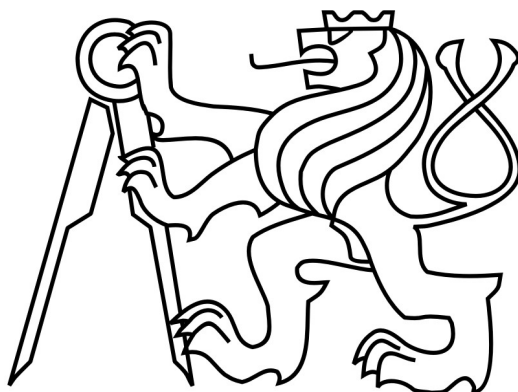


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



Diplomová práce

**Odezva systému tenkostěnných silikátových
tvarovek na balistické zatížení**

Květen/2023

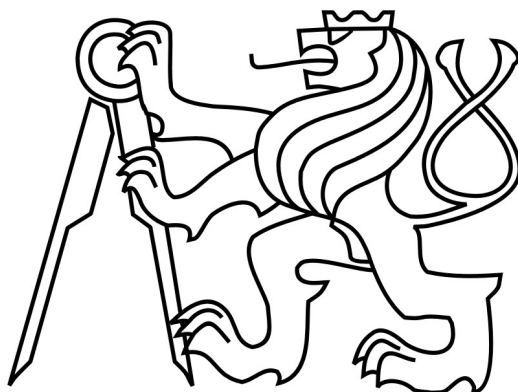
Bc. Tomáš Hrabě

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum

K210



**Odezva systému tenkostěnných silikátových
tvarovek na balistické zatížení**

**Response of thin-walled silicate brick system to
ballistic loading**

Student: **Bc. Tomáš Hrabě**

Vedoucí práce: **Ing. Michal Mára, Ph.D.**

Konzultanti: **Ing. Jan Zatloukal, Ph.D., Ing. Přemysl Kheml,
Lukáš Jogl, Jakub Koranda**



Akademický rok: **2022/2023**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE


I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hrabě</u>	Jméno: <u>Tomáš</u>	Osobní číslo: <u>477646</u>
Zadávací katedra: <u>Experimentální centrum (K210)</u>		
Studijní program: <u>Stavební Inženýrství</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Odezva systému tenkostěnných silikátových tvarovek na balistické zatížení</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Response of thin-walled silicate brick system to ballistic loading</u>	
Pokyny pro vypracování: Literární rešerše současného stavu a poznání v oblasti využití kompozitů na bázi UHPC pro tenkostěnné konstrukce se zvýšenou odolností vůči extrémním zatížením. Popis módu porušení a odezvy tenkostěnných silikátových konstrukcí při nárazu projektilu. Návrh experimentální kampaně pro naplnění cílů diplomové práce - Porovnání účinků různých projektilů a velikostí poškození testovaných vzorků v závislosti na uspořádání vnitřní struktury. Výroba zkušebních těles a provedení jednotlivých měření a experimentů. Vyhodnocení naměřených výsledků statických i rázových zkoušek a popis účinků jednotlivých druhů projektilů v závislosti na vnitřní struktuře tvarovek. Závěr, shrnutí výsledků a popis návrhu dalšího směřování výzkumu.	
Seznam doporučené literatury: Ařicín, P.-C.: High performance concrete Krauthammer, T.: Modern protective structures Smith, J. et al.: Discrete modeling of ultra-high-performance concrete with application to projectile penetration	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Michal Mára, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>20.02.2023</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>22.05.2023</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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>	
<u>20.2.2023</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány.

V Praze dne 22.5. 2023



Tomáš Hrabě

Poděkování

Těmito řádky bych rád poděkoval svému školiteli diplomové práce Ing. Michalu Márovi, Ph.D. za skvělé vedení při tvorbě tohoto díla. Oceňuji jeho pravidelné konzultace, které směřovali mojí práci správným směrem, a jeho odborné vědomosti v oblasti balistiky.

Za balistické zkoušky na střelnici patří poděkování Ing. Janu Zatloukalovi, Ph.D. Jeho střelecký um zajistil pro vzorky zátěžové testy střelbou, díky nimž se mohla experimentální kampaň posunout do části vyhodnocování výsledků.

Dále páni Ing. Přemysl Kheml, Lukáš Jogl a Jakub Koranda mají mé díky za pomoc v průběhu praktické části experimentální kampaně. Ať už jde o přípravu bednění, betonáž, odbednění nebo následný transport a zkoušky těles a vzorků.

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje průběh experimentální kampaně na vývoj tenkostěnných silikátových tvarovek odolných proti balistickému zatížení. V rámci experimentu byly navrženy dva prototypy rozměrově stejných tvarovek s rozdílným systémem vnitřních stěn, které byly rozmístěny tak, aby byla tvarovka, co týká balistické odolnosti, co nejefektivnější. Struktury stěn byly navrženy na pěti, respektive šesti příčných stěnách s variací podélných výztuh. Zmíněné tvarovky se po výrobě a zrání v rámci kampaně odvezly na střelnici, vyzdily v malé zdi, které byly podrobeny balistické zkoušce. Ráže pro testování vzorků byly zvoleny dle nejsilnějších tříd z normy ČSN EN 1522 tj. 5.56×45, 7.62×51 SC, 7.62×51 HC. Střeleckými zkouškami byly ověřeny vzorky na balistickou odolnost neboli jednodušeji řečeno neprůstřelnost a zároveň byly porovnány výsledky obou variant tvarovek mezi sebou.

Výsledky experimentu ukázaly, že oba návrhy struktury tvarovky vyhověly podmínkám normy ČSN EN 1522 a získaly nejvyšší balistickou třídu FB7. Rozdíl v průniku projektilu nebo poškození vzorku v souvislosti s návrhem struktury vnitřních stěn byl minimální, respektive v podmínkách tohoto výzkumu neprokázal žádné významné odlišnosti.

Klíčová slova

Tvarovka; UHPFRC; Balistická odolnost; Projektil; Hloubka penetrace

Abstract

This thesis describes the course of an experimental campaign to develop thin-walled ballistic-resistant silicate construction block. In the experiment, two prototypes of dimensionally identical construction blocks with different internal wall systems were designed and positioned to make the construction blocks as effective as possible in terms of ballistic resistance. The wall structures were designed on five and six transverse walls, respectively, with a variation of longitudinal reinforcements. The aforementioned shapes were taken to the firing range, after fabrication and maturation during the campaign, and bricked into small walls which were subjected to ballistic testing. The calibers for testing the samples were chosen according to the strongest classes from the CSN EN 1522 standard, i.e. 5.56×45, 7.62×51 SC, 7.62×51 HC. The shooting tests were used to verify the ballistic resistance of the samples and to compare the results of both variants of the construction blocks with each other.

The results of the experiment showed that both designs of the construction block structure met the conditions of the CSN EN 1522 standard and obtained the highest ballistic class FB7. The difference in projectile penetration or damage to the specimen related to the design of the internal wall structure was minimal or showed no significant differences under the conditions of this research.

Keywords

Construction block; UHPFRC; Ballistic resistance; Projectile; Penetration depth

Obsah

1. Úvod.....	14
1.1. Motivace.....	14
1.2. Cíle práce.....	14
1.3. Rozsah práce.....	15
2. Teorie.....	16
2.1. Charakteristika betonu.....	16
2.1.1. Rozdělení betonu dle pevnosti.....	16
2.1.2. Složení obyčejného a vysokohodnotného betonu.....	17
2.1.3. Cement.....	19
2.1.4. Kamenivo.....	19
2.1.5. Voda.....	19
2.1.6. Příměsi a přísady.....	20
2.1.7. Vlákniatá výztuž.....	20
2.2. Mód porušení konstrukcí.....	21
2.2.1. Porušení vzorku projektilem.....	21
2.2.2. Fáze porušení.....	22
2.3. Vybrané ráže dle normy ČSN EN 1522.....	24
2.3.1. FB5.....	25
2.3.2. FB6.....	27
2.3.3. FB7.....	28

3. Experimentální kampaň.....	30
3.1. Návrh mřížky tvarovky.....	30
3.2. Výroba vzorků.....	32
3.2.1. Plastová vložka.....	32
3.2.2. Bednění.....	34
3.2.3. Polystyren.....	35
3.2.4. Betonáž.....	36
3.2.5. Odbednění.....	38
3.2.6. Doprovodná tělesa.....	38
3.3. Zkoušky doprovodných těles.....	39
3.4. Zátěžové testy střelbou	40
3.4.1. Střelnice.....	40
3.4.2. Transport, logistika.....	41
3.4.3. Příprava před střelbou.....	41
3.4.4. Střelba.....	42
4. Vyhodnocení kampaně a diskuse nad výsledky.....	45
4.1. Výsledky zkoušek doprovodných těles.....	45
4.2. Rychlosti výstřelů.....	52
4.3. Dráha a hloubka průstřelu.....	53
4.3.1. Rozbor stěn.....	53
4.3.2. Rozbor samostatných tvarovek.....	64
5. Závěr.....	67
6. Reference.....	69

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení betonu podle pevnosti [5]	17
Obrázek 2: Způsoby poškození vzorku projektilem [7] [10]	21
Obrázek 3: Módy poškození vzorku [7] [8]	22
Obrázek 4: Schéma náboje [14].....	24
Obrázek 5: Projektil 5.56×45 [17] [16]	25
Obrázek 6: CZ 805 BREN A1/A2 [20]	26
Obrázek 7: Projektil 7.62×51 [21] [16]	28
Obrázek 8: Puška samonabíjecí Luvo LA-110 SASS [23]	29
Obrázek 9: Zastavení projektilu o podélnou stěnu	31
Obrázek 10: Plastová vložka	32
Obrázek 11: Připravená forma bednění	32
Obrázek 12: Výkres plastové vložky	33
Obrázek 13: Výroba bednění.....	34
Obrázek 14: Dílna.....	34
Obrázek 15: Bednění	34
Obrázek 16: Schéma řezání polystyrénových výplní na bloku 1× 0,5 m.....	35
Obrázek 17: Řezačka polystyrenu	36
Obrázek 18: Polystyren pro výrobu 2 ks tvarovek „4 řad“.....	36
Obrázek 19: Připravené formy bednění	37
Obrázek 20: Betonování.....	37
Obrázek 21: Odbednění	38
Obrázek 22: Hotové vzorky.....	38
Obrázek 23: Doprovodná tělesa	38
Obrázek 24: Tahová zkouška za ohybu	39
Obrázek 25: Tlaková zkouška.....	39
Obrázek 26: Tříbodový ohyb [24]	39
Obrázek 27: Střelnice A, 500 m	40
Obrázek 28: Střelnice D, 50 m	40
Obrázek 29: Nakládání dodávky	41
Obrázek 30: Vykládání vzorků na střelnici	41

Obrázek 31: Zdění tvarovek lepicí směsí	42
Obrázek 32: Připravené bloky stěn.....	42
Obrázek 33: Příprava kamery	42
Obrázek 34: Nastavení rychlo-kamery, příprava munice a zbraní	42
Obrázek 35: Nástřelový trojúhelník [mm].....	42
Obrázek 36: Schéma ideálního nástřelu stěny „4 řad“ [mm]	43
Obrázek 37: Skutečný nástřel stěny „4 řad“	43
Obrázek 38: Schéma nástřelu stěny „5 řad“ [mm]	44
Obrázek 39: Skutečný nástřel stěny „5 řad“	44
Obrázek 40: Dráha průstřelů A, B	53
Obrázek 41: Stěna „5 řad“; 5.56×45, 7.62×51 SC	54
Obrázek 42: Stěna „5 řad“; 7.62×51 HC	55
Obrázek 43: Dráha průstřelů C	55
Obrázek 44: Stěna „4 řad“; 7.62×51 HC	56
Obrázek 45: Dráha průstřelů D.....	56
Obrázek 46: Stěna „4 řad“; 5.56×45, 7.62×51 SC	57
Obrázek 47: Dráha průstřelů E, F	57
Obrázek 48: Keramická tvarovka	61
Obrázek 49: Pórobetonová tvarovka	61
Obrázek 50: Pila	64
Obrázek 51: Přeříznutá tvarovka	64
Obrázek 52: Řez „4 řad“; 5.65×45	65
Obrázek 53: Řez „4 řad“; 7.62×51 SC	65
Obrázek 54: Řez „4 řad“; 7.62×51 HC.....	65
Obrázek 55: Řez „5 řad“; 5.56×45	66
Obrázek 56: Řez „5 řad“; 7.62×51 SC	66
Obrázek 57: Řez „5 řad“; 7.62×51 HC.....	66

Seznam grafů

Graf 1: Složení a poměr složek betonu.....	18
Graf 2: Průměrné pevnosti betonážních cyklů	49
Graf 3: Hloubka penetrace betonem.....	60
Graf 4: Celková hloubka penetrace tvarovkou.....	60
Graf 5: Hloubka penetrace materiálem.....	62
Graf 6: Celková hloubka penetrace vzorkem	62

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení betonu podle pevnosti dle ČSN EN 206+A2 [1].....	16
Tabulka 2: Schéma náboje.....	24
Tabulka 3: Přehled třídy FB5 [15] [16].....	25
Tabulka 4: Projektil 5.56 × 45 mm [17] [16]	25
Tabulka 5: Přehled třídy FB6 [15].....	27
Tabulka 6: Přehled třídy FB7 [15].....	28
Tabulka 7: Projektil 7,62 x 51 [21] [16].....	28
Tabulka 8: Přehled počtu vzorků.....	32
Tabulka 9: Počty polystyrénových výplní	35
Tabulka 10: Receptura směsi pro výrobu 2+2 ks	36
Tabulka 11: Výsledky zkoušky tříbodového ohybu	45
Tabulka 12: Výsledky zkoušky v tlaku	47
Tabulka 13: Objemové hmotnosti doprovodných těles.....	50
Tabulka 14: Úst'ové rychlosti projektilů	52
Tabulka 15: Hloubka penetrace.....	59

Seznam pojmů a zkratk

NPC – Normal performance concrete

NSC – Normal strength concrete

HPC – High performance concrete

HSC – High strength concrete

UHPC – Ultra high performance concrete

UHSC – Ultra high strength concrete

UHPFRC – Ultra high performance fibre reinforced concrete

1. Úvod

1.1. Motivace

Důvod výběru tématu týkajícího se balistiky je mé osobní propojení stavebního studia s vojenskou problematikou. Již několik let jsem příslušníkem Aktivní zálohy Armády ČR a pravidelně se účastním vojenských cvičení, kde nacvičujeme střelby, taktiku, ochranu budov důležitých k obraně státu a mnoho dalšího. Proto je mi blízké téma obrana a bezpečnost. Mít možnost si jako téma práce navrhnout a otestovat silikátovou tvarovku proti balistickému zatížení je pro mě proto ideální kombinací.

Očekávám od této diplomové práce svůj ať už osobní rozvoj v oblasti návrhu experimentální kampaně, logistiky, měření, vyhodnocování, tak i seznámení s účinky poškození jednotlivých ráží na strukturu navrhované tvarovky. Ideálním výsledkem v budoucnu by mělo být to, že tuto tvarovku využije armáda nebo obecně ozbrojené složky k ochraně osob či majetku nebo si ji civilní občané koupí ve stavebninách a postaví si z ní třeba garáž. Tímto pohledem je také na smysl této práce nahlíženo. Tak aby v uvozovkách vyřešila alternativu zdícího neprůstřelného stavebního materiálu k monolitické konstrukci.

1.2. Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout systém vnitřních stěn tenkostěnných silikátových tvarovek odolným proti balistickému zatížení. Vyrobeny budou z materiálu UHPC s rozptýlenou kovovou výztuží. K dosažení cíle je potřeba navrhnout experimentální kampaň, konkrétně způsob výroby, uskladnění vzorků a doprovodných těles, organizace a logistiky střeleckých testů na střelnici a následný postup vyhodnocení a popis výsledků.

Práce v teoretické části popíše charakteristiku betonu, módy porušení tenkostěnných konstrukcí a odezvu při nárazu projektilu. Dále porovná účinky různých projektilů na

velikost poškození vzorků. V závěru práce budou výsledky vyhodnoceny a bude provedena diskuse ohledně jejich významu.

Experimentální kampaň bude obsahovat:

- a) Výroba betonových tvarovek – testovací tělesa.
- b) Zatížení vybranými rážemi dle normy ČSN EN 1522.
- c) Naměření a zhodnocení poškození testovacích těles.
- d) Porovnání účinků poškození jednotlivých projektilů v závislosti na vnitřní struktuře tvarovky.

1.3.Rozsah práce

Práce je členěna na šest hlavních částí. První z nich je kapitola úvod, kde se čtenář dozví motivaci autora, cíle diplomové práce a rozsah jednotlivých kapitol.

Po prvním úvodu následuje část teorie, která je věnována základnímu popisu znalostí, které vyplývají z experimentální kampaně. Konkrétněji řečeno charakteristika UHPC a vláken, mód porušení tenkostěnných konstrukcí a použitých ráží na střelnici při zátěžovém testu.

Následuje experimentální část, kde je dán prostor pro popsání průběhu kampaně. Od návrhu mřížky tvarovky, výroby a uskladnění vzorků, pevnostních zkoušek až po zátěžový test na střelnici.

Další kapitolou je vyhodnocení jednotlivých zkoušek ať už pevnostních za ohybu a tlaku nebo balistických ze střelnice a diskusí nad výsledky. Co z nich vyplývá. Jaké jsou trendy.

Předposlední částí je pak závěr, kde je shrnuta celá diplomová práce zejména však finální výsledky, splnění zadaných cílů a návrh na další směřování experimentální kampaně.

Poslední částí je výpis zdrojů.

Práce je doprovázena fotografiemi, tabulkami a grafy pro lepší názornost jednotlivých činností s příslušným komentářem.

2. Teorie

V této kapitole bude popsána charakteristika a rozdíl běžného a vysokopevnostního betonu, módy porušení konstrukcí projektilem a také vybrané ráže z normy ČSN EN 1522

2.1. Charakteristika betonu

Beton je kompozitní materiál, směs plniva a pojiva. Plnivo nejčastěji reprezentuje přírodní kamenivo, pojivo poté cement. Se stále rostoucími požadavky na pevnost a udržitelnost konstrukcí přichází do popředí betony s vyšší pevností, které se začínají pomalu vyvíjet od 90. let 20. století. Oproti běžnému betonu je vysokohodnotný beton výjimečným svou vysokou pevností v tlaku, vyšší tuhostí, trvanlivostí a odolností vůči okolnímu prostředí. [1] [2] [3] [4]

2.1.1. Rozdělení betonu dle pevnosti

Beton můžeme obecně rozdělit do následujících tříd dle odpovídající pevnosti viz (Tabulka 1) a (Obrázek 1).

Tabulka 1: Rozdělení betonu podle pevnosti dle ČSN EN 206+A2 [1]

Běžný beton (NPC/NSC)	Vysokopevnostní beton (HPC/HSC)	Ultra-vysokopevnostní beton (UHPC/UHSC)
C8/10 až C50/60	C55/67 až C120/140	Tlaková pevnost > 120MPa

Původní myšlenka vývoje ultra-vysokopevnostního betonu (UHPC) byla taková, že se bude hledat a vyvíjet materiál s vyšší a vyšší tlakovou pevností standardně nad 120 MPa, jehož pevnost bude z pohledu využití v uvozovkách nekonečná. Pro účely aplikace do stavebních konstrukcí jsou důležité i jiné parametry – trvanlivost, houževnatost a tahová pevnost. Je zbytečné mít tlakově ultra pevný materiál, když se tahově popraská nebo dokonce poškodí. I proto se nynější výzkum zaměřuje na zvětšování tahové pevnosti i za cenu snížení nebo stagnace pevnosti v tlaku. Nižší nároky na tlakovou pevnost vedou také ke snížení ceny a tím pádem ke konkurenceschopnosti k běžným betonům. [4]



Obrázek 1: Rozdělení betonu podle pevnosti [5]

2.1.2. Složení obyčejného a vysokohodnotného betonu

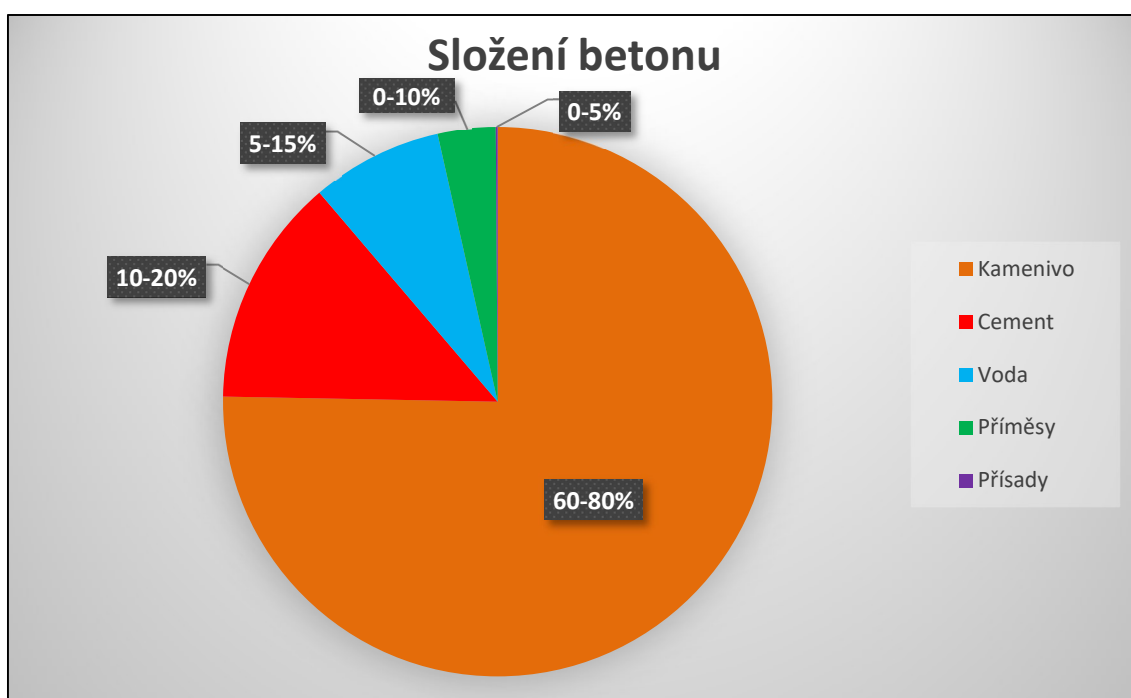
Složení betonové směsi zásadně ovlivňuje výsledné atributy betonové konstrukce. Obecně platí, že pokud chceme dosáhnout vysokých pevností, zvyšujeme podíl pojiva, snižujeme maximální velikost kameniva, snižujeme vodní součinitel a vodu nahrazujeme různou škálou příměsí. [4] [6]

U betonů normálních pevností (NPC) je složení směsi hlavně vázáno na výslednou pevnost, místní zdroje a ekonomickou stránku věci. Suroviny pro výrobu by měly být co nejbližší betonárce, aby doprava nebyla zbytečně dlouhá. Maximální zrno kameniva obecně dosahuje 22 mm, vodní součinitel je v rozpětí 0,4 až 0,7 a objem cementu 250 - 450 kg/m³. [1] [4]

Vysokohodnotné betony (HPC) se oproti běžným betonům liší ve výběru ingrediencí. Základní dílčí složky musejí vyhovovat striktním požadavkům a jsou voleny s ohledem na jejich výsledné parametry, ovlivňování s dalšími složkami navzájem a nežádoucích chemických reakcí. Výběr tedy není jen o co nejkvalitnějších surovinách, ale hlavně o jejich ideálním poměru, který vytvoří co nejlepší betonovou směs. Obsah hrubého

kameniva je lehce nižší než u běžných betonů. Maximální zrno obecně dosahuje 16 mm, vodní součinitel se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,4 a objem cementu činí 400 – 500 kg/m³. [1] [4]

Ultra-vysokohodnotné betony mají všechno více striktnější. Důležitým parametrem je návrh plynulé zrnitostní křivky od nejjemnějších mikropísků až po hrubé kamenivo, které má maximální zrno velikosti 8 mm nebo také hrubé kamenivo vůbec neobsahuje. Podstatným faktorem je také poměr mezi cementem a superplastifikátorem, jenž nahrazuje vodu. Objem cementu často přesahuje 500 kg/m³ a vodní součinitel se pohybuje pod hodnotou 0,3. [1] [4]



Graf 1: Složení a poměr složek betonu

Složení a poměr jednotlivých prvků betonové směsi jsou znázorněny viz (*Graf 1*)

2.1.3. Cement

Základním materiálem, jenž je zodpovědným za pojivovou část v betonu je cement. U standartního betonu se procentuální zastoupení pohybuje mezi 10-20 %, u vysokopevnostních betonů se tento poměr přibližuje k jedné čtvrtině. Druh a třída cementu jsou vybírány na základě charakteristiky a způsobu využití konstrukce. Pro HSC/HPC se využívá CEM I. neboli portlandský a také CEM II. neboli portlandský struskový, v obou případech třídy 42,5 R nebo 52,5 R. [1] [3] [2] [6]

2.1.4. Kamenivo

Základním materiálem, jenž je zodpovědným za výplňovou část v betonu je kamenivo. To zaujímá největší podíl objemu směsi a bývá kromě vody tou nejlevnější složkou, což by měl návrh směsi zohlednit. Pro optimální výplň by se kamenivo mělo dokonale skládat ze všech frakcí zrnitostní křivky od písku 0-4 mm, jemného štěrku 4-8 mm až po hrubý štěrk 8-22 mm. [1] [3]

S rostoucí pevností se kamenivo stává slabším článkem betonu. Zatímco u běžných betonů se trhлина šíří cementovou pastou, u vyšších zatížení to může být právě zvoleným kamenivem. Proto je výběr správně pevného a kompaktního kameniva s minimem dislokací tak důležitá. Všeobecná poučka říká, že by kamenivo mělo být 1,5krát pevnější, než je návrhová pevnost betonu, abychom měli opravdovou jistotu. Druhy kameniva vodné pro návrh směsi můžou být vápenec, gabro, žula, korund nebo umělé kamenivo bauxit. [1] [3]

2.1.5. Voda

Další součástí betonu je voda. Ta je zodpovědná jednak za hydrataci (chemickou reakci cementu a vody), tak i za zpracovatelnost čerstvého betonu. Vhodné druhy vod jsou takové, jenž svým obsahem neohrozí průběh hydratace. To může být způsobeno agresivitou vody, jenž například obsahuje síru anebo naopak postrádají inertní soli tzv. hladové vody. V našich podmínkách, kde je relativní dostatek vody v krajině, je tato složka nejlevnější částí betonu, avšak v zemích, kde je jí nedostatek, už je to významná ekonomická položka, se kterou se musí počítat do celkové ceny betonu. [1] [3]

Podíl vody v běžném betonu se pohybuje mezi 5-10 % a vodní součinitel okolo 0,5. Čím vyšších pevností chceme dosáhnout, tím méně vody se do směsi přidává. Vodní součinitel proto u HSC/HPC klesá mezi hodnoty 0,2-0,4 a pro UHPC klidně i pod poměr 0,2. Pro podíl vody ve směsi hraje i důležitou roli vlhkost i nasákavost kameniva. [1] [3]

2.1.6. Příměsi a přísady

Důležitou, ne však nutnou položkou jsou příměsi a přísady. Rozdíl mezi nimi je ve množství, tak i ve struktuře. U příměs se poměr pohybuje mezi 0-10 % a snažíme se jimi nahradit dražší materiál většinou cement. Konzistencí jsou to spíše sypké minerální látky (struska, mikrosilika, křemičitá mouka, atd.) U přísad se poměr pohybuje mezi 0-5 % a konzistencí připomínají spíše chemikálie, často polymery či monomery. Jejich hlavní funkcí je dodat betonu specifické vlastnosti. Ať už je to pomalé/rychlé tuhnutí, ztekucení nebo třeba proti-mrazové vlastnosti. [1] [3] [6]

Jak už bylo dříve řečeno, pro dosažení vyšších pevností se poměr vody ve směsi snižuje. Čím méně je v betonu vody, tím dříve nám beton tuhne a je hůře zpracovatelnější. Z toho důvodu se přidávají do směsi různé plastifikátory, které nám zachovají stejnou zpracovatelnost i při menším množství vody. [1] [3] [6]

2.1.7. Vlákenná výztuž

Za účelem zvýšení tahového napětí nebo duktility se do HSC/HPC přidává vláknitá výztuž. Ta může být vyrobena z kovu nebo z organických materiálů jako je plast nebo karbon. Důležitým prvkem pro správnou účinnost vláken rozhoduje jejich tvar, štíhlostní poměr, pevnost a objemové zastoupení. Nejčastěji se dávkuje mezi 1-2 % z objemu směsi. Pevnost ocelových vláken dosahuje 2500 MPa. Nutný předpoklad pro spolehlivé působení vláken je dostatek cementu v cementovém tmeli a odpovídající složení směsi, jenž zajistí dostatečné kotvení v betonové matici. [1] [3] [6]

2.2. M3d porušení konstrukcí

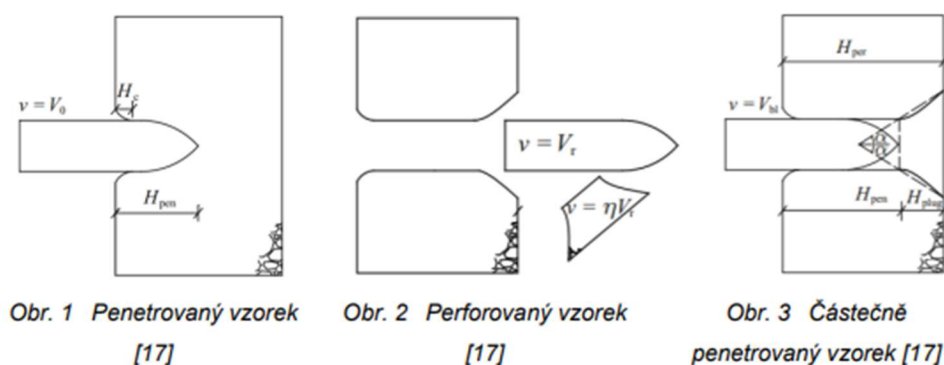
2.2.1. Porušení vzorku projektilem

Projektilel m3de obecně betonový vzorek porušit třemi způsoby. Zaprvé penetrací, za druhé perforací a za třetí částečnou penetrací viz (*Obrázek 2*). [7] [8] [9] [10]

V první zmíněné situaci (*Obrázek 2*) dochází k průniku projektilu do určité hloubky H_{pen} a ke vzniku vstupního kráteru o hloubce H_c a určitých rozměrech. Zadní strana vzorku je nepoškozená, k žádnému vzniku nebezpečných zraňujících úlomků nedochází. Rychlost V_0 a energie se ve výpočtu uvažují nulové, protože je střela v konečném a rovnovážném stavu. [7] [8] [9] [10]

V druhé situaci (*Obrázek 2*) prolétá střela skrz konstrukci. V zadní části vzorku je vytvořen kužel, který přebírá část kinetické energie na základě hmotnosti a rychlosti střely v místě styku a od vzorku se odtrhává. Co se týká hloubky penetrace H_{pen} , tak ta se rovná tloušťce stěny. [7] [8] [9] [10]

Třetí situace (*Obrázek 2*) je taková, při které se střela zastaví uvnitř vzorku a na zadní stěně začínají vznikat trhliny a odtrhávací kužel. Hloubka penetrace H_{pen} je menší než tlouška vzorku. Navození rovnovážného stavu vzorku dochází uvnitř. [7] [8] [9] [10]



Obrázek 2: Způsoby poškození vzorku projektilem [7] [10]

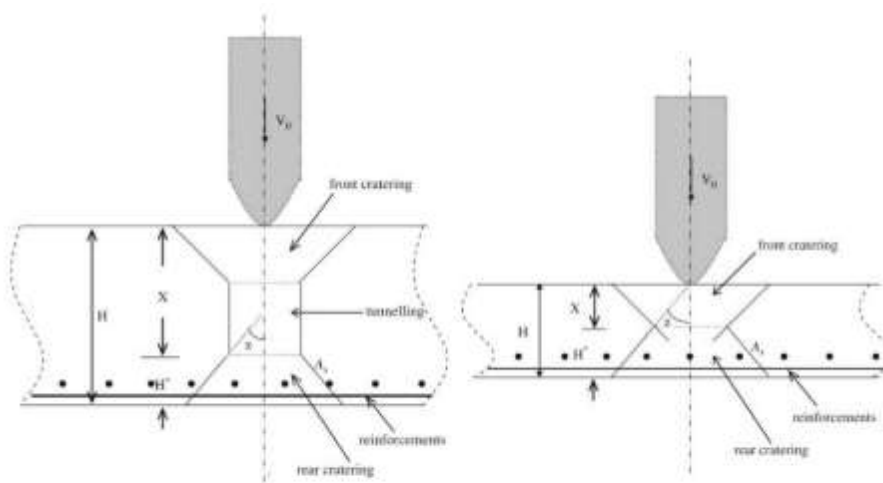
2.2.2. Fáze porušení

Proces porušení konstrukce dopadem projektilu můžeme rozdělit do tří fází (Obrázek 3). [7] [8] [9] [10] [11]

První fází porušení je vznik kráteru na přední straně vzorku. V anglické jazyce nazýváno „front cratering“. Při dopadu projektilu na povrch vzorku dochází ke stlačení materiálu, jeho poškození, rozdrčení a následném odpadnutí v opačném směru dráhy střely. Kráter, který vzniká má tvar kužele. [7] [8] [9] [10] [11]

Druhá fáze z, anglického „tunneling section“, pokračuje postupováním střely skrz vzorek a hloubením takzvaného tunelu. Průměr otvoru v této části vzorku se rovná průměru střely. [7] [8] [9] [10] [11]

Třetí fází, která navazuje na tunelovitou část, je průlet projektilu skrze konstrukci a vytvoření kužele na zadní stěně vzorku. Prvotní trhliny a drobné úlomky vznikají při překročení kritické hodnoty tahové, respektive smykové pevnosti. Vliv na vznik tohoto kráteru v důsledku tahového napětí má také prvotní tlaková vlna, která se uvolní při styku projektilu se vzorkem, proběhne skrz a na zadní stěně se odrazí. V angličtině se tato fáze jmenuje „rear cratering“. [7] [8] [9] [10] [11]



Obr. 4 Můd poškození tlustého železobetonového vzorku [18]

Obr. 5 Můd poškození tenkého železobetonového vzorku [18]

Obrázek 3: Můdy poškození vzorku [7] [8]

Výše tři zmíněné fáze se dají uplatnit u tlustostěnných konstrukcí. U těch tenkých se druhá fáze vůbec nevyskytuje z důvodu chybějící hmoty a po prvotním vzniku kráteru na přední stěně dotyku vzniká rovnou i kužel na zadní stěně. Úhel komolého kuželu α (Obrázek 3) je závislý na materiálových charakteristikách betonu. [7] [8] [12] [13]

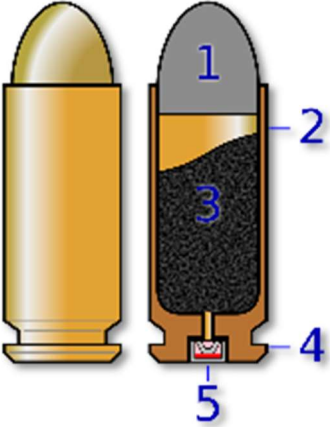
Na základě těchto poznatků z výzkumu je domněnka v práci taková, že vrstvení tenkých desek za sebou efektivněji zachytí projektil, než by tomu bylo v případě jedné tlustší desky při dodržení stejného množství materiálu, ovšem na úkor prostoru. On totiž projektil při průrazu první stěny neztrácí pouze energii, ale může také dojít k jeho deformaci, vychýlení směru a jeho prostorové orientace vzhledem k vytvoření kónusu na zadní straně stěny. Pokud se střela v mezeře před dopadem na druhou příčnou stěnu prostorově otočí nebo zdeformuje a narazí na ni větší plochou například bokem, její potenciál průrazu stěny je mnohem menší než při průrazu prvotním, kdy byla na stěnu orientovaná špičkou s minimální plochou, a ještě v osové rotaci střely. Zásadním aspektem je roznos síly na větší plochu, tudíž výsledné napětí je výrazně nižší.

2.3. Vybrané ráže dle normy ČSN EN 1522

Pro potřeby zařazení výsledků a jejich ohodnocení v praxi byly pro experiment vybrány ráže dle normy „ČSN EN 1522 OKNA, DVEŘE, UZÁVĚRY A ROLETY – ODOLNOST PROTI PRŮSTŘELU – POŽADAVKY A KVALIFIKACE.“

Tato norma testuje konstrukční prvky na balistickou odolnost, jež jsou v dokumentu rozděleny do sedmi balistických tříd FB1-FB7, jež jsou seřazeny podle síly destrukce vzestupně. Z praktických zkušeností z bakalářské práce, kde jsem testoval účinky porušení betonových trámů rážemi ze všech zmíněných tříd z normy, jsem se rozhodl pro výběr třech posledních FB5, FB6 a FB7, které mají nejsilnější potenciál experimentální vzorky zničit a odpovídají v praxi nejčastěji používaným puškovým rážím. Dále proto budou vysvětleny pouze tři zmíněné balistické třídy pro vizualizaci, jaká zbraň a jaký náboj tuto třídu reprezentuje. Vysvětlení a význam pojmů (Náboj, nábojnice, střela, projektil, atd...), které se často ve společnosti zaměňují a které se budou dále v textu vyskytovat, ilustruje (Obrázek 4) a (Tabulka 2)

Tabulka 2: Schéma náboje

	Náboj se skládá z:	
	1)	Projektil/Střela/Kulka
	2)	Nábojnice
	3)	Střelný prach
	4)	Dno nábojnice/Okraj
	5)	Zápalka

Obrázek 4: Schéma náboje [14]

2.3.1. FB5

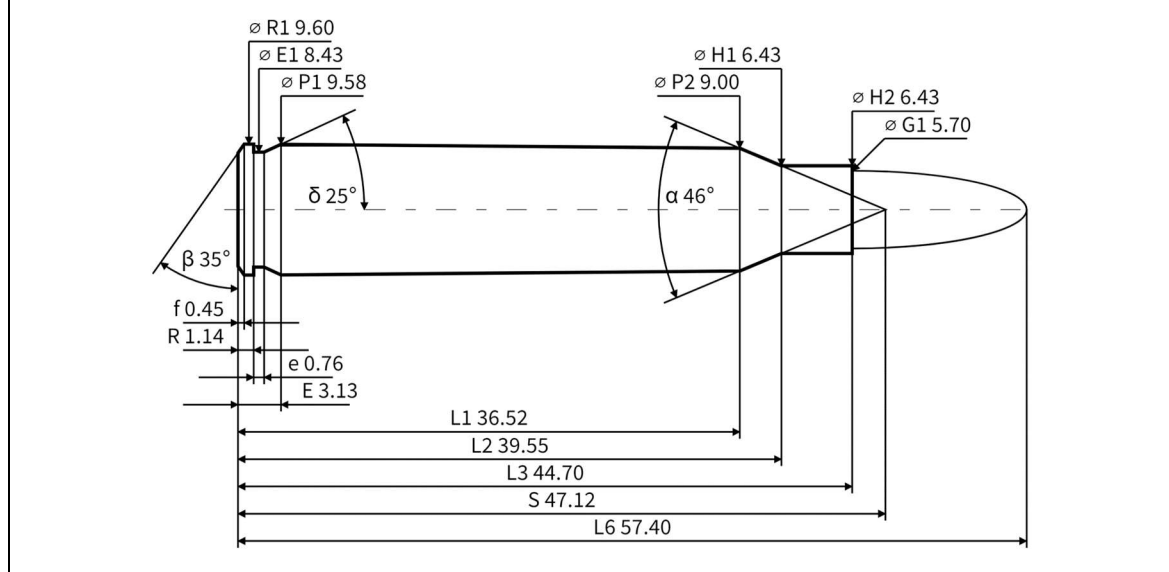
Tabulka 3: Přehled třídy FB5 [15] [16]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	5.56×45	FJ ₍₂₎ /PB/SCP1 ¹	4,0 g

Tabulka 4: Projektil 5.56 × 45 mm [17] [16]

Druh	Pušková	Průměr okraje	9.60 mm (.378")
Průměr střely	5.70 mm (.224")	Tloušťka okraje	1.14 mm (.045")
Průměr krčku	6.43 mm (.253")	Délka nábojnice	44.70 mm (1.760")
Průměr zahrdlení	u 9 mm (.354")	Celková délka	57.40 mm (2.260")
Průměr základny	9.58 mm (.377")	Maximální tlak	4300 bar

Obrázek 5: Projektil 5.56×45 [17] [16]



Tento náboj pod názvem .223 Remington vnikl na konci padesátých let 20. století jako experimentální náboj pro nově vyvíjenou pušku AR-15. Vědci, jenž stojí za tímto vývojem, jsou R. Hutton a E.M. Stoner. Po úspěšných testech v americkém letectvu byla

¹ Full copper alloy jacket bullet/Pointed bullet/Soft core (Lead) with steel penetrator (Type SS109)

v roce 1964 zbraň jako model M16 a náboj pod označením 5.56×45 přijat do americké armády. Střela/projektíl tohoto náboje měl hmotnost 3,56 g a označení M 193. [18] [19] Ze zkušeností z bojů vietnamské války se tento náboj zdokonaloval. V sedmdesátých letech 20. století největší inovaci zkonstruovala belgická zbrojovka FN Herstal, která vyměnila původní střelu za novou pod označením SS 109. Nová střela si zachovává stejnou ranivost při vyšší průraznosti. Hmotnost projektilu 4 g. [19] [18]

Náboj vznikl z požadavků státu NATO na nový modernější, než byl 7,62, který byl pro běžnou potřebu příliš výkonný, s vysokým zpětným rázem, těžký a s nižší kadencí. Oproti němu je právě náboj 5.56×45 lehčí, takže voják může se stejnou váhou nést více munice, má menší zpětný ráz a dovoluje lehčí konstrukci pušky. [18] [19]

Civilní verzí tohoto náboje je .223 Remington. Tyto náboje jsou téměř totožné, jediný rozdíl je v oblasti krčku nábojnice, která pak ovlivňuje tvar nábojové komory. Z důvodu skvělých vlastností jakožto přesnost a výkonnost si tuto značku oblíbili jak lovci, tak i sportovní střelci po celém světě. [18] [19]

Pod ráží 5.56×45 si můžeme představit českou nejnámější pušku BREN (*Obrázek 6*), jež používá Česká armáda.



Obrázek 6: CZ 805 BREN A1/A2 [20]

2.3.2. FB6

Tabulka 5: Přehled třídy FB6 [15]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	5.56×45	FJ ₍₂₎ /PB/SCP1 ²	4,0 g
Puška	7.62×51	FJ ₍₁₎ /PB/SC ³	9,5 g

Ráže patřící do této balistické třídy jsou 5.56×45 mm a 7.62×51 mm. Pokud by měl být prvek klasifikován třídou FB6, vzorek musí projít zátěžovým testem oběma rážemi. [15]

Z důvodu stejného náboje 5.56×45 ve třídách FB5 a FB6 se pro více informací ohledně původu a charakteristice vraťte viz kapitola (2.3.1 FB5)

Z důvodu stejného náboje 7.62×51 ve třídách FB6 a FB7 se pro více informací ohledně původu a charakteristice posuňte viz kapitola (2.3.3 FB7). Jediná odlišnost mezi nimi je ve stavbě projektilu – to, co po výstřelu zasahuje cíl. Typ náboje ve třídě FB6 je s měkkým olověným jádrem, u FB7 je to naopak tvrdé jádro s penetrátorem.

² Full copper alloy jacket bullet/Pointed bullet/Soft core (Lead) with steel penetrator (Type SS109)

³ Full steel jacket (plated) bullet/Pointed bullet/Soft core (Lead)

2.3.3. FB7

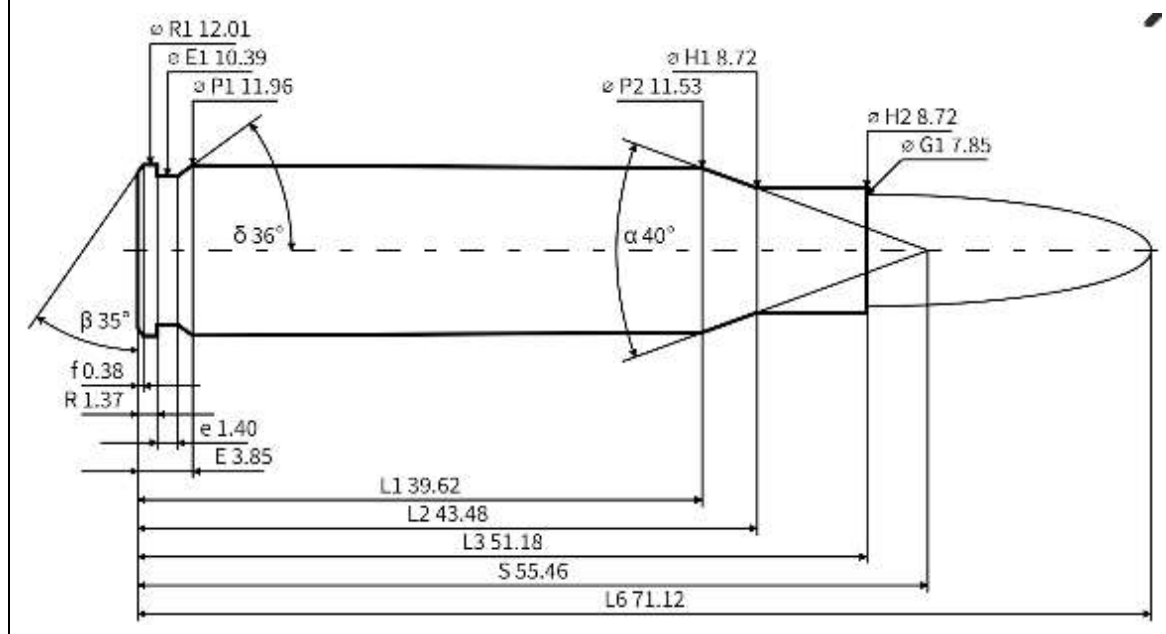
Tabulka 6: Přehled třídy FB7 [15]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	7.62×51	FJ ₍₂₎ /PB/HC1 ⁴	9,8 g

Tabulka 7: Projektil 7,62 x 51 [21] [16]

Druh	Pušková	Průměr okraje	12.01 mm (.473")
Průměr střely	7.85 mm (.309")	Tloušťka okraje	1.37 mm (.054")
Průměr krčku	8.72 mm (.343")	Délka nábojnice	51.18 mm (2.015")
Průměr zahrdlení	u 11.53 mm (.454")	Celková délka	71.12 mm (2.800")
Průměr základny	11.96 mm (.471")	Maximální tlak	4150 bar

Obrázek 7: Projektil 7.62×51 [21] [16]



Rozdíl mezi balistickou třídou FB6 a FB7 v ráži 7,62x51 je takový, že ve třídě FB7 je použitý tvrdý typ náboje (označení HC) oproti měkkému (SC) [16]

⁴ Full copper alloy jacket bullet/Pointed bullet/Steel hard core

7.62×51 je puškový náboj vyššího výkonu. Byl vyvinut USA po druhé světové válce za cílem nahradit tehdejší zastaralý náboj 30-06 Sprg. Americká armáda v roce 1954 přijala tento náboj a protlačila ho i v rámci NATO. Jako standartní puškový náboj byl ve výzbroji do roku 1980, pro běžné použití ho nahradila předchozí ráže z balistické třídy FB5 5.56×45 NATO. Armáda NATO ho však dodnes používá do kulometů nebo odstřelovačích pušek. Do své arsenalu ho používá i mnoho jiných zemí mimo státy NATO například Austrálie, Brazílie nebo Jihoafrická republika. [22] [18]

V roce 1952 firma Winchester uvedla civilní verzi náboje 308. Winchester, která je rozměrově totožná. Náboj dnes vyrábí téměř všichni výrobci munice. Osazuje se projektily 7-13 g. Pro náboj s projektilem o hmotnosti 9,8 g se úst'ová rychlost pohybuje okolo 850 m/s, maximální dostřel je až na 4 km a energii má kolem 3500 J. Je populární pro lovecké a střelecké soutěže. [18] [22]

Pod touto ráží si můžeme představit samonabíjecí pušky (*Obrázek 8*), které se používají na sportovní a lovecké soutěže.



Obrázek 8: Puška samonabíjecí Luvo LA-110 SASS [23]

3. Experimentální kampaň

V této kapitole je popsán průběh experimentální kampaň. Od návrhu struktury tvarovky, dále výrobu prvků nezbytných k betonáži jako je plastová vložka, polystyren, bednění přes samotnou betonáž a odbednění až po děj na střelnici.

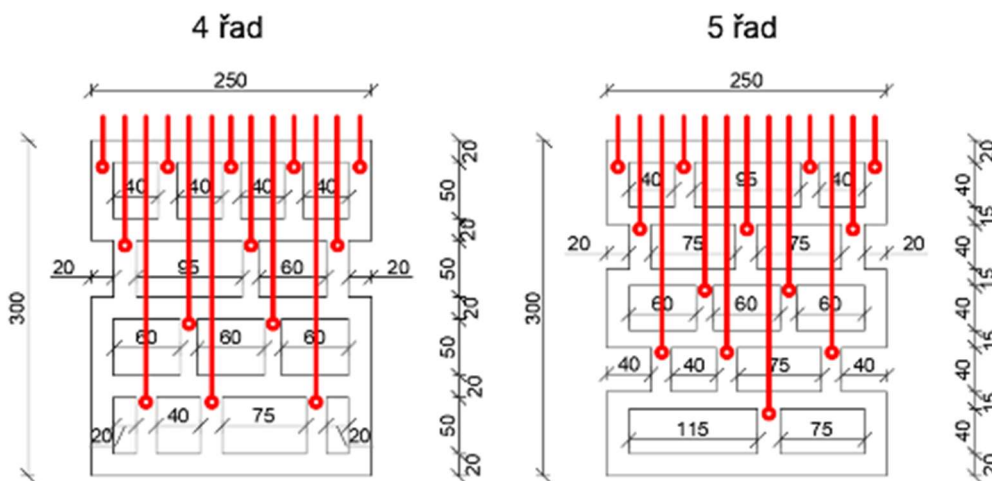
3.1. Návrh mřížky tvarovky

Jedním z hlavních úkolů diplomové práce je navrhnout strukturu tvarovky a otestovat ji proti balistickému zatížení. Co se týká formátu tvarovky, byly určeny standardní rozměry cihel $250 \times 300 \text{ mm}^2$ (š×d) s výškou 250 mm. Tyto dimenze nebyly vybrány nijak záměrně, spíše jako běžný rozměr cihel ve stavebnictví.

Jako další parametr při návrhu byla zvolena neměnná tloušťka polystyrenové vrstvy. Ta byla v tomto případě určena na 200 mm. Polystyren byl použit při návrhu jednak co se týče funkce bednění, tak i záměrně jako izolační vrstva, která by tvarovku udělala nejenom balisticky odolnou, ale zároveň tepelně izolační.

Návrh systému stěn byl takový, že čím více příčných vrstev bude tvarovka mít, tím pravděpodobnější je záchyt projektilu. A ne jenom z hlediska hmoty stěn, ale i z hlediska možné deformace a změny trajektorie střely nebo případném prostorovém otočení střely. Projektil totiž v primárním výstřelu letí v osové rotaci, špičkou dopředu (podobně jako vrták od vrtačky) tak, aby v případě kontaktu byla penetrace co nejefektivnější. Tím, že navrhne systém s vícero betonovými vrstvami, mezi nimiž necháme vrstvu polystyrenu (jehož příspěvek k balistické odolnosti je minimální), umožníme v meziprostoru po průniku první stěnou a před nárazem do druhé stěny možnou deformaci, změnu dráhy nebo prostorové orientace projektilu. Pokud se projektil otočí na bok a narazí do druhé stěny větší plochou, než je plocha špičky střely, jeho energie na průraz stěnou je více rozložena.

Aby byla tvarovka, co se týká neprůstřelnosti, dokonalá, byly podélné stěny, které tvoří spojovací a nosnou funkci, navrženy tak, aby v případě nárazu projektilu (červené čáry) v jakékoliv části přední stěny stály v jeho dráze (Obrázek 9). Tato podélná výztuha způsobuje výraznější ztrátu energie střely, než značně tenčí stěna příčná a tím pádem výrazněji zastaví průnik.



Obrázek 9: Zastavení projektilu o podélnou stěnu

Ze znalostí z kapitoly (2.2 *Mód porušení konstrukci*) a definovaného rozměru tvarovky a tloušťky polystyrenu byly proto navrženy dva prototypy (Obrázek 9) Jeden se čtyřmi řadami výplně polystyrenu (dále jen „4 řad“) respektive s pěti nosnými příčnými liniemi kompozitu a druhý s pěti výplněmi (dále jen „5 řad“), respektive se šesti nosnými příčnými liniemi a konkrétním rozložením výztuh rovnoběžných s očekávaným směrem střely. Tyto dva návrhy mají neměnnou celkovou vrstvu polystyrenu a zároveň celkovou vrstvu příčné betonové stěny. Proto bude zajímavé srovnat, jestli měl vliv vrstvení nějaký větší význam na odolnost.

3.2. Výroba vzorků

Pro experimentální kampaň bylo potřeba vyrobit několik sad testovacích vzorků, podrobně viz (Tabulka 8).

Tabulka 8: Přehled počtu vzorků

„4 řad“ Tvarovka 250×300×250 mm ³	„5 řad“ Tvarovka 250×300×250 mm ³	Doprovodná tělesa Trámce 40×40×160 mm ³
14	14	42

3.2.1. Plastová vložka

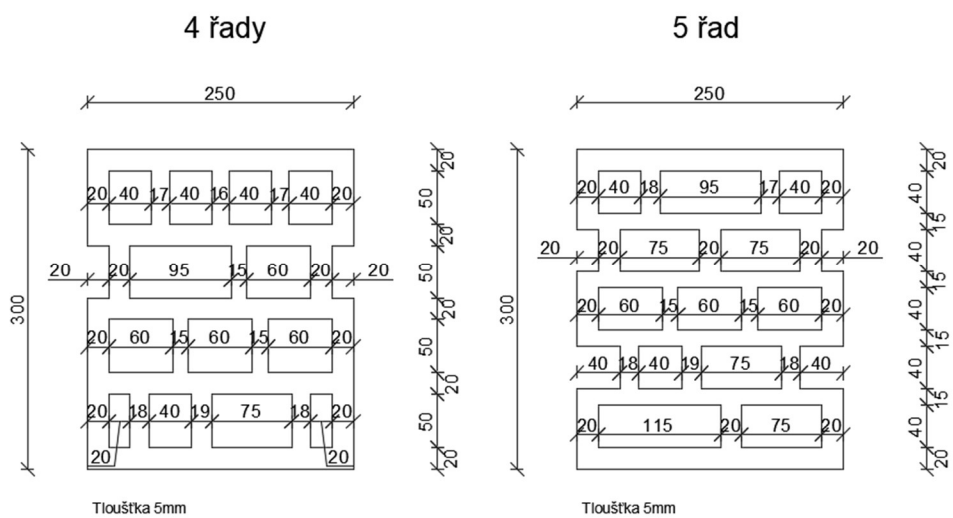
Pro postup při betonáži byl jako uchycující prvek polystyrénových výplně v bedně zvolena plastová vložka (Obrázek 10). Ta byla užita na uchycení a vycentrování jednak na dně bedně, tak i ve vršku, jak znázorňuje (Obrázek 11). Po navrtání vrutů ze spodu bedně a provrtání polystyrenu byla vrchní vložka vyjmuta a nechala se pouze spodní.



Obrázek 10: Plastová vložka



Obrázek 11: Připravená forma bedně

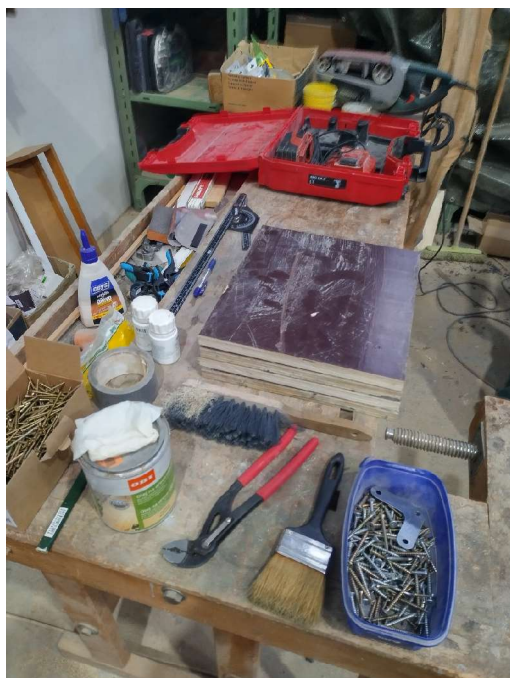


Obrázek 12: Výkres plastové vložky

(Obrázek 12) znázorňuje výkres plastové vložky a její rozměry.

3.2.2. Bednění

Pro konstrukci betonové tvarovky musely být vyrobeny čtyři stejné kusy speciálního dřevěného bednění o rozměrech 250×300 mm s výškou 260 mm. Forma byla navýšena o deset milimetrů z důvodu vložení dvou plastových vložek o tloušťce 5 mm. Od každého typu byly zhotoveny dva kusy pro tvarovku „4 řad“ a dva kusy pro tvarovku „5 řad“. Bednění bylo vyrobeno v dílně betonářské haly experimentálního centra, jak je znázorněno na (Obrázek 13), (Obrázek 14), (Obrázek 15)



Obrázek 13: Výroba bednění



Obrázek 14: Dílna



Obrázek 15: Bednění

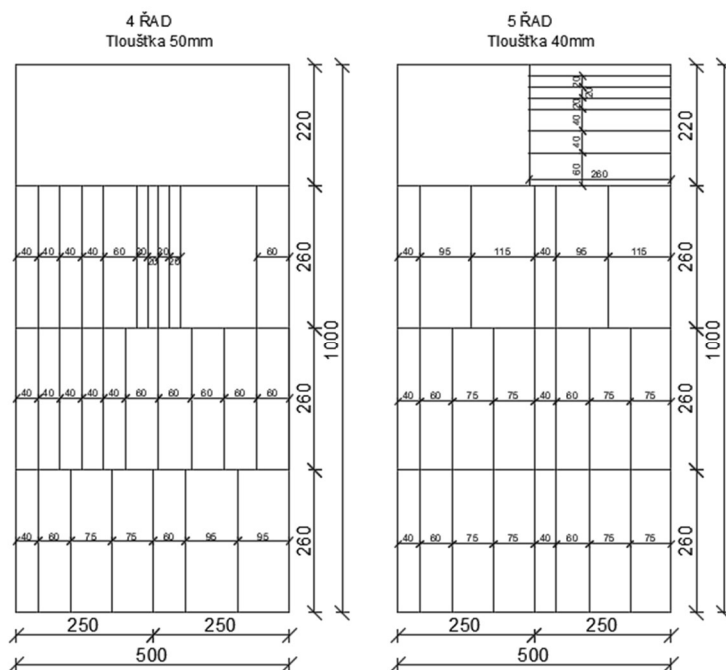
3.2.3. Polystyren

Pro výrobu tvarovky bylo také zapotřebí nařezat potřebné množství výplňových polystyrénových sloupečků. Jejich celkový počet je znázorněn (Tabulka 9)

Tabulka 9: Počty polystyrénových výplní

4 řad		5 řad	
Pro 1 tvarovku	Pro 14 tvarovek	Pro 1 tvarovku	Pro 14 tvarovek
4× ... 20×50 mm	56× ... 20×50 mm	2× ... 20×40 mm	28× ... 20×40 mm
5× ... 40×50 mm	70× ... 40×50 mm	5× ... 40×40 mm	70× ... 40×40 mm
4× ... 60×50 mm	56× ... 60×50 mm	3× ... 60×40 mm	42× ... 60×40 mm
1× ... 75×50 mm	14× ... 75×50 mm	4× ... 75×40 mm	56× ... 75×40 mm
1× ... 95×50 mm	14× ... 95×50 mm	1× ... 95×40 mm	14× ... 95×40 mm
		1× ..115×40 mm	14× ..115×40 mm

Schéma výkresu (Obrázek 16) řezání polystyrénových výplní z bloků 1×0,5 m



Obrázek 16: Schéma řezání polystyrénových výplní na bloku 1 × 0,5 m

Polystyren byl formátován na řezačce fungující na principu odporového drátu. (Obrázek 17). Ilustrace množství pro výrobu 2 ks tvarovek „4 řad“ je vidět na (Obrázek 18)



Obrázek 17: Řezačka polystyrenu



Obrázek 18: Polystyren pro výrobu 2 ks tvarovek „4 řad“

3.2.4. Betonáž

Betonáž jednotlivých vzorků pro experimentální kampaň probíhala v sedmi etapách po čtyřech testovacích vzorcích, přičemž vždy byly vyrobeny 2 ks tvarovky „4 řad“ a 2 ks tvarovky „5 řad“.

Na začátku probíhala příprava a vážení jednotlivých komponent směsi, ať už šlo o pytlovanou směs betonu, vody nebo drátků. Zde se kladl důraz na přesné vážení. Recepturu směsi je možno viděno v (Tabulka 10), kde jsou rozepsány i hmotnosti. Jak je dobře vidět, při jednom cyklu se manipulovalo se 115 kg betonu.

Tabulka 10: Receptura směsi pro výrobu 2+2 ks

Objem 48,1 litrů	
Položka	Hmotnost [kg]
Suchá směs	100,0
Voda	9,8
Vlákna 13×0,14 mm	5,7
Celkem	115,5

Před samotnou betonáží se ještě musely připravit formy bednění. Vložit plastové vložky, do nich zastříhat polystyrenové výplně a ty následně ukotvit zesponu bednění vruty. Připravená forma bednění je znázorněná na (Obrázek 19). Poté ještě ošetřit odbedňovacím olejem pro lepší odbednění.

Po navážení jednotlivých složek betonové směsi následuje proces míchání v míchačce. Zde se kladl důraz na postupné promísení komponentů, tak aby nedocházelo k nerovnoměrnému rozprostření látek. Zvláštní péče se věnovala ocelovým drátkům, která jsou schopná ve větším množství pohromadě tvořit takzvaná klastry, které pak v betonovém prvku tvoří lokální defekty a zeslabená místa.



Obrázek 19: Připravené formy bednění

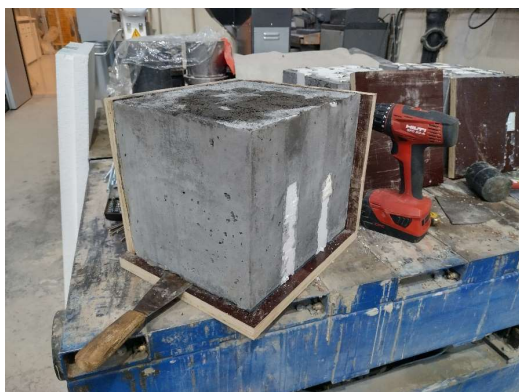


Obrázek 20: Betonování

Poslední fází bylo plnění forem čerstvým betonem. Na (Obrázek 20) je zobrazeno postupné vkládání betonu do formy. Zde bylo důležité udržet sloupečky polystyrenu ve svislé poloze, zvláště ty tenčí. Ty měly totiž tendenci kvůli působení betonu se ohýbat, dokonce i lámat.

3.2.5. Odbednění

Odbednění tvarovek vždy následovalo před další etapou, respektive výrobou dalších testovacích vzorků. Z forem se nejprve musely odvrtnat vruty, které držely polystyren, a následně se rozebralo bednění (Obrázek 21) a bylo možné vyjmout tvarovku (Obrázek 22). Bednění se následně opět složilo. Nato hned navazoval další cyklus betonáže nových vzorků.



Obrázek 21: Odbednění



Obrázek 22: Hotové vzorky

3.2.6. Doprovodná tělesa

Ke každému betonážnímu cyklu se vybetonovalo šest doprovodných těles v podobě trámčů o rozměrech 40×40×160 mm (Obrázek 23), které se použily na zkoušku v tahu za ohybu a následně zkoušku v tlaku na zbývajících fragmentech.



Obrázek 23: Doprovodná tělesa

3.3. Zkoušky doprovodných těles

Pro doprovodná tělesa byly vybrány následující zkoušky podle normy ČSN EN 206+A2.

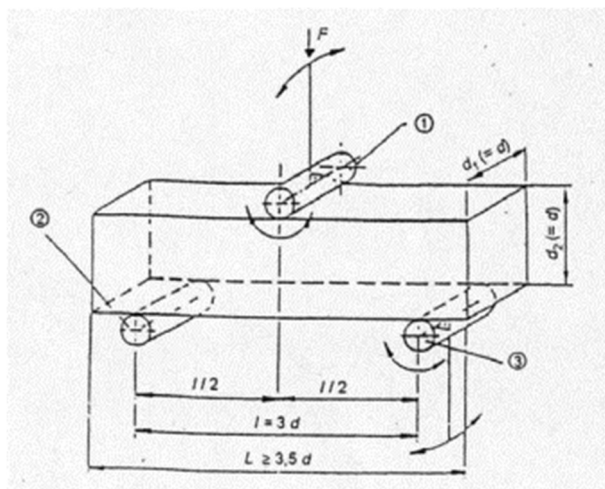
- Tahová zkouška za ohybu (Obrázek 24)(Obrázek 26)
- Tlaková zkouška (Obrázek 25)



Obrázek 24: Tahová zkouška za ohybu



Obrázek 25: Tlaková zkouška



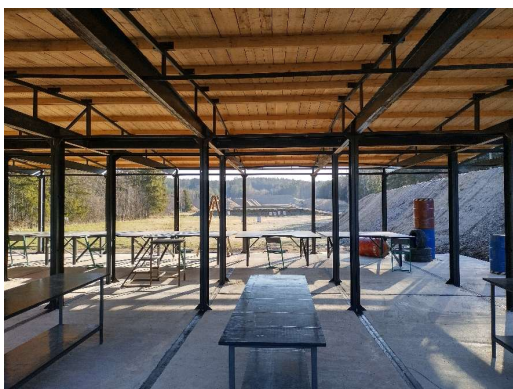
Obrázek 26: Tříbodový ohyb [24]

3.4. Zátěžové testy střelbou

Střelecké testy probíhaly v prostoru střelnice placy u Příbrami dne 5. dubna 2023 od 9:00 do 13:00. Panovala obava o stavu počasí a jeho vliv na střelecké zkoušky a samotného střelce. V případě mrazu nebo deště se špatně míří. Naštěstí ten den převládalo slunečné počasí. Teplota se ráno pohybovala pod bodem mrazu, avšak přes den se zvýšila na 10°C čímž pádem střelba proběhla bez problémů.

3.4.1. Střelnice

Střelnice Placy se nachází v lesích východně od Příbrami. Střelnice disponuje několika střelišti – 50, 100 m a 500 m. (Obrázek 27). Pro střelbu byla vybrána 50 m střelnice D (Obrázek 28). [25]



Obrázek 27: Střelnice A, 500 m



Obrázek 28: Střelnice D, 50 m

3.4.2. Transport, logistika

Počet tvarovek, který byl na střelnici vezen, byl 24 ks. Jedna cihla váží 25 kg, pak celková hmotnost vzorků je 600 kg. K tomu je zapotřebí připočítat váhu doprovodných stojů, materiálu a osob. Celková hmotnost dosahovala 1500 kg. Fotky z přepravy reprezentují (Obrázek 29) (Obrázek 30)



Obrázek 29: Nakládání dodávky



Obrázek 30: Vykládání vzorků na střelnici

3.4.3. Příprava před střelbou

Před samotnou střelbou bylo zapotřebí udělat několik úkonů.

- Zprvé vyzdít jednotlivé bloky stěn (Obrázek 32). To bylo docíleno za pomoci rychle-tuhnoucí lepicí směsi (Obrázek 31). Stěny byly volně položeny na paletě, sestaveny po dvou kusech od každého druhu tvarovky.
- Zadruhé nastavit měřící zařízení. Z toho kamera, která byla použita na snímání plochy tvarovky a jejím účelem bylo nasnímat video dopadu projektilu na povrch betonu tak, aby se dalo vytvořit zpomalený záběr (Obrázek 33). Dále pak rychlo-kameru, která měřila rychlost jednotlivých projektilů po výstřelu ze zbraně (Obrázek 34).
- Zatřetí příprava zbraní a munice (Obrázek 34).



Obrázek 31: Zdění tvarovek lepicí směsí



Obrázek 32: Připravené bloky stěn



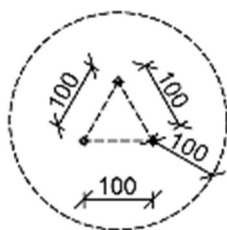
Obrázek 33: Příprava kamery



Obrázek 34: Nastavení rychlo-kamery, příprava munice a zbraní

3.4.4. Střelba

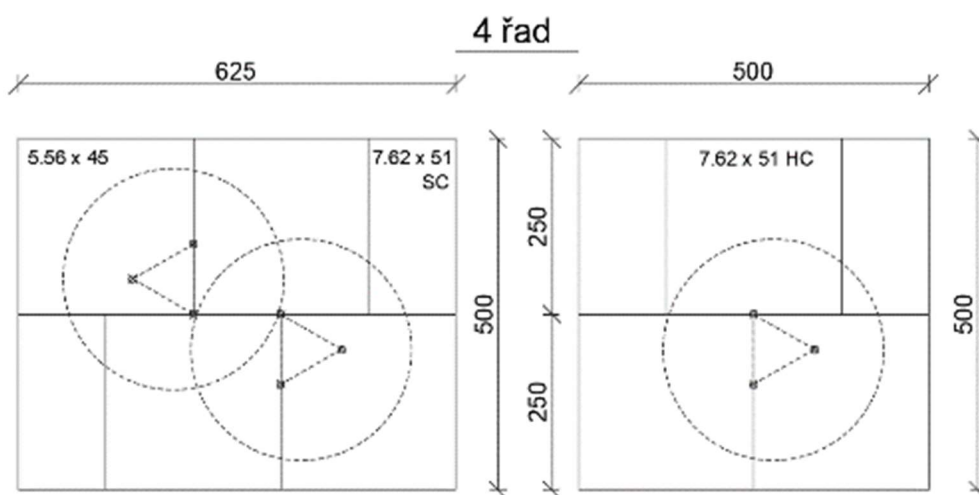
Střelba probíhala ve dvou palebných cyklech. Nejdříve se střílelo na pravé dvě stěny z tvarovek s „5 řadami“ (Obrázek 32), kde se jednotlivě odstřílely ráže podle balistických tříd FB5, FB6 a FB7. Poté se cyklus opakoval na levé dvě stěny tvarovky se „4 řadami“.



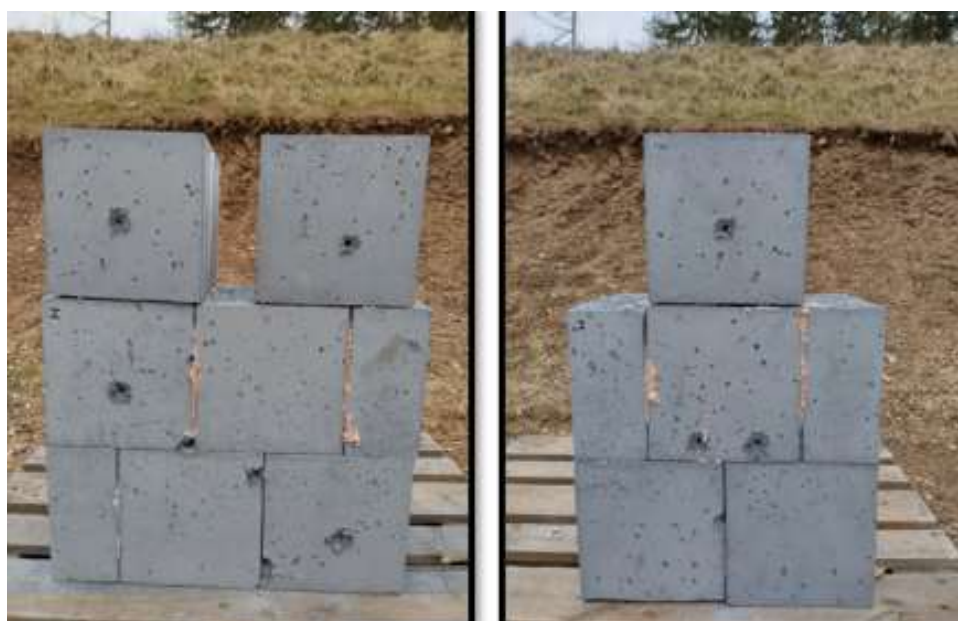
Obrázek 35: Nástřelový trojúhelník [mm]

Pro splnění zátěžového testu balistické třídy musel vzorek odolat zásahu nástřelového trojúhelníku dle normy ČSN EN 1522, jenž se skládá ze tří výstřelů dané balistické třídy s roztečí 100 mm (Obrázek 35). Kvůli lépe vypovídajícím hodnotám byl nástřelový trojúhelník umístěn do nejslabších zón zdícího systému, tj. první výstřel do třibodového styku spár, druhý na styk dvou spár a poslední výstřel do plné tvarovky.

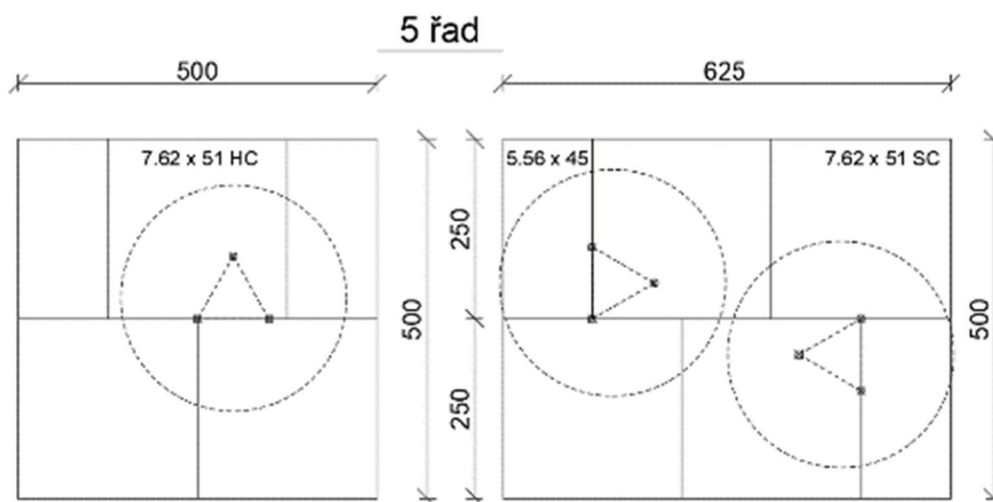
Následující obrázky (Obrázek 36) (Obrázek 38) ukazují schéma nástřelu stěn.



Obrázek 36: Schéma ideálního nástřelu stěny „4 řad“ [mm]



Obrázek 37: Skutečný nástřel stěny „4 řad“



Obrázek 38: Schéma nástřelu stěny „5 řad“ [mm]



Obrázek 39: Skutečný nástřel stěny „5 řad“

Reálné umístění zásahů je pak viděn (Obrázek 37) (Obrázek 39) Na každé stěně byly ještě nad rámec hlavního experimentu volně umístěny samostatné tvarovky, do jejichž středu se umístila od každé balistické třídy jedna rána. To bylo uděláno z důvodu lepší manipulace se vzorkem při zkoumání poškození než u spojené těžké stěny. Dále bylo také rozhodnuto, že by se takto samostatné tvarovky daly pilou rozříznout napůl a vidět průstřel v řezu.

4. Vyhodnocení kampaně a diskuse nad výsledky

V této kapitole jsou sepsány všechny výsledky měření, zkoušek a diskuse na výsledky.

4.1. Výsledky zkoušek doprovodných těles

Pro každý cyklus betonáže bylo vyrobeno šest kusů trámce 40×40×160 mm³. Na nich byla provedena zkouška tříbodového ohybu a tlaková zkouška ve stáří 60 dnů, jelikož je to čas stáří betonu v průběhu testů na střelnici. Důležitá pro nás nebyla ani tak absolutní čísla jakožto rozdíly mezi betonážními cykly.

V následující (*Tabulka 11*) jsou zobrazeny výsledky tahové zkoušky. Tahová pevnost se podle následujícího vzorečku vypočítá jako trojnásobek součinu síly dosažené při popraskání vzorku s roztečí podělená dvojnásobkem součinu šířky a kvadrátu výšky vzorku.

Tahová pevnost za ohybu u tříbodové zkoušky:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

F – maximální síla

d₁ – šířka trámce = 40 mm

l – rozteč = 100 mm

d₂ – výška trámce = 40 mm

Tabulka 11: Výsledky zkoušky tříbodového ohybu

	Vzorek	Stáří betonu [den]	Síla F [kN]	Průměrná tahová pevnost hranolu f _{cf} [MPa]	Průměrná tahová pevnost cyklu f _{cf} [MPa]
Cyklus 1	Trámec A	60 dní	7,4	17,3	15,2
	Trámec B	60 dní	6,9	16,2	
	Trámec C	60 dní	6,0	14,1	
	Trámec D	60 dní	7,7	18,0	
	Trámec E	60 dní	5,4	12,7	
	Trámec F	60 dní	5,6	13,1	

Cyklus 2	Trámec A	60 dní	6,1	14,3	13,6
	Trámec B	60 dní	5,4	12,7	
	Trámec C	60 dní	5,6	13,1	
	Trámec D	60 dní	6,7	15,7	
	Trámec E	60 dní	5,5	12,9	
	Trámec F	60 dní	5,5	12,9	
Cyklus 3	Trámec A	60 dní	8,4	19,7	18,4
	Trámec B	60 dní	7,9	18,5	
	Trámec C	60 dní	7,4	17,3	
	Trámec D	60 dní	8,9	20,9	
	Trámec E	60 dní	7,6	17,8	
	Trámec F	60 dní	6,8	15,9	
Cyklus 4	Trámec A	60 dní	9,2	21,6	18,0
	Trámec B	60 dní	7,0	16,4	
	Trámec C	60 dní	7,7	18,0	
	Trámec D	60 dní	6,0	14,1	
	Trámec E	60 dní	8,0	18,8	
	Trámec F	60 dní	8,1	19,0	
Cyklus 5	Trámec A	60 dní	7,8	18,3	17,8
	Trámec B	60 dní	7,5	17,6	
	Trámec C	60 dní	8,0	18,8	
	Trámec D	60 dní	7,3	17,1	
	Trámec E	60 dní	6,9	16,2	
	Trámec F	60 dní	8,0	18,8	
Cyklus 6	Trámec A	60 dní	8,7	20,4	25,7
	Trámec B	60 dní	12,0	28,1	
	Trámec C	60 dní	10,6	24,8	
	Trámec D	60 dní	10,5	24,6	
	Trámec E	60 dní	12,0	28,1	
	Trámec F	60 dní	12,1	28,4	

Cyklus 7	Trámec A	60 dní	8,6	20,2	20,8
	Trámec B	60 dní	9,0	21,1	
	Trámec C	60 dní	9,4	22,0	
	Trámec D	60 dní	9,5	22,3	
	Trámec E	60 dní	8,2	19,2	
	Trámec F	60 dní	8,6	20,2	

Z uvedených výsledků vyplývá (*Tabulka 11*), že tahová pevnost doprovodných těles před se pohybovala v rozmezí od 13,6 do 25,7 MPa. To je téměř dvojnásobný rozdíl nejmenší a největší průměrné hodnoty.

V následující (*Tabulka 12*) jsou znázorněny výsledky tlakové zkoušky. Tlaková pevnost se podle následujícího vzorce získala tak, že se síla při dosažení kritické síly, při které vzorek popraskal, podělila plochou zatěžování.

Tlaková pevnost:

$$f_{ct} = \frac{F}{A}$$

F – síla A – plocha zatěžování = 1600 mm²

Tabulka 12: Výsledky zkoušky v tlaku

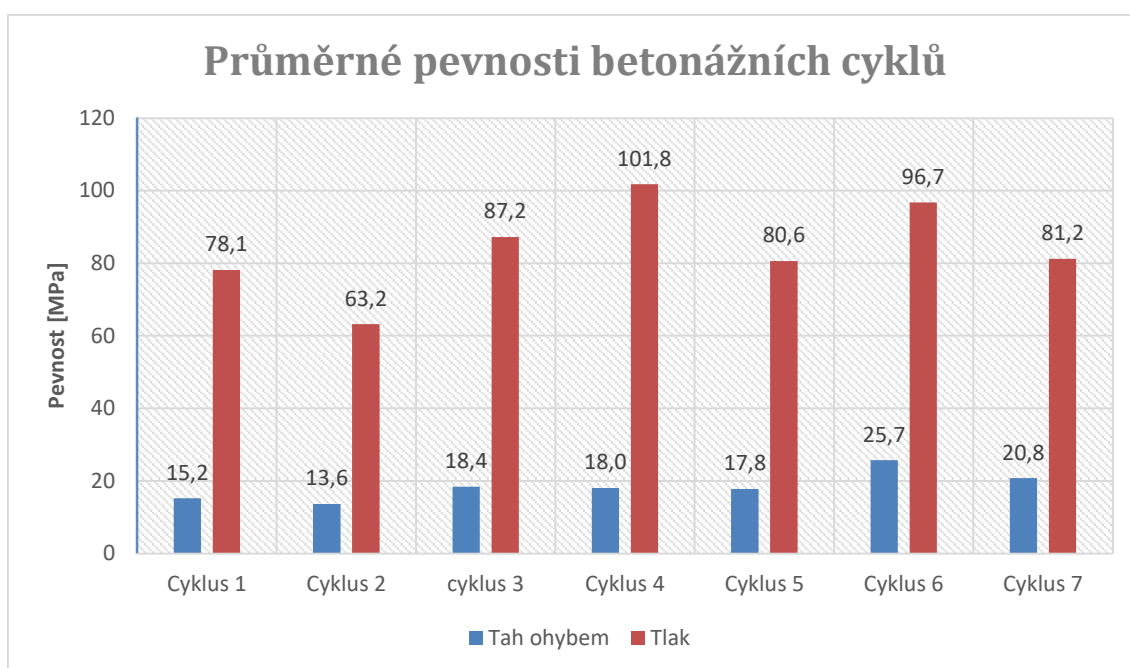
	Vzorek	Stáří betonu [den]	Síla část 1 F [kN]	Síla část 2 F [kN]	Průměrná pevnost trámce f _{ct} [MPa]	Průměrná pevnost cyklu f _{ct} [MPa]
Cyklus 1	Trámec A	60 dní	128	134	81,9	78,1
	Trámec B	60 dní	121	135	80,0	
	Trámec C	60 dní	115	115	71,9	
	Trámec D	60 dní	122	133	79,7	
	Trámec E	60 dní	121	125	76,9	
	Trámec F	60 dní	129	122	78,4	

Cyklus 2	Trámec A	60 dní	118	98	67,5	63,2
	Trámec B	60 dní	99	116	67,2	
	Trámec C	60 dní	93	102	60,9	
	Trámec D	60 dní	100	104	63,8	
	Trámec E	60 dní	94	94	58,8	
	Trámec F	60 dní	106	90	61,3	
Cyklus 3	Trámec A	60 dní	152	139	90,9	87,2
	Trámec B	60 dní	143	143	89,4	
	Trámec C	60 dní	137	135	85,0	
	Trámec D	60 dní	140	146	89,4	
	Trámec E	60 dní	140	128	83,8	
	Trámec F	60 dní	136	136	85,0	
Cyklus 4	Trámec A	60 dní	172	150	100,6	101,8
	Trámec B	60 dní	172	178	109,4	
	Trámec C	60 dní	140	177	99,1	
	Trámec D	60 dní	155	152	95,9	
	Trámec E	60 dní	171	167	105,6	
	Trámec F	60 dní	155	165	100,0	
Cyklus 5	Trámec A	60 dní	136	127	82,2	80,6
	Trámec B	60 dní	132	137	84,1	
	Trámec C	60 dní	133	116	77,8	
	Trámec D	60 dní	134	131	82,8	
	Trámec E	60 dní	140	131	84,7	
	Trámec F	60 dní	100	130	71,9	
Cyklus 6	Trámec A	60 dní	169	145	98,1	96,7
	Trámec B	60 dní	166	180	108,1	
	Trámec C	60 dní	142	174	98,8	
	Trámec D	60 dní	141	119	81,3	
	Trámec E	60 dní	140	152	91,3	
	Trámec F	60 dní	160	168	102,5	

Cyklus 7	Trámec A	60 dní	144	144	90,0	81,2
	Trámec B	60 dní	142	130	85,0	
	Trámec C	60 dní	144	153	92,8	
	Trámec D	60 dní	134	122	80,0	
	Trámec E	60 dní	112	114	70,6	
	Trámec F	60 dní	117	117	73,1	

Z uvedených výsledků vyplývá (Tabulka 12), že tlaková pevnost doprovodných těles před zátěžovým testem na střelnici se pohybovala v rozmezí od 63,0 do 102,0 MPa.

Pro lepší představu byla data z (Tabulka 11) (Tabulka 12) vložena do (Graf 2)



Graf 2: Průměrné pevnosti betonážních cyklů

Z hodnot je patrné, že ne všechny cykly byly stejné. Například celková průměrná tahová pevnost dosahovala 18,5 MPa, avšak druhý a šestý cyklus svými hodnotami 13,6 a 25,7 MPa vybočovaly. To samé bylo způsobeno i u tlakové pevnosti, kde se celkový průměr pohyboval na hodnotě 84,2 MPa. Druhý, čtvrtý a šestý cyklus se se svými hodnotami 63,2 101,8 a 96,7 MPa od daného průměru významně odchylovaly.

Tyto nerovnoměrné výsledky v oblasti pevností se pravděpodobně dají připisat prefabrikované pytlované směsi, která i když byla od jednoho výrobce, vykazovala v rámci betonáže jiné reologické vlastnosti při dodání stejného množství vody.

Dále byla na vzorcích zjišťována objemová hmotnost. Jednotlivé vzorky se zvážily a poté se podělily objemem podle následujícího vzorečku.

Objemová hmotnost:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m – hmotnost V – objem = 256 000 mm³

Tabulka 13: Objemové hmotnosti doprovodných těles

	Vzorek	Hmotnost m [g]	Průměrná objemová hmotnost cyklu ρ [kg/m ³]		Vzorek	Hmotnost m [g]	Průměrná objemová hmotnost cyklu ρ [kg/m ³]
Cyklus 1	Trámec A	598	2542	Cyklus 5	Trámec A	611	2565
	Trámec B	620			Trámec B	615	
	Trámec C	614			Trámec C	622	
	Trámec D	597			Trámec D	643	
	Trámec E	606			Trámec E	611	
	Trámec F	625			Trámec F	591	
Cyklus 2	Trámec A	564	2455	Cyklus 6	Trámec A	627	2614
	Trámec B	620			Trámec B	636	
	Trámec C	581			Trámec C	637	
	Trámec D	628			Trámec D	625	
	Trámec E	585			Trámec E	617	
	Trámec F	557			Trámec F	622	

Cyklus 3	Trámec A	625	2644	Cyklus 7	Trámec A	601	2542
	Trámec B	656			Trámec B	591	
	Trámec C	635			Trámec C	592	
	Trámec D	624			Trámec D	633	
	Trámec E	610			Trámec E	618	
	Trámec F	657			Trámec F	625	
Cyklus 4	Trámec A	616	2628				
	Trámec B	616					
	Trámec C	617					
	Trámec D	636					
	Trámec E	650					
	Trámec F	650					

Z uvedených výsledků vyplývá (*Tabulka 13*), že průměrná objemová hmotnost doprovodných těles se pohybovala v rozmezí od 2 450 do 2 650 kg/m³.

4.2. Rychlosti výstřelů

V následující (Tabulka 14) jsou vypsané průměrné rychlosti výstřelů jednotlivých ráží ze střelnice.

Tabulka 14: Úst'ové rychlosti projektilů

Tvarovka „4 řad				Tvarovka „5 řad			
Ráže	Výstřel	Úst'ová rychlost projektilů V_0 [m/s]	Průměrná úst'ová rychlost cyklu V_0 [m/s]	Ráže	Výstřel	Úst'ová rychlost projektilů V_0 [m/s]	Průměrná úst'ová rychlost cyklu V_0 [m/s]
5.56×45	A0	996	993	5.56×45	F0	1003	984
	A1	x			F1	x	
	A2	989			F2	972	
	A3	993			F3	976	
7.62×51 SC	B0	778	801	7.62×51 SC	E0	796	793
	B1	817			E1	790	
	B2	809			E2	798	
	B3	801			E3	789	
7.62×51 HC	C0	766	780	7.62×51 HC	D0	807	796
	C1	789			D1	787	
	C2	784			D2	795	
	C3	780			D3	795	

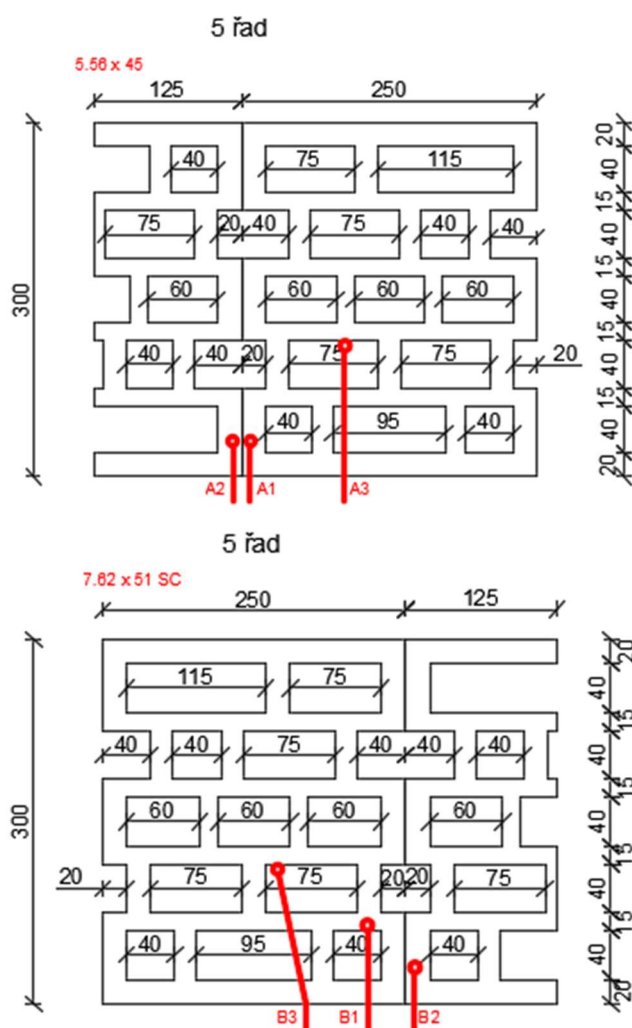
x – data nejsou k dispozici

Co se týká rychlosti výstřelů, nebyli zaznamenány výraznější odlišnosti. Akorát při výstřelu A1 a F1 kamera z neznámých důvodů nezaznamenala rychlost.

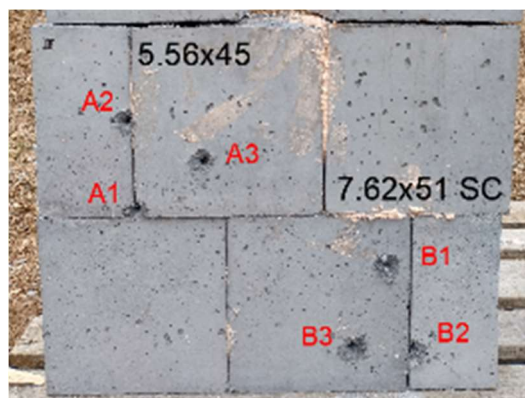
4.3. Dráha a hloubka průstřelu

4.3.1. Rozbor stěn

Celistvé stěny byly podrobeny trasování výstřelů. To bylo provedeno postupem tepelného vypalování polystyrenových výplní pomocí horkovzdušné pistole. Po vypálení bylo z důvodu viditelnosti do nitra stěny snadné určit trasu projektilu prostrčením drátu skrz kráter a dále stěnami ve tvarovce.



Obrázek 40: Dráha průstřelů A, B



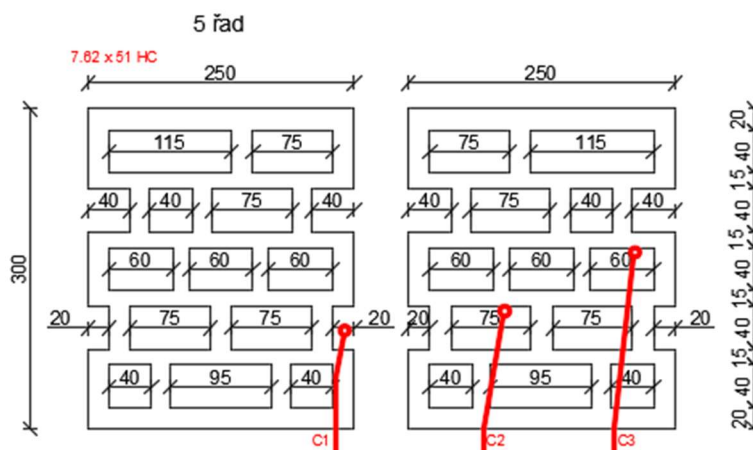
Obrázek 41: Stěna „5 řad“; 5.56×45, 7.62×51 SC

(Obrázek 40) (Obrázek 41): Projektil A1 testoval hranu tří spár. Jelikož je místo dopadu zesíleno podélnou obvodní stěnou, střela se ihned zastavila. To samé se projevilo u projektilu A2, který testoval hranu dvou spár. Tam také neměla střela dostatečnou kinetickou energii pro hlubší penetraci. Projektil A3 byl vlně volně vystřelen do prostoru tvarovky a jeho dráha překonala dvě příčky a zastavila se na třetí, která byla v místě dopadu zesílena podélnou stěnou.

(Obrázek 40) (Obrázek 41): Projektil B1 proletěl první příčkou a zastavil se o druhou v místě zesílení podélnou stěnou. Projektil B2 testoval hranu dvou spár. Jelikož je místo zpevněno obvodovou stěnou, kulka se ihned zastavila. Projektil B3 dopal na tvarovku v místě zesílení podélnou stěnou, která jeho dráhu lehce vychýlila směrem do středu. Tam proletěl druhou příčkou a svoji dráhu ukončil na třetí.

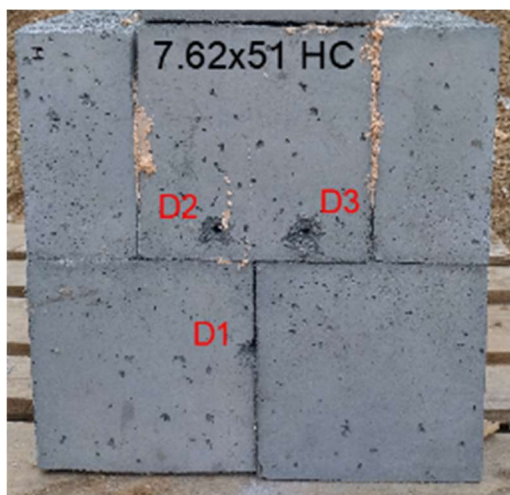


Obrázek 42: Stěna „5 řad“; 7.62×51 HC

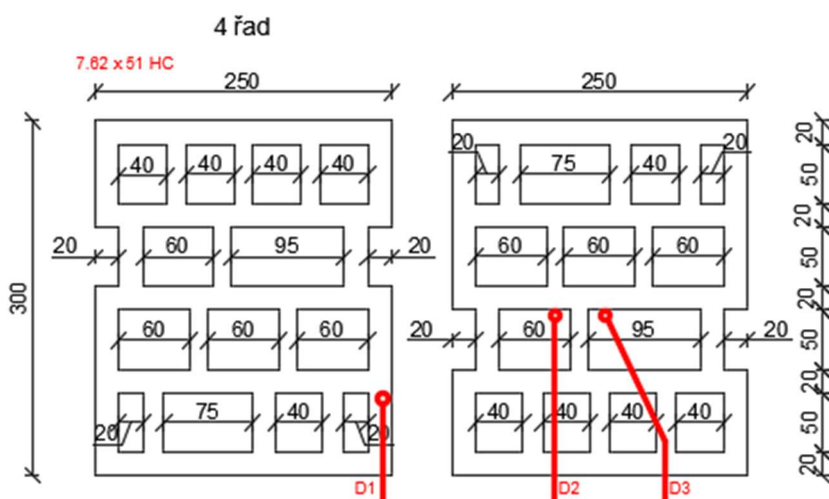


Obrázek 43: Dráha průstřelů C

(Obrázek 42) (Obrázek 43): Projektil C1 byl vystřelen s úmyslem otestovat hranu dvou spár. Dráha střely letěla lehce vně blíže komůrce a následně zakončila v polystyrenu v druhé řadě. Projektil C2 narazil do místa zesíleného podélnou stěnou, která jeho dráhu odklonila více doprostřed, kde proletěl druhou příčkou a dopadl na třetí přepážku zesílněnou další podélnou stěnou a dále neměl sílu k pokračovat. Projektil C3 proletěl ze všech výstřelů nejdále až ke čtvrté stěně. První místo dopadu lehce změnilo dráhu letu. Poté střela bez problému proletěla dalšími dvěma příčkami a její dráha byla ukončena v místě přepážky se zesílenou podélnou stěnou.

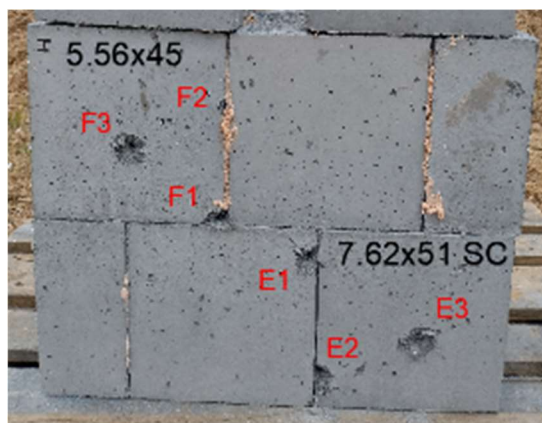


Obrázek 44: Stěna „4 řad“; 7.62×51 HC

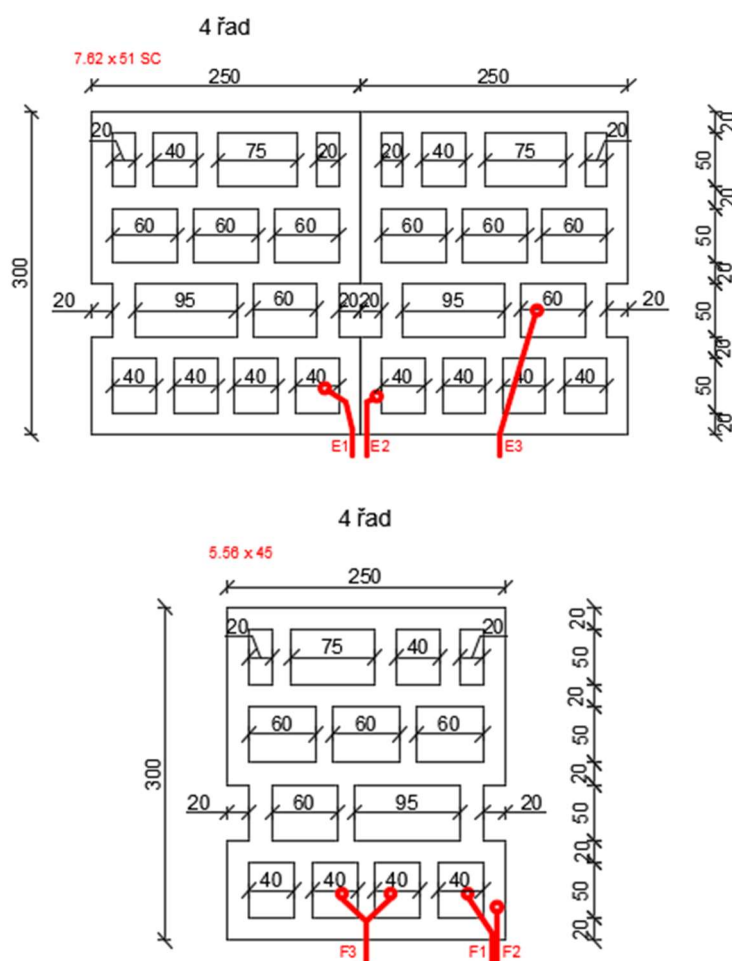


Obrázek 45: Dráha průstřelů D

(Obrázek 44) (Obrázek 45): Projektil D1 testoval hranu dvou spár. Jelikož je plocha dopadu zpevněna podélnou obvodovou stěnou, střela ztratila velkou část své energie a zastavila se v obvodové stěně na úrovni druhé příčky. Projektil D2 prošel dvěma příčkami a zastavil se o třetí přepážku zesílenou podélnou stěnou. Projektil D3 narazil na tvarovku v místě zpevněném podélnou stěnou, která dráhu kulky odklonila doprostřed tvarovky. Dále střela proletěla druhou příčkou a zastavila se o třetí.



Obrázek 46: Stěna „4 řad“; 5.56×45, 7.62×51 SC



Obrázek 47: Dráha prústřelů E, F

(Obrázek 46) (Obrázek 47): Projektil E1 testoval hranu tří spár. Jelikož je místo dopadu zesíleno podélnou obvodní stěnou, střela se ihned zastavila. To samé se projevilo u projektilu E2, který testoval hranu dvou spár. Tam také neměla střela sílu proniknout hlouběji. Projektil E3 byl vlně volně vystřelen do prostoru tvarovky a jeho dráha překonala dvě příčky a zastavila se na třetí, která byla v místě dopadu zesílena podélnou stěnou.

(Obrázek 46) (Obrázek 47): Projektil F1 testoval místo spojení tří spár. Jelikož je oblast zpevněna obvodovou stěnou, střela ztratila velkou část své energie a byla odkloněna do první řady polystyrenu, kde skončila. To samé se stalo s projektillem F2, který testoval místo spojení dvou spár. Zde se však střela okamžitě zastavila v obvodové stěně. Projektil F3 dopadl na tvarovku v místě zesílení podélnou stěnou, tudíž se v tomto případě rozpůlil a každá část skončila v první řadě polystyrenu.

Ze zvyše popsaných trasování zásahů můžeme konstatovat, že ani u jedné stěny nedošlo k prostřelení skrz tvarovkou. Pokud bychom zmíněné tvarovky hodnotily podle normy ČSN EN 1522, všechny by splnily nejvyšší balistickou třídu FB7.

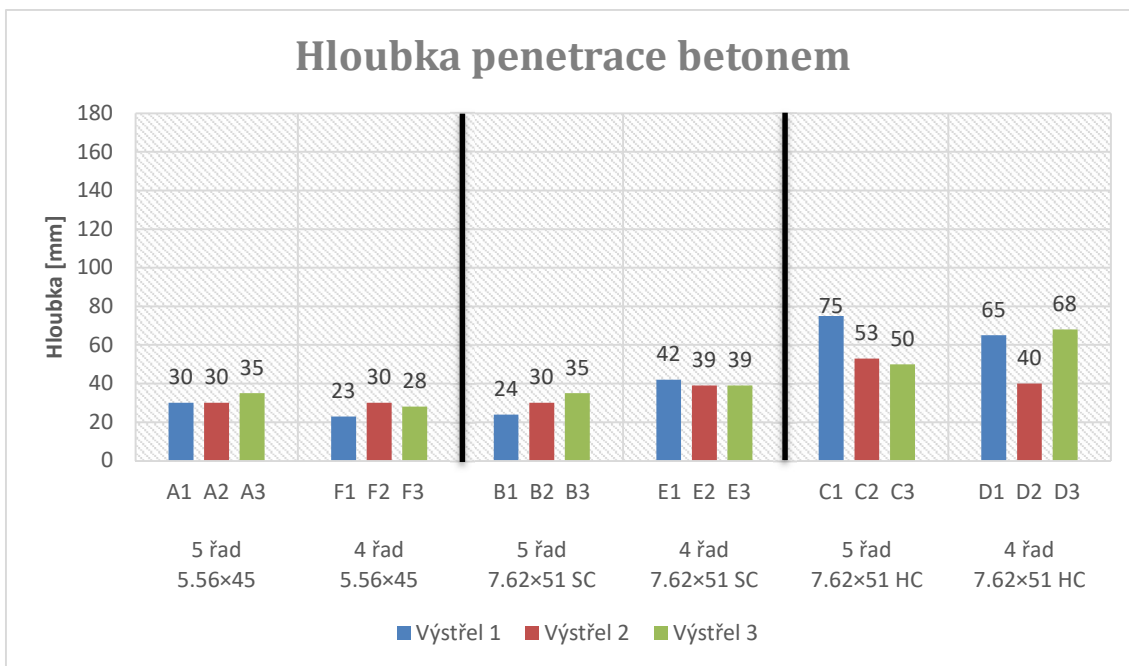
Výčet hloubek penetrace materiálem a celkové penetrace tvarovkou je zobrazen v následující (Tabulka 15).

Tabulka 15: Hloubka penetrace

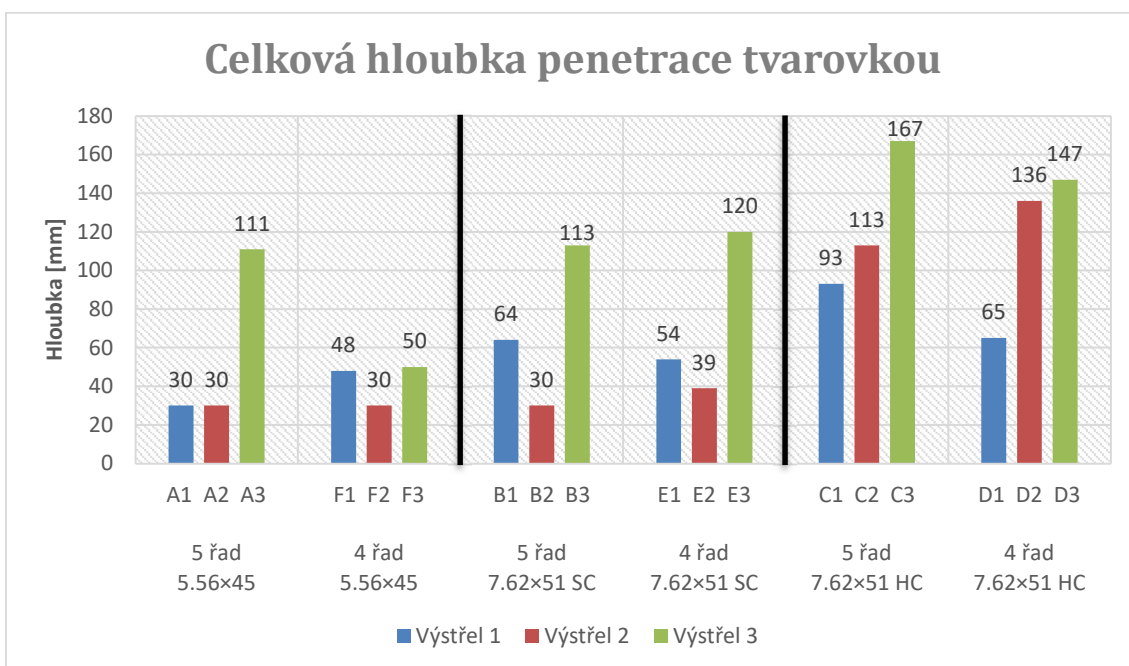
Tvarovka „5 řad				Tvarovka „4 řad			
Ráže	Výstřel	Penetrace betonem s [mm]	Celková penetrace h [mm]	Ráže	Výstřel	Penetrace betonem s [mm]	Celková penetrace h [mm]
5.56×45	A0	x	x	5.56×45	F0	x	x
	A1	30	30		F1	23	48
	A2	30	30		F2	30	30
	A3	35	111		F3	28	50
7.62×51 SC	B0	x	x	7.62×51 SC	E0	x	x
	B1	24	64		E1	42	54
	B2	30	30		E2	39	39
	B3	35	113		E3	39	120
7.62×51 HC	C0	x	x	7.62×51 HC	D0	x	x
	C1	75	93		D1	65	65
	C2	53	113		D2	40	136
	C3	50	167		D3	68	147

x – data nejsou k dispozici

Pro lepší vizuální přehled byla data překreslena do grafů (Graf 3)(Graf 4) na následující stránce.



Graf 3: Hloubka penetrace betonem



Graf 4: Celková hloubka penetrace tvarovkou

Při zběžném pohledu na (*Graf 3*) nebyl zaznamenán žádný významný trend. Jediné patrné je, že s vyšší ráží roste průměrná hloubka penetrace betonem. Rozdíly v tomto případě jsou mezi projektily 5.56×45 a 7.62×51 HC okolo dvojnásobku. Co se týká porovnání mezi prototypy tvarovek, z popsaných výsledků nejde určit jednoznačný závěr. Při testech se nijak neprokázalo, že by jeden z uvedených systému tvarovky byl výrazně lepší než ten druhý nebo výrazněji propadl v balistické odolnosti.

Jelikož se naskytla příležitost porovnat vzorky diplomové práce s jinými materiály, v následující pasáži bude možné nahlédnout na porovnání betonových tvárnic s keramickou tvarovkou 300×250×240 mm³ (d×š×v) (*Obrázek 48*) a pórobetonovou tvarovkou 500×300×250 mm³ (d×š×v) (*Obrázek 49*), které byly zatěžovány projektilem 5.56×45.

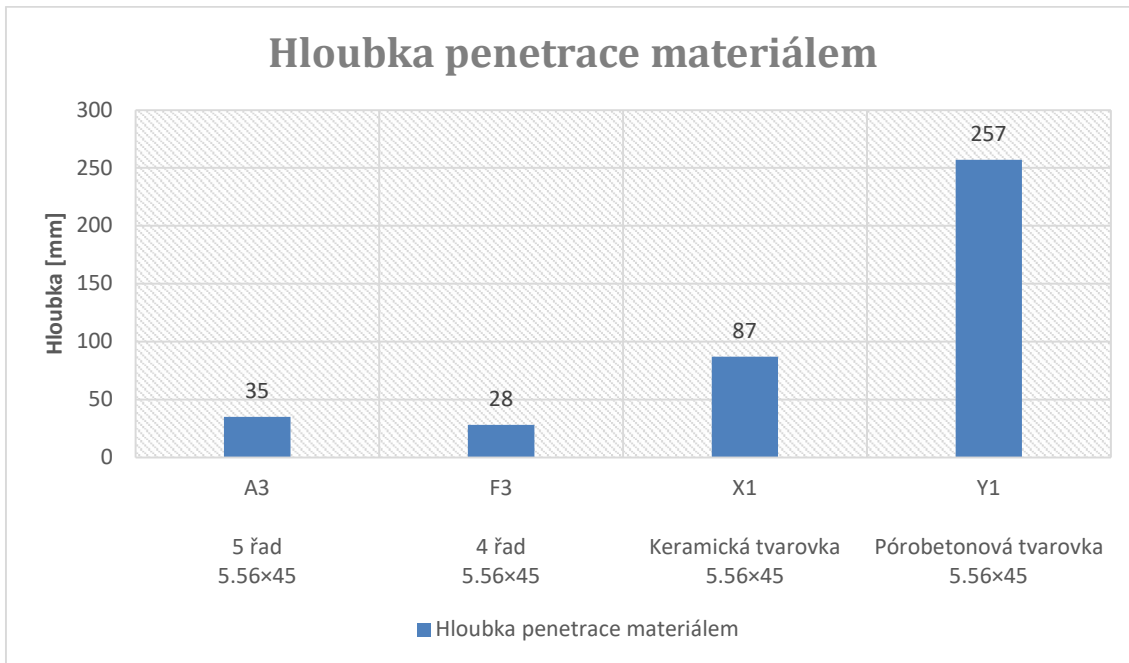


Obrázek 48: Keramická tvarovka

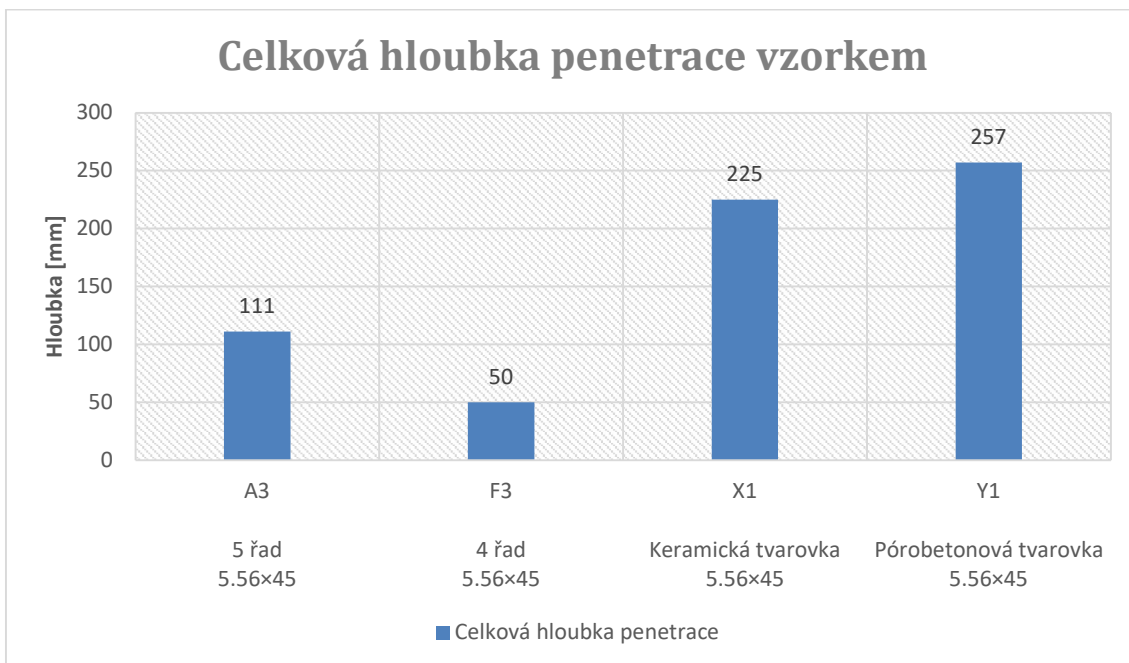


Obrázek 49: Pórobetonová tvarovka

V následujících (Graf 5) (Graf 6) jsou vyneseny příslušné hodnoty penetrace materiálem a celková hloubka tvarovek u ráží 5.56×45.



Graf 5: Hloubka penetrace materiálem



Graf 6: Celková hloubka penetrace vzorkem

Z hodnot (*Graf 5*) je patrné, že rozdíly mezi hloubkami průstřelu tvarovkami jsou významné. Při průměrné hloubce materiálem okolo 30 mm u betonových tvarovek je u keramické hloubka větší téměř 300 % respektive 87 mm, u pórobetonu o více než 850 % respektive 257 mm.

4.3.2. Rozbor samostatných tvarovek

Pro lepší přehled stavu uvnitř tvarovky po výstřelu a z důvodu lepší manipulace se vzorky než u stěny bylo všech šest volně stojících kusů tvarovek rozříznuto v podélném směru skrze kráter (*Obrázek 51*). Tato činnost byla provedena řezací pilou (*Obrázek 50*) na pracovišti experimentálního centra fakulty stavební.



Obrázek 50: Pila



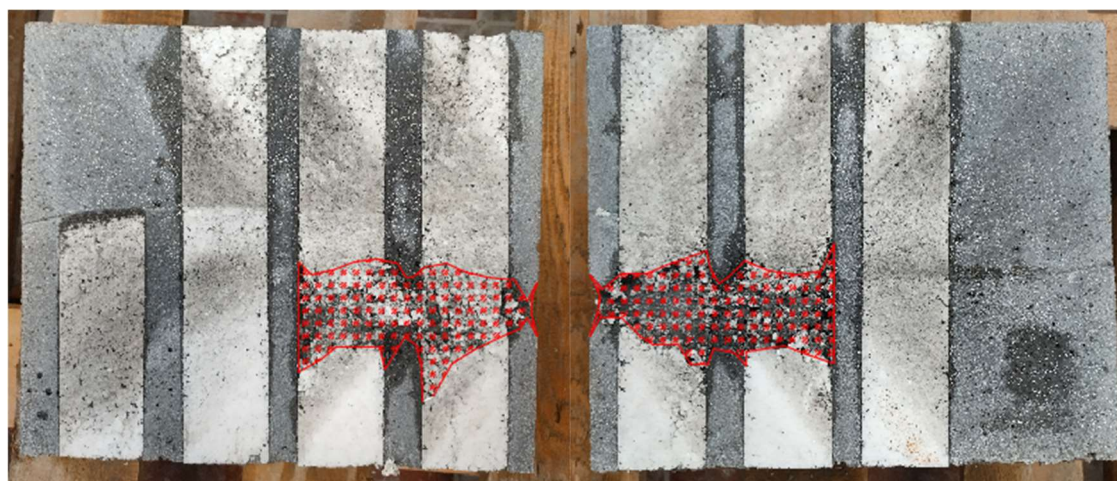
Obrázek 51: Přeříznutá tvarovka

(*Obrázek 52*) a (*Obrázek 55*) nám znázorňuje řez vzorkem, při kterém byla vychýlena dráha projektilu při nárazu do podélné stěny. U (*Obrázek 52*) střela dopadla na přední stěnu tvarovky v místě zesílení podélnou stěnou a byla odkloněna do levé části komory. U (*Obrázek 55*) střela proletěla první příčnou stěnou a při nárazu na druhou dopadla v místě spoje s podélnou stěnou. Její dráha byla také odkloněna z původního směru.

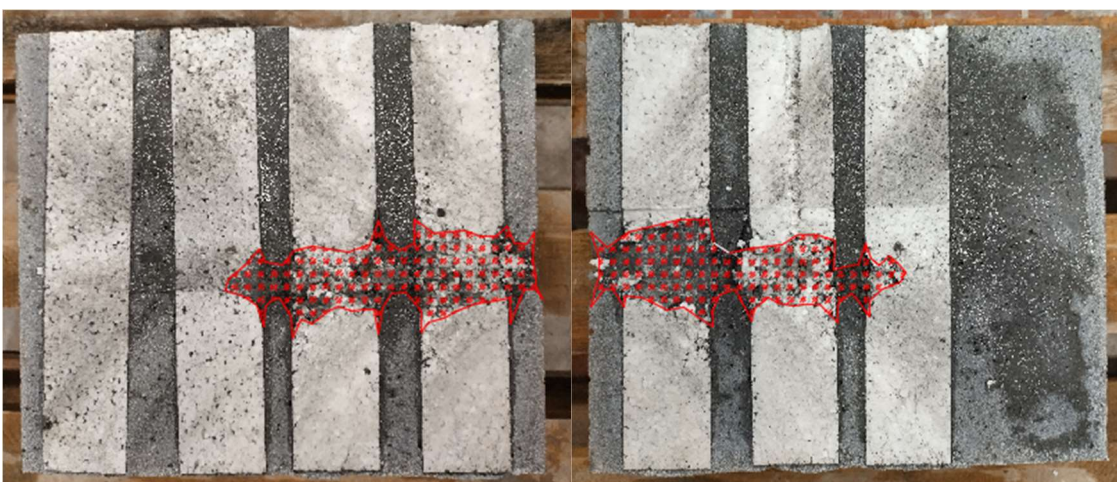
U zbylých řezů (*Obrázek 53*) (*Obrázek 54*) (*Obrázek 56*) (*Obrázek 57*) byla dráha projektilu víceméně přímá. Tvorbu předního a zadního kráteru u tenkostěných konstrukcí krásně ukazuje (*Obrázek 56*), kde je vidět poškození jednotlivých stěn. Zároveň můžeme spatřit roznos zbytku materiálu v kónovitěm tvaru po průrazu projektilu stěnou.



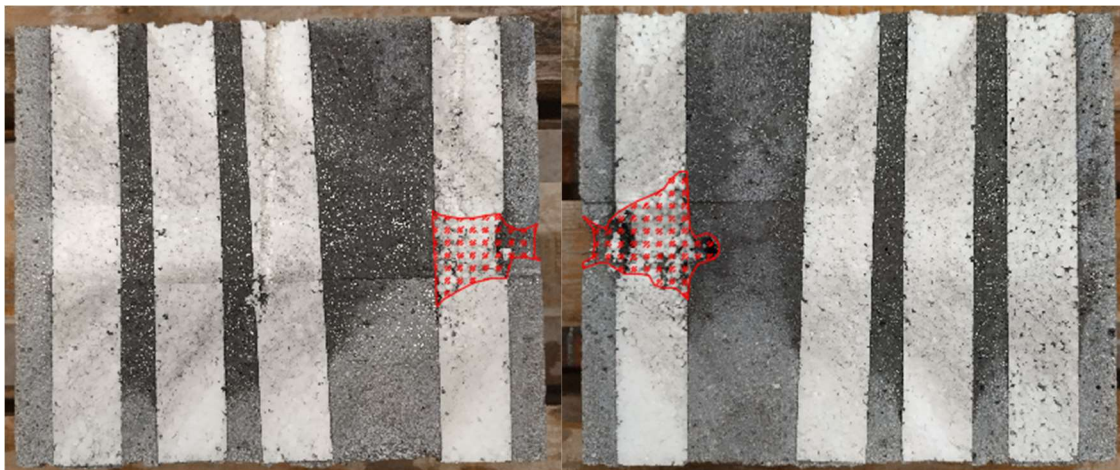
Obrázek 52: Řez „4 řad“; 5.65×45



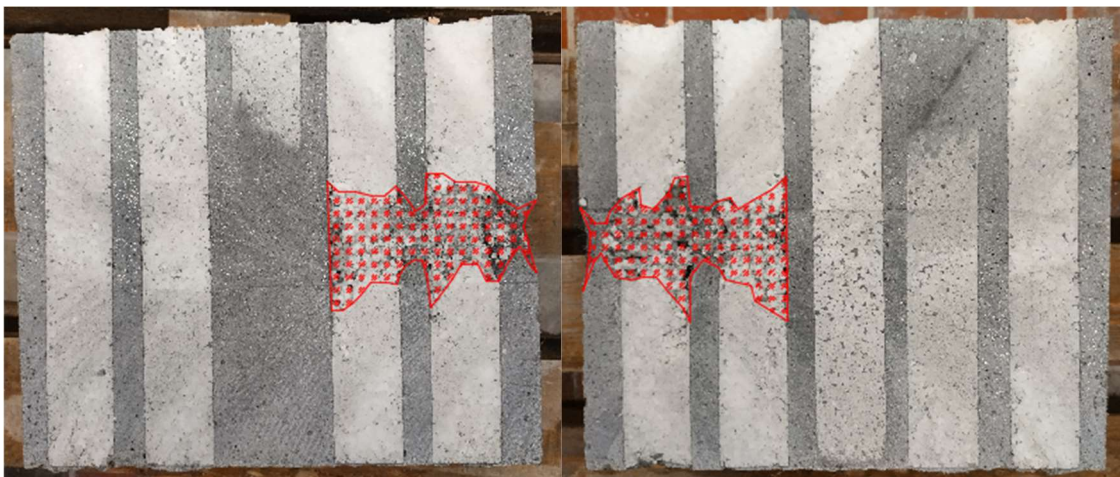
Obrázek 53: Řez „4 řad“; 7.62×51 SC



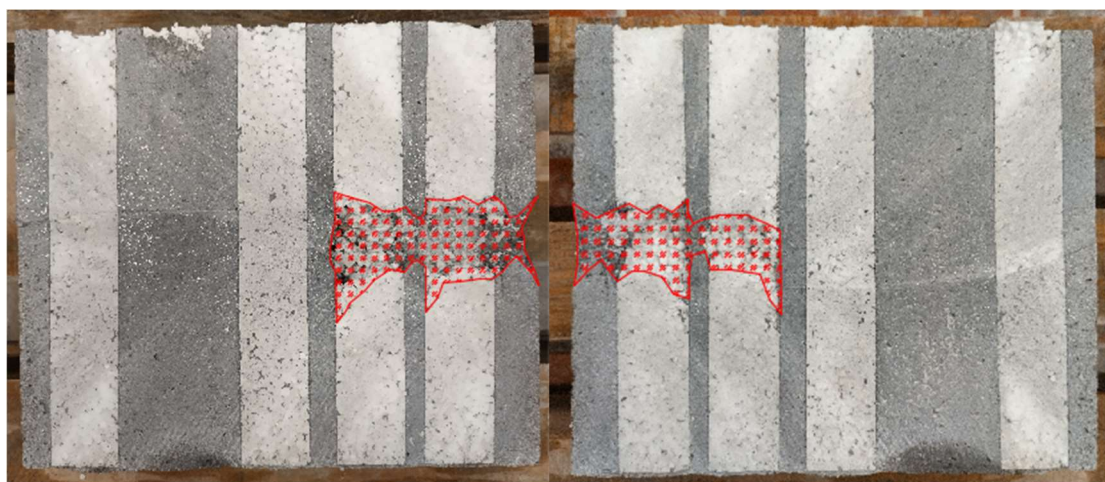
Obrázek 54: Řez „4 řad“; 7.62×51 HC



Obrázek 55: Řez „5 řad“; 5.56×45



Obrázek 56: Řez „5 řad“; 7.62×51 SC



Obrázek 57: Řez „5 řad“; 7.62×51 HC

5. Závěr

Hlavním cílem této experimentální kampaně bylo navrhnout a otestovat silikátovou tvarovku z vysokohodnotného a drátky vyztuženého betonu proti účinkům balistického zatížení. Pro lepší vypovídající hodnoty a možné mezinárodní srovnání byly vybrány střelecké ráže z normy ČSN EN 1522 OKNA, DVEŘE, UZÁVĚRY A ROLETY – ODOLNOST PROTI PRŮSTŘELU – POŽADAVKY A KVALIFIKACE, jenž se používá ke kategorizaci neprůstřelných předmětů.

Tvarovka byla vyrobena ze směsi vysokohodnotného betonu s 1,5 % množstvím kovových vláken. Rozměr vzorku byl zvolen na 250×300×250 mm³ (š×d×v) jako standartní velikost cihel ve stavebnictví. Poměr množství materiálu betonu k polystyrenu ve směru střelby byl 100 mm ku 200 mm. Systém příčných stěn a podélných výztuh silikátové tvarovky byl navržen takovým způsobem, aby byla balistická odolnost vzorku co nejvyšší, hlavně správným rozmístěním podélných výztuh. Tvarovky byly zhotoveny ve dvou prototypch. Prvním z nich je pěti vrstvá tvarovka „4 řady“ a druhá šesti vrstvá tvarovka „5 řad“. Výsledky penetrace materiálem dopadly následovně. U ráže 5.56×45 se průměrná hloubka pohybovala okolo 30 mm u obou systémů. V případě ráže 7.62×51 SC byla hloubka 4 řadu 40 mm a u 5 řadu 30 mm. Poslední ráže 7.62×51 HC měla průměrné hloubky pro 4 řad i 5 řad 60 mm. Od první ráže se liší dvojnásobnou hodnotou. Očekávání experimentální kampaně bylo takové, že by tyto dva systémy mohly mít výrazně balisticky rozdílné vlastnosti, což se však v rámci balistických zkoušek neprokázalo. Nicméně oba typy byly stejně úspěšné v neprůstřelnosti a všechny projektily dokázaly zachytit. Podle normy by získaly nejvyšší třídu balistické odolnosti FB7.

V rámci porovnání betonových tvarovek s jinými materiály u ráže 5.56×45 dopadly výsledky lépe. Průměr 4 řadu a 5 řadu byl již zmíněných 30 mm, u keramické tvarovky byla zjištěna hloubka 87 mm, což je téměř třínásobek. Poslední pórobetonový vzorek vykázal osminásobnou hodnotu průstřelu materiálem respektive 257 mm.

Do budoucna by bylo zajímavé vyrobit silikátovou tvarovku z běžného betonu s kovovými drátky a také z běžného betonu bez drátků a ty porovnat s nynějšími výsledky experimentální kampaně diplomové práce. Pomohlo by to objasnit, jestli má vysokohodnotný beton v tomto případě takový vliv na neprůstřelnost anebo jestli je jeho pozice nadbytečná a lépe nahraditelná obyčejným a levnějším betonem. U porovnání s anebo bez drátků by bylo zajímavé vidět rozdíl v hloubce penetrace a jestli se z neprůstřelné tvarovky stane rázem tvarovka průstřelná. Přece jenom mají ocelové drátky významný vliv na tahové napětí, které je při balistických zkouškách na tenkostěnné konstrukce výrazné.

6. Reference

- [1] M. Tipka, „Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu,“ 2011. [Online]. Available: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_pr_iprava_HSC_a_UHSC.pdf. [Přístup získán 5. Květen 2023].
- [2] P.-C. Aitcin, Vysokohodnotný beton, Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005.
- [3] K. Trtík, Technologie betonu, Praha: Česká technika, 2009.
- [4] J. L. Vítek, D. Čítek, R. Coufal, J. Kolísko a J. Marek, „UHPC a jeho aplikace v České Republice,“ *Časopis Beton*, č. 4, pp. 99-111, 15. Srpen 2019.
- [5] R. Coufal, „Lávka z ultra-vysokohodnotného betonu,“ 28 Duben 2016. [Online]. Available: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/lavka-z-ultra-vysokohodnotneho-betonu>. [Přístup získán 7. Květen 2023].
- [6] E. Fehling, . M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher, S. öhlich a S. öhlich, Ultra-High Performance Concrete UHPC, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, 2015.
- [7] M. Mára, Vliv struktury balisticky odolného kompozitu, Praha: Disertační práce, 2021.
- [8] X. Chen, X. Li, F. Huang, H. Wu a Y. Chen, Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile, *Int J Impact Eng*, 2008.
- [9] Y. Peng, H. Wu, Q. Fang, Z. Gong a X. Kong, A note on the deep penetration and perforation of hard projectiles into thick targets, *International Journal of Impact Engineering*, 2015.
- [10] H. Wu, Q. Fang a Y. Zhang, Semi-theoretical analyses of the concrete plate perforated by a rigid projectile, *Acta Mech Sin*, 2012.
- [11] V. Luk a M. Forestal, Penetration into semi-finite reinforced concrete targets with spherical and ogival nose projectiles, *Int J Impact Eng*, 1987.
- [12] A. Dancygier a D. Yankelevsky, High strenght concrete response to hard projectile impact, *Int. Journal impact Eng.*, 1996.

- [13] A. Dancygier, Rear face damage of normal and high-strength concrete elements caused by hard projectile impact, ACI Structure, 1998.
- [14] „Náboj (střelivo),“ Wikipedie, [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1boj_\(st%C5%99elivo\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1boj_(st%C5%99elivo)). [Přístup získán 7. Duben 2023].
- [15] Český normalizační institut, ČSN EN 1522 - Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Požadavky a klasifikace, Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [16] T. Hrabě, Balistická odolnost vysokohodnotného betonu podle ČSN EN 1522, Praha: Bakalářská práce, 2021.
- [17] Zbraně.cz, „5,56 NATO,“ [Online]. Available: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/5,56-NATO>. [Přístup získán 30. Duben 2021].
- [18] V. Krčma, J. Hýkel a P. Neshyba, Atlas nábojů do ručních palných zbraní, Praha: Naše vojsko s.r.o., 2016.
- [19] Armed, „RÁŽE 223 REM, 5,56 X 45 MM NATO,“ [Online]. Available: <https://www.armed.cz/slovník/raze-223-rem-5-56-x-45-mm-nato/>. [Přístup získán 7. Duben 2023].
- [20] Ministerstvo obrany, „5,56 mm CZ 805 BREN A1/A2,“ [Online]. Available: <http://www.73tankovyprapor.army.cz/fotogalerie/556-mm-cz-805-bren-a1a2>. [Přístup získán 30. Březen 2023].
- [21] Zbraně.cz, „308 Win,“ [Online]. Available: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/308-win>. [Přístup získán 12. Květen 2023].
- [22] Armed, „RÁŽE 308 WINCHESTER, 7,62 X 51 MM NATO,“ [Online]. Available: <https://www.armed.cz/slovník/raze-308-winchester-7-62-x-51-mm-nato/>. [Přístup získán 8. Duben 2023].

- [23] Czech ammunition, „Puška samonabíjecí Luvo LA-110 SASS .308 Win. / 7,62x51 25" černá,“ [Online]. Available: <https://www.czechammunition.cz/Puska-samonabijeci-Luvo-LA-110-SASS-308-Win-7-62x51-25-cerna-d1930.htm>. [Přístup získán 12. Květen 2023].
- [24] „Zkoušení ztvrdlého betonu,“ [Online]. Available: <http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi8/pevnostvtahuohybem.pdf>. [Přístup získán 12. Duben 2023].
- [25] Střelnice Placy s.r.o., „Střelnice placy,“ [Online]. Available: <https://www.placy.cz/>. [Přístup získán 8. Květen 2023].
- [26] E. Průšová, M. Babčaník a J. Melichárek, Zbraně, Střelivo a jejich ověřování, Praha: Druckvo s.r.o., 2015.
- [27] T. Krauthammer, Modern protective structures, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [28] J. Smith a e. al., Discrete modeling of ultra-high-performance concrete with application to projectile penetration, International Journal of Impact Engineering, 2014.