém silovém působení pole. Vhodné může být i pokusit se zapojit experimenty do praxe a provést vyhodnocení na základě dlouhodobého sledování chování prvků z různě orientovaného bednění (případně prvků s cíleně orientovanými vlákny) umístěných do reálných konstrukcí. Do vzdálenější budoucnosti lze také uvažovat o robotickém ukládání s elektromagnetickým směřováním vláken.

Bibliografie

- [1] HALLADAY M. The Strategic Highway Research Program: An investment that has paid off. *Public Roads*. Federal Highway Administration, 1998, **61**(5), 11-17. ISSN 0033-3735.
- [2] PAVLÍKOVÁ M. *Vláknobetony* [online]. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, s. 1-33 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/36969591-Vlaknobetony-doc-ing-milena-pavlikova-ph-d-k123-d.html>
- [3] LI V. C. Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002, **83**(3), 660-686. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/app.2263
- [4] *Reologie. Ústav Fyziky a Materiálového Inženýrství*, Fakulta Technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. Dostupné také z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [5] JANALÍK J. *Viskozita tekutin a její měření*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava, 2010. Dostupné také z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Janalik-TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [6] TRACHENKO K., a BRAZHKIN V. V. Minimal quantum viscosity from fundamental physical constants. *Science Advances*. 2020, **6**(17). ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.aba3747
- [7] MAHMOOD, W., MOHAMMED A. a GHAFOR K. Viscosity, yield stress and compressive strength of cement-based grout modified with polymers. *Results in Materials*. 2019, **4**. ISSN 2590048X. Dostupné z: doi:10.1016/j.rinma.2019.100043
- [8] What is Viscosity?. *AMETEK Brookfield Website* [online]. Middleboro, USA: AMETEK Brookfield, 2020. Dostupné také z: <https://www.brookfieldengineering.com/learning-center/learn-about-viscosity/what-is-viscosity>
- [9] BARTOVSKÁ L., a ŠIŠKOVÁ M. Měření viskozity. *Integrovaný systém elektronických studijních opor VŠCHT* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_viskozity.html
- [10] Lauda viskozimetry - PVS a iVisc - Centec. *Centec* [online]. Praha, ČR: Centec automatika s.r.o., 2011 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.centec.cz/clanky-viskozimetry.html>
- [11] Viskozimetr na principu padající kuličky. *HELAGO-CZ, s.r.o.: Vybavení laboratoří a lékáren, dodávka výukových pomůcek, zdravotních simulátorů, projekce a výroba nábytku* [online]. Hradec Králové, ČR, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.helago-cz.cz/eshop-viskozimetr-na-principu-padajici-kulicky-146588.html>
- [12] PRUŠKA J. *Mechanika hornin: Reologie*. Katedra geotechniky, Fakulta stavební, České Vysoké Učení Technické, 2008. Dostupné také z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2008/05/reologie.pdf>
- [13] TATTERSALL G. H., a BAKER P. H. The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1988, **40**(143), 79-89. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.1988.40.143.79



- [14] TATTERSALL G. H., a BAKER P. H. An investigation on the effect of vibration on the workability of fresh concrete using a vertical pipe apparatus. *Magazine of Concrete Research*. 1989, **41**(146), 3-9. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.1989.41.146.3
- [15] HU C., a DE LARRARD F. The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 1996, **26**(2), 283-294 [cit. 2020-11-01]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(95)00213-8
- [16] LI Z., a CAO G. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*. 2019, **120**, 217-226. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2019.03.020
- [17] HELA R. *Problematika čerstvých samozhutnitelných betonů: Problems of fresh self-compacting concrete - Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4199-6.
- [18] ROUSSEL N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research* [online]. 2006, **36**(10), 1797-1806 [cit. 2020-11-01]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.025
- [19] Časová závislost vztahu deformace a napětí, viskoelastické látky. *Základní kurz fyziky pro distanční studium na MFF UK* [online]. Praha, ČR: Katedry fyziky povrchů a plazmatu, Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_3
- [20] TERZIJSKI I. *Betonové Prvky: M01 - Základy navrhování konstrukcí, zatížení, materiály*. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2005. Dostupné také z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL01-Prvky%20Betonovych%20konstrukci/Prvky%20bet%20kci%20II.pdf>
- [21] MEWIS J., a WAGNER N. J. Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009, **147-148**, 214-227. ISSN 00018686. Dostupné z: doi:10.1016/j.cis.2008.09.005
- [22] LAPASIN R., , LONGO V. a RAJGELJ S. Thixotropic behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 1979, **9**(3), 309-318. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(79)90123-6
- [23] GOSSELIN C., , DUBALLET R., ROUX P., GAUDILLIÈRE N., DIRRENBERGER J. a MOREL P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*. 2016, **100**, 102-109. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097
- [24] SVOBODA L., a KOLEKTIV. *Stavební hmoty* [online]. 4. vydání. Praha, 2018. Dostupné také z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH4v1.pdf>
- [25] LOVICHOVÁ R. *Vliv vysokých teplot na materiálové vlastnosti cementové pasty s příměsí popílku*. 2013. Diplomová práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Padevět P.
- [26] ČSN EN 197-1 Ed. 2 (72 2101): *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Český normalizační institut, 2012-05.
- [27] ŠÁNA V., , POLÁK M. a PLACHÝ T. A Dynamic Analysis of the Cable-Stayed Footbridge in Čelákovice Town. *Procedia Engineering*. 2017, **199**, 2877-2882. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.09.582



- [28] TICHÝ J., KOLÍSKO J., VOKÁČ M., ČÍTEK D., TREFIL V. a KALNÝ M. *Metodika 3: Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze, 2015.
- [29] AİTCIN P. C. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [30] NILSON A. H. High strength concrete: an Overview of Cornell Research. In: HOLLAND I. *Proceedings of symposium on Utilization of High-Strength concrete*. Stavanger, Norway: Tapir, 1987, s. 27-38. ISBN 8251907977, 9788251907972.
- [31] 212.3R-16. *Report on Chemical Admixtures for Concrete*. Farmington Hills, MI, USA: ACI Committee 212, 2016. ISBN: 9781942727804.
- [32] 212.4R-04. *Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete*. Farmington Hills, MI, USA: ACI Committee 212, 2017. ISBN: 9780870311611.
- [33] RAMEZANIANPOUR A. A., SIVASUNDARAM V. a MALHOTRA V. M. Superplasticizers: Their Effect on the Strength Properties of Concrete. *Concrete International*. 1995, **17**(4), 30-35. ISSN 01624075.
- [34] MOHAMED M. S., MOHAMED S. A. a JOHARI M. A. M. Influence of Superplasticizer Compatibility on the Setting Time, Strength and Stiffening Characteristics of Concrete. *Advances in Applied Sciences*. 2016, **1**(2), 30-36. Dostupné z: doi:10.11648/j.aas.20160102.12
- [35] PADEVĚT P., a LOVICHOVÁ R. Material Properties of Cement Paste with Addition of Fly Ash Exposed to High Temperatures. In: *Recent Advances in Mechanical Engineering and Automatic Control*. Athens: WSEAS Press, 2012, s. 158-192. ISBN 978-1-61804-142-5.
- [36] GOPALAN M. K., a HAQUE M. N. Mix design for optimal strength development of fly ash concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 1989, **19**(4), 634-641 [cit. 2020]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(89)90015-X
- [37] OZYILDIRIM C., a HAISTEAD W. J. Improved Concrete Quality with Combinations of Fly Ash and Silica Fume. *ACI Materials Journal: A Journal of the American Concrete Institute an International Technical Society*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1994, **91**(6), 587-594.
- [38] RONNE M. Effect of Condensed Silica Fume and Fly Ash on Compressive Strength Development of Concrete. *ACI Materials Journal: A Journal of the American Concrete Institute an International Technical Society*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1989, **114**(1), 175-189. Dostupné z: doi:10.14359/1922
- [39] VIPULANANDAN C., a DHARMARAJAN N. Analysis of Fracture Parameters of Epoxy-Polymer Concrete. *ACI Materials Journal: A Journal of the American Concrete Institute an International Technical Society*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1989, **86**(4), 383-393. ISSN 0889325X.
- [40] SOROUSHIAN P., SHAH Z. a WON J. P. Optimization of Wastepaper Fiber-Cement Composites. *ACI Materials Journal: A Journal of the American Concrete Institute an International Technical Society*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1995, **92**(1), 82-92. ISSN 0889325X.
- [41] SWAMY R. N. Fibre reinforcement of cement and concrete. *Matériaux et Constructions*. 1975, **8**(3), 235-254. ISSN 0025-5432. Dostupné z: doi:10.1007/BF02475172



- [42] ZOLLO R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1997, **19**(2), 107-122 [cit. 2020-11-01]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(96)00046-7
- [43] HAMEED D. H., ALRUBAIE M. F., SALIH S. A., HABEED G. M. a ABBAS W. A. Slurry Infiltrated Fiber Concrete as Sustainable Solution for Defected Buildings. *Engineering and Technology Journal*. 2019, **37**(1), 132-138. ISSN 2456-3358. Dostupné z: doi:10.30684/etj.37.1C.21
- [44] FARNAM Y., MOOSAVI M., SHEKARCHI M., BABANAJAD S. K. a BAGHERZADEH A. Behaviour of Slurry Infiltrated Fibre Concrete (SIFCON) under triaxial compression. *Cement and Concrete Research*. 2010, **40**(11), 1571-1581. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2010.06.009
- [45] ČSN EN 14889-1 (72 3434): Vlákná do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda. Český normalizační institut, 2007-06.
- [46] VODIČKA J., VESELÝ V. a KRÁTKÝ J. Specifika z technologie vláknobetonu. *Beton TKS*. 2010, **2**, 38-42. ISSN 12133116.
- [47] PLAGUÉ T., DESMETTRE C. a CHARRON J. P. Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. *Cement and Concrete Research* [online]. 2017, **94**, 59-70 [cit. 2020-11-01]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2017.01.004
- [48] ABDELAZIZ M., BEDDAR M. a MAHAMED H. Experimental Study of Steel Fibre Reinforced Refractory Concrete. In: *METECH '15: III. International Conference on Innovative Materials and Structures Technologies in Metallurgical Engineering Proceedings*. Istanbul: DAKAM, 2015, s. 32-41. ISBN 978-605-9207-16-4.
- [49] Špeciálne betóny. BAJZA A., a ROUSEKOVÁ I. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006, s. 158-172. ISBN 80-8076-032-2.
- [50] TVAROĞ M. *Vliv orientace vláken na odolnost cementového kompozitu vůči extrémnímu zatížení*. 2016. Diplomová práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Fornůšek J.
- [51] STÄHLI P., CUSTER R. a VAN MIER J. G. M. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures* [online]. 2008, **41**(1), 189-196 [cit. 2020-11-01]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-007-9229-x
- [52] MARTINIE L., ROUSSEL N. Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete Research*. 2011, **41**(10), 993-1000. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.05.008
- [53] LOVICOVÁ R., TAKÁČOVÁ K., FORNŮSEK J. a MÁRA M. Steel fibre orientation by means of magnetic field. In: ZINGONI A., ed. *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. CRC Press, 2019, s. 1497-1500. ISBN 978-0-429-42650-6. Dostupné z: doi:10.1201/9780429426506-258
- [54] MU R., LI H., QING L., LIN J. a ZHAO Q. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field. *Construction and Building Materials*. 2017, **131**, 309-316. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.081
- [55] BOULEKBACHE B., HAMRAT M., CHEMROUK M. a AMZIANE S. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material.



- Construction and Building Materials*. 2010, **24**(9), 1664-1671. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025
- [56] SEPEHR M., , AUSIAS G. a CARREAU P. J. Rheological properties of short fiber filled polypropylene in transient shear flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2004, **123**(1), 19-32. ISSN 0377-0257. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnnfm.2004.06.005
- [57] BASTIEN-MASSE M., , DENARIÉ E. a BRÜHWILER E. Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers. *Cement and Concrete Composites*. 2016, **67**, 111-125. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.01.001
- [58] KRENCHHEL H. Fibre Spacing and Specific Fibre Surface. *Fibre Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium*. 1975, s. 69-79.
- [59] LEE C., a KIM H. Orientation factor and number of fibers at failure plane in ring-type steel fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2010, **40**(5), 810-819. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2009.11.009
- [60] ŠVEC O., , ŽIRGULIS G., BOLANDER J. E. a STANG H. Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2014, **50**, 60-72 [cit. 2020-11-01]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.12.002
- [61] BARNETT S. J., , LATASTE J. F., PARRY T., MILLARD S. G. a SOUTSOS M. N. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Materials and Structures*. 2010, **43**(7), 1009-1023. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-009-9562-3
- [62] ZHOU B., a UCHIDA Y. Fiber orientation in ultra high performance fiber reinforced concrete and its visualization. In: *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures: FraMCoS-8*. Toledo, Spain: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2013, s. 228-235. ISBN 978-84-941004-1-3.
- [63] ZHOU B., a UCHIDA Y. Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC. *Cement and Concrete Research*. 2017, **95**, 164-177. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.017
- [64] YOON D. Y., , KANG S. T. a YOON Y. S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **64**, 67-81. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.007
- [65] FERRARA L., , FAIFER M. a TOSCANI S. A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration. *Materials and Structures*. 2012, **45**(4), 575-589. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-011-9793-y
- [66] DUPONT D., a VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*. 2005, **27**(3), 391-398. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005
- [67] BASTIEN MASSE M. *Structural Behavior of R-UHPFRC - RC Composite Slabs*. 2015. Disertační práce. École Polytechnique Fédérale De Lausanne. Vedoucí práce Brühwiler E. a Denarié E.



- [68] Experimentální centrum Fakulty stavební ČVUT a tištěný dům Prvok. *Srdcem stavaři | Fakulta stavební ČVUT v Praze* [online]. Praha: Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://srdcemstavari.cz/experimentalni-centrum-fakulty-stavebni-cvut-a-tisteny-dum-prvok/>
- [69] XUE W., CHEN J., XIE F. a FENG B. Orientation of Steel Fibers in Magnetically Driven Concrete and Mortar. *Materials*. 2018, **11**(1). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11010170
- [70] GHAILAN D. B., a AL-GHALIB A. A. Magnetic alignment of steel Fibres in self-compacting concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*. 2020, **21**(1), 333-341. ISSN 1328-7982. Dostupné z: doi:10.1080/13287982.2019.1643642
- [71] KOLÁŘ K., BAŽANTOVÁ Z. a KONVALINKA P. *Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu*. 2016. CZ 306663 B3. Přihlášeno 2015-09-01. Uděleno 2017-03-15. Zapsáno 2016-12-20. Prague: Industrial Property Office.
- [72] Univerzální kuchyňský robot SP-200 SPAR. *E-shop s profesionálním gastro zařízením* [online]. Týn nad Vltavou, ČR: Šance Týn nad Vltavou s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.gastrosance.cz/product/samostane-stojici/roboty-spar/univerzalni-kuchynsky-robot-sp-200-spar/2795>
- [73] Filamos » Míchačky s nuceným oběhem – řada M. *Filamos | důlní a stavební technika* [online]. Příbram, ČR: Filamos, s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.filamos.cz/stavebni-stroje/michacky/michacky-s-nucenym-obehem>
- [74] Sonogel na ultrazvuk 500ml. *Zdravotnický materiál* [online]. Olomouc, ČR: Zdravotnický Materiál - Velkoobchod s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.zdravotnicke-materialy.cz/eshop/gely/detail-produktu/sonogel-na-ultrazvuk-500ml/0594/0>
- [75] HOOTON R. D., FERRARIS C. F. a DE LARRARD F. Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*. 1998, **20**(2), 241-247. ISSN 01496123. Dostupné z: doi:10.1520/CCA10417J
- [76] LOVICHOVÁ R., FORNŮSEK J., BENEŠOVÁ L. a VALENTIN J. Ultrasound gel as suitable tool for simulation of the fiber orientation in the fiber reinforced concrete. In: *Experimental Stresss Analysis 2016*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd, Západočeská universita, 2016. ISBN 978-80-261-0624-1.
- [77] ČSN EN 1015-3 (72 2400): *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Český normalizační institut, 2000-04.
- [78] BROOKFIELD VISCOSITMETER DVII+PRO. *BROOKFIELD VISCOSITY BROOKFIELD BENELUX* [online]. Netherlands [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: http://brookfield-benelux.com/Brookfield_DVII+PRO_viscometer.html
- [79] Spindle Rack. *AMETEK Brookfield Website* [online]. Middleboro, USA: AMETEK Brookfield, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/spindles-cones-cups-chambers/spindle-rack>
- [80] Spindles – Tagged "Spindles" – AMETEK Brookfield Europe. *AMETEK Brookfield European Online Store* [online]. AMETEK Brookfield, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://store.brookfieldengineering.eu/collections/accessories-spindles/Spindles>

- [81] FERRARIS C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* [online]. 1999, **104**(5), 461-478 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1044677X. Dostupné z: doi:10.6028/jres.104.028
- [82] FERRARIS C. F., a DE LARRARD F. *Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1998. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.IR.6094
- [83] STROEVEN P. Stereological Principles of Spatial Modeling Applied to Steel Fiber-reinforced Concrete in Tension. *ACI Materials Journal*. Farmington Hills, 2009, **106**(3), 213-222.
- [84] MA J., a SCHNEIDER H. Creep of ultra-high performance concrete under compressive stresses. *Leipzig Annual Civil Engineering Report*. 2003, **8**.
- [85] TRTÍK K. Vyztužování struktury betonu ocelovými vlákny. *METAL 2000*. 2000. Dostupné také z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_00/papers/304.pdf
- [86] LOVICHOVÁ R., , FORNŮSEK J. a MÁRA M. The influence of fibre orientation on the mechanical properties of cement composites. In: ZINGONI A., ed. *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. CRC Press, 2019, s. 1501-1508. ISBN 978-0-429-42650-6. Dostupné z: doi:10.1201/9780429426506-259
- [87] ČSN EN 12390-5 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Český normalizační institut, 2020-07.
- [88] ČSN EN 12390-4 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Český normalizační institut, 2020-04.
- [89] ČSN EN 12390-3 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Český normalizační institut, 2020-04.
- [90] ČSN EN 12390-1 (73 1302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Český normalizační institut, 2013-03.
- [91] ABDALLA H. M., a KARIHALOO B. L. Determination of size-independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests. *Magazine of Concrete Research*. 2003, **55**(2), 133-141. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.2003.55.2.133
- [92] GUINEA G. V., , PLANAS J. a ELICES M. Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1 - Influence of experimental procedures. *Materials and Structures*. 1992, **25**(4), 212-218. ISSN 0025-5432. Dostupné z: doi:10.1007/BF02473065
- [93] HU X. Z., a WITTMANN F. H. Fracture energy and fracture process zone. *Materials and Structures*. 1992, **25**(6), 319-326. ISSN 0025-5432. Dostupné z: doi:10.1007/BF02472590
- [94] KARIHALOO B. L., , ABDALLA H. M. a IMJAI T. A simple method for determining the true specific fracture energy of concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2003, **55**(5), 471-481. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.55.5.471.37590
- [95] DUAN K., , HU X. a WITTMANN F. H. Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003, **70**(16), 2257-2268. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/S0013-7944(02)00223-0



- [96] VYDRA V. *Lomové charakteristiky betonu vystaveného působení vysokých teplot*. 2005. Habilitační práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze.
- [97] VYDRA V. *Determination of fracture energy of concrete: Stanovení lomové energie*. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, 2006. ISBN 80-01-03571-9.
- [98] RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*. 1985, **18**(4), 287-290. ISSN 0025-5432. Dostupné z: doi:10.1007/BF02472918
- [99] VAN MIER J. G. M., a VAN VLIET M. R. A. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002, **69**(2), 235-247. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/S0013-7944(01)00087-X
- [100] LÖFGREN I., STANG H. a OLESEN J. F. The WST method, a fracture mechanics test method for FRC. *Materials and Structures*. 2007, **41**(1), 197-211. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-007-9231-3
- [101] VESELÝ V., KERŠNER Z. a ŘOUTIL L. Fracture Energy of Quasi-brittle Materials: Variants of its Expression and Determination, and Related Effects. In: *Engineering Mechanics 2007*. ISBN 978-80-87012-06-2. Dostupné také z: <https://www.engmech.cz/improc/2007/156-Veselyv-PT.pdf>
- [102] ČERMÁK L., a HLAVIČKA R. *Numerické metody*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3752-4.
- [103] HILLERBORG A., ed. Analysis of one single crack. In: WITTMANN F. H. *Fracture Mechanics of Concrete (Developments in civil engineering)*. Elsevier, 1983, s. 223-249. ISBN 0-444-42199-8.
- [104] KRAUTHAMMER, Theodor. *Modern protective structures*. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 08-247-2526-3.
- [105] ZHANG M. H., SHIM V. P. W., LU G. a CHEW C. W. Resistance of high-strength concrete to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2005, **31**(7), 825-841. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009
- [106] LOVICHOVÁ R., MÁRA M., FORNŮSEK J. a KHEML. P. The Thickness Influence of Fibre-reinforced Slabs on Extreme Load Resistance. In: *55th Conference on Experimental Stress Analysis 2017*. Košice: Technical University of Košice, 2017, s. 166-169. ISBN 978-80-553-3167-6.
- [107] BLUDAU C., KEUSER M. a KUSTERMAN A. Perforation Resistance of High-Strength Concrete Panels. *ACI Structural Journal*. 2006, **103**(2), 188-195. ISSN 08893241.
- [108] LI Q. M., REID S. R., WEN H. M. a TELFORD A. R. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*. 2005, **32**(1-4), 224-284. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2005.04.005
- [109] LU Y., ed. Impact on Reinforced Concrete Structures. ALTENBACH H., a ÖCHSNER A. *Encyclopedia of Continuum Mechanics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, s. 1-24. ISBN 978-3-662-53605-6.
- [110] RAHMAN A. I., Ismail, ZAIDI A. M. A., LATIF I. a Muhammad ISMAIL Y. M. Empirical Formula Prediction on Critical Impact Energy for Scabbing Phenomena on

- Concrete Structures. *Applied Physics Research*. 2010, **2**(2), 192-197. ISSN 1916-9647. Dostupné z: doi:10.5539/apr.v2n2p192
- [111] HURTIG K. *Vliv orientace vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení*. 2017. Bakalářská práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Fornůsek J.
- [112] LOVICOVÁ R., , FORNŮSEK J., MÁRA M., KOČOVÁ M. a ŘÍHOVÁ Z. The Fibre Orientation Influence in Cementitious Composite Against Extreme Load Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **307** [cit. 2020-11-10]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/307/1/012069
- [113] ČSN EN 1522 (74 6006): *Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Požadavky a klasifikace*. Český normalizační institut, 2000-05.
- [114] ČSN EN 1523 (74 6007): *Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Zkušební metody*. Český normalizační institut, 2000-05.
- [115] VAVŘINÍK T., , ZATLOUKAL J., FORNŮSEK J. a KONVALINKA P. Numerical analysis of projectile impact on cementitious composite. *AIP Conference Proceedings* [online]. American Institute of Physics, 2013, **1558**(1), 1012-1015 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: doi:10.1063/1.4825675
- [116] 7,62 × 39 mm - Pušková ráže - ZBRANĚ.cz. *ZBRANĚ - databáze zbraní, prodej zbraní, bazar zbraní, střelivo, střelnice, zbrojní průkaz - ZBRANĚ.cz* [online]. Praha, ČR: VOID CZ s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/7,62x39-mm>
- [117] VOSSOUGH F., , OSTERTAG C. P., MONTEIRO P. J. M. a JOHNSON G. C. Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact. *Cement and Concrete Research* [online]. 2007, **37**(1), 96-106 [cit. 2020-11-10]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2006.09.003
- [118] LOVICOVÁ R., , MÁRA M. a FORNŮSEK J. Effect of Placement Method on Projectile Impact Resistance of UHPFRC. *Key Engineering Materials* [online]. 2016, **722**, 316-321 [cit. 2020-11-10]. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.722.316
- [119] KHEML P. *Vliv tloušťky vlákniny vyztuženého kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení*. 2017. Bakalářská práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Fornůsek J.
- [120] KNEUBUEHL B. P. *Ballistic protection*. Thun, Switzerland: Swiss Defense Procurement Agency, 2003. Dostupné také z: <https://www.scribd.com/document/467099419/Ballistic-protection-by-Beat-P-Kneubuehl>
- [121] POLÁČEK M. *Vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení*. 2017. Bakalářská práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Fornůsek J.
- [122] FORNŮSEK J., , MÁRA M. a LOVICOVÁ R. The Influence of Different Fibres Ratio in the Cementitious Composite on Ballistic Resistance. *Key Engineering Materials*. 2018, **760**, 114-118. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.760.114
- [123] FORNŮSEK J., , MÁRA M., SOVJÁK R. a ZATLOUKAL J., FORNŮSEK J., MÁRA M. UHPFRC Resistance to Projectile Impact in Dependence on Fibre Content. FANGUEIRO R., a RANA S. *Advanced Materials for Defense*. Cham: Springer



- International Publishing, 2020, s. 63-69. ISBN 978-3-030-34122-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-34123-7_7
- [124] DEEB R., , KARIHALOO B. L. a KULASEGARAM S. Reorientation of short steel fibres during the flow of self-compacting concrete mix and determination of the fibre orientation factor. *Cement and Concrete Research*. 2014, **56**, 112-120. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2013.10.002
- [125] WIJFFELS M. J. H., , WOLFS R. J. M., SUIKER A. S. J. a SALET T. A. M. Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour. *Cement and Concrete Composites*. 2017, **80**, 342-355. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.04.005
- [126] MILLER A. I., a BJÖRKLUND F. R. *Method of reinforcing concrete with fibres*. 1977. United States. 4,062,913. Uděleno 1977-12-13. Zapsáno 1977-12-13.
- [127] FEYNMAN R. P., , LEIGHTON R. B. a SANDS M. *The Feynman Lectures on Physics*. 2. California Institute of Technology, 1963. ISBN 9780465040858.
- [128] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014. ISBN 978-80-7196-438-4.
- [129] DOBBS E. R. *Electricity and Magnetism*. Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 978-94-011-7092-5.
- [130] REITZ J., , MILFORD F. J., CHRISTY R. a CLAUS A. C. Foundations of Electromagnetic Theory, 3rd Edition. *American Journal of Physics* [online]. 1979, **47**(12), 1110-1110 [cit. 2020-11-04]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.11593
- [131] ŠERÝ M. *Vlastnosti permanentních magnetů*. 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Hruška K.
- [132] AHMED S. M. Effect of Magnetic Water on Engineering Properties of Concrete. *AL-Rafdain Engineering Journal (AREJ)* [online]. 2009, **17**(1), 71-82. ISSN 2220-1270. Dostupné z: doi:10.33899/rengj.2009.38451
- [133] REDDY S. K. B., , GHORPADE V. G. a RAO H. S. Influence of Magnetic Water on Strength Properties of Concrete. *Indian Journal of Science and Technology*. 2013, **7**(1), 14-18. ISSN 09746846. Dostupné z: doi:10.17485/ijst/2014/v7i1.7
- [134] GHOLIZADEH M., a ARABSHAHI H. The Effect of Magnetic Water on Strength Parameters of Concrete. *Research Journal of Applied Sciences* [online]. 2011, **6**(1), 66-69. ISSN 1815932X. Dostupné z: doi:10.3923/rjasci.2011.66.69
- [135] LORAINE A., a HUCHLER P. E. Non-Chemical Water Treatment System: Histories, Principles, and Literature Review: IWC-02-46. In: *International Water Conference: 63rd Annual Meeting*. Pittsburgh, Pennsylvania, 2002.
- [136] STARMER J. E. *Magnetic Treatment of Swimming Pool Water for Enhanced Chemical Oxidation and Disinfecting*. Cranfield, Great Britain, 1996. Disertační práce. Cranfield University, School of Industrial and Manufacturing Science. Vedoucí práce Parsons A. S.
- [137] JOSHI K. M., a KAMAT P. V. Effect of Magnetic Field on the Physical Properties of Water. *Indian Chemical Society*. 1966, **43**, 620-622. ISSN 00194522.
- [138] BRUNS S. A., , KLASSEN V. I. a KONSHINA A. K. Change in the Extinction of Light by Water After Treatment in a Magnetic Field. *Colloid Journal - USSR*. 1966, **28**(1), 153-155.

- [139] CHECHEL P. S., a ANNENKOVA G. V. Influence of Magnetic Treatment on Solubility of Calcium Sulphate. *Coke & Chemistry USSR*. USSR, 1972, **8**, 60-61. ISSN 00100501.
- [140] MARTYNOVA O. I., , TEBENEKHIN E. F. a GUSEV B. T. Conditions and Mechanism of Deposition of the Solid Calcium Carbonate Phase from Aqueous [sic] Solutions under the Influence of a Magnetic Field. *Colloid Journal of Russian Academy of Science*. 1967, **29**, 512-514.
- [141] LIPUS L., , KROPE J. a GAQRBAI L. Magnetic Water Treatment for Scale Prevention. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*. 1994, **22**(4), 239-242. ISSN 2450-5102.
- [142] DONALDSON J. D. Magnetic Treatment of Fluids - Preventing Scale. *Finishing*. 1988, **12**(1), 22-32.
- [143] KORZHOV A. V. Effects of magnetic field on cable sheath corrosion. *Engineering Failure Analysis*. 2020, **116**. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2020.104749
- [144] DAVENPORT A., , TANG Y. C., GONZALEZ-TORREIRA M., YANG S. a HARRIS R. Effects of Magnetic Fields on Corrosion. *Journal of Corrosion Science and Engineering*. 2003, **6**. ISSN 1466-8858.
- [145] LOVICOVÁ R., , TAKÁČOVÁ K., KÜNZEL K., PAPEŽ V., MÁRA M., FORNŮSEK J., KONRÁD P. a SOVJÁK R. Directed Orientation of Steel Fibres in Ultra-high-performance Cementitious Composite Using the Magnetic Field. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials* [online]. Wessex: WIT PRESS, 2020, **196**, 39-49 [cit. 2020-11-25]. ISBN 978-1-78466-389-6. ISSN 1746-4498. Dostupné z: doi:10.2495/HPSM200051
- [146] WIJFFELS, M. J. H. *Magnetically orienting steel fibres in self-compacting concrete*. 2014. Diplomová práce. Eindhoven University of Technology.
- [147] TAKÁČOVÁ K. *Studie orientace ocelových vláken v cementovém kompozitu pomocí magnetického pole*. 2017. Bakalářská práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Fornůsek J.
- [148] TAKÁČOVÁ K. *Vývoj a testování přístroje pro cílenou orientaci vláken v cementových kompozitech pomocí elektromagnetického pole*. 2020. Diplomová práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Fornůsek J.
- [149] OZYURT N., , WOO L. Y., MASON T. O. a SHAH S. P. Monitoring Fiber Dispersion in Fiber-Reinforced Cementitious Materials: Comparison of AC-Impedance Spectroscopy and Image Analysis. *ACI Materials Journal*. Farmington Hills, 2006, **103**(5), 340-347.
- [150] TORRENTS J. M., , BLANCO A., PUJADAS P., AGUADO A., JUAN-GARCÍA P. a SÁNCHEZ-MORAGUES M. Á. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and Structures*. 2012, **45**(10), 1577-1592. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-9858-6
- [151] OZYURT N., , MASON T. O. a SHAH S. P. Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and Concrete Research*. 2006, **36**(9), 1653-1660. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.026
- [152] ZUNA I., a POUŠEK L. *Úvod do zobrazovacích metod v lékařské diagnostice I*. Vyd. 2. České vysoké učení technické v Praze, 2000. ISBN 978-80-01-03779-9.



- [153] ČSN EN 14721 + A1 (72 3432): *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny - Měření obsahu vláken v čerstvém a ztvrdlém betonu*. Český normalizační institut, 2008-12.
- [154] SOLOMON C., a BRECKON T. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. ISBN 9780470689776. Dostupné z: doi:10.1002/9780470689776