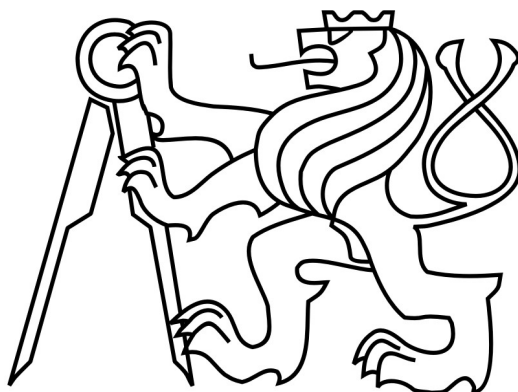


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



Bakalářská práce

**Balistická odolnost vysokohodnotného betonu
podle ČSN EN 1522**

Květen/2021

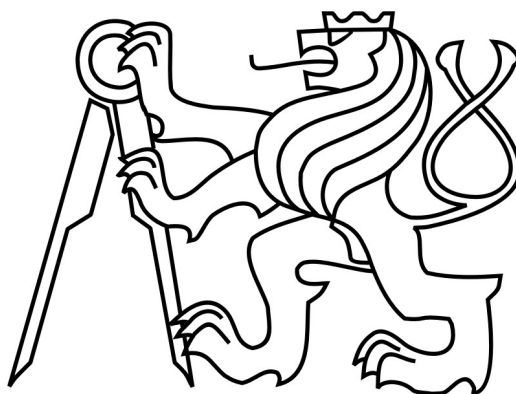
Tomáš Hrabě

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum

K210



**Balistická odolnost vysokohodnotného betonu
podle ČSN EN 1522**

**Ballistic resistance of high-performance concrete
according to CSN EN 1522**

Student: **Tomáš Hrabě**

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

Konzultanti: **Ing. Michal Mára, Ph.D., Ing. Jan Zatloukal, Ph.D.**

Ing. Přemysl Kheml, Lukáš Jogl

Akademický rok: **2020/2021**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hrabě Jméno: Tomáš Osobní číslo: 477646
Zadávací katedra: Experimentální centrum (k210)
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Balistická odolnost vysokohodnotného betonu podle ČSN EN 1522
Název bakalářské práce anglicky: Ballistic resistance of high-performance concrete according to CSN EN 1522

Pokyny pro vypracování:

Popis vysokohodnotného betonu a jeho vlastností. Představení normy, podle které se experiment bude řídit.

Vysvětlení ráží, zbraní a projektilů. Návrh experimentální kampaně, výroba vzorků a jejich test na střelnici.

Vyhodnocení výsledků a diskuze. Návrh na pokračování výzkumu v této oblasti.

Seznam doporučené literatury:

Response of Thin UHPFRC Targets with Various Fibre Volume Fractions to Deformable Projectile Impact, Procedia Engineering, Volume 193, 2017, Pages 3-10

Failure characteristics of UHPFRC panels subjected to projectile impact, Composites Part B: Engineering Volume 182, 1 February 2020, 107505

Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under high-velocity projectile impact. Part I. experiments, 2018, Acta Polytechnica, 58(4), pp. 232-239

Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliber deformable projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Volume 144, October 2020, 103629

Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts, Engineering Structures, Volume 173, 15 October 2018, Pages 166-179

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

Datum zadání bakalářské práce: 15. 2. 2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 16. 5. 2021

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

15. 2. 2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 16.5. 2021

.....
.....

Tomáš Hrabě

Poděkování

Těmito řádky bych rád poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bc. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za skvělou asistenci a vedení při tvorbě této práce. Oceňuji jeho ochotu mi kdykoliv poradit a vše zkonzultovat. Jeho přátelský přístup a zápal pro věc. Pod jeho dohledem se mi práce psala s velkým nadšením.

Dále pak Ing. Janu Zatloukalovi, Ph.D. za faktické provedení střelb na střelnici Placy a jeho ostrostřelecký um, bez kterého by nebylo možné dokončit praktickou část práce.

Páni Ing. Michal Mára, Ph.D., Ing. Přemysl Kheml a Lukáš Jogl mají moje poděkování za praktické vedení při betonování, odbedňování, vyhodnocení a práci se vzorky v průběhu praktické části mé bakalářské práce.

V neposlední řadě také musím poděkovat Mgr. Markétě Součkové, která mi byla oporou při jazykové a stylistické úpravě práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce zkoumá balistickou odolnost vysokohodnotného, drátky vyztuženého betonu vyvinutém v Experimentální centru Fakulty stavební ČVUT v Praze vůči různým velikostem a ničivé síle jednotlivých projektilů podle normy ČSN EN 1522.

Teoretická část práce obsahuje nezbytné informace týkající se experimentálního výzkumu tedy stručný popis vysokohodnotného betonu, zkoušky v jednoosém tlaku a popis normy ČSN EN 1522. Tato norma rozděluje jednotlivé ráže do balistických tříd a definuje postup střelb.

V praktické části práce je popsána výroba, odbedňování, skladování vzorků a průběh zátěžového testu pomocí střelby. Na závěr jsou zhodnoceny výsledky experimentu, porovnány účinky jednotlivých ráží mezi sebou a jejich dopad na balistickou odolnost zkoumaného betonu.

Klíčová slova

HPC, UHPC, ČSN EN 1522, balistická odolnost, projektil, hloubka penetrace, průměr kráteru

Abstract

The bachelor thesis examines a ballistic resistance of high-performance concrete with wire-reinforced concrete developed in the Experimental Centre of the Faculty of Civil Engineering CTU in Prague against various sizes and destructive forces of individual projectiles according to the standard ČSN EN 1522.

The theoretical part of the thesis contains the necessary information regarding experimental research i.e., a brief description high-performance concrete, uniaxial pressure tests and a description of the standard ČSN EN 1522. The standard divides individual calibers into ballistic classes and defines the shooting process.

The practical part describes the production, stripping, storage of samples and the course of the shooting stress test. Finally, we evaluate the results of the experiment, compare the effects of individual calibers and their impact on the ballistic resistance of the investigated concrete.

Keywords

HPC, UHPC, CSN EN 1522, ballistic resistance, projectile, depth of penetration, crater diameter

Obsah

1. ÚVOD.....	1
1.1. Motivace.....	1
1.2. Cíl práce.....	2
1.3. Rozsah práce.....	2
2. VYSOKOHODNOTNÝ BETON.....	3
2.1. Složení betonové směsi.....	4
2.2.1 Kamenivo.....	4
2.3.2 Cement.....	5
2.4.3 Voda.....	5
2.5.4 Přísady a příměsy.....	6
2.6.5 Vlákna.....	6
3. ZKOUŠKY PEVNOSTI BETONU.....	7
3.1. Zkouška betonu v jednoosém tlaku.....	8
4. NORMA ČSN EN 1522.....	9
4.1. Jednotlivé balistické třídy podle ČSN EN 1522.....	9
4.1.1. FB1.....	10
4.1.2. FB2.....	12
4.1.3. FB3.....	14
4.1.4. FB4.....	16
4.1.5. FB5.....	18
4.1.6. FB6.....	20
4.1.7. FB7.....	23

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	25
5.1. Úvod do experimentu.....	25
5.2. Harmonogram.....	27
5.3. Práce se vzorky.....	28
5.3.1. Výroba vzorků.....	28
5.3.2. Odbednění vzorků.....	29
5.3.3. Průběh zkoušek v tlaku a jejich výsledky.....	31
5.4. Zátěžové testy střelbou.....	34
5.5. Zpracování výsledků.....	36
5.5.1. Měření plochy.....	36
5.5.2. Měření hloubky.....	39
5.5.3. Měření objemu.....	43
5.5.4. Závěrečné vyhodnocení.....	46
6. ZÁVĚR.....	50
7. PŘÍLOHY	51
7.1. Fotografie kráterů.....	51
7.2. 2D profily kráterů.....	61
8. LITERATURA.....	70

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení betonu podle pevnosti [4]	3
Obrázek 2: Schéma zkoušky v jednoosém tlaku [5], Obrázek 3: Lis	8
Obrázek 4: Projektil 22 Long rifle [7]	10
Obrázek 5: Variace náboje 22 Long rifle [9].....	11
Obrázek 6: Malorážková puška Hatsam [10]	11
Obrázek 7: Projektil 9mm Luger [11]	12
Obrázek 8: Pistole CZ 75 [13].....	13
Obrázek 9: Projektil 357 Magnum [14].....	14
Obrázek 10: Ruger GP100 [16].....	15
Obrázek 11: Projektil 357 Magnum [14].....	16
Obrázek 12: Projektil 44 Rem Magnum [17]	17
Obrázek 13: Projektil 5,56 x 45 [18]	18
Obrázek 14: CZ 805 BREN A1/A2 [19]	19
Obrázek 15: Projektil 5,56 x 45 [18]	20
Obrázek 16: Projektil 7,62 x 51 [20]	21
Obrázek 17: Projektil 7,62 x 51 [20]	23
Obrázek 18: Puška samonabíjecí Luvo LA-110 SASS [21]	24
Obrázek 19: Odbedňování vzorků na experiment	29
Obrázek 20: Ukládání odbedněných vzorků do vlhkého prostředí vany.....	30
Obrázek 21: Vážení vzorku, Obrázek 22: Měření vzorku.....	32
Obrázek 23: Zatěžování krychle, Obrázek 24: Poničený vzorek.....	33
Obrázek 25: Střelba, Obrázek 26: Kontrola střelby.....	34
Obrázek 27: Schéma ideálních zásahů vzorku 600x150x150	35
Obrázek 28: Schéma ideálních zásahů vzorku 700x150x150	35
Obrázek 29: Práce v AutoCad 2018	36
Obrázek 30: Sestava 2D Profilometr, Obrázek 31: Snímání vzorku	39
Obrázek 32: Měření objemu jemným pískem	43

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení betonu podle pevnosti [1].....	3
Tabulka 2: Přehled třídy FB1 [6].....	10
Tabulka 3: Projektil 22 Long rifle [7]	10
Tabulka 4: Přehled třídy FB2 [6].....	12
Tabulka 5: Projektil 9 mm Luger [11].....	12
Tabulka 6: Přehled třídy FB3 [6].....	14
Tabulka 7: Projektil 357 Magnum [14]	14
Tabulka 8: Přehled třídy FB4 [6].....	16
Tabulka 9: Projektil 357 Magnum [14]	16
Tabulka 10: Projektil Remington Magnum [17]	17
Tabulka 11: Přehled třídy FB5 [6].....	18
Tabulka 12: Projektil 5,56 x 45 mm [18]	18
Tabulka 13: Přehled třídy FB6 [6].....	20
Tabulka 14: Projektil 5,56 x 45mm [18]	20
Tabulka 15: Projektil 7,62 x 51mm [20]	21
Tabulka 16: Přehled třídy FB7 [6].....	23
Tabulka 17: Projektil 7,62 x 51 [20]	23
Tabulka 18: Soupis počtu výstřelů	25
Tabulka 19: Použité ráže při střelbě	25
Tabulka 20: Přehled počtu vzorků.....	26
Tabulka 21: Přehled významných událostí experimentu.....	27
Tabulka 22: Receptura směsi.....	28
Tabulka 23: Krychle č. 1 a 2.....	31
Tabulka 24: Krychle č. 3 a 4.....	31
Tabulka 25: Výsledky tlakové zkoušky v pevnosti	33
Tabulka 26: Plocha kráterů.....	37
Tabulka 27: Hloubka kráterů	41
Tabulka 28: Objemy kráterů.....	44
Tabulka 29: Výpočet dopadové energie [9]	46

Seznam grafů

Graf 1: Složení betonu	4
Graf 2: Plochy kráterů	38
Graf 3: Příklad profilu	40
Graf 4: Hloubka kráterů.....	42
Graf 5: Objem kráterů.....	45
Graf 6: Vliv dopadové energie na plochu kráteru	47
Graf 7: Vliv dopadové energie na hloubce kráteru.....	48
Graf 8: Vliv dopadové energie na objemu kráteru	49

1. Úvod

1.1. Motivace

Již delší dobu se podílím na dílčích projektech týmu z Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze. Když přišla nabídka spolupráce na zpracování vlastního projektu a možnosti „po vojensku“ otestovat recepturu vysokohodnotného betonu, nabídku jsem s radostí přijal.

Jelikož 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, tak mě téma balistické odolnosti vysokohodnotného betonu, určeného pro ochranu vojáků a integrovaného záchranného systému bezprostředně dotýká a v budoucnu mi klidně může zachránit život. Proto mám k tomuto tématu takové zapálení a velmi mě zajímá, jakým způsobem testování probíhá a kolik námi zkoumaný beton vydrží.

Obecně očekávám od této bakalářské práce profesní rozhled v oblasti vojenské tematiky z vědeckého úhlu pohledu a rád bych také přispěl svým dílem k probádání tohoto vysokohodnotného betonu. Velkou výhodou těchto experimentů od teoretických zpracování jsou jasné hmatatelné výsledky, o které se můžete v práci opřít. Sice je to náročné na harmonogram a rozvrh práce, výsledky však stojí za to.

1.2. Cíl práce

Cílem práce je otestovat recepturu vysokohodnotného, drátky vyztuženého betonu vyvinutém v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze vůči síle jednotlivým pistolovým a puškovým rážím. Pro systematičnost budou vybrány ráže z normy ČSN EN 1522, která klasifikuje stavební prvky jako průstřelu odolné, podle toho, jakou zkouškou balistické třídy projdou. Pokud nebude daná ráže k dispozici, bude v některých případech nahrazena nábojem, který bude dané balistické třídě nejvíce podobný.

Pro experiment je potřeba:

- a) Vyrobit vzorky z betonu a podrobit je zátěžovému testu střelbou na střelnici.
- b) Vyhodnotit výsledky střelb
- c) Popsat závislost dopadové energie na hloubce, ploše a objemu vzniklého kráteru.

Účinky jednotlivých ráží se pak mezi sebou porovnají.

1.3. Rozsah práce

Práce je členěna na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části je popsán vysokopevnostní beton, tlaková zkouška pevnosti a její stanovení a na závěr představení normy ČSN EN 1522, která je určující pro dobré zařazení a porovnání výsledků.

Druhá část bakalářské práce představuje samotný experiment popisující výrobu, odbednění a uskladnění vzorků v betonářské hale. Také obsahuje popis výsledků tlakových zkoušek a analyzuje hlavní zátěžové testy na střelnici.

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

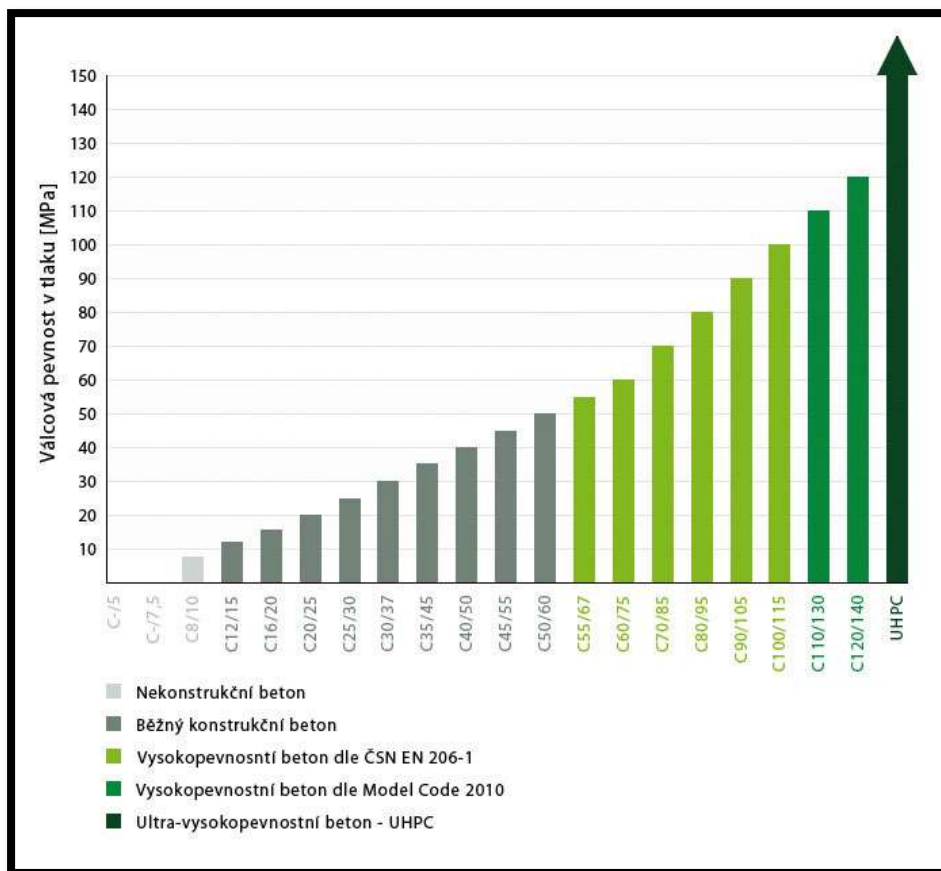
2. Vysokohodnotný beton

Beton je umělý materiál, slepenec plniva a pojiva. Plnivo nejčastěji představuje přírodní kamenivo. Pojivo poté cement. Se stále rostoucími požadavky na pevnost a udržitelnost konstrukcí přichází do popředí betony s vyšší pevností. Oproti běžnému betonu není vysokohodnotný beton ničím výjimečným než jen beton s nízkou pórovitostí, které se dosáhne tak, že se minimalizuje použití záměsné vody, tudíž se částice cementu a kameniva těsněji přilepí [1] [2] [3].

Vysokohodnotný beton můžeme pevnostně rozdělit do tříd (Tabulka 1) a (Obrázek 1)

Tabulka 1: Rozdělení betonu podle pevnosti [1]

Běžný beton	Vysokopevnostní beton (HPC)	Ultravysokopevnostní beton (UHPC)
C8/10 až C50/60	C55/67 až C100/115	Tlaková pevnost > 150MPa

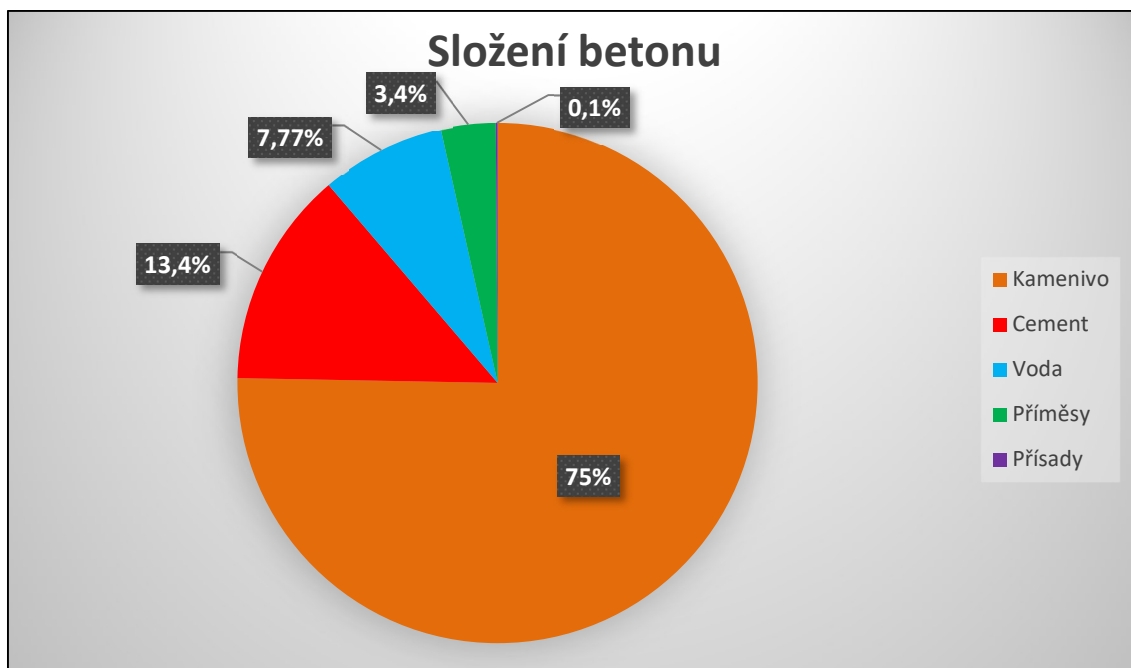


Obrázek 1: Rozdělení betonu podle pevnosti [4]

2.1. Složení betonové směsi

Složení směsi pro vysokohodnotný beton se nijak závratně neliší od běžného betonu, který můžeme vidět na (Graf 1). Nenachází se v ní žádné neobvyklé až magické komponenty, ovšem od těch běžných vyžaduje jisté lepší specifické vlastnosti. Běžný beton si můžeme dovolit namíchat a připravit dle jednoduchých postupů ověřených po generace a praxí našich předků, ovšem u vysokohodnotného betonu postupujeme na základně přísných kritérií a hledáme optimální poměr a kvalitu jednotlivých komponentů tak, aby se vzájemně negativně neovlivňovali a nevytvářeli mezi sebou nežádoucí chemické reakce. Takže cesta není o tom hledat nejlepší a nejkvalitnější složku, nýbrž zajistit optimální kombinaci dostupných komponentů [1] [2].

Graf 1: Složení betonu



2.1.1. Kamenivo

Jelikož u betonů standartních pevností je pevnost obyčejného kameniva zcela dostačující a případná poruchová trhlinka prochází mimo něj, tak u vysokohodnotného betonu, kde je cementová pasta houževnatější, už se musí pečlivě vybírat, jaké plnivo se použije, tak aby se nestalo nejslabším článkem. Co se týká takové poučky, tak pevnost kameniva by měla být 1,5x vyšší než pevnost zamýšleného betonu, tak abychom vyloučili jeho rozdrčení.

Důležité je, aby kamenivo bylo pevné, celistvé a nemělo lokální poškození. Mezi vhodné kandidáty na plnivo do vysokohodnotného betonu patří horniny vyšších pevností jako je vápenec, žula, gabro nebo diorit. U ultra vysokohodnotných betonů se pak používá umělé plnivo jako je bauxit. Ideální tvar kamene je kulovitý až kubický s maximální velikostí zrna 12 mm [1] [2].

2.1.2. Cement

Základní pojivový materiál v betonu je cement. U běžného betonu je ho podle (*Graf 1*) přibližně kolem 13 %, u vysokopevnostních betonů se jeho podíl zvyšuje na 15-22 %.

Pro výrobu cementu se používají tyto druhy: CEM I – portlandský cement a CEM II struskový portlandský cement. Oba třídy 42,5 R nebo 52,5 R. Významnou roli v cementu hraje také charakteristika slínku a četnost síranu vápenatého, který slouží jako regulátor tuhnutí. Pro lepší reologii je doporučeno použít cement s nižším podílem tricalcium aluminátu. Další důležitá vlastnost cementu je vodonasákavost, která popisuje množství potřebné vody k hydrataci [1] [2].

2.1.3. Voda

Další nezbytnou součástí betonu je voda. Ta plní dvě funkce, a to iniciátora hydratačního procesu cementu a poté prvek, co určuje soudržnost a zpracovatelnost betonu. Jak můžeme vidět na (*Graf 1*) na předchozí stránce, podíl vody v běžném betonu se pohybuje kolem 6–8 % a vodní součinitel 0,50. Pro dosažení vyšších pevností se podíl vody snižuje jen na nezbytné minimum potřebné k hydrataci cementu. Pro vodní součinitel to znamená hodnotu 0,25 až 0,40. Pro UHPC, kde je pevnost vyšší než 150MPa, se může vodní součinitel dostat i pod 0,20. Důležitou roli hraje vlhkost i nasákavost kameniva, která nám taky může změnit celkový vodní součinitel. Jelikož se při tvorbě vysokohodnotného betonu snažíme co nejvíce snížit podíl vody ve směsi, pro lepší zpracovatelnost musíme vodu nahradit superplastifikátory [1] [2].

2.1.4. Přísady a příměsy

Tyto položky podle (*Graf 1*) mají v obyčejném betonu procentuální zastoupení v nižších jednotkách procent. I přes malý objem ve směsi, jsou nesmírně potřebné a hrají při výrobě vysokohodnotných betonů velkou roli.

Jak už bylo řečeno dříve, například kvůli dosažení vysoké pevnosti u těchto betonů, je zapotřebí snížit množství vody na minimum. To má ale negativní vliv na reologii a zpracovatelnost betonu. Kvůli tomu se do vysokohodnotných betonů přidávají různé plastifikátory, které nahrazují funkci vody a dělají beton zpracovatelnějším [1] [2].

Co se týká vylepšení další vlastností vysokohodnotného betonu, je možnost a občas i nezbytné nahradit část cementu různými jemnozrnnými minerálními příměsí. Mezi takové patří křemičitý úlet, metakaolin, popílek nebo vysokopecní granulová struska. Ty jednak doplňují zrnitostní křivku o nejjemnější frakci, tudíž je beton méně pórovitější, tak i nahrazují dražší cement. A jelikož je většina těchto příměsí právě odpadní produkt jiných výrobních procesů, má to i svou ekologickou stránku [1] [2].

2.1.5. Vlákna

Za účelem zvýšení pevnosti v tahu za ohybu, lepší tlakové pevnosti nebo jen omezení křehkosti konstrukce se do betonu mohou přidávat vlákna. Pro vysokohodnotné betony do 150 MPa to není nezbytné, avšak ultra vysokohodnotné betony se bez nich neobejdou. Vlákna mohou být vyrobena jak z kovu, tak z organické hmoty (plast, karbon). Roli zde hlavně hraje tvar, poměr délky ku průměru, velikost nebo procentuální zastoupení. Nejčastěji ke 2 %. Pro správné upevnění v betonu je nezbytné, aby byl dostatek cementu v cementovém tmeli [1] [2].

3. Zkoušky pevnosti betonu

U betonu se zkouší a měří různé jeho vlastnosti. Pro náš experiment jsme si stanovili jako podstatnou vlastnost tlakovou pevnost a zajímala nás v čase po 28 dnech zrání a poté v den zátěžového testu střelbou. Proto také dále bude podrobněji popsána zkouška tlakové pevnosti.

Zkoušky pevnosti betonu se rozdělují do dvou metodických postupů. Na destruktivní a nedestruktivní. Rozdíl mezi těmito postupy je už patrný z jejich názvu a říkájí nám, jakým způsobem se provádí [3].

U destruktivní zkoušky se zatěžuje přesně definované doprovodné těleso v laboratoři na lisu, až do dosažení poničení vzorku. Výsledkem je síla, ze které se odvodí smluveným matematickým výrazem zkoumaná pevnost. Výhody této metody jsou jasné a srozumitelné výsledky a lehké srovnání. Nevýhodou je potřeba náročnější techniky a výsledná pevnost, která je stanovena z doprovodných těles, a ne přímo z dotyčné konstrukce [3].

Nedestruktivní zkoušení označujeme jako nepřímé a provádíme je rovnou na dotyčné konstrukci nebo vzorku. Principem zkoušení je existence věrohodného kalibračního vztahu definovaným autorem zkoušky, díky které z hodnoty znaku odvodíme zkoumanou pevnost betonu. Výhodou tohoto typu zkoušení je realizace přímo na dané konstrukci. Nevýhodou může být závislost výsledku na povrchových vlastnostech betonu, který nemusí reprezentovat celý objem prvku [3].

3.1. Zkouška betonu v jednoosém tlaku

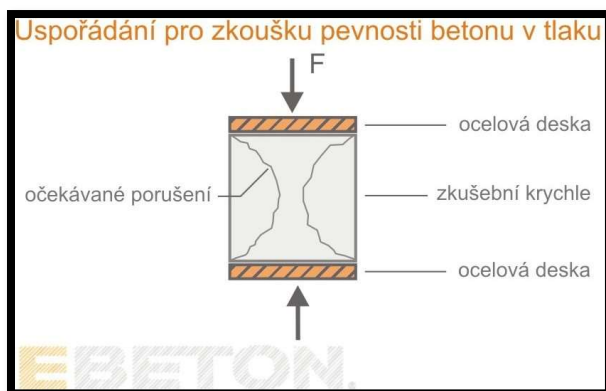
Jedna ze základních destruktivních zkoušek betonu je pevnost v jednoosém tlaku. Stanovuje se na doprovodných tělesech ve tvaru krychle 150x150x150 mm anebo válci o průměru 150 mm a výšce 300 mm [3].

Těleso se do lisu vkládá kolmo na směr hutnění (*Obrázek 3*), abychom vyloučili kontakt nerovnoměrného povrchu z jedné ze stran krychle, který vznikl v důsledku výroby vzorku. To by totiž mohlo zkreslit výsledky. Výsledná pevnost se spočítá pomocí jednoduchého vzorečku, kdy vyvinutou sílu lisem podělíme vodorovnou plochou krychle a dostaneme napětí [3].

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

kde σ – Napětí (Pevnost), F – Síla, A – Plocha

(*Obrázek 2*) nám pak ukazuje schéma zkoušky a její očekávané porušení. Prvek by se měl porušit po stranách příčným tahem.



Obrázek 2: Schéma zkoušky v jednoosém tlaku [5]



Obrázek 3: Lis

4. Norma ČSN EN 1522

Z důvodu možného porovnávání výsledků a standardizace byla vybrána pro tento experiment norma ČSN EN 1522 „Okna dveře, uzávěry a rolety – Odolnost proti průstřelu – Požadavky a klasifikace“.

To, co nás v této normě zajímá, je postup testování na střelnici a rozdělení jednotlivých balistických tříd, které jsou podrobněji popsány v další kapitole. Jedná se tedy o konkrétní náboje charakteristické svojí konstrukcí, průměrem a úst'ovou rychlostí.

Tato norma se běžně používá pro testování prvků nutných být balisticky odolných z důvodu ochrany budov, lidí nebo služeb. Příklady budov, které mohou vyžadovat balisticky odolné prvky, jsou banky, policejní stanice, elektrárny atd.

4.1. Jednotlivé balistické třídy podle ČSN EN 1522

Norma ve své vlastní vnitřní tabulce předepisuje klasifikační třídy od ráží s nejmenší silou (FB1) až po ráže s ničivějším účinkem (FB7). V této kapitole rozeberu podrobněji jednotlivé třídy tak, aby bylo možné si představit, co je reprezentuje a jaké typy zbraní si pod nimi dá očekávat [6].

4.1.1. FB1

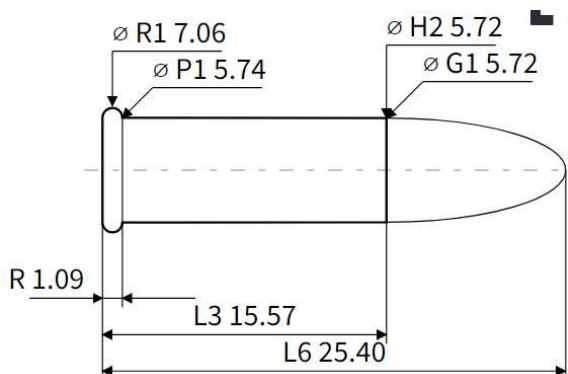
Tabulka 2: Přehled třídy FB1 [6]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	22 Long rifle	L/RN ¹	2,61 g

Tabulka 3: Projektil 22 Long rifle [7]

Druh	s okrajovým zápalem	Tloušťka okraje	1,09 mm (.043")
Průměr střely	5,72 mm (.225")	Délka nábojnice	15,57 mm (.613")
Průměr základny	5,74 mm (.226")	Celková délka	25,4 mm (.000")
Průměr okraje	7,06 mm (.278")	Maximální tlak	1000 bar

Obrázek 4: Projektil 22 Long rifle [7]



Jak už bylo řečeno, do první třídy patří zbraně s nejmenší účinnou silou. Pokud by testovaný předmět neprošel ani touto třídou, nesmí se označovat jako odolný proti průstřelu [6].

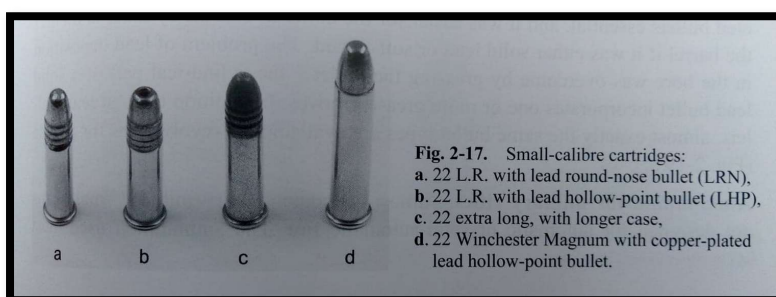
Projektil, který do této balistické třídy patří, je 22 Long rifle. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších nábojů na světě, ze kterého vycházejí jeho různé další variace. Ty se mohou lišit hmotností střely (1,94 až 2,59g), různorodou počáteční rychlostí výstřelu (323 až 519 m/s) nebo prachovou výplní [8].

¹ Lead/Round nose bullet

Rychlosti tohoto náboje můžeme rozdělit do několika skupin jako je kategorie

- podzvuková rychlost
- standartní rychlost (rychlost zvuku)
- vysoká rychlost (cca 400 m/s)
- velmi vysoká rychlost. (cca 500 m/s)

Poslední dvě zmíněné kategorie se běžně používají pro lov zvěře. Pro třídu FB1 je požadován typ náboje lead round-nose bullet, který můžeme vidět na (Obrázek 5) pod písmenem a) [6] [8] [7].



Obrázek 5: Variace náboje 22 Long rifle [9]

Obecně si můžeme pod touto třídou a ráží představit malorážkové pušky, které se často používají pro sportovní a rekreační střelbu, popřípadě lov menší zvěře jako zajíců anebo bažantů. Na (Obrázek 6) je uveden jako příklad malorážková puška Hatsam [7].



Obrázek 6: Malorážková puška Hatsam [10]

4.1.2. FB2

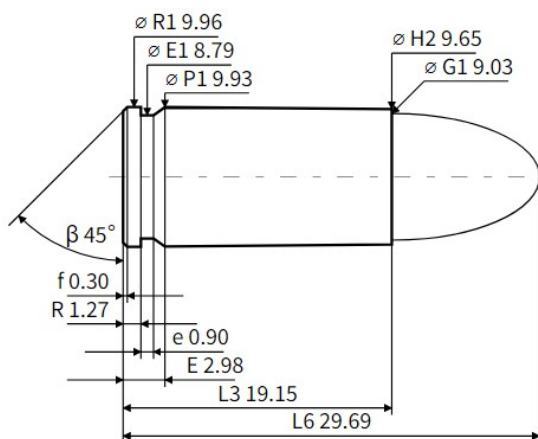
Tabulka 4: Přehled třídy FB2 [6]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Ruční zbraň	9 mm Luger	FJ ₍₁₎ /RN/SC ²	8,0 g

Tabulka 5: Projektil 9 mm Luger [11]

Druh	Pistolová a revolverová	Tloušťka okraje	1,27 mm (.050")
Průměr střely	9,03 mm (.356")	Délka nábojnice	19,15 mm (.754")
Průměr základny	9,93 mm (.391")	Celková délka	29,69 mm (1.169")
Průměr okraje	9,96 mm (.392")	Maximální tlak	2350 bar

Obrázek 7: Projektil 9 mm Luger [11]



Projektil, který do této kategorie patří, je 9 mm Luger. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších pistolových nábojů na světě, ze kterého vycházejí jeho různé další sportovní, vojenské a obranné varianty. Ty se liší od sebe provedením nábojnice nebo výkonem. Kov, který se nejčastěji využívá pro výrobu tohoto náboje je mosaz, se střelou o hmotnosti 6,5 až 9 g s tombakovým pláštěm a jádrem z olova. Náboj byl vyvinut německou firmou DWM v roce 1902 [8].

² Full steel jacket (plated) bullet/Round nose bullet/Soft core (Lead)

Pod touto ráží si můžeme představit běžné ruční zbraně, který mívají vojáci či policisté ve službě. Použití je jak na střelecké soutěže, tak i pro svoji vlastní ochranu. Tato zbraň se dá lehce schovat za opasek.

Česká nejznámější ruční zbraň je pistole CZ 75 (Obrázek 8). Vymyšlena byla konstruktérem Františkem Kouckým a unikátní ve své době byla mechanismem, který umožňoval prostým stlačením spouště první výstřel, aniž by musel být před tím natahován kohoutek tak, jak to bylo doposud zvykem [12].

Po pistoli Colt M1911 je tato ruční zbraň druhou nejkopírovanější pistolovou zbraní ve světě.



Obrázek 8: Pistole CZ 75 [13]

4.1.3. FB3

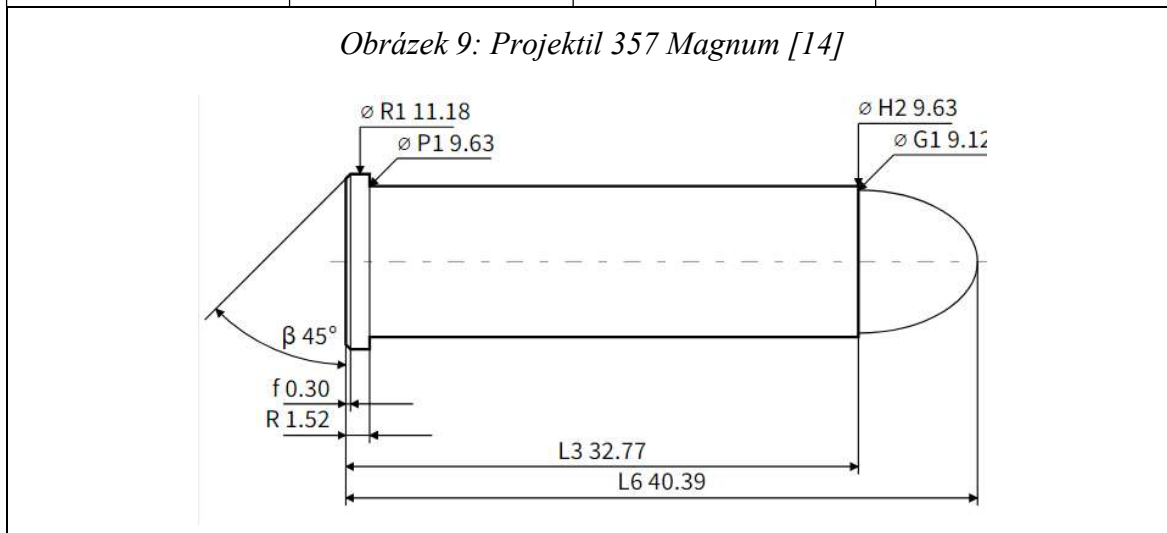
Tabulka 6: Přehled třídy FB3 [6]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Ruční zbraň	357 Magnum	FJ ₍₁₎ /CB/SC ³	10,2 g

Tabulka 7: Projektil 357 Magnum [14]

Druh	Pistolová a revolverová	Tloušťka okraje	1,52 mm (.060")
Průměr střely	9,12 mm (.359")	Délka nábojnice	32,77 mm (1.290")
Průměr základny	9,63 mm (.379")	Celková délka	40,39 mm (1.590")
Průměr okraje	11,18 mm (.440")	Maximální tlak	3000 bar

Obrázek 9: Projektil 357 Magnum [14]



Projektil, který do této balistické třídy patří, je 357 Magnum. Jedná se o americký náboj vyvinutý firmou Smith & Wesson v roce 1934. V USA je hojně využíván k lovecké nebo sportovní činnosti. Pro policisty je brán jako univerzální náboj. Vyrábí se s řadou celoplášťových, poloplášťových i olověných střel [8] [15].

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

Pod touto ráží si můžeme představit všechny možné revolvery. Zvolený příklad je zde na (Obrázek 10) revolver Ruger GP 100.



Obrázek 10: Ruger GP100 [16]

4.1.4. FB4

Tabulka 8: Přehled třídy FB4 [6]

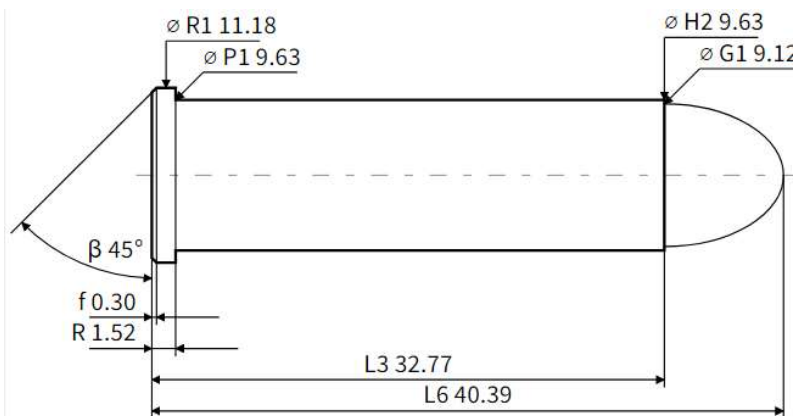
Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Ruční zbraň	357 Magnum	FJ ₍₁₎ /CB/SC ⁴	10,2 g
Ruční zbraň	44 Rem. Magnum	FJ ₍₂₎ /FN/SC ⁵	15,6 g

Projektily, které do této balistické třídy patří jsou 357 Magnum a 44 Remington magnum. Pokud by měl být prvek klasifikován třídou FB4, vzorek musí splnit test oběma rážemi [6].

Tabulka 9: Projektil 357 Magnum [14]

Druh	Pistolová a revolverová	Tloušťka okraje	1,52 mm (.060")
Průměr střely	9,12 mm (.359")	Délka nábojnice	32,77 mm (1.290")
Průměr základny	9,63 mm (.379")	Celková délka	40,39 mm (1.590")
Průměr okraje	11,18 mm (.440")	Maximální tlak	3000 bar

Obrázek 11: Projektil 357 Magnum [14]



⁴ Full steel jacket (plated) bullet /Coned bullet/Soft core (Lead)

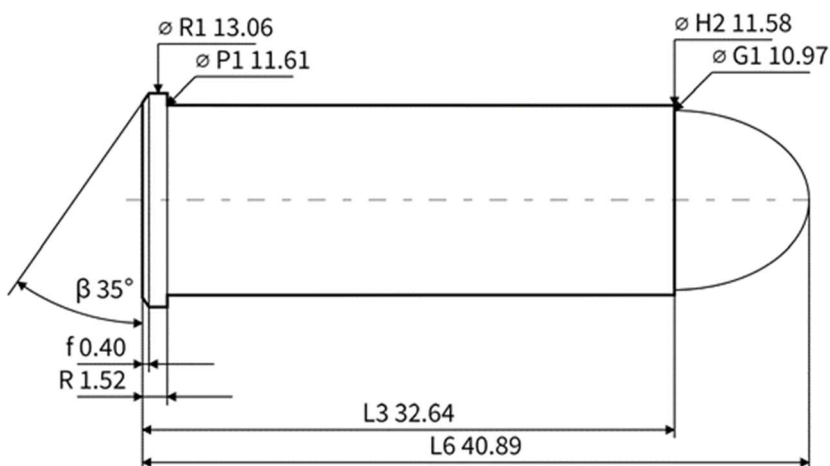
⁵ Full copper alloy jacket bullet/Flat nose bullet/Soft core (Lead)

357 Magnum je americký náboj vyvinutý firmou Smith & Wesson v roce 1934. V USA je hojně využíván k lovecké nebo sportovní činnosti. Pro policisty je brán jako univerzální náboj. Vyrábí se s řadou celoplášťových, poloplášťových i olovených střel [14] [8].

Tabulka 10: Projektil Remington Magnum [17]

Druh	Pistolová a revolverová	Tloušťka okraje	1,52 mm (.060")
Průměr střely	10,97 mm (.432")	Délka nábojnice	32,64 mm (1.285")
Průměr základny	11,61 mm (.457")	Celková délka	40,89 mm (1.610")
Průměr okraje	13,06 mm (.514")	Maximální tlak	2800 bar

Obrázek 12: Projektil 44 Rem Magnum [17]



44 Remington magnum je moderní revolverový náboj, který vznikl na základě spolupráce Elmera Keitha s techniky firem Remington a Smith & Wesson v roce 1955. Jeho výkon a široká škála různých variant z něho udělali oblíbený náboj mezi americkými lovci. Nábojnice je mosazná, bezdýmny prach tvoří výmetnou výplň. Zápalka je typu Boxer. Náboje se vyrábí ve variantách olovené, poloplášťové nebo celoplášťové s plochou špičkou nebo dutinkou ve špičce [8].

Názorný příklad zbraní pro tuto balistickou třídu je defacto podobný jako v kapitole 4.1.3 FB3 na straně 15 a to revolver.

4.1.5. FB5

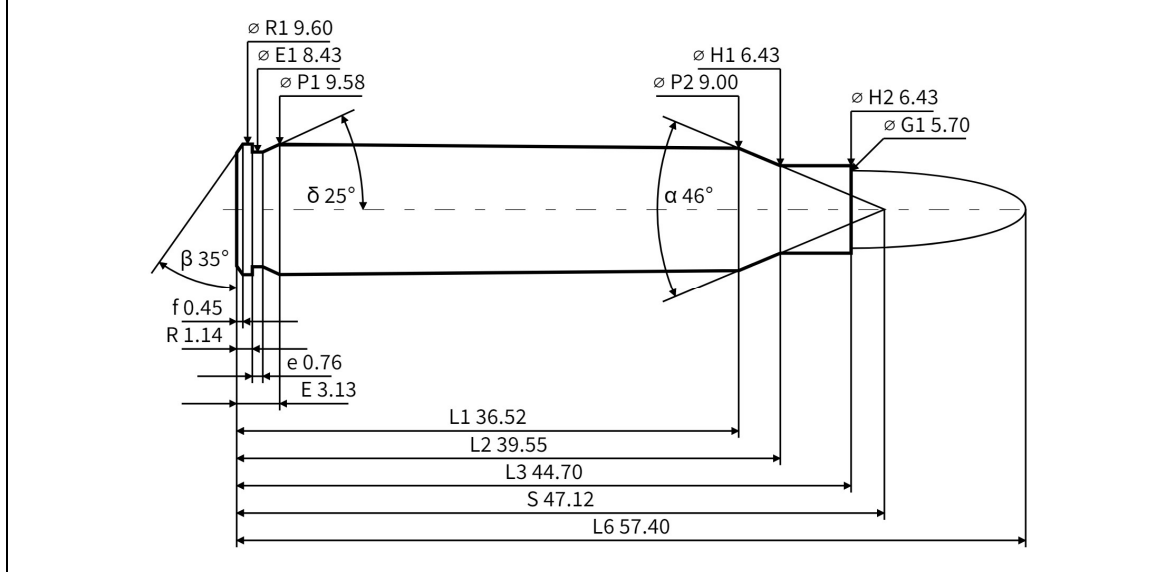
Tabulka 11: Přehled třídy FB5 [6]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	5,56 x 45	FJ ₍₂₎ /PB/SCP1 ⁶	4,0 g

Tabulka 12: Projektil 5,56 x 45 mm [18]

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 u zahrdlení	9 mm (.354")	Celková délka	57,40 mm (2.260")
Průměr základny	9,58 mm (.377")	Maximální tlak	4300 bar

Obrázek 13: Projektil 5,56 x 45 [18]



Tento náboj pod vojenským označením .223 Remington vzniknul v roce 1957 v USA pod vedením konstruktéra R. Huttona a na základě dobrých zkušeností byl přijat do americké armády po sedmi letech v roce 1964. První varianta tohoto náboje označovaná M193

⁶ Full copper alloy jacket bullet/Pointed bullet/Soft core (Lead) with steel penetrator (Type SS109)

s hmotností 3,56g se používala do roku 1984. Poté byl náboj belgickou firmou FN vylepšen na hmotnost 4,00g s tombakovým pláštěm a kombinovaným ocelovým a olověným jádrem pod označením SS 109. Nová střela si stále udržela svoji ranivost, ovšem zvýšila se její průraznost. Nábojnice se vyrábí téměř ve všech případech z mosazi, avšak vyskytuje se i její ocelová varianta [15] [18].

Pod ráží 5,56 x 45 si můžeme představit českou nejznámější pušku BREN (*Obrázek 14*), jež byla vyvinuta Českou zbrojovkou a používá ji naše armáda.



Obrázek 14: CZ 805 BREN A1/A2 [19]

4.1.6. FB6

Tabulka 13: Přehled třídy FB6 [6]

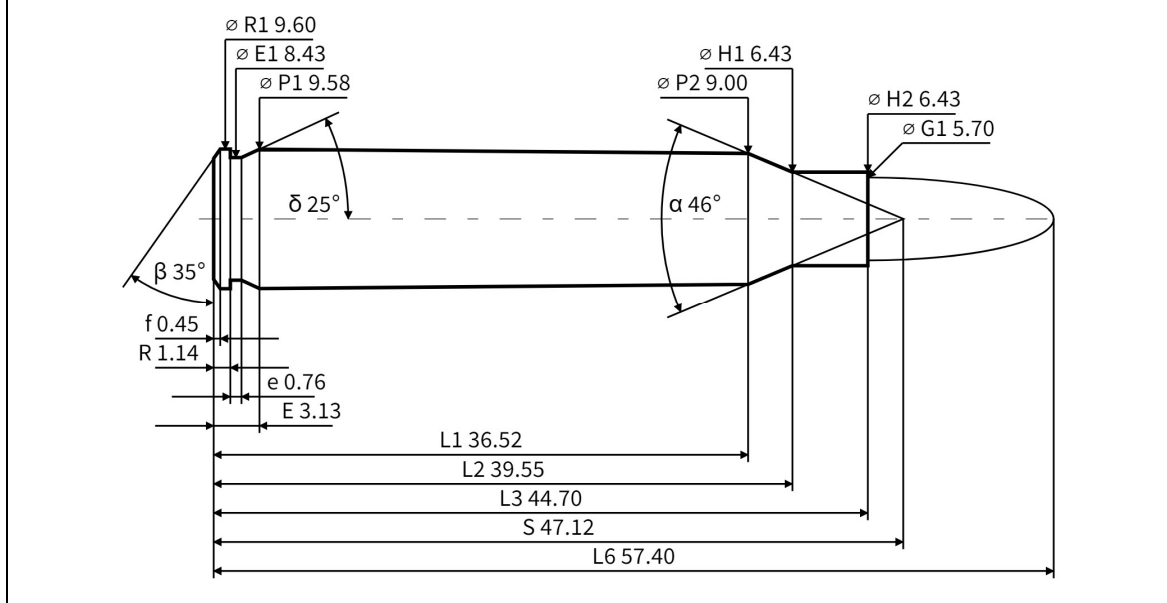
Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	5,56 x 45	FJ ₍₂₎ /PB/SCP1 ⁷	4,0 g
Puška	7,62 x 51	FJ ₍₁₎ /PB/SC ⁸	9,5 g

Projektily, které do této balistické třídy patří, jsou 5,56 x 45 mm a 7,62 x 51 mm. Pokud by měl být prvek klasifikován třídou FB6, vzorek musí projít testem oběma rážemi. [6]

Tabulka 14: Projektil 5,56 x 45 mm [18]

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 u zahrdlení	9 mm (.354")	Celková délka	57,40 mm (2.260")
Průměr základny	9,58 mm (.377")	Maximální tlak	4300 bar

Obrázek 15: Projektil 5,56 x 45 [18]



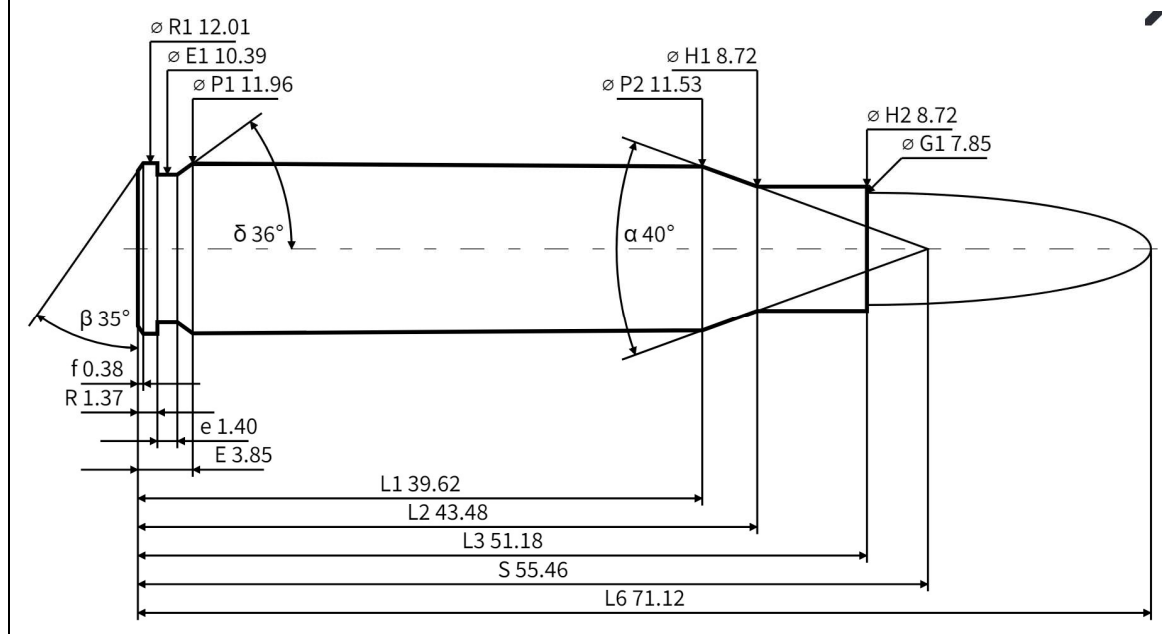
⁷ Full copper alloy jacket bullet/Pointed bullet/Soft core (Lead) with steel penetrator (Type SS109)

⁸ Full steel jacket (plated) bullet/Pointed bullet/Soft core (Lead)

Tabulka 15: Projektil 7,62 x 51 mm [20]

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 u zahrdlení	11.53 mm (.454")	Celková délka	71.12 mm (2.800")
Průměr základny	11.96 mm (.471")	Maximální tlak	4150 bar

Obrázek 16: Projektil 7,62 x 51 [20]



Náboj 7,62 x 51, též pod označením 308 Winchester, byl vyvíjen v USA v letech 1944 a 1949. Snaha byla po druhé světové válce přezbrojit na lépe výkonný pěchotní náboj. V roce 1950 se vývoj podařil a vycházel ze zkrácení nábojnice 30-06 Springfield. Americká armáda přijala náboj do své výzbroje v roce 1954 a protlačila ho i v rámci NATO. Kromě NATO tuto ráži přijali i další státy ve světě, jako je například Brazílie nebo Austrálie. Náboj vyrábí prakticky všichni světový výrobci [15] [20].

Pod touto ráží si můžeme představit samonabíjecí pušky viz (Obrázek 18) v kapitole 4.1.7 FB7 na straně 24, které se používají na sportovní a lovecké soutěže.

Náboj 5,56 x 45 pod vojenským označením .223 Remington vzniknul v roce 1957 v USA pod vedením konstruktéra R. Huttona a na základě dobrých zkušeností byl přijat do americké armády po sedmi letech v roce 1964. První varianta tohoto náboje označovaná M193 s hmotností 3,56g se používala do roku 1984. Poté byl náboj belgickou firmou FN vylepšen na hmotnost 4,00g s tombakovým pláštěm a kombinovaným ocelovým a olověným jádrem pod označením SS 109. Nová střela si stále udržela svoji ranivost, ovšem zvýšila se její průraznost. Nábojnice se vyrábí téměř ve všech případech z mosazi, avšak vyskytuje se i její ocelová varianta. [15] [18]

Pod ráží 5,56 x 45 si můžeme představit českou nejznámější pušku BREN viz (*Obrázek 14*) v kapitole 4.1.5 *FB5* na straně 19, jež byla vyvinuta Českou zbrojovkou a používá ji naše armáda.

4.1.7. FB7

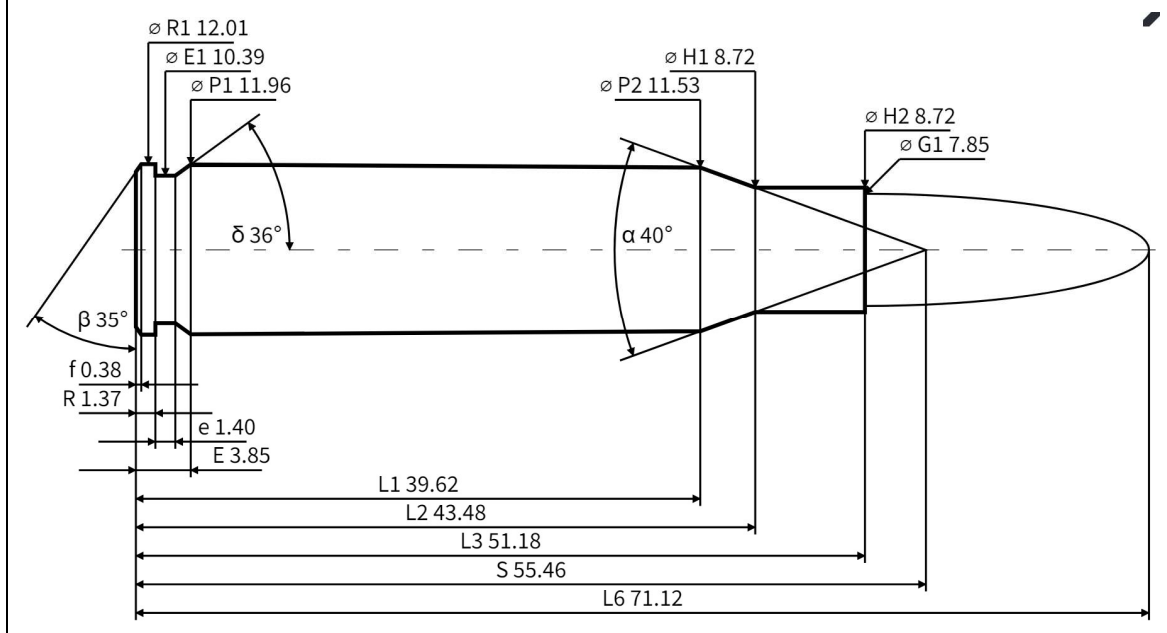
Tabulka 16: Přehled třídy FB7 [6]

Typ zbraně	Kalibr	Typ náboje	Hmotnost
Puška	7,62 x 51	FJ ₍₂₎ /PB/HC1 ⁹	9,8 g

Tabulka 17: Projektil 7,62 x 51 [20]

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 u zahrdlení	11.53 mm (.454")	Celková délka	71.12 mm (2.800")
Průměr základny	11.96 mm (.471")	Maximální tlak	4150 bar

Obrázek 17: Projektil 7,62 x 51 [20]



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)

⁹ Full copper alloy jacket bullet/Pointed bullet/Steel hard core

Náboj 7,62 x 51, též pod označením 308 Winchester, byl vyvíjen v USA v letech 1944 a 1949. Snaha byla po druhé světové válce přezbrojit na lépe výkonný pěchotní náboj. V roce 1950 se vývoj podařil a vycházel ze zkrácení nábojnice 30-06 Springfield. Americká armáda přijala náboj do své výzbroje v roce 1954 a protlačila ho i v rámci NATO. Kromě NATO tuto ráži přijali i další státy ve světě, jako je například Brazílie nebo Austrálie [15] [20].

Pod touto ráží si můžeme představit samonabíjecí pušky (*Obrázek 18*), které se používají na sportovní a lovecké soutěže.



Obrázek 18: Puška samonabíjecí Luvo LA-110 SASS [21]

5. Experimentální část

5.1. Úvod do experimentu

Zadání práce bylo zjistit a zdokumentovat balistickou odolnost vysokohodnotného betonu vyzkoumaného v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze vůči jednotlivým velikostem ráží zbraní. Pro ucelenost, systematickosti a možné porovnávání výsledků byly v co největší míře zvoleny ráže podle normy ČSN EN 1522.

Pro experimentální kampaň to znamenalo každý z jednotlivých ráží vystřelit, zdokumentovat a vyhodnotit alespoň jednou. Pro lépe vypovídající výsledky, možné zprůměrování zkoušek, popřípadě zanedbání větších odchylek, jsme stanovili tři jednotlivé výstřely pro každý typ náboje. Celkový soupis ráží je vidět v *(Tabulka 19)*.

Tabulka 18: Soupis počtu výstřelů

Počet dostupných ráží	Počet výstřelů	Celkem
9	3	27

Tabulka 19: Použité ráže při střelbě

Použité ráže	Balistická třída dle ČSN EN 1522	Označení vzorku	Krátery
22 Long rifle	FB1	G	G1, G2, G3
9 mm Luger (Pistole)	FB2	H	H1, H2, H3
9 mm Luger (Scorpion)	[-]	F	F1, F2, F3
7,62 x 25	[-]	I	I1, I2, I3
44 Rem. magnum	FB4	E	E1, E2, E3
5,56 x 45 M193 SC	(FB5)	D	D1, D2, D3
5,56 x 45 – SCP1	FB5 + FB6	C	C1, C2, C3
7,62 x 51 - SC	FB6	B	B1, B2, B3
7,62 x 54R - HC	(FB7)	A	A1, A2, A3

(-) – Ráže neuvedeny v ČSN EN 1522, ale přibližně zařazeny do balistických tříd na základě podobnosti.

Podle (Tabulka 18) to znamená devět ráží krát tři výstřely je rovno dvaceti sedmi dopadovým plochám. K tomu ještě přičíst dodatečné plochy navíc, kdyby se výstřel náhodou nepovedl, předpokládaná destrukce by byla menší než ve skutečnosti a jiné nepředpokládané neznámé. Ve výsledku je to ohromná spousta betonu, protože na jeden výstřel si je potřeba přibližně rezervovat objem 150x150x150mm. To z toho důvodu, aby jednotlivý projektil neproletěl skrz, anebo výstřely nebyli moc blízko u sebe a tím pádem si navzájem nezkreslovali výsledky destrukce.

Pro účely experimentu viz (Tabulka 20) bylo navrženo zřídit čtyři krychle na zátěžové testy pevnosti v tlaku a devět kvádrů betonu pro samotný experiment střelby.

Tabulka 20: Přehled počtu vzorků

Trámec 150x150x600mm	Trámec 150x150x700mm	Krychle 150x150x150mm
6	3	4

Krychle se rozdělí do dvojic a první z dvojic bude podrobena zkoušce pevnosti v jednoosém tlaku ve stáří betonu 28 dní. Druhá z dvojic krychlí bude podrobena zkoušce v období zátěžového testu střelbou, tak abychom věděli, jakou pevnost beton má v průběhu střelby. Výsledky pevností mohou dobře popisovat i výsledky a odchylky při střelbě. V případě, že by pevnost betonu vyšla v porovnání s průměrnou pevností významně hůře, museli bychom přihlídnout k tomuto faktu i při vyhodnocování dopadových ploch. Soupis pevností těchto testů jsou podrobněji popsány v kapitole 5.3.3 *Průběh zkoušek v tlaku a jejich výsledky* na straně 33.

Na delší stranu kvádrů se provedou tři výstřely vedle sebe v dostatečné vzdálenosti tak, aby se jednotlivé výstřely nepřekrývali a mezi sebou neovlivňovali. V tomto slova smyslu nejde jenom čistě o velikost předního kráteru, ale i o porušení uvnitř vzorku, které není na povrchu vidět. Základní myšlenka logistiky střelby je taková, že pro ráže menších velikostí (FB1 až FB4) se bude střílet na obě protilehlé delší strany, jelikož jejich energie není tak velká a u ráží větších velikostí (FB5 až FB7) bude střelba provedena pouze na jedné delší straně. Zde už totiž reálně hrozí ovlivnění výsledků nejen dopadem sousední

střely ale i skrz na skrz pro jejich větší destruktivní účinky. Proto zde už střílet na obě protilehlé strany nebudeme.

Výroba, uskladnění, provedení tlakových zkoušek pevnosti a vyhodnocování výsledků probíhala v laboratořích Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze. Pro betonáž a uskladnění vzorku byla využita betonářská hala.

5.2. Harmonogram

Stručný přehled všech významných událostí spojených s experimentem viz (*Tabulka 21*).

Tabulka 21: Přehled významných událostí experimentu

Událost	Datum	Čas práce	Stáří betonu
Zadání projektu	21.09. 2020	-	-
Betonáž vzorků	19.10. 2020	2 hod	0 dní
Odbednění vzorků	20.10. 2020	3 hod	1 den
První zkouška pevnosti v tlaku	16.11. 2020	1 hod	28 dní
Zadání bakalářské práce	15.02. 2021	-	-
Druhá zkouška pevnosti v tlaku	12.04. 2021	1 hod	175 dní
Zátěžové testy střelbou	12.04. 2021	1 hod	175 dní
Měření hloubky kráterů 2D profilometrem	13.04. 2021	3 hod	-
Měření plochy kráterů	14.04. 2021	2 hod	-
Měření objemu kráterů	06.05. 2021	2 hod	-
Odevzdání bakalářské práce	16.05. 2021	-	-

5.3. Práce se vzorky

5.3.1. Výroba vzorků

Betonáž jednotlivých vzorků pro experiment se odehrávala v pondělí 19. října 2020 v betonářské hale Experimentálního centra. Výroba kvádrů a krychlí byla celkem logisticky náročná, jelikož bylo potřeba vybetonovat dohromady 142 litrů betonu. Takové množství bohužel žádná míchačka v laboratoři neumí najednou namíchat, z toho důvodu byla betonáž rozdělena do dvou cyklů po 71 litrech betonu. I tak to bylo obrovské množství, se kterým nebyla jednoduchá práce.

Začátek betonáže patří tradičně ke kompletaci jednotlivých složek do betonu a jejich přesnému vážení a měření podle receptury. Je zde důležité, abychom se nepřehlédli v seznamu a nenavázili něco jiného. Jak je vidět v (*Tabulka 22*) celkové množství jednotlivých složek dosahovalo téměř 170 kg pro jeden cyklus, to znamená 340 kg za celou betonáž.

Tabulka 22: Receptura směsi

Objem 71 litrů	
Položka	Hmotnost [g]
Suchá směs	147 517
Voda	14 448
Vlákna 13x0,14 mm	8 360
Celkem	170 325

Po navážení složek následuje fáze míchání, kde se dílčí položky postupně smíchají v míchačce. Zde je důležité nenaházet vše najednou do míchačky a čekat, že se směs promísí a bude všude stejná. Hlavní důraz je kladen na ocelová vlákna (drátky), které vytváří klubíčka (tzv. klastry) mezi sebou, a to pak v betonovém vzorku může udělat slabé místo, které bude náchylné k deformaci. Proto je nezbytné vlákna do míchačky postupně rozprostírat tak, aby se promíchali jednotlivě do betonu.

Poslední fáze je pak plnění forem bednění betonem. Zde klademe důraz, aby byly forma vyplněny řádně, bez vzduchové kapsy a drátkových klubiček. Ty je nutné ze vzorku vyndat.

Formy je nutné ještě před plněním betonu vystříkat odbedňovacím sprejem, tak aby při odbedňovacích pracích šli vzorky z forem vyndat. Po vyplnění forem betonem všechny vzorky zakryjeme plastovou fólií proti vysychání (Obrázek 19).

5.3.2. Odbednění vzorků

Odbednění jednotlivých vzorků následovalo hned druhý den po betonáži 20. října 2020. I zde to nebyla jednoduchá práce, jelikož vzorků bylo hodně, jsou těžké a samotné bednění pro kvádry nemá úplně chytrý systém demontáže.



Obrázek 19: Odbedňování vzorků na experiment

Při této práci je důležité, aby hrubá síla, která je použita při odbednění, neponičila vzorky, které se sotva dostali na svět. Pozornost je také kladena na trčící drátky z betonu, o které hrozí poranění říznutím.

Jednotlivé prvky byli po odbednění opatrně uloženy do vlhkého prostředí vany v betonářské hale (Obrázek 20).



Obrázek 20: Ukládání odbedněných vzorků do vlhkého prostředí vany

Takto uložené vzorky se nechali zrát a přišlo se pro ně na následné tlakové zkoušky, anebo až na „den D“ zátěžového testu střelbou.

5.3.3. Průběh zkoušek v tlaku a jejich výsledky

První tlaková zkouška pevnosti se odehrála 28 dní po betonáži vzorků 16. listopadu 2020. Druhá pak 12. dubna 2021 těsně před samotným zátěžovým testem střelbou. Obě v betonářské hale Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze strojem, jenž dokáže vyvinout sílu až 4000 kN. Všechny změřené hodnoty jsou vidět přehledně v (Tabulka 23) a (Tabulka 24)

Tabulka 23: Krychle č. 1 a 2

Číslo vzorku	Délka a [mm]	Délka b (Hrubší strana krychle) [mm]				Povrch zatěžované strany [mm ²]
		Levý kraj	Střed	Pravý kraj	Průměr	
Č. 1	150,00	152,16	152,42	153,65	152,74	22 911
Č. 2	150,00	153,46	152,61	153,19	153,09	22 964
Číslo vzorku	Hmotnost [g]	Délka stran [mm]			Objem [mm ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Č. 1	7 827,0	150,00	150,00	152,74	3 436 650	2 210
Č. 2	7 891,4	150,00	150,00	153,09	3 444 525	2 228

Tabulka 24: Krychle č. 3 a 4

Číslo vzorku	Délka a [mm]	Délka b (Hrubší strana krychle) [mm]				Povrch zatěžované strany [mm ²]
		Levý kraj	Střed	Pravý kraj	Průměr	
Č. 3	150,00	150,02	150,48	149,60	150,03	22 505
Č. 4	150,00	153,73	153,00	153,89	153,54	23 031
Číslo vzorku	Hmotnost [g]	Délka stran [mm]			Objem [mm ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Č. 3	7708,5	150,00	150,00	150,03	3 375 675	2 284
Č. 4	7923,3	150,00	150,00	153,54	3 454 650	2 294

Co je nejprve nutné před tlakovou zkouškou znát, jsou rozměry stran jednotlivých krychlí. To je nezbytné pro výpočet plochy zatěžování. Dále je pak vhodné si vzorek zvážit (Obrázek 21). Hmotnost je dobré znát pro výpočet objemové hmotnosti betonu, která je taky jedna ze základních fyzikálních vlastností materiálu.



Obrázek 21: Vážení vzorku



Obrázek 22: Měření vzorku

Důvod nutného měření krychle, i když je vytaženo z formy bednění 150x150x150 mm je takový, že strana, která byla vystavena přímo vzduchu, není úplně rovná a požadovaným 150 mm se nerovná. Je proto potřeba posuvným měřítkem (šuplerou) (Obrázek 22) spočítat po celé délce troje hodnoty, které se zprůměrují a z ní se poté vypočítá výsledná plocha zatěžování.

Toto vše je nutné udělat ještě před tlakovou zkouškou (Obrázek 23), protože z rozdrčeného prvku po zatěžování reprezentativní hodnoty nedostaneme viz (Obrázek 24) na následující stránce.



Obrázek 23: Zatěžování krychle



Obrázek 24: Poničený vzorek

Výpočet výsledné pevnosti v tlaku už je jednoduchý. Podle vzorečku, kde se napětí rovná síle lomená plochou dostaneme výslednou pevnost prvku.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

kde σ - Napětí [Pa] F – Síla [N] S – Plocha [m²]

Tabulka 25: Výsledky tlakové zkoušky v pevnosti

Vzorek	Stáří betonu	Rychlost zatěžování [mm/s]	Zatěžovací plocha [mm ²]	Dosažená síla [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
Krychle č.1	28 dní	0,3	22 911	1 670	72,891	72,590
Krychle č.2	28 dní	0,3	22 964	1 660	72,289	
Krychle č.3	175 dní	0,3	22 505	1 970	85,537	85,711
Krychle č.4	175 dní	0,3	23 031	1 978	85,884	

Z uvedených výsledků (Tabulka 25) je možno vyvodit, že pevnost v tlaku tohoto vysokohodnotného betonu po 28 dnech je zhruba 72,500 MPa. Pevnost před zatěžovým testem střeleb se blíží 86 MPa.

5.4. Zátěžové testy střelbou

Střelby probíhaly v prostoru střelnice Placy u Příbrami dne 12. dubna 2021.

Tato střelnice je unikátní svou nejdelší střeleckou dráhou na 500 m, kde se dá střílet opakovacími kulovnicemi s optickými zaměřovači. Takto dlouhých střelištích v České republice pro veřejnost moc není, leda by člověk měl zvláštní povolení na vojenské střelnice ve vojenských újezdech. Dále obsahuje ještě tři kratší střeliště, jedno zastřešené na 100 m, kde se střílí dlouhými kulovými zbraněmi a dvě na 50 m, kde se trénuje s nejslabšími zbraněmi jako jsou pistole, revolvery, brokovnice nebo malorážky. Areál samozřejmě disponuje klubovnou s občerstvením, sociálním zařízením a přilehlým parkovištěm pro 40 osobních vozů [22].

Bohužel v průběhu střelby nepanovalo dobré počasí. Teploty klesali k 0°C a pršelo. To chvílemi zapříčinilo nepřesné míření a tím pádem špatné umístění kráteru na vzorku. Nebylo také možnost využít vysokorychlostní kameru na měření rychlostí výstřelů.

Na (Obrázek 25) je vidět průběh střelby na střelnici. Střílelo se ve vzdálenosti 20 m na vzorky kvádrů stojících na železných stojanech. Po každých třech výstřelech umístěných do vzorku se kvádr odebral, odnesl a jeho místo se nahradilo dalším (Obrázek 26).

V průběhu střílení se musela dodržovat vysoká kázeň, tak aby nedošlo k nehodě, při které by došlo ke zranění. Zbraně totiž nejsou hračky!

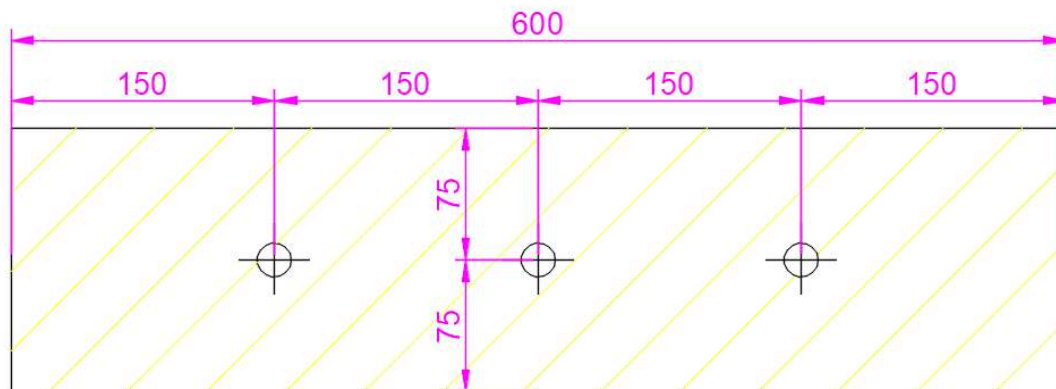


Obrázek 25: Střelba

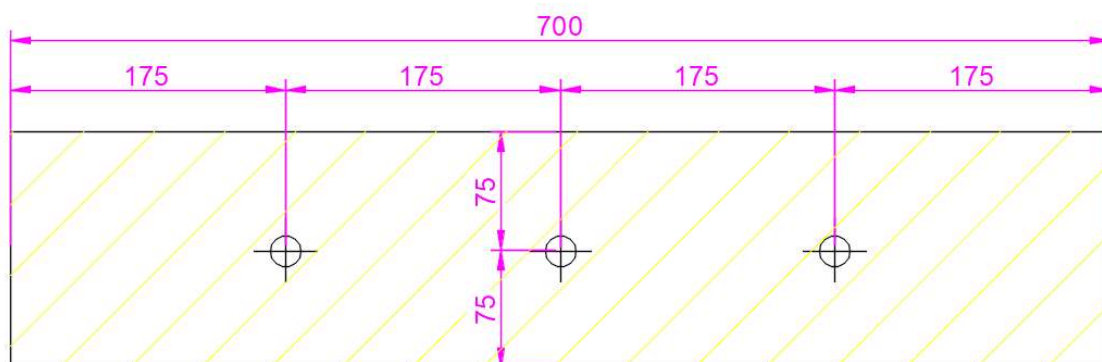


Obrázek 26: Kontrola střelby

Ideální rozmístění kráterů na kvádrech je názorně ukázáno na (Obrázek 27) a (Obrázek 28). Rovnoměrné rozmístění umožňuje neovlivnění jednotlivých poškození mezi sebou.



Obrázek 27: Schéma ideálních zásahů vzorku 600x150x150



Obrázek 28: Schéma ideálních zásahů vzorku 700x150x150

5.5. Zpracování výsledků

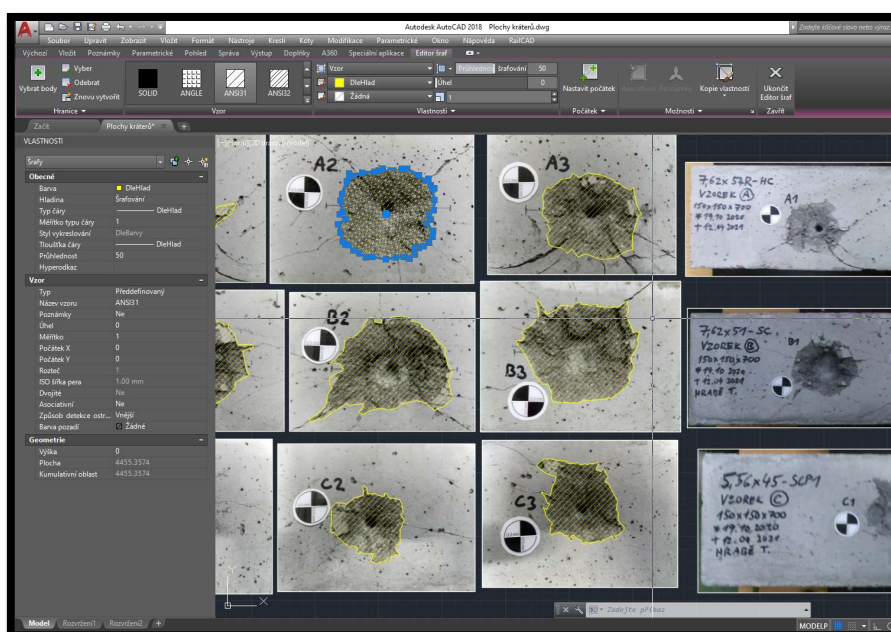
5.5.1. Měření plochy

Plochy jednotlivých kráterů byly měřeny pomocí programu „AutoCad 2018“. Do softwaru byly nahrány detailní fotografie všech kráterů a dále se s nimi pracovalo (Obrázek 29). Fotografie musí být v dostatečné kvalitě tak, aby na nich bylo možné rozpoznat hranici kráteru a neporušeného povrchu vzorku a nejlépe foceny kolmo na kráter, aby nedocházelo ke zkreslení plochy.

Poté, co je nahráno, je nutné všechny fotografie upravit velikostně do správného měřítku. K tomu dopomohl černobílý terčik, který ukazuje přesně definovaný poloměr. V tomto případě to je 12,5 mm, celý průměr kruhu 25 mm.

Posléze, co jsou fotografie ve správném měřítku, obtáhneme ručně křivkou jednotlivé krátery. To zabere asi nejvíce času. Následné vyšrafování plochy už je zcela automatické a v levém sloupci „Vlastnosti“ viz (Obrázek 29) pak vidíme výslednou plochu obrazce.

Tato činnost se vykoná u všech jednotlivých fotografií. Výsledky ploch jsou zapsány v přehledné (Tabulka 26) na následující stránce.



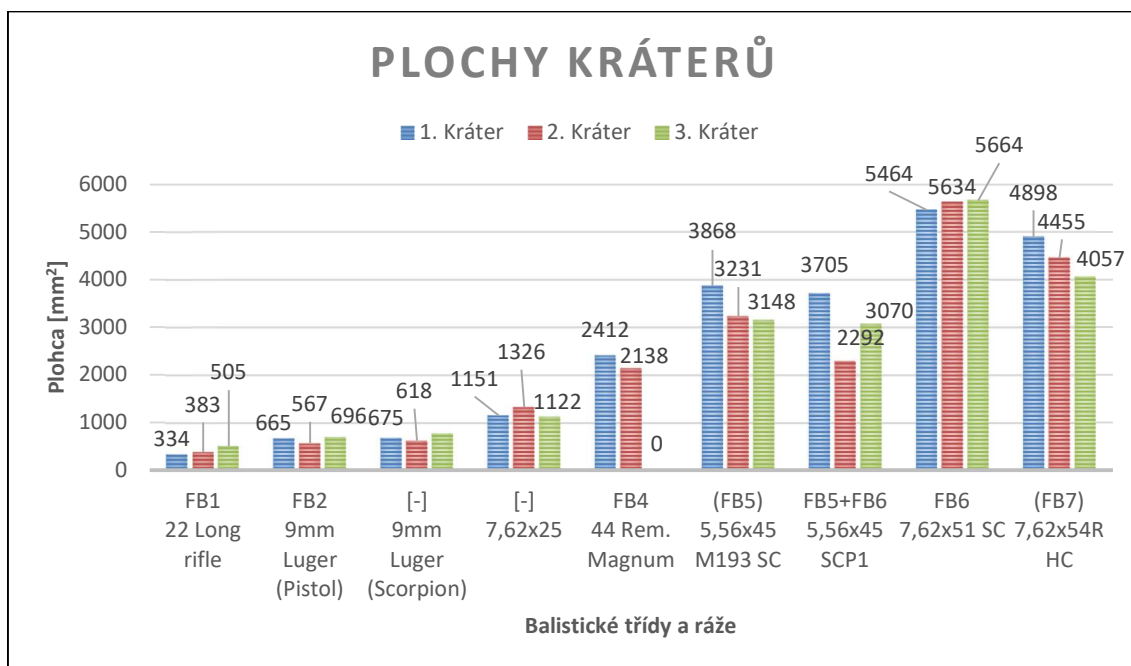
Obrázek 29: Práce v AutoCad 2018

Tabulka 26: Plocha kráterů

Balistická třída	Typ náboje	Vzorek	Kráter	Plocha [mm ²]	Průměrná plocha [mm ²]
FB1	22 Long rifle	G	G1	333,53	406,94
			G2	382,58	
			G3	504,70	
FB2	9mm Luger (Pistole)	H	H1	664,79	642,79
			H2	567,25	
			H3	696,34	
[-]	9mm Luger (Scorpion)	F	F1	675,45	688,08
			F2	617,99	
			F3	770,79	
[-]	7,62 x 25	I	I1	1151,01	1199,77
			I2	1326,18	
			I3	1122,11	
FB4	44 Rem. magnum	E	E1	2412,41	2275,23
			E2	2138,04	
			E3	-	
(FB5)	5,56 x 45 M193 SC	D	D1	3868,00	3415,83
			D2	3231,40	
			D3	3148,10	
FB5+FB6	5,56 x 45 – SCP1	C	C1	3704,72	3022,16
			C2	2291,95	
			C3	3069,81	
FB6	7,62 x 51 - SC	B	B1	5464,45	5587,21
			B2	5633,56	
			B3	5663,63	
(FB7)	7,62 x 54R - HC	A	A1	4898,16	4470,1
			A2	4455,36	
			A3	4057,02	

Výsledný přehled hodnot z (Tabulka 26) je pro lepší znázornění vykreslen do (Graf 2).

Graf 2: Plochy kráterů



5.5.2. Měření hloubky

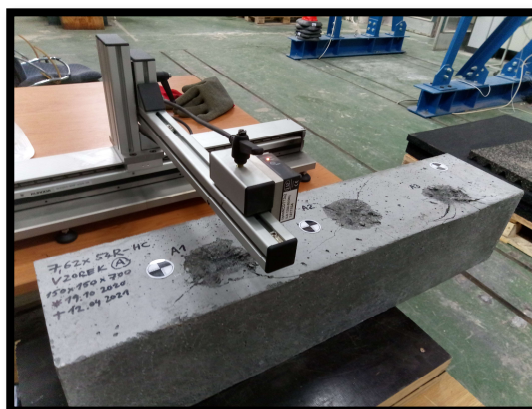
Hloubka kráteru byla měřena pomocí 2D Profilometru a softwarem „*Profilové měření 2015 Micro Epsilon*“. (Obrázek 30) nám ukazuje sestavu takovéto celé aparatury. Ta se skládá s pojízdné dráhy, ramena s laserovým snímačem a na práce s daty je využíván stolní počítač s již zmíněným programem.

Na začátku měření je důležité všechny přístroje řádně napojit na elektrickou síť a propojit stolní počítač se snímačem. Kladen je důraz na správné umístění konektorů, jinak se může stát, že nám může snímač vyházovat nesmyslné data. Po správném připojení je ještě dobré udělat zkoušku měření, že vše funguje jak má.

Přístroj pracuje tak, že rameno jezdí po přesně definované dráze a snímá laserem povrch prvku (Obrázek 31). Všechny nezbytné parametry se zadávají do programu. V našem případě byla zvolena dráha rovna 100 mm. Rychlost pohybu ramene se pohybovala 50mm/s. Frekvence měření byla rovna 750 vzorkům/s



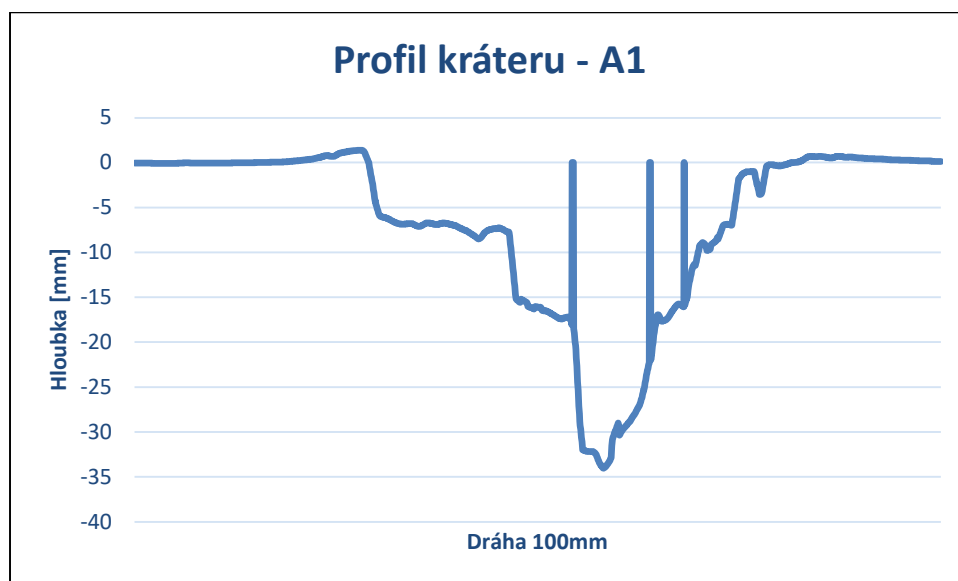
Obrázek 30: Sestava 2D Profilometr



Obrázek 31: Snímání vzorku

Výsledkem je vykreslení profilu (*Graf 3*). Na ose x je rozložena dráha snímání, která byla nastavena na 100mm, na ose y je vyobrazena hloubka v mm. Co se týká strmě táhnoucím se čarám na profilu vzhůru, které by se dalo říci, že na první pohled nepasují do obrázku, tak ty představují drátky trčící z betonu, který laser přešel a zachytil.

Graf 3: Příklad profilu



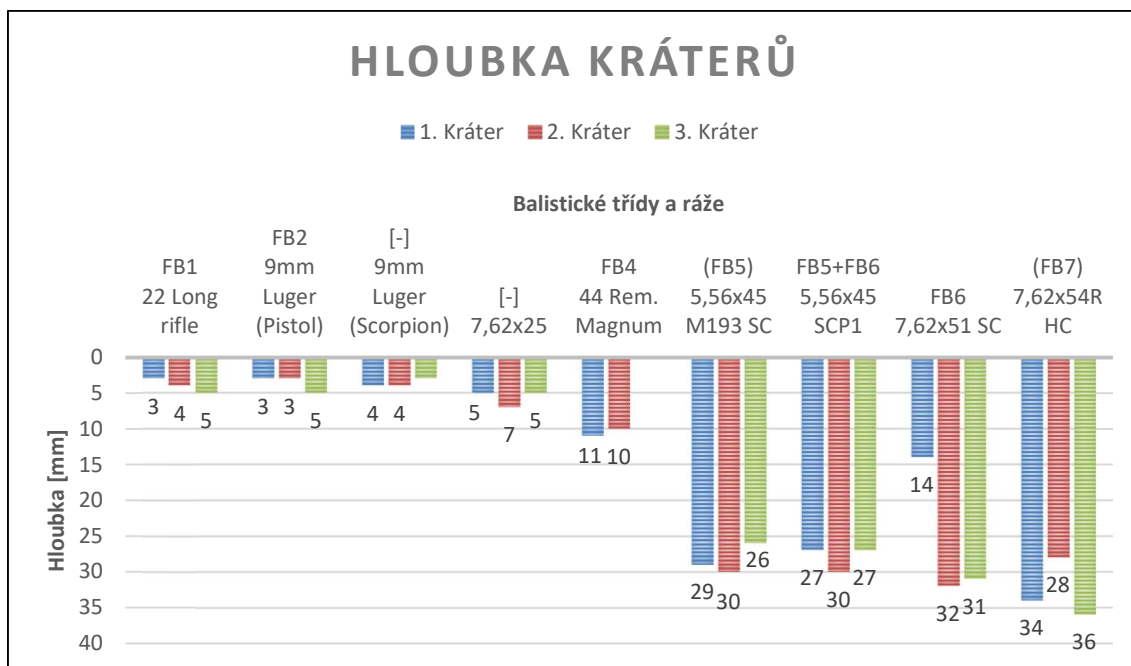
Všechny číselné výsledky hloubek jednotlivých kráterů jsou sepsány v předhledné (*Tabulka 27*) na následující stránce. V přílohách v kapitole 7.2 *2D profily kráterů* je pak přehled všech vykreslených profilů.

Tabulka 27: Hloubka kráterů

Balistická třída	Typ náboje	Vzorek	Kráter	Hloubka [mm]	Průměrná hloubka [mm]
FB1	22 Long rifle	G	G1	2,59	3,84
			G2	4,06	
			G3	4,88	
FB2	9mm Luger (Pistole)	H	H1	2,59	3,58
			H2	3,11	
			H3	5,03	
[-]	9mm Luger (Scorpion)	F	F1	4,10	3,78
			F2	3,79	
			F3	3,46	
[-]	7,62 x 25	I	I1	5,09	5,99
			I2	7,45	
			I3	5,42	
FB4	44 Rem. magnum	E	E1	11,35	10,61
			E2	9,86	
			E3	-	
(FB5)	5,56 x 45 M193 SC	D	D1	28,59	28,35
			D2	30,24	
			D3	26,21	
FB5+FB6	5,56 x 45 – SCP1	C	C1	26,76	28,75
			C2	29,73	
			C3	26,76	
FB6	7,62 x 51 - SC	B	B1	13,53	31,74 (Bez vzorku B1)
			B2	32,16	
			B3	31,32	
(FB7)	7,62 x 54R - HC	A	A1	34,03	32,56
			A2	27,78	
			A3	35,88	

Pro lepší přehlednost výsledků hloubky kráterů (*Tabulka 27*) jsou výsledky vykresleny společně na (*Graf 4*).

Graf 4: Hloubka kráterů



5.5.3. Měření objemu

Objemy kráterů byly měřeny pomocí metody sypání jemného písku do jednotlivých kráterů (*Obrázek 32*). Není to metoda úplně ideální na přesnost výsledků, jelikož se kráter vysypával pískem na základě mého odhadu, nicméně jiná technika k dispozici nebyla. Shodli jsme se, že pro tuto práci je tato přesnost dostatečná.

Jednotlivé krátery musí být před měřením řádně vyčištěné, nejlépe vysány vysavačem, aby nezbyly drobné nečistoty v podobě prachu a kamínků, které by zkreslily výsledky. Následně se odměřilo přesně dané množství písku do odměrného válce a poté se písek pomaloučku odsypával do kráteru. Po vyplnění kráteru se hodnota na odměrném válci odečetla s hodnotou původní a výsledný objem se zapsal (*Tabulka 28*).



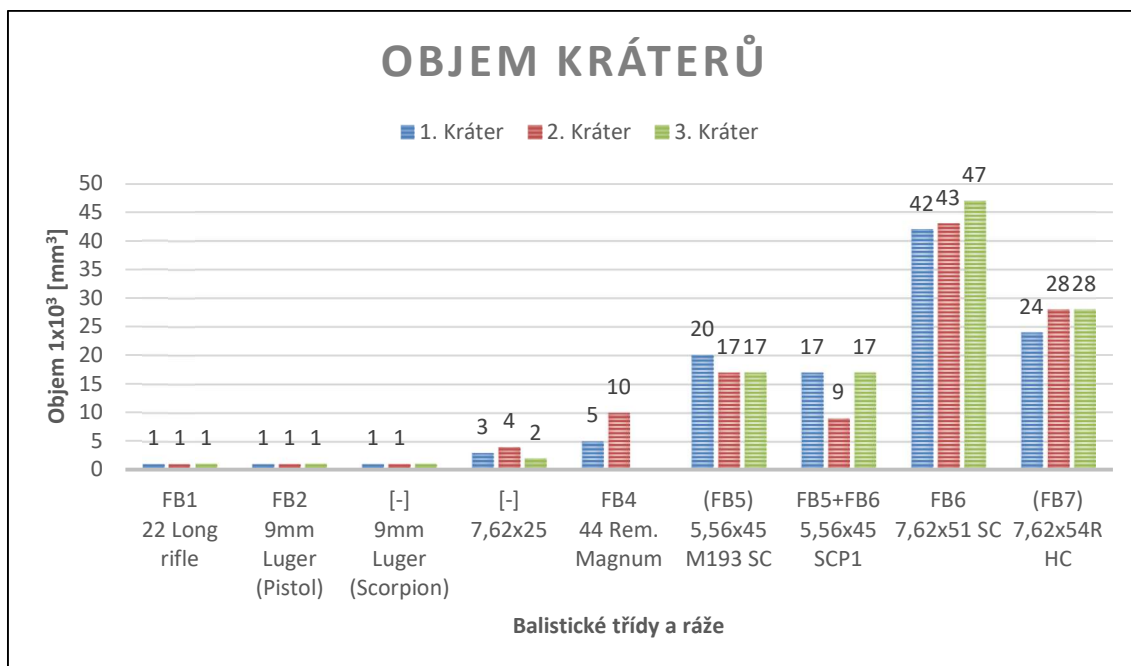
Obrázek 32: Měření objemu jemným pískem

Tabulka 28: Objemy kráterů

Balistická třída	Typ náboje	Vzorek	Kráter	Objem 1x10 ³ [mm ³]	Průměrný objem 1x10 ³ [mm ³]
FB1	22 Long rifle	G	G1	1	1
			G2	1	
			G3	1	
FB2	9mm Luger (Pistole)	H	H1	1	1
			H2	1	
			H3	1	
[-]	9mm Luger (Scorpion)	F	F1	1	1
			F2	1	
			F3	1	
[-]	7,62 x 25	I	I1	3	3
			I2	4	
			I3	2	
FB4	44 Rem. magnum	E	E1	5	8
			E2	10	
			E3	-	
(FB5)	5,56 x 45 M193 SC	D	D1	20	18
			D2	17	
			D3	17	
FB5+FB6	5,56 x 45 – SCP1	C	C1	17	14
			C2	9	
			C3	17	
FB6	7,62 x 51 - SC	B	B1	42	44
			B2	43	
			B3	47	
(FB7)	7,62 x 54R - HC	A	A1	24	27
			A2	28	
			A3	28	

Výsledný přehled objemu kráterů (*Tabulka 28*) je pro lepší představivost vykreslen do (*Graf 5*).

Graf 5: Objem kráterů



5.5.4. Závěrečné vyhodnocení

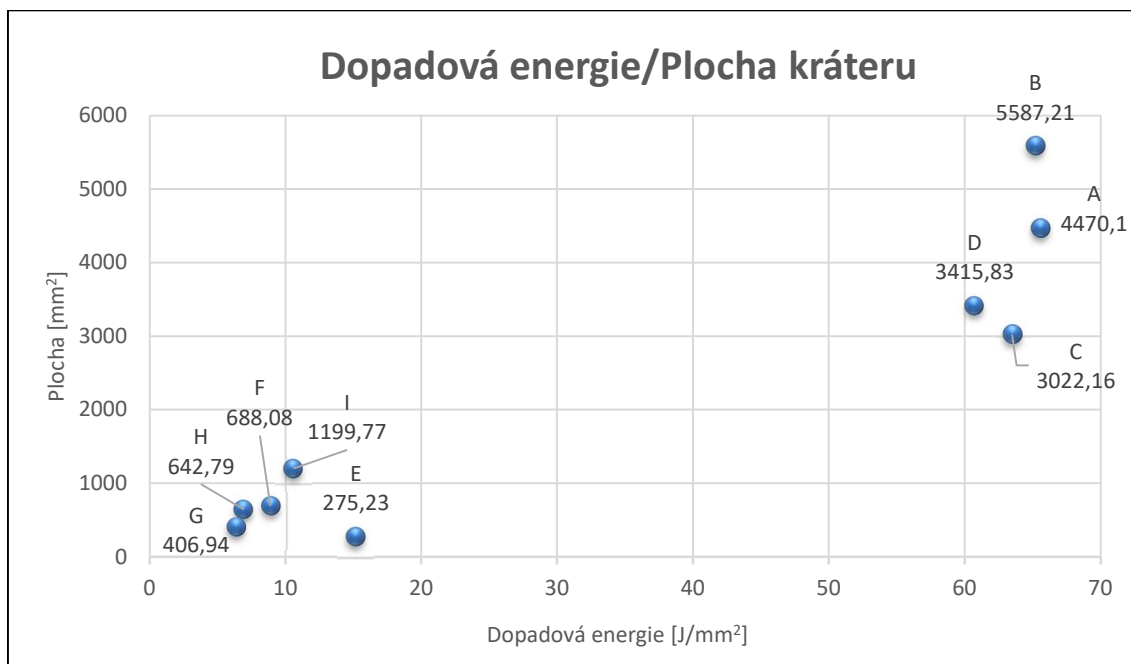
Pro reprezentativní výpověď výsledků plochy, hloubky a objemu kráterů si tyto dotyčné veličiny vyjádříme v závislosti na dopadové energii. Ta by měla zohlednit dopadovou rychlost střely, hmotnost a plochu náboje a vše hodit do stejného poměru. V následující (Tabulka 29) jsou postupně vypsány všechny důležité veličiny k výpočtu dopadové energie.

Finální výsledky závislosti veličin popisující poničení vzorku na dopadové energii jsou vykresleny v grafech na následujících stránkách.

Tabulka 29: Výpočet dopadové energie [9]

Balistická třída	Typ náboje	Vzorek	Ústová rychlost V_0 [m/s]	Dopadová rychlost V_{20m} [m/s]	Hmotnost náboje m [g]	Kinetická energie $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ [J]	Plocha náboje \varnothing^2 [mm ²]	Dopadová energie $\frac{E_k}{\varnothing^2}$ [J/mm ²]
FB1	22 Long rifle	G	380	355	2,60	164	25,70	6,38
FB2	9mm Luger (Pistole)	H	350	333	8,00	444	64,04	6,93
[-]	9mm Luger (Scorpion)	F	400	377	8,00	569	64,04	8,89
[-]	7,62 x 25	I	455	427	5,60	511	48,15	10,61
FB4	44 Rem. magnum	E	440	429	15,60	1436	94,52	15,19
(FB5)	5,56 x 45 M193 SC	D	960	933	3,56	1550	25,52	60,74
FB5 FB6	5,56 x 45 – SCP1	C	915	900	4,00	1620	25,52	63,48
FB6	7,62 x 51 - SC	B	830	815	9,50	3155	48,40	65,19
(FB7)	7,62 x 54R - HC	A	820	805	9,80	3175	48,40	65,60

Graf 6: Vliv dopadové energie na plochu kráteru

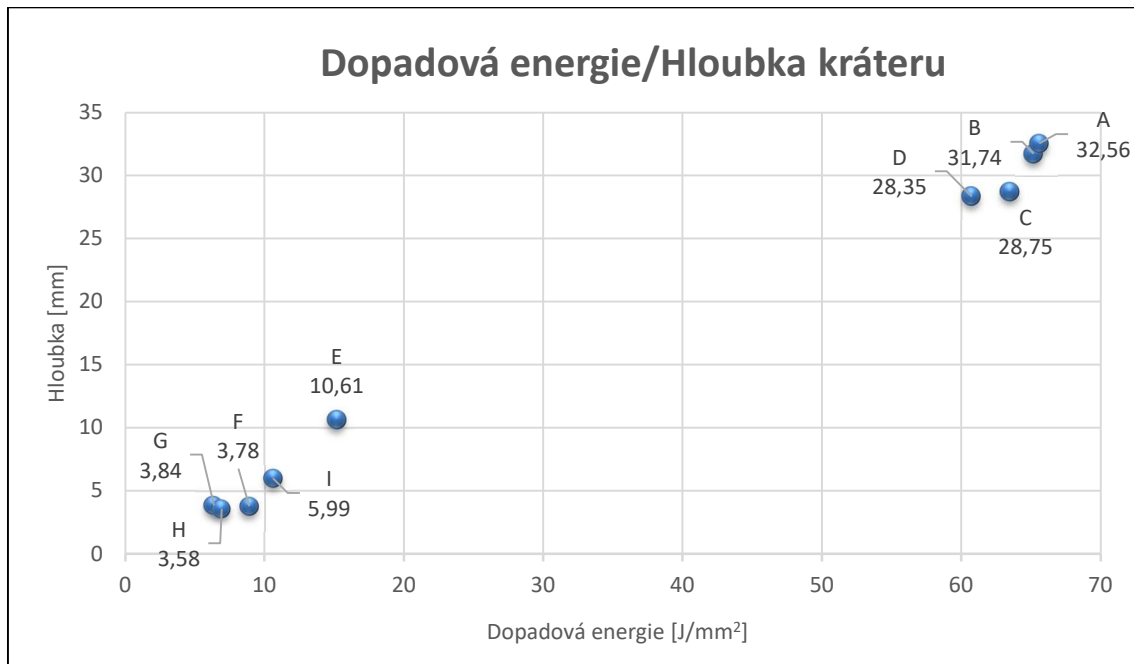


Po vykreslení závislosti plochy, hloubky a objemu na dopadovou energii můžeme vyčíst (Graf 6) (Graf 7) (Graf 8), že se námi vybrané ráže dělí na dvě skupiny. První oblast (vzorky G, H, D, I, E), jež reprezentují malorážky, pistole a revolvery a na druhou oblast (vzorky D, C, B, A), pod které spadají pušky.

Co se týká vlivu dopadové energie na plochu, z grafu je patrné rostoucí lokální trend v první oblasti, kdy plochy vzorků G, H, F, I rostou. Vzorek E, pod který spadá ráže 44 Remington magnum, se výrazně vymyká trendu a spíše než poškození do plochy, působil raději do hloubky a do objemu (Graf 7) a (Graf 8).

V druhé oblasti grafu už se nedá hovořit o trendu, spíše na výslednou plochu má vliv typ náboje. Nejlépe je to vidět na rozdílu mezi vzorky B, pod který spadá ráže 7,62 x 51 – SC, což je měkká střela a A, který reprezentuje 7,62 x 54R – HC, což je tvrdá střela. Zatímco měkká střela se při nárazu roztránila a znásobila ničivější účinek, tvrdá střela se pevně zaryla do vzorku a dál se na destrukci nepodílela.

Graf 7: Vliv dopadové energie na hloubce kráteru

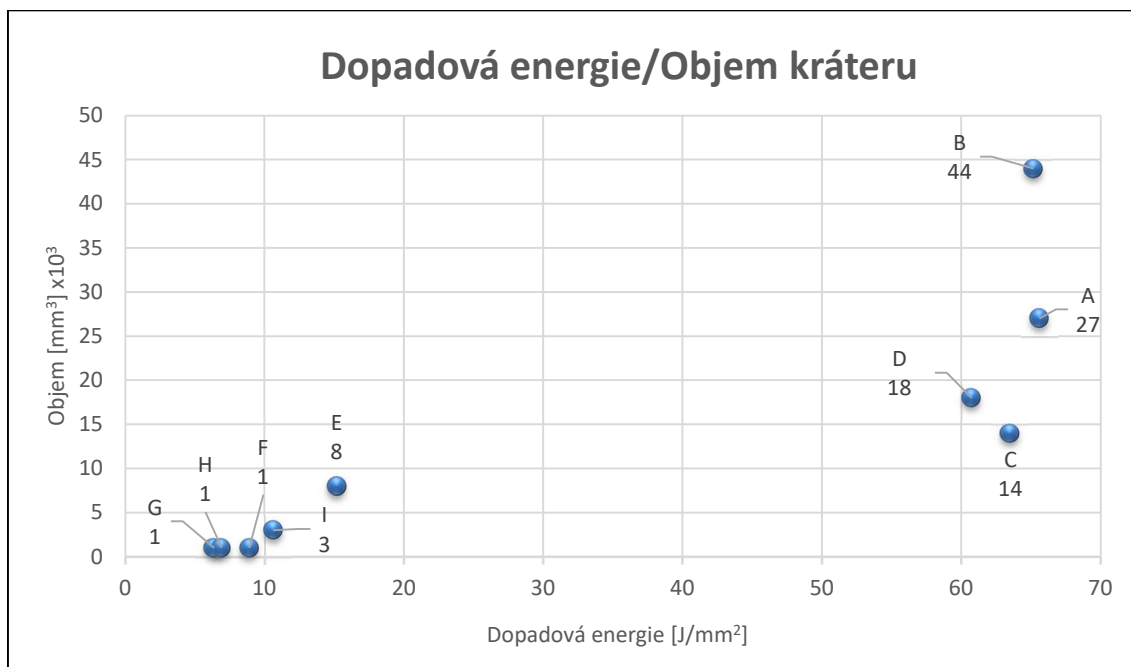


Z (Graf 7) můžeme krásně vyčíst víceméně lineárně rostoucí trend jak u obou oblastí lokálně, tak zároveň i jeden velký globální.

Ráže, jež byli vystřeleny u vzorků G, H, F a I neměli na poničení kvádrů téměř žádný vliv a spíše se po dopadu odrazili pryč. Již zmíněná ráže u vzorku E už nějaké poničení měla.

U druhé skupiny vzorků D, C, B, A byla hloubka víceméně podobná s lehkou tendencí k růstu.

Graf 8: Vliv dopadové energie na objemu kráteru



U (Graf 8) je patrné vidět podobný vývoj, jako na (Graf 6) u plochy. Balistické třídy nižší kategorie neměli defacto vliv na objemové poničení vzorku. U vzorků G, H, F, I střely způsobily pouze povrchové poničení a následně se odrazily pryč.

S rostoucí balistickou třídou objemové poničení roste (oblast grafu se vzorky D, C, B, A), ale z výsledků je patrné, že nejspíše větší vliv, než samotná ráže bude mít materiál náboje. To je krásně vidět mezi dvěma nejvyššími balistickými třídami se vzorky A a B, kdy vzorek B byl zasažen nábojem 7,62 x 51 – SC, což je měkká střela a vzorek A střelou 7,62 x 54R – HC což je tvrdý náboj. Měkká střela se dokázala při dopadu roztříštit a znásobit tak objemovou deformaci, zatímco tvrdá střela se pevně zaryla do vzorku, a tudíž objemového poničení způsobila méně.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo otestovat recepturu vysokohodnotného, drátky vyztuženého betonu vyvinutém v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze vůči síle jednotlivým pistolovým a puškovým rážím. Pro systematicklost a ucelenost experimentální kampaně při výběru ráží byla vybrána norma ČSN EN 1522.

V experimentu se nejprve počítalo s popsáním účinků všech balistických tříd obsažených v normě, avšak z důvodu absence ráží nejsou všechny třídy zahrnuty anebo jsou nahrazeny improvizovaným nábojem na základě podobnosti.

Průběh praktické části bakalářské práce jinak proběhl podle plánu. S výrobou a prací se vzorky nebyl problém až na celkový objem hmoty (asi 300 kg), které vzorky při manipulaci představovali. Zkoušky doprovodných těles nám potvrdili předpokládanou pevnost vysokohodnotného betonu. Při následném zpracování výsledků byly změřeny důležité parametry poškození vzorku. To jest plocha, hloubka a objem všech kráterů.

Výsledky nám kromě lineárního trendu u hloubky neukázali žádný zajímavý trend. Jediné, co se potvrdilo a dalo se to předpokládat je, že s čím vyšší balistickou třídou pracujeme, tím je destrukce větší. Do budoucna by bylo zajímavé porovnat účinky ráží s obyčejným betonem, který jsme z kapacitních a časových důvodů netestovali. Zároveň pro úplnost experimentální kampaně by bylo vhodné zajistit náboje všech ráží dle normy ČSN EN 1522 tak, aby byla kompletní,

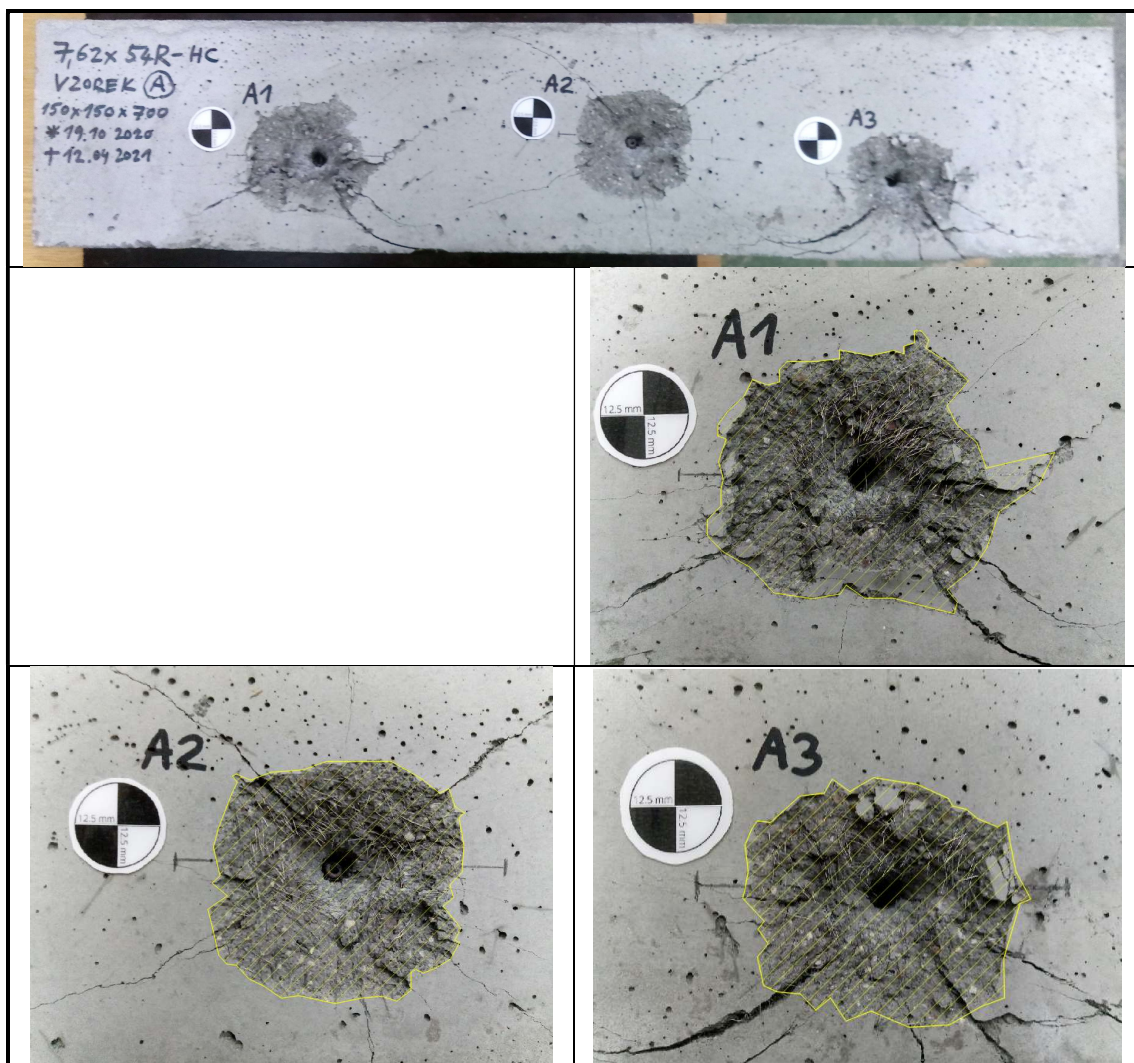
7. Přílohy

7.1. Fotografie kráterů

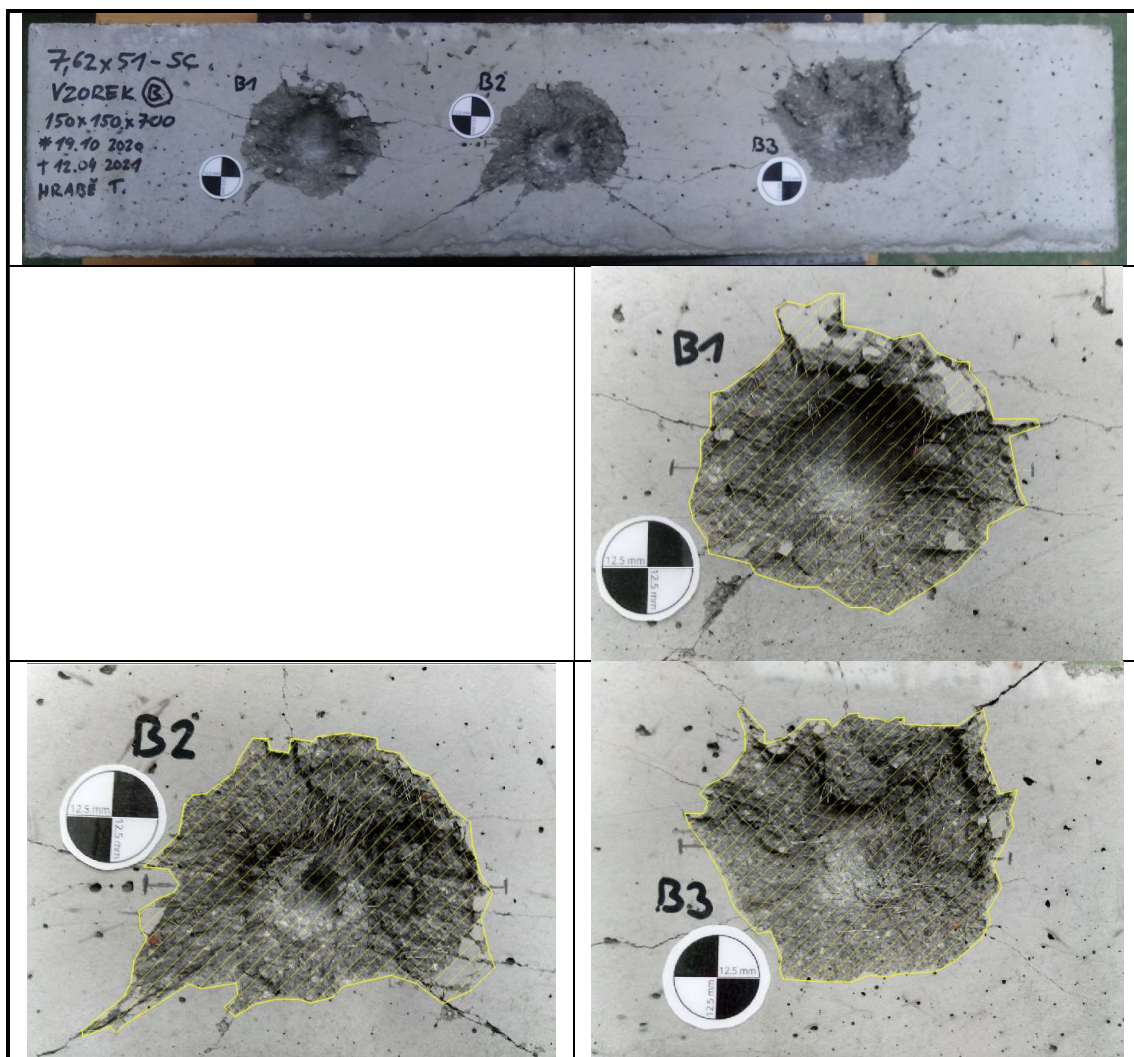
Celkový přehled kráterů – vzorky A, B, C, D, E, G, H



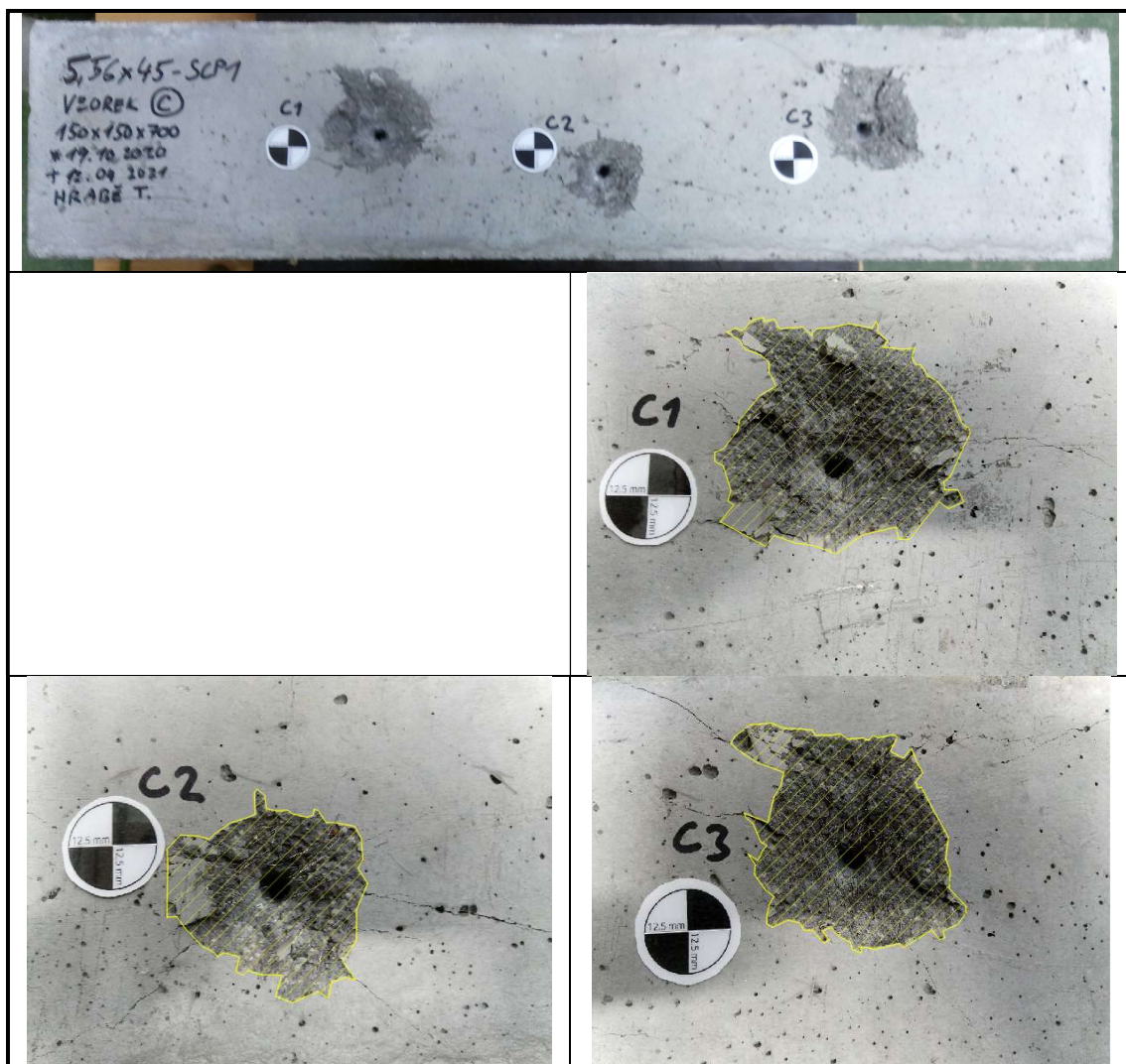
Fotografie: Krátery po 7,62x54R – HC



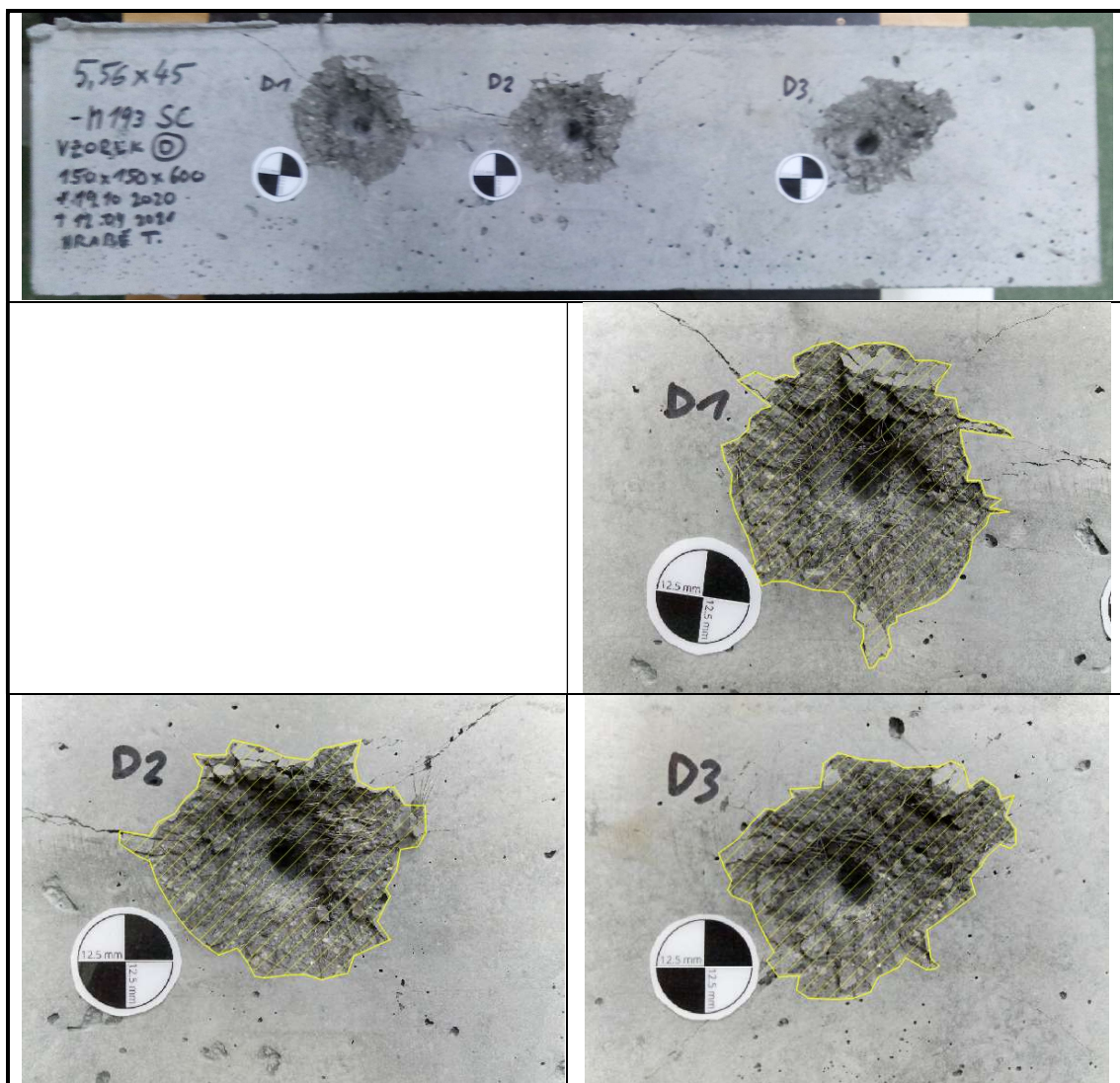
Fotografie: Krátery po 7,62x51 – SC



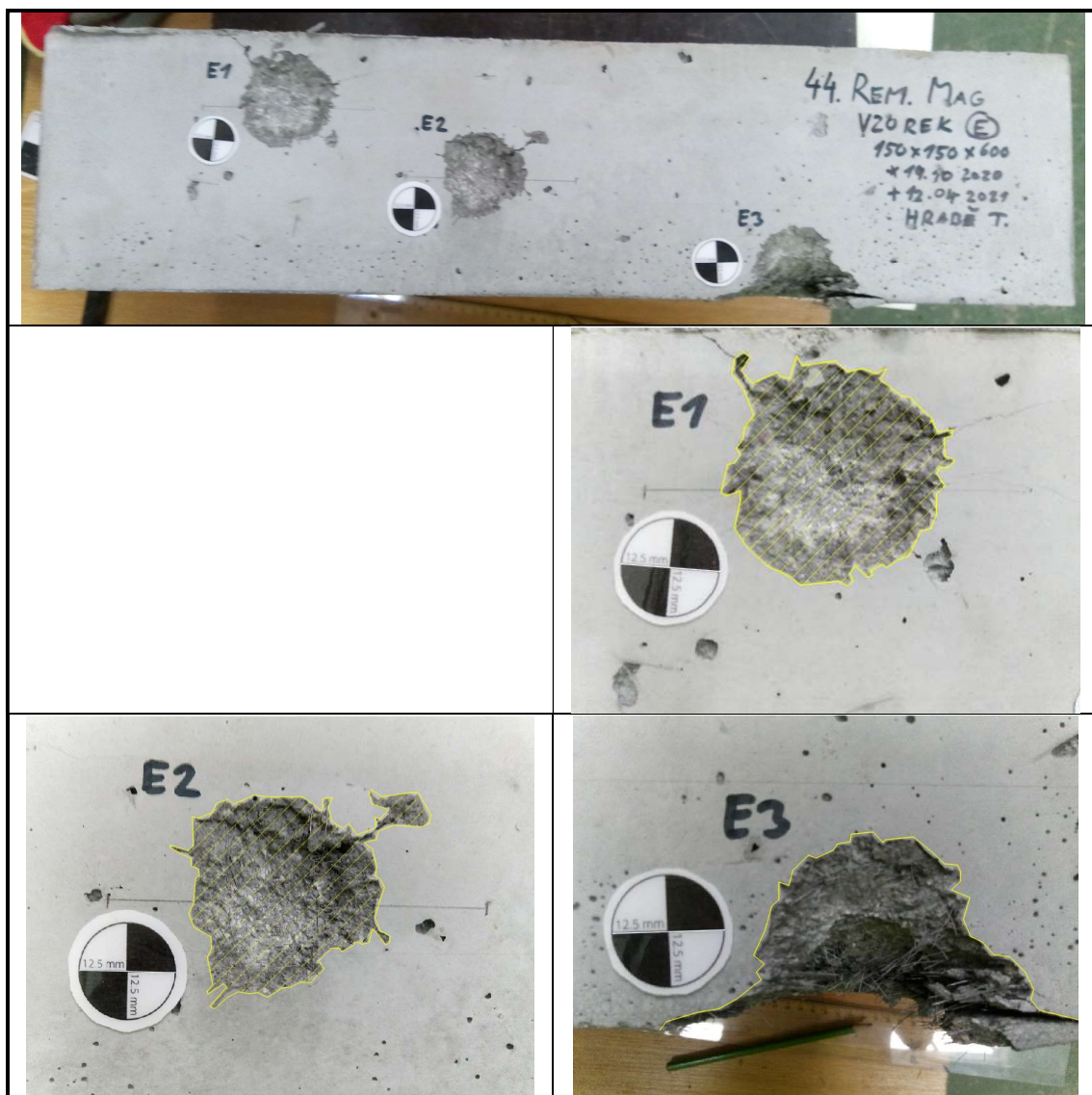
Fotografie: Krátery po 5,56x45 – SCPI



Fotografie: Krátery po 5,56x45 M193 SC



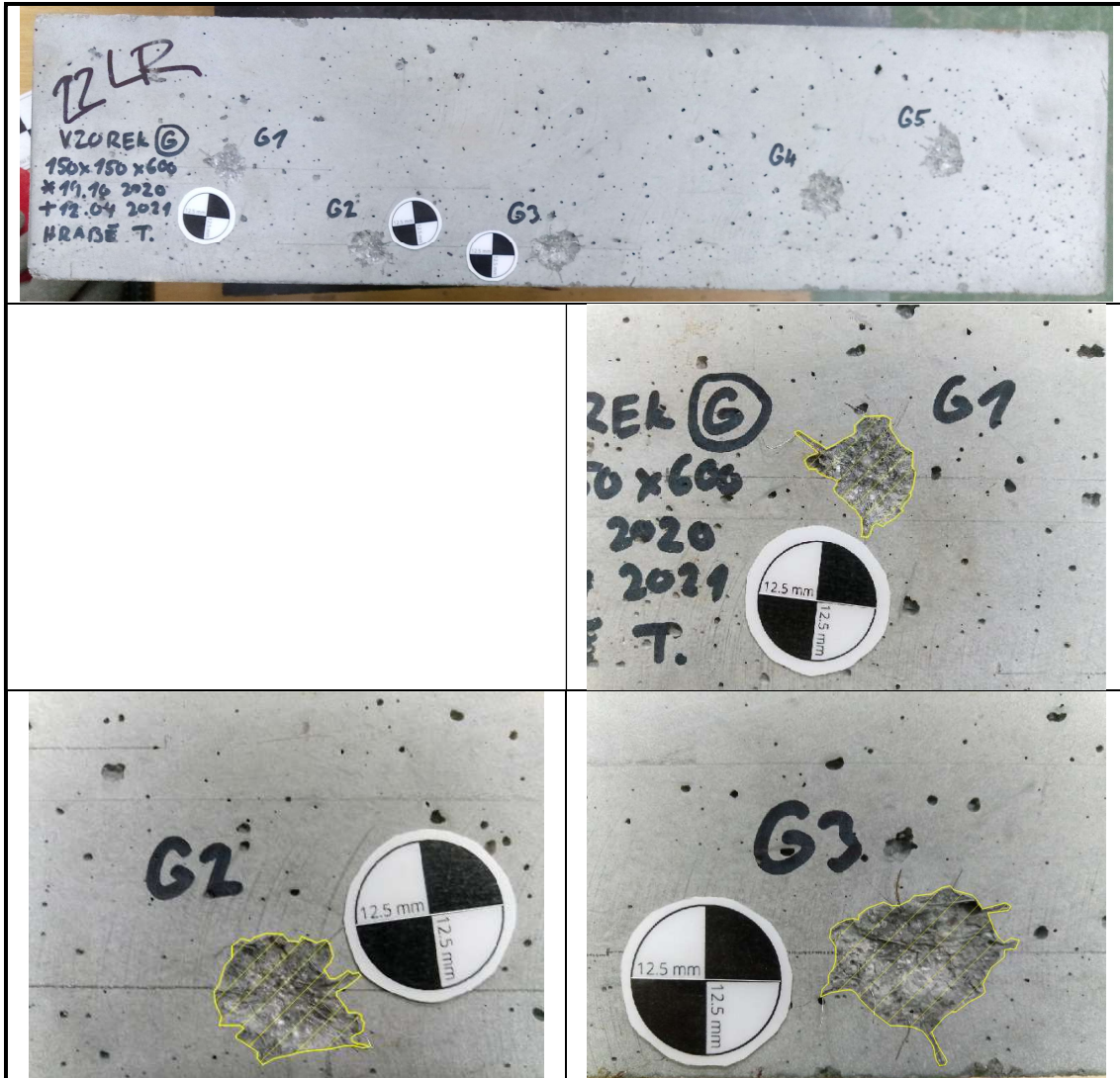
Fotografie: Krátery po 44 Remington magnum



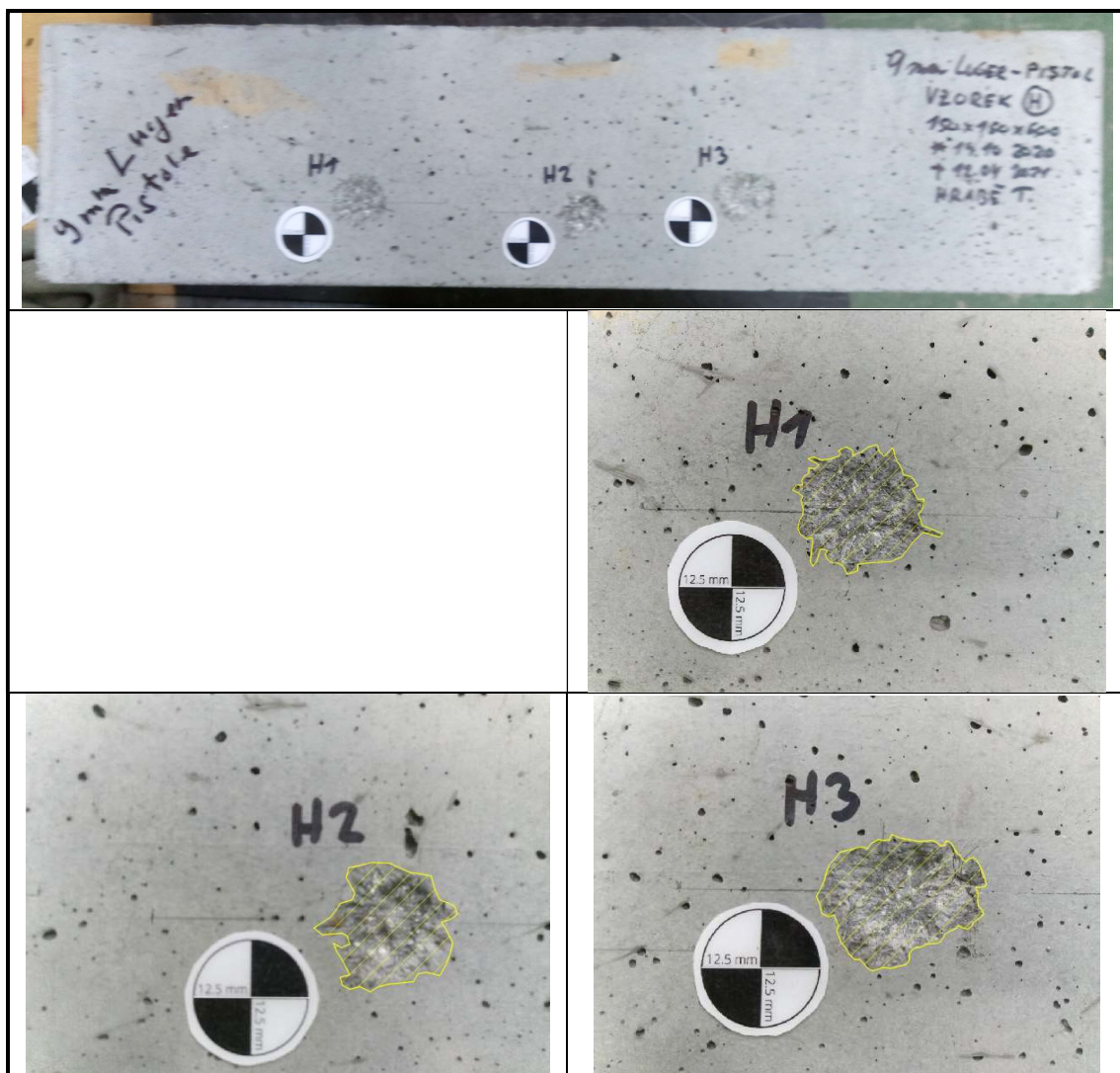
Fotografie: Krátery po 9mm Luger (Scorpion)



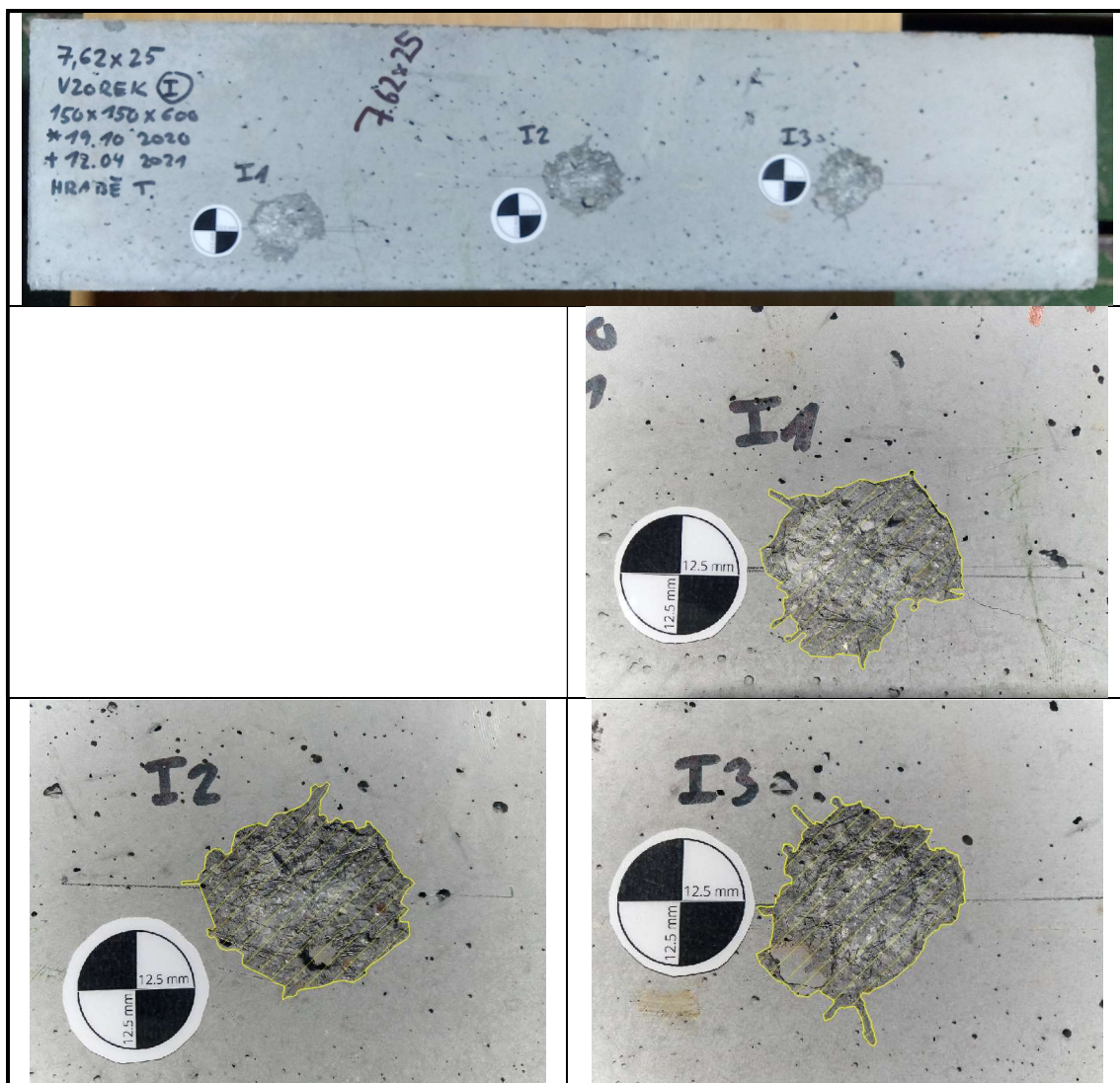
Fotografie: Krátery po 22 Long rifle



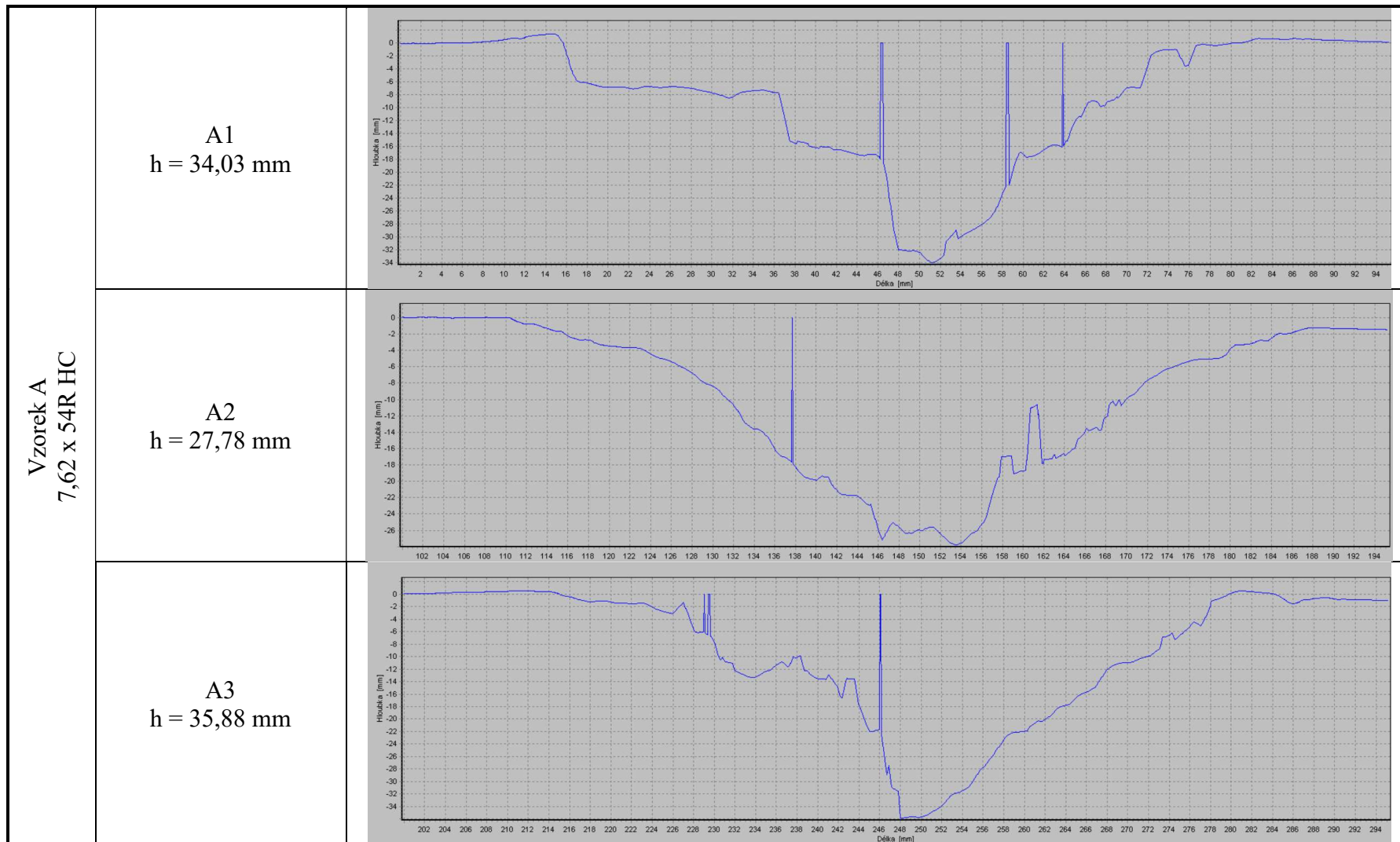
Fotografie: Krátery po 9mm Luger (Pistole)



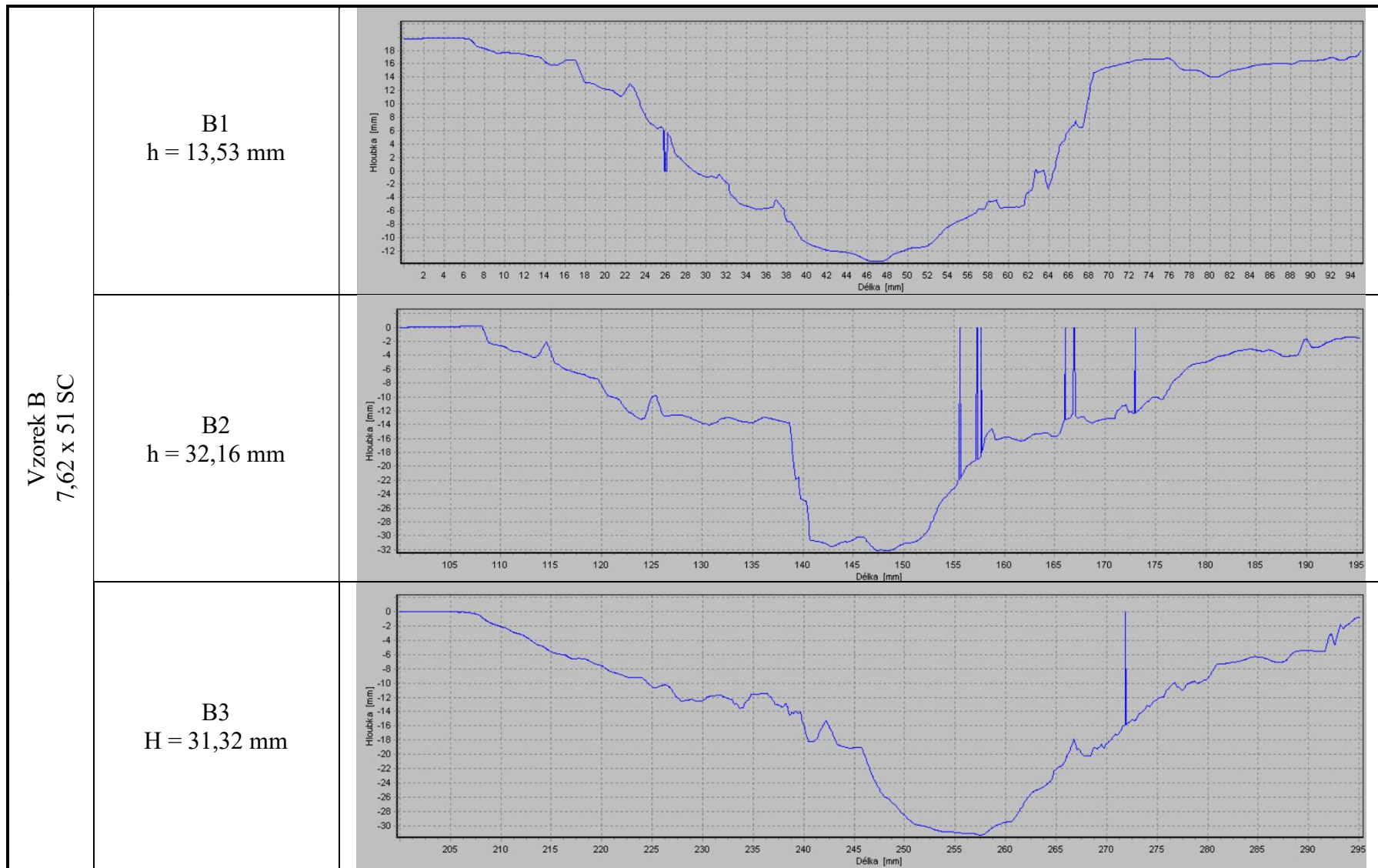
Fotografie: Krátery po 7,62x25



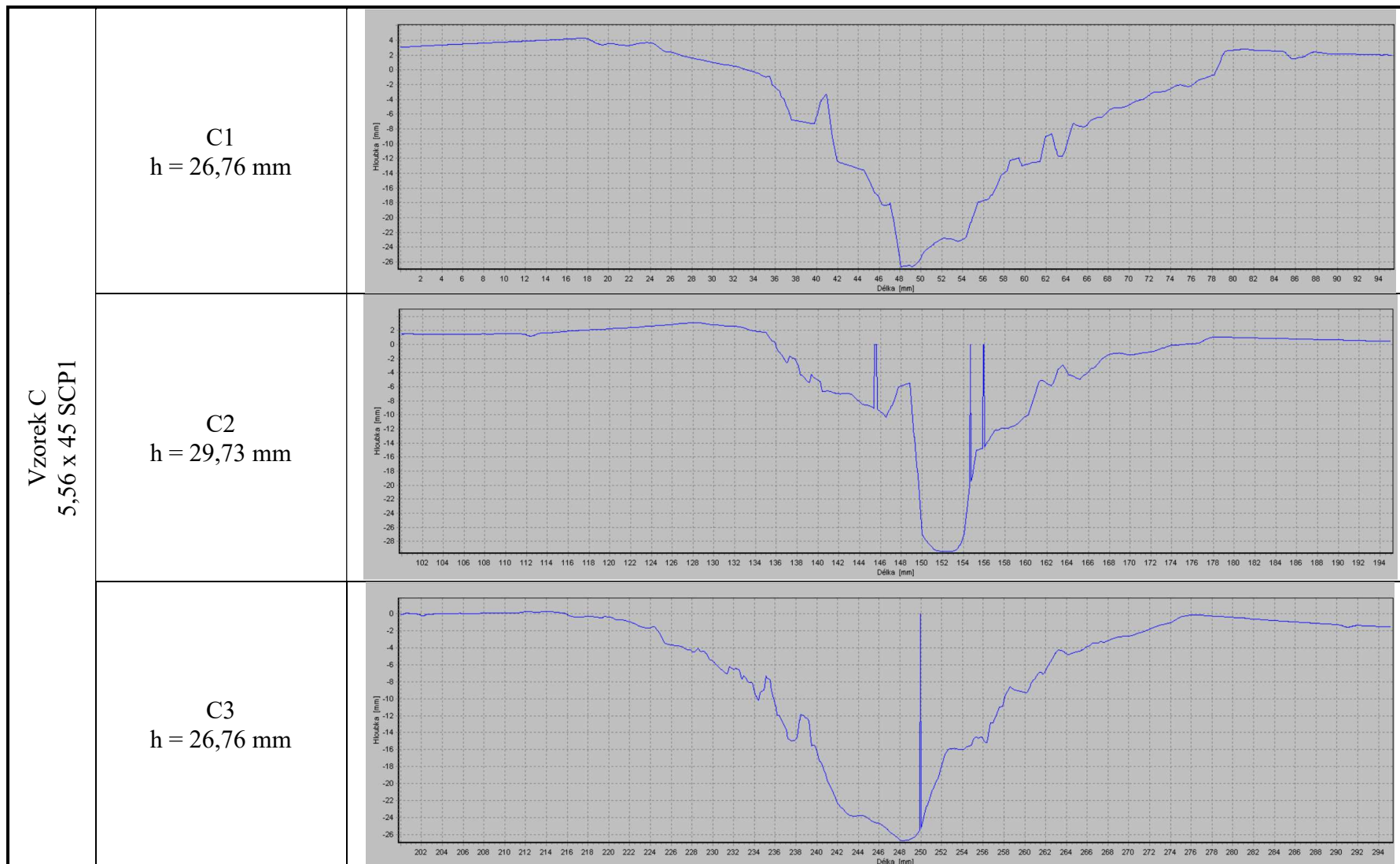
7.2. 2D profily kráterů



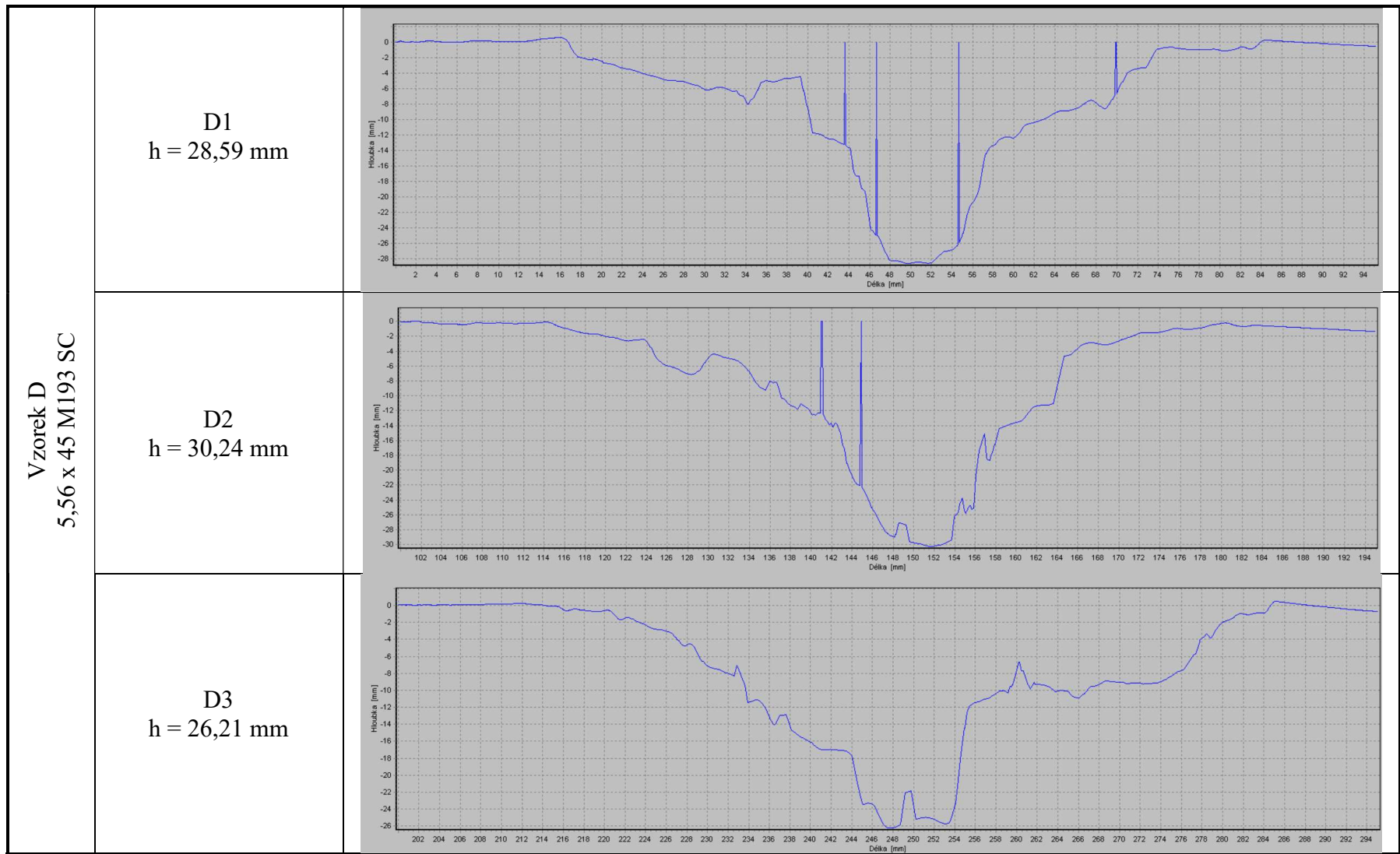
* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



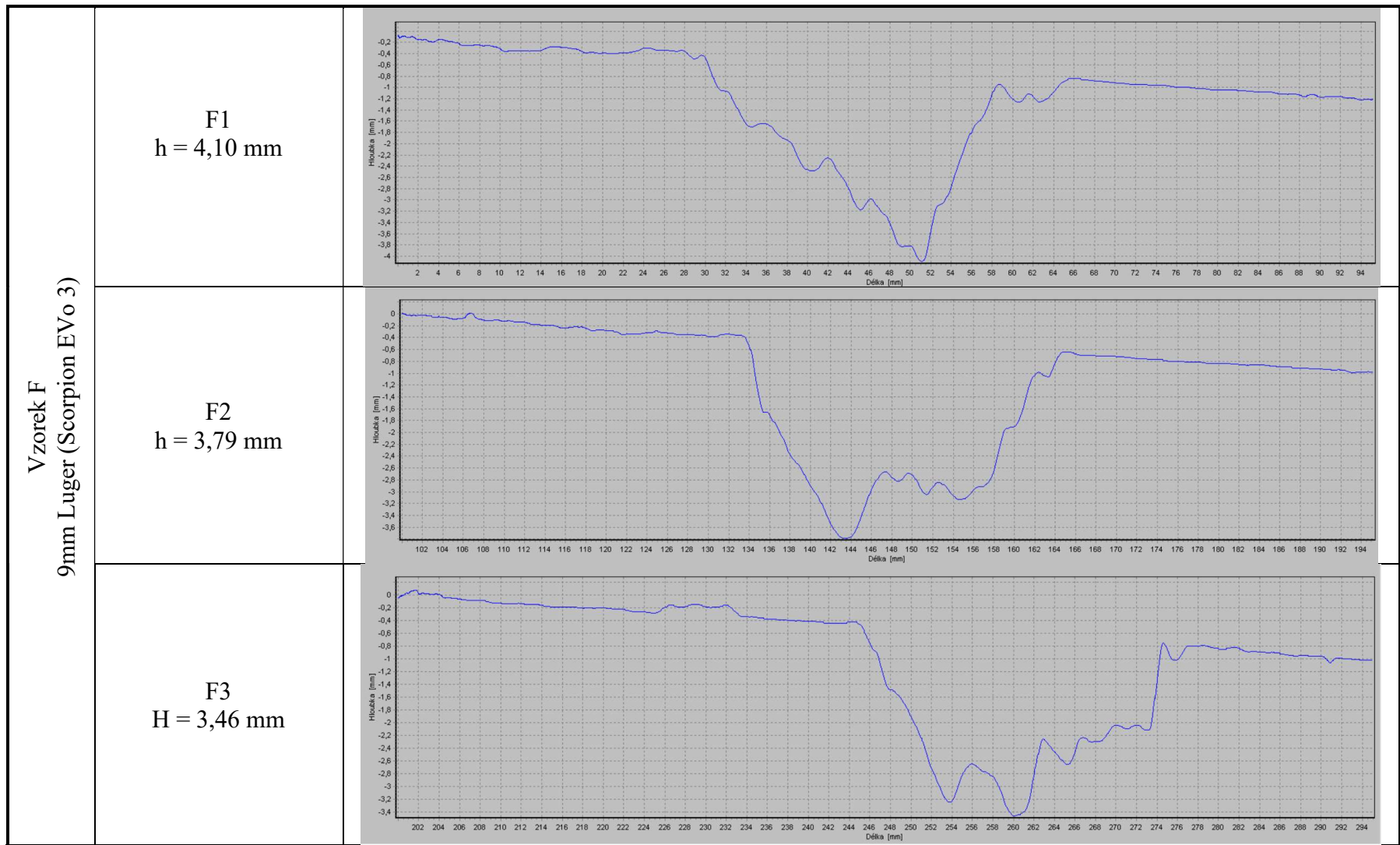
* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



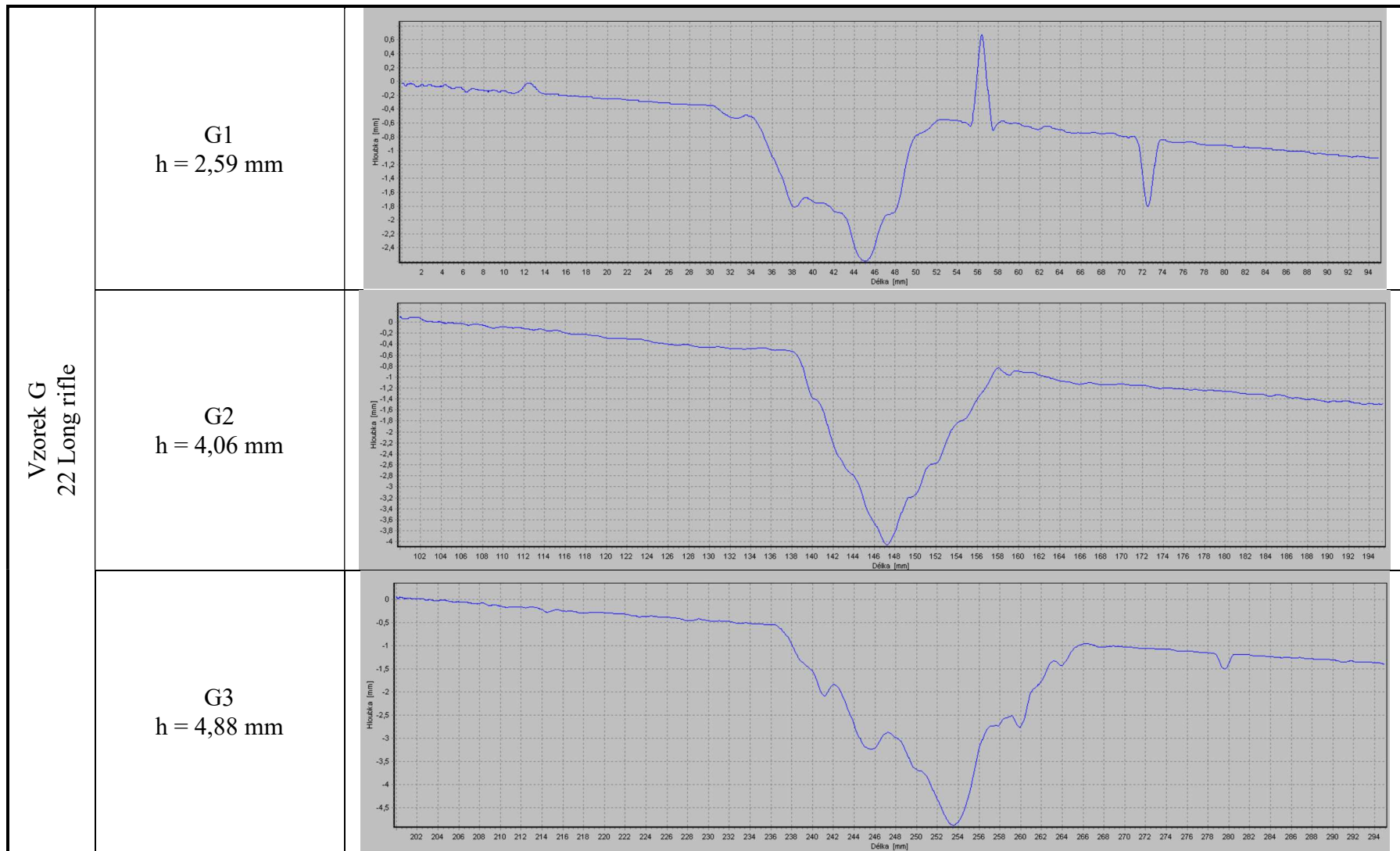
* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky

Vzorek E 44 Remington magnum	E1 $h = 11,35 \text{ mm}$	
	E2 $h = 9,86 \text{ mm}$	
	E3 $h = - \text{ mm}$	

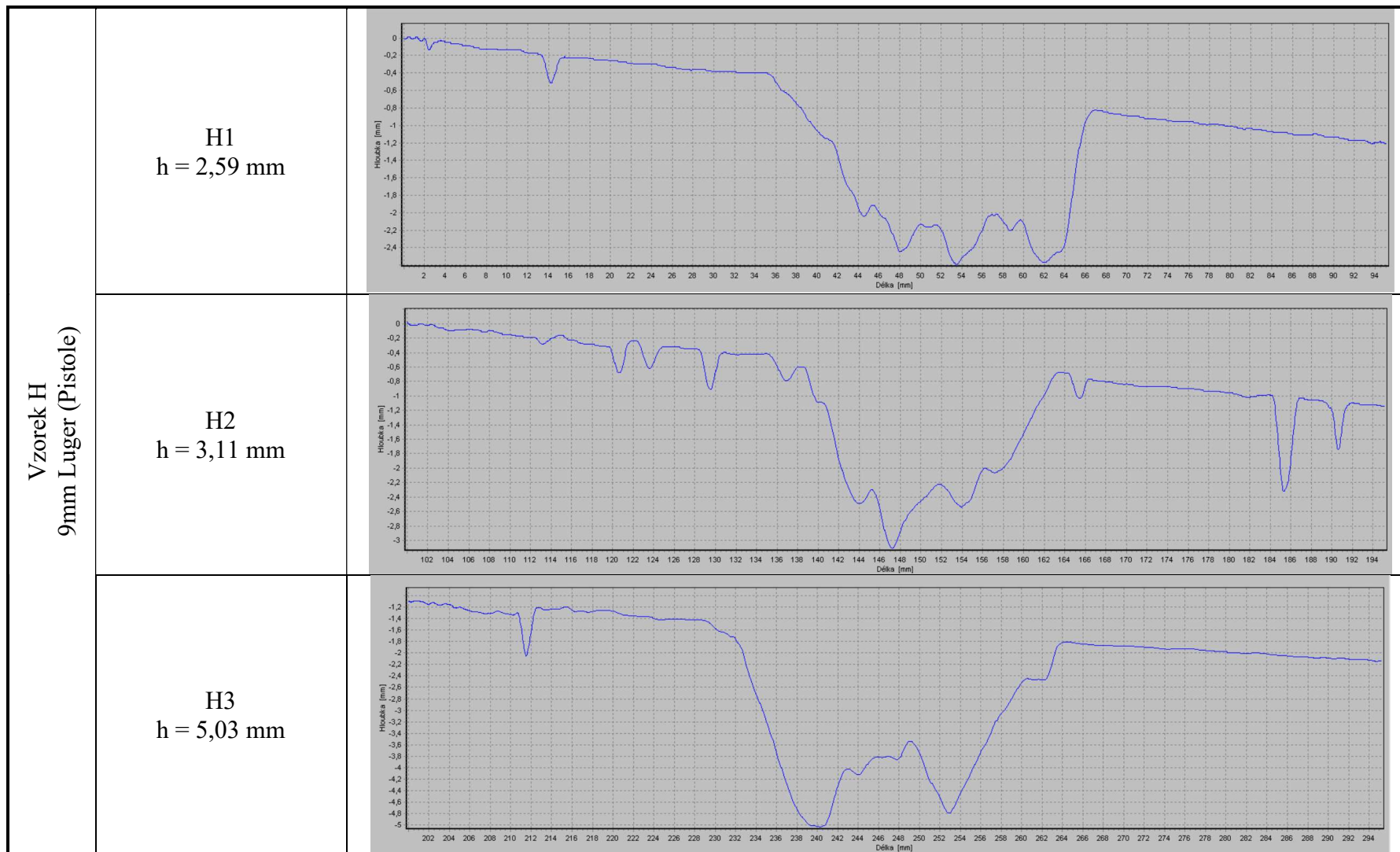
* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



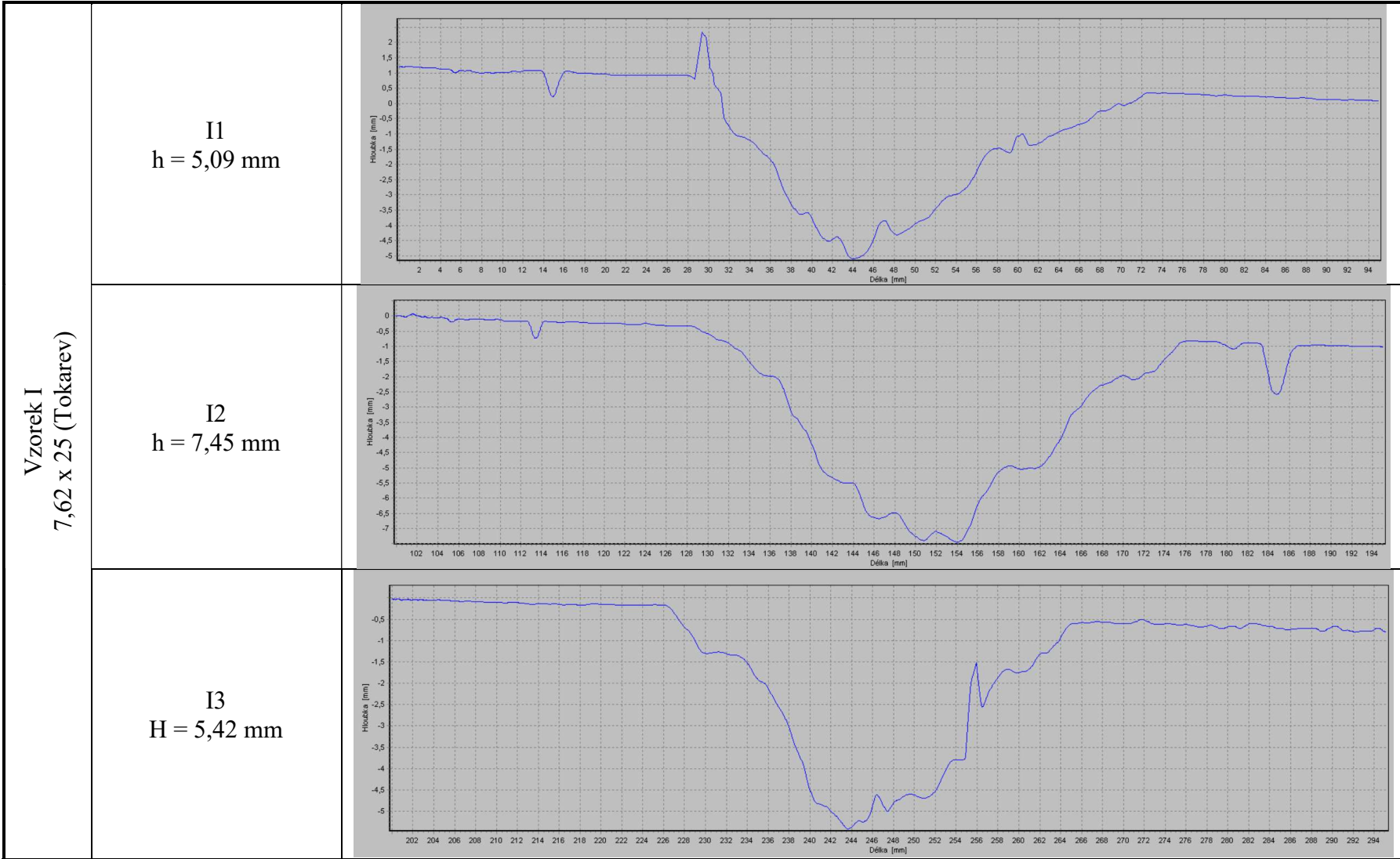
* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky



* Mimořádné čáry vzhůru představují drátky

8. Literatura

- [1] **M. Tipka**, „Složení, návrh a příprava vysokohodnotného a ultravysokohodnotného betonu,“ 2011. [Online]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_priprava_HSC_a_UHSC.pdf. [Citace 12. Květen 2021].
- [2] **P.-C. Aitcin**, Vysokohodnotný beton, Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005.
- [3] **K. Trtík**, Technologie betonu, Praha: Česká technika, 2009.
- [4] **R. Coufal**, „Lávka z ultra-vysokohodnotného betonu,“ 28. Duben 2016. [Online]. Dostupné z <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/lavka-z-ultra-vysokohodnotneho-betonu> [Citace 12. Květen 2021].
- [5] **Svaz výrobců betonu ČR**, „Pevnost betonu v tlaku - zkouška,“ Sunnysoft s.r.o., [Online]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska> [Citace 26. Duben 2021].
- [6] **Český normalizační institut**, ČSN EN 1522 - Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Požadavky a klasifikace, Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [7] **Zbraně.cz**, „22 Long Rifle,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/22-long-rifle> [Citace 27. Duben 2021].
- [8] **V. Krčma, J. Hýkel a P. Neshyba**, Atlas nábojů do ručních palných zbraní, Praha: Naše vojsko s.r.o., 2016.
- [9] **B. P. Kneubuehl, R. M. Coupland, M. A. Rothschild a M. J. Thali**, Wound Ballistics: Basics and applications, Berlín: Springer, 2001.
- [10] **Zbrantobiasek.cz**, „Malorážka HATSAN Escort standard - cal.22LR,“ [Online]. Dostupné z: <https://zbrantobiasek.cz/zbrane/4177-malorazka-hatsan-escort-standard-cal22lr.html#>. [Citace 27. Duben 2021].

- [11] **Zbraně.cz**, „9 mm Luger,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/9-mm-luger> [Citace 27. Duben 2021].
- [12] **Wikipedie.org**, „CZ 75,“ Wikipedie, [Online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/CZ_75 [Citace 30. Duben 2021].
- [13] **Kentaurzbraně**, „CZ 75 B Ω cal. 9mm Luger,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.kentaurzbrane.cz/cz-75-b--cal--9mm-luger/> [Citace 30. Duben 2021].
- [14] **Zbraně.cz**, „357 Magnum,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/357-magnum> [Citace 28. Duben 2021].
- [15] **E. Průšová, M. Babčaník a J. Melichárek**, Zbraně, Střelivo a jejich ověřování, Praha: Druckvo s.r.o., 2015.
- [16] **TRIGGER; Zbraně.cz**, „Ruger GP100,“ 30 Červenec 2018. [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/galerie/ruger-gp100-trigger-116>. [Citace 12. Květen 2021].
- [17] **Zbraně.cz**, „44 Rem.Mag,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/44-rem-mag> [Citace 28. Duben 2021].
- [18] **Zbraně.cz**, „5,56 NATO,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/5,56-NATO> [Citace 30. Duben 2021].
- [19] **Ministerstvo obrany**, „5,56 mm CZ 805 BREN A1/A2,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.73tankovyprapor.army.cz/fotogalerie/556-mm-cz-805-bren-a1a2> [Dostupné z 30 Duben 2021].
- [20] **Zbraně.cz**, „308 Win,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/308-win> [Citace 12. Květen 2021].
- [21] **Czech ammunition**, „Puška samonabíjecí Luvo LA-110 SASS .308 Win. / 7,62x51 25" černá,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.czechammunition.cz/Puska-samonabijeci-Luvo-LA-110-SASS-308-Win-7-62x51-25-cerna-d1930.htm> [Citace 12 Květen 2021].
- [22] **Střelnice Placy s.r.o.**, „Střelniceplacy,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.placy.cz/>. [Citace 8. Květen 2021].

- [23] **T. Krauthammer**, Modern protective structures, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [24] **P. D. Smith a J. G. Hetherington**, Blast and ballistic loading of structures, New York: Routledge, 1994.
- [25] **R. Sovják, D. Shanbhag, P. Konrad a J. Zatloukal**, „Response of thin UHPFRC targets with various fibre volume,“ Procedia Engineering, Praha, 2017.
- [26] **M. Beppu, S. Kataoka, H. Ichino a H. Musha**, „Failure characteristics of UHPFRC panels subjected to projectile impact,“ Composites Part B, 2020.
- [27] **S. Kravanja a R. Sovjak**, „Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under high-velocity projectile impact. Part I. experiments,“ Acta polytechnica, 2018.
- [28] **F. Zhang, L. Hien Poh a M.-H. Zhang**, „Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliberdeformable projectile impact,“ International Journal of Impact Engineering, 2020.
- [29] **J. Liu, C. Wu, Y. Su, J. Li, R. Shao, G. Chen a Z. Liu**, „Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts,“ Engineering Structures, 2018.