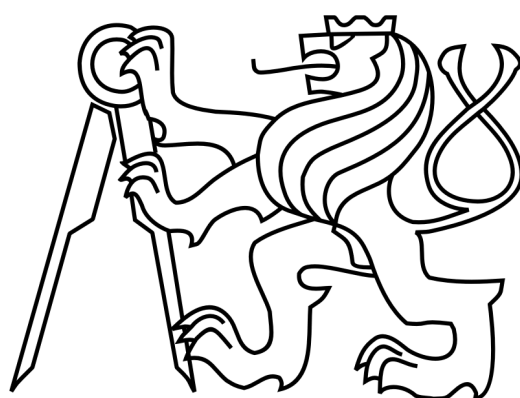


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv hrubého kameniva ve vysokohodnotném betonu na
odolnost proti nárazu projektilu**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Experimentální centrum

**Vliv hrubého kameniva ve vysokohodnotném
betonu na odolnost proti nárazu projektilu**

**Influence of coarse aggregate in high
performance concrete on projectile impact
resistance**

Bakalářská práce

Autor: Filip Petřík
Vedoucí práce: Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.
Konzultant: Ing. Michal Mára
Akademický rok: 2016/2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Petrík Jméno: Filip Osobní číslo: 410064

Zadávací katedra: K210 - Experimentální centrum

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv hrubého kameniva ve vysokohodnotném betonu na odolnost proti nárazu projektilu

Název bakalářské práce anglicky: Influence of coarse aggregate in high performance concrete on projectile impact resistance

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše ultra vysokohodnotných a vysokohodnotných cementových kompozitů s hrubým kamenivem a rozptýlenou ocelovou výztuží v podobě ocelových mikro vláken.

Prozkoumání současného stavu poznání v oblasti mechanických parametrů cementových kompozitů s hrubým kamenivem; vliv hrubého kameniva na vybrané mechanické parametry.

Návrh experimentálního programu pro splnění cílů bakalářské práce, výroba vzorků pro experimentální ověření. Provedení experimentů, vyhodnocení a popsání odezvy cementových kompozitů s hrubým kamenivem na náraz projektilu.

Závěr a shrnutí výsledků, popřípadě návrh na další bádání v dané oblasti.

Seznam doporučené literatury:

Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC, International Journal of Impact Engineering 84 (2015) 38-53.

Impact resistance of basalt aggregated UHP-SFRC/fabric composite panel against small caliber arm, International Journal of Impact Engineering 88 (2016) 201-213.

Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact, International Journal of Impact Engineering 63 (2014) 158-163.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

20.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

Praha, 24. Května 2017

Filip Petřík

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a inspiraci. Velký dík patří také Ing. Michalu Márovi za jeho vstřícnost při konzultacích a věcné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat ostatním pracovníkům Experimentálního centra za jejich ochotu a pomoc při zpracovávání experimentální části této práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem hrubého kameniva na odolnost vysokohodnotného betonu proti nárazu projektilu z hlediska hloubky jeho penetrace a velikosti vzniklého kráteru. Na základě experimentálního programu byly navrženy a vyrobeny vzorky vysokohodnotného betonu s rozptýlenou ocelovou výztuží a s různými druhy a podíly hrubého kameniva, které byly vystaveny rázovému zatížení v podobě nárazu projektilu. Poškozené vzorky byly nasnímány pomocí 3D skeneru a následně byl vyhodnocen jejich povrch. Výstupem práce pak bylo nalezení optimálního obsahu hrubého kameniva ve vysokohodnotném betonu, aby došlo ke zlepšení jeho odolnosti proti nárazu projektilu.

Klíčová slova: vysokohodnotný beton, hrubé kamenivo, náraz projektilu, hloubka penetrace, povrch kráteru, 3D skener

Abstract

The aim of this paper is focused on the influence of coarse aggregate in high performance concrete on projectile impact resistance in terms of depth of penetration and size of the crater. Based on experimental programme, samples of high performance steel fiber reinforced concrete with different types and quantities of coarse aggregates were designed and produced, to be exhibited to impact loading in the form of projectile impact. Damaged samples were scanned using a 3D scanner and then their surface was evaluated. The output of the paper was to find the optimum content of coarse aggregate in high performance concrete to improve its projectile impact resistance.

Key words: high performance concrete, coarse aggregate, projectile impact, depth of penetration, crater surface, 3D scanner

Obsah

1. Úvod	12
1.1. Motivace práce	12
1.2. Cíle práce	12
1.3. Rozsah práce	13
2. Ultra-vysokohodnotný beton s rozptýlenou ocelovou výztuží.....	14
2.1. Charakteristiky UHPSFRC	14
2.2. Složení UHPSFRC	15
2.3. Mechanické vlastnosti UHPSFRC	18
2.3.1. Pevnost v tlaku.....	18
2.3.2. Pevnost v tahu.....	19
2.4. Odolnost UHPSFRC proti nárazu projektilu.....	20
3. UHPSFRC s hrubým kamenivem.....	21
3.1. Hrubé kamenivo	21
3.1.1. Výběr kameniva.....	22
3.1.2. Umělý bílý korund	23
3.1.3. Čedič	23
3.2. UHPSFRC s přidaným korundem.....	24
3.3. UHPSFRC s přidaným čedičem.....	25
4. Experimentální část	27
4.1. Návrh a složení zkušebních vzorků.....	27
4.1.1. Vzorky UHPSFRC s korundem.....	27
4.1.2. Vzorky UHPSFRC s čedičem.....	29
4.1.3. Vzorky UHPSFRC s železitým kamenivem.....	29
4.2. Výroba vzorků.....	30
4.3. Mechanické vlastnosti směsí UHPSFRC	32

4.4.	Zkoušení vzorků.....	32
5.	Výsledky.....	34
5.1.	Nasnímání vzorků pomocí 3D skeneru.....	34
5.2.	Seznam výsledků.....	39
5.3.	Hloubka penetrace.....	40
5.4.	Průměr kráteru.....	42
5.5.	3D povrch.....	45
5.6.	UHPSFRC s železitým kamenivem	47
6.	Vyhodnocení a diskuse.....	48
7.	Závěr a směřování dalšího výzkumu	49
	Použitá literatura	50

Seznam obrázků

[obr. 2.1] Pevnostní třídy betonu	13
[obr. 2.2] Křemičitá moučka	15
[obr. 2.3] Rozlítí betonu v mm v závislosti na množství přidané křemičité moučky ...	16
[obr. 2.4] Pevnost betonu v tlaku v závislosti na množství přidané křemičité moučky	16
[obr. 2.5] Mikrosilika	16
[obr. 2.6] Pracovním diagram ultra-vysokohodnotného betonu bez přidaných vláken .	18
[obr. 2.7] Pracovním diagram ultra-vysokohodnotného betonu s přidanými vlákny ...	18
[obr. 3.1] Autogenní smršťování	21
[obr. 3.2] Porovnání hodnot autogenního smršťování	21
[obr. 3.3] Umělý bílý korund frakce 3-5 mm	22
[obr. 3.4] Čedič frakce 4-8 mm	23
[obr. 3.5] Čedič frakce 0-2 mm	23
[obr. 4.1] Ocelová vlákna o délce 13 mm a průměru 0,15 mm	26
[obr. 4.2] Složení navržené směsi	27
[obr. 4.3] Železité kamenivo frakce 5-8 mm	30
[obr. 4.4] Vzorky v bedně 400 × 300 × 50 mm ³	30
[obr. 4.5] Rozbitá krychle UHPC s obsahem železitého kameniva	31
[obr. 4.6] Výroba vzorků UHPSFRC s obsahem železitého kameniva	31
[obr. 4.7] Tříbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu	32
[obr. 4.8] Měření pevnosti v tlaku	32
[obr. 4.9] Projektil 7,62×39 vz 43	33
[obr. 4.10] Vzorek UHPSFRC s obsahem 5% korundu zasažen jednou ranou projektilu 7,62×39 vz 43	33
[obr. 5.1] Snímání kráteru na přední straně desky pomocí skeneru David 3D	34
[obr. 5.2] Nastavení kalibračního panelu	35
[obr. 5.3] Nastavení světelnosti kamery	35

[obr. 5.4] Snímek povrchu desky	36
[obr. 5.5] Skenování povrchu desky ze čtyř různých úhlů	36
[obr. 5.6] Oříznutí snímků jednotlivých kráterů	37
[obr. 5.7] Zarovnání jednotlivých snímků 1	37
[obr. 5.8] Zarovnání jednotlivých snímků 2	37
[obr. 5.9] Sloučení snímků kráteru v jeden kompaktní povrch 1	37
[obr. 5.10] Sloučení snímků kráteru v jeden kompaktní povrch 2	37
[obr. 5.11] Zobrazení povrchu kráteru v programu Autocad Civil 3D pomocí mračna bodů	38
[obr. 5.12] Měření průměru kráteru pomocí softwaru Autocad Civil 3D	38
[obr. 5.13] Měření hloubky kráteru pomocí softwaru Autocad Civil 3D	39
[obr. 5.14] Vzorek Korund5_3 po zásahu projektilu	46
[obr. 5.15] Vzorek Korund15_1 po zásahu projektilu	46
[obr. 5.16] Vzorek Korund30_2 po zásahu projektilu	46
[obr. 5.17] Vzorek Čedič30_1 po zásahu projektilu	47
[obr. 5.18] Přední strana desky z UHPSFRC s železitým kamenivem po zásahu tří projektilů	47
[obr. 5.19] Zadní strana desky z UHPSFRC s železitým kamenivem po zásahu tří projektilů	48

Seznam tabulek

[Tab. 4.1] Poměrné množství složek prefabrikované směsi	28
[Tab. 4.2] Složení navržených směsí UHPSFRC s obsahem korundu	29
[Tab. 4.3] Složení navržených směsí UHPSFRC s obsahem čediče	29
[Tab. 4.4] Mechanické vlastnosti vzorků	32
[Tab. 5.1] Seznam výsledků, část 1	39
[Tab. 5.2] Seznam výsledků, část 2	40
[Tab. 5.3] Seznam výsledků, průměrné hodnoty jednotlivých směsí	40

Seznam grafů

[graf 5.1] Velikosti hloubky penetrace	41
[graf 5.2] Závislost hloubky penetrace na tlakové pevnosti	42
[graf 5.3] Závislost hloubky penetrace na podílu hrubého kameniva	42
[graf 5.4] Závislost průměru kráteru na tlakové pevnosti	43
[graf 5.5] Závislost průměru kráteru na množství hrubého kameniva	43
[graf 5.6] Závislost hloubky penetrace a průměru kráteru	44
[graf 5.7] Velikosti 2D povrchu	44
[graf 5.8] Velikosti 3D povrchu	45

1. Úvod

1.1. Motivace práce

V poslední době se klade velký důraz na trvanlivost, odolnost a bezpečnost betonových konstrukcí, především občanských a vojenských staveb, které by mohly být cílem úmyslného nebo náhodného rázového zatížení. Tyto konstrukce, mezi které patří objekty strategického významu jako například vládní budovy, opevnění, obranné úkryty nebo jiné ochranné konstrukce, musí těmto zatížením odolat. Jsou navrženy tak, aby vydržely možné extrémní zatížení, které může být vyvolané projektily, střepinami, explozemi, nárazem automobilů nebo letadel, zemětřesením a s ohledem na události poslední doby také teroristickými útoky.

Vysoký potenciál materiálu na stavbu těchto konstrukcí představuje vysokohodnotný beton s rozptýlenou ocelovou výztuží (UHPSFRC). Motivací této práce je zlepšení odolnosti desek z UHPSFRC proti nárazu projektilu. Vylepšení vlastností těchto desek je potřeba dosáhnout při zachování jejich tloušťky, aby se nezměnila snadná manipulace s deskami z důvodu vysoké hmotnosti. Při zvýšení množství ocelových vláken nad určitou hranici se zhorší zpracovatelnost čerstvého betonu a dochází ke snížení pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Tato práce se zaměří na zlepšení UHPSFRC přidáním hrubého kameniva.

1.2. Cíle práce

Pokusy s UHPSFRC s hrubým kamenivem prováděl v roce 2015 H. Wu a kolektiv [1; 2]. Cílem této práce bylo ověřit výsledky těchto studií a vytvořit experiment v našich podmínkách a s materiály běžně dostupnými v Česku.

Záměrem této práce bylo tedy vytvořit experimentální program, kterým bude možné zjistit chování UHPSFRC s hrubým kamenivem z hlediska odolnosti proti nárazu projektilu. Byly vytvořeny vzorky s různými druhy a obsahy hrubého kameniva, které byly vystaveny nárazu projektilu. Povrchy poškozených vzorků byly nasnímány a vyhodnoceny pomocí 3D skeneru a následně porovnány. Výstupem práce pak bylo nalezení ideálního obsahu hrubého kameniva ve směsi UHPSFRC, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností materiálu.

1.3. Rozsah práce

Práce se dělí na dva hlavní celky. První část je zaměřena na rešerši odborné literatury a je rozdělena na dvě kapitoly. Věnuje se nejdříve charakteristikám, složení a vlastnostem UHPSFRC, ve druhé polovině se potom řeší vlastnosti hrubého kameniva a chování UHPSFRC po přidání tohoto kameniva.

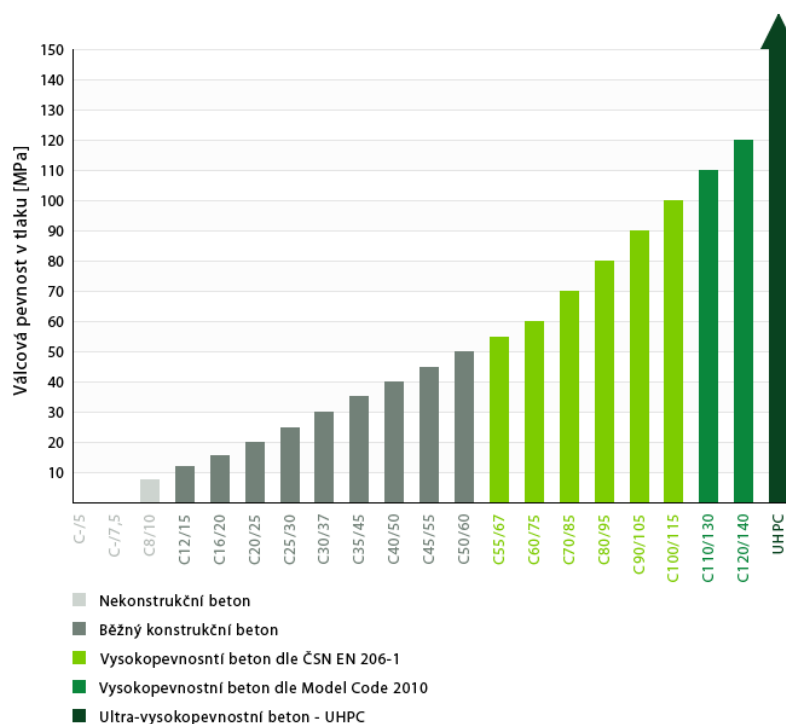
Ve druhé části je pak popsána experimentální část této práce. Text obsahuje informace o návrhu, složení a výrobě vzorků, dále také o jejich zkoušení. V závěru je pak pojednání o výsledcích a vyhodnocení této práce.

2. Ultra-vysokohodnotný beton s rozptýlenou ocelovou výztuží

2.1. Charakteristiky UHPSFRC

Ultra-vysokohodnotný beton s rozptýlenou ocelovou výztuží (UHPSFRC) je popisován jako kompozit, který charakterizuje vysoké množství ocelových vláken a mikrosiliky, nízký vodní součinitel a absence hrubého kameniva s průměrem zrn větším než 4 mm. Vyznačuje se velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, samozhutnitelností nebo nízkou propustností, což způsobuje vysokou odolnost tohoto materiálu vůči vnějšímu prostředí. Běžné pevnosti UHPSFRC se pohybují mezi 150-200 MPa v tlaku a 7-15 MPa v jednoosém tahu. [3]

Neexistuje žádná celosvětově uznávaná norma, která by stanovovala, jaké musí mít beton parametry, aby mohl být označen jako ultra-vysokohodnotný. Je však zřejmé, že pevnosti UHPSFRC se pohybují vysoko nad stanovenými pevnostními třídami dle normy ČSN EN 201-1/Z3, která počítá s nejvyšší pevnostní třídou C100/115. Model Code FIB 2010 pak obsahuje ještě třídu C120/140 [obr 2.1]. [4; 5]



[obr. 2.1] Pevnostní třídy betonu [6]

UHPSFRC je v betonářském oboru moderním trendem a má široké spektrum využití. Používá se například na nosné konstrukce, především mostů a lávek, a to z důvodu snížení vlastní hmotnosti konstrukce a prodloužení její životnosti. Je také vhodný na sanace betonových konstrukcí. Je možné vyhotovit přibetonávky tenkou vrstvou UHPSFRC za účelem zesílení staré konstrukce bez jejího zbytečného přetížení. Využívá se také na spoje prefabrikovaných konstrukcí, protože vykazuje výbornou soudržnost mezi výztuží a betonem. Další možné použití najde UHPSFRC u fasádních prvků. Dají se zhotovit tenké prvky rozmanitých tvarů, které vykazují vysokou odolnost i v agresivním prostředí. [7]

Pokud se omezí maximální zrno kameniva na 0,5 – 4 mm, je možné dosáhnout pevností v tlaku 200-250 MPa. Získaný materiál lze tedy řadit mezi klasický beton a ocel. UHPSFRC je sice nákladný materiál, ale má použití u konstrukcí, které jsou běžně vyráběny z oceli. Jeho aplikací se získá výrazně pevnější a trvanlivější konstrukce, která bude mít nižší náklady na její údržbu než u ocelových konstrukcí. [8]

Výhoda UHPSFRC oproti běžnému betonu spočívá ale především v tom, že vykazuje vysokou kapacitu absorpce energie a při rázovém zatížení dochází k menšímu poškození betonu z hlediska jeho roztržení nebo poškrábání. [3]

2.2. Složení UHPSFRC

Jako nejdůležitější hlediska při návrhu UHPSFRC musíme zohlednit zlepšení homogenity betonu úpravou zrnitosti, přidání co nejmenšího množství vody a přídavek výztuže z ocelových vláken. Zpracovatelnost betonu při zachování minimálního vodního součinitele je zajištěna přidáním vhodných superplastifikátorů. Rozptýlená výztuž poté zlepšuje nejen pevnosti, ale i houževnatost. Obecně UHPSFRC obsahuje vysoké množství cementu (více než 800 kg/m^3), mikrosiliky (více než 200 kg/m^3) a jemných ocelových vláken (více než 100 kg/m^3). [8]

Mezi hlavní složky betonu patří cement, který v betonu plní funkci pojiva. Cementy se dělí podle skladby vstupních minerálů a podle pevnostní třídy. Pro vysokohodnotné betony se volí zpravidla cement pevnostní třídy 52,5. [9] Ve směsi většinou není takové množství vody, aby cement úplně zhydratoval. Pojivo tedy částečně funguje jako plnivo, které pomáhá optimalizovat křivku zrnitosti směsi a také zvyšuje hutnost betonu. [4; 8]

Druhou hlavní složkou betonu je kamenivo, které je jeho nosnou kostrou. U ultravysokohodnotného betonu je potřeba, aby byla křivka zrnitosti stanovena tak, že bude směs vyplněna od nejjemnějších částic po ty hrubší. [4] Vzhledem k vysokopevnostnímu charakteru betonu je nezbytné, aby i kamenivo vykazovalo vysoké hodnoty pevností a minimum interních poruch. Při výrobě UHPSFRC je nutné splnit vyšší nároky na kvalitu vstupních surovin, proto se používají tříděné písky z pevných hornin, nejčastěji křemičitý písek. [10]

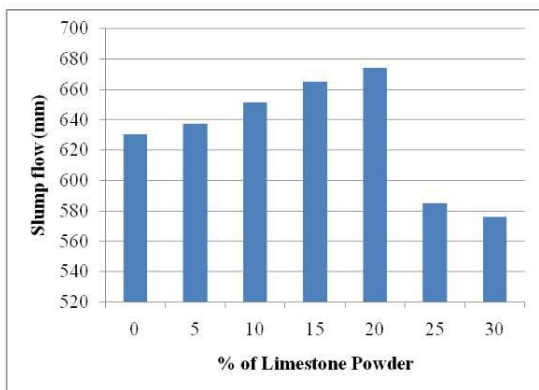
Výroba UHPSFRC také není možná bez příměsí. Minerální příměsi lze charakterizovat jako anorganické látky, které se přidávají do betonu za účelem zlepšení jeho vlastností v čerstvém i zatvrdlém stavu. Tyto látky mají velikost částic menší než 0,125 mm a vyznačují se velkým měrným povrchem. Příměsi jsou nejčastěji používány jako částečné náhrady pojivové složky nebo jako jemné podíly plniva. Dle normy ČSN EN 206-1 jsou příměsi rozděleny na 2 typy.

Typ I – inertní příměsi – mají v betonu pomoci dosáhnout hutnější struktury a zlepšit reologické vlastnosti čerstvého betonu. Tyto příměsi díky svému mineralogickému složení netuhnou ani netvrdnou. Do UHPSFRC se jako inertní příměs přidává nejčastěji křemičitá moučka [obr. 2.2]. Tento materiál vzniká zachytáváním jemného podílu kameniva jako odpad při drcení kameniva v lomu. Charakterizuje ho průměr částic 0,01-0,125 mm a měrný povrch 150-300 m²/kg. Díky těmto vlastnostem vyplňuje zrnitostní křivku a podílí se na vyšší hutnosti betonové směsi. [11]

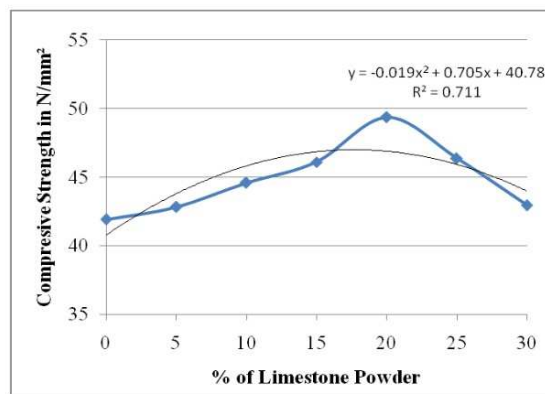


[obr. 2.2] Křemičitá moučka

Dle výsledků studií, kterými se zabývali B. Beeralingegowda a V. D. Gundakalle, je vidět, že při 20% náhradě cementu křemičitou moučkou je dosaženo nejlepšího rozlité [obr. 2.3] a nejvyšší pevnosti v tlaku [obr. 2.4]. [12]



[obr. 2.3] Rozlití betonu v mm v závislosti na množství přidané křemičité moučky [12]



[obr. 2.4] Pevnost betonu v tlaku v závislosti na množství přidané křemičité moučky [12]

Typ II – aktivní příměsi – jsou látky, které svým složením aktivně přispívají k nárůstu pevnosti cementového tmele. Aktivní příměsi jsou buď latentně hydraulické, jejichž schopnosti jsou aktivovány účinkem budičů, nebo pucolánové, které obsahují amorfni SiO_2 , jenž je schopen reagovat s Ca(OH)_2 za vzniku C-S-H gelu. Do UHPSFRC se přidávají aktivní příměsi v podobě mikrosiliky [obr. 2.5].



[obr. 2.5] Mikrosilika

Tato látka obsahuje 90-98% amorfniho SiO_2 a má velmi vysoký měrný povrch (15000-25000 m^2/kg) při velikosti kulového zrna $(1 - 2) \cdot 10^{-7}$ m. Díky své jemnosti vyplňuje mezery mezi zrny cementu, čímž zlepšuje pevnost tranzitních zón na povrchu kameniva. Použitím mikrosiliky také dochází k zamezení odmísení vody a zlepšení čerpatelnosti betonu. Po zatvrdnutí se pak vlivem větší hutnosti betonu zlepšuje odolnost proti vlivům agresivního prostředí. Dochází také ke zvýšení odolnosti proti smršťování a vzniku mikrotrhlin. [11]

Další složkou betonu jsou přísady. Do UHPSFRC se nejčastěji přidávají přísady plastifikační nebo superplastifikační. Superplastifikátory jsou v podstatě plastifikační přísady se silnějším ztekucujícím účinkem. Jsou to látky, které umožňují redukovat množství záměsové vody při zachování zpracovatelnosti čerstvého betonu. Základní funkcí superplastifikátorů je tedy redukce vodního součinitele (w/c). [9] Vodní součinitel (w/c) se v UHPSFRC pohybuje okolo hodnoty 0,2. [13]

Další důležitou součástí UHPSFRC jsou ocelové drátky, které v betonu působí jako rozptýlená výztuž. Tyto drátky mají výrazně menší rozměry (průměr 0,2-0,3 mm) než drátky, které jsou používány do běžných konstrukcí, například do podlah. Jejich množství se pohybuje mezi 1-2%, objemově 80-160 kg/m³. Drátky omezují křehké chování betonu a zároveň výrazně zvyšují pevnost betonu v tahu.

2.3. Mechanické vlastnosti UHPSFRC

V posledních letech byl UHPSFRC z hlediska mechanických vlastností pro badatele velké téma. Běžný beton je sice ekonomický, ale má velkou nevýhodu v nízkých pevnostech v tahu a za ohybu. Oproti tomu má UHPSFRC kromě vysoké pevnosti v tlaku také výrazně zvýšenou odolnost proti porušení způsobenému právě tahem nebo ohybem. [14]

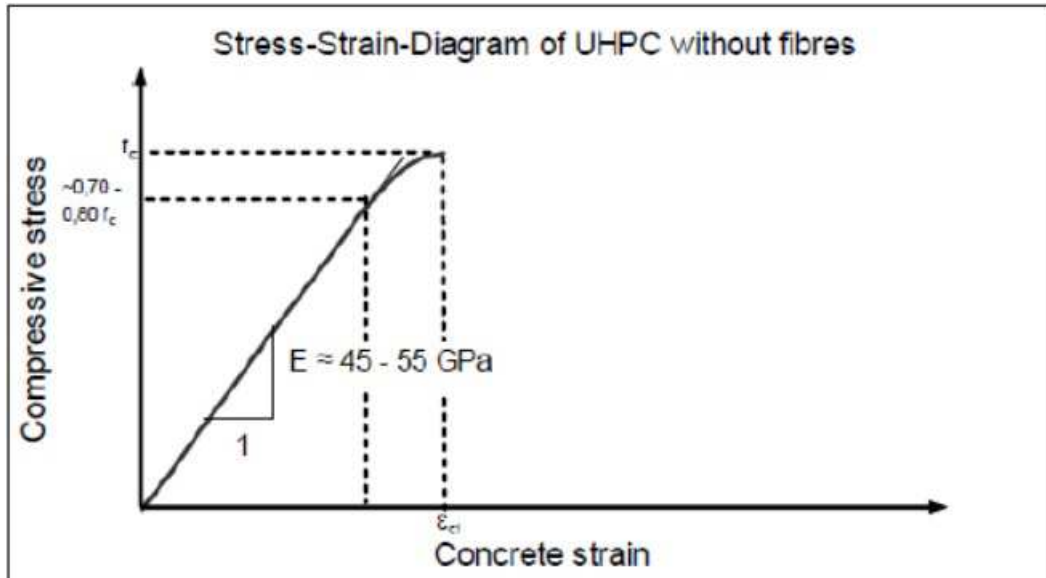
2.3.1. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je jedním z primárních parametrů, které charakterizují UHPSFRC. Běžně se pohybuje v rozmezí 150-220 MPa, ale lze dosáhnout i vyšších pevností. [10; 12; 15; 16] Výsledná pevnost UHPSFRC v tlaku je dána několika parametry, které by se měly při uvádění pevnosti betonu v tlaku také deklarovat. Mezi tyto faktory patří například proteplování směsi v počátečních fázích tuhnutí a tvrdnutí, způsob uložení a ošetřování vzorků, rychlost jejich zatěžování nebo také velikost vzorků. [10]

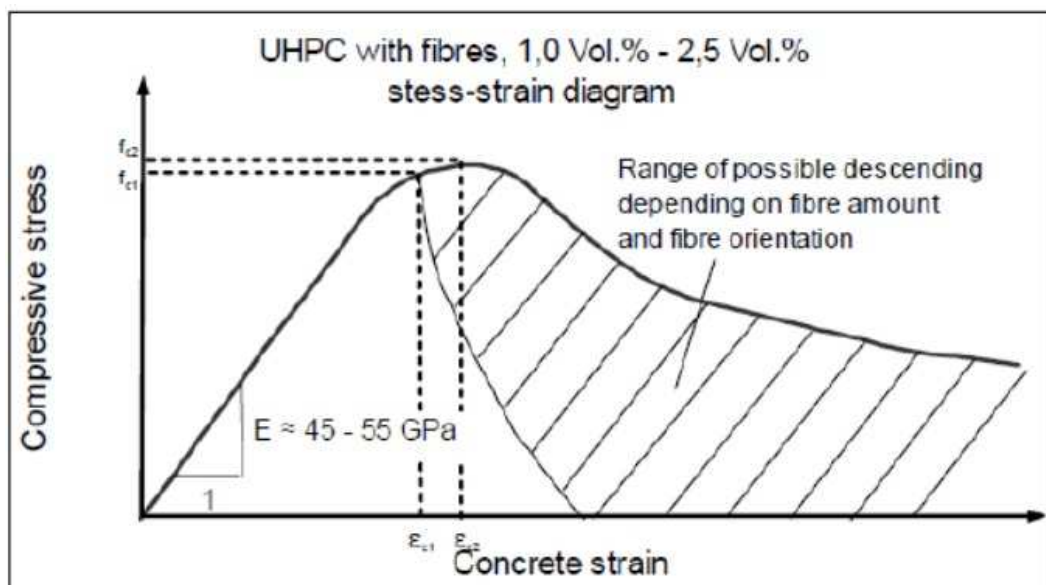
Podle výzkumů, které prováděli P. R. Prem, B. H. Bharatkumar a N. R. Iyer, lze vyvodit, že u UHPSFRC dochází k velmi rychlému nárůstu pevnosti v tlaku. Po 7 dnech od vyhotovení směsi získá materiál 80% velikosti 28-denní pevnosti v tlaku. Po dalších 7 dnech se pak pevnost v tlaku dostane na 90% velikosti 28-denní pevnosti. [14]

Přidání vláken do ultra-vysokohodnotného betonu má pouze malý vliv na velikost pevnosti v tlaku, ale značně ovlivňuje pracovní diagram a chování betonu po vzniku trhlin. Na pracovním diagramu ultra-vysokohodnotného betonu bez přidávaných vláken -

UHPC [obr. 2.6] je vidět, že po dosažení meze pevnosti dochází ke křehkému lomu a velmi dramatickému poklesu pevnosti betonu. Naopak UHPSFRC vykazuje velice duktilní porušení [obr. 2.7]. Velikost poklesu pevnosti závisí na velikosti a množství vláken, ale také na jejich orientaci. [15]



[obr. 2.6] Pracovním diagram ultra-vysokohodnotného betonu bez přidaných vláken [15]



[obr. 2.7] Pracovním diagram ultra-vysokohodnotného betonu s přidanými vlákny [15]

2.3.2. Pevnost v tahu

Pro účely UHPSFRC jsou podstatné dva způsoby stanovení pevnosti v tahu – zkouška v tahu za ohybu a zkouška pevnosti v prostém tahu. Každý test pak poskytuje jinou

hodnotu. [10] Zásadní pro pevnost ultra-vysokohodnotného betonu v tahu je přítomnost ocelových vláken v podobě rozptýlené výztuže. Bez vláken vykazuje UHPC pevnost v prostém tahu 7-10 MPa, s přidáním vláken se pak může tato hodnota až zdvojnásobit. Zvýšení pevnosti závisí na druhu, množství a orientaci vláken. Pevnost v tahu za ohybu nabývá zpravidla vyšších hodnot než pevnost v prostém tahu. [15]

2.4. Odolnost UHPSFRC proti nárazu projektilu

Aby se zabránilo kolapsu konstrukcí a zraněním, musí konstrukce z vysokopevnostních materiálů vykazovat také lepší odolnost proti rázovému zatížení. Odolnost betonu proti nárazu projektilu závisí na mnoha aspektech. Zlepšení odolnosti proti rázovému zatížení z hlediska hloubky penetrace i průměru kráteru lze dosáhnout snížením vodního součinitele w/c a zvýšením pevnosti betonu v tlaku. Přítomnost rozptýlených ocelových vláken poté zmenší průměr kráteru. Z těchto důvodů je použití UHPSFRC ideálním řešením při stavbě konstrukcí, které by mohly být potenciálně namáhané rázovým zatížením. Je známo, že tradiční vlákny vyztužený beton (FRC) s běžnou pevností matrice má velkou kapacitu absorpce energie při zásahu projektilem. Nicméně ze studií vyplývá, že UHPSFRC má mnohem větší schopnost pohlcení energie při kvazi-statickém i dynamickém namáhání. [3]

Kompozity na bázi cementu, které jsou vyztužené ocelovými vlákny, jsou tedy obecně vhodné materiály pro vojenské i občanské stavby, které jsou navrženy tak, aby odolaly náhodnému rázovému zatížení způsobenému projektily, střepinami apod. Z experimentálních výzkumů E. F. O'Neila a kolektivu [17] bylo zjištěno, že hloubka penetrace betonového vzorku s pevností v tlaku přes 150 MPa byla o 50% menší než u vzorků s běžnou tlakovou pevností 35 MPa. Vliv tlakové pevnosti na odolnost UHPFRC proti nárazu projektilu dokázal ve svých studiích také A. N. Dancygier [18; 19], který se také věnoval vlivům na zlepšení duktility UHPC. Zjistil, že nejefektivnější přístup k omezení roztržení nebo poškození přední i zadní strany vzorku je přidání ocelových vláken. [20] P. Máca, R. Sovják a P. Konvalinka ve svých experimentech poté zjistili, že ideální množství ocelových vláken (o délce 13 mm a průměru 0,15 mm) je s ohledem na zachování mechanických vlastností a zpracovatelnosti 1,5-2% objemu směsi. Při přidání většího množství vláken než 2% objemu směsi dochází ke snížení pevnosti v tlaku a modulu pružnosti betonu. [3]

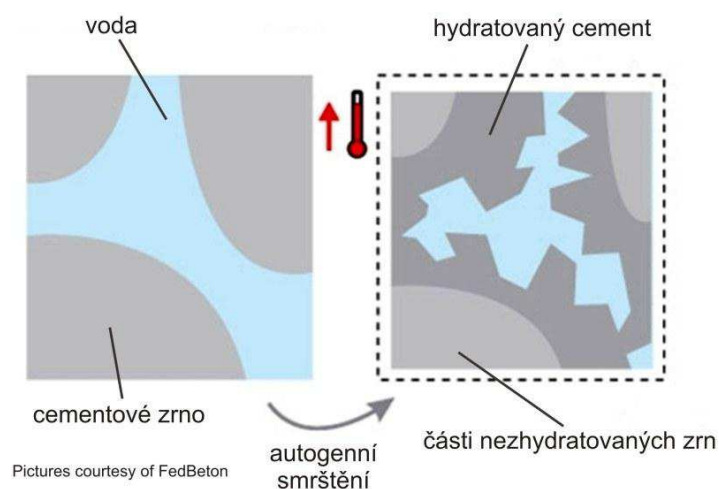
3. UHPSFRC s hrubým kamenivem

Odolnost betonu proti nárazu projektilu ovlivňuje kromě tlakové pevnosti také velikost, pevnost a tvrdost přidaného hrubého kameniva. Ve snaze dosáhnout co nejvyšší pevnosti v tlaku se nicméně přítomnost hrubého kameniva v UHPSFRC snižovala nebo dokonce eliminovala, aby se dosáhlo potřebné homogenity a hutnosti směsi. Anti-penetrační schopnosti hrubého kameniva se tedy téměř zanedbávaly. Poté se ale při pokusech s penetrací projektilu, které prováděli M. H. Zhang a kolektiv [21], H. Langberg a G. Markeset [22] nebo H. Wu a kolektiv [23], zjistilo, že hloubka penetrace projektilu se nadále nesnižuje, pokud tlaková pevnost betonu dosáhne určité hranice. Optimální pevnost v tlaku pro UHPSFRC, ze kterého budou vyhotoveny ochranné konstrukce, byla navržena na 90-150 MPa s ohledem na komplexní úvahy o efektivitě ochrany a nákladech na výrobu. Proto je možné přidání hrubého kameniva do matrice UHPSFRC, i když je pravděpodobné, že se tlaková pevnost sníží do zmíněného rozsahu. Zároveň bude ale odolnost proti nárazu projektilu zvýšena o přítomnost hrubého kameniva. [1]

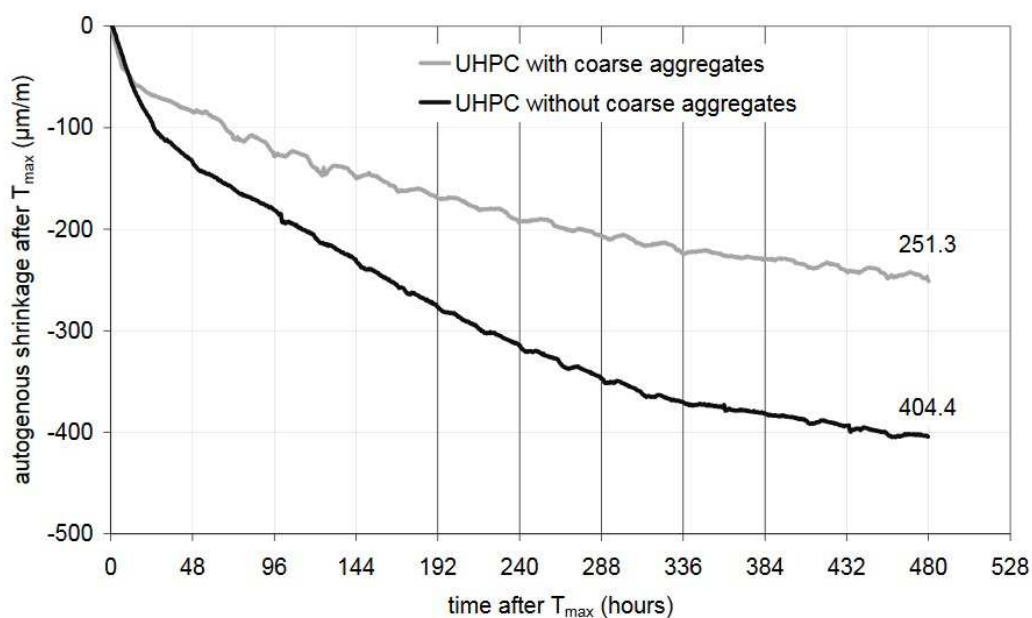
3.1. Hrubé kamenivo

Rozdíly mezi tepelnými a mechanickými vlastnostmi kameniva a cementové matrice jsou jedním z hlavních důvodů tvorby mikrotrhlin v tranzitní zóně cementového kompozitu. Délka mikro trhlin je úměrná velikosti kameniva, proto se v UHPSFRC, u kterého je požadavek na maximální pevnosti, omezuje přítomnost hrubého kameniva. Nicméně, čím menší je průměr zrn přidaného kameniva, tím větší má kamenivo povrch, který je potřeba obalit cementovou pastou. To vede k vysokému obsahu cementu ve směsi UHPSFRC ($700-1000 \text{ kg/m}^3$), což může mít nevýhody, jako je například autogenní smršťování. Autogenní smršťování způsobuje snížení objemu betonové směsi při hydrataci cementu a uvolňování hydratačního tepla [obr. 3.1]. Změny objemu v počáteční fázi tuhnutí mohou způsobit mikrotrhliny. [24]

Přidáním hrubého kameniva dojde ke snížení množství cementu ve směsi a tím se vliv autogenního smršťování sníží. [15] Dle výsledků experimentu D. Schmidta a kolektivu jsou hodnoty autogenního smršťování u UHPSFRC s hrubým kamenivem zhruba o 40% nižší než u vzorku s maximálním průměrem zrna kameniva 0,8 mm [obr. 3.2]. [24]



[obr. 3.1] Autogenní smršťování



[obr. 3.2] Porovnání hodnot autogenního smršťování

3.1.1. Výběr kameniva

Při výběru vhodného hrubého kameniva do UHPSFRC je nutné brát ohled na jeho tvrdost, pevnost, velikost zrn a také objemovou hmotnost. Pokud by byla objemová hmotnost kameniva příliš vysoká, kamenivo by v betonu segregovalo a nevytvořilo by homogenní materiál. Pevnost a tvrdost kameniva jsou důležité z toho pohledu, že UHPSFRC je vysokopevnostní materiál, u kterého jsou kladeny vysoké nároky

na kvalitu vstupních surovin, proto nemůže být přidané hrubé kamenivo slabým článkem směsi. Při výběru frakce kameniva je vhodné, aby byla velikost jeho zrn výrazně menší, než je tloušťka konstrukčního prvku. [15]

3.1.2. Umělý bílý korund

Jedním z ideálních materiálů pro funkci hrubého kameniva v UHPSFRC je umělý bílý korund [obr. 3.3], a to především z důvodu jeho velmi vysoké tvrdosti, která na desetistupňové Mohsově stupnici dosahuje hodnoty 9, a jeho odolnosti vůči opotřebení. Korund je souhrnný název pro nerosty, které jsou v podstatě Al_2O_3 , ale v důsledku zbarvení se vyskytují v různých odrůdách. [25]

V našich podmínkách je nejrozšířenější právě umělý bílý korund, který se vyrábí v indukčních pecích tavením práškového Al_2O_3 v kyslíkovodíkovém plameni. Vzniklý materiál se po vychladnutí opracuje a roztrídí. Objemová hmotnost umělého bílého korundu se běžně pohybuje mezi $3750\text{-}3950 \text{ kg/m}^3$. [25; 26]



[obr. 3.3] Umělý bílý korund frakce 3-5 mm

3.1.3. Čedič

Dalším vhodným materiálem, který je vhodný pro použití do UHPSFRC je čedič [obr. 3.4], [obr. 3.5]. Čedič neboli bazalt je výlevná magmatická hornina, která se na povrchu Země vyskytuje v nejhojnějším množství. Oproti jiným běžným horninám vyniká především velmi vysokou pevností v tlaku, která se pohybuje mezi 180-

380 MPa. Pevnost čediče dosahuje na Mohsově stupnici hodnoty 8, jeho objemová hmotnost se pak pohybuje okolo 3200 kg/m³. [27]



[obr. 3.4] Čedič frakce 4-8 mm



[obr. 3.5] Čedič frakce 0-2 mm

3.2. UHPSFRC s přidáním korundem

Experimenty s UHPSFRC s přidáním korundem jako hrubým kamenivem (UHP-CASFRC) prováděl v roce 2015 H. Wu a kolektiv. [1] Ve snaze vytvořit vysoce odolný materiál proti nárazu projektilu vytvořil 16 vzorků UHP-CASFRC s různým obsahem korundu a také jeho různými frakcemi. Vzorky poté testoval zásahem projektilu o rychlostech 510-850 m/s, průměrnou hmotností 341,2 g a průměrem 25,3 mm.

Nejprve se zaměřil na testování mechanických vlastností. Pevnost v tlaku i pevnost v tahu za ohybu vyšly v daném pokusu u UHP-CASFRC vyšší než u UHPSFRC bez hrubého kameniva. Z výsledků lze také vyvodit, že při zvětšení velikosti zrna kameniva dosahuje beton vyšších pevností v tlaku. Při změně frakce z 5-20 mm na 35-45 mm dojde ke zvýšení tlakové pevnosti ze 106,6 MPa na 125,6 MPa, tedy o 18%.

S korundem frakce 65-75 mm poté beton dosahoval pevnosti v tlaku ještě o 3% vyšší (129,2 MPa). Při zvýšení podílu kameniva frakce 5-20 mm z 15% na 30% došlo ke zlepšení tlakové pevnosti o 16%.

Z hlediska hloubky penetrace (DOP) projektilu lze konstatovat, že při zvětšení velikosti zrna kameniva z 0,5d (kde d je průměr projektilu) na 1,5d a 2,5d její hodnota postupně klesá. Například s korundem frakce 65-75 mm byla průměrná hloubka penetrace 48 mm, což je o 51% nižší hodnota, než s korundem frakce 5-20 mm. Zajímavostí také je extrémně nízká hodnota DOP u jednoho ze vzorků s kamenivem frakce 35-45 mm. Ta by se dala vysvětlit tím, že projektil trefil přímo tvrdou částici hrubého kameniva a o ni se roztříštil. Bylo také zjištěno, že s rostoucí velikostí zrna přidaného plniva pravděpodobnost přímého zásahu částice hrubého kameniva roste. Proto je možné takto značně posílit odolnost proti nárazu projektilu UHPSFRC, pokud bude použito hrubé kamenivo s vysokou tvrdostí a pevností.

V dalším porovnání je vidět, že hloubka penetrace postupně roste při zvyšování rychlosti vystřeleného projektilu. Zvláštního výsledku pak bylo dosaženo, když hloubka penetrace betonu s podílem korundu 45% byla vyšší, než u vzorků s podílem 30%, které navíc vykazovaly také nižší pevnosti v tlaku. Autor experimentu to zdůvodňuje tím, že vzorky se 45% zastoupením korundu nebyly dostatečně zhutněny, což doložil obrázkem, kde byly vidět dutiny na povrchu vzorku.

Povrch kráteru po nárazu projektilu podle výsledků experimentu klesá, pokud se zvýší velikost zrna přidaného hrubého kameniva. Mírně lepších výsledků se z hlediska povrchu kráteru také dosahuje, pokud se zvýší podíl korundu ve směsi. Průměrný povrch vzniklého kráteru při podílu korundu 45% (245,4 cm²) byl o 12,5% menší než při podílu 30% (280,4 cm²). Velikost objemu kráteru se pak chová podobně jako jeho povrch.

H. Wu a kolektiv tedy dokázali, že korund v UHPSFRC může pozitivně ovlivňovat jeho odolnost proti nárazu projektilu. Vzhledem k nízkým počtům jednotlivých vzorků je ale potřeba dané hodnoty ověřit dalšími experimenty. [1]

3.3. UHPSFRC s přidaným čedičem

H. Wu a kolektiv prováděli v roce 2015 experimenty i s UHPSFRC s přidaným čedičem jako hrubým kamenivem (UHP-BASFRC). [2] Byly vyrobeny vzorky s čedičem o frakci 5-15 mm, které bylo možné porovnat s předchozími experimenty s korundem,

a také další vzorky s čedičem o frakci 5-10 mm, pevnosti v tlaku 210 MPa a objemové hmotnosti 2800 kg/m^3 , které byly testovány menšími rážemi projektilů.

Mechanické vlastnosti UHP-BASFRC byly podle výsledků o 5-10% horší, než u vzorků s přidaným korundem, a to jak z hlediska 7-denních a 28-denních pevností v tlaku, tak z hlediska pevnosti v tahu za ohybu. To by mohlo naznačovat, že statické pevnosti UHPSFRC rostou s tvrdostí přidaného hrubého kameniva. Stejně jako u UHP-CASFRC pak pevnosti tohoto kompozitu nepatrně vzrostly při zvýšení podílu přidaného čediče z 15% na 30% celkového objemu vzorku.

Při porovnání hloubky penetrace (DOP) si lze všimnout, že při zvýšení rychlosti projektilu DOP roste, stejně jako u UHP-CASFRC. Zajímavé je, že u vysohodnotného betonu s čedičem vyšla hloubka penetrace vyšší, než u vzorků s korundem. Z toho můžeme vyvodit, že tvrdost hrubého kameniva pozitivně ovlivňuje hloubku penetrace projektilu. Také se zdá, že právě tvrdost hrubého kameniva má větší vliv na DOP, než tlaková pevnost materiálu, což H. Wu předpokládal [28].

Povrch kráteru vzorků UHP-BASFRC poté vyšel o 20-30% nižší, než u vzorků s korundem. Autor to zdůvodňuje tím, že povrch zrn korundového kameniva je hladší než u čediče, což vede k nižší pevnosti spojení kameniva a cementové pasty v tranzitní zóně cementového kompozitu.

4. Experimentální část

4.1. Návrh a složení zkušebních vzorků

Ke zjištění chování UHPSFRC s přidaným hrubým kamenivem z hlediska odolnosti proti nárazu projektilu bylo v rámci experimentálního programu navrženo celkem 8 druhů vzorků. Každý z nich se poté vyhotovil ve třech provedeních, aby bylo možné dosáhnout více vypovídajících výsledků. Tloušťka všech desek byla stanovena na 50 mm. Jejich velikost byla $400 \times 300 \text{ mm}^2$. Ocelová vlákna, která ve směsi plní funkci rozptýlené výztuže, byla použita o velikosti 13 mm na délku a 0,15 mm v průměru. [obr. 4.1] Množství přidaných drátků bylo u všech vzorků 1,5% objemové hmotnosti kompozitu.



[obr. 4.1] Ocelová vlákna o délce 13 mm a průměru 0,15 mm

4.1.1. Vzorky UHPSFRC s korundem

U prvních zkušebních vzorků UHPSFRC s korundem byla použita suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu [29], do které byly přidány podíly korundu. Tato prefabrikovaná směs obsahuje cementovou matici, kterou tvoří umletý cementový slínek s měrným povrchem vyšším než $150 \text{ m}^2/\text{kg}$. Součástí směsi je dále plastifikátor, odpěňovač, jemná frakce látek pucolánového charakteru a jemnozrnná a hrubozrnná inertní plniva. Množství jednotlivých složek je vidět v tabulce [Tab. 4.1]. Vodní součinitel u této směsi byl 0,3. S touto prefabrikovanou směsí byly vyrobeny dva druhy vzorků – se zastoupením korundu 5% z celkového objemu

kompozitu a s 10% zastoupením korundu. Korund byl použit ve frakci 3-5 mm, jeho objemová hmotnost pak byla 3850 kg/m³.

Množství (hmotností díl)	Složka
1	Hmotností díl pojivové složky
0,1	Hmotnostního dílu aktivní formy SiO ₂ , tzv. mikrosiliky
0,25	Hmotnostního dílu křemičité moučky se střední velikostí zrna d ₅₀ okolo 6 μm
1,6	Hmotnostního dílu čistého křemičitého písku plynulé granulometrie 0,1 až 1,2 mm střední velikosti zrna d ₅₀ okolo 500 μm
0,01	Hmotnostního dílu plastifikační přísady
0,001	Hmotnostního dílu odpěňovací přísady

[Tab. 4.1] Poměrné množství složek prefabrikované směsi

Pro další vzorky s korundem byla navržena vlastní směs [obr. 4.2], která splňovala optimalizovanou granulometrii UHPSFRC. Stejně jako prefabrikovaná směs obsahovala křemičitou moučku, mikrosiliku, plastifikátor a odpěňovač. Složení této směsi je vidět v tabulce [Tab. 4.2]. V této receptuře korund nahrazoval oproti prefabrikované směsi jemné kamenivo, a to v množství 15%, 22,5% a 30% celkového objemu obsaženého kameniva. Do směsi byl použit cement pevnostní třídy 52,5, vodní součinitel (w/c) byl navržen na 0,3.



[obr. 4.2] Složení navržené směsi

Složka	Korund 15%	Korund 22,5%	Korund 30%
Cement (hmotnostní díl)	1	1	1
Příměsi	0,4	0,4	0,4
Voda	0,3	0,3	0,3
Přísady	0,025	0,025	0,025
Jemnozrnné kamenivo	1,5	1,36	1,23
Korund	0,26	0,4	0,53

[Tab. 4.2] Složení navržených směsí UHPSFRC s obsahem korundu

4.1.2. Vzorky UHPSFRC s čedičem

Pro vzorky UHPSFRC s obsahem čediče byla také navržena vlastní směs, ve které byly použity dvě frakce čediče, a to 0-2 mm a 4-8 mm. Objemová hmotnost použitého čediče byla 3200 kg/m^3 . Ocelových vláken bylo stejně jako u vzorků s korundem do směsi přidáno 1,5% z celkového objemu desky. Byly vyrobeny dva druhy vzorků s obsahem čediče 22,5% a 30% z celkového objemu kameniva v UHPSFRC. Jejich složení je vidět v tabulce [Tab. 4.3].

Složka	Čedič 22,5%	Čedič 30%
Cement (hmotnostní díl)	1	1
Příměsi	0,4	0,4
Voda	0,33	0,35
Přísady	0,01	0,02
Jemnozrnné kamenivo	1,1	1,35
Čedič 0-2 mm	0,1	0,2
Čedič 4-8 mm	0,18	0,24

[Tab. 4.3] Složení navržených směsí UHPSFRC s obsahem čediče

4.1.3. Vzorky UHPSFRC s železitým kamenivem

Jako další experiment byly do UHPSFRC přidány kuličky železitého kameniva o frakci 5-8 mm [obr. 4.3], které se vyznačují velmi vysokou objemovou hmotností. U těchto vzorků byla opět použita suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu, množství ocelových vláken bylo také 1,5% z objemu desky.



[obr. 4.3] Železitě kamenivo frakce 5-8 mm

4.2. Výroba vzorků

Při výrobě vzorků bylo důležité dodržení přesného postupu. Do míchačky byly nejdříve vloženy složky pojiva a jemnozrnného plniva, které bylo potřeba nechat 5 minut homogenizovat. Následně se do směsi přidala většina záměsové vody a současně s ní se přiléval superplastifikátor. Po dalším pětiminutovém míchání byla za stálého chodu míchačky postupně přidávána ocelová vlákna. Po jejich promíchání se do míchačky nasypalo hrubé kamenivo a dolil se zbytek záměsové vody.

Směs byla nalita do bedněních desek o velikosti $400 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$, ve kterých byl materiál ošetřován 24 hodin po výrobě směsi [obr 4.4]. Po odbednění byly vzorky na minimálně 27 dní uloženy ve vodní lázni.



[obr. 4.4] Vzorky v bednění $400 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$

Při výrobě vzorků s kuličkami železitého kameniva musel být zvolen při výrobě vzorků jiný postup. Objemová hmotnost železitého kameniva byla 7400 kg/m^3 , proto se předpokládalo, že bude v betonu segregovat, kamenivo nebude ve směsi rovnoměrně rozloženo a nevytvoří se homogenní materiál. Vyrobyly se tedy zkušební krychle vysokohodnotného betonu bez ocelových vláken o rozměrech $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, do kterých bylo přidáno železité kamenivo. Tyto krychle se následně rozbily, aby se zjistilo rozložení kameniva ve směsi [obr. 4.5]. Ukázalo se, že všechny kuličky kvůli své objemové hmotnosti propadly ve směsi dolů a vytvořily zde vrstvu s vysokým obsahem železitého kameniva.



[obr. 4.5] Rozbitá krychle UHPC s obsahem železitého kameniva

Velké množství kuliček zůstalo také na dně míchačky, proto se došlo k závěru, že bude lepší nejdříve vložit vrstvu železitého kameniva do bednění a poté ji zalít směsí UHPSFRC [obr. 4.6].



[obr. 4.6] Výroba vzorků UHPSFRC s obsahem železitého kameniva

4.3. Mechanické vlastnosti směsí UHPSFRC

Z každé směsi byly kromě desek vytvořeny také 3 zkušební trámečky o rozměrech $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. U těch byla nejdříve provedena tříbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu [obr 4.7] a následně se změřila pevnost v tlaku [obr 4.8]. Vzdálenost podpor při měření tahu za ohybu byla 100 mm, zatěžovací plocha při zkoušení pevnosti v tlaku pak $40 \times 40 \text{ mm}^2$. Výsledné pevnosti materiálů jsou vidět v tabulce [Tab 4.3]. Výsledky ze třech vzorků stejné směsi byly z důvodu přehlednosti zprůměrovány, změřena byla také jejich objemová hmotnost. Tabulka je také pro porovnání doplněna o průměrné hodnoty vzorků UHPSFRC vyrobené ze suché prefabrikované směsi multifunkčního silikátového kompozitu bez přidaného hrubého kameniva.



[obr. 4.7] Tříbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu



[obr. 4.8] Měření pevnosti v tlaku

Materiál	Obsah kameniva ve směsi [kg/m^3]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
UHPSFRC	0	158,0	25,60	2373
Korund 5%	119,5	164,6	30,19	2293
Korund 10%	239,0	173,3	28,16	2433
Korund 15%	181,1	164,2	30,86	2400
Korund 22,5%	296,4	163,5	31,25	2391
Korund 30%	375,0	170,4	26,40	2468
Čedič 22,5%	216,8	200,0	27,27	2416
Čedič 30%	306,8	204,0	31,14	2482

[Tab. 4.4] Mechanické vlastnosti vzorků

4.4. Zkoušení vzorků

Vyrobené desky o velikosti $400 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$ byly na střelnici vystaveny nárazu projektilu 7,62×39 vz 43 [obr. 4.9]. Jde o celoplašťovou střelu s ráží 7,62 mm

s měkkým olověným jádrem. Hmotnost tohoto projektilu je 7,94 g, rychlost střely se pohybuje okolo 720 m/s a úst'ová energie střely je 2030 J. V předchozích pokusech desky UHPSFRC o tloušťce 50 mm bez přidaného hrubého kameniva tento typ projektilu zastavily, proto se předpokládá, že desky s hrubým kamenivem by měly tomuto projektilu odolat také. [30] Do desek s železitým kamenivem bylo stříleno projektilem 7,62×39 vz 43 s tvrdým ocelovým jádrem, protože se předpokládaly lepší výsledky z důvodu vytvoření silné vrstvy na povrchu desek.



[obr. 4.9] Projektil 7,62×39 vz 43 [30]

Desky byly uchyceny do stojanu a zasaženy tímto projektilem ze vzdálenosti 20 m. Na každý vzorek byla vystřelena jedna rána [obr. 4.10], u některých vzorků i dvě nebo tři, za účelem zlepšení přesnosti výsledků.



[obr. 4.10] Vzorek UHPSFRC s obsahem 5% korundu zasažen jednou ranou projektilu 7,62×39 vz 43

5. Výsledky

5.1. Nasnímání vzorků pomocí 3D skeneru

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno pomocí skeneru David 3D. Tento skener funguje na principu fotogrammetrie, která pracuje s obrazovým záznamem (nejčastěji s fotografickými snímky) za účelem zjišťování geometrických a polohových informací. Skener David 3D využívá metodu dvousnímkové fotogrammetrie (stereofotogrammetrie). Ze dvou nebo více snímků lze zjistit prostorové souřadnice, pokud je objekt zachycen na obou fotografiích. Stereofotogrammetrie je odvozena od vjemu zdravých očí. [31]

U každého vzorku byl pomocí 3D skeneru nasnímán kráter na přední straně desky [obr. 5.1]. Po připojení všech potřebných zařízení se muselo nastavení skeneru optimálně upravit. Vzorek byl umístěn do ideální vzdálenosti, kamera a skener byly nastaveny v úhlu 20-30°.

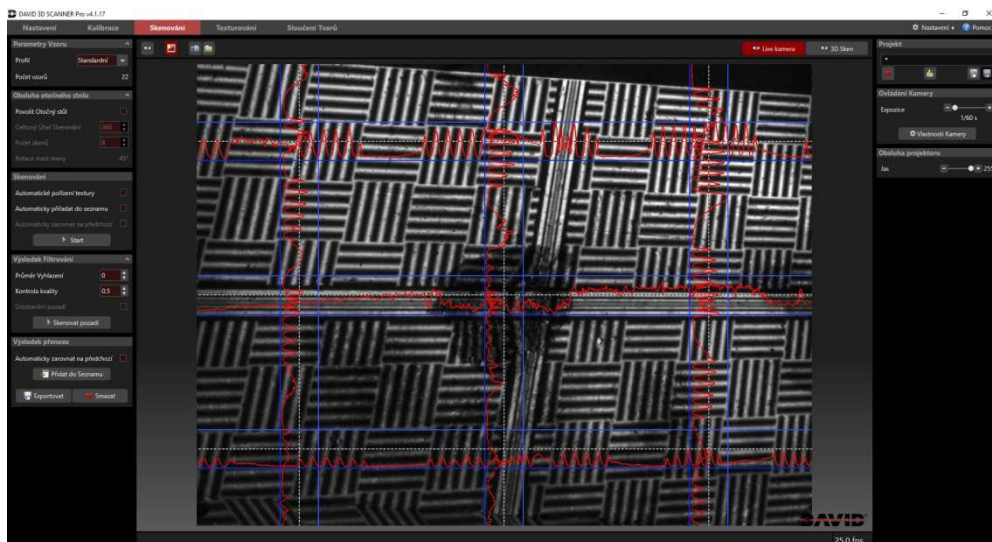


[obr. 5.1] Snímání kráteru na přední straně desky pomocí skeneru David 3D

Skener bylo potřeba také správně zkalibrovat. Podle velikosti skenovaného objektu se vybrala optimální škála na kalibračním panelu. [obr. 5.2] Snímek ze skeneru se na objektu zaostřil a v softwaru David 3D byla nastavena kamera tak, aby se zajistila správná světelnost snímků [obr. 5.3]. Vzorek byl umístěn do stejné vzdálenosti jako kalibrační panel, aby nedošlo k rozmazání výstupu.



[obr. 5.2] Nastavení kalibračního panelu [32]

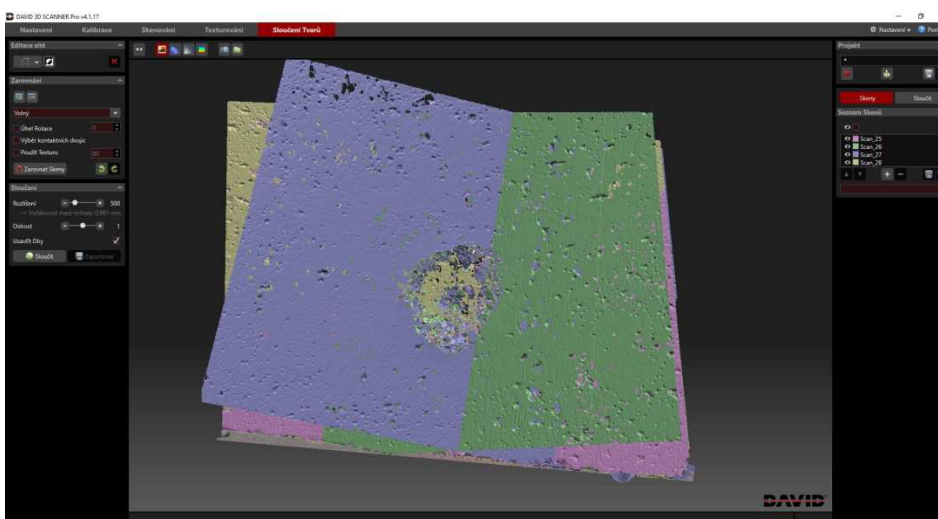


[obr. 5.3] Nastavení světelnosti kamery

Po správném nastavení byl naskenován snímek povrchu desky [obr. 5.4]. Aby byl nasnímán celý povrch kráteru, byly provedeny snímky ze čtyř různých úhlů [obr. 5.5]. Tím se zajistila větší přesnost a kompaktnost výstupu. Před každým skenováním bylo potřeba zkontrolovat, že se křivky na obrazu snímaného povrchu pohybují v daných mezích, aby nedošlo ke snížení světelnosti nebo naopak k přesvětlení snímku. Dále byl kladen důraz na to, aby nebyl rozostřen jak obraz z projektoru, tak snímaný obraz z kamery.



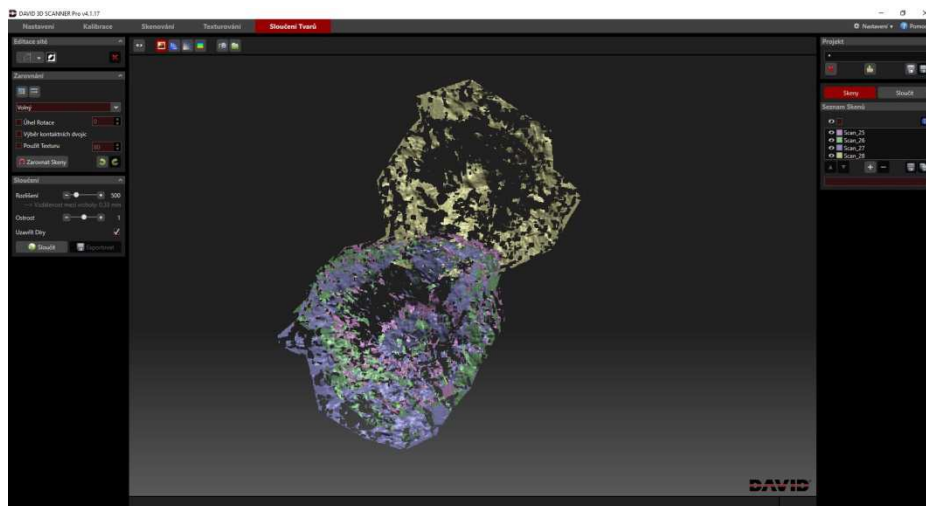
[obr. 5.4] Snímek povrchu desky



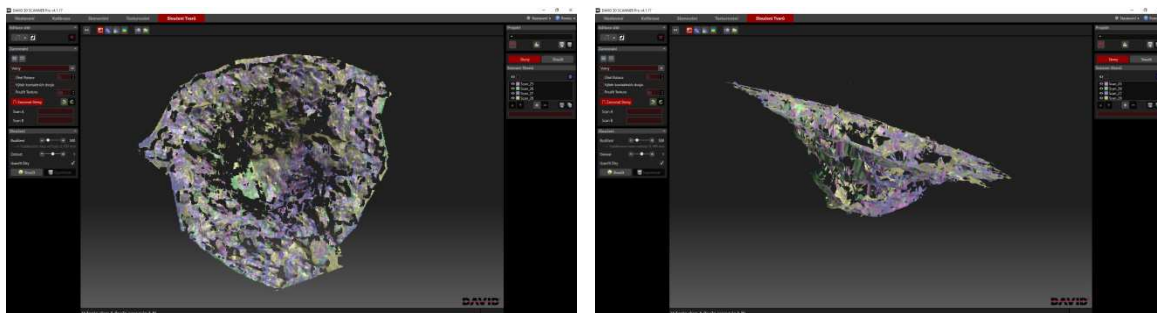
[obr. 5.5] Skenování povrchu desky ze čtyř různých úhlů

Po naskenování bylo potřeba jednotlivé krátery oříznout [obr. 5.6]. Při zarovnávání snímků totiž dochází k porovnávání prostorových matic jednotlivých skenů povrchů a při ponechání rovných ploch u kráterů dochází v maticích k velké shodě, takže se snímky na sebe nezarovnají správně. Oříznutí kráterů probíhalo také z toho důvodu, aby bylo možné následně přesně určit jejich povrch.

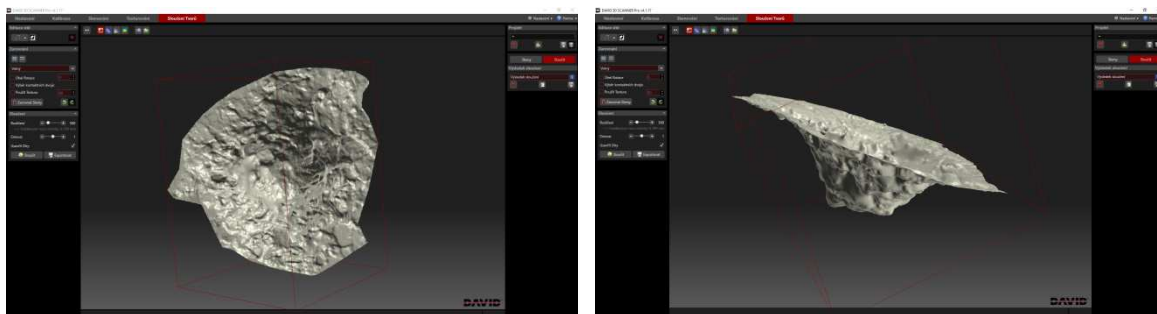
Jak už bylo napsáno, snímky z různých úhlů musely být zarovnány na sebe [obr. 5.7, obr. 5.8]. Zarovnané snímky byly sloučeny v jeden kompaktní povrch. Chybějící místa naskenovaných kráterů software David 3D automaticky dopočítal [obr. 5.9, obr. 5.10].



[obr. 5.6] Oříznutí snímků jednotlivých kráterů

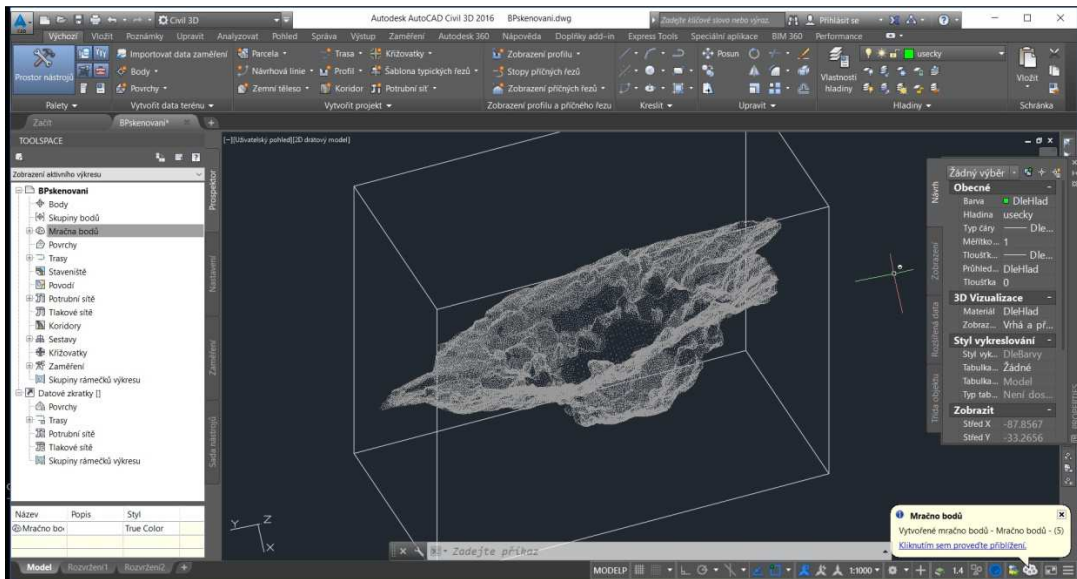


[obr. 5.7], [obr. 5.8] Zarovnání jednotlivých snímků



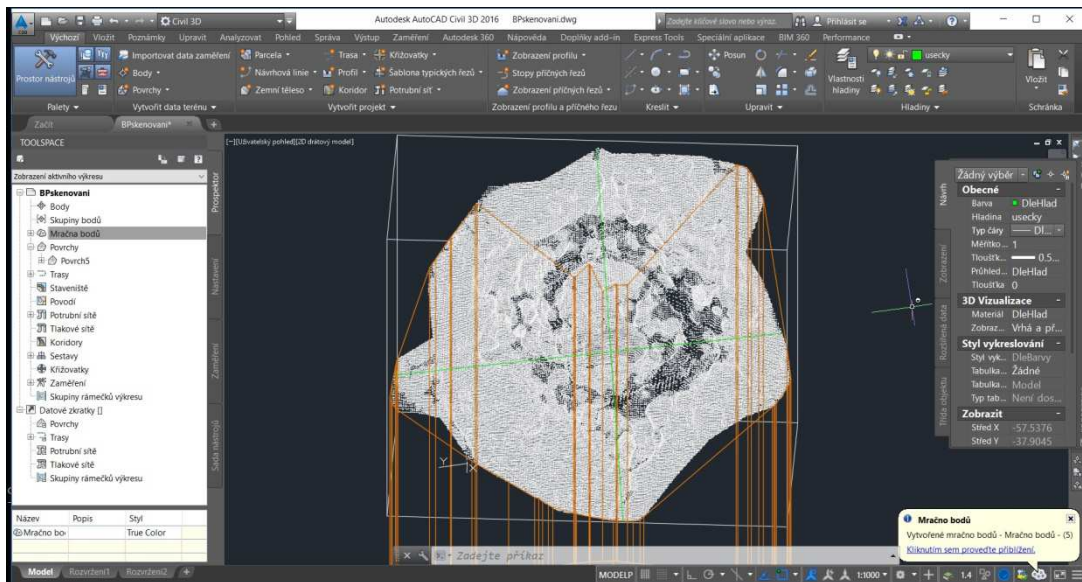
[obr. 5.9], [obr. 5.10] Sloučení snímků kráteru v jeden kompaktní povrch

Výsledný povrch byl exportován ve formátu .obj a následně zpracováván v softwaru Autocad Civil 3D. V něm se poté z těchto souborů, které obsahovaly 3D souřadnice naskenovaných kráterů, vytvořila mračna bodů [obr. 5.11]. Z těch se následně vytvořil 3D povrch, který je schopen tento software změřit.



[obr. 5.11] Zobrazení povrchu kráteru v programu Autocad Civil 3D pomocí mračna bodů

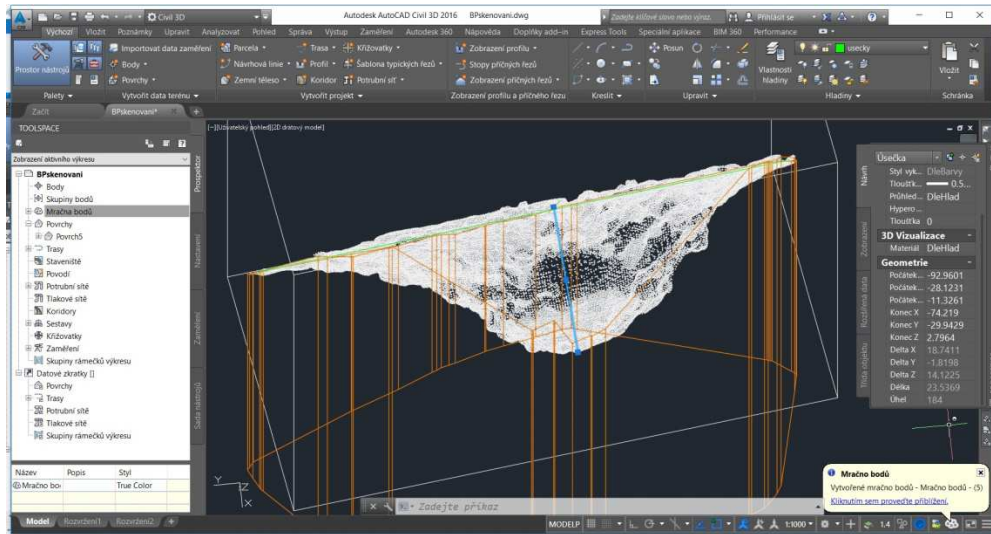
V programu Autocad Civil 3D bylo také možné pomocí úseček změřit průměr vzniklého kráteru. U každého vzorku byly zhotoveny dvě na sebe kolmé úsečky, jejichž střední hodnota představuje průměr kráteru [obr. 5.12]. Pokud by se uvažovalo, že kráter má kruhový průmět, mohl by se také snadno vypočítat 2D povrch kráteru.



[obr. 5.12] Měření průměru kráteru pomocí softwaru Autocad Civil 3D

Kolmicí na tyto průměry lze pak zjistit hloubku penetrace projektilu [obr. 5.13]. Měření hloubky penetrace tímto způsobem lze považovat za velmi přesné, protože kráter je zde vyobrazen ve vysokém rozlišení s více jak 200 tisíci body a při větší pečlivosti lze

optimálně označit body v povrchu, čímž se snadno získá jejich vzdálenost od vrchní strany kráteru.



[obr. 5.13] Měření hloubky kráteru pomocí softwaru Autocad Civil 3D

5.2. Seznam výsledků

Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Hloubka penetrace [mm]	Průměr kráteru [mm]	2D povrch [mm ²]	3D povrch [mm ²]
UHPSFRC_1	158,0	22,2	72,7	4143	29160
UHPSFRC_2	158,0	23,6	61,5	2969	31949
UHPSFRC_3	158,0	21,7	68,3	3662	15564
Korund 5_1	164,6	17,8	85,7	5759	27212
Korund 5_2	164,6	22,9	77,0	4654	25275
Korund 5_3	164,6	21,4	80,3	5062	76797
Korund 10_1	173,3	18,8	79,6	4968	49861
Korund 10_2	173,3	21,0	58,2	2659	64889
Korund 10_3	173,3	19,2	66,8	3503	29152
Korund 15_1	164,2	23,5	80,9	5131	74362
Korund 15_2	164,2	23,2	77,7	4739	26686
Korund 15_3	164,2	23,6	73,1	4195	17808
Korund 22_1	163,5	20,8	82,1	5285	29750
Korund 22_2	163,5	18,3	76,7	4618	34104
Korund 22_3a	163,5	18,8	68,2	3651	34461
Korund 22_3b	163,5	24,8	75,5	4469	62114
Korund 30_1a	170,4	18,1	60,8	2897	29443
Korund 30_1b	170,4	18,0	66,8	3498	19407
Korund 30_2	170,4	21,4	67,3	3555	16049
Korund 30_3	170,4	21,2	72,1	4075	48636

[Tab. 5.1] Seznam výsledků, část 1

Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Hloubka penetrace [mm]	Průměr kráteru [mm]	2D povrch [mm ²]	3D povrch [mm ²]
Čedič22_1	200,0	18,5	55,9	2453	18392
Čedič22_2	200,0	20,1	64,9	3306	46605
Čedič22_3a	200,0	18,1	87,5	6010	13729
Čedič22_3b	200,0	17,5	75,5	4469	60984
Čedič30_1	204,0	23,8	72,3	4103	9886
Čedič30_2	204,0	19,6	74,5	4357	21985
Čedič30_3	204,0	24,4	79,7	4986	23443
Železo_1*	---	18,5	68,7	3700	20443
Železo_2*	---	15,7	68,2	3651	12669
Železo_3*	---	16,5	70,2	3863	13315

* do vzorků se železitým kamenivem bylo stříleno projektilem 7,62×39 vz 43 s tvrdým ocelovým jádrem

[Tab. 5.2] Seznam výsledků, část 2

Pro každý druh směsi byly z těchto tabulek vypočítány průměrné hodnoty, které jsou vidět v tabulce [Tab. 5.3].

Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]	Hloubka penetrace [mm]	Průměr kráteru [mm]	2D povrch [mm ²]	3D povrch [mm ²]
Korund 5%	164,6	20,7	81,0	5158	43095
Korund 10%	173,3	19,7	68,2	3710	47967
Korund 15%	164,2	23,4	77,2	4688	39619
Korund 22,5%	163,5	20,7	75,6	4506	40107
Korund 30%	170,4	19,7	66,7	3506	28384
Čedič 22,5%	200,0	18,6	70,9	4060	34928
Čedič 30%	204,0	22,6	75,5	4482	18438
UHPSFRC	158,0	22,5	67,5	3591	25558
Železo	---	16,9	69,0	3738	15476

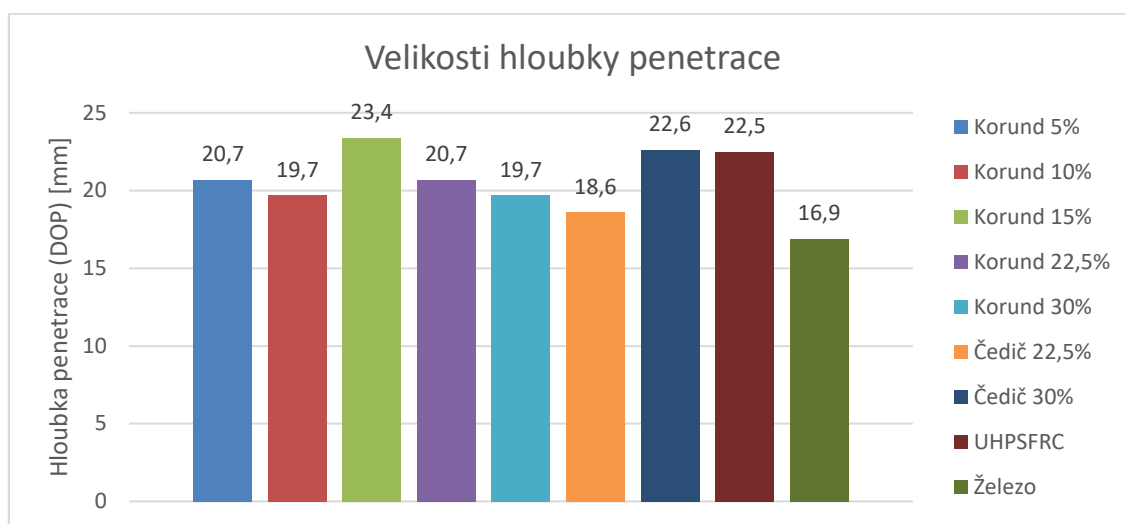
[Tab. 5.3] Seznam výsledků, průměrné hodnoty jednotlivých směsí

5.3. Hloubka penetrace

Hloubka penetrace může být posouzena podle několika kritérií. Na následujícím grafu je vidět, že při přidání korundového kameniva do suché prefabrikované směsi dochází ke snížení hloubky penetrace z 22,5 mm na 20,7 mm a při dalším zvýšení podílu korundu se DOP ještě mírně sníží na 19,7 mm. U vzorků z navržené směsi UHPSFRC poté dochází při přidávání většího množství korundu ke snížení hloubky penetrace z 23,4 mm až na 19,7 mm.

U vzorků s přidaným čedičem pak vyšly hloubky kráteru opačně, protože při přidání většího množství hrubého kameniva došlo překvapivě ke zvětšení DOP. To může být ovlivněno tím, že ve směsi s obsahem 22,5% čediče je obsaženo o 25% více jemných částic, které zvyšuje kompaktnost a hutnost betonu.

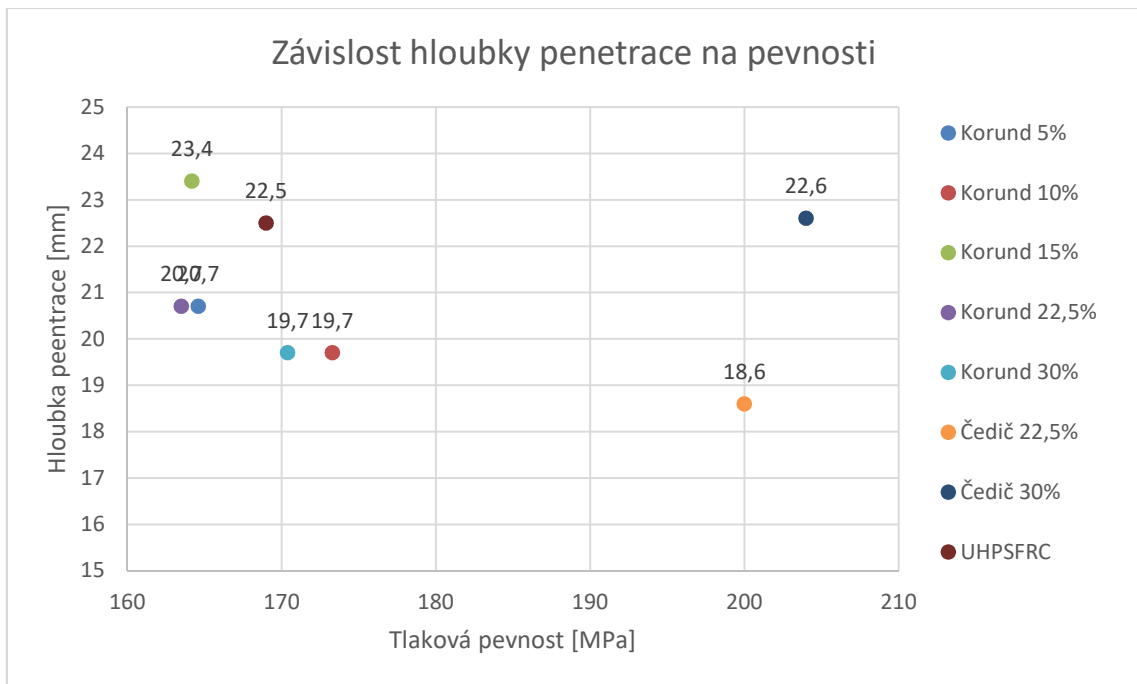
Nejlepších výsledků pak z hlediska hloubky penetrace dosahuje UHPSFRC s přidaným železitým kamenivem, které vytvořilo na povrchu betonu velmi odolnou vrstvu materiálu. [graf 5.1]



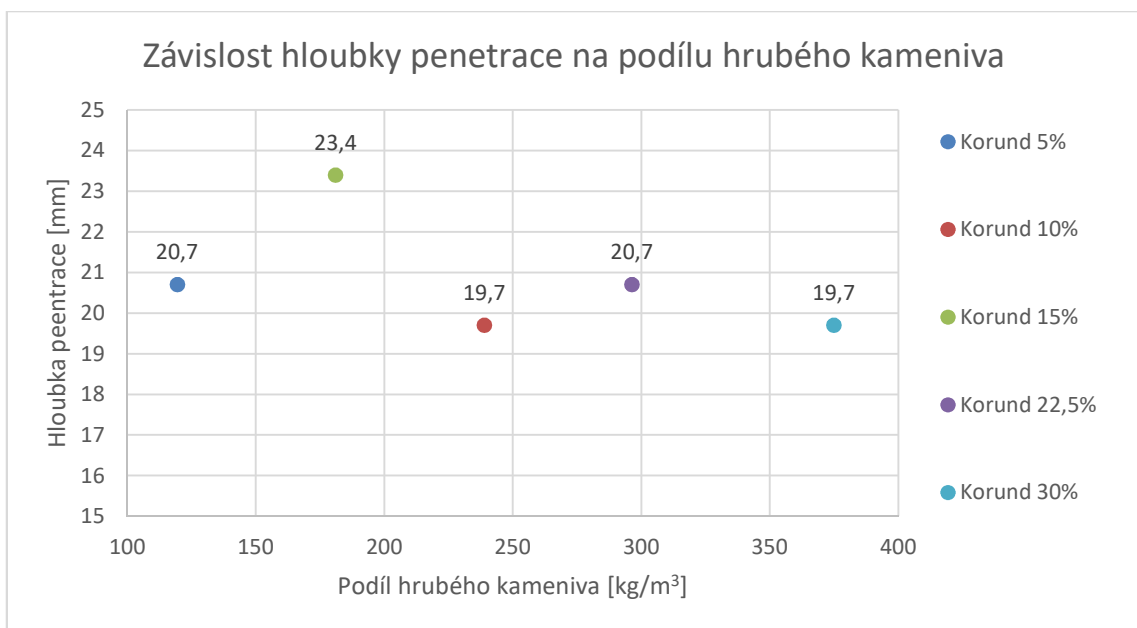
[graf 5.1] Velikosti hloubky penetrace

Zajímavé porovnání hloubky penetrace se nabízí také v závislosti na pevnosti UHPSFRC v tlaku. Na dalším grafu je vidět tendence klesání DOP při zvyšování tlakové pevnosti kompozitu. Pouze vzorky s 30% obsahem čediče vykazují při velmi vysoké pevnosti horší hloubku penetrace, a to zřejmě z důvodu nízkého podílu jemného kameniva ve směsi, což může mít za následek špatnou kohezi velkých zrn kameniva a zbytku matrice. [graf 5.2]

Na grafu 5.3 je vidět závislost hloubky penetrace na množství přidaného korundu. Obecně tedy platí, že s rostoucím množstvím přidaného hrubého kameniva hloubka penetrace klesá, ale musí se najít optimální složení směsi. Pokud nebude křivka zrnitosti vyplněna dostatečným množstvím jemnozrnného kameniva, dojde v kompozitu k mikrotrhlinám způsobeným nedostatečnou kompaktností a hutností směsi. Proto hloubka penetrace u vzorků s vyšším množstvím čediče dosahovala vyšších hodnot.



[graf 5.2] Závislost hloubky penetrace na tlakové pevnosti

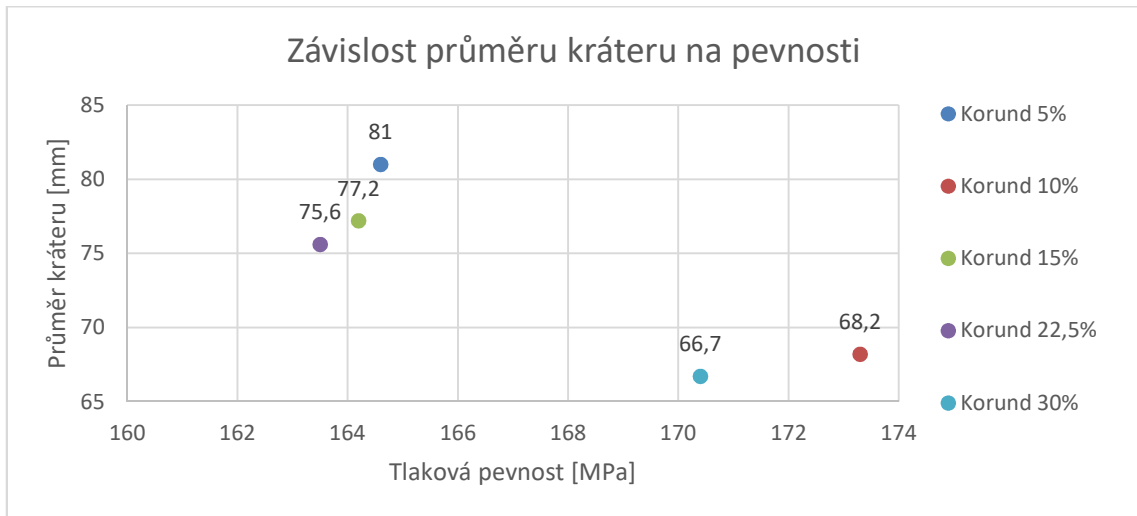


[graf 5.3] Závislost hloubky penetrace na podílu hrubého kameniva

5.4. Průměr kráteru

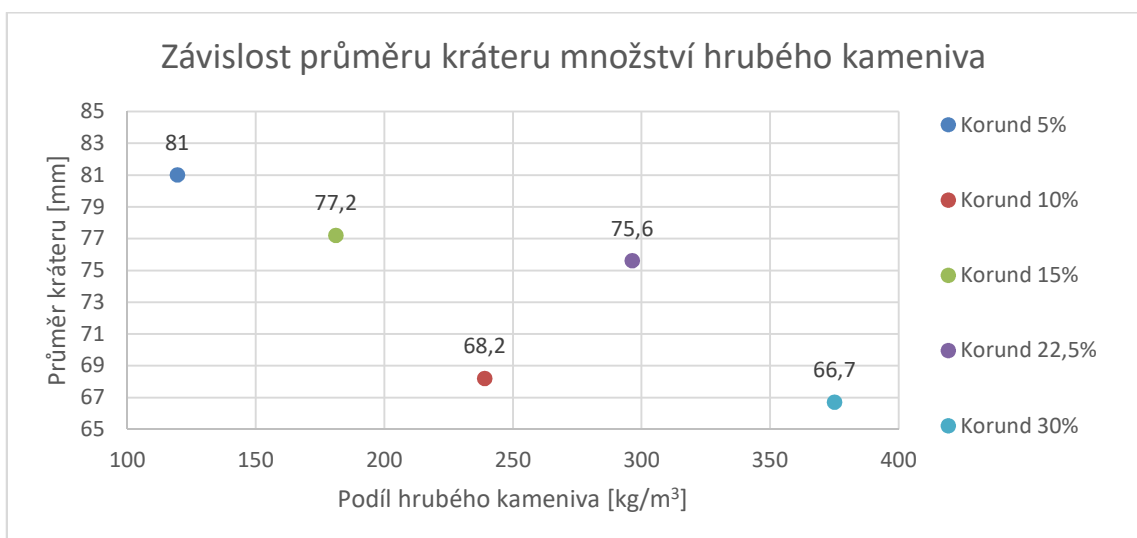
Dalším výstupem této práce je porovnání průměru vzniklých kráterů. Co se týče závislosti průměru kráteru na pevnosti kompozitu v tlaku, tak z měření vyplývá, že při zvyšování pevnosti v tlaku dochází k mírnému snížení průměru kráteru [graf 5.4].

Vzhledem k přehlednosti jsou v následujících grafech vybrány pouze vzorky s korundem.



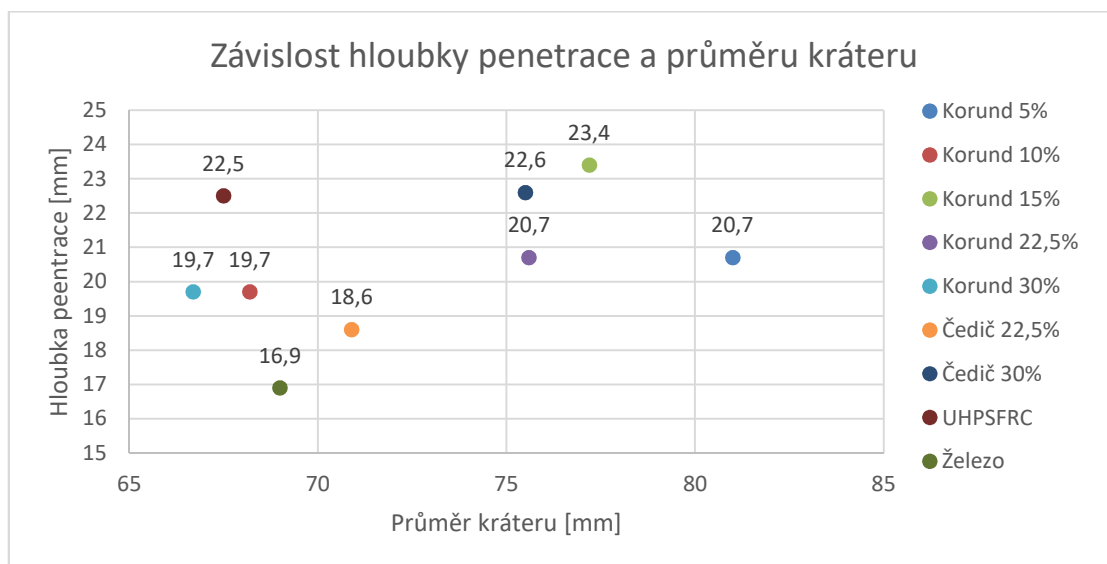
[graf 5.4] Závislost průměru krátera na tlakové pevnosti

Na dalším grafu je vidět závislost průměru krátera na množství přidaného hrubého kameniva. Při větším obsahu hrubého kameniva v UHPSFRC dochází ke zmenšení průměru krátera vzniklého nárazem projektilu. U prefabrikované směsi dochází při zvýšení podílu korundu z 5% na 10% ke snížení průměru krátera z 81 mm na 68,2 mm. U navržené směsi je pak po přidávání většího množství korundu vidět pokles ze 77,2 mm na 66,7 mm. Jiné chování průměru krátera je způsobeno rozdílností těchto dvou směsí, které mají různé složení křivky zrnitosti. Proto má vzorek Korund 22,5% větší průměr krátera než Korund 10%, i když je v něm hrubého kameniva více.[graf 5.5]



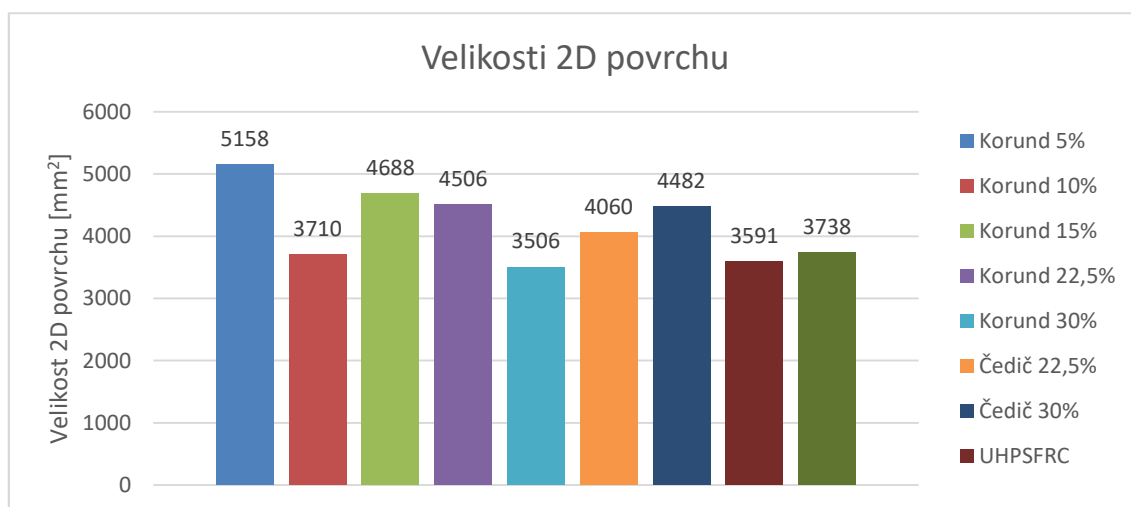
[graf 5.5] Závislost průměru krátera na množství hrubého kameniva

Při pohledu na závislost hloubky penetrace a průměru krátera si lze všimnout, že u vzorků s obsahem hrubého kameniva dochází při vyšší hloubce penetrace také ke zvětšení průměru krátera. To může naznačovat, že krátery vzorků s obsahem hrubého kameniva budou mít podobný tvar. [graf 5.6]



[graf 5.6] Závislost hloubky penetrace a průměru krátera

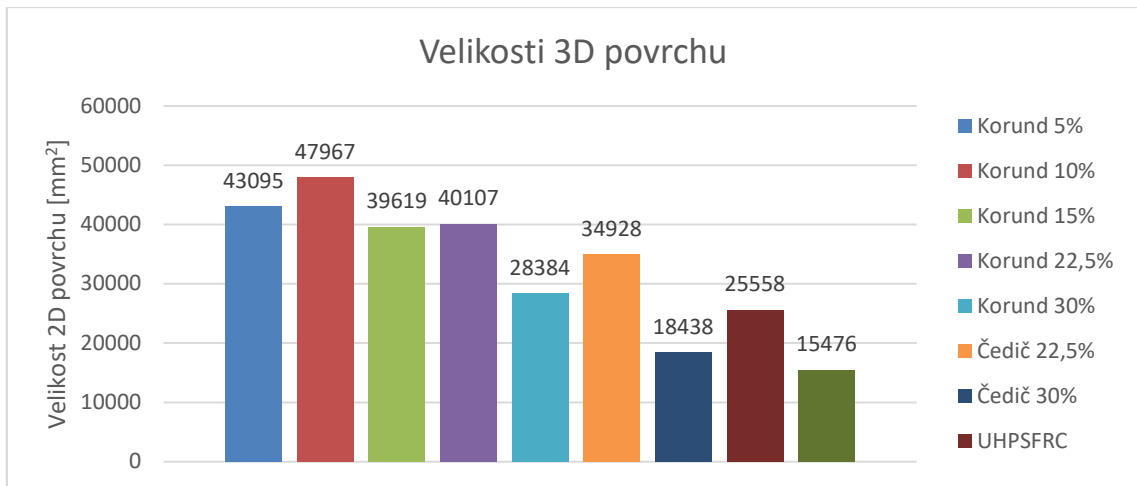
Pokud by se uvažoval tvar průmětu krátera jako kruhový, snadno se dopočítá 2D povrch krátera, což je právě průmět krátera kolmo na čelní stranu desky. [graf 5.7] Ze vzorce pro výpočet povrchu kruhu $S=(\pi*d^2)/4$, kde d je průměr krátera, lze logicky odvodit, že průběhy velikostí 2D povrchů se budou pohybovat stejně jako velikosti průměrů kráterů.



[graf 5.7] Velikosti 2D povrchu

5.5. 3D povrch

3D povrch je veličina, která vypovídá o celkovém povrchu kráteru. Byla zjištěna pomocí 3D modelu v programu Autocad Civil 3D. Zahrnuje také všechny nerovnosti na daném povrchu, proto nemusí být v některých případech úplně vypovídající. U měření této veličiny docházelo k velkým odchylkám u jednotlivých vzorků. V grafu 5.8 jsou zobrazeny průměrné hodnoty 3D povrchů jednotlivých druhů vzorků.



[graf 5.8] Velikosti 3D povrchu

Z grafu je vidět, že výsledky jsou lehce nesourodé, nicméně zde lze vidět trend zmenšování 3D kráteru při zvyšování podílu hrubého kameniva. Pokud se podíváte do seznamu všech výsledků v tabulce 5.1, tak si můžete všimnout, že některé 3D povrchy vyšly až trojnásobně v porovnání se stejnými vzorky, jako je to například u vzorků Korund5_3 [obr. 5.14] a Korund15_1 [obr. 5.15]. Je to dáno velkou nerovností povrchů daných kráterů a výstupky vyčnívajícími drátů obalených cementovou směsí, které 3D scanner také nasnímal a naměřil. Naopak u vzorků, u kterých vyšel 3D povrch nižší, například Korund30_2 [obr. 5.16] nebo Čedič30_1 [obr. 5.17], je vidět hladký a rovný povrch kráteru.



[obr. 5.14] Vzorek Korund5_3 po zásahu projektilu



[obr. 5.15] Vzorek Korund15_1 po zásahu projektilu



[obr. 5.16] Vzorek Korund30_2 po zásahu projektilu



[obr. 5.17] Vzorek Čedič30_1 po zásahu projektilu

5.6. UHPSFRC s železitým kamenivem

Nejlepších výsledků ze všech vzorků však vykazovaly desky s přidaným železitým kamenivem. Obrovský pokrok nastal především z toho důvodu, že tyto desky dokázaly s přehledem zastavit projektily 7,62×39 vz 43 s tvrdým ocelovým jádrem. Tyto projektily nedokázaly desky z UHPSFRC o tloušťce 50 mm a bez hrubého kameniva zastavit. Vzorky z železitým kamenivem byly vystaveny nárazu projektilu z té strany, kde byly vkládány zrna kameniva do bedně [obr. 5.18]. Zadní strana desky pak nebyla prakticky vůbec poškozena [obr. 5.19]. Desky podle výsledků vykazovaly nejnižší hloubku penetrace i nejmenší průměry i povrchy kráterů, přestože byly nastřelovány projektilem s tvrdým ocelovým jádrem.



[obr. 5.18] Přední strana desky z UHPSFRC s železitým kamenivem po zásahu tří projektilů



[obr. 5.19] Zadní strana desky z UHPSFRC s železitým kamenivem po zásahu tří projektilů

6. Vyhodnocení a diskuse

V této práci se podařilo zjistit chování UHPSFRC s přidaným hrubým kamenivem z hlediska odolnosti proti nárazu projektilu. Pomocí návrhu, výroby a otestování vzorků UHPSFRC s různými druhy a obsahy hrubého kameniva byly zjištěny vlivy tohoto kameniva na hloubku penetrace desky a velikost vzniklého kráteru.

Bylo zjištěno, že přidání hrubého kameniva do vysokohodnotného betonu pozitivně ovlivňuje jeho odolnost proti nárazu projektilu. Hloubka penetrace, stejně jako průměr kráteru závisí na tlakové pevnosti kompozitu a množství přidaného kameniva. Čím vyšší je pevnost materiálu v tlaku a čím více hrubého kameniva je do UHPSFRC přidáno, tím lepší vlastnosti z hlediska odolnosti proti rázovému zatížení materiál vykazuje. Tyto vlastnosti závisí také na kvalitě přidaného hrubého kameniva, především na jeho pevnosti a tvrdosti.

Po přidání korundu do směsi UHPSFRC došlo ke zlepšení hloubky penetrace a velikosti kráteru jak u vzorků ze suché prefabrikované směsi, tak u vzorků nově navržené směsi s optimalizovanou zrnitostí jemného kameniva. Právě optimalizace křivky zrnitosti se ukázala jako velmi důležitá při navrhování směsi s obsahem čediče. Když byla směs správně navržena, dosahovala odolnost UHPSFRC s čedičem ještě lepších výsledků, než u vzorků s korundem.

Nejlepšího výsledku však bylo dosaženo po přidání železitého kameniva, které ve směsi segregovalo a nevytvořilo tak homogenní materiál. Pokud byla deska vystavena nárazu projektilu ze strany, na které byla odolná vrstva železitého kameniva, zastavila tato deska i projektil 7,62×39 vz 43 s tvrdým ocelovým jádrem, což se u desek z UHPSFRC bez přidaného kameniva nepovedlo.

Experimenty, které prováděl v roce 2015 H. Wu a kolektiv [1; 2], byly touto prací ověřeny s materiály, které jsou na našem trhu běžně k sehnání.

7. Závěr a směřování dalšího výzkumu

Další výzkum v tomto odvětví by se měl zaměřit především na odolnost UHPSFRC s ještě větším obsahem hrubého kameniva, než bylo zkoumáno v této práci. Hrubé kamenivo ukázalo velký potenciál ke zlepšení odolnosti UHPSFRC a při přidání větších jeho větších množství se charakteristiky desek stále zlepšovaly. Bude proto potřeba navrhnout a vytvořit mnoho dalších vzorků, aby byl nejdříve tento experiment ověřen a následně mohl být naplněn potenciál těchto desek.

Dále by se výzkum mohl zaměřit na práci s deskami z UHPSFRC s železitým kamenivem, které už nyní vykazovaly velmi dobré výsledky. Vzhledem k tomu, že po výstřelu do čelní strany desky se železité kuličky uvolnily a vystřelily do prostoru, mohlo by se například zkoumat, jakou silou je kamenivo vystřeleno a jestli jsou kuličky schopné způsobit nějaké poškození. Toto kamenivo by poté mohlo být využito v deskách jako systém aktivní ochrany proti střelci.

Další experimenty by se mohly věnovat způsobu vyhodnocení poškození desek, a to především pomocí 3D skeneru, který může být potenciálně velmi přesný. Je potřeba zjistit, jakou metodikou bude nejvhodnější vyhodnocovat 3D povrch vzniklých kráterů, aby bylo možné dosáhnout výsledků bez velkých odchylek. Bude se muset zajistit, aby povrchy nebyly ovlivněny nerovnostmi kráteru. Odchytky mohou být způsobené například tím, že dojde k segregaci ocelových vláken na čelní straně desky a v kráteru zůstane velké množství drátků, které zabrání správnému naskenování povrchu.

Celkově lze v rámci zlepšení odolnosti desek z UHPSFRC proti nárazu projektilu pomocí přidání hrubého kameniva vytvořit mnoho experimentů, než se vyzkoumá, jaký potenciál tento materiál opravdu má.

Použitá literatura

1. **H. Wu, Q. Fang, J. Gong, J. Z. Liu, J. H. Zhang, Z. M. Gong.** Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC. *International Journal of Impact Engineering*. 2015 (84), stránky 38-53.
2. **Y. Peng, H. Wu, Q. Fang, J. Z. Liu, Z. M. Gong.** Impact resistance of basalt aggregated UHP-SFRC/fabric composite panel against small caliber arm. *International Journal of Impact Engineering*. 2016 (88), stránky 201-213.
3. **P. Máca, R. Sovják, P. Konvalinka.** Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2014 (63), stránky 158-163.
4. **R. Coufal, J. L. Vítek.** První použití UHPC ve formě transportního betonu v ČR. *Materiály pro stavbu*. 9/2012, stránky 57-59.
5. **R. Coufal, J. L. Vítek, A. Procházková.** Praktická zkušenost s výrobou a dopravou UHPC (Practical experience with producing and transport of UHPC). *Beton TKS*. 2/2015, stránky 28-33.
6. **Metrostav, TBG.** Ultra-vysokopevnostní betony (UHPC). [Online] <http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-betony-uhpc/>.
7. **Beton university.** Beton v architektuře. [Online] http://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/prezentace/40cdd35830895bc39c6538c2258e1efd64ab25d2_uploaded_2016-03-bu-design-uhpc-kompr.pdf.
8. **R. Hela, L. Bodnárová, J. Maršálová.** Nové materiály – nové druhy a technologie betonu (New materials – new types and technologies of concrete). *Beton TKS*. 2/2003, stránky 58-60.
9. **L. Svoboda a kolektiv.** *Stavební hmoty*. Bratislava : JAGA GROUP, s.r.o., 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
10. **J. Kolísko, P. Bouška, D. Čítek, P. Huňka, M. Rydval, M. Vokáč.** Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky. *Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu (UHPC) pro prefabrikované prvky staveb, Metodika 1*. 2015.
11. **Hela, R.** Příměsi do betonu (Concrete admixtures). *Beton TKS*. 2/2015, stránky 4-10.

12. **B. Beeralingegowda, V. D. Gundakalle.** The effect of addition of limestone powder on the properties of self-compacting concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013.
13. **W. Shen, Y. Liu, L. Cao, X. Huo, Z. Yang, C. Zhou, P. He, Z. Lu.** Mixing design and microstructure of ultra high strength concrete with manufactured sand. *Construction and Building Materials*. 2017 (143), stránky 312-321.
14. **P. R. Prem, B. H. Bharatkumar, N. R. Iyer.** Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete.
15. **M. B. Eide, J.-M. Hisdal.** Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art. *COIN Project report no 44*. 2012.
16. **Graybeal, B. J.** Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. 2006.
17. **E.F. O’Neil, B.D. Neeley, J.D. Cargile.** Tensile Properties of Very-High-Strength Concrete for Penetration-Resistant Structures. *Shock and Vibration*. 1999 (6), stránky 237-245.
18. **A. N. Dancygier, D. Z. Yankelevsky, C. Jaegermann.** Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2007 (34), stránky 1767-1779.
19. **A.N. Dancygier, D.Z. Yankelevsky.** High strength concrete response to hard projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 1996 (18), stránky 583-599.
20. **H. Wu, Q. Fang, Z. M. Gong, Y. Peng.** Hard projectile impact on layered SFRHSC composite target. *International Journal of Impact Engineering*. 2015.
21. **M.H. Zhang, V.P.W. Shim, G. Lu, C.W. Chew.** Resistance of high-strength concrete to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2005 (31), stránky 825-841.
22. **H. Langberg, G. Markeset.** High performance concrete-penetration resistance and material development. *Proceedings of the ninth international symposium on interaction of the effects of munitions with structures*. 1999, stránky 933-941.
23. **H. Wu, Q. Fang, X.W. Chen, Z.M. Gong, J.Z. Liu.** Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320 m/s. *Construction and Building Materials*. 2015 (74), stránky 188-200.

24. **J. Ma, F. Dehn, N. V. Tue, M. Orgass, D. Schmidt.** Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. 2004.
25. **Kašpar, J.** Výroba syntetických korundů a jejich použití v praxi. 1950.
26. **Korund Benátky s.r.o.** Bílý korund Al₂O₃. [Online] <http://www.korund.cz/products/white-corundum?lang=cs>.
27. **Česká geologická služba.** Bazalt (čedič). [Online] <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?bazalt>.
28. **H. Wu, X. W. Chen, L. L. He, Q. Fang.** Stability analyses of the mass abrasive projectile high-speed penetrating into concrete target. Part I: Engineering model for the mass loss and nose-blunting of ogive-nosed projectiles. *Acta Mechanica Sinica*. 2014 (30), stránky 933-942.
29. **K. Kolář, Z. Bažantová, P. Konvalinka.** Suchá prefabrikovaná směs silikátového kompozitu. *Úřad průmyslového vlastnictví*. 2015.
30. **Vavříník, T.** Odolnost vysokohodnotného betonu proti nárazu projektilu. 2012.
31. **Pavelka, K.** Fotogrammetrie 1. *ČVUT v Praze, Stavební fakulta, katedra mapování a kartografie*. [Online] http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm10/fotogrammetrie1_prednasky_2009.pdf.
32. **David and HP Company.** David 3D scanner. *Calibration of camera and projector*. [Online] <http://www.david-3d.com/content/4-support/david5/calibration/typical-setup.jpg>.