

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv vrstvení UHPFRC desek na odolnost vůči nárazu projektilu

2020

Martin Mildner

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum

Vliv vrstvení UHPFRC desek na odolnost vůči nárazu projektilu

Influence of UHPFRC plate layering on projectile impact
resistance

Autor: Martin Mildner

Vedoucí práce: doc. Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jindřich Vorel, Ph.D.

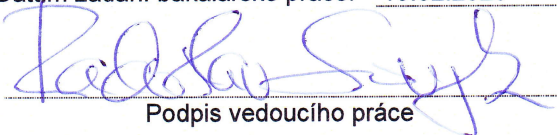
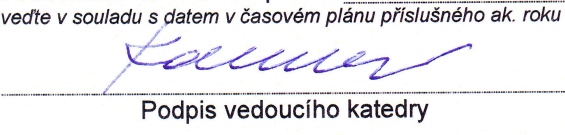
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

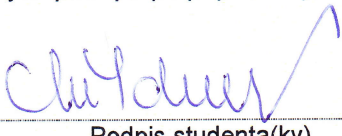
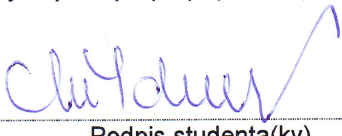
I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Mildner</u>	Jméno: <u>Martin</u>	Osobní číslo: <u>468248</u>
Zadávající katedra: <u>k210 - Experimentální centrum</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Vliv vrstvení UHPFRC desek na odolnost vůči nárazu projektilu</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Influence of UHPFRC plate layering on projectile impact resistance</u>	
<p>Pokyny pro vypracování:</p> <p>Prozkoumání současného stavu poznání v oblasti ultra vysokohodnotných vlákní vyztužených cementových kompozitů vůči nárazu projektilu z odborné literatury. Prozkoumání různých experimentálních balistických testů se zaměřením na uložení vzorku a měřené veličiny. Návrh experimentálního programu pro splnění cílů bakalářské práce a výroba vzorků pro naplnění experimentálního programu. Provedení experimentů, vyhodnocení a popsání poškození, porovnání s referenčním experimentem. Popis a diskuze výsledků, shrnutí vlastních zkušeností získaných během přípravy a měření poškození, které bylo způsobeno dopadem projektilu. Závěr a souhrnné shrnutí výsledků, popřípadě návrh na další bádání v dané oblasti.</p>	
<p>Seznam doporučené literatury:</p> <p>Failure characteristics of UHPFRC panels subjected to projectile impact, Composites Part B: Engineering ,Volume 182, 1 February 2020, Article 107505, M. Beppu, S. Kataoka, H. Ichino, H. Musha</p> <p>Response of Thin UHPFRC Targets with Various Fibre Volume Fractions to Deformable Projectile Impact, Procedia Engineering, Volume 193, 2017, Pages 3-10, Radoslav Sovják, Devavrat Shanbhag, Petr Konrád, Jan Zatloukal</p> <p>Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets, International Journal of Impact Engineering, Volume 76, February 2015, Pages 166-177, Radoslav Sovják, Tomáš Vavřiník, Jan Zatloukal, Petr Máca, Michal Frydřín</p>	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>doc. Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.</u>	
<p>Datum zadání bakalářské práce: <u>19.02.2020</u></p> <p>Termín odevzdání bakalářské práce: <u>17.05.2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i></p>	
<p> Podpis vedoucího práce</p>	<p> Podpis vedoucího katedry</p>

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<p><i>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 nutně 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“.</i></p>	
<p> Datum převzetí zadání</p>	<p> Podpis studenta(ky)</p>

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

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

V Praze, 2020

.....

Martin Mildner

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, rady a vstřícný přístup v průběhu zpracování této práce i přes nelehkou situaci v době koronavirové pandemie. Rovněž děkuji Ing. Jindřichu Vorlovi, Ph.D. za jeho odborné rady týkající se obsahu práce, zejména pak druhé kapitoly. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Zatloukalovi, Ph.D. za pomoc při realizaci balistických testů v experimentální části práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je prozkoumání vlivu vrstvení desek a jejich odolnosti vůči extrémnímu zatížení. V Jednotlivých kapitolách práce jsou shrnuty poznatky o složení betonu, typech vláken využívaných v betonových směsích, vysokohodnotném betonu a následně o znalostech problematiky balistických testů. Extrémní zatížení je vyvozováno pomocí nárazu jak deformovatelného, tak nedeformovatelného projektilu ráže $7,62 \times 39$ mm. Pro toto zkoumání byl navržen experimentální program, který zahrnuje výrobu dvanácti desek o rozměrech 500×500 mm tloušťky 20 mm z ultra vysokohodnotného vlákny vyztuženého betonu. Odolnost byla hodnocena pomocí změření ploch poškozených míst, tzv. kráterů, které vznikly v důsledku nárazu projektilu. Dále byla vyhodnocena změna trajektorie při průletu čelní deskou dané vrstvené sady.

Klíčová slova

vrstvení desek, lokální poškození, UHPFRC, balistická odolnost, náraz projektilu

Abstract

The thesis aims to investigate the effects of UHPFRC plate layering on their resistance to extreme loads. The individual chapters of the thesis summarize the application of the concrete composites, types of fibres used in concrete mixtures, high-performance concretes and ballistic tests. The extreme load is simulated by the impact of both deformable and a non-deformable 7.62×39 mm projectile. For this investigation, an experimental program consisted of the production of twelve slabs made of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete that were 500×500 mm in size. The thickness of the slab was 20 mm. The resistance was evaluated through crater areas, which were initiated during the impact of the projectile. Besides, the deviation of the projectile trajectory during the penetration process through the plates made of UHPFRC was evaluated.

Key words

plate layering, local damage, UHPFRC, ballistic resistance, projectile impact,

Obsah práce

1	Úvod	15
1.1	Motivace.....	15
1.2	Cíl práce.....	15
1.3	Rozsah práce.....	16
2	Struktura betonu	17
2.1	Složení obyčejného betonu	17
2.1.1	Kamenivo do betonu.....	18
2.1.2	Cement.....	20
2.1.3	Voda v betonu	25
2.1.4	Přísady do betonu.....	27
2.1.5	Příměsi do betonu.....	32
2.2	Vysokohodnotný beton	36
2.2.1	Beton vyztužený vlákny	37
2.3	Ultra-vysokohodnotný beton.....	44
2.3.1	Ultra-vysokohodnotný vláknobeton.....	45
3	Metodika balistických testů	47
3.1	Balistická odolnost.....	47
3.1.1	Odolnost proti průniku projektilu.....	48
3.1.2	Lokální účinky poškození blízkou detonací.....	51
3.1.3	Lokální účinky poškození projektilem.....	51
3.2	Experimentální balistické testy.....	52
4	Experimentální část	56
4.1	Návrh experimentu	56
4.1.1	Schematické znázornění návrhů experimentů.....	57
4.2	Bednění na vzorky	58
4.3	Výroba vzorků.....	58
4.3.1	Složení suché směsi	58
4.3.2	Rozpis betonáže	60
4.3.3	Použité přístroje a pomůcky.....	60

4.3.4	Vlastní výroba vzorků.....	61
4.4	Zkoušení mechanických vlastností doprovodných těles	64
4.4.1	Stanovení objemové hmotnosti	64
4.4.2	Stanovení pevnosti v tahu ohybem	65
4.4.3	Stanovení pevnosti v tlaku.....	66
4.5	Balistický experiment.....	67
4.5.1	Držák pro vrstvení desek	67
4.5.2	Popis místa a průběh zkoušení	68
4.5.3	Vlastní zkoušení vrstvených desek.....	71
5	Výsledky a diskuse.....	77
5.1	Vyhodnocení stavu desek po střelbě	78
5.2	Zjišťování průřezů kráterů pomocí 2D profilometru	80
5.2.1	Krátery v referenčních deskách.....	81
5.2.2	Krátery v deskách číslo 11 a 12	82
5.2.3	Krátery v deskách číslo 8, 9 a 10	83
5.2.4	Krátery v deskách číslo 5, 6 a 7.....	84
5.2.5	Krátery v deskách číslo 1, 2, 3 a 4.....	85
5.3	Měření ploch kráterů.....	86
5.4	Ústové a dopadové rychlosti střel	91
5.5	Změna trajektorie střel.....	93
5.5.1	Trajektorie střel mezi deskami číslo 11 a 12.....	95
5.5.2	Trajektorie střel mezi deskami číslo 8, 9 a 10.....	95
5.5.3	Trajektorie střel mezi deskami číslo 5, 6 a 7	96
5.5.4	Trajektorie první střely mezi deskami 1, 2, 3 a 4.....	96
5.5.5	Trajektorie druhé střely mezi deskami 1, 2, 3 a 4	97
5.5.6	Trajektorie třetí střely mezi deskami 1, 2, 3 a 4	97
6	Závěr	98
7	Přílohy.....	100
7.1.1	Výsledky mechanických vlastností doprovodných těles.....	100
7.1.2	Výrobní výkresy držáku.....	104
7.1.3	Fotografie ploch jednotlivých kráterů.....	106

Seznam obrázků

obrázek č. 1: <i>Drobné kamenivo (písek)</i>	19
obrázek č. 2: <i>Hrubé kamenivo (těžený štěrtek)</i>	19
obrázek č. 3: <i>Schéma rotační pece</i>	21
obrázek č. 4: <i>Hydratace cementu v závislosti na vodním součiniteli</i> [7].....	26
obrázek č. 5: <i>Vliv vodního součinitele na vlastnosti betonu</i> [7]	26
obrázek č. 6: <i>Princip elektrostatického přitahování zrn cementu</i> [12]	28
obrázek č. 7: <i>Princip elektrostatického odpuzování zrn cementu</i> [12].....	28
obrázek č. 8: <i>Stupeň nasycení v závislosti na obsahu plastifikátoru</i> [5]	31
obrázek č. 9: <i>Pozice hydraulických a pucolánových látek</i> [2].....	33
obrázek č. 10: <i>Mikrosilika</i>	34
obrázek č. 11: <i>SEM mikrosiliky (50 000 × zvětšeno)</i> [10].....	34
obrázek č. 12: <i>Popílek</i>	35
obrázek č. 13: <i>SEM popílku</i>	35
obrázek č. 14: <i>Typy úprav ocelových vláken</i>	39
obrázek č. 15: <i>Příklady ocelových vláken</i>	40
obrázek č. 16: <i>Příklady polymerních makrovláken</i>	42
obrázek č. 17: <i>Příklady polymerních mikrovláken</i>	43
obrázek č. 18: <i>Skelná vlákna</i>	43
obrázek č. 19: <i>Odlíšnost struktur různých betonů</i> [26]	44
obrázek č. 20: <i>Projektily vznikající při výbuchu</i>	47
obrázek č. 21: <i>Odezva konstrukce při nárazu automobilu</i>	47
obrázek č. 22: <i>Části náboje 7,62 × 39 mm</i> [33]	49
obrázek č. 23: <i>Druhy projektilů</i>	50
obrázek č. 24: <i>Tlaková vlna způsobující fragmentaci materiálu</i> [32]	51
obrázek č. 25: <i>Typy lokálních poškození</i> [37]	52
obrázek č. 26: <i>Uspořádání střelecké zkoušky</i> [38].....	53
obrázek č. 27: <i>Laminovací účinek projektilu</i> [39]	53
obrázek č. 28: <i>Připravené UHPCC cíle</i> [40]	54
obrázek č. 29: <i>Projektil</i> [41].....	54
obrázek č. 30: <i>Schéma zkušebního stroje se zkoušeným vzorkem</i> [41]	55
obrázek č. 31: <i>Parametry desek</i>	56
obrázek č. 32: <i>Připravené bednění</i>	58
obrázek č. 33: <i>Detail rohu bednění</i>	58
obrázek č. 34: <i>Zkušební lis</i>	61

obrázek č. 35: <i>Nízkootáčková vertikální míchačka</i>	61
obrázek č. 36: <i>Míchací lopatka a nádoba</i>	61
obrázek č. 37: <i>Vibrační stolice</i>	61
obrázek č. 38: <i>Vybetonované desky</i>	63
obrázek č. 39: <i>Detail rohu a rovinatosti desky</i>	63
obrázek č. 40: <i>Zkouška pevnosti v tahu ohybem</i>	65
obrázek č. 41: <i>Zlomek trámečku</i>	66
obrázek č. 42: <i>Držák na zkoušené vzorky</i>	68
obrázek č. 43: <i>Boční pohled na držák</i>	68
obrázek č. 44: <i>Střeliště D</i>	69
obrázek č. 45: <i>Zastřešení střeleckého stanoviště</i>	69
obrázek č. 46: <i>Použité nástroje a náboje</i>	69
obrázek č. 47: <i>Rozložení zkoušení referenční desky</i>	70
obrázek č. 48: <i>Rozložení zkoušení vrstvených desky</i>	70
obrázek č. 49: <i>Rozložení střelby na desku (multi-hit)</i>	71
obrázek č. 50: <i>Schematické rozložení střelby</i>	71
obrázek č. 51: <i>Odzkoušený vzorek</i>	71
obrázek č. 52: <i>Schematické rozložení střelby (vrstvení po 300 mm)</i>	72
obrázek č. 53: <i>Odzkoušené vzorky (vrstvení po 300 mm)</i>	72
obrázek č. 54: <i>Schematické rozložení střelby (vrstvení po 150 mm)</i>	73
obrázek č. 55: <i>Odzkoušené vzorky (vrstvení po 150 mm)</i>	73
obrázek č. 56: <i>Schematické rozložení střelby (vrstvení po 50 mm)</i>	74
obrázek č. 57: <i>Odzkoušené vzorky (vrstvení po 50 mm)</i>	74
obrázek č. 58: <i>Schematické rozložení střelby (vrstvení po 100 mm)</i>	74
obrázek č. 59: <i>Odzkoušené vzorky (vrstvení po 100 mm)</i>	74
obrázek č. 60: <i>Schematické rozložení střelby (vrstvení po 50, 150, 100 mm)</i>	75
obrázek č. 61: <i>Odzkoušené vzorky (vrstvení po 50, 150, 100 mm)</i>	75
obrázek č. 62: <i>Schematické rozložení střelby (vrstvení po 150, 50, 100 mm)</i>	76
obrázek č. 63: <i>Odzkoušené vzorky (vrstvení po 150, 50, 100 mm)</i>	76
obrázek č. 64: <i>Profilometr s počítačem</i>	80
obrázek č. 65: <i>Měřící rameno s laserem</i>	80
obrázek č. 66: <i>Jádro nedeformovatelné střely po průchodu deskou</i>	90
obrázek č. 67: <i>Plášť nedeformovatelné střely po průchodu deskou</i>	90
obrázek č. 68: <i>Odklon střely po průchodu deskou [27]</i>	93

Seznam tabulek

tabulka č. 1: <i>Druhy hornin</i> [2].....	18
tabulka č. 2: <i>Chemické složení portlandského slínku</i> [2].....	23
tabulka č. 3: <i>Mineralogické složení slínku</i> [5].....	23
tabulka č. 4: <i>Druhy cementů dle směsnosti</i> [2].....	24
tabulka č. 5: <i>Třídy vysokohodnotného betonu</i> [6].....	36
tabulka č. 6: <i>Složení suché prefabrikované směsi silikátového kompozitu</i> [42].....	59
tabulka č. 7: <i>Lomová energie</i> [42].....	59
tabulka č. 8: <i>Rozpis betonování zkušebních těles</i>	60
tabulka č. 9: <i>Složení směsi na výrobu dvou desek a tří doprovodných těles</i> [42].....	62
tabulka č. 10: <i>Rozdělení balistických testů</i>	77
tabulka č. 11: <i>Vyhodnocení stavu desek po střelbě</i>	78
tabulka č. 12: <i>Plochy jednotlivých kráterů</i>	86
tabulka č. 13: <i>Část balistické tabulky střel 7,62 × 39 mm</i> [44].....	91
tabulka č. 14: <i>Dopadové rychlosti jednotlivých střel</i>	92
tabulka č. 15: <i>Trajektorie střel</i>	93
tabulka č. 16: <i>Vyhodnocení objemových hmotností doprovodných těles</i>	100
tabulka č. 17: <i>Vyhodnocení pevností v tahu ohybem doprovodných těles</i>	102
tabulka č. 18: <i>Vyhodnocení pevností v tlaku doprovodných těles</i>	103

Seznam grafů

graf č. 1: <i>Hmotnostní podíl jednotlivých složek betonu</i> [45].....	17
graf č. 2: <i>Typické složení UHPFRC betonu</i> [28].....	45
graf č. 3: <i>Výsledné hodnoty objemových hmotností</i>	64
graf č. 4: <i>Výsledné hodnoty pevností v tahu ohybem</i>	66
graf č. 5: <i>Výsledné hodnoty pevností v tlaku</i>	67
graf č. 6: <i>Plochy kráterů po deformovatelné střele ráže 7,62 × 39 mm (SLC)</i>	89
graf č. 7: <i>Plochy kráterů po nedeformovatelné střele ráže 7,62 × 39 mm (MSC)</i>	89

Seznam zkratek a symbolů

ASR	C₃A
<i>alkalicko-křemičitá reakce</i>	<i>trikalciualuminát</i>
CaO	C₄AF
<i>oxid vápenatý</i>	<i>tetrakalciumaluminátferit</i>
SiO₂	M_H
<i>oxid křemičitý</i>	<i>hydraulický modul</i>
Al₂O₃	M_S
<i>oxid hlinitý</i>	<i>silikátový modul</i>
Fe₂O₃	M_A
<i>oxid železitý</i>	<i>aluminátový modul</i>
CaSO₄	w
<i>síran vápenatý</i>	<i>vodní součinitel</i>
CaSO₄ · 2H₂O	m_v
<i>dihydrát síranu vápenatého</i>	<i>hmotnost vody</i>
CaSO₄ · ½H₂O	m_c
<i>hemihydrát síranu vápenatého</i>	<i>hmotnost pojiva (cementu)</i>
P₂O₅	m_p
<i>oxid fosforečný</i>	<i>hmotnost příměsi</i>
MgO	SEM
<i>oxid hořečnatý</i>	<i>skenovací elektronový mikroskop</i>
SO₃	<i>(z ang. „scanning electron microscope“)</i>
<i>oxid sírový</i>	ρ_v
Na₂O	<i>objemová hmotnost</i>
<i>oxid sodný</i>	m
K₂O	<i>hmotnost materiálu</i>
<i>oxid draselný</i>	V
TiO₂	<i>objem prvku</i>
<i>oxid titaničitý</i>	f_{ct, f, 3, B}
Ca(OH)₂	<i>pevnost betonu v tahu za tříbodového</i>
<i>hydroxid vápenatý</i>	<i>ohybu</i>
C₃S	M
<i>trikalciumsilikát</i>	<i>hodnota ohybového momentu</i>
C₂S	W
<i>dikalciumsilikát</i>	<i>modul průřezu</i>
	F
	<i>maximální zatěžovací síla</i>

l*vzdálenost mezi podpěrnými válečky***b***šířka příčného průřezu trámečku***h***výška příčného průřezu trámečku* **f_c** *pevnost betonu v tlaku***A***zatěžovací plocha***HPC***vysokohodnotný beton**(z ang. „high performance concrete“)***HSC***vysokopevnostní beton**(z ang. „high strength concrete“)***SCC***samožhutnitelný beton**(z ang. „self compacting concrete“)***FRC***Vlákny vyztužený beton**(z ang. „fibre reinforced concrete“)***SFRC***vláknobeton s ocelovými drátky**(z ang. „steel fibre reinforced concrete“)***GFRC***vláknobeton se skelnými vlákny**(z ang. „glass fibre reinforced concrete“)***NFRC***vláknobeton s přírodními vlákny**(z ang. „natural fibre reinforced concrete“)***PFRC***vláknobeton s polypropylenovými vlákny**(z ang. „polypropylen fibre reinforced concrete“)***CFRC***vláknobeton s uhlíkovými vlákny**(z ang. „carbon fibre reinforced concrete“)***UHPC***ultra vysokohodnotný beton**(z ang. „ultra high performance concrete“)***UHSC***ultra vysokopevnostní beton**(z ang. „ultra high strength concrete“)***UHPCC***Ultra vysokohodnotný cementový kompozit**(z ang. „ultra high performance cementitious composites“)***SLC***deformovatelný projektil**(z ang. „soft-lead core“)***MSC***nedeformovatelný projektil**(z ang. „mild-steel core“)*

1 Úvod

1.1 Motivace

Beton jako stavební materiál se používá již dlouhá léta. Zlomovým okamžikem v použití prvních cementových či vápenných pojiv bylo nepochybně období antiky.

V průběhu historie se pak beton mimo jiné využíval na výstavbu pevností pro ochranu před střelnými zbraněmi. Tehdejší tloušťky stěn takovýchto objektů dosahovaly až 1,5 m, v závislosti na stupni ochrany, kterou měl objekt zajišťovat. Tloušťka stěn pak mohla být i větší.

V dnešní moderní době se vyvíjí vše kolem nás, materiálů nevyjímaje. Nyní již existují a dále se zkoumají cementové kompozity, které jsou schopny zastavit letící projektil při mnohonásobně menších tloušťkách, než tomu bylo dříve.

Hlavní motivací bylo pokusit se rozšířit problematiku odolnosti vysokohodnotných vlákný vyztužených cementových kompozitů o další téma, a tím je doposud neprozkoumané vrstvení desek. Dalším přínosem by měla být částečná úspora materiálu na úkor prostoru a také snížení hmotnosti jednotlivých prvků, díky jejímu rozložení do více dílů.

1.2 Cíl práce

Cílem této práce je potvrdit myšlenku, jestli vrstvení jednotlivých desek bude mít pozitivní vliv na ochranu měkkých cílů, tj. civilního obyvatelstva, a to především změnou trajektorie střely. Při průstřelu přední desky a následné změně trajektorie může snáze dojít ke snížení penetračního potenciálu střely a snížit její průbojnost u následující desky. Účelem této práce by také mělo být ověření, že může dojít i k částečné redukci spotřebovaného materiálu díky snížení celkové tloušťky desek, popřípadě alespoň rozložení hmotnosti do více dílů.

Rešeršní část práce bude dělena na dvě hlavní kapitoly. Jedna z nich se bude zabývat složkami betonu, vlákny do betonu a následně pak cementovým vlákny vyztuženým kompozitním materiálem (UHPFRC) z hlediska jeho složek používaných při

výrobě, které se liší oproti obyčejnému betonu. V následné podkapitole bude prozkoumáno jeho chování při extrémním zatížení, kterým je myšleno zásah palebnou zbraní, resp. projektilem. Svě místo zde také budou mít základní typy střel, jejich konstrukce, a to u nepoužívanějšího puškového náboje s polotvrdým ocelovým jádrem a měkkým olověným jádrem velikosti $7,62 \times 39$ mm. V závěru bude i kapitola o různých typech balistických testů se zaměřením na vzorky, jejich typ uložení a měřené veličiny.

1.3 Rozsah práce

Práce bude rozdělena na dvě hlavní části. Jednou z nich bude teoretická část, tj. rešerše, která bude obecně pojednávat o již zmíněné problematice, druhou pasáží bude experimentální část skládající se z postupu výroby dvanácti betonových desek o rozměru 500×500 mm tloušťky 20 mm a doprovodných těles, tj. trámců o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm pro určení základních charakteristik a jejich zkoušení. Zbytek experimentální části se bude zabývat popisem místa zkoušení na střelnici, testováním a vyhodnocováním stanovených cílů.

2 Struktura betonu

V každé encyklopedii, publikaci či knize, která se okrajově či podrobně zabývá tématem betonu, je definováno, co se pojmem „beton“ rozumí. Tato práce v tomto směru nebude výjimkou, a to z důvodu postupného přiblížení dané problematiky.

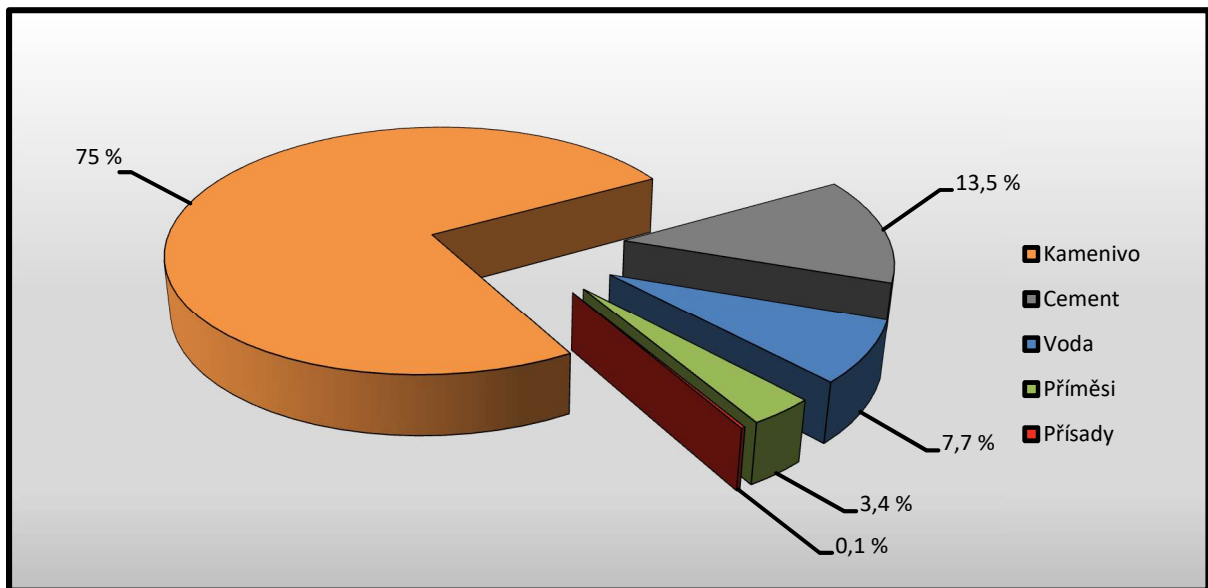
2.1 Složení obyčejného betonu

Beton se skládá ze dvou základních složek. Jednou z nich je kamenivo, které tvoří nosnou kostru betonu, a druhou složkou je cementová matrice, která spojuje jednotlivá zrna kameniva k sobě a vytváří tak soudržný a kompaktní materiál. Již zmíněná matrice, která se někdy nazývá cementovou pastou, se skládá z cementu a vody. V současné době je nejpoužívanější portlandský cement, nicméně cement může být různého druhu [1].

Stručně řečeno, nutnými složkami pro výrobu obyčejné betonové směsi je tedy písek, přírodní štěrk nebo drť, pojivo neboli cement a voda [1].

Pro výrobu speciálních betonů se přidávají ještě další důležité složky a těmi jsou tekuté chemické přísady, práškové minerální příměsi a kovová, skleněná nebo polymerní vlákna [1]. Téma vláken bude podrobněji zpracováno v dalších kapitolách.

graf č. 1: *Hmotnostní podíl jednotlivých složek betonu* [45]



2.1.1 Kamenivo do betonu

Kamenivo je přírodní nebo umělá, anorganická látka a je majoritní složkou v podstatě v každém betonu. Zabírá zhruba dvě třetiny až tři čtvrtiny celkového objemu betonu a hraje poměrně významnou roli, neboť zajišťuje objemovou stabilitu betonu a jeho lepší trvanlivost [1; 2].

„Kromě toho hraje kamenivo důležitou roli i z hlediska pevnosti betonu, zejména vysokohodnotného betonu.“ [1]

tabulka č. 1: *Druhy hornin* [2]

Hornina	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Nasákavost [%]
<i>Vyvřelé horniny</i>				
žula	2600–2800	120–240	10–35	0,2–1,2
diorit	2700–3000	135–215	20–40	0,2–0,7
gabro	2800–3100	150–225	25–60	0,2–0,5
syenit	2500–2900	150–200	10–20	0,2–0,5
čedič	2050–3000	250–400	15–25	0,1–0,3
trachyt	2400–2900	60–70	---	1,0–2,0
diabas	2800–2980	120–220	20–45	0,1–0,8
porfyr	2550–2650	70–210	15–30	0,2–1,5
<i>Usazené horniny</i>				
pískovec	2000–2400	30–80	3,8	4,0–8,5
vápenec	2600–2850	40–180	10–25	0,2–0,6
dolomit	2650–2850	100–200	12–25	0,2–0,6
břidlice	2600–2750	100–190	30–100	0,3–1,5
<i>Metamorfované horniny</i>				
rula	2650–2750	120–250	24–50	0,1–1,2
křemenec	2500–2700	300	---	0,5
amfibolit	2700–3100	170–280	---	0,1–0,4
mramor	2700–2800	75–145	12–26	0,2–1,0
serpentin	2500–2850	60–140	10–23	0,1–2,0

Mezi nejvýraznější rysy kameniva patří rozhodně zrnitost. Kamenivo se obecně dělí na hrubé a drobné kamenivo. Platí, že zrna, která jsou menší než 4 mm, spadají do kategorie drobného kameniva a naopak zrna, jež jsou větší než 4 mm, patří do kategorie hrubého kameniva [1].



obrázek č. 1: Drobné kamenivo (písek)



obrázek č. 2: Hrubé kamenivo (těžený štěrk)

Ovšem ne každé kamenivo se hodí k výrobě betonu, neboť může obsahovat látky, které by jej v budoucnu rozrušovaly, aniž by byl beton vystaven nepříznivým podmínkám. Mezi škodlivé látky patří například chloridy, sírany, reaktivní silika (ASR¹ reakce), jíly nebo organické látky [1].

2.1.1.1 Vliv vlhkosti kameniva na vlastnosti betonu

Vliv vlhkosti kameniva hraje poměrně zásadní roli při dávkování záměsové vody. Pokud je totiž kamenivo mokré, tak je nutné nadbytečnou vodu, která je oproti stavu nasycených a povrchově suchých zrn, připočítat do vodního součinitele. Dávka záměsové vody se pak poníží o tuto hodnotu [1].

V opačném případě, kdy je kamenivo zcela vysušené, nastává stav, ve kterém záměsovou vodu betonu odebírá právě suché kamenivo, které ji nasakuje do svých vnitřních pórů a tím snižuje reálný vodní součinitel [1]. Vlhkost kameniva je nutné brát v potaz, neboť může významně ovlivnit budoucí vlastnosti jako je pevnost betonu v tlaku, zpracovatelnost čerstvé směsi apod. [1].

¹ ASR – alkaliccko-křemičitá reakce (z anglického alkali-silica reaction)

2.1.2 Cement

„Beton nelze vyrobit bez kterékoliv ze základních složek – cementu, vody a kameniva; je ovšem pravda, že duší, nebo chcete-li srdcem betonu, je cement. On je tím protagonistou, díky němuž jsou betonové konstrukce někdy označovány jako cementové konstrukce.“ [1]

Silikátový, někdy také křemičitanový cement, je silně hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po přimíchání vody začne vytvářet kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí slinkových minerálů. Po zatvrdnutí si zanechává svou pevnost i stálost jak v suchém prostředí, tak i pod vodou [3].

2.1.2.1 Suroviny pro výrobu cementu

V dnešní době je portlandský cement nejrozšířenějším pojivem v oblasti stavebnictví a pro výrobu vysokohodnotných betonů je nezbytnou součástí.

Základní složkou pro výrobu cementu jsou ideálně navětralé a rozrušené vápence, které jsou pak ideálně středně až silně znečištěny jílovitými příměsmi. Ty vnášejí do směsi oxidy křemíku, hliníku a železa [4].

Obsah uhličitanu vápenatého by měl být kolem 76–78 %. Pokud je vyšší, musí se dodatečně upravit pomocí vedlejších složek, tzv. korigujících surovin. V přírodě lze nalézt i přírodně namíchaná ložiska, kde je surovina ve vhodném poměru [4].

Příklady jednotlivých korigujících surovin pro jednotlivé oxidy jsou:

- a) Oxid křemíku (SiO_2) – písek, křemen nebo vysocekřemičitý jíl,
- b) Oxid hliníku (Al_2O_3) – bauxit²,
- c) Oxid železa (Fe_2O_3) – železná ruda, kyzové výpalky³ [4].

² bauxit – hornina reziduálního nebo sedimentárního původu s obsahem nejméně 40 % Al_2O_3

³ kyzový výpalek – odpad při pražení pyritu v chemickém průmyslu při výrobě kyseliny sírové

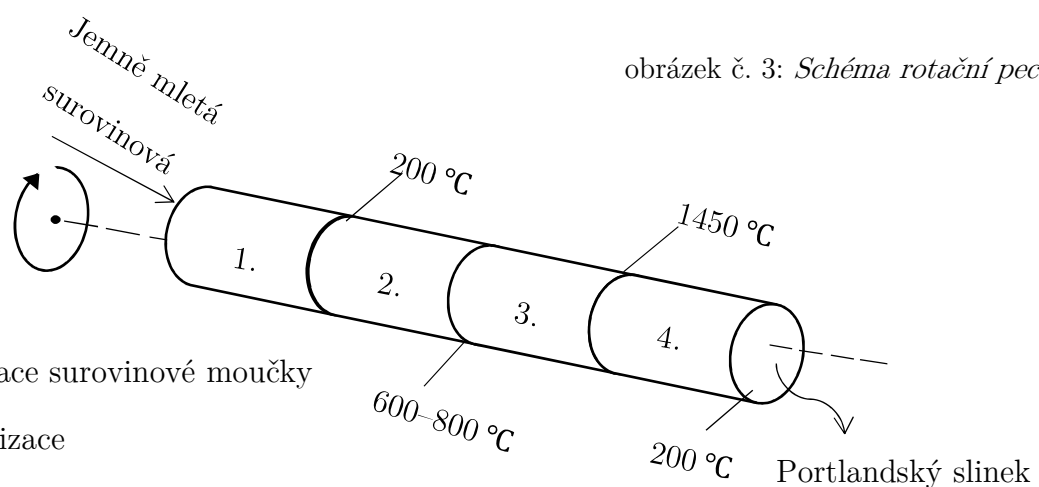
Další složkou, která se používá při výrobě cementu, jsou pomocné suroviny. Ty se používají v malém množství a ovlivňují vlastnosti surovinové moučky jak před výpalem, tak i v jeho průběhu [5].

Patří mezi ně tzv. intenzifikátory pro výpal slínku (slouží ke snížení viskozity taveniny při výpalu), intenzifikátory pro mletí slínku (snižují jeho dobu mletí po vychlazení), mineralizátory (látky, které ovlivňují tvorbu některých slinkových minerálů na úkor druhých) a regulátory tuhnutí (ty slouží k oddálení tuhnutí cementu po jeho smíchání s vodou – mezi ně patří například sádrovec) [5].

2.1.2.2 Výroba cementu

Portlandský cement se vyrábí mletím portlandského slínku, který je jednou ze dvou hlavních surovin cementu. Portlandský slínek vzniká při vypalování surovinové moučky. Tato moučka musí obsahovat vhodný poměr čtyř základních hlavních oxidů – CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , která se nastaví pomocí modulů. Základní moduly jsou popsány v následující kapitole 2.1.2.3. Druhou složkou je síran vápenatý, a to ve formě sádrovce – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, hemihydrátu – $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, anhydritu – CaSO_4 , popřípadě jejich směs [6].

Zjednodušené schéma výroby cementu v rotační peci je na následujícím obrázku (s laskavým poskytnutím pana Ing. Jindřicha Vorla, Ph.D.).



1. Dehydratace surovinové moučky
2. Dekarbonizace
3. Vlastní výpal surovinové moučky
4. Rychlé ochlazení portlandského slínku

2.1.2.3 Chemické a mineralogické složení cementu

Základem výroby cementu je správné nastavení surovinové směsi pomocí tzv. modulů, které byly odvozeny empiricky ze získaných praktických zkušeností. Existuje celá řada možností, podle kterých lze vypočítat poměr jednotlivých složek pro surovinovou směs speciálně pro požadavky na daný produkt. Zde jsou uvedeny tři nejzákladnější a nejznámější moduly, jimiž jsou hydraulický, silikátový a aluminátový (též hlinitanový) modul [4].

a) Modul hydraulický

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1,7 - 2,3 \quad (1)$$

Cementy s hydraulickým modulem menším než 1,7 mají nižší pevnosti, a naopak s vyšším hydraulickým modulem než 2,4 jsou objemově nestálé. Ideální cement s dobrými vlastnosti je takový, jehož hydraulický modul se blíží hodnotě 2 [4].

b) Modul silikátový

$$M_S = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1,9 - 3,2 \quad (2)$$

Při vyšších hodnotách silikátového modulu dochází ke zvýšení výsledných pevností cementu, ke zpomalení tuhnutí a tvrdnutí cementu a také je obtížnější výpal. Optimální rozmezí hodnot se nachází mezi 2,2 - 2,6 [4].

c) Modul aluminátový

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1,5 - 2,5 \quad (3)$$

Vyšší hodnoty zvyšují teplotu vypalování slínku, zrychlují tuhnutí a tvrdnutí, zvyšují výslednou pevnost, ale zmenšují odolnost cementu vůči síranovým jevům [4].

tabulka č. 2: Chemické složení portlandského slínku [2]

Druh	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O	TiO ₂
[%]	65	22	6	3	0,2	3	0,6	1,2	0,3

Jak již bylo řečeno, obsah jednotlivých oxidů ovlivňuje vlastnosti cementu a některé z nich dokonce negativně. Oxid hořečnatý (MgO) při koncentracích nad 5 % způsobuje objemové změny při hydrataci cementu [2].

Chemický proces tvorby jednotlivých slínkových minerálů je velmi složitý a velice často bývá zjednodušen na popis základních slínkových minerálů. Mineralogické složení slínku je pak uvedeno v tabulce č. 3 [2].

tabulka č. 3: Mineralogické složení slínku [5]

Název minerální fáze	Zkrácený název	Úplný vzorec	Zkrácený vzorec	Obsah [%]
Trikalciumsilikát	alit	3CaO · SiO ₂	C ₃ S	37–75
Dikaliumsilikát	belit	2CaO · SiO ₂	C ₂ S	5–40
Trikalciumaluminát	---	3CaO · Al ₂ O ₃	C ₃ A	3–15
Tetrakalciumaluminátferit	brownmillerit	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	9–14
Oxid vápenatý	volné CaO	CaO	C _v	<4
Oxid hořečnatý	periklas	MgO	M _v	<5

Jak je patrné z předcházející tabulky, alit a belit jsou dva nejdůležitější slínkové minerály. Mají největší procentuální zastoupení, které tvoří zhruba 75–85 % hmotnosti slínku. Zbytek hmotnosti slínku tedy 20–25 % tvoří aluminátová a ferialuminátová fáze, která se nachází mezi krystaly alitu a belitu [5].

Počáteční nárůsty pevností, významný vývoj hydratačního tepla a rychlost tvrdnutí ovlivňuje alit, neboť je charakteristický svou vysokou reaktivností. Jeho krystaly mají hexagonální tvar a jejich velikost je závislá na teplotě výpalu a rychlosti chlazení. Pomalým chlazením se totiž alit rozpadá na CaO a C₂S, proto je nutné taveninu rychle zchladit [4] [5].

Naopak belit se vyznačuje menším vývinem hydratačního tepla a pomalými nárůsty pevností, které jsou ovšem déletrvající. Krystaly jsou ve slínku nepravidelně rozmístěny po shlucích několika zrn a mají spíše okrouhlý tvar [4; 5].

2.1.2.4 Druhy cementů

Cementy se dále dělí dle směsnosti, což je uvedeno v tabulce č. 4.

tabulka č. 4: *Druhy cementů dle směsnosti* [2]

Druh cementu	Název cementu	Označení	Obsah složek [hm. %]		
			slínek	složka	plnivo
I.	portlandský	I	95–100	---	0–5
II.	portlandský směsný	II/A–X	80–94	6–20	0–5
		II/B–X	65–79	21–35	0–5
III.	vysokopecní	III/A	33–64	36–65	0–5
		III/B	20–34	66–80	0–5
		III/C	5–19	81–95	0–5
IV.	pucolánový	IV/A	65–89	11–35	0–5
		IV/B	45–64	36–55	0–5
V.	směsný	V/A	40–64	18–30	0–5
		V/B	20–39	30–50	0–5

Vysvětlivky k označení složek „X“:

CEM II.: S = struska; D = křemičitý úlet (max. 10 %); P = přírodní puclán;

Q = průmyslový puclán; V = křemičitý popílek; W = vápenatý popílek;

T = kalcinovaná břidlice; L = vápenec

CEM IV.: složky tvoří křemičitý úlet D, přírodní a průmyslový puclán P a Q a křemičitý popílek V

CEM IV.: složka je z poloviny tvořena struskou S a z poloviny P, Q, V [2].

2.1.3 Voda v betonu

Voda v betonu ovlivňuje vlastnosti jak čerstvého, tak ztvrdlého betonu. V počátcích má vliv na zpracovatelnost betonu, je startérem hydratačních procesů a podstatně ovlivňuje objemové změny betonu, jimiž je například vysychání, smršťování nebo dotvarování betonu, což souvisí s jeho pevností. Na záměsovou vodu jsou kladeny požadavky z hlediska určitých látek, které by ovlivňovaly průběh hydratace. Mezi takové látky patří hlavně látky organické, jako jsou cukry, huminové látky, tuky a oleje. Zkoumá se pH vody, obsah síranů či chloridů [7; 8].

2.1.3.1 Vodní součinitel

V dřívějších dobách bylo nutné pro zajištění dobré zpracovatelnosti přidávat velké množství záměsové vody. S příchodem stavební chemie, zejména pak plastifikátorů a superplastifikátorů, o kterých je pojednáno v kapitole 2.1.4, je možné stejnou zpracovatelnost zajistit i s menším množstvím vody [8].

Pro snadnější pochopení následujících vět bude zaveden pojem vodní součinitel w , který se vypočte ze vztahu (4).

$$w = \frac{m_v}{m_c} \quad (4)$$

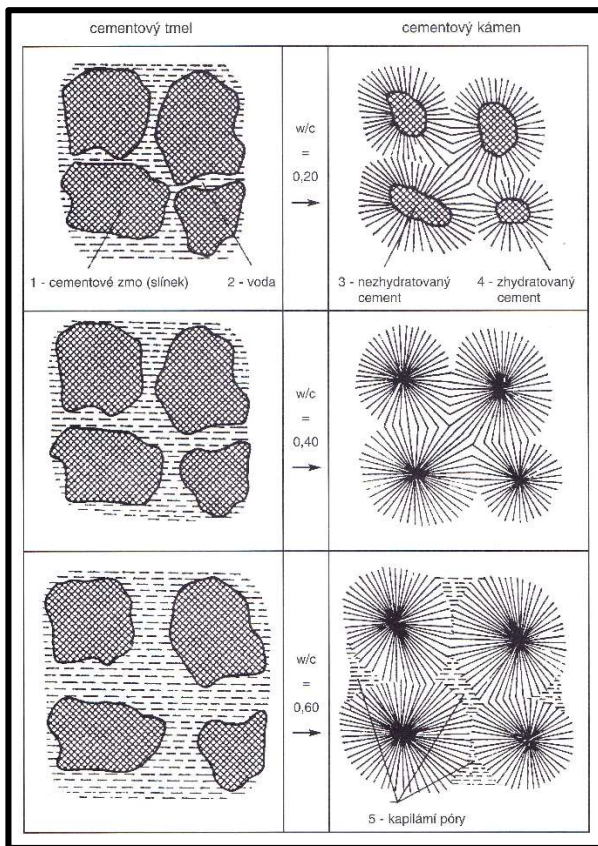
kde m_v je hmotnost vody [kg]

m_c je hmotnost pojiva (cementu) [kg]

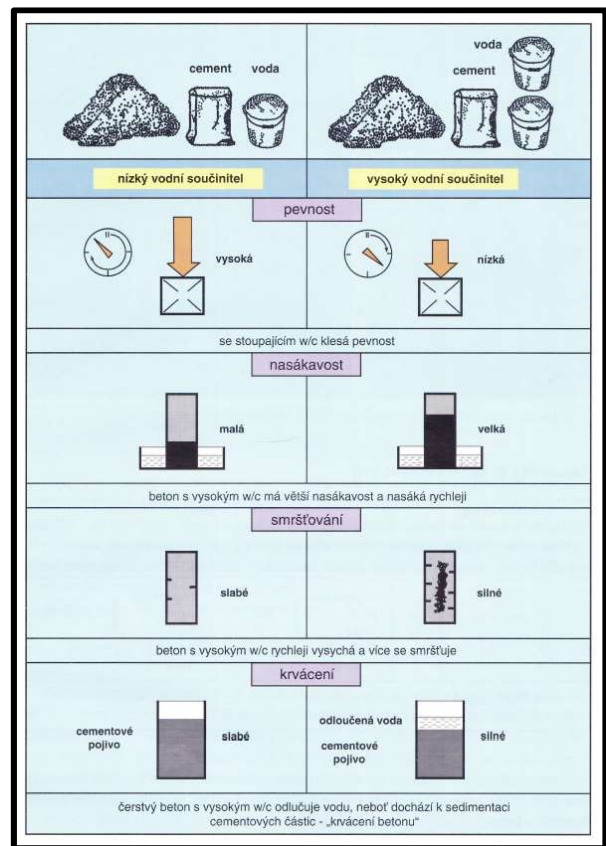
Vodní součinitel je tedy hmotnostní poměr vody k pojivu (cementu), u běžných betonů se pohybuje v rozmezí 0,4–0,6. U vysokohodnotných betonů pak klesá až na hodnotu 0,20, a to díky přísadám, které se do směsi přimíchávají [2; 8]. V normě ČSN EN 206 +A1 se uvádí mezní vodní součinitel betonu v závislosti na zvoleném stupni vlivu prostředí [9].

Obecně je známo, že čím menší je vodní součinitel, tím je struktura betonu kompaktnější a více homogenní. Není tolik pórovitá, je tedy pevnější, trvanlivější

a odolnější vůči vlivům prostředí. Je však důležité pamatovat na to, že pokud bychom snížili množství záměsové vody pod určitou mez, došlo by ke snížení prohydratování cementových zrn do hloubky, a tím by část nehydratovaných jader tvořila pouze mikroplnivo. To je sice drahé, avšak účinné, neboť jádra nehydratovaných cementových zrn tvoří mikroplnivo, které je vázáno chemickou vazbou a ne běžnou adhezí, tzv. Van der Waalsovými silami [5; 8]. Závislost hydratace cementových zrn na vodním součiniteli je zobrazen obrázku č. 4, vliv vodního součinitele na vlastnosti betonu je na obrázku č. 5.



obrázek č. 4: Hydratace cementu v závislosti na vodním součiniteli [7]



obrázek č. 5: Vliv vodního součinitele na vlastnosti betonu [7]

Při výrobě vysokohodnotných betonů jsou nedílnou součástí také příměsi (viz kapitola 2.1.5). Jelikož se jedná o velmi jemné látky s vysokým měrným povrchem, tak dochází k vyšší spotřebě záměsové vody.

Norma ČSN EN 206 upravuje klasický vodní součinitel (4) a nahrazuje ho tzv. ekvivalentním vodním součinitelem a ten vypočteme ze vztahu (5) [10].

$$w = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p} \quad (5)$$

kde m_v je hmotnost vody [kg]

m_c je hmotnost pojiva (cementu) [kg]

m_p je hmotnost příměsi [kg]

k je hodnota závislá na použité příměsi a užitém cementu [-]

2.1.4 Přísady do betonu

Přísady jsou v dnešní době u vysokohodnotných betonů nepostradatelnou součástí jejich složení. Jedná se běžně o kapalné látky (mohou být i v práškovém stavu), které se dávkuje v poměrně malých množstvích (0,1–10 kg/m³) vzhledem k ostatním složkám betonu. Slouží zejména pro vylepšení stávajících vlastností jak čerstvého, tak ztvrdlého betonu. Jelikož je přísad na trhu nepřehledné množství, budou zde uvedeny nejzákladnější z nich [1].

Podle funkce, kterou přísady plní, se dělí do jednotlivých skupin:

- plastifikační přísady,
- superplastifikační přísady,
- urychlující přísady,
- retardační přísady,
- provzdušňující přísady,
- odpěňovací přísady,
- hydrofobizační přísady [1].

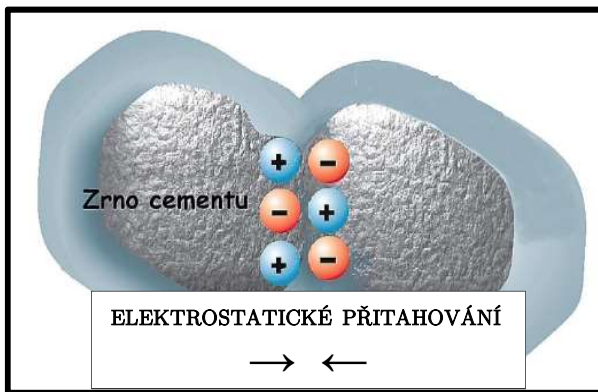
2.1.4.1 Plastifikační přísady

Plastifikační přísady jsou polymerní látky (organické sloučeniny) redukcující potřebné množství záměsové vody k dosažení stejné zpracovatelnosti při nižším vodním součiniteli [5]. Jejich přidáním dochází k významnému ztěkujícímu účinku, snížení

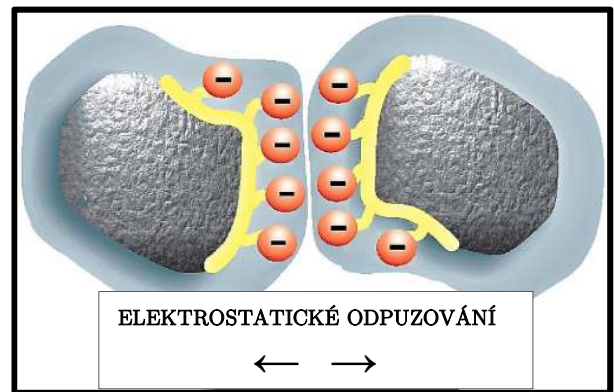
spotřeby vody až o 5 %, zlepšení trvanlivosti betonu a zvýšení tlakové pevnosti až o 10 % oproti referenčním betonům [11].

V klasické cementové kaši dochází k uspořádání elektrických nábojů na povrchu jednotlivých cementových zrn tak, že se vzájemně přitahují a vytváří flokule (shluky). Voda pak mezi ně špatně proniká, a tím se zhoršuje zpracovatelnost. Proces je znázorněn na obrázku č. 6 [12].

S použitím plastifikátorů, a to především díky jejich dispergačním vlastnostem, jsou schopny obalit povrch jednotlivých cementových zrn a jejich záporně nabitě molekuly se na něj navážou, následně dochází k elektrostatickému odpuzování a zabránění flokulaci⁴ zrn, což je zobrazeno na obrázku č. 7. Dojde k uvolnění vázané vody a tím naroste tekutost [5; 12].



obrázek č. 6: Princip elektrostatického přitahování zrn cementu [12]



obrázek č. 7: Princip elektrostatického odpuzování zrn cementu [12]

V případě použití plastifikátorů na bázi karboxylových kyselin dochází kromě elektrostatického odpuzování navíc ještě ke sférickému odpuzování. Tyto dispergační látky jsou pak vysoce účinné [12].

⁴ flokulace – srážení, vločkování

Mezi základní zástupce patří:

- a) Lignosulfonáty – vznikají jako výrobní odpad v průmyslovém zpracování celulózy pro papírenské účely. Hlavní účinnou složkou je lignosulfonan vápenatý, který je po přimíchání do směsi cementu a vody objemově stálý a nemá příliš vedlejších účinků. Dávkování je omezeno tím, že se do betonu dostávají sacharidy, které vznikají při hydrolýze dřevité hmoty a mohou nastat problémy s tuhnutím. Plastifikátory na této bázi jsou schopny redukovat množství záměsové vody až o 10 %. Dnes se již nepoužívají [3; 11; 13].
- b) Naftalensulfonáty – vznikají při procesu kondenzace kyseliny naftalensulfonové a formaldehydu. Vyrábějí se ve formě hnědé kapaliny s charakteristickým zápachem nebo v podobě prášku okrové barvy. Tyto ztekucovače jsou velmi účinné a jejich výhodou jsou takřka nulové retardační účinky. Jsou schopny redukovat množství záměsové vody až o 35 % [13].
- c) Melaminsulfonáty – jedná se o sulfonované melaminformaldehydové pryskyřice. Stejně jako ostatní ztekucovače je lze vyrobit ve formě kapaliny nebo prášku. Prášek má čistě bílou barvu, zatímco kapalná fáze je mírně žlutavá, vazká. Tyto ztekucovače mají výhodu v minimálním počtu vedlejších účinků. Neprovzdušňují a jejich retardační účinek je minimální. Nejsou citlivé na předávkování a obstojně se využívají při vysokých požadavcích na kvalitu betonu [13].
- d) Polykarboxyláty – jedná se o syntetické organické polymery. Jsou to nejmodernější a nejúčinnější ztekucovače, které mají kapalnou i práškovou formu. Prášek je opět bílé barvy stejně jako tomu je u melaminsulfonátů, a v kapalně fázi nažloutlé, mírně oranžové až hnědé barvy. Pro svou vysokou účinnost se využívají zejména v technologii samozhutnitelného betonu (SCC – z anglického „*self-compacting concrete*“). Při jejich použití dochází k extrémnímu snížení záměsové vody a jsou velmi citlivé na předávkování. Jejich účinek trvá nejméně hodinu [13].

2.1.4.2 Superplastifikátory (high-range water reducers)

„Superplastifikátory představují jednu z nejdůležitějších složek vysokohodnotných a vysokopevnostních betonů.“ [5]

Jsou to synteticky upravované látky (čisté látky), které se vyrábí v mnohem vyšší kvalitě, než klasické plastifikátory a tím se výrazně zvyšuje jejich účinnost (bez vedlejších účinků) [5]. Při použití plastifikátoru za účelem snížení spotřeby záměsové vody dochází současně ke stejné zpracovatelnosti již při vodním součiniteli kolem 0,25, i ke zlepšení vlastností ztvrdlého betonu, a to konkrétně zlepšení tlakové pevnosti betonu až o 15 % oproti referenčním betonům [1; 11].

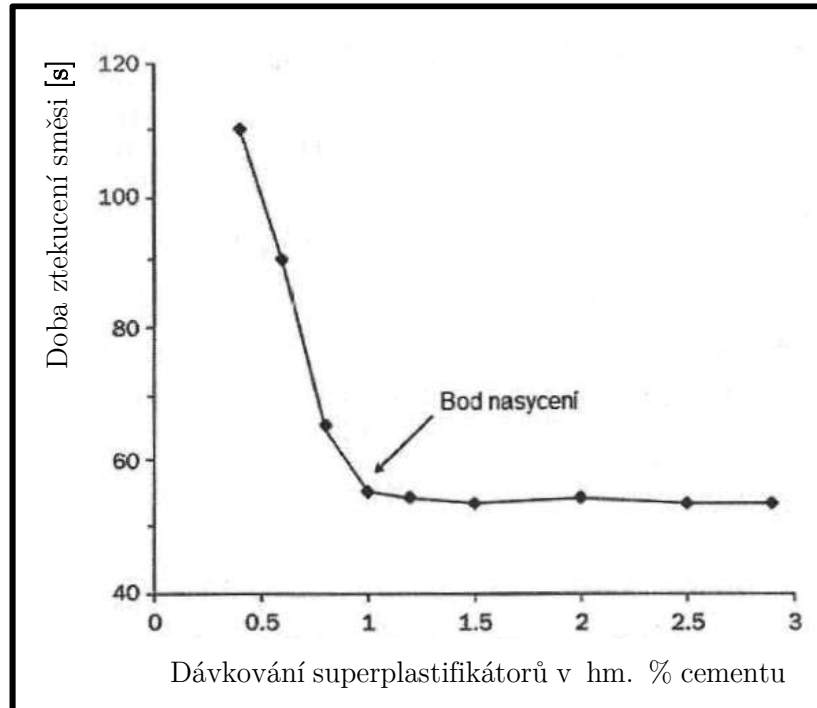
Superplastifikátory pracují na obdobném principu, jenž byl popsán v předcházející kapitole 2.1.4.1.

V dnešní době se zejména používají:

- a) Modifikované lignosulfanany (MLS)
- b) Sulfonované melaminformaldehyd kondensáty (SMF)
- c) Sulfonované naftalenformaldehyd kondensáty (SNF)
- d) Polymery obsahující skupiny kyseliny karboxylové, např. polykarboxyláty (PC), polyakrylátů (PA) apod [5].

Z hlediska okamžiku přimíchávání plastifikátoru do směsi je optimální čas jednu až dvě minuty po prvním kontaktu cementu se záměsovou vodou, protože když se aplikuje ve shodný čas jako voda, dojde k zapojení velké části plastifikátoru do rychlé reakce C_3A s přítomnou sádrrou a zpracovatelnost se sníží [5].

Při dávkování hraje důležitou roli tzv. bod nasycení, který nám udává zlomový okamžik, kdy další postupné přidávání plastifikátoru už nemá zlepšující vliv na tekutost, což je zobrazeno na obrázku č. 8. Překročení tohoto bodu není již ekonomicky ani materiálově přínosné [5].



obrázek č. 8: *Stupeň nasycení v závislosti na obsahu plastifikátoru* [5]

2.1.4.3 Provdzušňovací přísady

Provdzušňující přísady jsou zpravidla látky organického původu (rozpustná mýdla určitých pryskyřic, saponiny atd.), které do směsi čerstvého betonu rozptýlí kontrolované množství vzduchových mikrobublinek [5; 7].

Jejich charakteristickým znakem je, že nemají tendenci navzájem flokulovat. Přerušují kapiláry ve struktuře betonu a výrazně tak snižují jeho nasákavost. Další kladnou vlastností provdzušnění je, že zmenšují vnitřní tření čerstvé betonové směsi a zlepšují zpracovatelnost. Další předností také je, že vylepšují odolnost betonu proti zmrazovacím cyklům [5; 14].

Jejich nevýhodou je ovšem fakt, že nárůstem provdzušnění dochází ke snižování pevnosti betonu v tlaku, přičemž zvýšení pórovitosti o 1 % zapříčiní snížení pevnosti až o 6 %. To je částečně kompenzováno tím, že vlivem již zmíněné lepší zpracovatelnosti lze dosáhnout snížení vodního součinitele [5].

2.1.4.4 Odpěňovací přísady

Odpěňovací přísady se v praxi využívají velmi málo. Malé množství se používá u pohledových betonů, kde jde zejména o hladký povrch bez bublin a pórů. Odstraňuje bubliny vzduchu v době míchání, dopravy a hutnění. Napomáhá tedy zvýšit hutnost betonu, a tím vylepšit některé vlastnosti, např. pevnost v tlaku, mrazuvzdornost, menší nasákavost apod. [13].

Tato přísada se uplatní nejvíce u betonování svislých stěn, kdy odstranění bublin vzduchu není snadné. Výhodou také je, že betonová směs může být míchána vysokou rychlostí, aniž by došlo k vnesení vzduchu našleháním či napěnění směsi [13].

2.1.5 Příměsi do betonu

„Minerální příměsi jsou většinou anorganické látky, které přidáváme do betonu za účelem zlepšení vlastností v čerstvém a zatvrdlém stavu. Tyto látky se vyznačují velikostí částic menší než 0,125 mm a velkým měrným povrchem. Zčásti se může jednat o odpady, které ve stavebnictví zpracováváme, což se pozitivně odráží na jejich ceně, která je většinou výrazně nižší než cena cementu.“ [10]

Norma ČSN EN 206 +A1 rozděluje příměsi na typ I a typ II, první typ jsou inertní příměsi a typ druhý jsou aktivní příměsi [9].

a) Typ I – inertní příměsi

Tyto příměsi se svým chemickým a mineralogickým složením nijak nepodílí na hydrataci, a to ani po přidání budičů. Jsou složkou, jež vytváří hutnější strukturu betonu a zlepšují jeho zpracovatelnost. Svou přítomností mohou zmenšit mezerovitost kameniva použitého do betonu a částečně tím redukovat spotřebu cementu [14].

Do této kategorie příměsí patří zejména kamenné moučky nebo barevné anorganické pigmenty. Je ovšem nutno pamatovat na to, že jelikož se jedná o látky s velkým měrným povrchem, tak značně narůstá spotřeba záměsové vody z důvodů smáčení povrchu zrn [10; 14].

b) Typ II – aktivní příměsi

Aktivní příměsi mají pozitivní vliv na vývoj pevnosti cementové matrice v delším časovém horizontu. Lze je dále rozdělit na pucolánové látky a látky latentně hydraulické [2; 10].

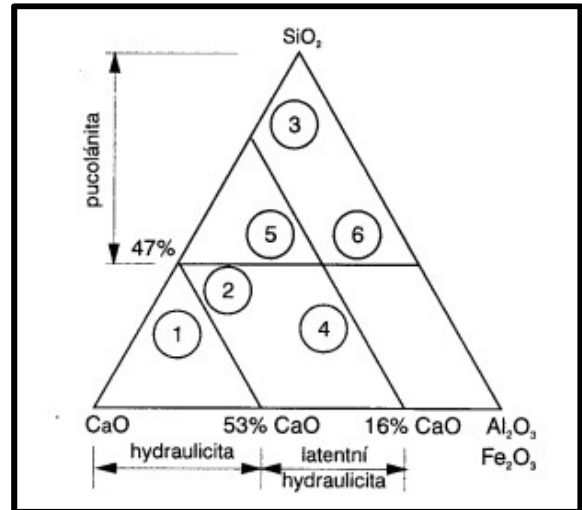
Látky pucolánové jsou zpravidla anorganického původu a jsou typické tím, že smícháním s vodou netuhnou ani netvrdnou v čase. Obsahují však velké množství amorfního SiO_2 , které je schopno reagovat s přítomným $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v alkalickém prostředí, tak vytvářejí zejména C-S-H gely, případně i jiné chemické sloučeniny [2; 10].

Látky latentně hydraulické též reagují s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a za normálních teplot jsou schopny ve vodním prostředí tvrdnout. Jejich nespornou výhodou je možnost snížení množství obsahu cementu, když se přičtou k obsahu pojiva. Mohou tak snižovat hydratační teplo, což se hodí zejména u masivních konstrukcí, avšak za cenu zpomalení počátečního nárůstu pevnosti [2; 7].

Rozdělení jednotlivých pozic je zobrazeno na obrázku č. 9.

2.1.5.1 Křemičité úlety

Synonymem křemičitého úletu, které se používá v praxi je mikrosilika, silika nebo též bílé saze. Je to velmi jemná amorfní minerální příměs (obsahující 90 až 98 % SiO_2), která vzniká jako odpad při výrobě prvkového křemíku nebo slitin obsahující vysoké množství křemíku v obloukových pecích [10; 15].



obrázek č. 9: Pozice hydraulických a pucolánových látek [2]

1 - portlandské cementy, 2 - vysokopecní strusky, 3 - křemičité úlety, 4 - popílký bohaté na CaO , 5 - popílký bohaté na SiO_2 , 6 - pucolánové popílký

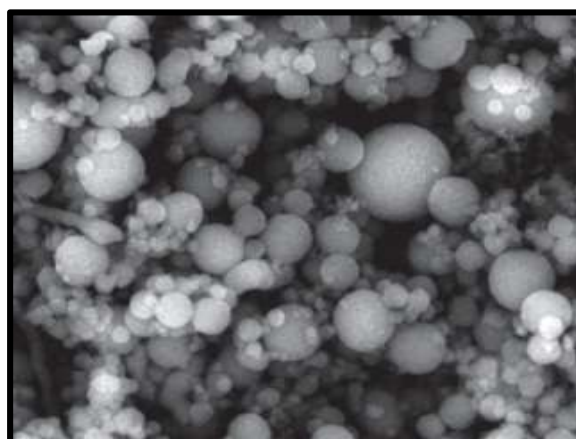
Jejich charakteristickým znakem je extrémně velký měrný povrch, který se pohybuje v rozmezí 15 000–25 000 m²/kg. Jednotlivá zrna jsou kulovitěho tvaru o průměru $1 \cdot 10^{-7}$ až $2 \cdot 10^{-7}$ m [10; 15].

Jak již bylo popsáno výše, vyznačují se vysokou pucolánovou aktivitou a za normálních teplot velmi dobře reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku tzv. C-S-H gelů. Jejich předností také je, že urychluje počátek hydratace, vytváří malé krystalizační zárodky, na nichž se pak lépe mohou vysrážet hydratační produkty z roztoků [4; 10; 15].

V současné době jsou poměrně žádanou surovinou pro výrobu vysokohodnotných a vysokopevnostních betonů, neboť pomáhají při vytváření hutnější struktury cementového tmelu. Jejich použitím dochází ke zmenšení pórů cementové matrice, čímž je struktura betonu homogennější a ten pak méně propouští vodu a je trvanlivější [4; 10].



obrázek č. 10: *Mikrosilika*



obrázek č. 11: *SEM mikrosiliky*
(50 000 × zvětšeno) [10]

2.1.5.2 Létavý popílek

Popílký jsou produktem vznikajícím při fluidním spalování práškového uhlí. Při procesu spalování vzniká struska, která padá na dno kotle a popílek, který je unášen (létá) spalinami a je zachycován v cyklónových odlučovačích. [4; 10].

Jedná se tedy o částice kulovitěho skelného charakteru, jejichž průměr je $5 \cdot 10^{-6}$ až $50 \cdot 10^{-6}$ m [16], měrný povrch se pohybuje v rozmezích 200 až 600 m²/kg [10].

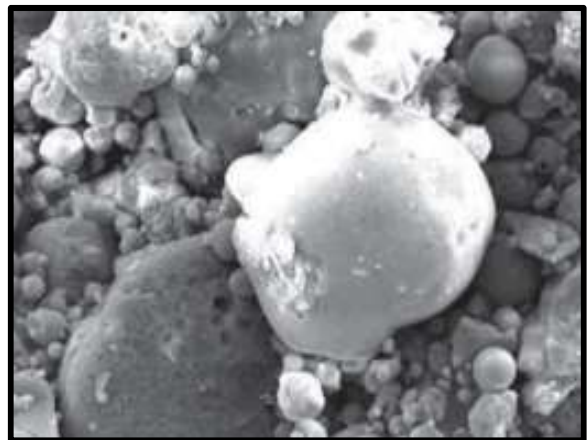
Popílky se dělí na dva typy:

- a) Typ F (křemičitý) - vzniká při spalování kvalitního černého uhlí neboli antracitu, popřípadě velmi kvalitního hnědého uhlí. Obsah CaO je menší než 10 % a obsah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ se pohybuje kolem 70 % [4; 10].
- b) Typ C (vápenatý) - vzniká při spalování lignitu, mladého hnědého uhlí. Obsah CaO je vyšší než 20 % a obsah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ se pohybuje kolem 50 %. Z důvodu vyššího obsahu CaO popílek nepotřebuje aktivátor a je sám nositelem hydraulických vlastností [4; 10].

Přidání popílku místo části cementu má vliv na počáteční vývoj pevností, který je sice menší, ale také se snižuje vývin hydratačního tepla, což může být při výstavbě konstrukcí žádoucí. Nezreagovaný popílek tvoří funkci mikro výplně a vytváří tak hutnější strukturu cementové matrice [10].



obrázek č. 12: *Popílek*



obrázek č. 13: *SEM popílku (2 000 × zvětšeno)* [10]

2.2 Vysokohodnotný beton

V současné rychlé době se kladou vysoké nároky v podstatě na všechno kolem nás a beton rozhodně není výjimkou. Nynější materiálový výzkum v oblasti technologie betonu se zaměřuje na vývoj betonů s vylepšenými fyzikálními a materiálovými charakteristikami, které reflektují specifické podmínky prostředí a využití betonu [5].

Důležitým faktorem dřívějších a hlavně dnešních betonů je rozhodně pevnost. Ovšem v nynějších dobách se také klade důraz na trvanlivost betonu. To znamená, že kromě pevnosti hrají roli také permeabilita⁵ betonu, odolnost proti zvýšeným teplotám, větší odolnost proti agresivnímu prostředí, odolnost proti extrémním zatížením apod. Všechny tyto typy speciálních betonů pak můžeme nazvat jedním souhrnným termínem „vysokohodnotný beton“, tzv. HPC (z anglického „*high-performance concrete*“) [5].

Pierre-Claude Aïtcin dělí vysokohodnotný beton do pěti tříd. Jednotlivé třídy mají mezi sebou přírůstek vždy 25 MPa [6]. Třídy jsou zobrazeny v tabulce č. 5.

tabulka č. 5: *Třídy vysokohodnotného betonu* [6]

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

Mezi vysokohodnotné betony například patří:

- a) Vysokopevnostní beton – HSC (z anglického „*high-strength concrete*“)
- b) Samozhutnitelný beton – SCC (z anglického „*self-compacting concrete*“)
- c) Vlákný vyztužený beton – FRC (z anglického „*fibre-reinforced concrete*“)

⁵ permeabilita – vlastnost popisující pohyb media nebo toku energie (vodotěsnost, nasákavost, tepelná vodivost apod.)

2.2.1 Beton vyztužený vlákny

Více používaným termínem než beton vyztužený vlákny (FRC) je vláknobeton. Jedná se o speciální typ betonu, který mimo klasických složek popsaných v kapitole 2.1 obsahuje navíc ještě vlákna. Přínos vláken je oproti nevyztuženému prostému betonu zejména zmenšení objemových změn (smrštění vysycháním, autogenní vysychání atd.), působení v tahem namáhaných oblastech i po vzniku trhlin, kdy se uplatní tzv. duktilita materiálu [17], zlepšení vlastností jako např. abrazivita⁶ betonu nebo rázová pevnost. Zjednodušeně řečeno vylepšuje všechny nedostatky prostého betonu [1; 18; 19].

První použití vláken, a to ocelových, bylo v sedmdesátých letech dvacátého století. Jednalo se tedy o tzv. drátkobeton. V zahraničí byl postup vývinu FRC mnohem rychlejší a podílely se na něm hlavně firmy vyrábějící vlákna [19].

Podle typu použitých vláken se pak beton v literatuře značí zkratkami:

- SFRC – vláknobeton s ocelovými drátky (z ang. „*steel fibre reinforced concrete*“),
- GFRC – vláknobeton se skelnými vlákny (z ang. „*glass fibre reinforced concrete*“),
- NFRC – vláknobeton s přírodními vlákny, např. kokosové, jutové, konopné atd.,
(z ang. „*natural fibre reinforced concrete*“),
- PFRC – vláknobeton s polypropylenovými vlákny,
(z ang. „*polypropylen fibre reinforced concrete*“),
- CFRC – vláknobeton s uhlíkovými vlákny,
(z ang. „*carbon fibre reinforced concrete*“) [2].

V současnosti je vývoj v oblasti vláknobetonů rychlý a jeho užívání se stále rozšiřuje např. v mostním stavitelství (např. deska mostovky), tunelovém stavitelství (stříkaný vláknobeton pro primární ostění), průmyslové výstavbě a podobně [17].

⁶ abrazivita – ohrusnost

S vývojem ultra-vysokohodnotných betonů, jejichž předností jsou zejména vysoké pevnosti v tlaku, došlo ve spojení s vlákny ke vzniku vynikajícího materiálu, díky kterému lze například snížit rozměry konstrukcí, a tím vynechat nebo snížit množství betonářské výztuže [17]. Tzv. UHPFRC betony, jejich přednost a vlastnosti budou podrobněji popsány v samostatné kapitole 2.3.1.

2.2.1.1 Vlákna pro konstrukční beton

Na počátku rozmachu vláknobetonů byly v ČSSR využívány pro nedostatek jakýchkoliv vláken ručně stříhané drátky na délku 30 mm o průměru 0,63 mm. V osmdesátých letech dvacátého století byly prvním dodavatelem železářny a drátovny Bohumín [19].

Jak již bylo naznačeno, v současnosti je na výběr nejčastěji mezi vlákny ocelovými, skelnými, polymerovými a jinými druhy (uhlíková, hliníková, nerezová, azbestová (dříve) aj.) [18].

2.2.1.1.1 Ocelová vlákna

Ocelové drátky se vyrábějí podle následujících technologických postupů:

- stříháním „nekonečného“ ocelového drátu,
- stříháním ocelového pásku,
- frézováním ocelového bloku,
- odstředováním z taveniny,
- litím [20].

Na výrobu drátku se používají oceli s různými hodnotami pevností. Standardně se pohybují v rozmezí 400 MPa až 1300 MPa. V určitých případech lze využít i drátky z vysokopevnostní oceli, jejíž pevnost dosahuje až 2600 MPa [19].

Podle normy PN ČMB 01-2008 se ocelová vlákna dělí do pěti skupin:

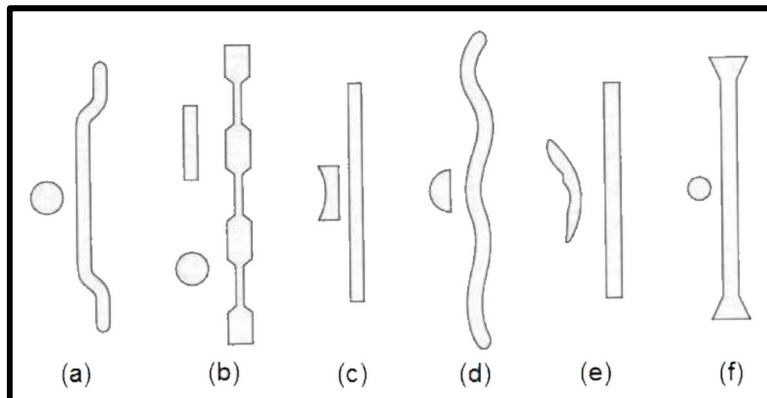
- skupina I. za studena tažený drát,
- skupina II. vlákna stříhaná z plechu,
- skupina III. vlákna oddělovaná z taveniny,
- skupina IV. vlákna protahovaná z drátu taženého za studena,
- skupina V. vlákna frézovaná z ocelových bloků [21].

Ocelová vlákna mají nejčastěji kruhový průřez, ale jsou dostupná i s jinými profily (obdélníkové či čtvercové). Jednotlivé typy ocelových vláken se neliší jen průřezem nebo jeho rozměrem, ale také délkou či tvarem [20]. Různé typy úprav ocelových vláken jsou na obrázku č. 14. Důležitým faktorem, který má vliv na vlastnosti vláknobetonu, je délka a štíhlost ocelových vláken [19].

Krátká vlákna, tzv. mikrovlákna, mírně zvyšují pevnost v tlaku (v řádech jednotek procent) a působí ve fázi rozvoje mikrotrhlin, zatímco delší vlákna vylepšují spíše tahové charakteristiky, duktilitu materiálu a uplatní se ve fázi rozvoje makrotrhlin. Štíhlost vláken ovlivňuje hlavně zpracovatelnost směsi [19].

Jednotlivé přednosti krátkých a dlouhých vláken lze uplatnit v tzv. hybridním vláknobetonu, kde se kombinuje více vláken o různých délkách [19]. Ocelová vlákna se vyrábí s různou koncovou úpravou, která zlepšuje mechanické ukotvení vlákna v betonové matici, a to je příznivě ovlivňuje chování vláknobetonu v místě rozvoje trhliny [19].

Následující obrázek byl poskytnut s laskavým svolením paní prof. Ing. Mileny Pavlíkové, Ph.D.



zleva:

- (a) se zahnutými konci;
- (b) nepravidelné;
- (c) deformované;
- (d) zvlňené;
- (e) leptané;
- (f) pádlovité

obrázek č. 14: Typy úprav ocelových vláken



obrázek č. 15: Příklady ocelových vláken

poznámka: předposlední obrázek ocelových vláken jsou vlákna z vysokopevnostní oceli ($\varnothing 0,15$ mm; délky 13 mm) využitá při betonáži vzorků v experimentální části práce

2.2.1.1.2 Polymerová vlákna

„S rozvojem chemického průmyslu se začala užívat polymerová vlákna (zejména polypropylén, polyester).“ [19]

Hlavními zástupci materiálů, které se využívají k výrobě polymerních vláken, jsou zejména polypropylen, polyethylen, polyester, nylon, polyvinylacelát, polyakryl, aramid a jejich různé směsi [17; 19].

Podobně jako u ocelových vláken dělíme polymerová vlákna na mikrovlákna a makrovlákna [17].

Polymerová vlákna lze pak zařadit do následujících tříd:

- Třída I.a – mikrovlákna s průměrem $<0,3$ mm; jednovlákná (monofilamentická)
- Třída I.b – mikrovlákna s průměrem $<0,3$ mm, vláknitá (fibrilovaná),
- Třída II. – makrovlákna s průměrem $>0,3$ mm [17].

Jedná se o nekorozivní, nemagnetické a chemicky inertní materiály, které mají oproti ocelovým vláknům určité odlišnosti (především mikrovlákna).

Při rovnoměrném rozptýlení jsou mikrovlákna schopna kladně ovlivnit počáteční objemové změny po vybetonování. Zamezují tedy vzniku prvotních mikrotrhlin. Dále zvyšují odolnost betonu proti abrazi, mrazu či povětrnostním jevům. Jejich velký přínos v konstrukci je při požárním zatížení, kdy zabraňují odprýskávání krycích vrstev prutové výztuže, neboť svým vyhořením tvoří cestu vzniklé páře [19].

Beton s mikrovláknem ovšem zůstává stále materiálem s kvazikřehkým poškozením, neboť duktilita a nárůst pevnostních charakteristik jsou zanedbatelné. Ideální je jejich kombinace s ocelovými vlákny [19].

Polymerová konstrukční vlákna, tzv. makrovlákna, zlepšují hlavně duktilitu a chování po vzniku první trhliny. Nedochozí tedy ke křehkému lomu. Pro pevnostní charakteristiky je jejich přítomnost spíše negativní, neboť snižují objemovou hmotnost betonu (objemová hmotnost polymerních vláken je ~ 900 kg/m³) [19].



obrázek č. 16: *Příklady polymerních makrovláken*



obrázek č. 17: Příklady polymerních mikrovláken

2.2.1.1.3 Skleněná vlákna

Sklená vlákna se vyrábějí roztavením a následným zpracováním sklářského kmene. Roztavený kmen gravitačně protéká skrze dno, které je vyrobeno ze slitiny platiny a rhodia. Díky speciálnímu dnu je pak průměr jednotlivých vláken 5-25 μm . Během několika milisekund formování a ochlazování jsou skleněná vlákna potažena speciálním nátěrem, který se obvykle skládá z různých činidel, polymerních filmotvorných látek, lubrikantů a dalších přísad. Je důležité, aby vlákna byla přizpůsobena vyšším nárokům na odolnost v alkalickém prostředí. Vlákna se pak spojí do jednotného pramene a přecházejí do sekundárního zpracování, obvykle navíjení nebo sekání vysokou rychlostí na kratší vlákna. Možností zpracování je i výroba skelných rohoží [2; 22; 23].



obrázek č. 18: Sklená vlákna

zleva: příklad skelného vlákna; SEM skelného vlákna v omítce [46]

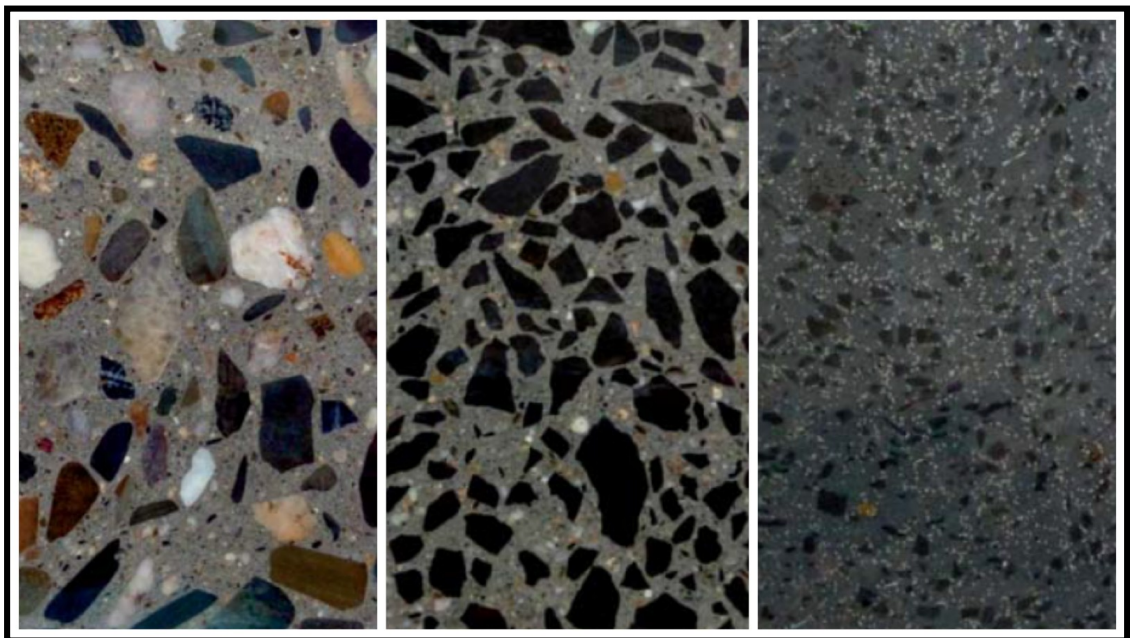
2.3 Ultra-vysokohodnotný beton

Ultra-vysokohodnotný beton, tzv. UHPC (z anglického „*ultra high-performance concrete*“), je vylepšený cementový kompozit, který se vyznačuje zejména vysokou pevností v tlaku přesahující 150 MPa a nadprůměrnou trvanlivostí. Aby bylo možné dosáhnout tak výjimečných materiálových charakteristik, je potřeba upravit složení a používat propracovanější výrobní postupy oproti obyčejnému betonu [24; 25].

UHPC je jemnozrnný cementový kompozit s vysokou dávkou cementu, drobným kamenivem, příměsmi, přísadami, vodou, popř. vlákny, pokud se jedná o ultra vysokohodnotný vlákny vyztužený beton (ten bude popsán v kapitole 2.3.1) [26].

Mezi ultra vysokohodnotné betony například patří [26]:

- a) Ultra-vysokopevnostní beton – UHSC (z anglického „*ultra high strength concrete*“)
- b) Ultra vysokohodnotný vlákny vyztužený beton – UHPFRC (z anglického „*ultra high performance fibre reinforced concrete*“)



obrázek č. 19: *Odlišnost struktur různých betonů [26]*

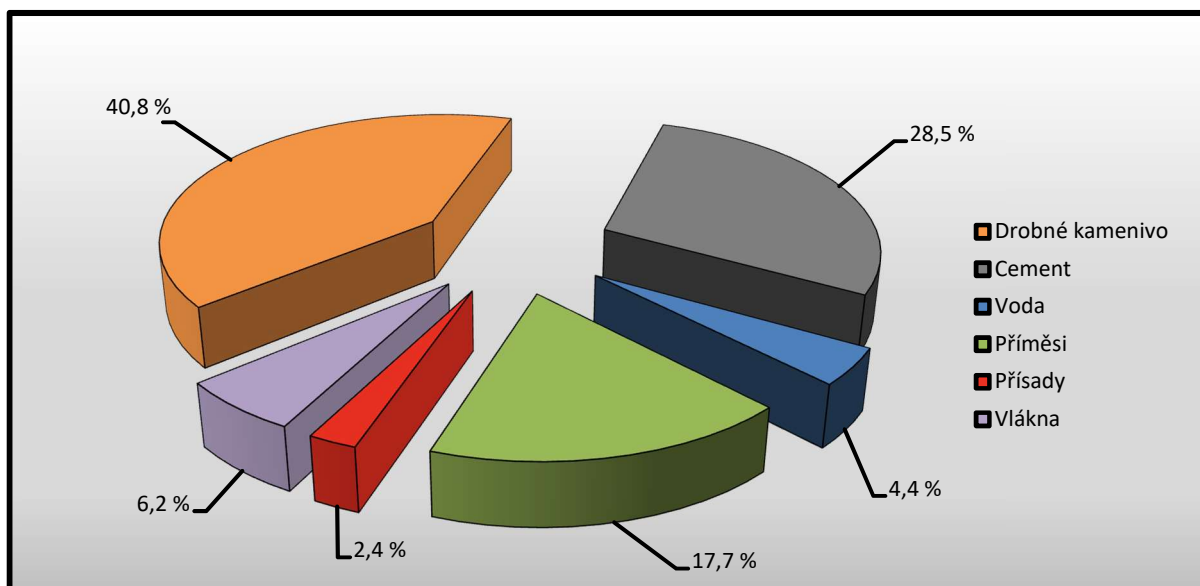
zleva: řez běžným betonem; řez vysokopevnostním betonem; řez UHPC betonem

2.3.1 Ultra-vysokohodnotný vláknobeton

Tento druh cementového kompozitu má oproti výše uvedeným výhodám UHPC betonu navíc ještě výborné vlastnosti v oblasti namáhání tahem, a to díky přidaným vláknům. Tímto vylepšením se absolutně využije potenciál tohoto materiálu. Tahové pevnosti dosahují hodnot až kolem 15 MPa [24], při vzniku trhliny dochází ke zpevnění, materiál má výraznou duktilitu. Všechny tyto vlastnosti umožňují používat materiál v konstrukcích vystavených mimořádným zatížením, jako jsou například rázové děje. [27]

2.3.1.1 Složení ultra vysokohodnotného vláknobetonu

Oproti koláčovému grafu v kapitole 2.1, který se zabývá složením klasického betonu, je v grafu č. 2 vidět určitá změna ve složení.



graf č. 2: Typické složení UHPFRC betonu [28]

Kamenivo se omezuje na menší frakce. Jedná se převážně o kamenivo vysokých pevností s velikostí zrn do 4 mm (případně do 8 mm) [24]. Některé zdroje uvádí, že velikost zrna by neměla přesahovat 1 mm [28]. Ideální tvar zrn kameniva je kulatý, neboť podlouhlá zrna způsobují větší mezerovitost, což není u UHPC betonů žádoucí [24].

Dochází ke skokovému zvýšení množství cementu, které se pohybuje v dávkách 600–800 kg/m³, což je zhruba dvojnásobný nárůst oproti obyčejným betonům [28].

Množství vody se stlačuje na minimum. Hodnota vodního součinitele se pohybuje kolem 0,2 (měl by však být <0,25) [24]. Zpracovatelnost zajišťují přísady a příměsi, které jsou detailněji popsány v kapitolách 2.1.4 a 2.1.5.

Jedná se hlavně o superplastifikátory, regulátory tuhnutí betonové směsi, popřípadě další modifikační přísady. Z příměsí je to pak hlavně mikrosilika, létavý popílek apod. [24]

Jako nová součást složení oproti obyčejnému betonu jsou zde vlákna. Nejčastěji se používají mikrovlákná z vysokopevnostní oceli do délky 20 mm s průřezem 0,1–0,3 mm. Běžně používaná dávka drátků se pohybuje kolem 2–3 %, což může být zhruba v rozmezí 160–240 kg drátků na jeden m³ betonové směsi [24]. Jednotlivé druhy a typy vláken jsou zobrazena v kapitole 2.2.1.1.

Všechny tyto úpravy složení mají tendenci zvyšovat náklady na výrobu UHPFRC betonu [29].

2.3.1.2 Možné využití UHPFRC

Ultra vysokohodnotný vláknobeton má velký potenciál pro významné budovy, dopravní uzly, ochranné nebo obranné konstrukce díky své vynikající zpracovatelnosti, pevnosti v tlaku i tahu, a velké schopnosti absorbovat energii [29; 30]. Mimo těchto vlastností je tento kompozit známý již zmíněným zpevněním materiálu při namáhání tahem [27].

Již zmíněné budovy a konstrukce bývají vystaveny riziku extrémního zatížení, jako je například výbuch nebo přímé ozbrojené útoky. Tento druh zatížení je charakteristický rychlým nárůstem uvolňování energie ve velmi krátké době [30].

Dále se také snižuje riziko odlupování a drolení kompozitu při namáhání rázem, čímž se výrazně odlišuje od klasických betonů [27].

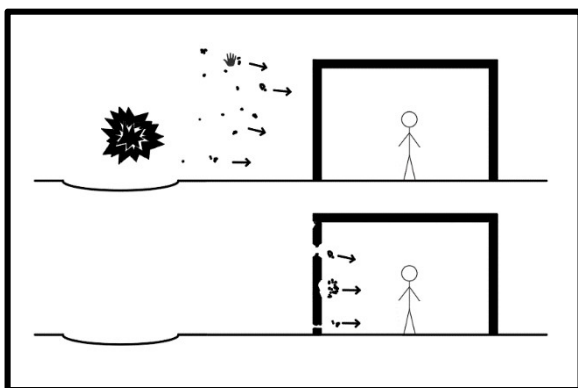
Jednotlivé typy lokálních poškození při nárazu projektilu budou popsány v kapitole 3.1.2 a 3.1.3.

3 Metodika balistických testů

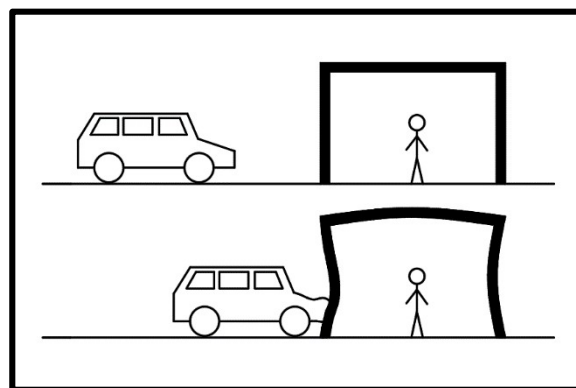
V následující kapitole bude popsán současný stav problematiky. Bude zaveden pojem balistická odolnost a bude popsána odolnost prvků vůči extrémnímu zatížení. V poslední části této kapitoly budou popsány různé experimentální balistické testy se zaměřením na uložení, typ vzorků a měřené veličiny.

3.1 Balistická odolnost

Extrémní zatížení se dostává do povědomí veřejnosti čím dál více. Toto zatížení je např. výbuch či balistický dopad střely při teroristickém útoku, přírodní zemětřesení, náraz automobilu do pilíře mostu, výbuch plynu, náraz letadla do konstrukce a různé další extrémní situace [29; 31]. Schematické zobrazení šrapnelů, tj. projektilů vzniklých při výbuchu, je na obrázku č. 20 a náraz automobilu je pak zobrazen na obrázku č. 21 (oba obrázky jsou poskytnuty s laskavým svolením pana doc. Ing. Radoslava Sovjáka, Ph.D.).



obrázek č. 20: *Projektily vznikající při výbuchu*



obrázek č. 21: *Odezva konstrukce při nárazu automobilu*

Beton je jedním z nejpoužívanějších materiálů v civilním i v obranném inženýrství, a proto je jeho balistická odolnost velké téma. Nejčastěji prováděné zkoušky pro výrobce či uživatele balisticky trvanlivých konstrukcí jsou zkoušky na odolnost proti střelám a střepinám [27]. Velice často se tak posuzuje účinek normované střely v materiálu, kdy se stanovuje rychlost střely, průstřel nebo neprůstřel, hloubka průniku neboli penetrace, popřípadě šíření trhlin [27; 29]. Zvýšená balistická odolnost proti extrémnímu zatížení

tedy obvykle souvisí s horší ekonomickou bilancí. Rovnováha mezi výkonem nárazu střely a pevností / náklady UHPFRC je velká otázka pro inženýrskou aplikaci [29].

3.1.1 Odolnost proti průniku projektilu

Navržené obranné konstrukce musí splňovat rostoucí požadavky na trvanlivost, bezpečnost a zabezpečení, ale zároveň ochranu obyvatelů či uživatelů (tzv. měkkých cílů) těchto budov proti zraněním od balistických útoků nebo výbuchů [27; 31]. Hlavními atributy těchto konstrukcí by měla být schopnost pohlcovat a disipovat⁷ kinetickou energii střely a současně energii výbuchu, který většinou vznikne při maximální penetraci střely na cíl [27].

V současném vývoji zbraní a projektilů, jehož tendence je co nejpřesnější míření na cíl, je snahou vytvářet obranný systém, který sníží hloubku penetrace střely, a tím snáze ochrání uživatele objektu od následného středu detonace projektilu [27].

Jak již bylo řečeno, důležitou vlastností UHPFRC betonů je schopnost absorbovat a následně rozptýlit kinetickou energii vzniklou při dopadu střely a co nejrychleji střelu zastavit, a to díky všudypřítomným vláknům, které výrazně zvyšují houževnatost. Při pronikání střely materiálem nastává jeho rozrušování, poškozování a dochází tak k předávání kinetické energie, jež je odebírána střele [27].

Problémem nevyztužených betonových konstrukcí je jejich charakter porušení. Při vystavení takovéto konstrukce zásahu projektilu nebo výbuchu dochází ke kompletnímu roztržení (tzv. kvazikřehkému porušení) materiálu na několik úlomků. Tento charakter porušení materiálu je způsoben zejména malou pevností v tahu a nízkou schopností odolávat rázovým zatížením. Oproti tomu konstrukce provedená z UHPFRC betonu díky svému duktilnímu chování transformuje kinetickou energii střely na plastickou deformaci materiálu [27; 32].

⁷ disipace – rozptýlení; přeměna např. části celkové energie v jinou energii (teplo)

3.1.1.1 Vliv projektilu

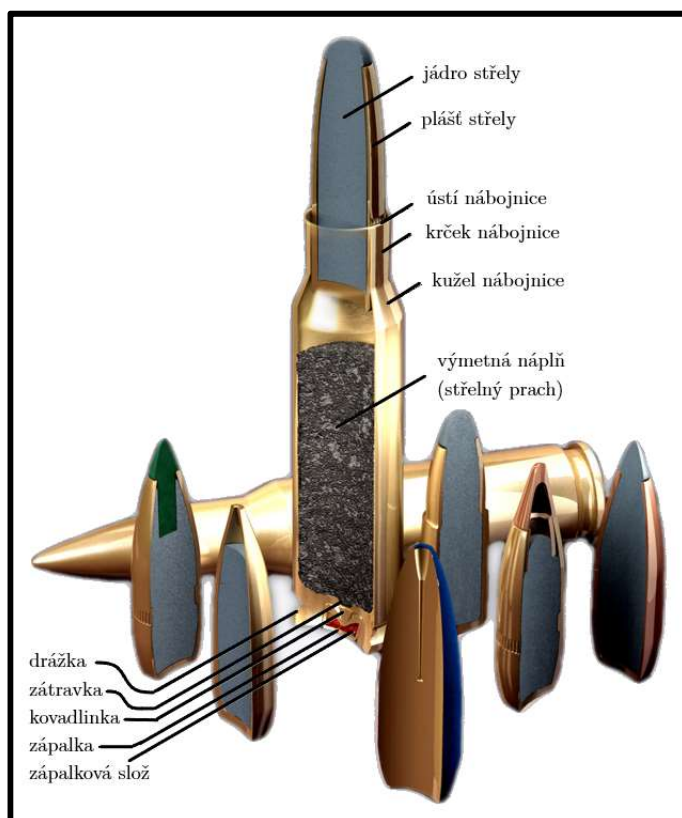
Celkový účinek dopadu střely výrazně ovlivňuje její geometrie, dále pak parametry útoku, a také parametry cíle [27].

Kulový náboj se skládá ze střely, nábojnice, výmetné náplně a zápalky. Střela může být buď vysoustružená jako celek z kovu, celoolověná nebo plášťová, která má olověné jádro. Jádro je schováno pláštěm z měkkého kovu, např. z mosazi či mědi [33].

Nábojnice má obvykle tvar válcovitý, mírně kuželovitý, popřípadě lahvovitý s krčkem. Jejím hlavním účelem je chránit výmetnou náplň neboli střelný prach před vlhkem a také držet celý náboj pohromadě. Hlavní výhodou lahvovité nábojnice je v tom, že umožňuje pojmout více střelného prachu při zachování menší ráže střely [33].

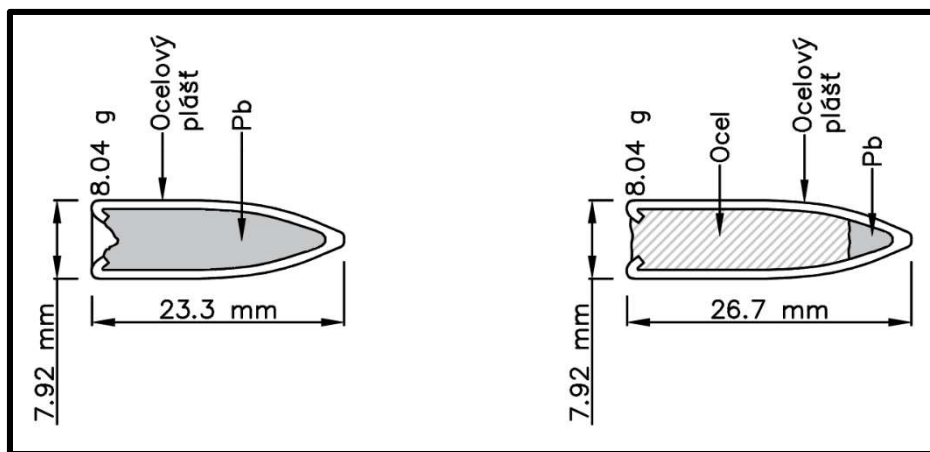
Výmetná náplň slouží k „vymetení“ neboli vystřelení střely ze zbraně. V současnosti se používá zejména bezdýmný prach [33].

Zápalka je buď se středovým zápallem (zápalková slož je ve středu náboje) anebo s okrajovým zápallem (zápalková slož je v okrajích náboje). Pomocí úderníku dojde k zapálení zápalkové slož, která skrze zátravku zapaluje výmetnou náplň [33].



obrázek č. 22: Části náboje 7,62 × 39 mm [33]

Hlavním parametrem střely je její geometrie, tedy rozměr (průměr, délka), tvar nosu. Ovlivňujícím faktorem je také typ střely. Základní dělení náboje 7,62 × 39 mm je na deformovatelné (SLC - z ang. soft-lead core) a nedeformovatelné projektily (MSC - z ang. mild-steel core), které jsou zobrazeny na obrázku č. 23 (obrázek poskytnut s laskavým svolením pana doc. Ing. Radoslava Sovjáka, Ph.D.) [27; 30].



obrázek č. 23: Druhy projektilů

zleva: deformovatelný projektil; nedeformovatelný projektil

Mezi základní tvary nosu projektilu patří:

- plochý,
- tupý,
- sférický,
- špičatý,
- ogivální [34].

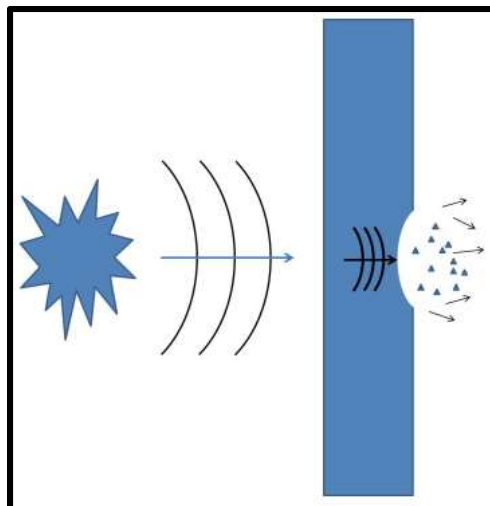
Nejúčinnější jsou projektily se špičatými nosy, zatímco ploché a tuhé se vyznačují spíše nižší účinností [27].

Parametry nárazu střely jsou dány zejména dopadovou rychlostí, úhlem dopadu a také rotací střely [27; 35].

Největší rozsah poškození má střela, pokud narazí na cíl pod úhlem 90°. Při odklonu střely o 10°, 20° a 30° se její účinek může snížit až o 10 %, 20 % a 30 % [27; 35].

3.1.2 Lokální účinky poškození blízkou detonací

Důležitým faktorem je tzv. „scabbing“, který by se dal volně přeložit jako odpadávající materiál ze zadní strany. Někdy je tento jev také označován jako „spalling back face“. Tento jev je potřeba zohlednit při ochraně osob proti odlupujícím se fragmentům betonu, které vzniknou, když na konstrukci působí vnější výbušné síly. Výbuch, který se nachází blízko konstrukce, vyvolává vysokorychlostní tlakovou vlnu, která narazí na přední část konstrukce. Velká část energie se bude šířit konstrukcí a malá část se odrazí, což způsobí prudký nárůst napětí na zadní části konstrukce. Toto napětí pak způsobuje vypuzování betonových částic, které se odlupují a stávají se nebezpečnými [32]. Scabbing je zobrazen na obrázku č. 24.



obrázek č. 24: *Tlaková vlna způsobující fragmentaci materiálu* [32]

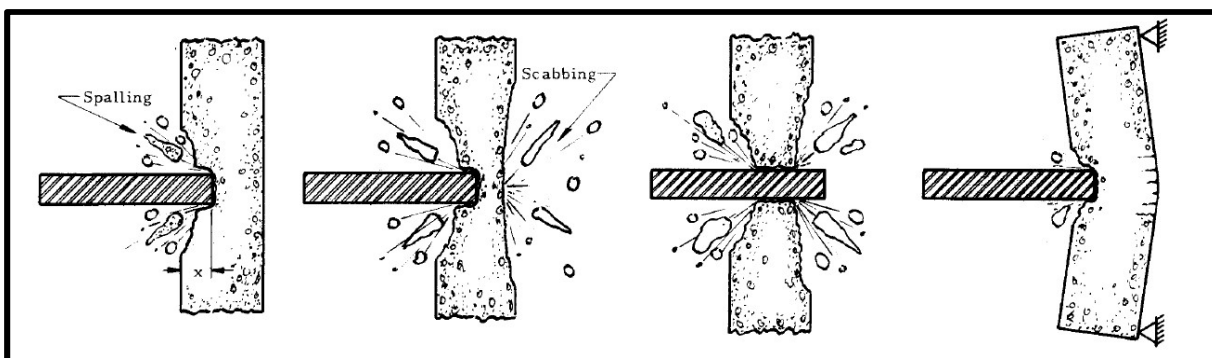
3.1.3 Lokální účinky poškození projektilem

Pro jednotlivé typy poškození při nárazu projektilu na tenké cíle se zavádí specifická terminologie. Nejpriznivější situací je, když projektil narazí do cíle a dojde k vytvoření paprskovitých trhlin v přední, popř. i zadní části, které směřují od centra dopadu ven. V zadní ani přední části nedochází k vylomení žádného materiálu [27; 36].

Při nárazu střely dochází k jejímu pronikání do materiálu, k tzv. penetraci. Penetrace je míra hloubky kráteru vytvořená v nárazové zóně. Pokud dojde k tzv. plné penetraci, nazýváme ji odborným termínem perforace. Střela pak prochází skrze cíl a pokračuje reziduální rychlostí dále [37].

Mezi další známé termíny patří spalling a scabbing. Při spallingu dochází k vytvoření předního kráteru a odražení části hmoty vlivem nárazu projektilu. Scabbing je potom pojem pro odlupování materiálu ze zední strany [36; 37].

V některých případech může dojít k vyražení celého kuželovitého kráteru (tzv. plugging) [36]. Na obrázku č. 25 jsou zobrazeny některé typy poškození.



obrázek č. 25: Typy lokálních poškození [37]

zleva: spalling (hodnota „x“ je hloubka penetrace); scabbing; perforace; celková odezva konstrukce při nárazu projektilu

3.2 Experimentální balistické testy

Autoři Petr Máca a kolektiv [38] ve svém konferenčním článku testují odolnost vysokohodnotného vláknobetonu vůči nárazu projektilu.

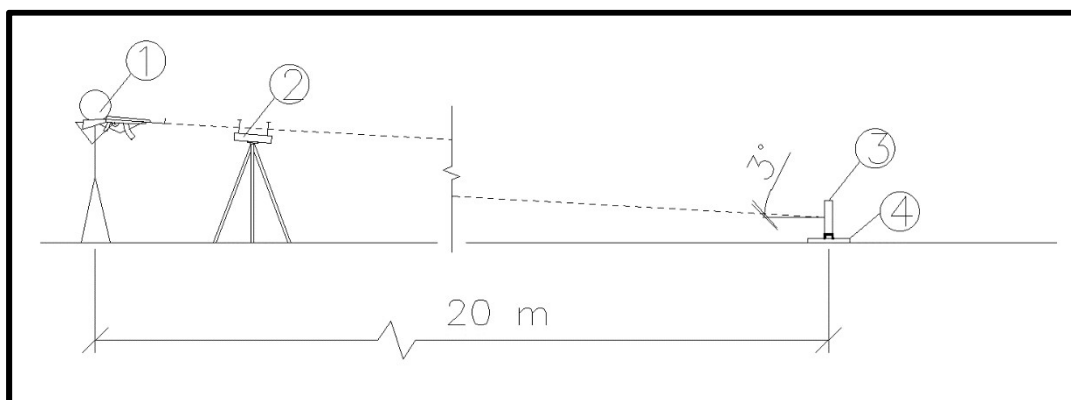
Cílem experimentu bylo porovnat směsi s různým procentuální zastoupením vláken v UHPC betonu. Jedna záměs byla bez přidání vláken (pouze UHPC beton) a dále následovaly směsi s přidáním 1 %, 2 % a 3 % vysokopevnostních vláken z objemu zatvrdlého betonu [38].

Celkem tedy byly čtyři směsi ke zkoušení. Z každé směsi byly vytvořeny sady vzorků. Jedna sada obsahovala vzorky ke zkoušení mechanických vlastností ultra vysokohodnotného betonu. Sadu tvořily tři válce o průměru 100 mm a výšce 200 mm, tři vzorky tvaru dog-bone a tři trámečky $40 \times 40 \times 160$ mm a dva vzorky deskovitého charakteru o rozměrech $300 \times 400 \times 50$ mm k otestování odolnosti vůči projektilu [38].

Testované vzorky byly uchyceny v ocelovém rámu, který byl vytvořen pro účel tohoto experimentu. Zhruba 50 mm od horizontálních okrajů byly na rámu čtyři uchycovací šrouby, které simulovaly bodové podepření zkoušené desky [38].

Měřenými veličinami rozsahu poškození byla hloubka penetrace a rozměr kráteru vzniklého od nárazu [38].

Rozložení zkoušky je zobrazeno na následujícím obrázku č. 26.



obrázek č. 26: Uspořádání střelecké zkoušky [38]

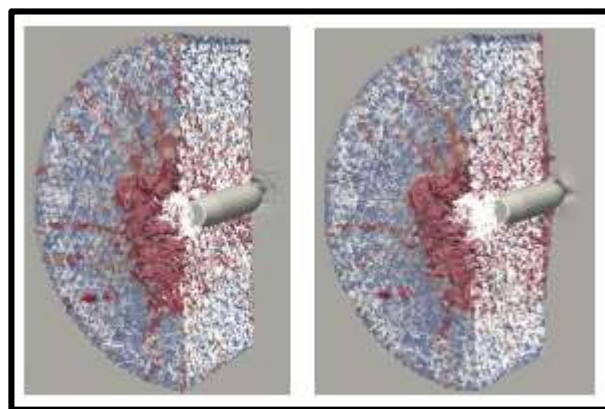
1 - střelec; 2 - chronograf; 3 - zkoušený vzorek; 4 - uchycení desky

Dalším experimentálním testováním UHPFRC betonu vůči pronikání projektilu se zabývali autoři Jun Feng a kolektiv [39].

Cílem jejich zkoumání bylo numericky a experimentálně popsat pronikání střely do dvouvrstvého terče z UHPFRC betonu a pancéřové oceli [39].

Mechanické vlastnosti použité směsi byly zkoušeny na krychlích o rozměrech $150 \times 150 \times 150$ mm. Jednalo se o objemovou hmotnost, Youngův modul pružnosti a pevnost v klaku, která dosahovala hodnot kolem 300 MPa [39].

Vlastní experiment vyhodnocoval poškození a hloubku průniku střely do zadních terčů, které byly podrobeny dvěma typům projektilů. Jednalo se o projektily s ogiválními a kónickými nosy. Cílem byly válcové terče vyhotovené z UHPFRC betonu o průměru 104 mm a tloušťkách kolem 50 mm respektive 100 mm. Druhá část sendvičového terče z pancéřové oceli měla tloušťky 30 mm a 60 mm. Část z ultra vysokohodnotného vláknobetonu byla umístěna před pancéřovou ocel tak, aby se vzájemně dotýkaly. Problémem při pronikání střely občas docházelo k tzv.



obrázek č. 27: Laminovací účinek projektilu [39]

zleva: zkouška s laminováním vzorků;
zkouška se separací vzorků o 10 mm

delaminaci právě v místě rozhraní dvou materiálů, kdy UHPFRC betonové cíle spadly na zem. Práce zkoumala vliv laminace mezi betonovým a ocelovým terčem při nárazu projektilu [39].

Další článek zabývající se danou tematikou, kterému se věnovali autoři H.Wu a kolektiv [40], zkoumali odolnost UHPCC (z anglického „*ultra high performance cementitious composites*“) proti nárazu projektilu.

V tomto poměrně rozsáhlém experimentu bylo hodně neznámých faktorů. Vzorky měly různé tloušťky (od 50 mm do 150 mm), různé procentuální zastoupení vláken, střílelo se rozdílnými rychlostmi (od 510 m/s do 1350 m/s) a dvěma typy nábojů. Cílem bylo popsat hloubku průniku střely, velikost vzniklého kráteru, poškození materiálu. Zkoumány byly také deformace a abrazivita projektilů [40].



Pro potřeby zkoušek se vyrobilo třicet dva kusů vzorků. Vzorky byly vyráběny do ocelové formy válcového charakteru, která měla tloušťku 3 mm a průměr 750 mm [40].

Válcový vzorek byl umístěn na dřevěný podkladek, aby se zabránilo přetočení cíle, neboť experimentální program byl nastaven tak, že střela dopadá na cíl pod úhlem 90° [40].

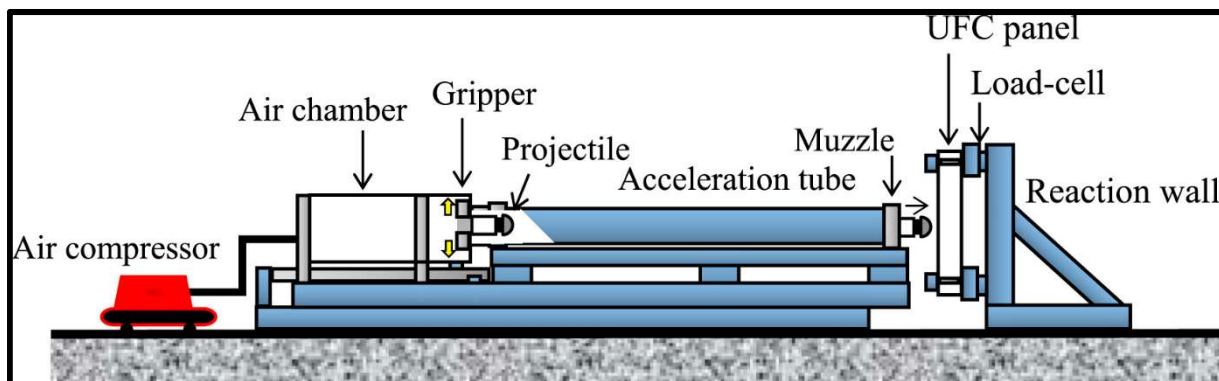
Autoři M. Beppu a kolektiv [41] ve své studii zkoumají poruchové charakteristiky z panelů, který jsou vyrobeny z ultra vysokohodnotného vyztuženého vlákný betonu (UHPFRC) vystavených nárazu ocelové střely [41].

Za účelem zkoumání nárazové odolnosti panelů UHPFRC byly provedeny nárazové zkoušky panelů UHPFRC o tloušťce 60 mm, 90 mm a 120 mm s použitím projektilu 8,3 kg při rychlosti přibližně 42 m/s [41].



obrázek č. 29: Projektil [41]

Na následujícím obrázku č. 30 je schematické znázornění a přehled odpalovacího zařízení střely. Stroj se skládá ze vzduchového kompresoru, vzduchové komory, zrychlovací trubice a laserového snímače rychlosti. Vzorek je umístěn v horizontálním kovovém rámu [41].



obrázek č. 30: Schéma zkušebního stroje se zkoušeným vzorkem [41]

Mezi vyhodnocované údaje patří průběh střely po srážce, rozměr lokálního selhání vzorků (tj. hloubka průniku a průměry spallingu / scabbingu), reakční síla a také odezva napětí na zadní straně vzorku příslušného vzorku [41].

Pro zkoumání nárazové odezvy vzorků se od středu příslušného UHPFRC panelu nastavilo pět 30 mm tenzometrů, které byly v intervalech po 100 mm [41].

Při experimentu byla využita vysokorychlostní kamera, jejíž snímková frekvence odpovídá 50 000 snímkům/s [41].

Celkem bylo vyrobeno a odzkoušeno 11 UHPFRC panelů (4 panely tloušťky 60 mm; 4 panely tloušťky 90 mm; 3 panely tloušťky 120 mm) [41].

4 Experimentální část

Následující část práce je zaměřena na návrh experimentu a jeho realizaci. Bude zde vysvětlena výroba bednění na vzorky a jejich následné zhotovení. V jedné kapitole bude popsáno zkoušení a vyhodnocení mechanických vlastností doprovodných těles.

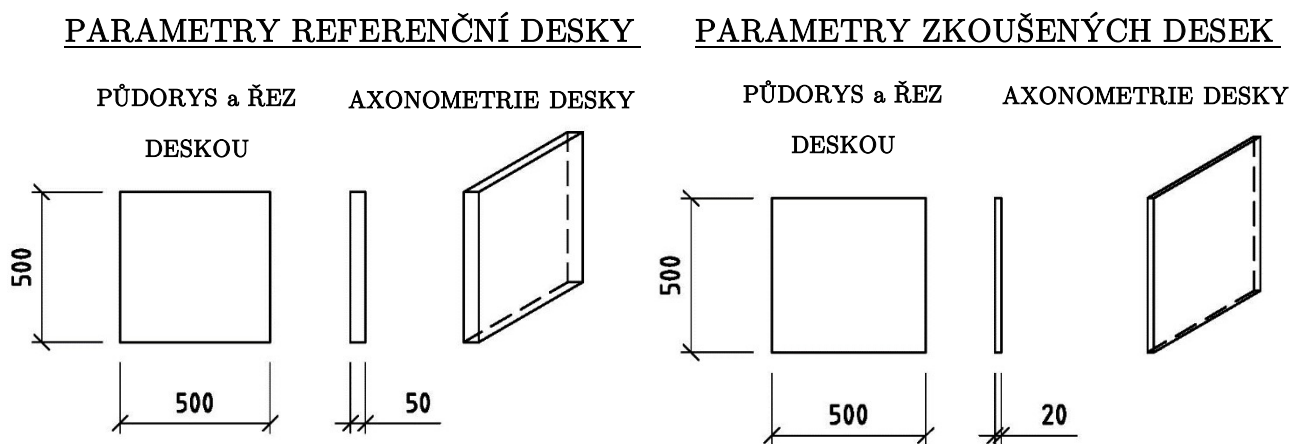
V nejdůležitější pasáži experimentální části práce bude podrobně popsán samotný experiment, ve kterém budou vyrobené desky podrobeny extrémnímu zatížení v podobě průniku projektilu.

Získané výsledky budou na závěr vyhodnoceny a interpretovány. Následně experiment vyhodnotím a interpretuji zjištěné výsledky.

4.1 Návrh experimentu

Jak již bylo popsáno v úvodu práce, cílem experimentu je ověřit myšlenku, zda by bylo možné uspořít materiál snížením celkové tloušťky desky a s tím zmenšit množství souvisejících financí na úkor prostoru. K tomu byl navržen experimentální program, k němuž bylo potřeba vyrobit dvanáct desek 500×500 mm tloušťky 20 mm. Experiment zahrnuje zkoušení vlivu vrstvení desek po 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm a 300 mm. Desky byly podrobeny zásahům dvou typů nábojů.

Výsledky jednotlivých měření budou porovnány s referenční, tzv. srovnávací deskou, která měla shodné rozměry vyjímaje tloušťku, jež byla 50 mm.

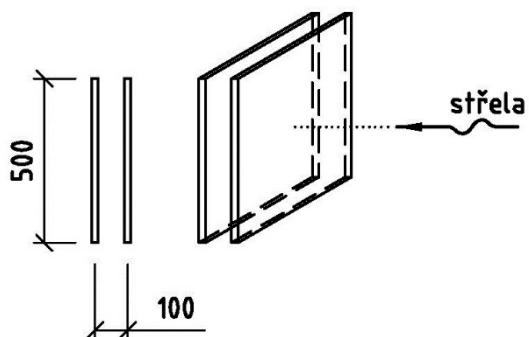


obrázek č. 31: Parametry desek

4.1.1 Schematické znázornění návrhů experimentů

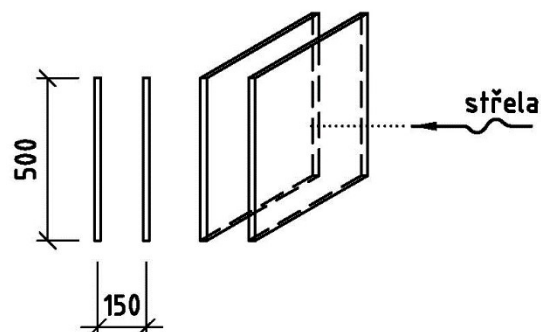
I. VARIANTA VRSTVENÍ

PŮDORYS AXONOMETRIE



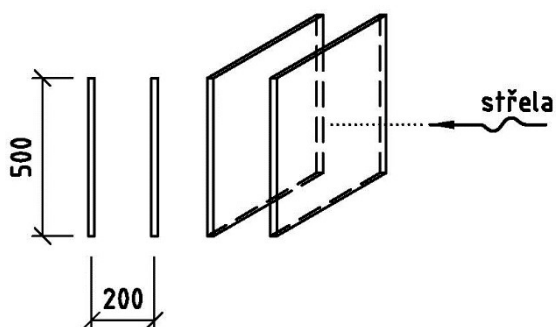
II. VARIANTA VRSTVENÍ

PŮDORYS AXONOMETRIE



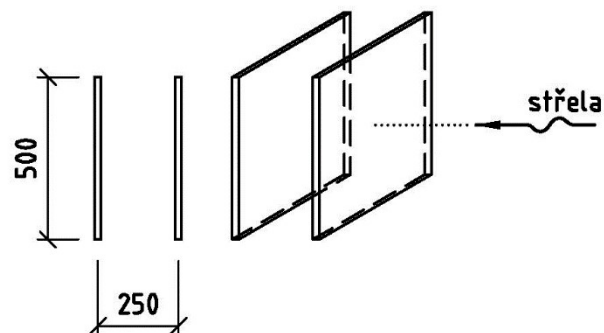
III. VARIANTA VRSTVENÍ

PŮDORYS AXONOMETRIE



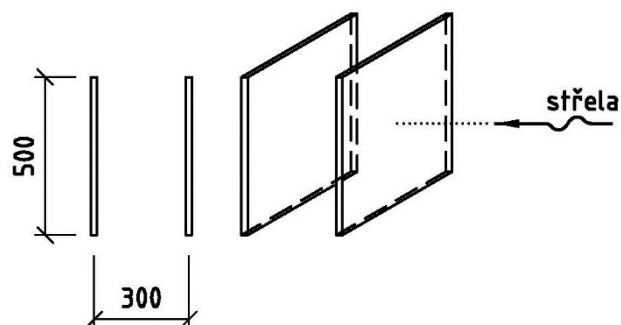
IV. VARIANTA VRSTVENÍ

PŮDORYS AXONOMETRIE



V. VARIANTA VRSTVENÍ

PŮDORYS AXONOMETRIE



4.2 Bednění na vzorky

Před výrobou jednotlivých desek bylo vyrobeno nutné bednění, a to zejména z důvodu atypičnosti tloušťek desek a jejich rozměrů. Bednění bylo vyrobeno z laminátové dřevotřískové desky tloušťky 25 mm povrchově upravené impregnovaným dekorativním papírem. Rám byl zhotoven z ohoblovaných smrkových latí o příčném profilu 25×20 mm. Sešroubované bednění je na obrázku č. 32 a také na obrázku č. 33. Pro betonování doprovodných těles byla použita ocelová trojforma pro betonování trámečků $40 \times 40 \times 160$ mm.

obrázek č. 32: *Připravené bednění*obrázek č. 33: *Detail rohu bednění*

4.3 Výroba vzorků

Pro provedení experimentu bylo nutné vyrobít celkem dvanáct desek o rozměrech 500×500 mm a tloušťky 20 mm. Součástí výroby bylo také vytvoření doprovodných těles, tj. trámečků o rozměru $40 \times 40 \times 160$ mm. Jedna výrobní sada tedy představovala dvě betonové desky a jednu ocelovou trojformu, tedy tři kusy trámečků.

4.3.1 Složení suché směsi

Na výrobu UHPFRC vzorků byla použita suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu. Informace a složení směsi je převzato z patentového spisu číslo 306 663 od původců doc. Ing. Karla Koláře, CSc., Ing. arch. Zdeňky Bažantové, CSc. a prof. Ing. Petra Konvalinky, CSc. Hmotnostní podíl složení prefabrikované směsi je uveden v tabulce č. 6 [42].

tabulka č. 6: Složení suché prefabrikované směsi silikátového kompozitu [42]

Množství	Název složky
1,000	hmotnostní díl pojivové složky
0,100	hmotnostního dílu aktivní formy SiO ₂ , tzv. mikrosiliky
0,250	hmotnostního dílu křemičité moučky se střední velikostí zrna d ₅₀ okolo 6 μm
1,600	hmotnostního dílu čistého křemičitého písku plynulé granulometrie 0,1 až 1,2 mm střední velikosti zrna d ₅₀ okolo 500 μm
0,010	hmotnostního dílu plastifikační přísady
0,001	hmotnostního dílu odpěňovací přísady

Jelikož byly vzorky navrženy z ultra-vysokopevnostního vlákny vyztuženého betonu, byla směs ještě doplněna o ocelová mikro vlákna. Detailnější pojednání o jednotlivých typech vláken je v kapitole 2.2.1.1.

„Přídavkem vláken dochází k významnému zvýšení ohybových pevností zatvrdělého kompozitu a k výraznému zvýšení odolnosti vůči rázovému namáhání, nebo výraznému zvýšení efektivní lomové energie v závislosti na použitém obsahu ocelových vláken, jak vyplývá z následujícího přehledu.“ [42]

tabulka č. 7: Lomová energie [42]

Obsah vláken [%]	Efektivní lomová energie [J/m ²]
0	80
0,5	3 000
1,0	11 000
2,0	17 000
3,0	22 000

4.3.2 Rozpis betonáže

Zprvu byl určen rozpis betonáže. Bylo přihlédnuto k vytíženosti laboratoře, a tak se betonování rozdělilo do jednotlivých sad, z nichž každá obsahovala výrobu 2 hlavních těles, tedy desek tloušťky 20 mm, a 3 doprovodných těles. Data jednotlivých betonáží jsou zapsána v tabulce č. 8.

tabulka č. 8: *Rozpis betonování zkušebních*

Datum výroby	Hlavní tělesa	Doprovodná tělesa
04. 12. 2019	2 kusy desek 500 × 500 mm tloušťky 20 mm	3 kusy trámečků 40 × 40 × 160 mm
09. 12. 2019		
13. 12. 2019		
16. 12. 2019		
18. 12. 2019		
15. 01. 2020		

4.3.3 Použité přístroje a pomůcky

K vyhodnocení mechanických vlastností doprovodných těles (detailněji popsáno v kapitole 4.4) byl použit lis s příslušným přípravkem na tříbodový ohyb, resp. přípravkem na zkoušku pevnosti v tlaku vzorků. Přístroj je zobrazen na obrázku č. 34.

Při výrobě betonové směsi je třeba využívat ochranné pomůcky, jako jsou rukavice, ochranné brýle nebo respirátor. Je snahou zamezit poranění při manipulaci s ocelovými vlákny a také kontaktu očí, kůže a dýchacích cest s jemnými částicemi pojiva. Cement totiž při kontaktu s vodou nebo vlhkostí vytváří silně zásaditý roztok, který vyvolává podráždění již zmíněných částí těla.

Následně je potřeba dostatečně připravit bednění jeho vymazáním. K tomu byl využit rozprašovač s odbedňovacím olejem a štětce. K míchání čerstvé směsi byla

použita nízkootáčková míchačka (obrázek č. 35 a obrázek č. 36), směs byla následně hutněna na vibračních stolicích s magnetickým uchycením (obrázek č. 37).



obrázek č. 34: *Zkušební lis*



obrázek č. 35: *Nízkootáčková vertikální míchačka*



obrázek č. 36: *Míchací lopatka a nádoba*



obrázek č. 37: *Vibrační stolice*

4.3.4 Vlastní výroba vzorků

Před vlastním betonováním bylo nejprve třeba navázat potřebné suroviny pro výrobu čerstvé směsi, tedy suchou silikátovou směs, vodu i příslušné množství mikrodrátků (o průměru 0,15 mm a délce 13 mm) a připravit pomůcky pro betonáž. Složení směsi na výrobu jedné sady, tedy dvou desek a tří doprovodných těles je uvedeno v tabulce č. 9.

tabulka č. 9: Složení směsi na výrobu dvou desek a tří doprovodných těles [42]

Složka směsi		Množství [g]	Celkové množství [kg]
Suchá prefabrikovaná směs pytlovaná	cement 42,5 R	8 443,1	25,000
	aktivní formy SiO ₂ , tzv. mikrosilika	844,3	
	křemičitá moučka se střední velikostí zrna d ₅₀ okolo 6 μm	2110,8	
	čistý křemičitý písek plynulé granulometrie 0,1 až 1,2 mm střední velikosti zrna d ₅₀ okolo 500 μm	13 509,0	
	plastifikační přísada	84,4	
	odpěňovací přísada	8,4	
Voda		2 533,0	2,533
Ocelové drátky (ø 0,15 mm; délky 13 mm)		1 421,0	1,421

Z přiloženého složení lze podle uvedeného vzorce (4) spočítat vodní součinitel směsi, který vychází na hodnotu 0,3, pokud bereme v úvahu pouze podíl množství vody ku množství pojiva, v našem případě tedy cementu 42,5 R. Správnější by však bylo k množství pojiva přičíst i množství jemných podílů, které se taktéž podílí na hydrataci cementového tmelu, tedy vypočítat dle vzorce (5). Toto téma je detailněji popsáno v kapitole 2.1.3.1.

Do míchací nádoby byla nasypána požadovaná hmotnost suché prefabrikované směsi a vlastní míchání bylo prováděno po několika cyklech. Jako první se promíchala suchá směs, která se míchala dvě minuty. Poté se po částech začala přilévat záměsová voda a to tak, že nejprve zhruba polovina jejího objemu. Směs začala postupně hrudkovatět a v přilévání se pokračovalo až do spotřebování veškerého objemu vody. V tomto cyklu se míchalo pět až sedm minut. Směs je v této fázi z hlediska konzistence velmi tekutá, a to díky plastifikační přísadě.

V posledním cyklu, kdy je směs dostatečně promíchána, se přejde k přidání poslední složky, a to ocelových vláken. Ta se vsypávají postupně po částech tak, aby došlo k jejich správnému rozmíchání a předešlo se vytvoření tzv. ježků⁸. Vlivem přimíchávání vláken dojde k zahuštění směsi. V závěru se směs nechala míchat ještě pět minut.

Po uplynulém času, tedy po kvalitním promíchání a homogenizaci směsi, se přistoupilo k plnění bednění. Pomocí zednické lžice se postupně začaly plnit formy na desky nejprve od rohů, kterým bylo potřeba věnovat větší pozornost. Součástí betonování byla i výroba tří doprovodných těles o rozměru 40 × 40 × 160 mm.

Po naplnění se vzorky zhutnily na vibrační stoličce, aby došlo k uvolnění vzduchových bublin ve směsi a ta se stala hutnější a více homogenní. Aby nedošlo k nadměrnému odpařování vody při hydrataci a tunutí betonu, a tím ke snížení pevnosti výsledného prvku, tak se vzorky přikryly strečovou fólií.



obrázek č. 38: Vybetonované desky



obrázek č. 39: Detail rohu a rovinatosti desky

⁸ „ježek“ - shluk vláken v betonu vzniklý v důsledku špatného dávkování a rozmíchání vláken

4.4 Zkoušení mechanických vlastností doprovodných těles

Vyrobená doprovodná tělesa byla nejprve změřena a zvážena pro určení objemové hmotnosti vysokohodnotného betonu. Následně byla jednotlivě podrobena tříbodové ohybové zkoušce pro určení pevnosti v tahu ohybem a v závěru byly jednotlivé půlky těles vyzkoušeny na pevnost v tlaku.

4.4.1 Stanovení objemové hmotnosti

Jednotlivé vzorky bylo nejprve potřeba změřit pomocí posuvného měřítka, a to vždy u krajů měřeného rozměru a uprostřed. Všechny rozměry byly tedy měřeny třikrát. Následně byly vzorky zváženy na digitální váze s přesností na setinu gramu.

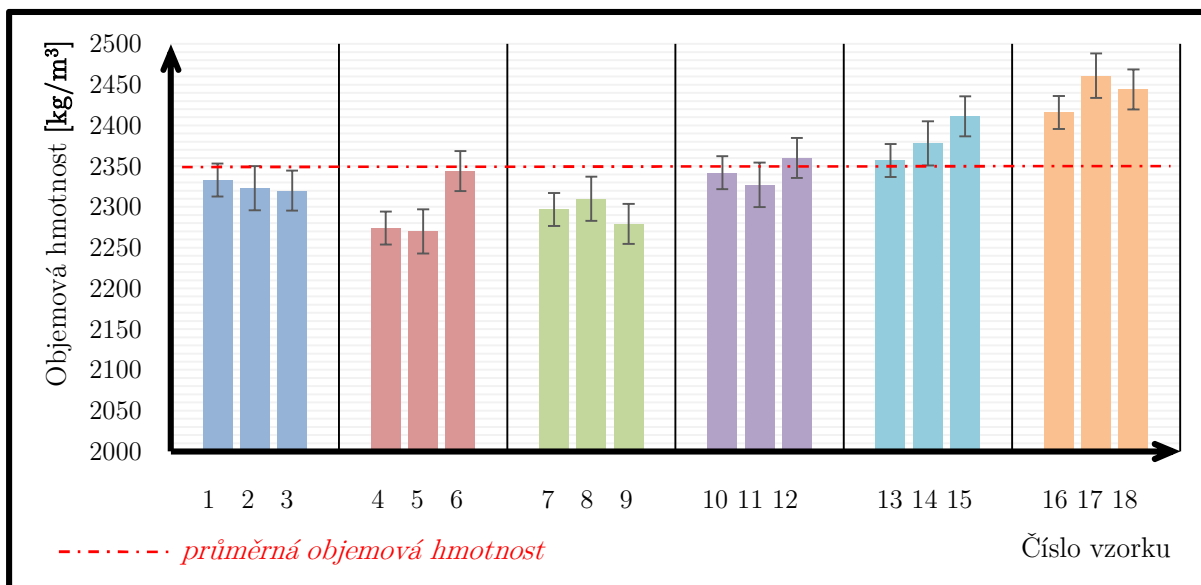
Objemová hmotnost ρ_v materiálu byla stanovena ze vzorce

$$\rho_v = \frac{m}{V}, \quad (6)$$

kde m je hmotnost materiálu [kg]

V je objem prvku [m³]

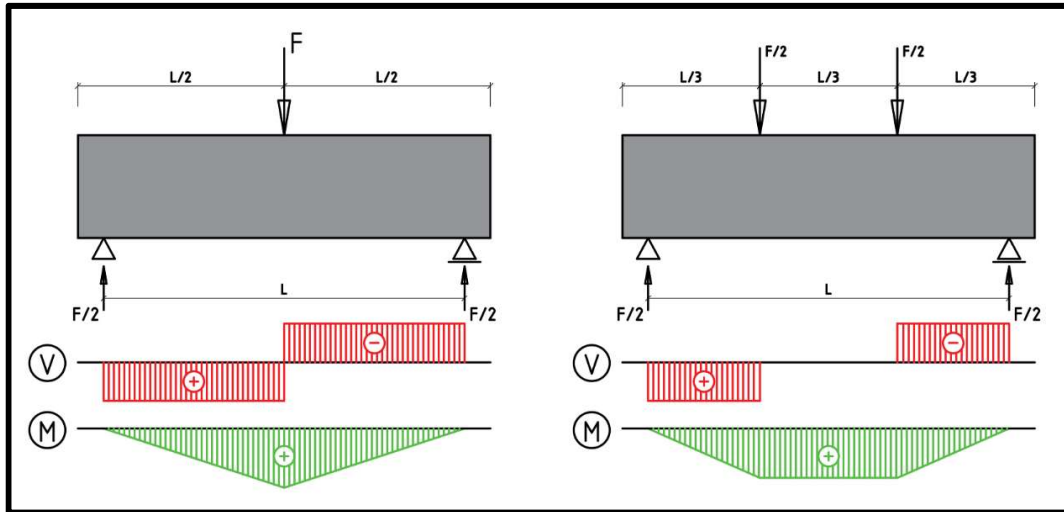
graf č. 3: Výsledné hodnoty objemových hmotností



Veškeré rozměry, hmotnosti a výsledky objemové hmotnosti vysokohodnotného betonu jsou zapsány v kapitole 7.1.1 v tabulce č. 16.

4.4.2 Stanovení pevnosti v tahu ohybem

Zkouškou se zjišťuje charakteristická hodnota pevnosti v tahu betonu. Lze ji provádět buď jako třibodovou s jedním břemenem uprostřed, nebo jako čtyřbodovou se dvěma břemeny ve třetinách rozpětí prvku. Obě zkoušky i s průběhem posouvající síly a ohybového momentu jsou vyobrazeny na obrázku č. 40.



obrázek č. 40: Zkouška pevnosti v tahu ohybem

zleva: zkouška třibodovým ohybem; zkouška čtyřbodovým ohybem

V třibodové zkoušce předem lokalizujeme místo porušení vzorku, tedy v místě největšího ohybového momentu v polovině rozpětí. V druhém případě zkoušení dojde k porušení v nejslabším průřezu v místě konstantního ohybového momentu (zanedbáme-li vlastní tíhu prvku) [14].

S ohledem na velikost vzorků byla zvolena třibodová zkouška pevnosti v tahu ohybem.

Pevnost betonu v tahu ohybem $f_{ct,f,3,B}$ byla stanovena ze vzorce

$$f_{ct,f,3,B} = \frac{M}{W} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (7)$$

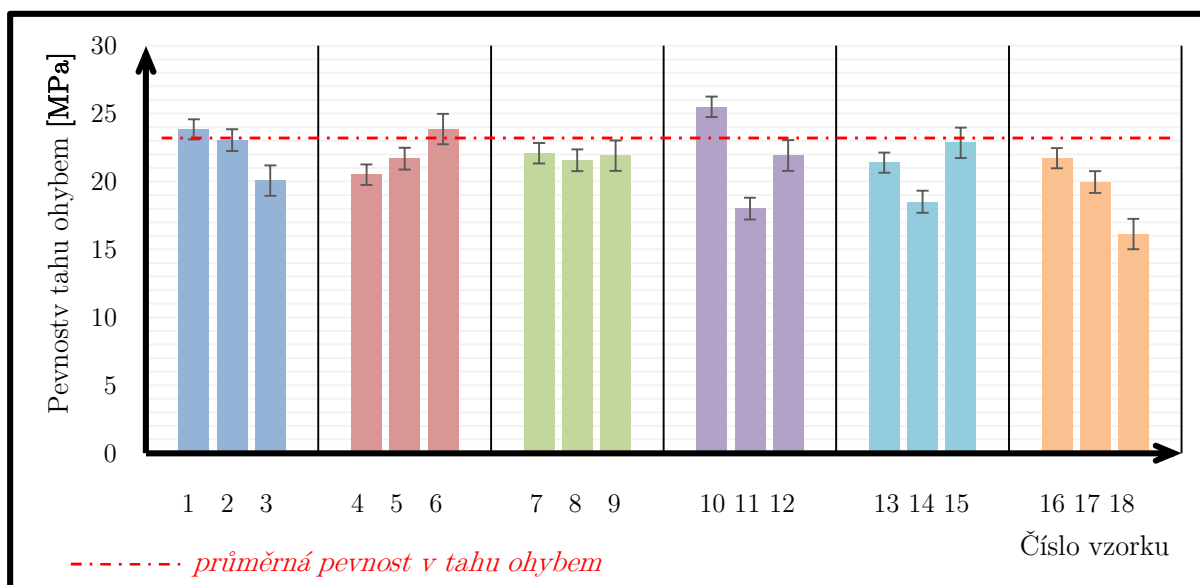
kde F je maximální zatěžovací síla [N]

L je vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

b je šířka příčného průřezu trámečku [mm]

h je výška příčného průřezu trámečku [mm]

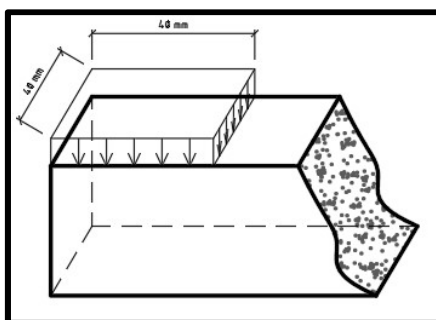
graf č. 4: Výsledné hodnoty pevnosti v tahu ohybem



Veškeré rozměry a výsledky pevností v tahu ohybem vysokohodnotného betonu jsou zapsány v kapitole 7.1.1 v tabulce č. 17.

4.4.3 Stanovení pevnosti v tlaku

Po provedení zkoušky trámečku na pevnost v tahu ohybem se přistoupilo ke zkoušení pevnosti v tlaku vždy na dvou zlomcích každého trámečku (obrázek č. 41). Zatěžovací plocha byla dána s ohledem na vzorek a zvolený přípravek v souladu s normou, měla tedy rozměr 40×40 mm.



obrázek č. 41: Zlomek trámečku

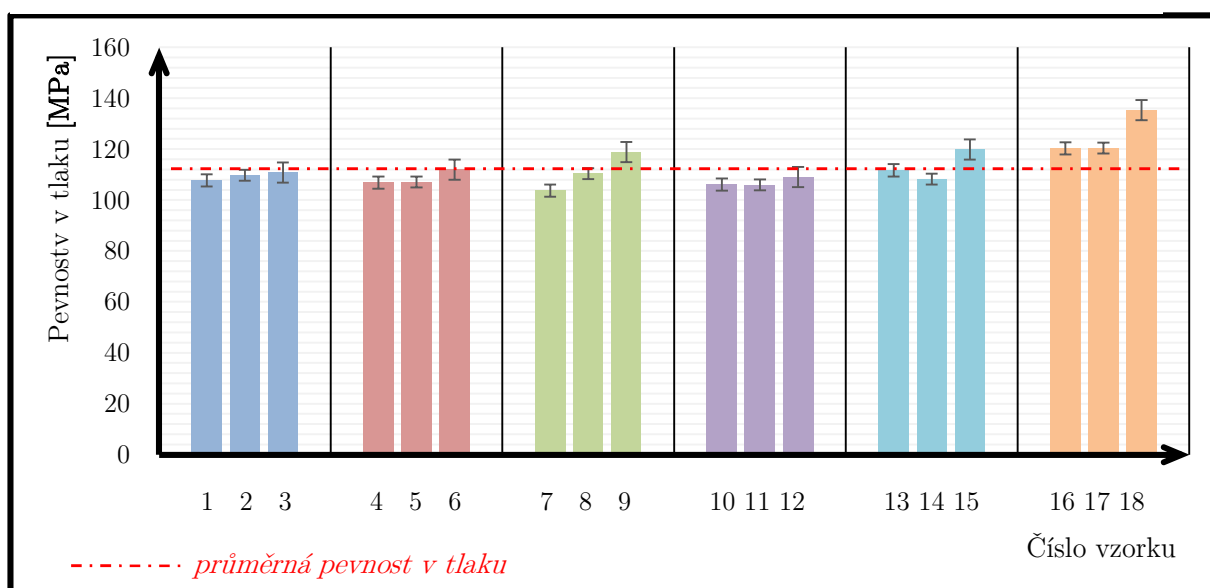
Pevnost betonu v tlaku f_c byla stanovena ze vzorce

$$f_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{1600} \quad (8)$$

kde F je maximální zatěžovací síla [N]

A je zatěžovací plocha (40×40 mm) [mm^2]

graf č. 5: Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku



Veškeré rozměry a výsledky pevností v tlaku vysokohodnotného betonu jsou zapsány v kapitole 7.1.1 v tabulce č. 18.

4.5 Balistický experiment

V této kapitole bude detailně popsán prováděný balistický experiment. Úvodní podkapitolou bude popis a výrobní výkres k vyhotovení speciálního držáku pro vrstvení desek. V následujících podkapitolách bude popsáno místo zkoušení a použité nástroje, tedy zbraň, náboje apod. V poslední podkapitole budou popsány jednotlivé balistické experimenty.

4.5.1 Držák pro vrstvení desek

Pro provedení experimentu, tedy podrobení vrstvených desek zásahu projektilu, bylo nutné navrhnout a vyrobit speciální držák, který zajistí správnou a požadovanou polohu desek při nárazu projektilu.

Zásadním požadavkem na volbu materiálu byla jeho odolnost vůči silám a kinetické energii, které se ve zkoušených deskách kvůli nárazu projektilu objevují. Konstrukce držáku tak byla navržena z oceli. Díky jejím vlastnostem bylo navíc možné držák vyrobit mnohem snáze, než kdyby byl z jiných materiálů, např. dřevěných. Pro zadání výroby byly vyhotoveny výkresy držáku, na kterých je rozkreslen půdorys, boční

pohled na konstrukci a její axonometrie. Součástí je i soupis materiálu. Tyto výkresy jsou přiloženy v kapitole 7.1.2 jako jedna z příloh.

Základna konstrukce se skládá ze dvou tzv. jeklů o rozměrech $60 \times 40 \times 2$ mm, na které je navařeno čtrnáct jeklů typu „U“ o rozměrech $35 \times 35 \times 35 \times 2$ mm. Konstrukce je rozebíratelná na dva díly, které jsou vzájemně propojeny ocelovou spojkou z „L“ úhelníku o rozměrech $30 \times 30 \times 3$ mm, jež ji připojují šrouby M8 k základně. Celá konstrukce je ztužena podélnou pásovinou a vzpěrou.



obrázek č. 42: Držák na zkoušené vzorky



obrázek č. 43: Boční pohled na držák

4.5.2 Popis místa a průběh zkoušení

Experiment probíhal dne 23. 04. 2020 na střelnici Placy, která má střelecký areál v obci Višňová u Příbrami.

4.5.2.1 Areál střelnice

Celý areál střelnice se dělí na čtyři střeliště označené písmeny A až D. Střeliště A je určeno pro opakovací kulovnice a umožňuje střelbu až na 500 m. Další střeliště B umožňující střelbu na vzdálenost 50 m je pro pistole a malorážky. Poslední dvě střeliště C (pro střelbu na 100 m) a D (pro střelbu na 50 m) se používají zejména pro nastřelování zbraní, popřípadě zkoušení dynamické střelby.

Experiment probíhal na posledním krátkém střelišti D. Celé střeliště je do tvaru písmene „U“, které je tvořeno záchytnými valy (viz obrázek č. 44 a obrázek č. 45).



obrázek č. 44: *Střeliště D*



obrázek č. 45: *Zastřešení střeleckého stanoviště*

4.5.2.2 Použitá zbraň, náboje a nástroje

K balistickým testům byla využita samonabíjecí puška CZ 858 a k dispozici byly jak deformovatelné (SLC), tak nedeformovatelné (MSC) náboje ráže 7,62 × 39 mm. Pro měření ústových rychlostí se využila optická hradla.



obrázek č. 46: *Použité nástroje a náboje*

zleva: používaná zbraň a střelecká sluchátka; optické hradlo; deformovatelný typ náboje ráže 7,62 × 39 mm; nedeformovatelný typ náboje ráže 7,62 × 39 mm

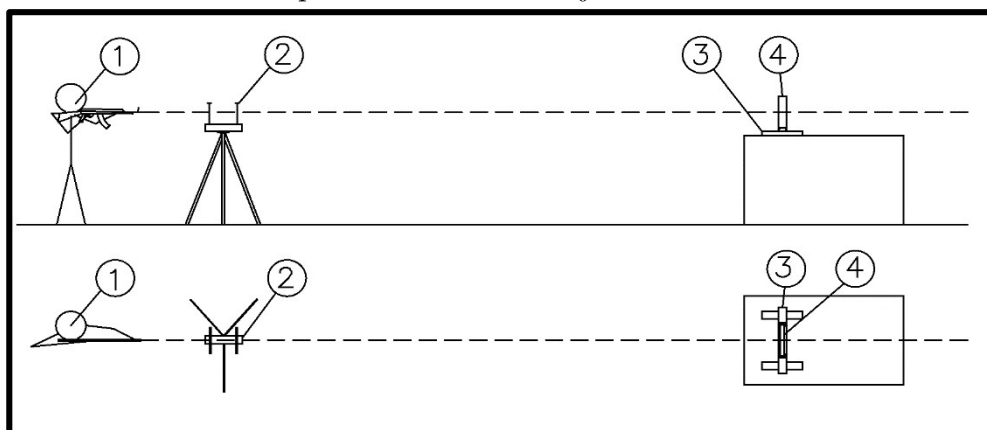
4.5.2.3 Schematické zobrazení balistického testu

Oba typy zkoušek, tedy odolnost samotné referenční desky a zkouška odolnosti vrstvených desek, probíhaly tak, aby byly desky zasaženy pod úhlem 90° a došlo tak k největšímu poškozujícímu potenciálu projektilu.

Jak již bylo zmíněno, střelba probíhala pomocí samonabíjecí pušky CZ 858. Dva metry od ústí hlavně pušky se umístilo optické hradlo, které snímalo ústovou rychlost projektilu na začátku jeho trajektorie. Střelec byl od cíle vzdálen 20 metrů.

Jako první se zkoušely referenční desky, respektive srovnávací o rozměrech 500×500 mm s tloušťkou 50 mm.

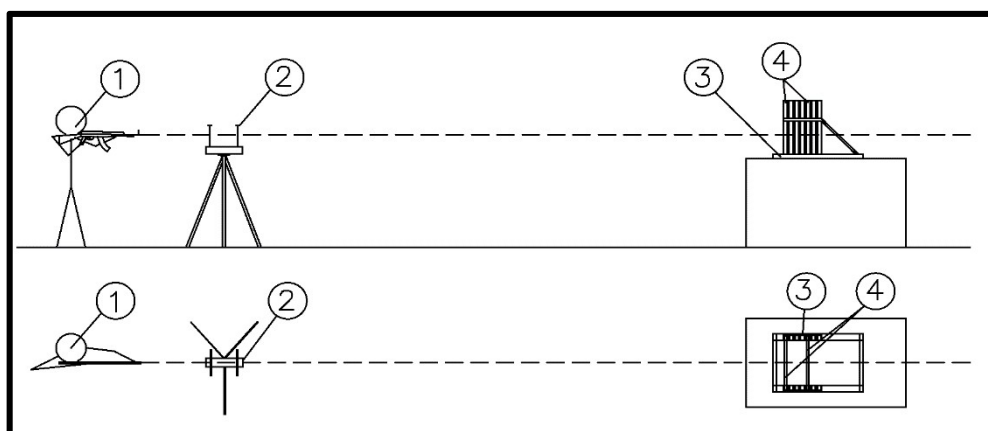
Schematické rozložení první části zkoušení je zobrazeno na obrázku č. 47.



obrázek č. 47: Rozložení zkoušení referenční desky

1 - střelec; 2 - chronograf; 3 - uchycení desky; 4 - zkoušený vzorek

Následně se přešlo ke zkoušení vlivu vrstvení UHPFRC desek (viz obrázek č. 48).

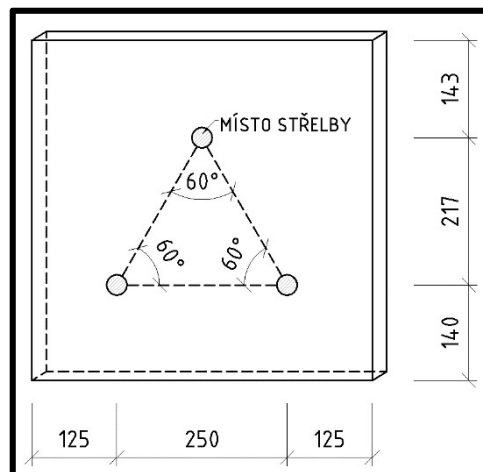


obrázek č. 48: Rozložení zkoušení vrstvených desek

1 - střelec; 2 - chronograf; 3 - uchycení desky; 4 - zkoušený vzorek

4.5.3 Vlastní zkoušení vrstvených desek

V následující kapitole bude popsán průběh zkoušení jak referenčních desek, tak jednotlivých sad vrstvených desek. Veškeré desky v jednotlivých testech byly podrobeny třem zásahům projektilů. Jednalo se o vícenásobný zásah tzv. multi-hit, který bývá jedním ze základních požadavků pro kvalitní balistickou ochranu konstrukcí. Na desky se tedy střílí tak, aby zásahy byly ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku a vzdalovaly se od sebe alespoň 100 mm. Je prokázáno, že se při této vzdálenosti střely nijak neovlivňují [43].



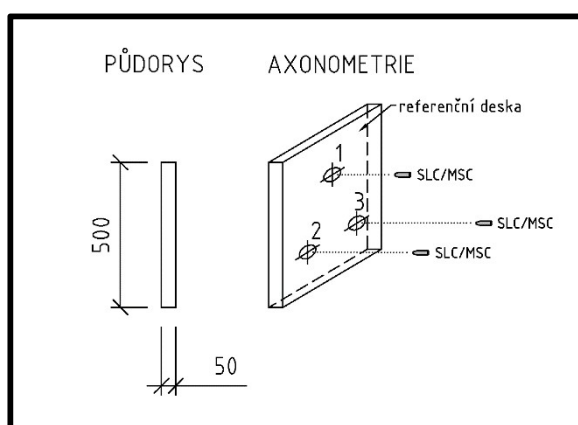
obrázek č. 49: Rozložení střelby na desku (multi-hit)

4.5.3.1 Referenční desky

Jednalo se o desky z UHPFRC betonu tloušťky 50 mm. Tyto desky byly přichyceny k držáku pomocí ocelové svorky, což je zobrazeno na obrázku č. 51.

Parametry referenčního balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. R1 a vzorek č. R2,
- náboj SLC, tedy deformovatelná střela ráže 7,62 × 39 mm u desky R1
- náboj MSC, tedy nedeformovatelná střela ráže 7,62 × 39 mm u desky R2
- na vzorky byly vystřeleny tři projektily v postupném pořadí.



obrázek č. 50: Schematické rozložení střelby



obrázek č. 51: Odzkoušený vzorek

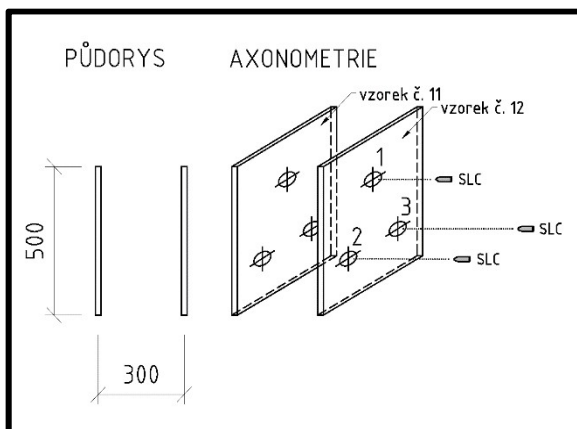
4.5.3.2 První balistický test (vrstvení po 300 mm)

Jako první balistický test vrstvených desek byly odzkoušeny dvě desky na největší vzdálenost, tedy 300 mm, a to z důvodů ověření, zda je myšlenka vůbec správná a desky budou schopny projektil zastavit.

Parametry prvního balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. 12 a vzorek č. 11,
- vzdálenost mezi deskami byla 300 mm,
- náboj SLC, tedy deformovatelná střela ráže $7,62 \times 39$ mm,
- na vzorky byly vystřeleny tři projektily v postupném pořadí.

Vše je znázorněno na obrázku č. 52, stav desek po zkoušce je na obrázku č. 53.



obrázek č. 52: Schematické rozložení střelby (vrstvení po 300 mm)



obrázek č. 53: Odzkoušené vzorky (vrstvení po 300 mm)

Zkouškou bylo zjištěno, že myšlenka je lichá, neboť došlo ke třem totálním průstřelům u obou desek. Bylo tedy nutné návrh experimentálního programu z kapitoly 4.1.1 přehodnotit a upravit. Z vrstvení dvou desek tedy bylo nutné udělat vrstvení tří a čtyř desek. Další experimenty probíhaly v upravené formě podle následujících kapitol.

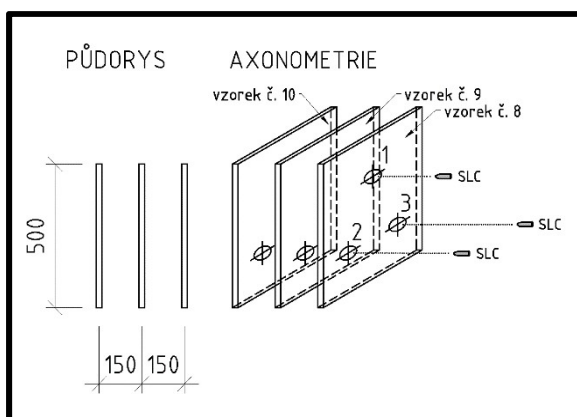
4.5.3.3 Druhý balistický test (vrstvení po 150 mm)

Jelikož dvě desky neprokázaly dostatečnou odolnost proti průniku projektilu a došlo k jejich kompletní perforaci, bylo nutné vyzkoušet vrstvení tří desek.

Parametry druhého balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. 8, vzorek č. 9 a vzorek č. 10,
- vzdálenost mezi deskami byla 150 mm,
- náboj SLC, tedy deformovatelná střela ráže $7,62 \times 39$ mm,
- na vzorky byly vystřeleny tři projektily v postupném pořadí.

Vše je znázorněno na obrázku č. 54, stav desek po zkoušce je na obrázku č. 55.



obrázek č. 54: Schematické rozložení střelby (vrstvení po 150 mm)



obrázek č. 55: Odzkoušené vzorky (vrstvení po 150 mm)

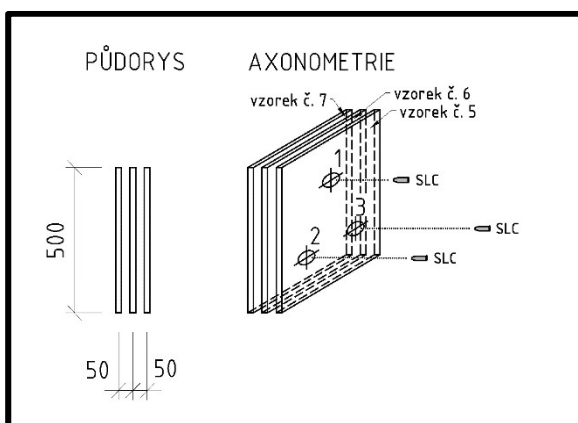
4.5.3.4 Třetí balistický test (vrstvení po 50 mm)

Rozložení dalšího testu bylo obdobné jako v předchozím případě, ale bylo potřeba prověřit, zda při bližším vrstvení nedojde k rozdílným výsledkům.

Parametry třetího balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. 5, vzorek č. 6 a vzorek č. 7,
- vzdálenost mezi deskami byla 50 mm,
- náboj SLC, tedy deformovatelná střela ráže $7,62 \times 39$ mm,
- na vzorky byly vystřeleny tři projektily v postupném pořadí.

Vše je znázorněno na obrázku č. 56, stav desek po zkoušce je na obrázku č. 57.



obrázek č. 56: Schematické rozložení střelby (vrstvení po 50 mm)



obrázek č. 57: Odzkoušené vzorky (vrstvení po 50 mm)

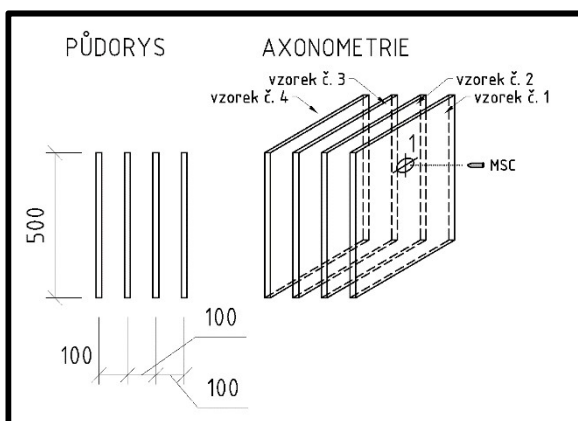
4.5.3.5 Čtvrtý balistický test (vrstvení po 100 mm)

Oproti předchozím balistickým testům zde došlo k několika změnám.

Parametry čtvrtého balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3 a vzorek č. 4,
- vzdálenost mezi deskami byla 100 mm,
- náboj MSC, tedy nedeformovatelná střela ráže $7,62 \times 39$ mm,
- na vzorky byl vystřelen pouze jeden projektil, nikoliv tři jako v předchozích případech.

Vše je znázorněno na obrázku č. 58, stav desek po zkoušce je na obrázku č. 59.



obrázek č. 58: Schematické rozložení střelby (vrstvení po 100 mm)



obrázek č. 59: Odzkoušené vzorky (vrstvení po 100 mm)

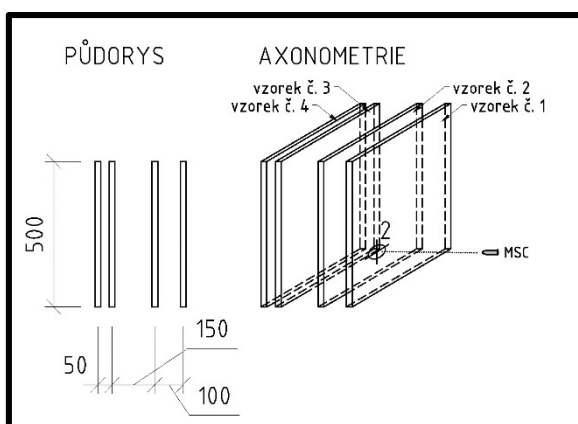
4.5.3.6 Pátý balistický test (vrstvení po 50 mm, 150 mm, 100 mm)

V této fázi zkoušení došlo ke změně vzdáleností mezi jednotlivými deskami. Používaly se stejné desky jako v minulém balistickém experimentu.

Parametry pátého balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3 a vzorek č. 4,
- vzdálenost mezi deskami byla 50 mm, 150 mm, 100 mm,
- náboj MSC, tedy nedeformovatelná střela ráže $7,62 \times 39$ mm,
- na vzorky byl vystřelen opět pouze jeden projektil.

Vše je znázorněno na obrázku č. 60, stav desek po zkoušce je na obrázku č. 61.



obrázek č. 60: Schematické rozložení střelby (vrstvení po 50, 150, 100 mm)



obrázek č. 61: Odzkoušené vzorky (vrstvení po 50, 150, 100 mm)

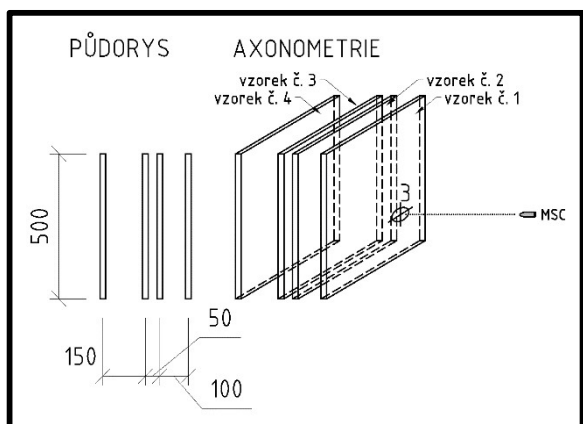
4.5.3.7 Šestý balistický test (vrstvení po 150 mm, 50 mm, 100 mm)

Při závěrečném balistickém experimentu bylo nutné opětovně přeskládat desky. Desky se používaly stejně jako v minulém a předminulém balistickém experimentu.

Parametry šestého balistického testu:

- použity desky s označením vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3 a vzorek č. 4,
- vzdálenost mezi deskami byla 150 mm, 50 mm, 100 mm,
- náboj MSC, tedy nedeformovatelná střela ráže $7,62 \times 39$ mm,
- na vzorky byl vystřelen opět pouze jeden projektil.

Vše je znázorněno na obrázku č. 62, stav desek po zkoušce je na obrázku č. 63.



obrázek č. 62: Schematické rozložení střelby
(vrstvení po 150, 50, 100 mm)

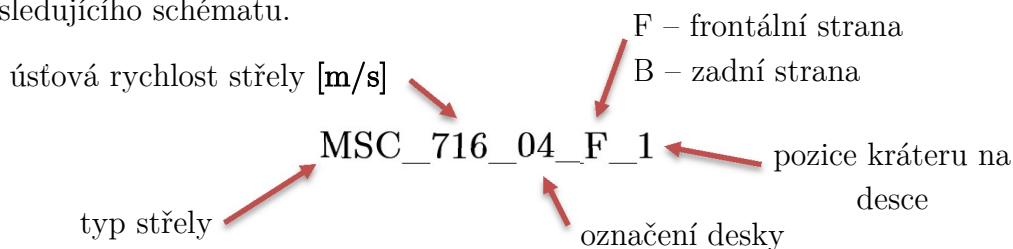


obrázek č. 63: Odzkoušené vzorky
(vrstvení po 150, 50, 100 mm)

5 Výsledky a diskuse

V následující kapitole budou vyhodnoceny a následně okomentovány výsledky jednotlivých balistických testů.

Pro lepší identifikování jednotlivých kráterů budou označeny standardizovaně podle následujícího schématu.



Pro větší orientaci čtenářů bude následující kapitola rozdělena na balistické testy, které byly zkoušeny náboji SLC neboli deformovatelnou střelou ráže $7,62 \times 39$ mm, a testy, které byly zkoušeny náboji MSC neboli nedeformovatelnou střelou ráže $7,62 \times 39$ mm.

Každý test bude mít příslušnou barvu, která se bude vyskytovat u všech dílčích vyhodnocení. Vše je uvedeno v přehledné tabulce č. 10.

tabulka č. 10: *Rozdělení balistických testů*

Balistický test	Používané desky	Typ náboje	Barva
referenční	referenční R1, tl. 50 mm	SLC	
referenční	referenční R2, tl. 50 mm	MSC	
první	vzorek č. 11, vzorek č. 12	SLC	
druhý	vzorek č. 8, vzorek č. 9, vzorek č. 10		
třetí	vzorek č. 5, vzorek č. 6, vzorek č. 7		
čtvrtý	vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3, vzorek č. 4	MSC	
pátý	vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3, vzorek č. 4		
šestý	vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3, vzorek č. 4		

5.1 Vyhodnocení stavu desek po střelbě

Jako jedno z prvních vyhodnocení po realizaci balistického experimentu bylo provedeno vizuální zhodnocení stavu jednotlivých desek.

Vyhodnocení má pak následující závěry:

- deska zůstala po střelbě bez poškození
- deska byla částečně poškozena a vznikl v ní kráter (došlo k částečné penetraci)
- deska byla poškozena kompletním průstřelem (došlo k celkové perforaci)

Nejzajímavější při vizuálním vyhodnocování bylo, že na vzorku desky s označením č. 11 bylo kromě lokálního průstřelu také spousta menších oděrků, které vznikly od šrapnelů betonu, jenž byly vyraženy střelou ze zadní části desky s označením č. 12.

Vše je přehledně popsáno v následující tabulce č. 11.

tabulka č. 11: *Vyhodnocení stavu desek po střelbě*

Balistický test	Používané desky	Označení kráterů	Typ náboje	Popis poškození
referenční	referenční R1	SLC_730_R1_F_1	SLC	částečná penetrace s odloupenutím zadní strany
		SLC_716_R1_F_2		částečná penetrace s odloupenutím zadní strany
		SLC_734_R1_F_3		částečná penetrace s odloupenutím zadní strany
referenční	referenční R2	MSC_730_R2_F_1	MSC	celková perforace
		MSC_714_R2_F_2		celková perforace
		MSC_714_R2_F_3		celková perforace
první	vzorek č. 12	SLC_712_12_F_1	SLC	celková perforace
		SLC_736_12_F_2		celková perforace
		SLC_729_12_F_3		celková perforace
	vzorek č. 11	SLC_712_11_F_1		celková perforace
		SLC_736_11_F_2		celková perforace
		SLC_729_11_F_3		celková perforace

Balistický test	Používané desky	Označení kráterů	Typ náboje	Popis poškození
druhý	vzorek č. 8	SLC_761_08_F_1	SLC	celková perforace
		SLC_766_08_F_2		celková perforace
		SLC_765_08_F_3		celková perforace
	vzorek č. 9	SLC_761_09_F_1		celková perforace
		SLC_766_09_F_2		celková perforace
		SLC_765_09_F_3		celková perforace
	vzorek č. 10	SLC_761_10_F_1		bez poškození
		SLC_766_10_F_2		bez poškození
		SLC_765_10_F_3		bez poškození
třetí	vzorek č. 5	SLC_784_05_F_1	SLC	celková perforace
		SLC_771_05_F_2		celková perforace
		SLC_772_05_F_3		celková perforace
	vzorek č. 6	SLC_784_06_F_1		celková perforace
		SLC_771_06_F_2		celková perforace
		SLC_772_06_F_3		celková perforace
	vzorek č. 7	SLC_784_07_F_1		bez poškození
		SLC_771_07_F_2		bez poškození
		SLC_772_07_F_3		bez poškození
čtvrtý	vzorek č. 1	MSC_712_01_F_1	MSC	celková perforace
	vzorek č. 2	MSC_712_02_F_1		celková perforace
	vzorek č. 3	MSC_712_03_F_1		částečná penetrace s popraskáním zadní strany
	vzorek č. 4	MSC_712_04_F_1		bez poškození
pátý	vzorek č. 1	MSC_723_01_F_2	MSC	celková perforace
	vzorek č. 2	MSC_723_02_F_2		celková perforace
	vzorek č. 3	MSC_723_03_F_2		celková perforace
	vzorek č. 4	MSC_723_04_F_2		bez poškození
šestý	vzorek č. 1	MSC_706_01_F_3	MSC	celková perforace
	vzorek č. 2	MSC_706_02_F_3		celková perforace
	vzorek č. 3	MSC_706_03_F_3		celková perforace
	vzorek č. 4	MSC_706_04_F_3		bez poškození

5.2 Zjišťování průřezů kráterů pomocí 2D profilometru

Tento přístroj se používá k detekci, měření a následné vyhodnocení stavu povrchu. Přístroj vysílá bodový červený paprsek laseru (viz obrázek č. 65), který díky pohyblivému rameni snímá příslušný povrch. Profilometru se zadá náležitá vzdálenost, na jaké má měřit a také rychlost, kterou se má rameno profilometru pohybovat. Následně se ještě specifikuje počet měřených vzorků za sekundu.

Profilometr byl nastaven na měření 50 vzorků za sekundu na délce 200 mm, rychlostí 20 mm za sekundu. Na příslušné přímce se samozřejmě nacházel měřený kráter. Výstupem je pak textový soubor s naměřenými hodnotami (souřadnice ve směru osy „X“ a ve směru osy „Y“), ze kterých lze snadno vytvořit průběh měřeného kráteru.

Měření byly vždy pouze první krátery na patřičných deskách, a to ve dvou na sebe kolmých směrech, které byly vždy rovnoběžné s okraji desky (horizontální a vertikální měření).



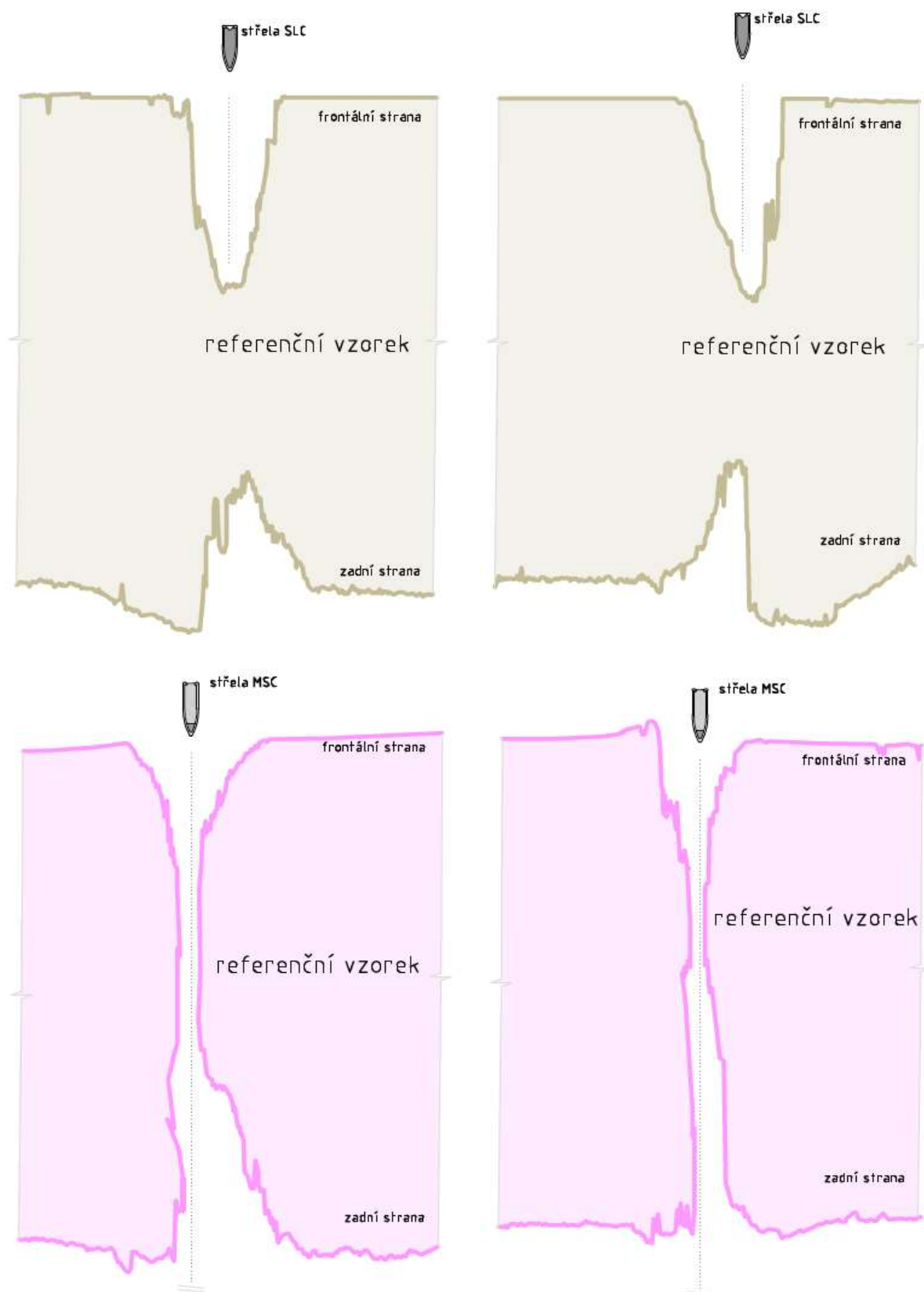
obrázek č. 64: *Profilometr s počítačem*



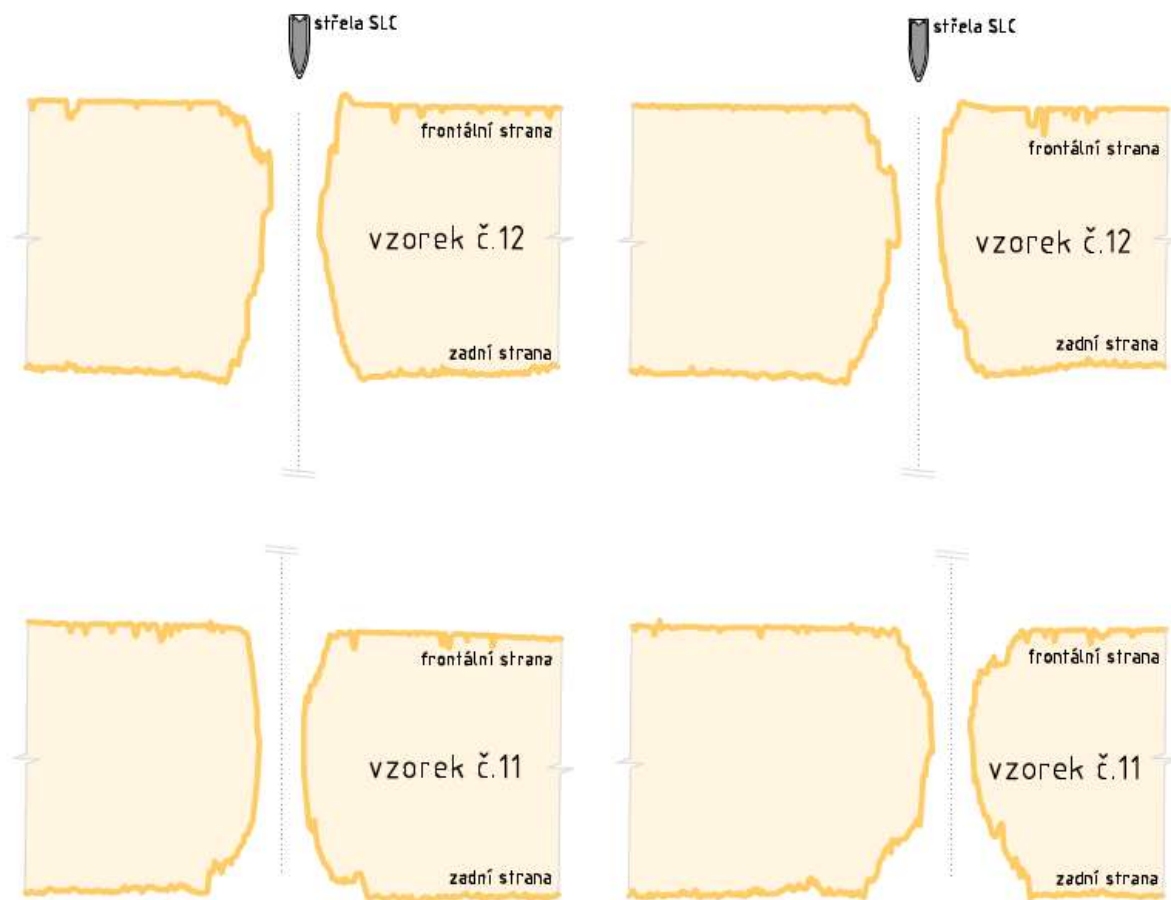
obrázek č. 65: *Měřící rameno s laserem*

Následující obrázky kráterů v jednotlivých deskách mají vždy pětikrát převýšenou tloušťku desky oproti délce, a to zejména pro lepší a viditelnější poškození, které daná střela způsobila. Od každého vzorku desky je vyobrazen jeden kráter, který byl ovšem měřen ve dvou na sebe kolmých směrech, a tedy levý průřez kráteru je vždy měřený v horizontálním směru a pravý naopak ve vertikálním směru.

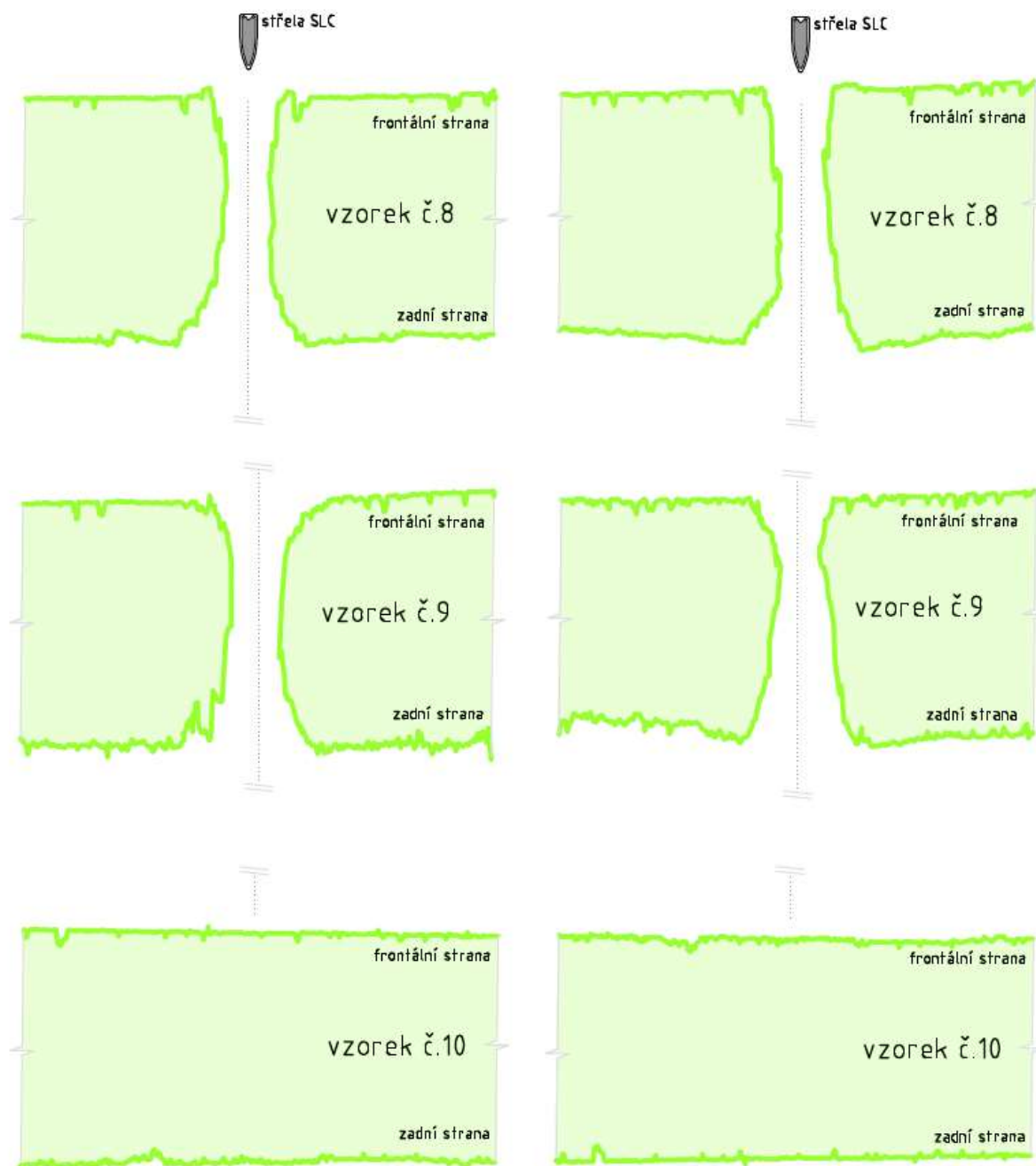
5.2.1 Krátery v referenčních deskách



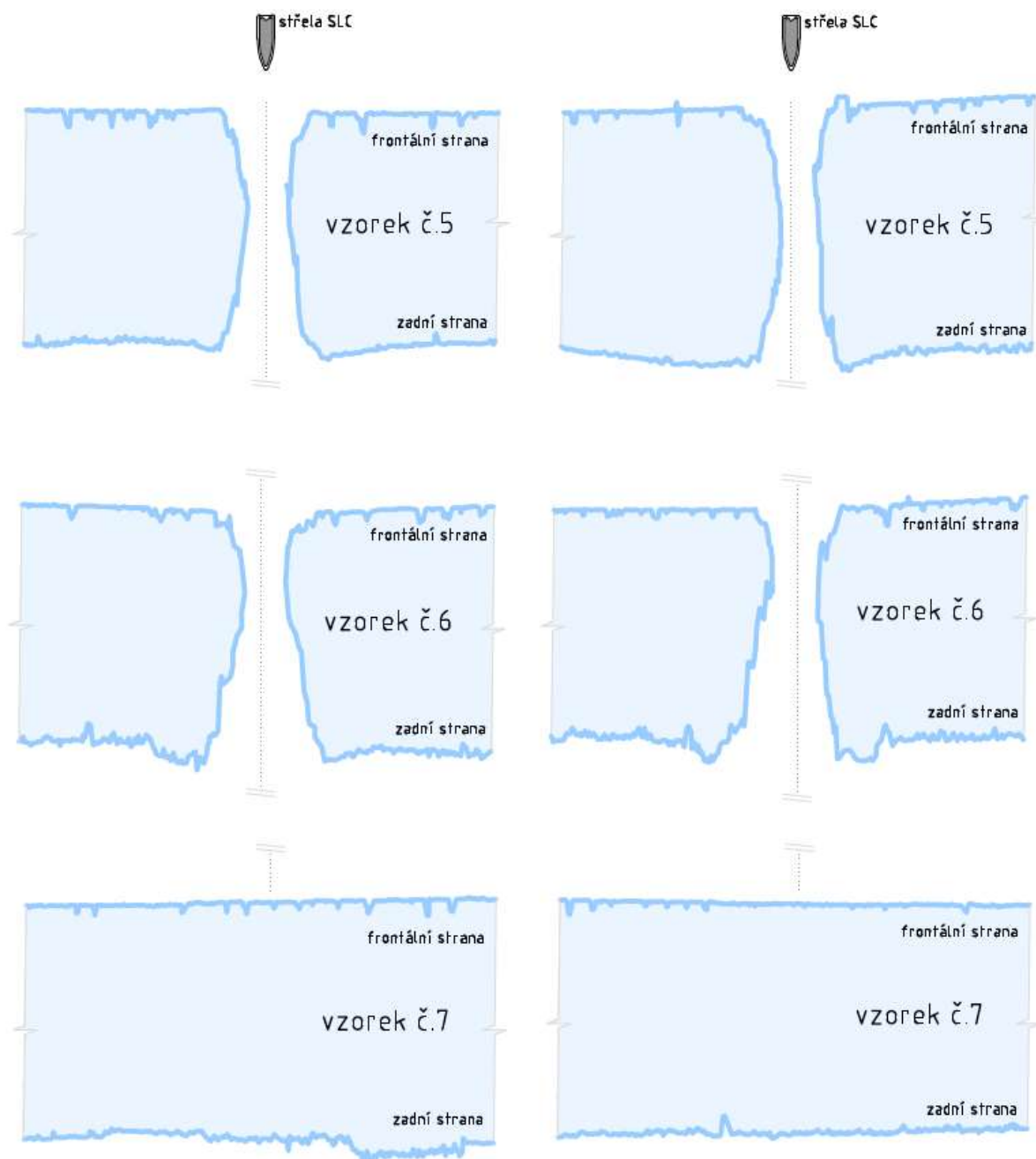
5.2.2 Krátery v deskách číslo 11 a 12



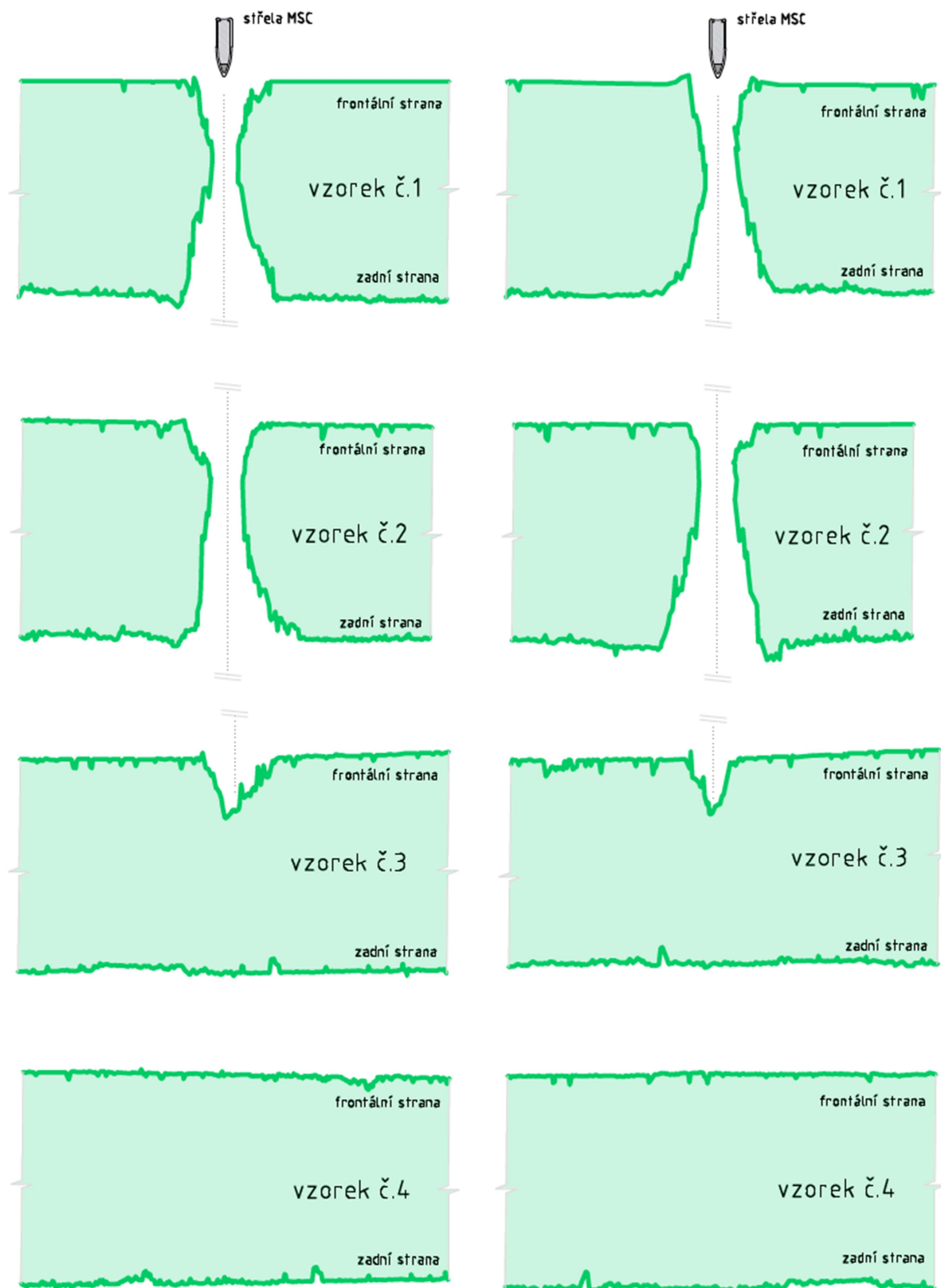
5.2.3 Krátery v deskách číslo 8, 9 a 10



5.2.4 Krátery v deskách číslo 5, 6 a 7



5.2.5 Krátery v deskách číslo 1, 2, 3 a 4



5.3 Měření ploch kráterů

Měření ploch jednotlivých kráterů probíhalo pomocí softwaru AutoCAD 2018. Nejprve byly jednotlivé krátery vyfoceny a fotografie byly nahrány do pracovního prostředí zmíněného softwaru. Pro určení plochy musela být hranice kráterů obtažena křivkou, ze které software určil příslušnou plochu. Vše je zaznamenáno v rozsáhlé tabulce č. 12. Pro upřesnění je nutné zmínit, že pojem lokální kráter značí ve většině případů průstřel a s ním spojené poškození a okolní samostatné krátery, které vznikly například šrapnely odloupenutého betonu, jsou zahrnuty ve sloupci ostatní plochy.

tabulka č. 12: *Plochy jednotlivých kráterů*

Balistický test	Používané desky	Označení kráterů	Typ náboje	Plochy kráterů [mm ²]	
				lokálních	ostatních
referenční	referenční R1	SLC_730_R1_F_1	SLC	4063,23	---
		SLC_716_R1_F_2		3807,76	---
		SLC_734_R1_F_3		3844,36	---
		SLC_730_R1_B_1		9338,69	---
		SLC_716_R1_B_2		6233,62	---
		SLC_734_R1_B_3		6105,69	---
referenční	referenční R2	MSC_730_R2_F_1	MSC	3665,71	---
		MSC_714_R2_F_2		3580,87	---
		MSC_714_R2_F_3		3617,43	---
		MSC_730_R2_B_1		4892,60	---
		MSC_714_R2_B_2		4151,79	---
		MSC_714_R2_B_3		4291,91	---
první	vzorek č. 12	SLC_712_12_F_1	SLC	1545,25	---
		SLC_736_12_F_2		1868,19	---
		SLC_729_12_F_3		1254,32	---
		SLC_712_12_B_1		2126,72	---
		SLC_736_12_B_2		2502,29	---
		SLC_729_12_B_3		2157,35	---
	vzorek č. 11	SLC_712_11_F_1		1654,40	1224,56
		SLC_736_11_F_2		1953,71	894,64
		SLC_729_11_F_3		1854,98	865,65
		SLC_712_11_B_1		3116,21	---
		SLC_736_11_B_2		1984,56	---
		SLC_729_11_B_3		2648,17	---

Balistický test	Používané desky	Označení kráterů	Typ náboje	Plochy kráterů [mm ²]	
				lokálních	ostatních
druhý	vzorek č. 8	SLC_761_08_F_1	SLC	1515,26	---
		SLC_766_08_F_2		1862,88	---
		SLC_765_08_F_3		1383,16	---
		SLC_761_08_B_1		2245,76	---
		SLC_766_08_B_2		1713,62	---
		SLC_765_08_B_3		2136,41	---
	vzorek č. 9	SLC_761_09_F_1		1586,42	---
		SLC_766_09_F_2		1292,77	567,54
		SLC_765_09_F_3		2172,62	---
		SLC_761_09_B_1		1564,20	---
		SLC_766_09_B_2		1613,52	---
		SLC_765_09_B_3		2720,03	---
	vzorek č. 10	SLC_761_10_F_1		---	---
		SLC_766_10_F_2		---	---
		SLC_765_10_F_3		---	---
		SLC_761_10_B_1		---	---
		SLC_766_10_B_2		---	---
		SLC_765_10_B_3		---	---
třetí	vzorek č. 5	SLC_784_05_F_1	SLC	1685,05	---
		SLC_771_05_F_2		1275,26	---
		SLC_772_05_F_3		1363,53	---
		SLC_784_05_B_1		1501,48	---
		SLC_771_05_B_2		1890,16	---
		SLC_772_05_B_3		2140,99	---
	vzorek č. 6	SLC_784_06_F_1		1585,15	---
		SLC_771_06_F_2		1673,28	---
		SLC_772_06_F_3		1322,41	---
		SLC_784_06_B_1		4139,47	---
		SLC_771_06_B_2		3554,21	---
		SLC_772_06_B_3		3389,48	---
	vzorek č. 7	SLC_784_07_F_1		---	---
		SLC_771_07_F_2		---	---
		SLC_772_07_F_3		---	---
		SLC_784_07_B_1		---	---
		SLC_771_07_B_2		---	---
		SLC_772_07_B_3		---	---

Balistický test	Používané desky	Označení kráterů	Typ náboje	Plochy kráterů [mm ²]	
				lokálních	ostatních
čtvrtý	vzorek č. 1	MSC_712_01_F_1	MSC	1100,48	---
		MSC_712_01_B_1		1957,97	---
	vzorek č. 2	MSC_712_02_F_1		910,35	---
		MSC_712_02_B_1		2472,16	---
	vzorek č. 3	MSC_712_03_F_1		556,89	---
		MSC_712_03_B_1		---	---
	vzorek č. 4	MSC_712_04_F_1		---	---
		MSC_712_04_B_1		---	---
pátý	vzorek č. 1	MSC_723_01_F_2	MSC	1258,70	---
		MSC_723_01_B_2		1475,91	---
	vzorek č. 2	MSC_723_02_F_2		1407,25	---
		MSC_723_02_B_2		2623,33	---
	vzorek č. 3	MSC_723_03_F_2		811,25	---
		MSC_723_03_B_2		3302,28	---
	vzorek č. 4	MSC_723_04_F_2		---	---
		MSC_723_04_B_2		---	---
šestý	vzorek č. 1	MSC_706_01_F_3	MSC	1231,18	---
		MSC_706_01_B_3		2169,39	---
	vzorek č. 2	MSC_706_02_F_3		1212,41	---
		MSC_706_02_B_3		2837,67	---
	vzorek č. 3	MSC_706_03_F_3		396,91	---
		MSC_706_03_B_3		2809,46	---
	vzorek č. 4	MSC_706_04_F_3		---	---
		MSC_706_04_B_3		---	---

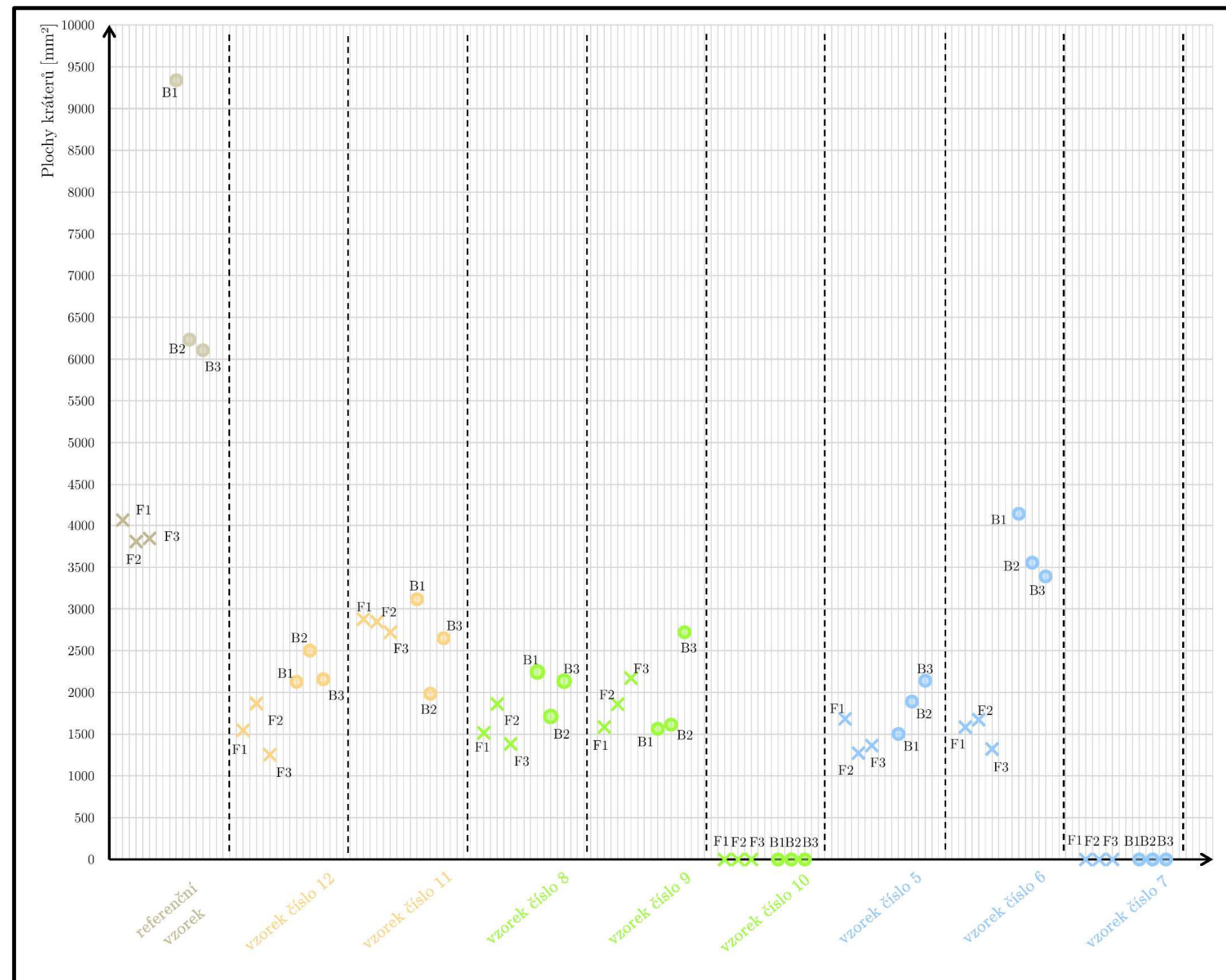
Na následujícím složeném listě jsou uvedeny dva grafy, které přehledněji zachycují jednotlivé plochy z výše uvedené tabulky. Na grafu č. 6 jsou zobrazeny plochy kráterů, které vznikly při balistických testech střelou SLC (deformovatelná střela 7,62 × 39 mm). Jedná se o první, druhý a třetí balistický test.

Oproti tomu druhý graf č. 7 zobrazuje plochy kráterů, které vznikly při balistických testech střelou MSC (nedeformovatelná střela 7,62 × 39 mm). Jedná se o čtvrtý, pátý a šestý balistický test.

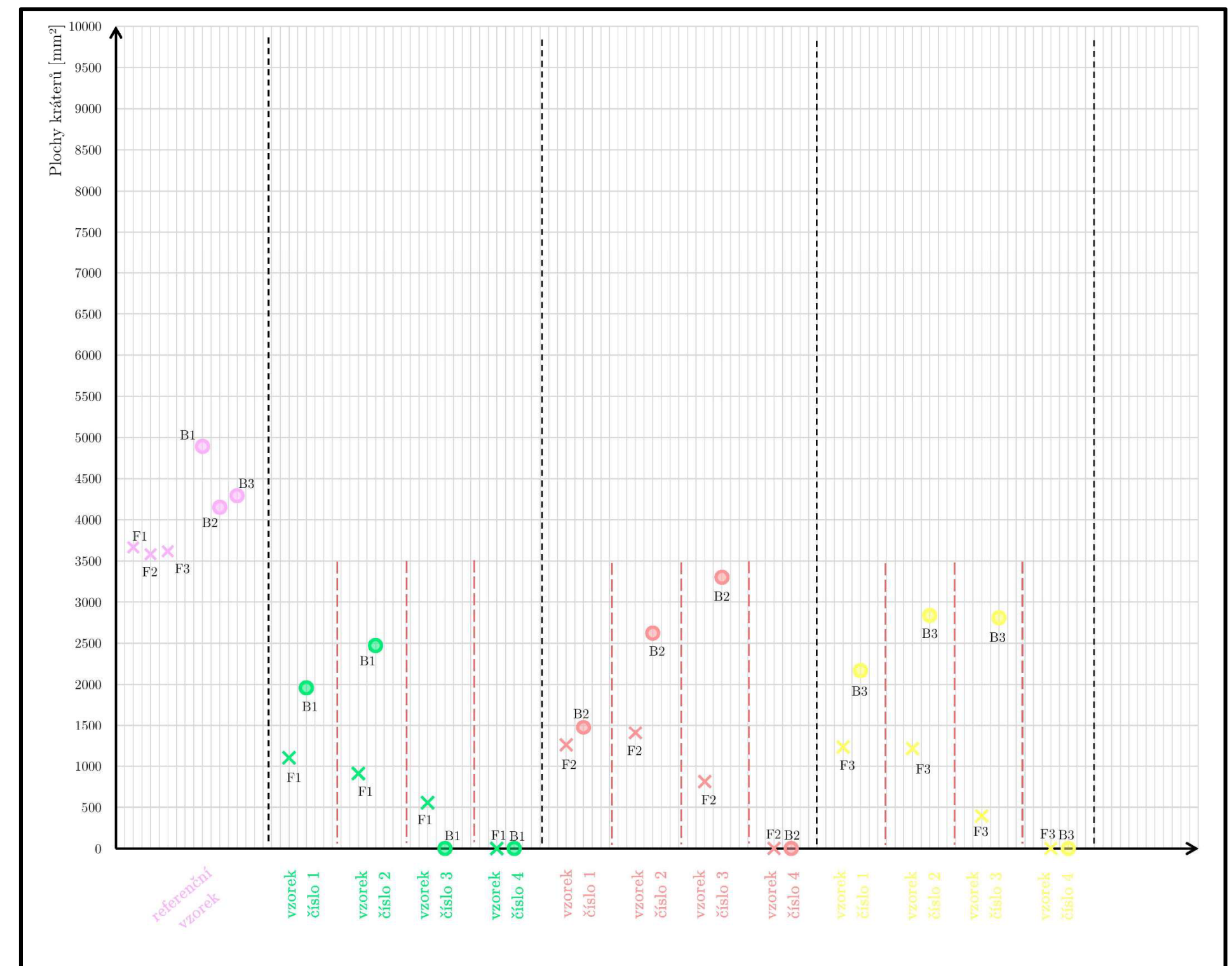
✕ F1 je označení předního příslušného kráteru v daném balistickém testu,

○ B1 je označení zadního příslušného kráteru v daném balistickém testu.

graf č. 6: Plochy kráterů po deformovatelné střele ráže 7,62 × 39 mm (SLC)



graf č. 7: Plochy kráterů po nedeformovatelné střele ráže 7,62 × 39 mm (MSC)



Při pohledu na graf č. 6 nelze jednoznačně určit trend mezi jednotlivými balistickými testy. Například v prvním balistickém testu se plochy zadních kráterů postupně zvětšují a u druhého balistického testu tomu tak není. Ve třetím balistickém testu se opět plochy zadních kráterů zvětšují.

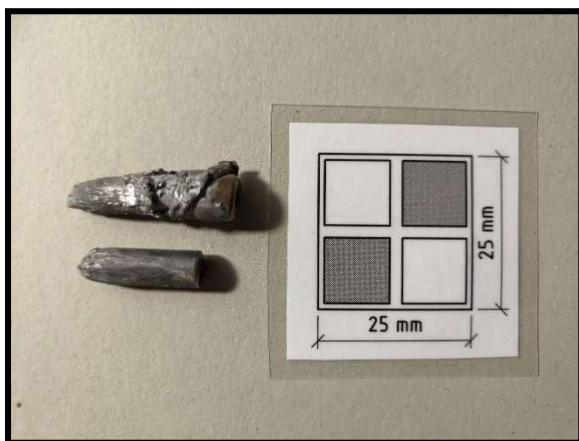
Při průstřelu první desky velice pravděpodobně dojde k deformaci SLC střely, která následně pokračuje s určitou rotací. Vzniklé krátery jsou pak závislé hned na několika faktorech. Těmi může být zdeformovaný tvar projektilu, jeho rotace nebo změna jeho trajektorie. Dalším důležitým aspektem, který může společně s výše zmíněnými faktory působit na výsledky balistických testů je ztráta rychlosti projektilu při průchodu jednotlivými UHPFRC deskami.

Jelikož při provádění experimentu nebyla přítomna vysokorychlostní kamera, nelze jednoznačně určit, k jakému chování střely došlo.

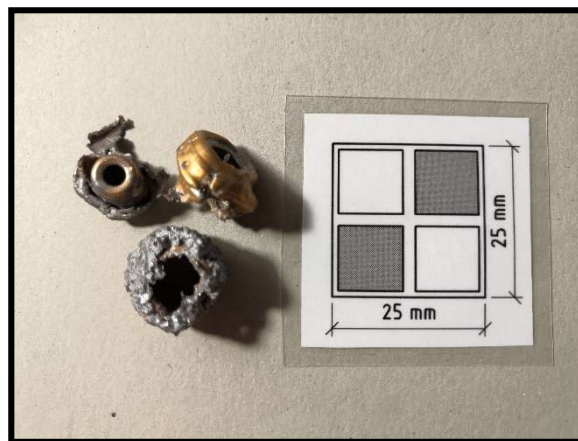
Při pohledu na druhý graf č. 7 je patrná určitá podobnost jednotlivých testů. S narůstajícím počtem prostřelených desek dochází ke zmenšování ploch předních kráterů, ale naopak ke zvětšování zadních ploch kráterů.

Jelikož se jedná o střely typu MSC, tedy nedeformovatelnou ráži, při průletu deskou dochází ke svlečení měděného (popřípadě mosazného) pláště dané střely a dále již pokračuje pouze ocelové jádro. Z této teze by šlo zdůvodnit, proč se přední plochy kráteru narůstajícím počtem prostřelených desek zmenšují.

Jádro střely a její svlečená plášť jsou na následujících obrázcích.



obrázek č. 66: *Jádro nedeformovatelné střely po průchodu deskou*



obrázek č. 67: *Plášť nedeformovatelné střely po průchodu deskou*

Na velikost zadních kráterů tedy může mít vliv do jisté míry i svlečený plášť, ale zejména pak natočení střely při průchodu jednotlivými deskami.

Fotografie s vyznačenými plochami kráterů jsou přiloženy v přílohách konkrétně v kapitole 7.1.3. Pro lepší orientaci v přiložených fotografiích je nutné zmínit, že v levém sloupci jsou zobrazeny přední krátery počínaje označením číslem 1 a v druhém sloupci jsou zobrazeny vždy příslušící zadní krátery.

5.4 Ústové a dopadové rychlosti střel

Jak již bylo naznačeno v kapitole 4.5.2.2, ústové rychlosti byly měřeny pomocí optického hradla, které bylo umístěno 2 m za ústí zbraně.

Tento přístroj měří ústovou rychlost díky dvojici hradel, jenž mají mezi sebou známou vzdálenost. Při průletu prvním hradlem přístroj začne měřit čas, který byl nutný k překonání vzdálenosti ke druhému hradlu. Ze vzdálenosti a z naměřeného času se vypočte ústová rychlost střely.

Dopadové rychlosti byly určeny dle tabulky č. 13, která je převzata z odborné publikace Wound Ballistics (basics and applications) [44]. Určené dopadové rychlosti střel vystřelených při balistických experimentech jsou zapsány v tabulce č. 14.

tabulka č. 13: Část balistické tabulky střel $7,62 \times 39$ mm [44]

x [m]	as [Mil]	v ₀ [m/s]	E [J]	ED [J/mm ²]	t [s]	Cw [cm]	y _s [cm]	x _s [cm]	ad [Mil]
0	0,00	710	2016	44,2	0,00	0	0	0	0,0
20	0,20	688	1893	41,5	0,03	0	0	10	0,2
40	0,41	666	1774	38,9	0,06	2	0	20	0,4
60	0,63	645	1662	36,5	0,09	4	1	30	0,7

Vysvětlivky k veličinám v tabulce:

x je vzdálenost mezi střelcem a cílem [m]

E je energie střely [J]

t je čas letu [s]

Cw je odchylka vlivem příčného větru [cm]

y_s je vzepětí balistické křivky [cm]

as je úhel výstřelu [Mil]

ED je hustota energie [J/mm²]

v₀ je rychlost [m/s]

x_s je výška vrcholu [cm]

ad je úhel dopadu [Mil]

tabulka č. 14: Dopadové rychlosti jednotlivých střel

Balistický test	Označení čelní desky	Místo dopadu střely	Ústová rychlost střely [m/s]	Dopadová rychlost střely [m/s]
referenční	vzorek R1	SLC_730_R1_F_1	730	708
		SLC_716_R1_F_2	716	694
		SLC_734_R1_F_3	734	712
referenční	vzorek R2	MSC_730_R2_F_1	730	708
		MSC_714_R2_F_2	714	692
		MSC_714_R2_F_3	714	692
první	vzorek č. 12	SLC_712_12_F_1	712	690
		SLC_736_12_F_2	736	714
		SLC_729_12_F_3	729	707
druhý	vzorek č. 8	SLC_761_08_F_1	761	739
		SLC_766_08_F_2	766	744
		SLC_765_08_F_3	765	743
třetí	vzorek č. 5	SLC_784_05_F_1	784	762
		SLC_771_05_F_2	771	749
		SLC_772_05_F_3	772	750
čtvrtý	vzorek č. 1	MSC_712_01_F_1	712	690
pátý	vzorek č. 1	MSC_723_01_F_2	723	701
šestý	vzorek č. 1	MSC_706_01_F_3	706	684

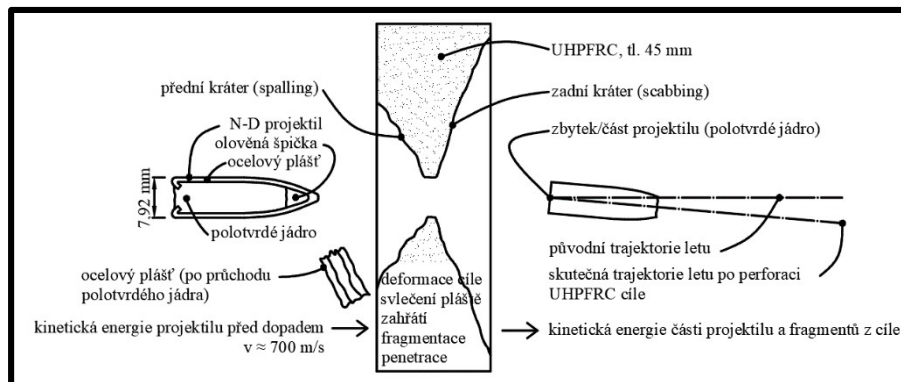
Z výše uvedené tabulky vyplývá, že průměrná ústová rychlost všech SLC střel, tedy deformovatelné střely ráže $7,62 \times 39$ mm, je 748 m/s, zatímco průměrná dopadová rychlost daných střel je 726 m/s.

U nedeformovatelných střel ráže $7,62 \times 39$ mm je průměrná ústová rychlost 717 m/s a průměrná dopadová rychlost MSC střel je 695 m/s.

Ideálním prostředkem k měření dopadových rychlostí střel by nepochybně byla vysokorychlostní kamera, která bohužel při provádění experimentu nebyla k dispozici.

5.5 Změna trajektorie střel

Autor Radoslav Sovják ve své publikaci [27] uvádí, že střela vycházející ze zadní strany desky nesleduje svůj původní směr a dochází k jejímu odklonění.



obrázek č. 68: Odklon střely po průchodu deskou [27]

Na níže uvedených schematických zobrazeních (kapitola 5.5.1 až kapitola 5.5.6) jednotlivých střel a jejich trajektorií je vidět, že při průletu střely jednotlivými deskami dochází ke změně směru střely. Nejvíce patrná je tato skutečnost při větších vzdálenostech mezi deskami. Se snižující vzdáleností mezi deskami dochází i k menším odklonům střel oproti původní trajektorii. V následující tabulce č. 15 jsou pak vidět finální hodnoty, o které střela změnila svůj původní směr.

tabulka č. 15: Trajektorie střel

Balistický test	Pořadí výstřelu	Rozdíl vzdáleností střely [mm]	
		od levého okraje desky (půdorysný směr)	od spodního okraje desky (výškový směr)
první	první	13	10
	druhý	17	3
	třetí	16	8
druhý	první	2	9
	druhý	2	5
	třetí	6	5
třetí	první	2	0
	druhý	6	0
	třetí	2	1
čtvrtý	první	29	24
pátý	druhý	14	3
šestý	třetí	16	0

V prvním balistickém testu došlo k jednomu z největších rozdílů vzdáleností ze všech provedených testů.

Ve druhém balistickém testu docházelo k menším půdorysným rozdílům vzdáleností středů kráterů od levého okraje, než tomu bylo při prvním balistickém testu. To je zapříčiněno snižující se vzdáleností mezi deskami a střela nemá tolik prostoru k rotaci a změně směru. Výškový rozdíl byl pak největší u prvního výstřelu, a to 9 mm.

Ve třetím balistickém testu, kde jsou desky nejbližší se všech provedených testů docházelo k velmi malým rozdílům jak v půdorysném, tak výškovém směru.

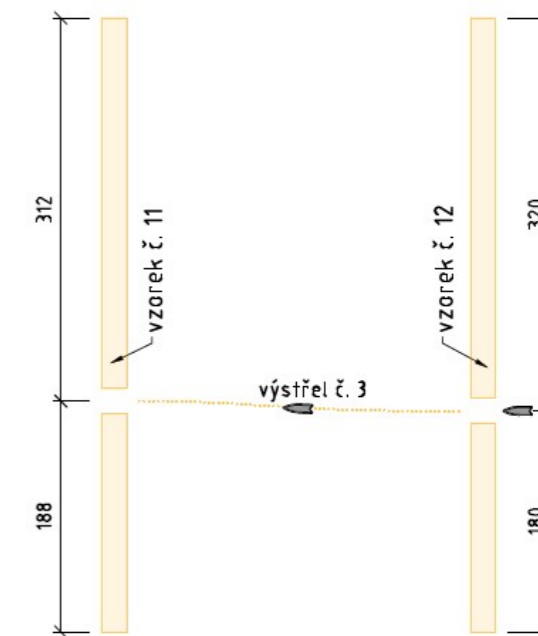
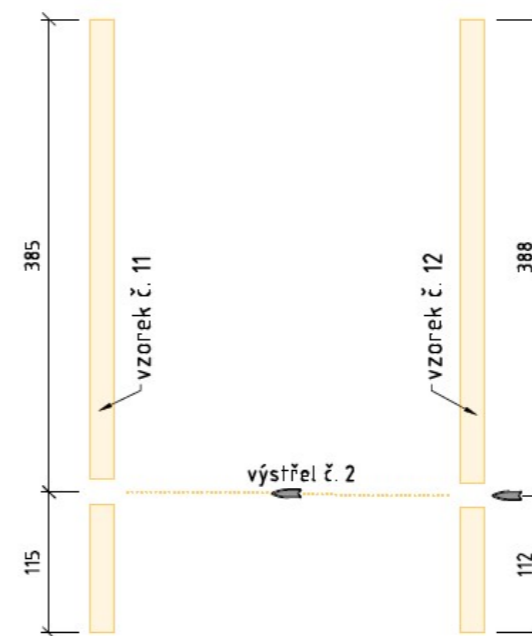
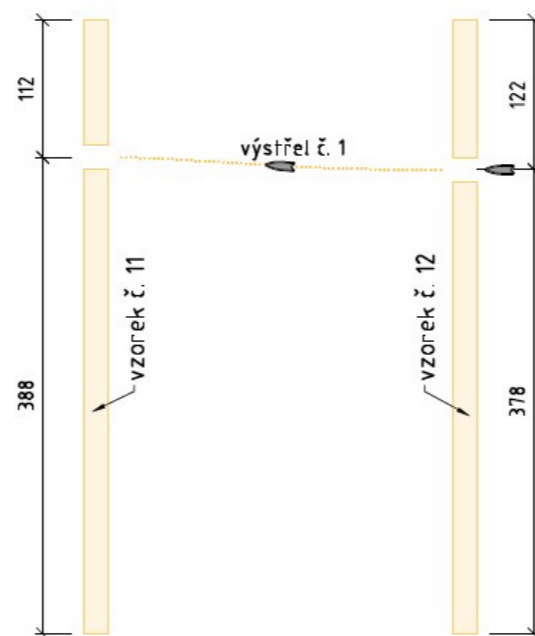
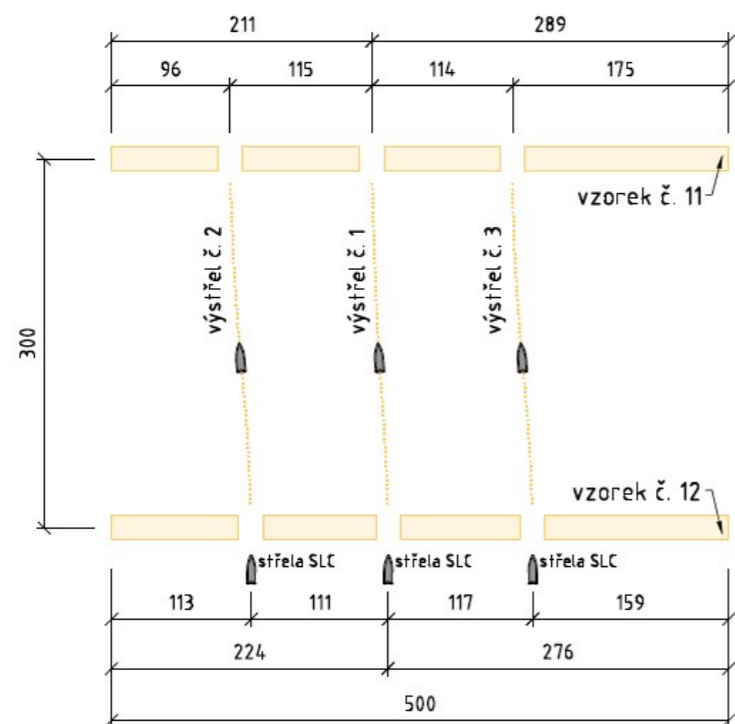
Nejzajímavější změna trajektorie střely je pak u čtvrtého balistického testu, kde došlo ke změně trajektorie střely o 29 mm v půdorysném směru a o 24 mm ve výškovém směru, a to opět směrem vzhůru. Velice pravděpodobně byla střela před deskou (označenou vzorek č. 3) pod takovým úhlem, že již neměla dostatek penetračního potenciálu a nedokázala prorazit desku, jako se tomu stalo u ostatních dvou výstřelů.

V posledních dvou balistických testech jsou výsledky velmi obdobné, a to díky podobnému rozložení desek. V půdorysném směru se při pátém balistickém testu střela stočila o 14 mm a v šestém testu o 16 mm. Výšková změna v těchto testech byla zanedbatelná, v řádech milimetrů. V posledním šestém balistickém testu ve výškovém směru bylo zajímavé, že při průletu první deskou došlo k odklonu střely o 3 mm oproti svému původnímu směru a následně při průletu druhou deskou se vrátila zpět do své prvotní trajektorie.

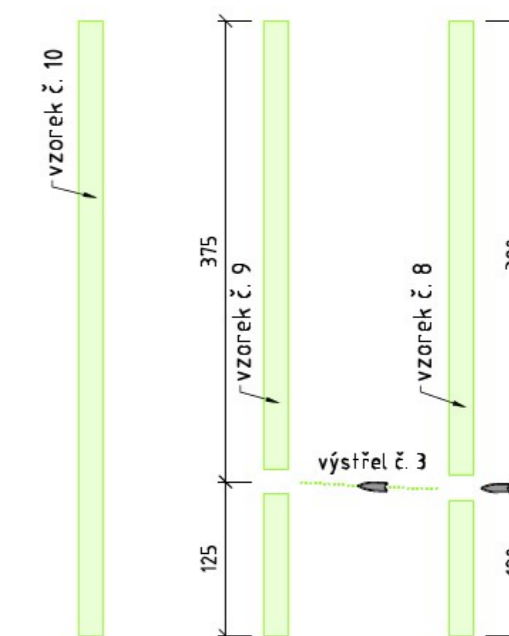
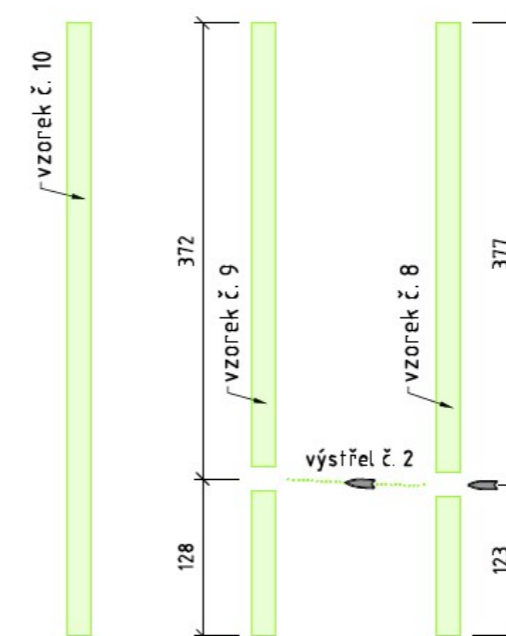
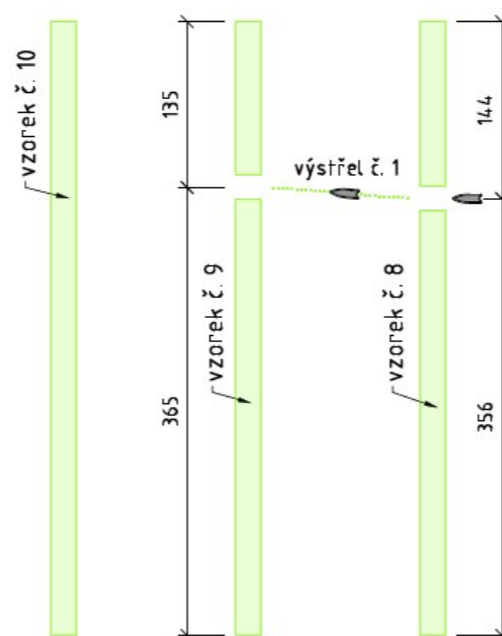
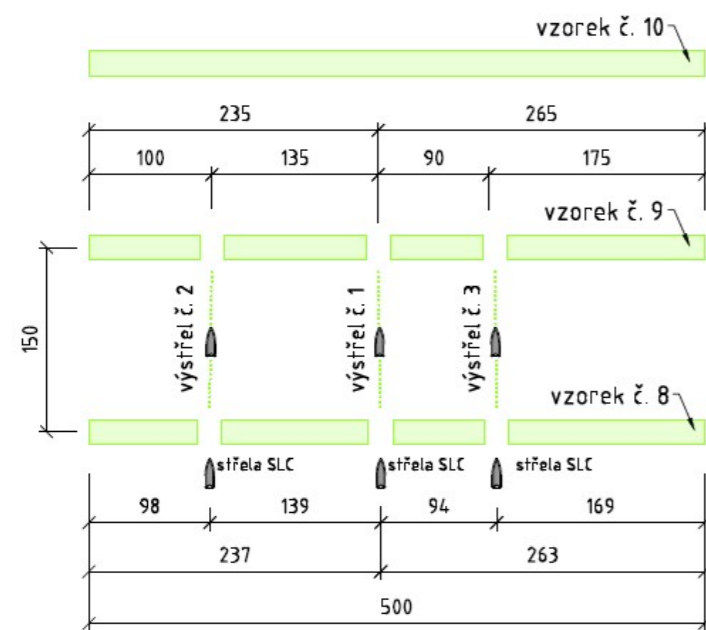
Velká většina střel měla tendenci se odklánět od své původní trajektorie vlevo a směrem vzhůru (bráno z pohledu, jak střela procházela deskami).

Na následujících stránkách je schematické zobrazení jednotlivých trajektorií střel.

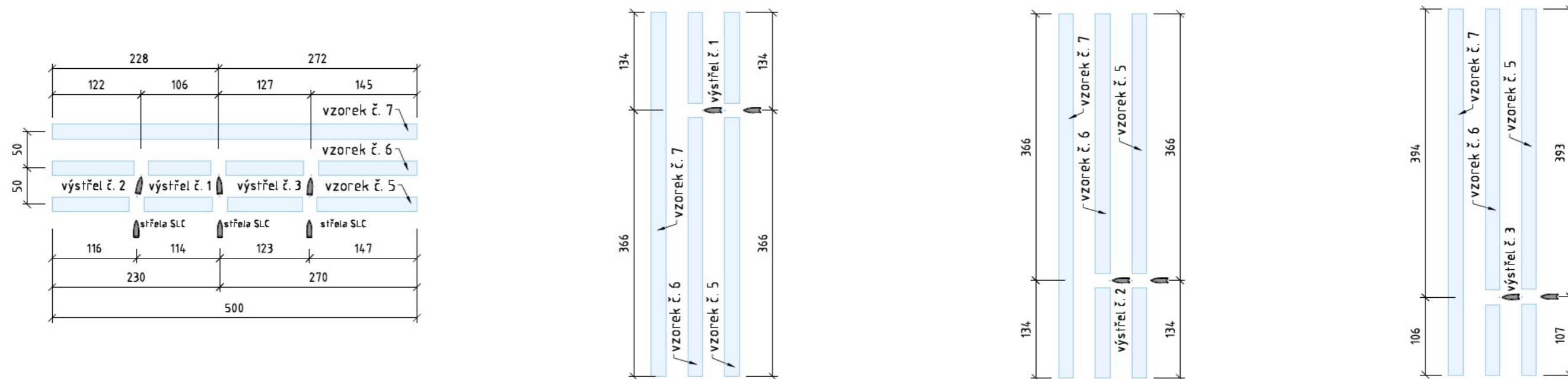
5.5.1 Trajektorie střel mezi deskami číslo 11 a 12



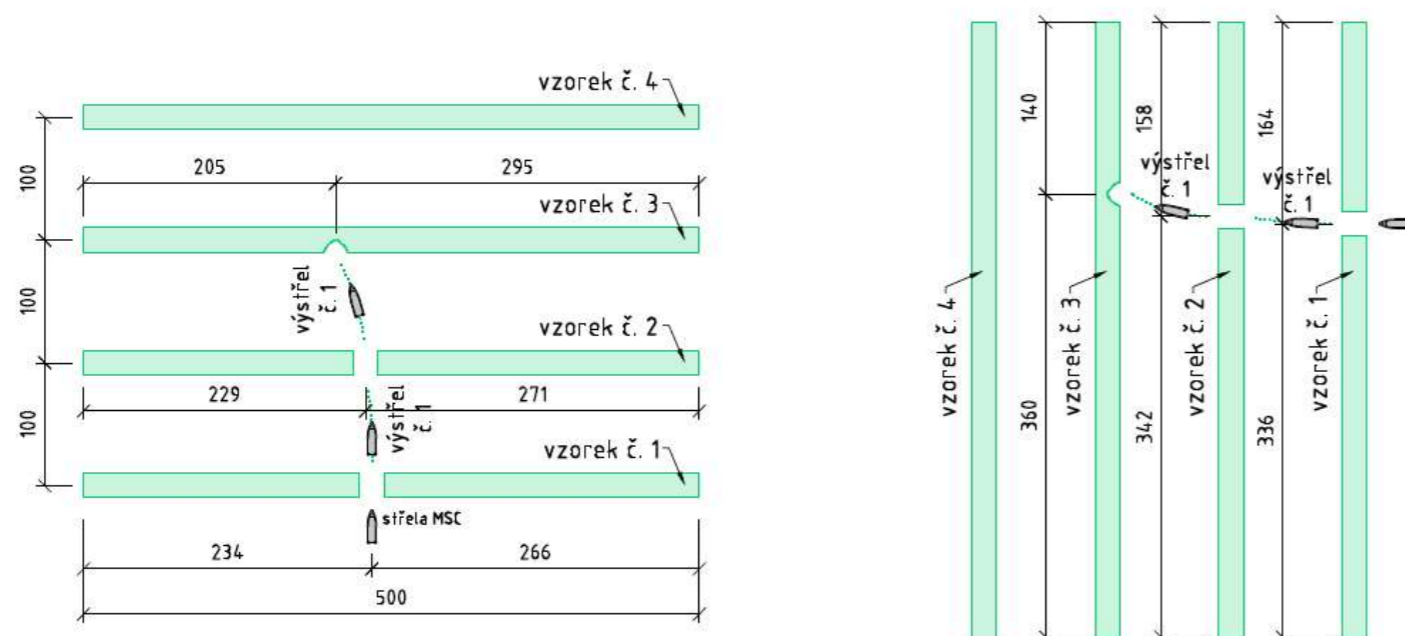
5.5.2 Trajektorie střel mezi deskami číslo 8, 9 a 10



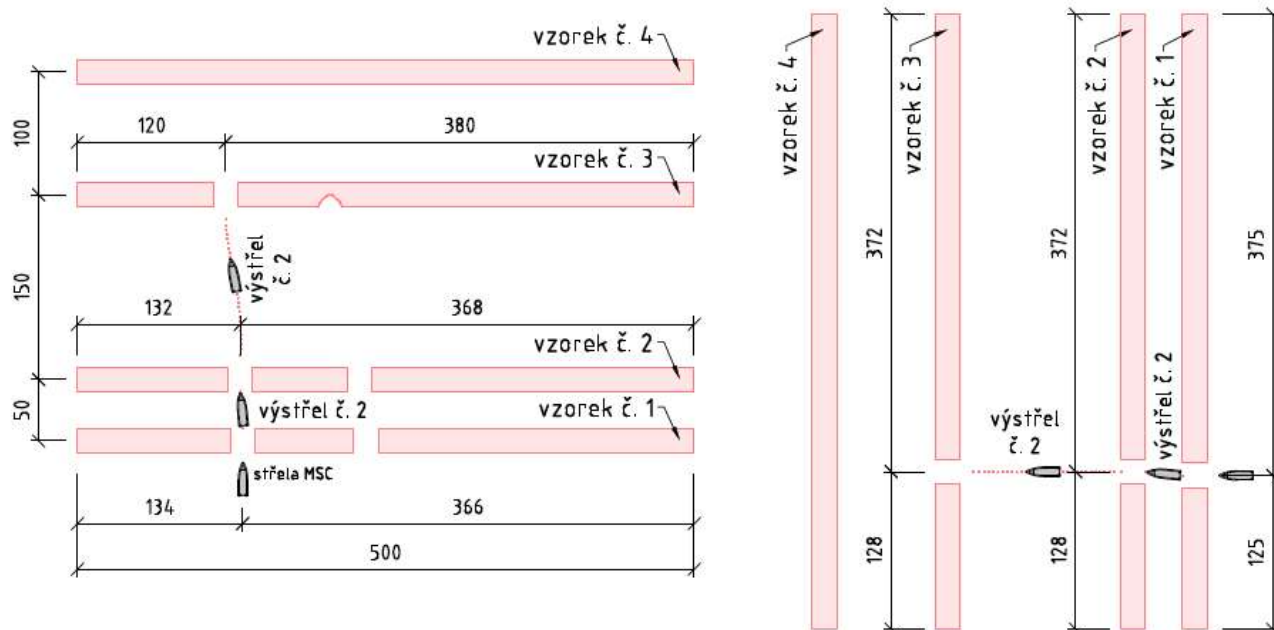
5.5.3 Trajektorie střel mezi deskami číslo 5, 6 a 7



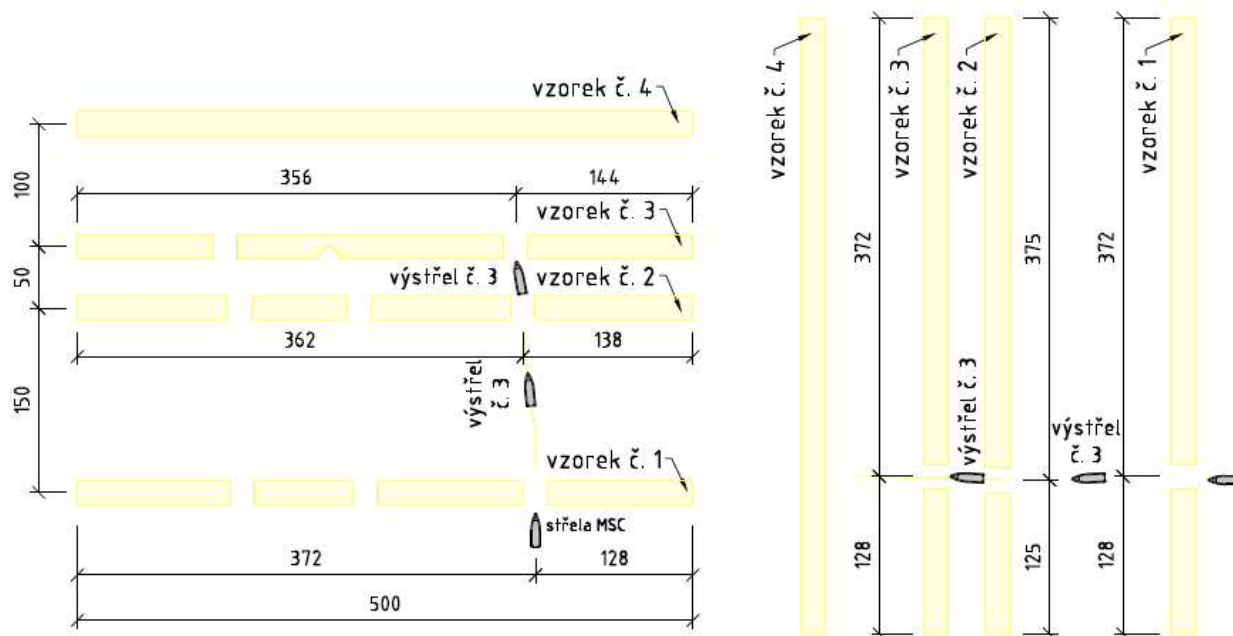
5.5.4 Trajektorie první střely mezi deskami 1, 2, 3 a 4



5.5.5 Trajektorie druhé střely mezi deskami 1, 2, 3 a 4



5.5.6 Trajektorie třetí střely mezi deskami 1, 2, 3 a 4



6 Závěr

V úvodní rešeršní části práce jsou uvedeny informace, které se zaměřují na problematiku složení betonu, vláken do betonu, a také na vysokohodnotné a ultra vysokohodnotné betony. Kromě toho jsou shrnuty informace jak o odolnosti UHPFRC betonů na náraz projektilu, tak i o experimentálních balistických testech, které jsou tématem této práce.

Tato práce se zaměřuje na návrh experimentálního programu, výrobu vzorků pro daný experiment a pro odzkoušení mechanických vlastností ultra vysokohodnotného betonu.

Bylo naplánováno, že balistický experiment proběhne v měsíci březnu roku 2020. Tento plán zkomplikovala rozvíjející se pandemie koronaviru a vládní opatření. Bylo nutné balistický experiment odložit na konec dubna roku 2020 a s měsíčním zpožděním se tedy změnily i plány vyhodnocení z důvodu časových úspor.

V průběhu experimentu se nepotvrdila původní myšlenka a naplánovaný experimentální program, a tak muselo dojít k jistým změnám plánu zkoušení vzorků.

Na odstřílených deskách byly vizuálně vyhodnoceny škody po průletu projektilů. Dále se zkoumaly plochy jednotlivých kráterů, pomocí profilometru se zjišťoval jejich průřez. Naměřené hodnoty ústových rychlostí z optických hradel byly využity k vyhodnocení dopadových rychlostí. Při posuzování ploch kráterů bylo očekáváno, že na grafech bude vidět určitý trend chování mezi jednotlivými balistickými testy. To se však při vyhodnocení nepotvrdilo. V závěru vyhodnocení byly naměřeny a zakresleny jednotlivé trajektorie střel, které při průletu jednotlivými deskami měnily svůj směr.

Jelikož se jednalo o výzkum chování vrstvených desek, které doposud nebylo zkoumáno, při průběhu experimentu se projevil skutečnosti, které nebyly předpokládány. Na těchto výše uvedených balistických testech je naznačeno, jaký vliv vrstvení desek má.

Tato bakalářská práce je pouhým nahlédnutím do oblasti vrstvení desek z ultra vysokohodnotných vláken vyztužených cementových kompozitů na odolnost proti nárazu

projektilu. Jedná se rozhodně o velice zajímavé téma, které stojí za hlubší bádání. Nastavit vhodný experimentální program však není úplně snadné, neboť se zde nachází mnoho neznámých vlivů a faktorů, které významně ovlivňují budoucí výsledky, jako např. vzdálenosti mezi jednotlivými deskami, počet zkoušených desek, různá tloušťka desek, jejich možné natačení rovnoběžně či proti sobě, případně vkládání vložek z různých materiálů mezi zkoušené desky či různé typy nábojů.

Při dalším zkoumání v této oblasti by bylo potřeba rozhodně využít vysokorychlostní kameru, která by zajistila přesnější a jistější výsledky při vyhodnocení stavu jednotlivých desek. Také by bylo potřeba vytvořit rozsáhlejší experimentální program, který čítá více zkoušených vzorků pro lepší určení trendu chování vrstvených desek.

7 Přílohy

7.1.1 Výsledky mechanických vlastností doprovodných těles

tabulka č. 16: Vyhodnocení objemových hmotností doprovodných těles

Datum betonáže	Číslo vzorku	Hmotnost vzorku [g]	Rozměry [mm]						Objemová hmotnost vzorku [kg/m ³]
			šířka		výšky		délka		
			jednotlivě	průměrná	jednotlivě	průměrná	jednotlivě	průměrná	
04. 12. 2019	1	605,42	40,04	40,00	40,63	40,64	159,65	159,58	2333
			39,95		40,71		159,57		
			40,02		40,59		159,52		
	2	601,61	40,11	40,06	40,58	40,51	159,55	159,55	
			40,08		40,51		159,52		
			39,99		40,45		159,59		
	3	600,35	39,89	39,92	40,58	40,60	159,63	159,60	
			39,95		40,66		159,61		
			39,93		40,57		159,57		
09. 12. 2019	4	604,75	39,97	39,95	41,44	41,71	159,54	159,54	2274
			39,94		41,92		159,50		
			39,95		41,78		159,59		
	5	622,46	40,29	40,29	42,41	42,66	159,51	159,52	
			40,31		42,81		159,49		
			40,26		42,77		159,55		
	6	606,12	40,12	40,17	40,46	40,34	159,61	159,59	
			40,22		40,17		159,62		
			40,18		40,39		159,54		
13. 12. 2019	7	610,02	39,98	39,98	41,67	41,63	159,53	159,56	2297
			39,97		41,78		159,64		
			39,99		41,45		159,51		
	8	615,37	40,10	40,07	41,23	41,67	159,47	159,55	
			40,08		41,79		159,63		
			40,04		41,98		159,56		
	9	610,79	40,00	39,98	42,39	42,00	159,54	159,58	
			39,97		42,04		159,55		
			39,98		41,57		159,65		
16. 12. 2019	10	593,45	39,90	39,70	39,94	40,00	159,55	159,56	2342
			39,65		39,97		159,51		
			39,55		40,10		159,61		
	11	602,18	39,97	39,94	40,54	40,59	159,66	159,62	
			39,89		40,49		159,62		
			39,95		40,73		159,58		
	12	612,71	40,35	40,31	40,79	40,37	159,56	159,51	
			40,29		40,33		159,47		
			40,30		40,00		159,50		

Datum betonáže	Číslo vzorku	Hmotnost vzorku [g]	Rozměry [mm]						Objemová hmotnost vzorku [kg/m ³]
			šířka		výšky		délka		
			jednotlivě	průměrná	jednotlivě	průměrná	jednotlivě	průměrná	
18. 12. 2019	13	590,06	40,14	40,18	41,13	40,72	159,60	159,61	2357
			40,22		40,80		159,65		
			40,19		40,22		159,58		
	14	591,59	40,38	40,39	40,37	40,81	159,55	159,51	
			40,38		41,05		159,52		
			40,41		41,00		159,47		
	15	598,29	39,95	39,92	41,61	41,35	159,47	159,52	
			39,91		41,55		159,58		
			39,90		40,89		159,52		
15. 01. 2020	16	616,68	40,35	40,25	40,67	41,01	159,48	159,54	2416
			40,25		40,98		159,63		
			40,14		41,38		159,51		
	17	612,34	40,31	40,27	40,85	40,74	159,58	159,53	
			40,29		40,65		159,49		
			40,21		40,72		159,52		
	18	613,66	40,12	40,11	41,45	41,69	159,58	159,59	
			40,14		41,89		159,63		
			40,08		41,73		159,55		
Průměrná objemová hmotnost vysokohodnotného betonu [kg/m ³]								2350	

tabulka č. 17: Vyhodnocení pevností v tahu ohybem doprovodných těles

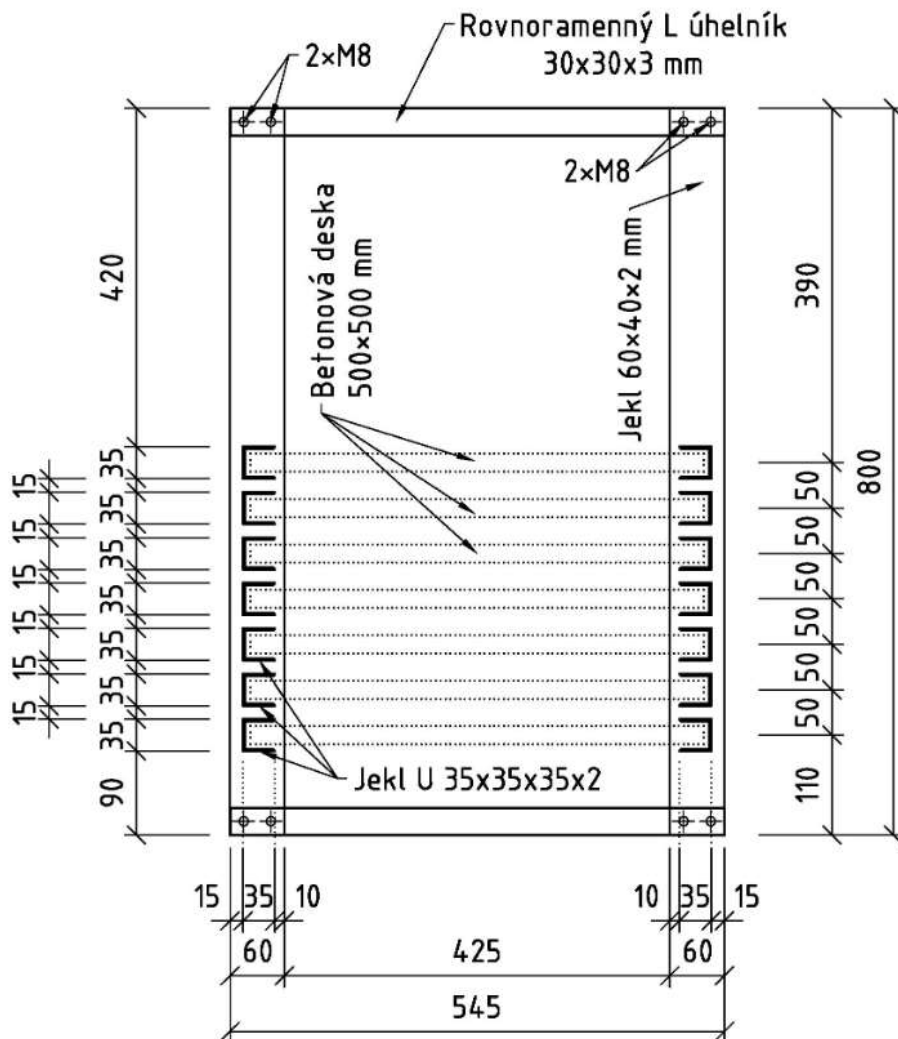
Datum betonáže	Číslo vzorku	Maximální zatěžovací síla [kN]	Vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]	Průměrná šířka příčného průřezu [mm]	Průměrná výška příčného průřezu [mm]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
04. 12. 2019	1	10,5	100	40,00	40,64	23,84
	2	10,1		40,06	40,51	23,05
	3	8,8		39,92	40,60	20,06
09. 12. 2019	4	9,5	100	39,95	41,71	20,50
	5	10,6		40,29	42,66	21,68
	6	10,4		40,17	40,34	23,86
13. 12. 2019	7	10,2	100	39,98	41,63	22,08
	8	10,0		40,07	41,63	21,56
	9	10,3		39,98	42,00	21,91
16. 12. 2019	10	10,8	100	39,70	40,00	25,50
	11	7,9		39,94	40,59	18,01
	12	9,6		40,31	40,37	21,92
18. 12. 2019	13	9,5	100	40,18	40,72	21,39
	14	8,3		40,39	40,81	18,51
	15	10,4		39,92	41,35	22,86
15. 01. 2020	16	9,8	100	40,25	41,01	21,72
	17	8,9		40,27	40,74	19,97
	18	7,5		40,11	41,69	16,14
Průměrná pevnost vysokohodnotného betonu v tahu ohybem [MPa]						21,4

tabulka č. 18: Vyhodnocení pevností v tlaku doprovodných těles

Datum betonáže	Číslo vzorku	Maximální zatěžovací síla [kN]	Zatěžovací plocha [mm ²]	Pevnost v tlaku jednotlivých zlomků [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku jednotlivých trámečků [MPa]
04. 12. 2019	1	178,5	1600	111,56	107,72
		166,2		103,88	
	2	187,5		117,19	109,69
		163,5		102,19	
	3	173,0		108,13	110,78
		181,5		113,44	
09. 12. 2019	4	173,8	1600	108,63	106,81
		168,0		105,00	
	5	171,4		107,13	107,06
		171,2		107,00	
	6	179,3		112,06	111,97
		179,0		111,88	
13. 12. 2019	7	169,1	1600	105,69	103,69
		162,7		101,69	
	8	173,8		108,63	110,38
		179,4		112,13	
	9	188,4		117,75	118,88
		192,0		120,00	
16. 12. 2019	10	170,0	1600	106,25	106,06
		169,4		105,88	
	11	174,0		108,75	105,94
		165,0		103,13	
	12	174,2		108,88	108,97
		174,5		109,06	
18. 12. 2019	13	178,2	1600	111,38	111,69
		179,2		112,00	
	14	169,8		106,13	108,19
		176,4		110,25	
	15	198,1		123,81	119,84
		185,4		115,88	
15. 01. 2020	16	193,4	1600	120,88	120,28
		191,5		119,69	
	17	194,0		121,25	120,38
		191,2		119,50	
	18	212,8		133,00	135,25
		220,0		137,50	
Průměrná pevnost vysokohodnotného betonu v tlaku [MPa]					112,4

7.1.2 Výrobní výkresy držáku

PŮDORYS



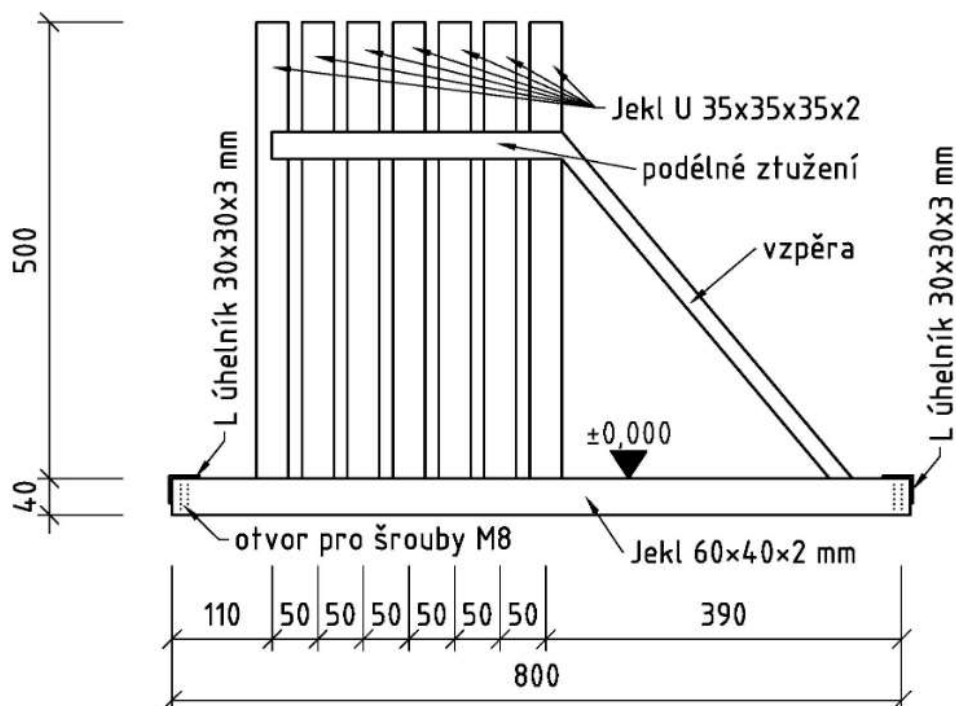
SOUPIS MATERIÁLU

Prvek konstrukce držáku	Počet [ks]	Délka kusu [mm]	Celková délka [mm]	Hmotnost [kg]
Jekl 60x40x2 mm	2	800	1600	4,8
L úhelník 30x30x3 mm	2	545	1100	1,3
Jekl U 35x35x35x2 mm	14	500	7000	11,2
Šrouby M8	8	---	---	---
Celková hmotnost držáku				17,3

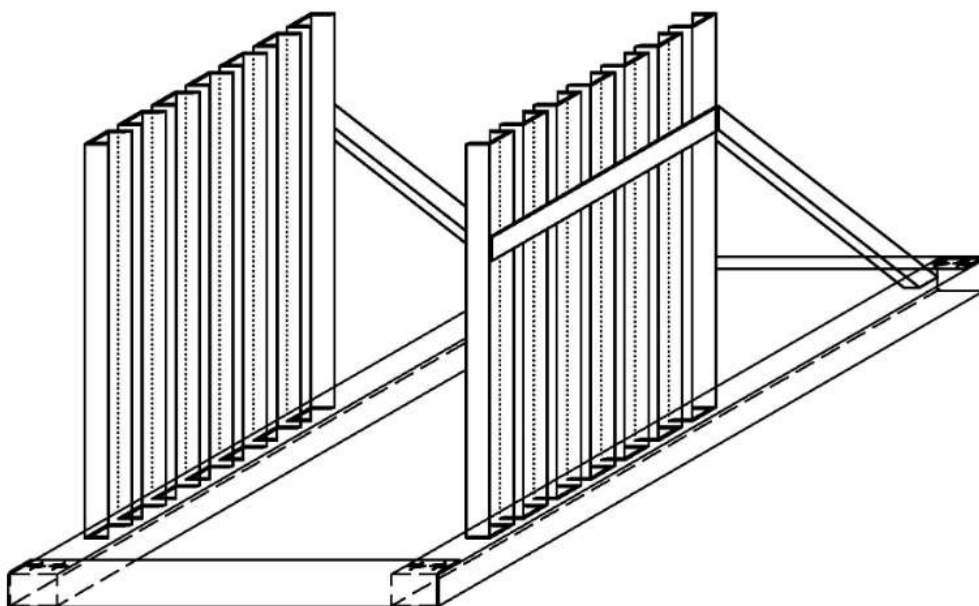
PŮDORYS DRŽÁKU

VÝKRES ①

POHLED Z BOKU



AXONOMETRIE

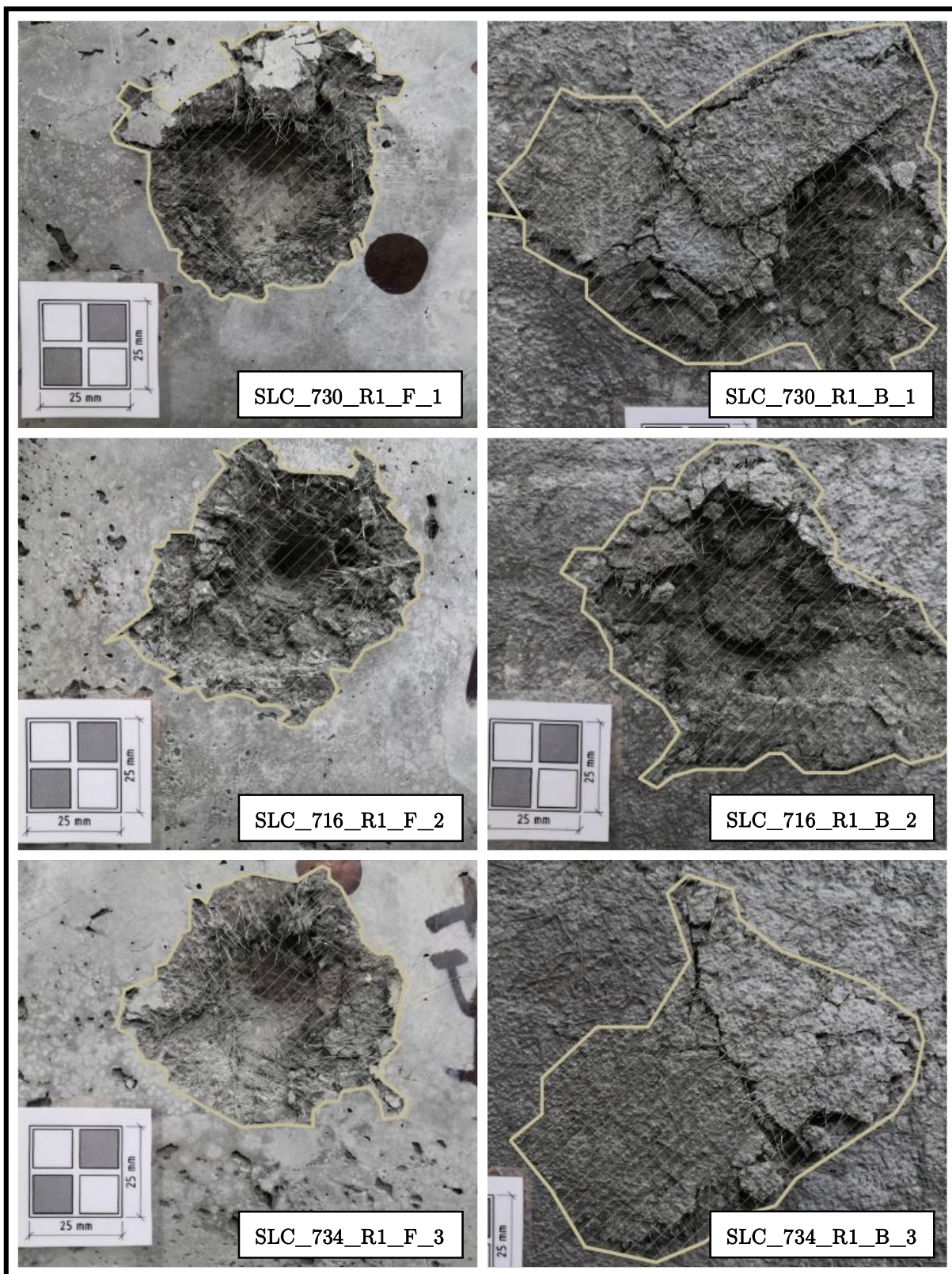


BOČNÍ POHLED A AXONOMETRIE

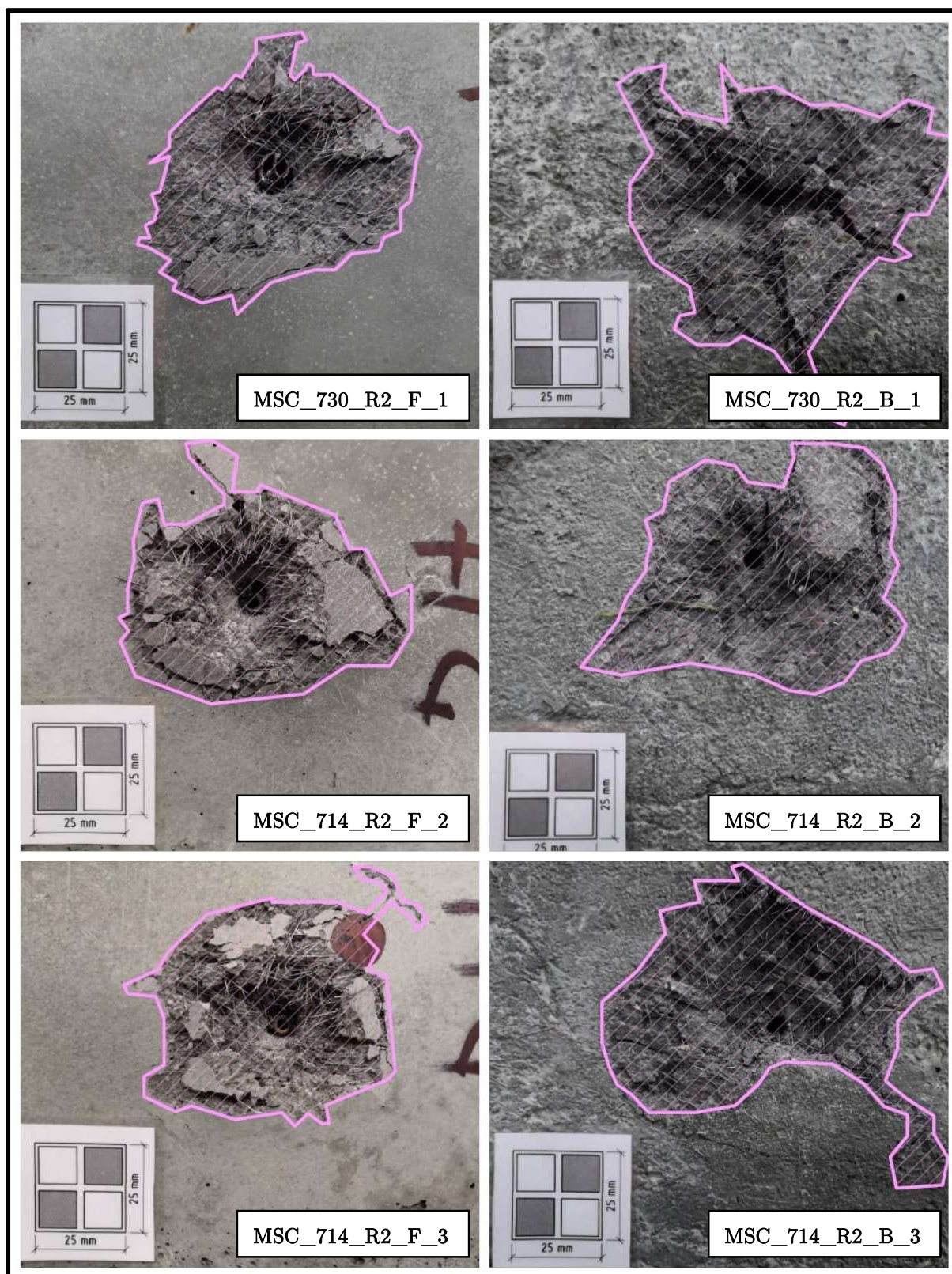
VÝKRES ②

7.1.3 Fotografie ploch jednotlivých kráterů

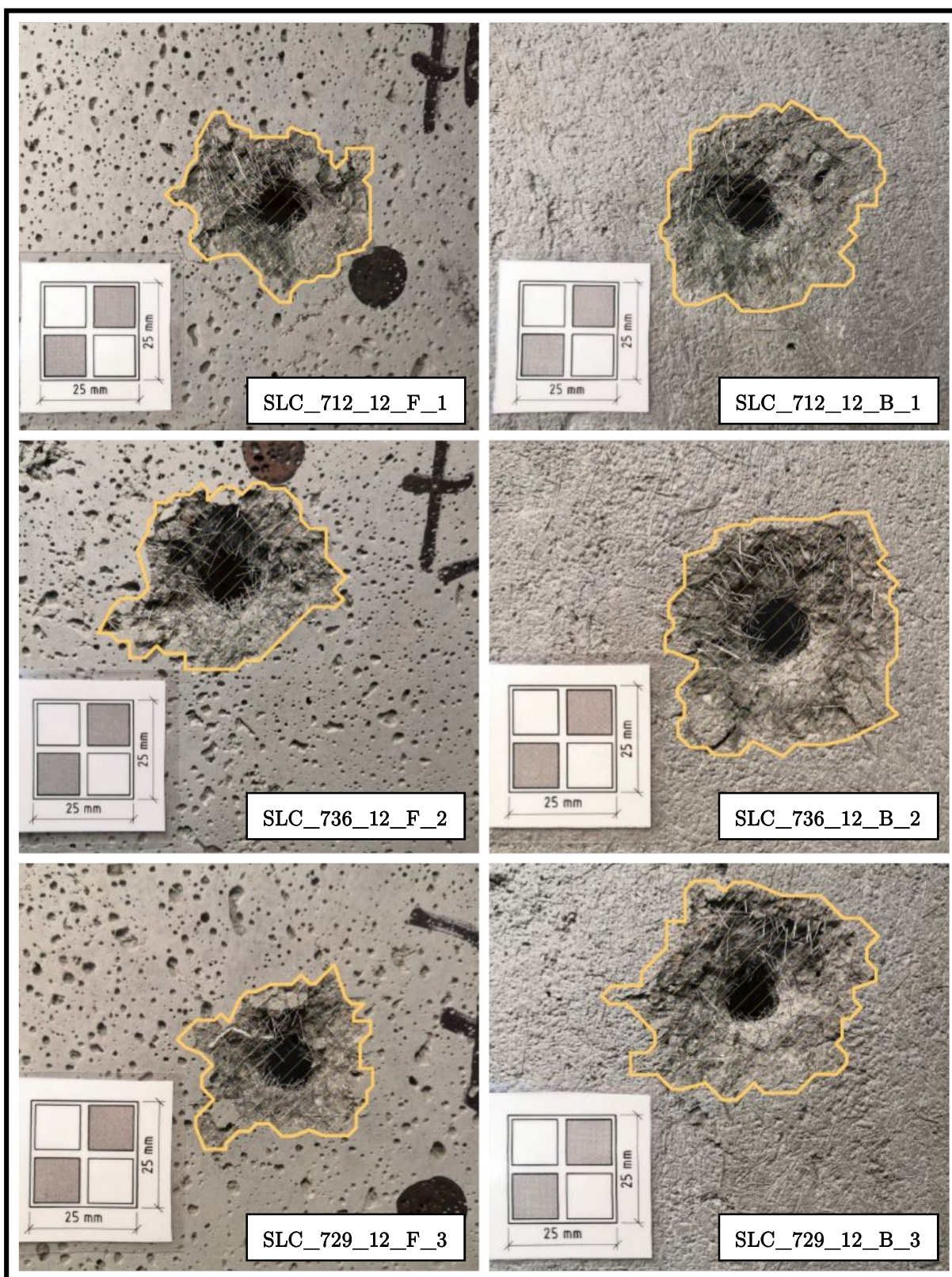
Následující fotografie patří referenční desce s označením číslo R1.



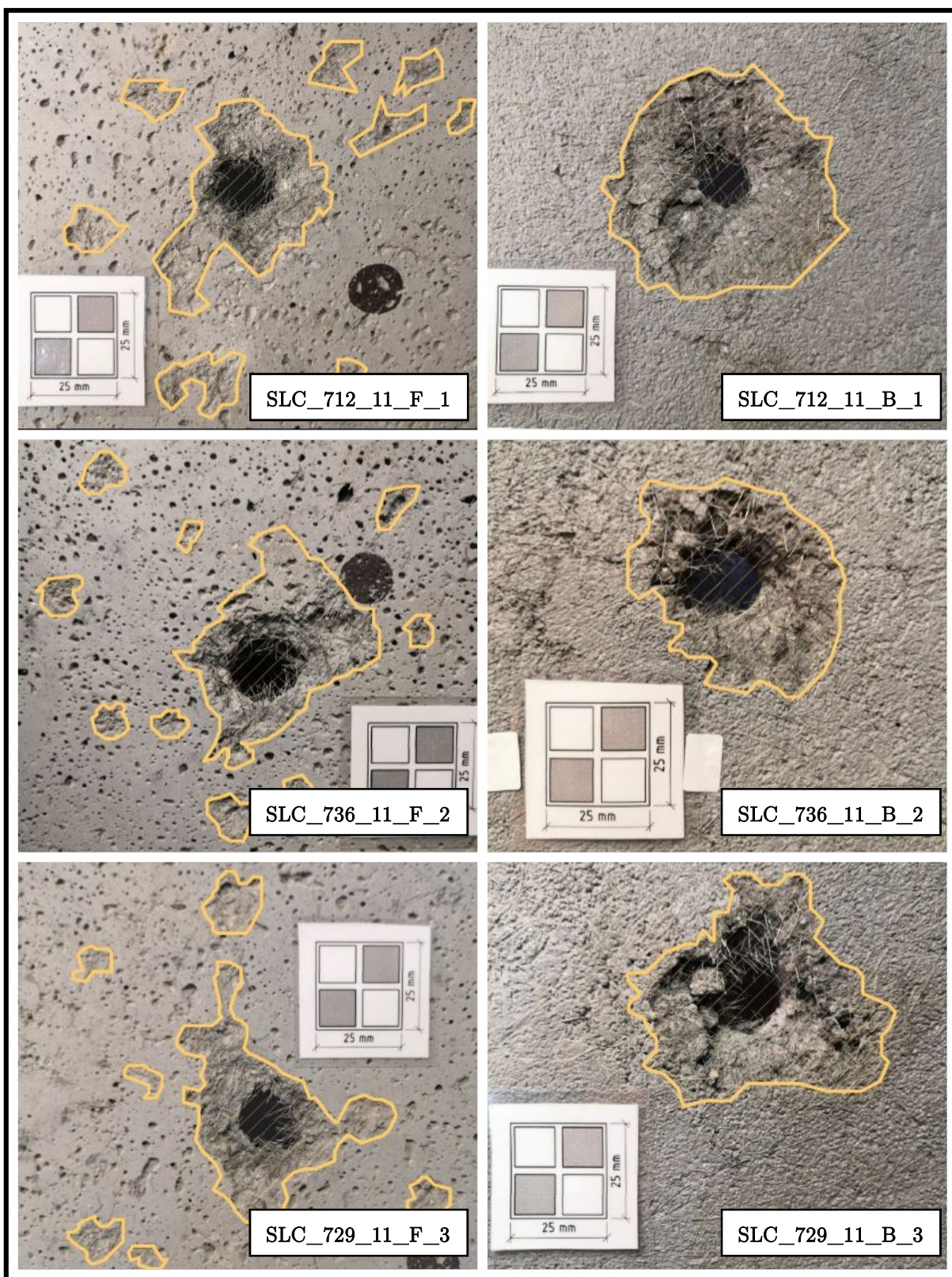
Následující fotografie patří referenční desce s označením číslo R2.



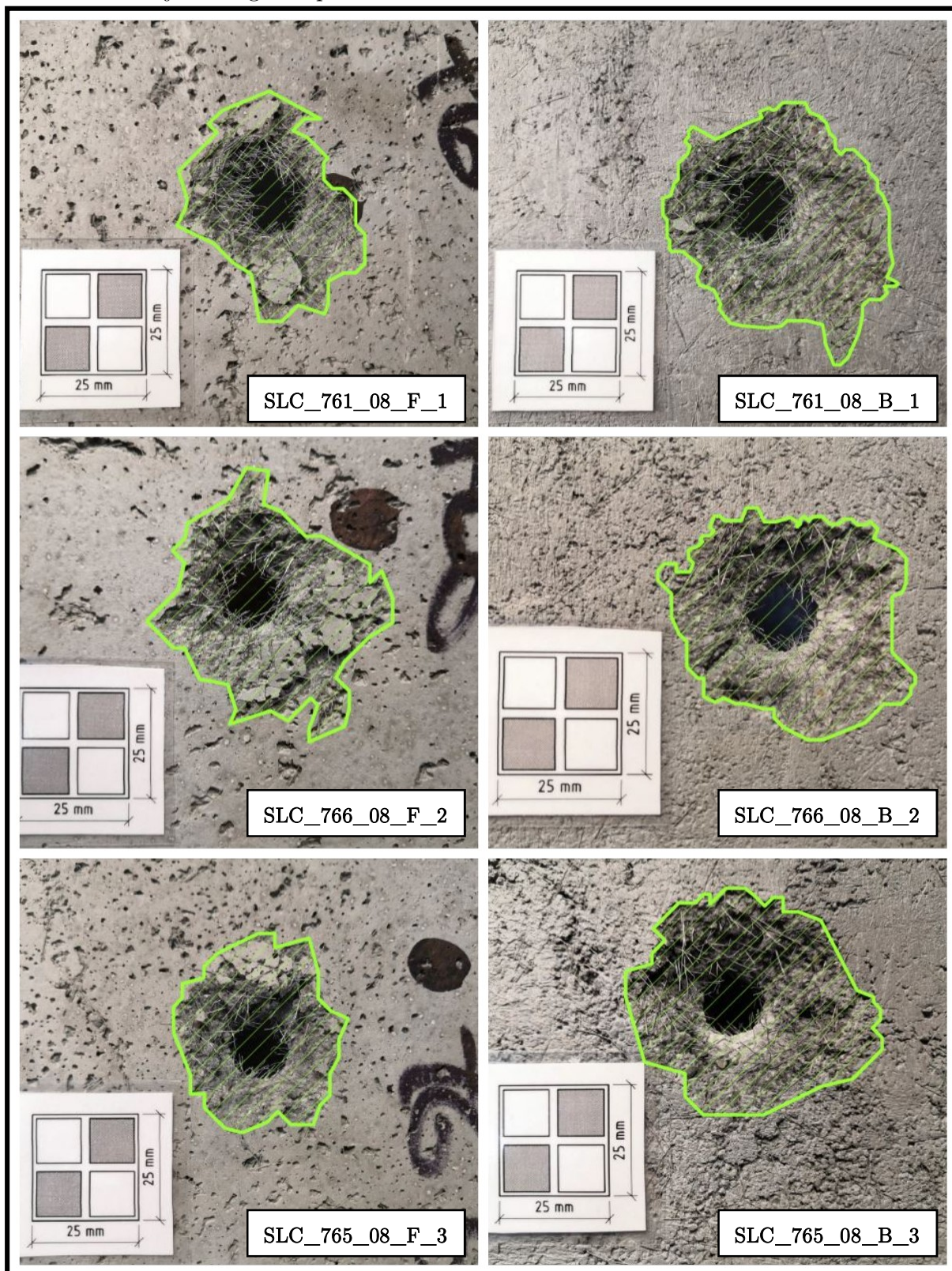
Následující fotografie patří desce s označením číslo 12.



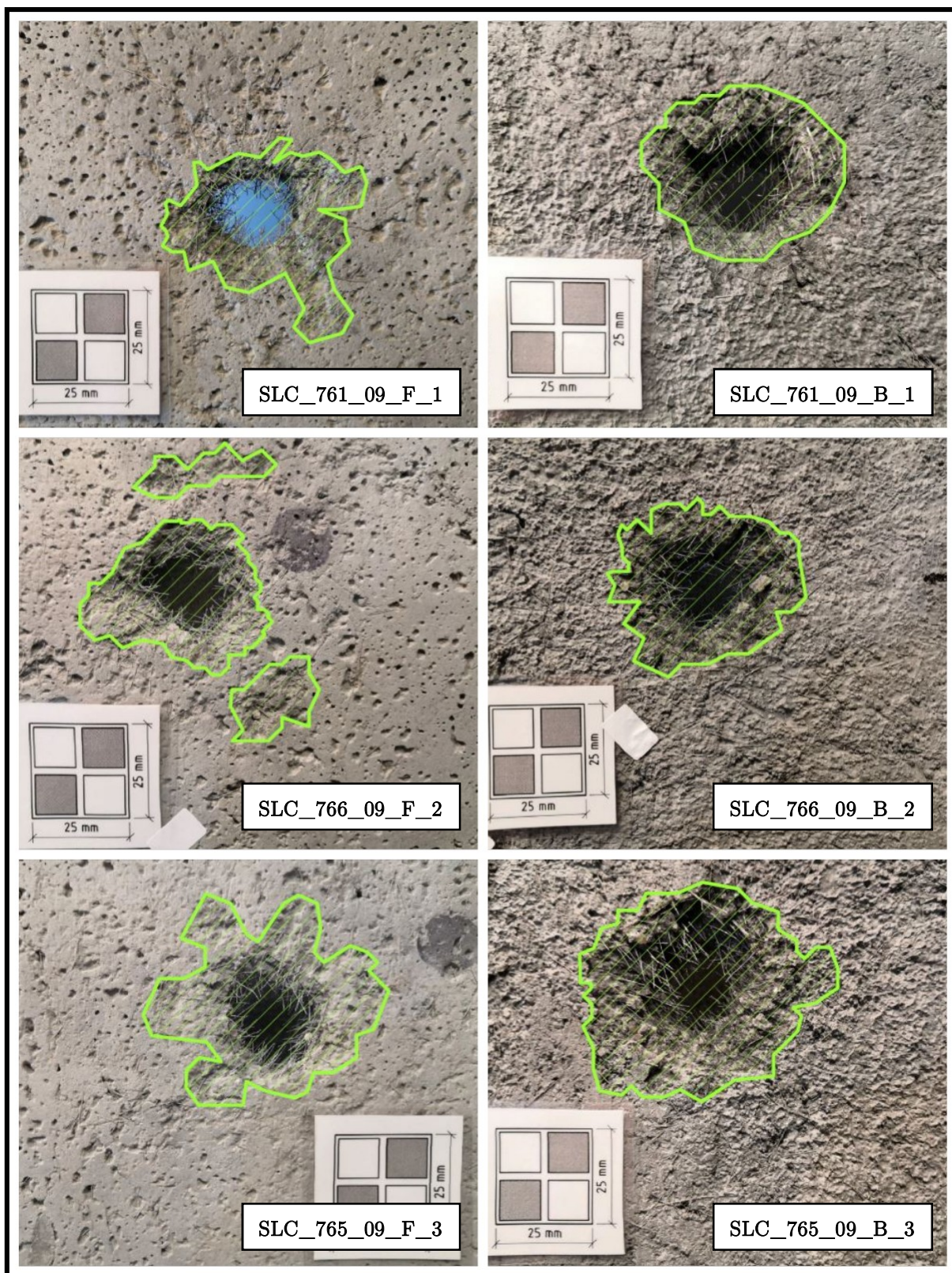
Následující fotografie patří desce s označením číslo 11.



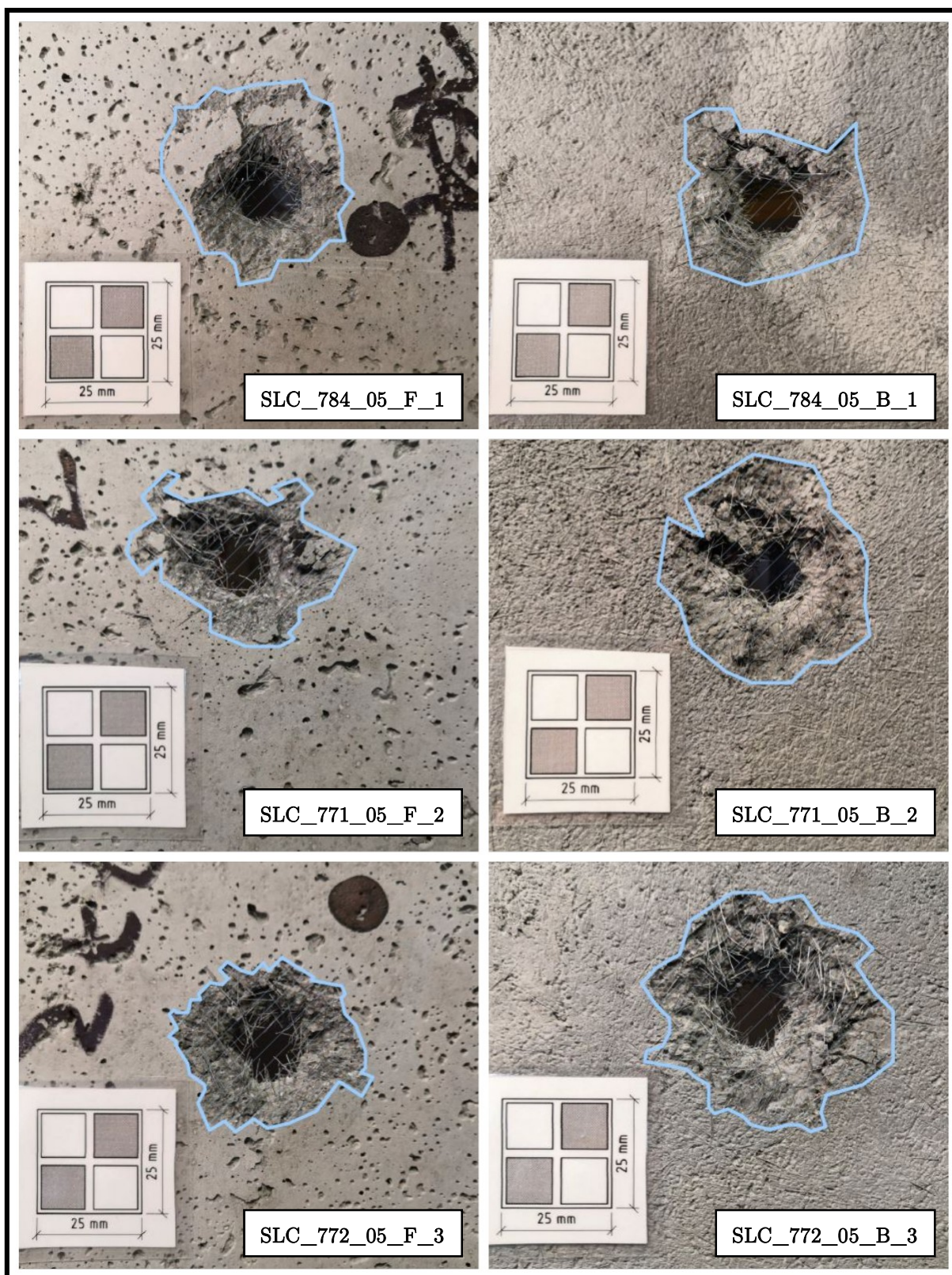
Následující fotografie patří desce s označením číslo 8.



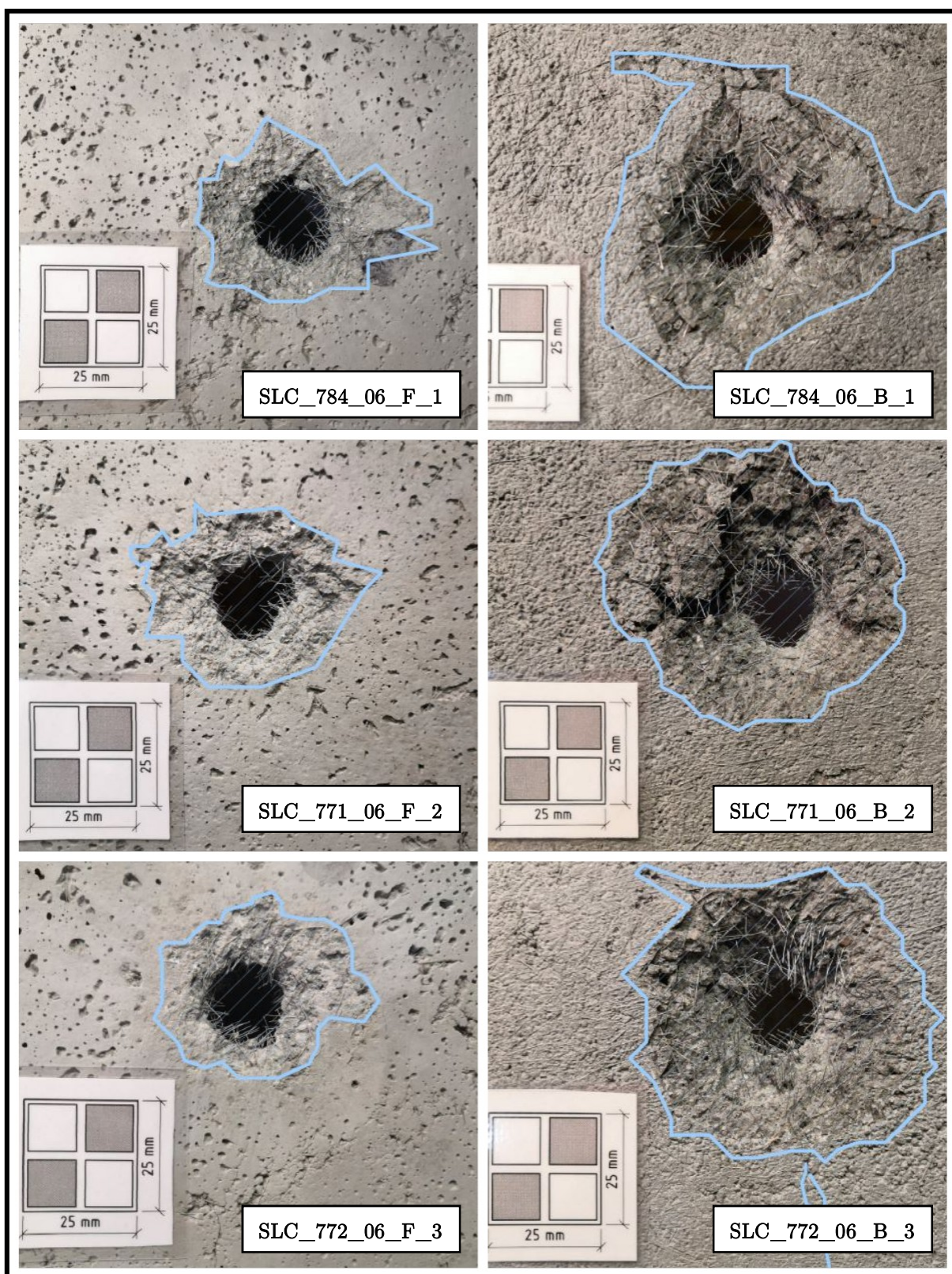
Následující fotografie patří desce s označením číslo 9.



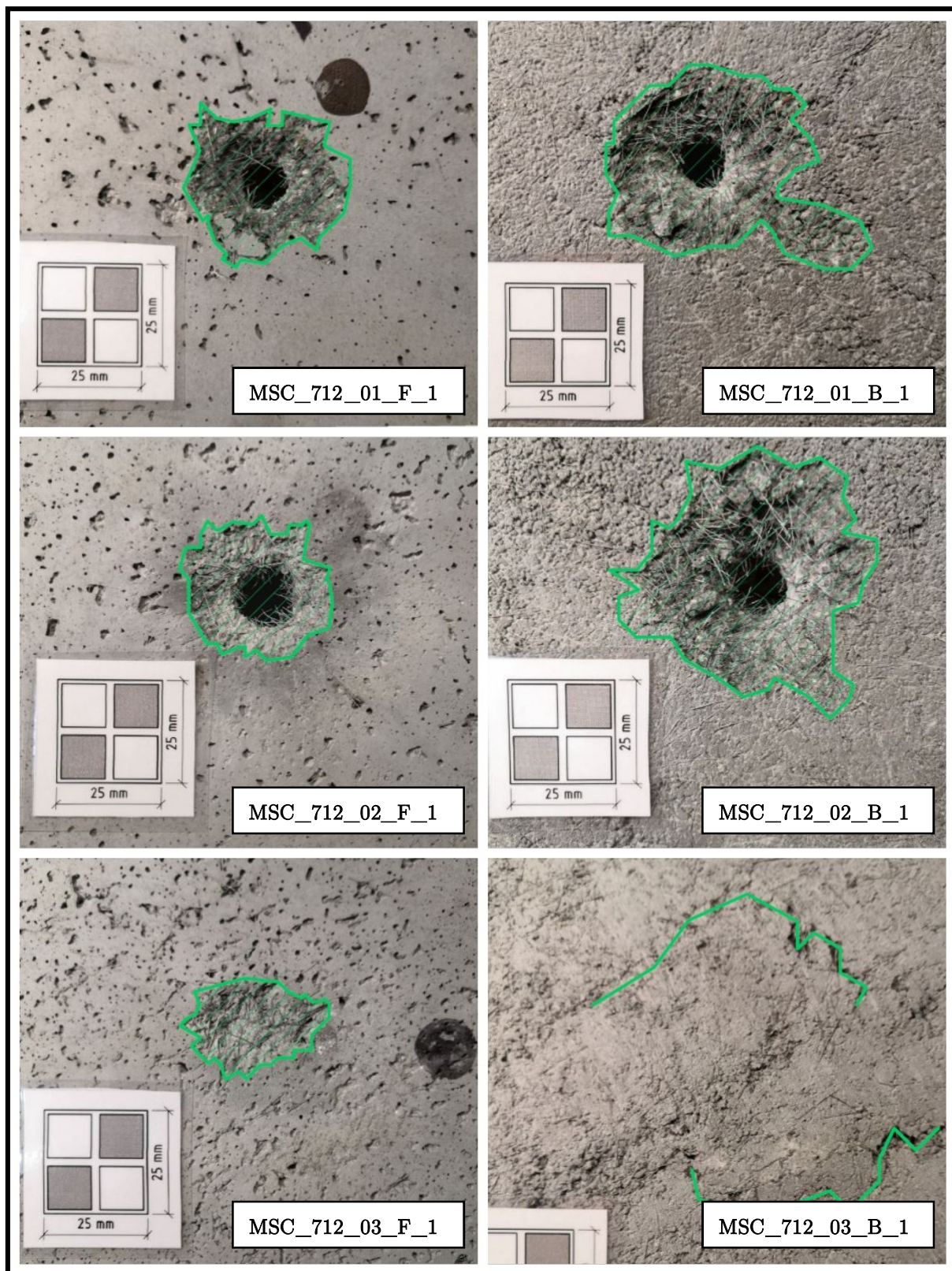
Následující fotografie patří desce s označením číslo 5.



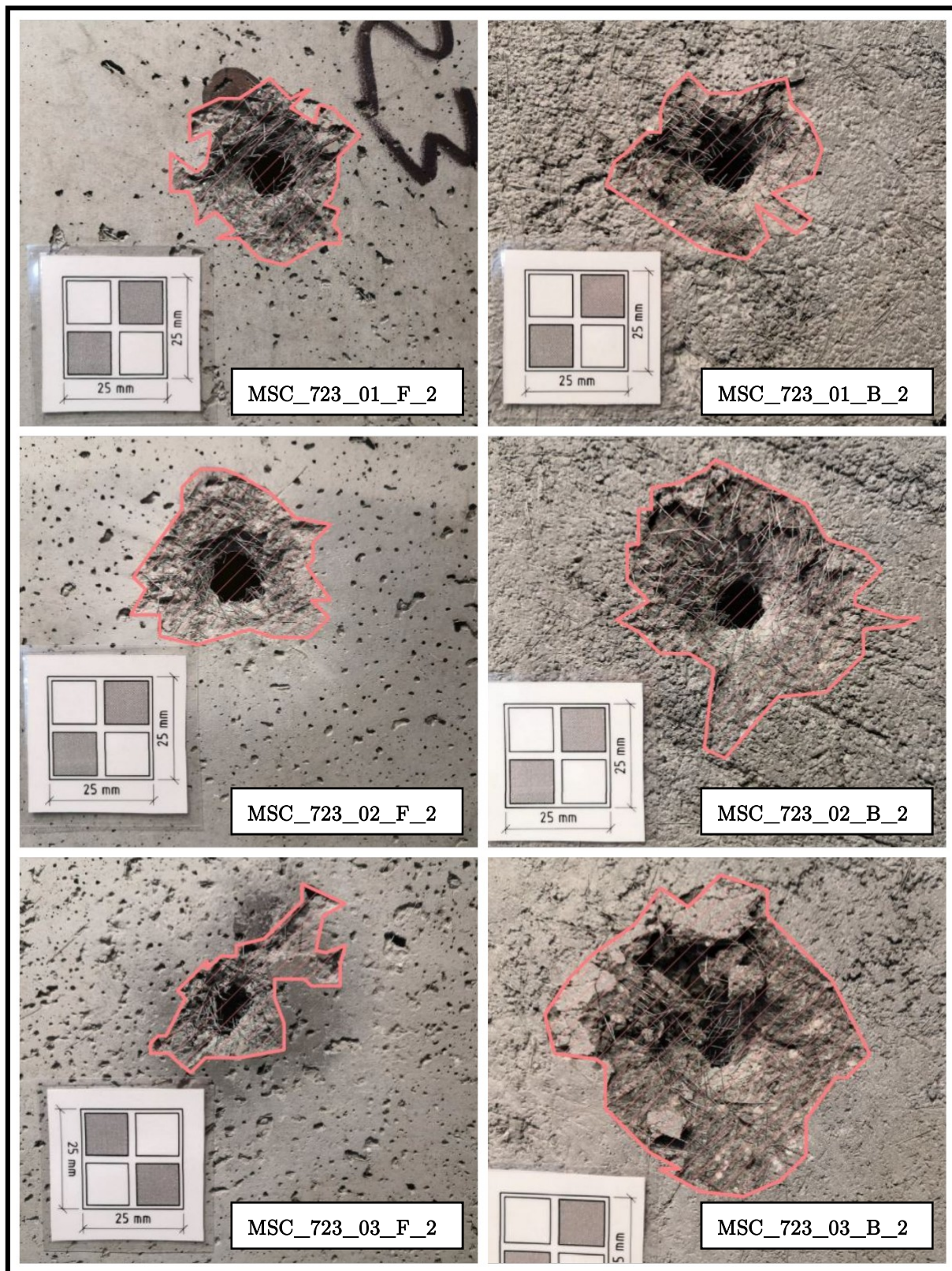
Následující fotografie patří desce s označením číslo 6.



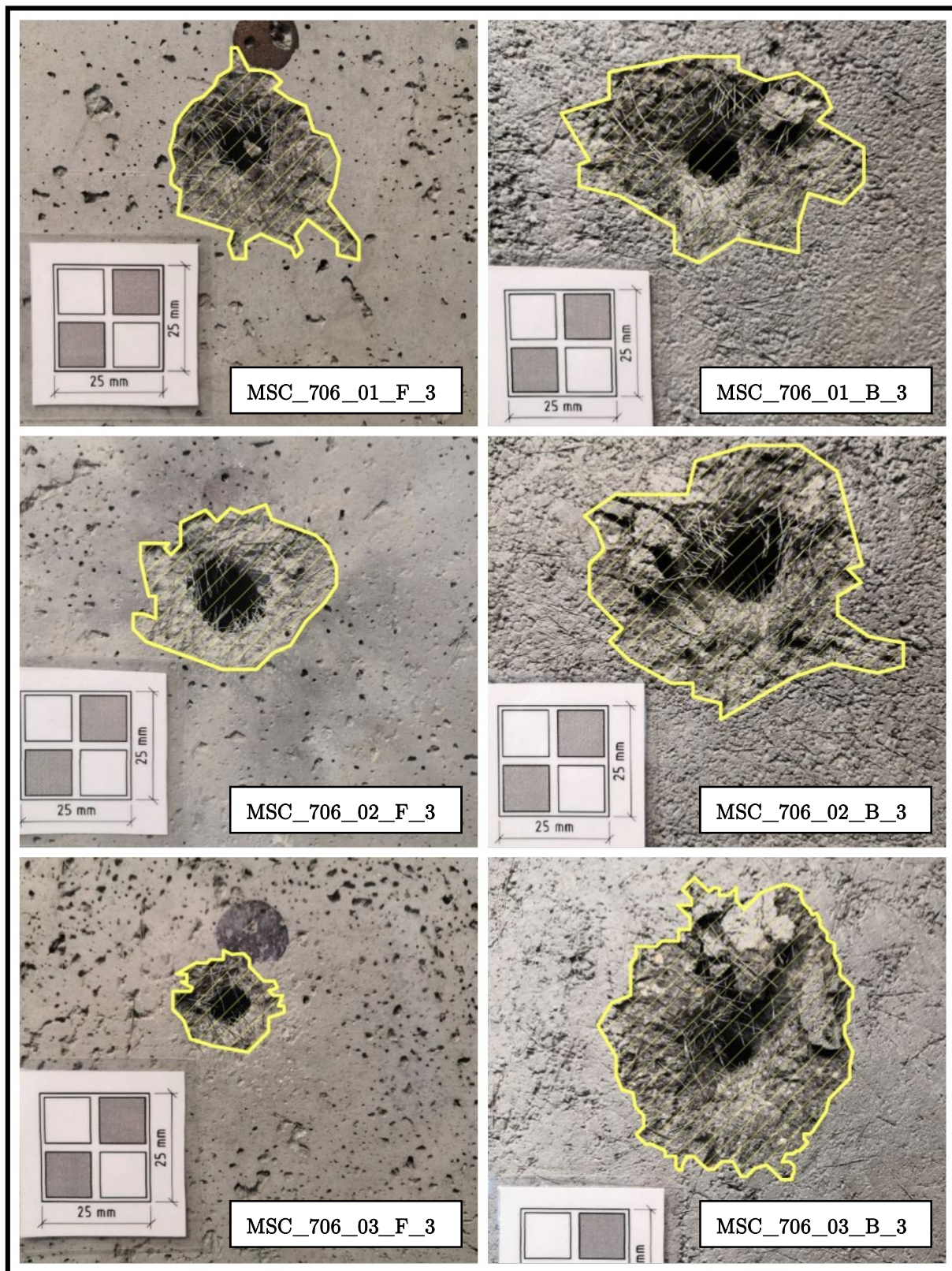
Následující fotografie patří deskám s označením číslo 1, 2, 3 a 4. Jedná se o celý čtvrtý balistický test.



Následující fotografie patří deskám s označením číslo 1, 2, 3 a 4. Jedná se o celý pátý balistický test.



Následující fotografie patří deskám s označením číslo 1, 2, 3 a 4. Jedná se o celý šestý balistický test.



Bibliografie

- [1] **Colleparidi, Mario.** *Moderní beton.* Betonové stavitelství. Praha: Informační centrum ČKAIT, s r.o., 2009. ISBN 978-80-87093-75-7
- [2] **Pytlík, Petr.** *Technologie betonu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [3] **Svoboda, Luboš a kolektiv.** *Stavební hmoty.* Bratislava: Vydavatelství Jaga group, s r.o., 2005. ISBN 80-8076-007-1.
- [4] **Pavlíková, Milena a Keppert, Martin.** *Chemie stavebních materiálů.* Praha: ČVUT v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04237-3.
- [5] **Pavlíková, Milena, Pavlík, Zbyšek a Hošek, Jiří.** *Materiálové inženýrství I.* Praha: ČVUT v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04932-7.
- [6] **Aïtcin, Pierre-Claude.** *Vysokohodnotný beton.* Betonové stavitelství. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [7] **Nedbal, František.** *Za betonem do Evropy.* Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 1998.
- [8] **Marek Vinkler.** *Voda v betonu.* Praha: Beton TKS, s r.o., 2018, **18(2)**, str. 49-53, ISSN 1213-3116.
- [9] **ČSN EN 206 +A1.** *Beton - specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [10] **Hela, Rudolf.** *Příměsi do betonu.* Praha: Beton TKS, s r.o., **15(2)**, str. 4-10, ISSN 1213-3116.
- [11] **Fládr, Josef.** *Technologie betonu [přednáška].* [online]. Praha: ČVUT v Praze, 03. říjen 2019. [citace: 3. březen 2020]
Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/fladrjos/vyuka/YTB/01_technologie.pdf
- [12] **Terzijski, Ivailo.** *Polyfunkční přísady do betonu - principy a možnosti návrhu podle požadavku konkrétní aplikace.* Brno : Vutium Brno, 2011. ISBN 978-80-214-4331-0.
- [13] **Vetchý, Jan.** *Přísady do betonů a malt I.* [Online]. 2015 [citace: 3. březen 2020]
Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-i/>

- [14] **Trtík, Karel.** *Technologie betonu.* Praha : ČVUT v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.
- [15] **Adil, Goran, T.Kevern, John a Mann, Daniel.** Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Constructions and building materials.* [Online]. 3. březen 2020, vol. 247, article 118453, [citace: 6. březen 2020], ISSN 0950-0618.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>
- [16] **Jingming, Cai, Jinlong, Pan, Xiaopeng, Li, Jiawei, Tan, Jiabin, Li.** Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers. *Constructions and building materials.* [Online]. 24. prosinec 2019, vol. 234, article 117868 [citace: 7. březen 2020], ISSN 0950-0618.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117868>
- [17] **Kohoutková Alena.** *Vláknobeton – blýská se na lepší časy?.* Praha: Beton TKS, s r.o., 2010, 10(2), str. 3-5, ISSN 1213-3116.
- [18] **Nedbal, František, Mazurová, Milada a Trtík, Karel.** *Speciální betony.* Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2001. ISBN 80-238-2678-6.
- [19] **Krátký, Jiří, Hana, Hanzlová, Alena, Kohoutková, Jitka, Vašková, Jan, Vodička.** *Experimenty a analýza chování konstrukčního vláknobetonu.* Praha: Nakladatelství ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04990-7.
- [20] **Trtík, Karel.** *Vyztužování struktury betonu ocelovými vlákny [přednáška].* [online]. Praha: ČVUT v Praze, [citace: 8. březen 2020]
Dostupné z: <https://docplayer.cz/14874635-Vyztužování-struktury-betonu-ocelovými-vlákny-cvut-fakulta-stavebni-katedra-betonových-konstrukci-a-mostu-thakurova-7-166-29-praha-6-cr.html>
- [21] **PN ČMB 01-2008.** *Vláknobeton (FC) – Specifikace, vlastnosti.* Praha: Českomoravský beton, 2008.
- [22] **Thomason James.** A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings. *Polymer Testing.* [Online]. 13. únor 2020, vol. 85, article 106421 [citace: 11. březen 2020], ISSN 0142-9418.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106421>

[23] Pokorný, Lukáš. *Návrh materiálu na bázi dřeva s využitím skelného vlákna*. Brno, 2010. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně, fakulta lesnická a dřevařská, Ústav základního zpracování dřeva. vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Pavel Král.

Dostupné z:

https://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=3420;studium=40360;zp=26724;download_prace=1

[24] Broukalová, Iva. *Aplikace cementových a betonových kompozitů v konstrukčních prvcích*. Praha 2017. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební.

Dostupné z: <https://www.fsv.cvut.cz/vvc/hp/habilitace/broukalova/prace.pdf>

[25] Rui Yang, Rui Yu, Zhonghe Shui, Xu Gao, Xunguang Xiao, Dingqiang Fan, Ziao Chen, Jiajie Cai, Xiaosheng Li, Yongjia He. Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Journal of Cleaner Production*. [Online]. 19. únor 2020. vol. 258, article 120673, [citace: 14. březen 2020], ISSN 0959-6526.

Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120673>

[26] Coufal, Robert, Vítek, Jan L. a Procházková, Alena. *Praktická zkušenost s výrobou a dopravou UHPC*. Praha: Beton TKS, s r.o., 2015, 15(2), str. 28-33, ISSN 1213-3116

[27] Sovják, Radoslav. *Odezva vysokohodnotných cementových kompozitů na náraz projektilu*. Praha : ČVUT v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06445-0.

[28] Tichý, Jan; Kolísko, Jiří; Vokáč, Miroslav; Čítek, David; Trefil, Vladislav; Kalný, Milan. *Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. [Online] Praha: ČVUT v Praze, Kloknerův ústav. 30. červen 2015. [citace: 16. březen 2020]

Dostupné z: <http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Metodika-3-V%C3%BDroba-UHPC.pdf>

- [29] Li, P.P., Brouwers, H.J.H. a Yu, Qingliang. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*. [Online]. 31. říjen 2019. vol. 136, article 103434, [citace: 17. březen 2020], ISSN 0734-743X.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103434>
- [30] Sovják, Radoslav, Vavříník, Tomáš, Zatloukal, Jan, Máca, Petr, Mičunek, Tomáš, Frydrýn, Michal. Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets. *International Journal of Impact Engineering* [Online]. 12. říjen 2014. vol. 76, pages 166-177. [citace: 17. duben 2020.], ISSN 0734-743X.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.10.002>
- [31] Máca, Petr, Sovják, Radoslav a Konvalinka, Petr. Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. [Online]. 17. srpen 2013. vol. 63, pages 158-163. [citace: 18. březen 2020], ISSN 0734-743X.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.08.003>
- [32] Richardson, Alan, Coventry, Kathryn, Lamb, Thomas Mackenzie, David. The addition of synthetic fibres to concrete to improve impact/ballistic toughness. *Construction and Building Materials*. [Online]. 18. červen 2016. vol. 121, pages 612-621. [citace: 19. březen 2020], ISSN 0950-0618.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.024>
- [33] Zbraně kvalitně. *Nauka o střelivu*. [Online] [citace: 07. květen 2020]
Dostupné z: <https://zbranekvalitne.cz/zbrojni-prukaz/nauka-o-strelivu>
- [34] Krauthammer, Theodor. *Modern Protective Structures*. Boca Raton: CRP Press Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-0-8247-2526-6.
- [35] Smith, P.D. a Hetherington, J.G. *Blast and ballistic loading of structures*. New York : Routledge, Taylor & Francis Group, 1994. ISBN 0-7506-2024-2.
- [36] Sovják, Radoslav, Shanbhag, Devavrat, Konrád, Petr, Zatloukal, Jan. Response of Thin UHPFRC Targets with Various Fibre Volume Fractions to Deformable Projectile Impact. *Procedia Engineering*. [Online] 29. červen 2017. vol. 193, pages 3-10. [citace: 12. duben 2020], ISSN 1877-7058.
Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.179>

- [37] **Kennedy, R.P.** A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*. [Online]. květen 1976. vol. 37, issue 2, pages 183-203. [citace: 20. březen 2020], ISSN 0029-5493. Dostupné ze ScienceDirect: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(76\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7)
- [38] **Máca, Petr, Sovják, Radoslav a Konvalinka, Petr.** Odolnost vysokohodnotného vlákny vyztuženého betonu vůči nárazu projektilu. In: *Speciální betony 2012*. Praha, Sekurkon s r.o., 2012, strany 31-40. ISBN 978-80-86604-58-9
- [39] **Feng, Jun, Sun, Weiwei, Liu, Zhilin, Cui, Chong, Wang, Xiaoming.** An armour-piercing projectile penetration in a double-layered target of ultra-high-performance fiber reinforced concrete and armour steel: Experimental and numerical analyses. *Materials & Design*. [Online]. 13. duben 2016. vol. 102, pages 131-141. [citace: 22. březen 2020], ISSN 0264-1275. Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.021>
- [40] **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*. [Online]. 9. listopad 2014. vol. 74, pages 188-200. [citace: 24. březen 2020] ISSN 0950-0618. Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.041>
- [41] **M. Beppu, S. Kataoka, H. Ichino, H. Musha.** Failure characteristics of UHPFRC panels subjected to projectile impact. *Composites Part B: Engineering*. [Online]. 07. říjen 2019. vol. 182, article 107505. [citace: 12. květen 2020], ISSN 1359-8368. Dostupné ze ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107505>
- [42] **České vysoké učení technické v Praze, Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu.** Kolář, Karel, Bažantová, Zdeňka a Konvalinka, Petr. Česká Republika, patentový spis CZ 306663 B6, 26. Duben 2017.
- [43] **Pommer, Vojtěch.** *Balistická odolnost vysokohodnotného vlákny vyztuženého cementového kompozitu vůči vícenásobnému dopadu projektilu*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, Experimentální centrum. Vedoucí práce: Ing. Radoslav Sovják, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70660/F1-BP-2017-Pommer-Vojtech-Bakalarska%20prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[44] Kneubuehl, B. P. *Wound Ballistics: Basics and Applications*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN- 978-3-642-20355-8.

[45] Svaz výrobců betonu, ČR. *Složení betonu - složky betonu*. [Online] [citace: 20. únor 2020]

Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu>

[46] HOME byt, dům, styl, zahrada. *Brnění pro váš dům*. [Online] 25. září 2017. [citace: 04. květen 2020]

Dostupné z: https://homebydleni.cz/dum/stavebni-materialy/brneni-vas-dum/attachment/vlakna_activcem/