

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Šikmý dopad projektilu na vlákny vyztužený cementový kompozit

2019

Bc. Karel Hurtig

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum

Šikmý dopad projektilu na vlákny vyztužený cementový kompozit

Oblique impact of projectile on fibre-reinforced cementious composite

Diplomová práce

Autor: Bc. Karel Hurtig
Vedoucí práce: doc. Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.
Akademický rok: 2018/2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hurtig Jméno: Karel Osobní číslo: 395686

Zadávající katedra: Experimentální centrum (k210)

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Šikmý dopad projektilu na vlákny vyztužený cementový kompozit

Název diplomové práce anglicky: Oblique impact of projectile on fibre-reinforced cementitious composite

Pokyny pro vypracování:

Prozkoumání současného stavu poznání v oblasti nárazu projektilu z odborné literatury. Zaměření literární rešerše na šikmý dopad projektilu na betony a cementové kompozity. Návrh experimentálního programu pro splnění cílů diplomové práce a výroba vzorků pro experimentální ověření. Provedení experimentů, vyhodnocení a popsání poškození, porovnání s referenčním experimentem. Popis a diskuze výsledků, shrnutí vlastních zkušeností získaných během přípravy a měření poškození, které bylo způsobeno dopadem projektilu. Závěr a souhrnné shrnutí výsledků, popřípadě návrh na další bádání v dané oblasti.

Seznam doporučené literatury:

Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile, International Journal of Impact Engineering, Volume 30, Issue 6, July 2004, Pages 617-637, X. W. Chen, S. C. Fan, Q. M. Li
Numerical simulations of oblique penetration into reinforced concrete targets, Computers & Mathematics with Applications, Volume 61, Issue 8, April 2011, Pages 2168-2171, Yan Liu, Fenglei Huang, Aie Ma
Numerical simulations of oblique-angle penetration by deformable projectiles into concrete targets, International Journal of Impact Engineering, Volume 36, Issue 3, March 2009, Pages 438-446, Yan Liu, Aie Ma, Fenglei Huang

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

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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“.

1.10.2018

Datum převzetí zadání

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

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

Praha, dne 6. 1. 2019

.....

Karel Hurtig

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, rady a vstřícný přístup v průběhu zpracování této práce. Rovněž děkuji Ing. Michalu Márovi a Ing. Janu Zatloukalovi, Ph.D. za pomoc a realizaci nejen experimentální části práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je analýza chování nedeformovatelného projektilu po dopadu na tenkostěnný prvek z vlákniny vyztuženého cementového kompozitu (konkrétně UHPC vyztužený ocelovými vlákny) pod různým dopadovým úhlem a popis porušení tenkostěnného prvku jako odezvy na namáhání tímto dopadem vyvolaném. Proto byl uskutečněn experimentální program, při němž byly desky o rozměrech 300×400 mm a tloušťkou 40 mm ostřelovány projektilem s ocelovým jádrem ráže 7,62×39 mm. Šikmý dopad je realizován v intervalu dopadového úhlu $\beta = 20^\circ$ až $\beta = 60^\circ$, kde jeden krok činí 5° . Pro porovnání vzniklého poškození je měřena hloubka penetrace, rozměry, povrch a objem kráteru, také jsou vytvořeny 3D objekty vzniklých kráterů pro určení změny jejich tvaru v závislosti na dopadovém úhlu. Z analýzy dat je možné vypočítat závislost těchto charakteristik na dopadovém úhlu β a určit vliv úhlu dopadu projektilu na tvar vniklého kráteru. Z experimentu plynou tři základní případy spojené se zvyšováním hodnoty dopadového úhlu - perforace desky, zaražení jádra střely v desce a odražení projektilu od testované desky. Výsledky této práce umožňují prohloubit znalosti v oboru balistické odolnosti cementového kompozitu vyztuženého rozptýlenou výztuží.

Klíčová slova: UHPFRC, šikmý dopad projektilu, dopadový úhel, balistická odolnost, lokální poškození

Abstract

The aim of this diploma thesis is to analyse the behaviour of the non-deformable projectile after impact on thin-walled fibre reinforced cementitious composite element with steel fibres (UHPFRC) under different impact angle and description of the damage, which result from the aforementioned impact. An experimental campaign was carried out in which 300×400 mm plates with a thickness of 40 mm were hit with a 7.62×39 mm steel core projectile. The oblique impact was achieved at the impact angle ranging from 20° to 60° , where one step was 5° . The depth of penetration, the dimensions, the surface and the volume of the crater were measured. The resulting damage was analysed with a 3D scanner in order to determine the detail change in shapes of the craters. From the data analysis, it was possible to observe the dependence of the damage characteristics on the impact angle and to determine the influence of the angle of impact of the projectile on the shape of the crater. The experiment revealed three basic findings associated with the increase of the impact angle: The perforation of the plate, the retention of the core of the projectile in the plate and the rebound of the projectile. The results of this work enable to deepen the knowledge in the field of ballistic resistance of the cementitious composite reinforced by the disperse fibre reinforcement.

Key words: UHPFRC, oblique projectile impact, impact angle, ballistic resistance, local damage

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Motivace.....	10
1.2	Cíl práce	11
1.3	Obsah práce	11
2	Teoretická část	13
2.1	Chování ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu při zatěžování	13
2.1.1	Dynamický faktor nárůstu pevnosti DIF	15
2.2	Mechanismus rozrušování hornin za použití trhaviny	17
2.2.1	Druhy vln napětí	17
2.2.2	Charakter působení výbuchu v horninách	19
2.3	Střelivo	21
2.3.1	Balistický výkon	21
2.3.2	Konstrukce a funkce střel	21
2.3.3	Puškové střelivo s jednotnou střelou	24
2.3.3.1	Náboj 7,62 × 39 mm.....	25
2.3.4	Klasifikace materiálů podle balistické odolnosti.....	27
2.4	Lokální poškození betonového prvku po nárazu projektilu.....	30
2.5	Odolnost ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu vůči dopadu projektilu	33
2.6	Šikmý dopad projektilu	42
2.6.1	Experimentální přístup.....	42
2.6.2	Analytický přístup.....	46
2.6.3	Přístup pomocí numerické simulace	48
3	Praktická část	55
3.1	Materiál a jeho komponenty.....	56
3.2	Výroba vzorků.....	56

3.3	Mechanické vlastnosti	57
3.4	Zkouška balistické odolnosti	58
3.5	Metody vyhodnocení experimentu	60
3.5.1	Hloubka penetrace a profil kráteru	60
3.5.2	Povrch kráteru a jeho celkový tvar	62
3.5.3	Rozměry kráteru	64
3.5.4	Objem kráteru	65
3.6	Výsledky	66
3.6.1	Obecný charakter poškození a chování střely po dopadu na cíl	66
3.6.2	Hloubka penetrace	73
3.6.3	Povrch kráteru	75
3.6.4	Objem čelního kráteru	76
3.6.5	Objem zadního kráteru	77
3.6.6	Rozměry kráteru a jejich poměr	78
3.6.7	Vysokorychlostní záznam dopadu projektilu	80
4	Diskuze	82
4.1	Tvar kráteru	82
4.2	Efektivní tloušťka a změna trajektorie střely	83
4.3	Mechanismus poškození	87
5	Závěr	97
6	Citovaná literatura	99
7	Přílohy	108

1 Úvod

1.1 Motivace

Tématem účinku dopadu projektilu na betonovou konstrukci se věda zabývá téměř celé století. Počátky jsou zakořeněny již v popisu chování dopadu projektilu na opevnění z pytlů naplněné pískem. Poté, co se beton hojně využíval, coby materiál používaný pro konstrukci opevnění, bylo zapotřebí tyto účinky zdokumentovat jak pro účel zlepšení balistické ochrany konstrukce, tak naopak pro nastavení parametrů střely pro maximalizaci ničivého potenciálu.

Do nedávna probíhal výzkum dopadu projektilu na konstrukce z betonu běžných pevností (~ 40 MPa) a na betony vyztužené betonářskou výztuží. S vývojem nových materiálů na bázi cementu, které vynikají svými vysokými pevnostmi (~ 150 MPa) a duktilními vlastnostmi při použití rozptýlené výztuže, přicházejí nové příležitosti. Kombinace těchto vlastností dovoluje produkovat tenkostěnné konstrukce, které jsou schopny absorbovat veliké množství energie, vzniklé při dopadu projektilu.

Velké množství prací se v minulosti i současnosti zabývá tzv. normálním dopadem, což je kolmý dopad projektilu na cíl. Bylo také popsáno několik typů poškození, které je s tímto tématem spojeno. V dnešní době se dává přednost právě cementovým kompozitům, které jsou porovnávány s betony běžných pevností na základě balistické odolnosti, popisovanou parametry poškození, jako je hloubka penetrace, velikost kráteru apod.

Jelikož v reálném světě dojde k tomuto ideálnímu dopadu střely na cíl jen zřídka, je nutné se zabývat chováním materiálu při dopadu střely převážně pod různým úhlem. Již za druhé světové války vznikl experimentální program, při němž byla testována konstrukce z běžného betonu odstřelováním 38 mm projektilem, a byly popsány základní parametry poškození při tomto typu dopadu. V dnešní době není ale toto téma nikterak rozebíráno. Proto je nutné, v kombinaci s novými cementovými kompozity, poznání v této oblasti vědy rozšířit.

1.2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je navržení a provedení experimentálního programu, který by měl po svém vyhodnocení přinést potřebná data k řešení problematiky nárazu projektilu na cementový kompozit vyztužený rozptýlenou ocelovou výztuží, pod různým úhlem dopadu. Testovaným materiálem bude ultra-vysokohodnotný beton vyztužený ocelovými vlákny s vhodně zvolenou tloušťkou zkušebních vzorků. Tloušťka vzorků by měla být taková, při které dojde k perforaci cíle při kolmém dopadu.

Z výsledků by měla být zřejmá závislost mezi úhlem dopadu a charakteristikami, které popisují poškození tímto dopadem způsobené. S rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje efektivní tloušťka cíle, a tudíž by se měla úroveň poškození snižovat. Práce si klade za cíl pochopit a popsat proces vzniklého poškození. Očekává se také, že dojde k odrazu střely od daného cíle, pokud bude úhel dopadu dostatečně velký.

1.3 Obsah práce

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních bloků – část teoretickou a experimentální. Teoretická část si klade za úkol popsat dosavadní znalost problematiky dopadu projektilu na betonový cíl, respektive na novodobý kompozitní materiál na bázi cementu.

Nejprve bude stručně popsán samotný kompozitní materiál a jeho chování při zatěžování. Zatížení od dopadu projektilu je charakteristické vysokou rychlostí přetvoření, a jak je známo, tato rychlost má vliv na mechanické vlastnosti zatěžovaného vzorku či konstrukce. S pomocí vědního oboru zabývajícím se rozrušováním hornin pomocí výbušnin bude popsán mechanismus vzniku a následné šíření napěťových vln spolu s jejich charakteristikami a deformačním potenciálem. Tento mechanismus poškození hornin, jak se ukáže, je téměř totožný s tím, který se vyskytuje při nárazu projektilu na betonový prvek.

Prostor zde dostane také téma samotných střel, jejich konstrukci a balistickému výkonu. Zvláště se práce bude věnovat puškovému náboji typu 7,62 × 39, který bude hrát roli v experimentální části. Zmínka padne také na vyhodnocení balistické odolnosti materiálů k tomu určených. Probrány budou normy české, evropské i zahraniční, podle nichž se balistická odolnost hodnotí, a materiály zatřídí do příslušných tříd.

Po popisu střel následuje popis procesu poškození betonového cíle těmito střelami způsobené. Zdokumentováno bude několik charakteristických úkazů, které se po dopadu střely na betonový cíl téměř vždy objevují.

Značná část teoretické části se věnuje pracím českých i zahraničních autorů, kteří se tématem balistické odolnosti cementových kompozitů zabývají. Probrané bude téma jak ideálního - kolmého dopadu, tak i dopadu pod úhlem. Shrnuty jsou zde poznatky z experimentálních výzkumů, z analytických předpovědí chování materiálu s využitím různých teorií a z numerických simulací daného problému.

Experimentální část nabídne náhled do výroby testovaných vzorků a popíše mechanické vlastnosti cementového kompozitu, z něhož budou vzorky vyrobeny. Dále bude popsán samotný experiment dopadu projektilu s následným vyhodnocením všech měřených charakteristik poškození. Vyhodnocována bude hloubka penetrace vzorku projektilem, povrch kráteru v rovině dopadové plochy testovaného vzorku a celkový povrch stěny vzniklého kráteru, dále budou vyhodnocovány rozměry kráteru a jeho objem.

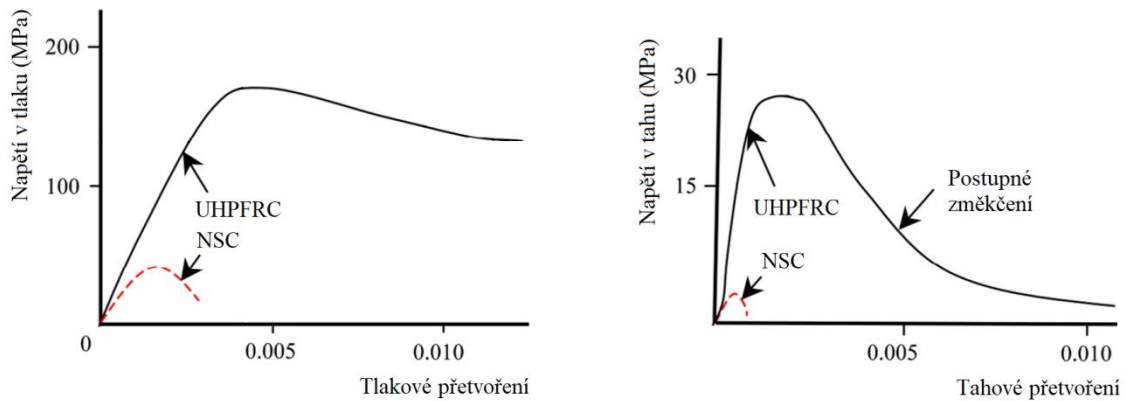
Nakonec budou výsledky interpretovány a vloženy do kontextu vyšetřovaného problému a proběhne diskuze s následným závěrem. Vše bude doprovázeno grafickým materiálem pro lepší představu o dané problematice.

2 Teoretická část

Tato část diplomové práce shrnuje poznatky o vysokohodnotném materiálu na bázi cementu a jeho chování při zatěžování. Dále je zde popsán princip rozrušování hornin trhavinou, jelikož mechanismus rozrušení je analogií s přetvořením materiálu po dopadu střely. Je zde také popsáno samotné střelivo, kde je detailně popsán náboj 7,62×39 mm, který bude součástí praktické části diplomové práce. S nárazem projektilu souvisí vzniklé poškození, které je v této části také popsáno. Velká část teoretické části se věnuje dosavadními poznatky ze samotného dopadu projektilu na betonový cíl. Zde je práce rozdělena na poznatky o kolmém dopadu střely a dopad střely pod úhlem. V obou případech jsou popsány experimentální programy testování balistické odolnosti jak běžných betonů, tak i vysokohodnotných cementových kompozitů. To je doplněno o analytické modely a numerické simulace.

2.1 Chování ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu při zatěžování

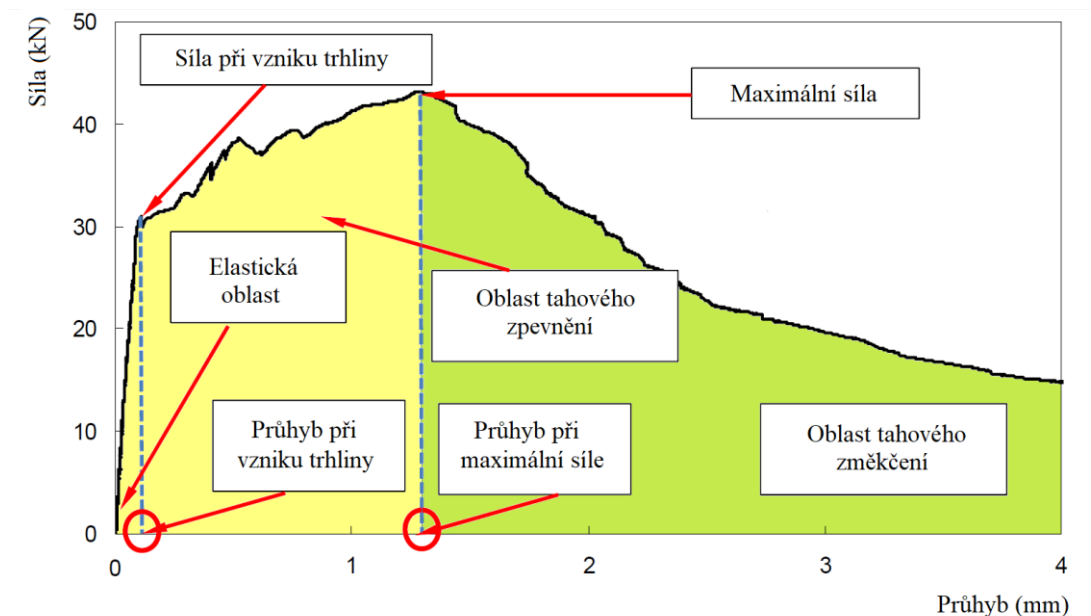
Ultra-vysokohodnotný cementový kompozit, resp. ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) je relativně nový materiál, který oproti běžným betonům vyniká mnohem vyššími pevnostmi jak v tlaku tak převážně v tahu. Jeho předností je také jeho dobrá odolnost vůči zmrazovacím cyklům, průniku chloridů, obrusu a karbonataci. Těchto vlastností je docíleno převážně díky použití malého množství záměsové vody, tudíž mnohem větší hutnosti a kompaktnosti materiálu než u běžných betonů. To je umožněno díky plastifikačním přísadám, jejichž účelem je právě redukovat záměsovou vodu při zachování dobré zpracovatelnosti čerstvé směsi. Dále je také užíváno pouze jemných frakcí kameniva, doplněných o další jemné podíly jako je křemičitá moučka a mikrosilika. [1] Samotný UHPC je sice velmi pevný ale zároveň velice křehký materiál. Pro zvýšení duktility se proto přidává např. ocelová nebo polymerní rozptýlená výztuž. [2] Takto vlákný vyztužený kompozit se označuje jako UHPFRC. Na obr. 1 je na schematických grafech zobrazeno porovnání mechanických vlastností běžného (NSC) a vlákný vyztuženého ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu (UHPFRC) při zatížení v tlaku, resp. v tahu.



Obrázek 1: Mechanické vlastnosti běžného betonu (NSC) a ultra-vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny (UHPFRC) při zatížení tlakem, resp. tahem [3]

Jak je patrné na obr. 2, kde je zaznamenána zkouška UHPFRC ve 4-bodém ohybu, tento materiál má vysokou schopnost absorpce energie. Žlutě je vyznačena oblast energie absorbované až do okamžiku dosažení maximální hodnoty síly při zatěžování. Plocha vyznačená zeleně je potom charakteristika nazývaná jako lomová energie, což se dá chápat jako odpor materiálu proti šíření trhliny.

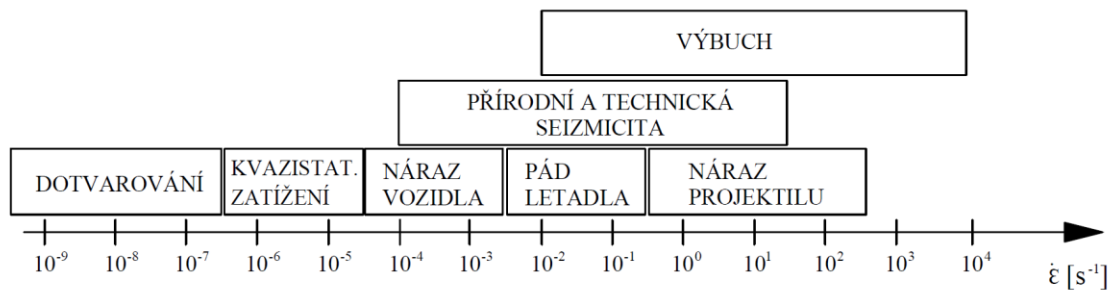
Materiál s takovými vlastnostmi je předurčen k aplikacím na místech, kde může dojít k uvolnění velkého množství energie. To je případ různých rázových zatížení jako např. náraz vozidla, deflagrace hořlavých chemikálií, detonace výbušnin a náraz projektilu. [3]



Obrázek 2: Hlavní parametry UHPFRC při 4-bodém zatěžování [4]

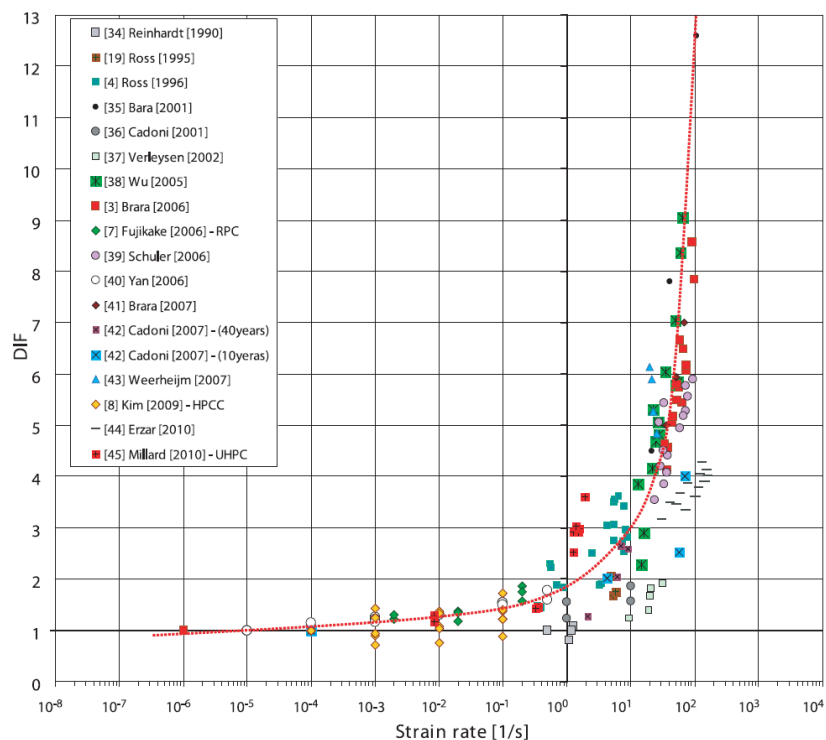
2.1.1 Dynamický faktor nárůstu pevnosti DIF

Dnes je dobře známo a akceptováno, že dynamické chování betonu a dalších materiálů jemu podobných, je závislé na rychlosti přetvoření. Pro představu v jakých rychlostech přetvoření se pohybují různé typy zatížení, je na obr. 3 na vodorovné ose vyznačena rychlost přetvoření a k ní schematicky doplněné známé druhy zatížení, od dotvarování až po výbuch. V porovnání se statickým chováním dochází se vzrůstající hodnotou rychlosti přetvoření k nárůstu pevnosti, deformační kapacity a lomové energie. Kvantitativně lze tento nárůst vyjádřit pomocí dynamického faktoru nárůstu pevnosti (anglicky dynamic increase factor) se zkratkou DIF. [5]



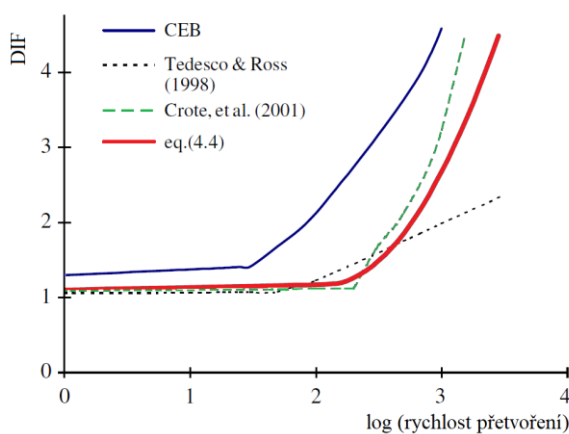
Obrázek 3: Oblasti zatížení dle rychlosti přetvoření [5]

DIF je poměr dynamické a statické pevnosti betonu [6] a je v grafech prezentován v závislosti na rychlosti přetvoření, jak je vidět na obr. 4, kde jsou nashromážděny data z několika prací, zabývajících se dynamickým faktorem nárůstu pevnosti při zatížení tahem. Velikost DIF se u zatížení tahem a tlakem liší. Do hodnoty přetvoření 10^{-1} s^{-1} se DIF v tahu a tlaku výrazně neliší, poté nastává výrazný nárůst u DIF při namáhání tahem. [7]



Obrázek 4: DIF v závislosti na rychlosti přetvoření u zatížení tahem [7]

Existuje řada empirických metod pro výpočet dynamického faktoru nárůstu pevnosti. Pro příklad je to řešení dle CEB [8], Tedesco a Ross [9], Grote a kol. [10] a Li, Reid, Wen a Telford [6]. Poslední jmenovaní v jejich práci [6] modifikovali metodu SHPB (Split-Hopkinson pressure bar). Porovnání těchto čtyř metod, které se věnují výpočtu DIF za podmínek jednoosé napjatosti v tlaku, je na obr. 5. Je patrné, že metoda dle [8] se od ostatních třech výrazně liší. Od hodnoty přetvoření přibližně $2,5 \cdot 10^1 \text{ s}^{-1}$ se od sebe výrazně vzdalují předpoklady od autorů [9], [6] a [10]. Nicméně z těchto metod si můžeme udělat obrázek o tom, jak rychlost přetvoření ovlivňuje dynamický faktor nárůstu pevnosti, tzn. pevnost materiálu v tlaku samotnou.



Obrázek 5: Porovnání empirických vztahů pro výpočet DIF [6]

2.2 Mechanismus rozrušování hornin za použití trhaviny

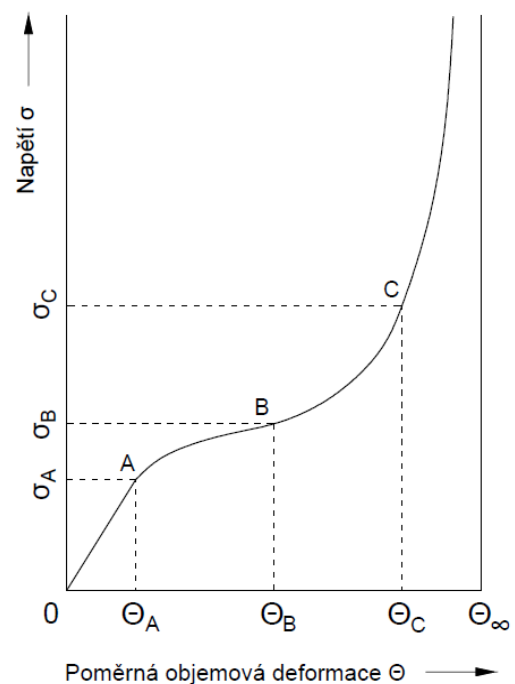
Ačkoliv se tato diplomová práce nezabývá výbuchem ani horninami, tato kapitola popisuje působení výbuchu v horninách. Mechanismus vzniku napěťových vln, jejich rozdělení a charakteristiky jsou v této vědní oblasti dobře popsány a vysvětleny. Je zde také patrna analogie porušení materiálu po odpálení horniny s dopadem projektilu a jeho účinky na betonovou konstrukci, které jsou předmětem této práce.

2.2.1 Druhy vln napětí

Vlnu napětí lze pro libovolné prostředí definovat jako oblast, která je v přechodném pohybu a stavu napětí. Čelem vlny je potom hranice mezi prostředím ve stavu napětí a ostatním prostředím. Napětí je vždy provázeno deformací, proto vlny napětí jsou i vlnami deformace. [11]

Obecně se napětí rozděluje na normálná (tah, tlak) a tangenciální (smyk). Stejně tak se z hlediska druhu napětí mohou rozdělit i vlny napětí na normálové a tangenciální. Vlny normálové lze dále rozdělit na vlny tlakové a tahové. Normálná napětí způsobují změnu tvaru prostoru a smykové napětí změnu jeho tvaru. Zásadním rozdílem mezi vlnou normálovou a tangenciální je pohyb částic hmoty. Ve vlně normálové se částice hmoty pohybují ve směru šíření vlny, naopak ve vlně tangenciální se pohybují ve směru kolmo na směr šíření. [11]

Charakter vln napětí, jejich chování a modifikace v prostředí, závisí na vlastnostech prostředí, ve kterém se vlna napětí šíří. Z toho důvodu je nutné znát obecnou charakteristiku prostředí, kterou je závislost $\sigma(\Theta)$, kde σ je napětí při všestranném objemovém stlačení a Θ je poměrná objemová deformace. Tato závislost má obecně pro tuhá tělesa tvar vyznačený na obr. 6. [11]



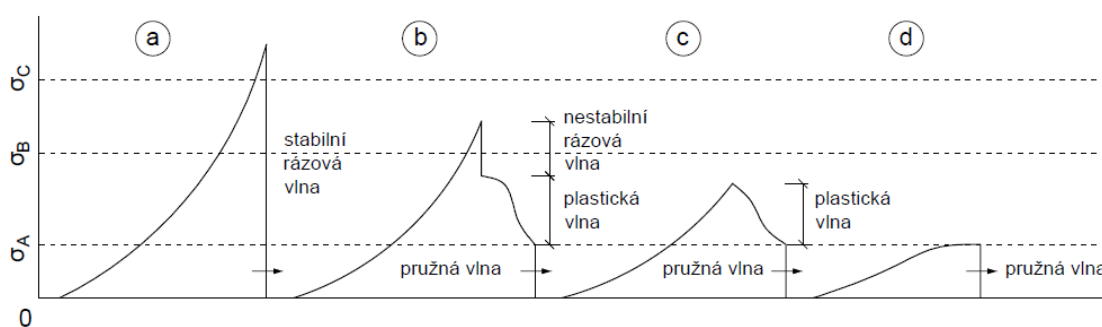
Obrázek 6: Závislost tlakových napětí na poměrné objemové deformaci pro tuhá tělesa [11]

V tuhých tělesech se v oboru tlaků $0 \leq p \leq \sigma_A$ mění napětí σ s deformací Θ lineárně. Tento obor se nazývá pružným a z hlediska fyzikálního je charakterizován neměnnou strukturou materiálu, který přenáší smyková napětí. Rychlost šíření všech tlaků je v tomto oboru stejná a rovná se rychlosti zvuku. Profil tlakové vlny se během šíření nemění. V tomto oboru se může šířit i vlna rázová. Pokud je její profil vnějším zásahem změněn, šíří se dále jako vlna se změněným profilem, která se nemůže opět zformovat v rázovou vlnu. Dále se tedy může šířit jen jako nestabilní rázová vlna. [11]

V intervalu $\sigma_A \leq p \leq \sigma_B$ dochází k rozrušování struktury materiálu. Dochází k velkým vzájemným posuvům jeho částic při slabě proměnném tlaku. Materiál se zhušťuje, přestává přenášet smyková napětí a začíná se chovat jako kapalina. Po dovršení maximálního tlaku na tomto intervalu (bod B), jsou smykové vazby zrušeny a z materiálu se stává kapalina (prach) reagující jen tlakovými napětími. V tomto oboru se větší tlaky šíří menšími rychlostmi, než tlaky menší. Jde zde o plastický obor a plastickou vlnu napětí. [11]

Pro tlak v mezích $\sigma_B \leq p \leq \sigma_C$ se prostředí chová jako kapalina a nepřenáší proto smyková napětí. Rychlost šíření vln je v tomto oboru menší než rychlost zvuku, jak je tomu v oboru $0 \leq p \leq \sigma_A$. Větší tlaky se šíří rychleji než tlaky menší. Jde tedy o obor stabilních rázových vln podzvukových. [11]

V oboru tlaků $p > \sigma_C$ se opět větší tlaky šíří rychleji než ty menší, přičemž rychlost šíření je větší než rychlost zvuku. Je to tedy obor stabilních rázových vln nadzvukových. [11]



Obrázek 7: Změna profilu napěťové vlny v pevném tělese se vzdáleností [11]

Z hlediska výše objasněného mechanismu vln napětí je na obr. 7 vyznačena postupná změna profilu napěťové vlny v závislosti na vzdálenosti od impaktu. V místě vzniku napětí, kde $p > \sigma_C$, má vlna tvar vyznačený na obr. 7a. Maximální tlak napěťové vlny klesá se vzdáleností a v určitém intervalu vzdáleností $R_C \leq R \leq R_B$ leží v oboru tlaků $\sigma_B \leq p \leq \sigma_C$ podzvukové stabilní rázové vlny. Zde se maximální tlaky opozdí

a pružná vlna předbíhá, jak je vyznačeno na obr. 7b. Maximální tlak dále klesá a v intervalu $R_B \leq R \leq R_A$ leží v plastickém oboru $\sigma_A \leq p \leq \sigma_B$. Zde se maximální tlaky šíří nejpomaleji, opožďují se a vlna má tvar vyznačený na obr. 7c. S dalším poklesem maximálního tlaku ve vzdálenosti $R_A \leq R < \infty$ se tlak dostává do intervalu $0 < p \leq \sigma_A$, kde se všechny tlaky šíří stejnou rychlostí a profil vlny se dále nemění. (obr. 7d) [11]

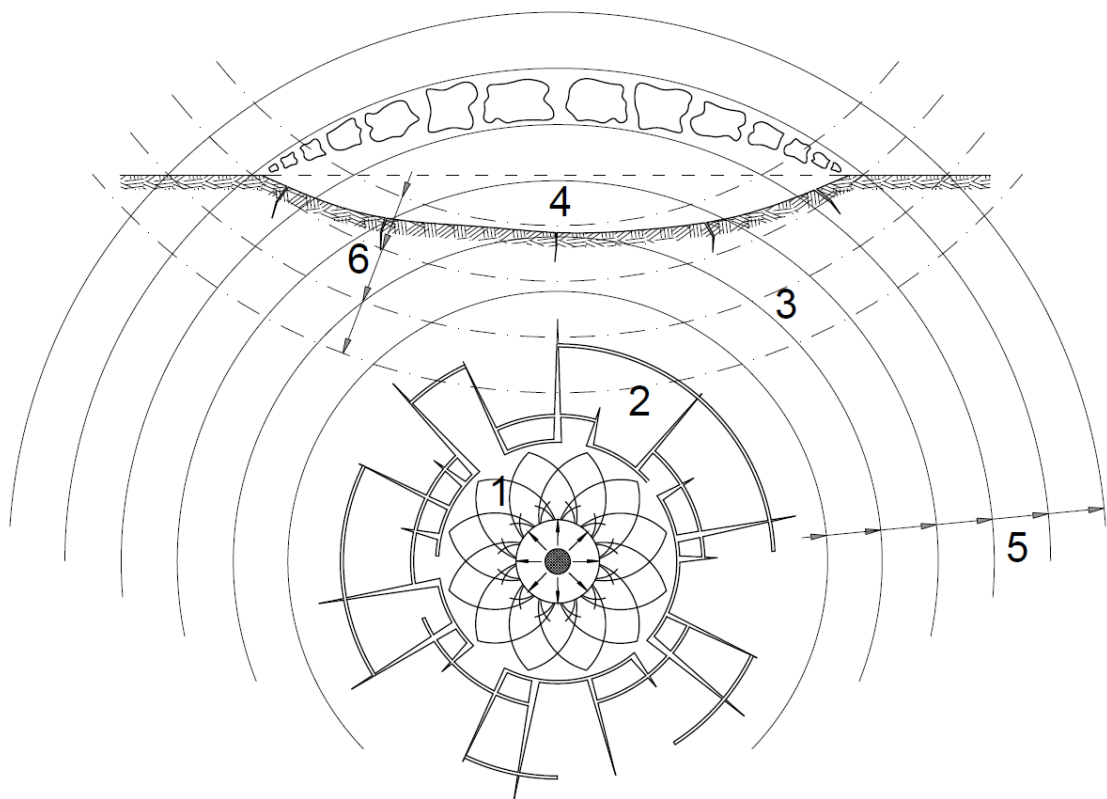
2.2.2 Charakter působení výbuchu v horninách

Po roznětu rozbušky se všemi směry začne šířit detonační vlna stejnou rychlostí. Přetlak začne působit na horninu ve všech bodech kontaktu s náloží současně. Tlak výbuchových plynů je bezprostředně po detonaci mnohem větší než dosahuje pevnost horniny a proto se hornina přiléhající k povrchu nálože rozdrťí. Vytváří se tak zóna velmi silně deformované horniny. V homogenním prostředí se zde vytváří soustava kluzných ploch, kde tečny k těmto plochám svírají úhel 45° s přímkami vycházejícími ze středu nálože. Hornina je v této zóně silně stlačována a začne se pohybovat směrem od nálože. Tak se vytváří rázová vlna, šířící se nadzvukovou rychlostí. [11; 12]

S rostoucí vzdáleností čela rázové vlny od nálože se její energie rozptýluje stále na větší a větší objem hmoty a přetlak prudce klesá. v určité vzdálenosti od nálože je přetlak menší než mez pevnosti horniny a charakter deformace se mění. Drcení, či kluzné plochy se ztrácejí a struktura horniny zůstává zachována. Následkem značného přemístění částic se zvětšují poloměry kulových ploch a u pevných hornin vznikají velké tahová napětí v tangenciálním směru a vytvářejí se radiální trhliny. S poklesem přetlaku při zvětšování poloměru čela tlakové vlny klesají i hodnoty tahových tangenciálních napětí a při určité velikosti poloměru budou tato napětí menší než mez pevnosti horniny v tahu a hornina se přestane trhat. Pohyb částic horniny ve směru od nálože pokračuje setrvačností ještě nějakou dobu po odtržení tlakové vlny od výbuchové komory, čímž vzniká podtlak ve výbuchových plynech a za vlnou tlakovou se šíří vlna zředění (tahová). Stlačená hornina se začne vlivem nahromaděné potenciální energie odpružovat směrem k náloži a v jejím okolí se může objevit celá řada tangenciálních trhlin, způsobených setrvačnými tahovými napětími v radiálním směru. V každé oblasti mezi sousedními radiálními trhlínami se u pevných hornin objevuje vlastní soustava tangenciálních trhlin, nezávisle na ostatních oblastech. [11; 12]

V okolí výbuchové komory je u pevných křehkých hornin zóna drcení (obr. 8-1), dále zóna trhlin (obr. 8-2) a pak zóna pružných deformací (obr. 8-3). U soudržných zemin je nejdříve zóna drcení, pak zóna pružnoplastických deformací a nejdále od nálože zóna pružných deformací. V zóně pružných deformací se šíří pružné vlny, které mohou rozrušit horninu už jen při dopadu na volný povrch jako následek odražení od volného povrchu za vzniku vlny tahové (obr. 8-4). [11; 12]

Jakmile čelo tlakové vlny dosáhne volného povrchu, vlna se odrazí jako vlna tahová (zředění), šířící se od povrchu směrem dolů. Působením vlny zředění, v níž se částice horniny pohybují proti směru jejího šíření, a vlny tlakové, vzniká kopulovitě vzedmutí horniny nad náloží a tahová a smyková napětí v oblasti při povrchu. [11; 12]



Obrázek 8: Schéma rozrušení horniny při výbuchu nálože v blízkosti volného povrchu [11]

- 1 – zóna drcení;
- 2 – zóna trhlin;
- 3 – zóna trvalých a pružných deformací;
- 4 – odprýskání horniny při volném povrchu vlivem odražené vlny;
- 5 – postupné polohy čela tlakové vlny;
- 6 – postupné polohy čela odražené tahové vlny

2.3 Střelivo

2.3.1 Balistický výkon

Balistický výkon je charakteristika střeliva pro palnou zbraň nebo celého hlavnového zbraňového systému vyjádřená velikostí úst'ové, resp. počáteční kinetické energie střely. U ručních zbraní se pohybuje balistický výkon ve stovkách až tisících Joule. Úroveň balistického výkonu ovlivňuje dostřel zbraňového systému, účinky střely v cíli a chování zbraně při výstřelu jako je zpětný ráz, hluk nebo záblesk. [13]

Za minimální hodnotu dopadové energie střely pro vyrazení živého cíle se považuje hodnota 80 - 100 J. Jelikož se ale vychází z účinku puškových střel ráže přibližně 8 mm o hmotnosti okolo 10 gramů, je toto kritérium použitelné pouze pro projektily s podobnými charakteristikami. Pro hodnocení účinků pistolových a revolverových střel, či puškových střel výrazně menších ráží, které jsou vystřelované většími rychlostmi, není tato hodnota relevantní. [13]

Podle balistického výkonu se střelivo dělí do tří kategorií. Jde o střelivo nízkého, středního a vysokého balistického výkonu. Pistolové a revolverové náboje se řadí ke střelivu nízkého balistického výkonu, jelikož kinetická energie střely na ústí hlavně dosahuje hodnot v řádu stovek Joule a obvykle nepřevyšuje 600 J. Puškové střelivo se řadí ke střelivu středního a vysokého balistického výkonu. Pro střední balistický výkon se udává hodnota úst'ové energie v rozmezí od 600 do 2000 J, pro vysoký balistický výkon energie nad 2000 J. [13]

2.3.2 Konstrukce a funkce střel

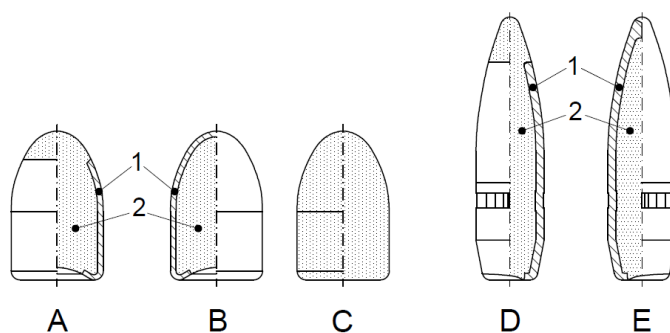
Střela neboli projektil je část náboje určená k dosažení požadovaného účinku v cíli na požadovanou vzdálenost. Pro naplnění tohoto účelu musí být střela urychlena v hlavní na požadovanou rychlost a za letu musí být co nejméně ovlivněna okolní atmosférou. Požadavky koncové balistiky tedy úzce souvisí s požadavky vnitřní a přechodové balistiky. [13]

Pro stabilizaci střely za letu je nutný její pohyb kolem podélné osy. Tento pohyb je zajištěn zařízením měkké obvodové části střely do drážek vývrtu při vnitrobalistickém ději. Projektil uvedený do rotace se chová jako gyroskop, sleduje tedy svou podélnou osou přibližně tečnu ke dráze a letí špičkou vpřed. [13]

Základní konstrukční charakteristikou střely je její ráže. Ráže střely je smluvní údaj přibližně odpovídající maximálnímu vnějšímu průměru vodících částí střely. Její hodnota je u civilního střeliva stanovena mezinárodně pro každý náboj. Obvykle se udává v milimetrech, u malorážových střel pro ruční zbraně i v setinách anglického palce. Ráže střel určených pro hlavnové zbraně se pohybuje od několika milimetrů do několika stovek milimetrů. [13]

Vnější tvar střely je dán zejména podle aerodynamických kritérií vnější balistiky, vztažených k letové rychlosti střely. Pistolové a revolverové střely jsou obvykle vystřelovány podzvukovými rychlostmi na cíle v malé vzdálenosti a jejich počáteční rychlost nepřevyšuje u nábojů malého a středního výkonu $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jejich tvar je proto méně aerodynamický, mají délku 1 až 2 ráže, špičku mají zaoblenou a zadní část střely válcovou (tzv. monoogivální střely). Naopak puškové střely jsou vystřelovány nadzvukovými rychlostmi a střelba je s nimi vedena na střední a velké vzdálenosti. Tyto střely mají aerodynamický tvar, délku 4 až 5 ráží, špičku mají ostřejší a zadní část střely mohou mít válcovou nebo kuželovitou (tzv. biogivální střely). [13]

Vnitřní uspořádání střely (obr. 9) včetně volby vhodných materiálů pro její výrobu vychází zejména z kritérií vnitřní a koncové balistiky. Převážná většina střel je tvořena pouze kovovými materiály jako je olovo, ocel a jiné barevné kovy. U většiny střel ručních zbraní je jejich účinek v cíli zajištěn kinetickou dopadovou energií, a proto tyto střely nemají žádnou účinnou náplň. Podle vnitřního uspořádání a celkového konstrukčního řešení se střely dělí na nehomogenní a homogenní. [13]



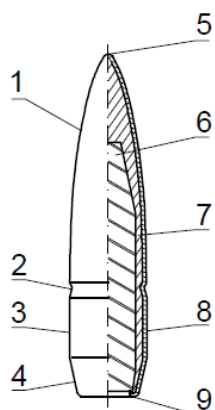
Obrázek 9: Vnitřní uspořádání střel a jejich zkrácené označení [13]

- | | |
|--|---------------------------|
| A – poloplášťová střela (SP); | 1 – plášť střely; |
| B – celoplášťová střela (FMJ); | 2 – olověná výplň (jádro) |
| C – homogenní neplášťovaná střela (SP-FN); | |
| D – poloplášťová střela (PSP); | |
| E – celoplášťová střela | |

Nehomogenní střely jsou sestavou více konstrukčních částí. Jednou z nich je plášť, pokrývající vnější povrch střely. Takové střely se nazývají plášťové nebo plášťované. Podle rozsahu pokrytí vnějšího povrchu střely se tyto střely dále rozlišují na celoplášťové a poloplášťové. Homogenní střela je tvořena jedním kusem a je vždy neplášťovaná. [13]

Celoplášťové střely (anglicky full metal jacket – zkratka FMJ) mají celý svůj povrch pokryt tenkostěnným kovovým pláštěm o tloušťce několika desetin milimetru. Plášť je vyroben z tombaku, což je slitina mědi a zinku zpravidla v poměru 90/10 nebo z oceli plátované tombakem. [13]

U celoplášťové střely je možné rozlišovat střely s tvrdým a měkkým jádrem. Tvrdá jádra jsou vyrobena z legované oceli a kalena na vysokou tvrdost. Střely s tvrdým jádrem (obr. 10) mají v přední části hrot (může být i tupý), který usnadňuje pronikání materiálem, jelikož jejich základním účelem je penetrace. Plášť střely se po nárazu na překážku roztrhne a jádro pokračuje v pronikání cílu. Měkká jádra se vyrábí z běžné oceli, která se primárně používá pro úsporu olova při výrobě střel. [14] Tyto střely mají zvýšený průbojný účinek oproti střelám s olověným jádrem, ale nemohou se srovnávat se střelami s tvrdým ocelovým jádrem. [15] U střel s ocelovým jádrem se vkládá mezi jádro a plášť tenká vrstva olova – tzv. košilka, která umožní zaříznutí vodící části střely do drážek vývrtnu. [13]



- 1 – přední ogivál;
- 2 – drážka;
- 3 – vodící část;
- 4 – zadní ogivál;
- 5 – špička;
- 6 – ocelové jádro;
- 7 – olověná košilka;
- 8 – plášť;
- 9 – lem pláště

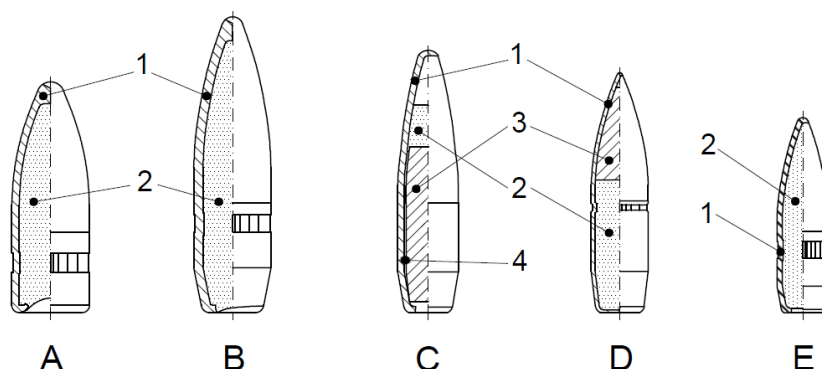
Obrázek 10: Pušková průbojná jádrová střela[13]

Poloplášťové střely jsou vyrobeny obvykle z olova, které tvoří jádro, kryté pláštěm pouze v zadní části. Pláštěm nekrytá olověná špička se při dopadu i na méně odolnou překážku deformuje a poloplášťová střela má proto lepší schopnost předat svou energii zasaženému cíli. To se projeví ve větší ranivosti a menší průbojnosti střely. U poloplášťových střel neexistuje varianta s ocelovým jádrem. [13]

2.3.3 Puškové střelivo s jednotnou střelou

Puškové náboje s jednotnou střelou jsou určeny ke střelbě z loveckých a sportovních opakovacích i samonabíjecích kulovnic, dále z vojenských automatických zbraní a také z vojenských a odstřelovacích pušek. [13]

Pro služební puškové střelivo (obr. 11), tzn. policejní a vojenské puškové náboje, je charakteristická obvykle celoplášťová střela s olověným, měkkým ocelovým nebo tvrdým ocelovým jádrem. Délka střel je 3,5 až 5 ráží a počáteční rychlost nadzvuková. Nábojnice jsou ocelové nebo mosazné, lahvovitého tvaru s drážkou nebo okrajem. [13]



Obrázek 11: Celoplášťové střely pro služební náboje [13]

- | | |
|---|--------------------|
| A – monoogivální malorážová střela; | 1 – plášť střely; |
| B – klasická biogivální malorážová střela; | 2 – olověné jádro; |
| C, D – mikrorážové biogivální střely s ocelovými jádry; | 3 – ocelové jádro; |
| E – klasická mikrorážová biogivální střela | 4 – olověná košile |

K nejrozšířenějším současným vojenským puškovým rážím v celosvětovém měřítku patří:

7,62 × 51 – standard NATO

7,62 × 39

7,62 × 54 R

5,56 × 45 – standard NATO

5,45 × 39,5

12,7 × 99

Standard NATO v ráži 7,62 × 51 s vysokým balistickým výkonem je používán v současné době zejména pro kulometry a odstřelovací pušky. Ekvivalentem bývalého východního bloku je náboj 7,62 × 54 R. Pro automatické pušky jsou určeny mikrorážové náboje (ráže méně než 6 mm) středního balistického výkonu – 5,56 × 45 a 5,45 × 39. Mezi oběma skupinami je tzv. střední náboj 7,62 × 39. [13]

2.3.3.1 Náboj 7,62 × 39 mm

Tento vojenský náboj, původem ze sovětského svazu, byl vyvíjen již za 2. světové války. Byl určen pro samonabíjecí pušku SKS a později pro útočnou pušku AK-47 Kalašnikov a kulometry RPD, RPK A RPKS. Uvádí se, že bylo vyrobeno až sto milionů kusů útočných pušek AK a tomuto počtu odpovídá také počet vyrobených nábojů. Kvůli rozšíření po celém světě byl použit téměř ve všech poválečných konfliktech. Po rozpadu Sovětského svazu a Varšavské smlouvy se přebytek vojenských nábojů prodával na komerčním trhu. [16]



Vlevo: náboj a celoplášťová střela (FMJ)

Vpravo: náboj a poloplášťová střela (SP)

Obrázek 12: Náboj 7,62 × 39 [17] [18]

Nábojnice se vyrábějí z oceli plátované tombakem, dále např. z oceli, postupně mezi tahy fosfátované s konečnou úpravou lakováním, nebo z mosazi. [16] Délka nábojnice je 38,7 mm. [19] Střely mohou být celoplášťové nebo poloplášťové (obr. 12). U celoplášťové střely jsou možné varianty s měkkým ocelovým, olověným nebo tvrdým ocelovým jádrem (obr. 13). Střely s ocelovým jádrem jsou doplněny olověnou košilkou. Hmotnost střel je kolem 8 gramů. Úst'ová rychlost střel se pohybuje v rozmezí přibližně od $690 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $750 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tomu odpovídá kinetická energie od 1904 J do 2250 J. [20] Rychlost střely (a s tím spojená kinetická energie) se vzdáleností od výstřelu klesá, např. ve vzdálenosti 50 m je rychlost přibližně o 5%, ve 100 m o 15 %, ve 200 m o 30 % a ve 300 m o 40 % nižší než původní úst'ová rychlost. [17] Celková délka náboje je 56 mm. [19]



Obrázek 13: Různé druhy nábojů $7,62 \times 39$ [20]

- Zleva: 1., 4. a 5. – FMJ s měkkým olověným jádrem;
 2. – SP s měkkým olověným jádrem;
 3. a 6. – FMJ s měkkým ocelovým jádrem

2.3.4 Klasifikace materiálů podle balistické odolnosti.

Úroveň balistické a protistřepinové ochrany materiálů k tomu určených se posuzuje v rámci norem. Jednou z nich je česká norma vypracovaná českým úřadem pro zkoušení zbraní a střeliva z roku 1996, která byla schválena a zavedena jako ČSN 39 5360. Obsahuje hodnocení balistické odolnosti, protistřepinové ochrany a ochrany proti průpichu. Z hlediska balistiky obsahuje řadu úrovní ochrany proti hrozbám z různých zbraní. (tab. 1) Pro dané třídy balistické odolnosti (TBO) je předepsaná ráže střely, její rychlost a hmotnost. [21]

Tabulka 1: ČSN 39 5360 - Klasifikace a požadavky na testování s pistolemi a puškami [21]

TBO	Ráže	Střela	Rychlost $V_{2.5}$ [m/s]	Hmotnost m [g]
1	.22LR	Pb/O	300 ± 10	2,6
2	9mm Luger	CP/Pbj./O	410 ± 10	8
2 CZ	7,62 × 25	CP/Pbj./O	470 ± 10	5,5
3	.357 Magnum	CP/Pbj./KK	430 ± 10	10,2
3 CZ	9mm Luger	CP/Fej./O	440 ± 10	6,45
4	.44 Magnum	CP/Fej./KK	440 ± 10	15,6
4 CZ	7,62 × 25	CP/Fej./O	550 ± 10	5,5
5	.223 Rem.	CP/Pbj.	920 ± 10	4
5 CZ	7,62 × 39	CP/Fej.	710 ± 10	8
6	7,62 × 51	CP/Pbj.	830 ± 10	9,5
6 CZ	.223 Rem.	CP/Fej.	950 ± 10	3,95
7	7,62 × 51	CP/Fej.	820 ± 10	9,8
7 CZ	7,62 × 54 R	CP/Fej.	860 ± 10	9,75

CP	celoplášť
Fej.	ocelové jádro
Pbj.	olověné jádro
O	ogivál
KK	komolý kužel

Odolnost proti průstřelu hodnotí také evropská norma ČSN EN 1522, která obsahuje požadavky a klasifikaci a ČSN EN 1523, jejíž součástí jsou zkušební metody. Pro zařazení do tříd balistické odolnosti jsou předepsány různé ráže, parametry střely a testovací podmínky. (tab. 2) Základní tabulka obsahuje rozšíření o další používané typy ráží, jako např. 7,62 × 39 (tab. 3). [22]

Tabulka 2: EN 1522 - Klasifikace a požadavky pro testování s pistolemi a puškami [22]

Třída	Typ zbraně	Kalibr	Střela		Testovací podmínky	
			Typ	Hmotnost [g]	Vzdálenost [m]	Rychlost střely [m/s]
FB1	puška	22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10
FB2	pistole	9 mm Luger	FJ ⁽¹⁾ /RN/SC	8,0 ± 0,1	5 ± 0,5	400 ± 10
FB3	pistole	357 Mag.	FJ ⁽¹⁾ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
FB4	pistole	357 Mag.	FJ ⁽¹⁾ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
	pistole	44 Rem. Meg.	FJ ⁽²⁾ /FN/SC	15,6 ± 0,1	5 ± 0,5	440 ± 10
FB5	puška	5,56 × 45	FJ ⁽²⁾ /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
FB6	puška	5,56 × 45	FJ ⁽²⁾ /PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
	puška	7,62 × 51	FJ ⁽¹⁾ /PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10
FB7	puška	7,62 × 51	FJ ⁽²⁾ /PB/HC1	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10
L olovená střela CB střela s kuželovou přední částí FJ celoplašťová střela FN střela s plochou špičkou HC1 tvrdé ocelové jádro, hm. (3,7 ± 0,1) g tvrdost více než 63 HRC PB špičatá střela RN střela s kulovitou špičkou SC měkké jádro (olověné) SCP1 měkké jádro (olověné) s ocelovým hrotem (typ SS109)						

Tabulka 3: Doplnění tabulky pro klasifikaci a požadavky pro testování s pistolemi a puškami [22]

Typ zbraně	Kalibr	Střela		Testovací podmínky	
		Typ	Hmotnost [g]	Vzdálenost [m]	Rychlost střely [m/s]
brokovnice	12/7	SP ⁽⁴⁾ /FS	17,9 ± 0,1	10 ± 0,5	605 ± 30
puška	5,56 × 45	FJ ⁽²⁾ /PB/HC2	3,45 ± 0,1	10 ± 0,5	980 ± 10
puška	8 × 68 S	FJ ⁽¹⁾ /RN/SC	12,7 ± 0,1	10 ± 0,5	880 ± 10
puška	5,56 × 45	FJ ⁽¹⁾ /PB/SC	4,1 ± 0,1	10 ± 0,5	905 ± 10
puška	7,5 × 55	FJ ⁽¹⁾ /PB/SC	11,3 ± 0,1	10 ± 0,5	760 ± 10
puška	7,62 × 39	FJ ⁽¹⁾ /PB/SC	8,0 ± 0,1	10 ± 0,5	700 ± 10
puška	5,45 × 39	FJ ⁽¹⁾ /PB/SCP2	3,45 ± 0,1	10 ± 0,5	910 ± 10
puška	7,62 × 51	FJ ⁽¹⁾ /PB/HC3	8,45 ± 0,1	10 ± 0,5	960 ± 10
puška	7,62 × 51	FJ ⁽²⁾ /PB/HC4	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	870 ± 10
puška	5,56 × 45	FJ ⁽²⁾ /PB/HC5	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	970 ± 10
FJ celoplašťová střela FS celokovová střela (ocel) HC2 tvrdé ocelové jádro, hm. (1,17 ± 0,1) g, tvrdost více než 63 HRC HC3 tvrdé ocelové jádro, hm. (6,0 ± 0,1) g, tvrdost více než 63 HRC HC4 tvrdé ocelové jádro, hm. (4,3 ± 0,04) g, tvrdost více než 63 HRC HC5 tvrdé ocelové jádro, hm. (0,61 ± 0,02) g, tvrdost více než 63 HRC PB špičatá střela RN střela s kulovitou špičkou SC měkké jádro (olověné) SCP2 měkké jádro (olověné) s ocelovým hrotem FJ ⁽¹⁾ celoplašťová střela (ocel) FJ ⁽²⁾ celoplašťová střela (slitina mědi) SP ⁽⁴⁾ spherical ball					

V současnosti je ve světě hojně používaná americká norma NIJ STD 0101.06, podle které se musí řídit všechny bezpečnostní složky při nákupu balistických ochran. Česká a evropská norma je oproti americké komplexnější, jelikož zahrnuje i hojně užívanou ráži $7,62 \times 39$. [21]

Mimo zmíněné normy existuje také norma NATO AEP-55 STANAG 4569 pro určení balistické ochrany u lehkých obrněných vozidel, nebo této normě obdobné VPAM a VSAG. [23]

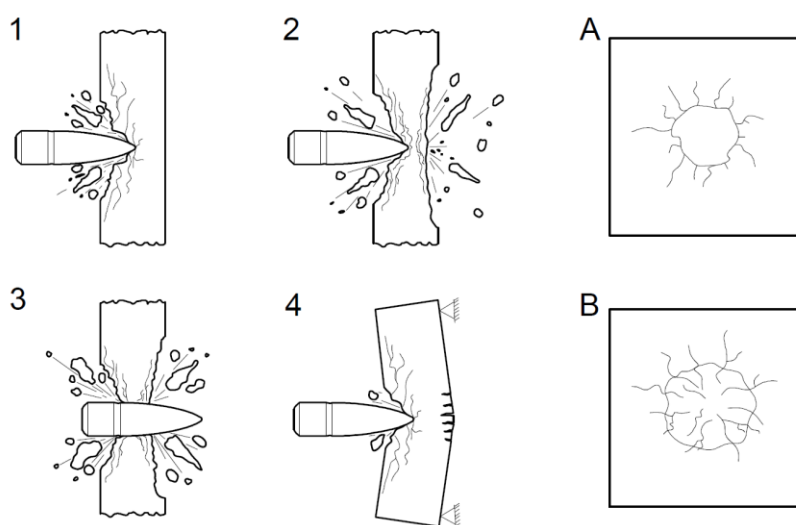
2.4 Lokální poškození betonového prvku po nárazu projektilu

V této kapitole bude popsáno několik druhů lokálního poškození popsané a pojmenované Kennedym v roce 1975 [24]. Z fyzikálního hlediska jsou to následky dějů popsaných v kapitole 2.2.2, která se zabývá rozrušováním horním za pomoci trhaviny. V kapitole 2.1.1 bylo naznačeno, že rychlost přetváření u zatížení způsobeném výbuchem a dopadem střely je srovnatelná a nakonec i samotný popis konečného poškození horniny a betonového prvku je srovnatelný, tudíž o analogii mezi těmito procesy není pochyb.

Při velmi nízkých rychlostech projektilu může dojít k odrazu střely bez vzniku kráteru nebo jiného lokálního poškození. S rostoucí rychlostí ale započne odstřelování částí betonového prvku za vzniku kráteru s větším průměrem než je průměr projektilu. (obr. 14-1) Toto poškození z frontální strany prvku se anglicky nazývá spalling. Při ještě větších rychlostech střela penetruje betonový prvek hlouběji než je hloubka kráteru způsobená „spallingem“ a vytvoří válcovitý otvor s průměrem o málo větší než je průměr střely. Se zvyšující se hloubkou penetrace se střela začne zarážet v betonovém prvku namísto jejího odrazení. Další zvýšení rychlosti způsobuje praskání betonu na zadní straně prvku a následné vyražení materiálu z jeho povrchu aniž by došlo k průstřelu. To je zapříčiněno tlakovou napěťovou vlnou, která se odrazí od volného povrchu (rozhraní beton vzduch) a vrací se zpět jako vlna tahová. Pokud je tahové napětí v betonovém prvku větší, než je jeho pevnost, dochází k tomuto vyražení hmoty z povrchu (obr. 8 a obr. 14-2). Toto poškození na odvrácené straně prvku oproti dopadu projektilu se anglicky nazývá scabbing. Oblast tohoto poškození je obvykle mnohem větší ale oproti přednímu kráteru méně hluboká. Tento vyražený materiál může nabývat i větších rozměrů a značných rychlostí. S výskytem poškození na zadní straně, velmi vzroste hloubka penetrace způsobená střelou na přední straně betonového prvku. Jak se zvyšující se rychlostí roste hloubka kráterů na přední i odvrácené straně betonového prvku, v jeden moment dojde ke spojení těchto kráterů. (obr. 14-3) Je tedy možné, že po dopadu střely se v betonovém prvku objeví otvor, ale střela už dále nemá žádnou energii k pokračování v pohybu vpřed. Pokud ale ještě zbytkovou energii má, pokračuje dále v pohybu, který může i nemusí být ve směru dopadu projektilu na betonový prvek. Toto konečné poškození je nazýváno jako perforace. [24]

Po nárazu střely se část celkové kinetické energie převede na energii spojenou s její deformací a na energii spojenou s probitím cíle. Zbývající část energie je absorbována celým betonovým prvkem a má za následek jeho celkovou odezvu, která zahrnuje ohybovou deformaci a deformaci jeho nosné konstrukce. (obr. 14-4) [24]

Při nárazu projektilu vznikají trhliny, které se radiálně šíří z místa dopadu. (obr. 14-A) Pokud je energie dostatečně veliká na to, aby se trhliny rozvinuly přes celou tloušťku betonového prvku, účinek se projeví i na zadní straně zasaženého cíle. (obr. 14-B) [6]

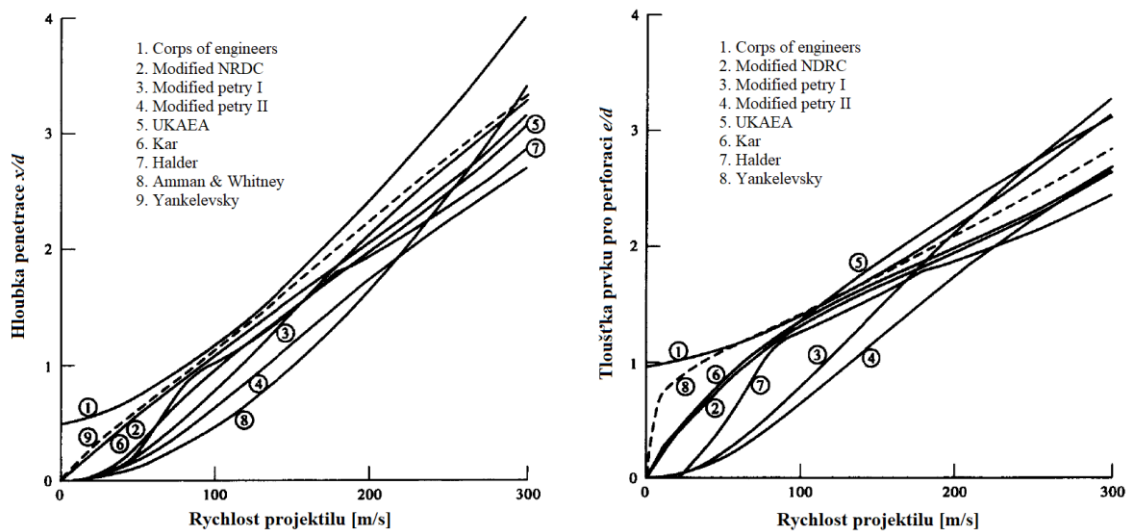


Obrázek 14: Typy poškození materiálu po nárazu střely [6], [24]

Pro kvantitativní popis účinků dopadu projektilu se často používá čtyř veličin. První z nich je hloubka penetrace, definovaná jako hloubka vniku projektilu, který neperforuje cíl, tzn., neprostřelí cíl skrz. Další veličinou je tzv. scabbing limit. Ten udává minimální tloušťku cíle pro předejetí vzniku tohoto typu poškození. Podobně je to s perforačním limitem, který udává minimální tloušťku cíle pro zamezení perforace. Poslední měřenou veličinou je balistický limit. Je to minimální dopadová rychlost projektilu, který perforuje cíl. [6]

Existuje řada typů modelů a empirických vzorců snažících se o predikci a výpočet těchto čtyř veličin. Již roku 1910 vznikl vzorec předpovídající hloubku penetrace betonového cíle. Některé modely, které samy o sobě prošly modifikací jako je např. modifikovaný NDRC model (US National Defense Research Committee), jsou brány pro mnoho autorů jako základní formule, kterou dále rozvíjejí. Obecně lze tvrdit, že ve výpočtu hloubky penetrace nebo scabbing limitu se vždy objevuje funkce

dopadové rychlosti projektilu, hmotnost a průměr projektilu a funkce pevnosti betonu v tlaku. V některých modelech můžeme nalézt např. zohlednění tvaru špičky projektilu, maximálního zrna kameniva v betonu, objemové hmotnosti nebo Youngův modul pružnosti projektilu. Modely se také liší různými použitými konstantami a také často exponentem u exponenciálních funkcí použitých proměnných. To je pravděpodobně z důvodu „nafitování“ modelu na data z experimentálních měření daných měřených veličin. [6] Srovnání několika empirických modelů pro hloubku penetrace projektilu a tloušťku prvku pro perforaci projektilem je na obr. 15. X značí hloubku penetrace, e perforační limit a d průměr střely. [25] Rychlost projektilu je zde zaznamenána do $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ což postihuje jen velmi malý interval rychlostí projektilu, který má běžně rychlosti vyšší.



Obrázek 15: Empirické modely pro hloubku penetrace a perforaci [25]

Vedle empirických modelů stojí modely analytické, které se opírají o vyjádření odporové síly, která je na projektil aplikována při vnikání do materiálu zasaženého cíle. Jedna z takových metod je založena na teorii dynamické expanze kavity. V tomto modelu se beton chápe jako pružnoplastický materiál a využívá se podmínek plasticity (Tresca, Mises, Mohr-Coulomb nebo Drucker-Prager) spolu s termodynamickou stavovou rovnicí. Takový model existuje jak pro tuhé projektily, které po dobu pronikání cíle zůstávají neporušeny, tak i pro projektily, které se při penetraci cíle deformují a rozpadají. [26]

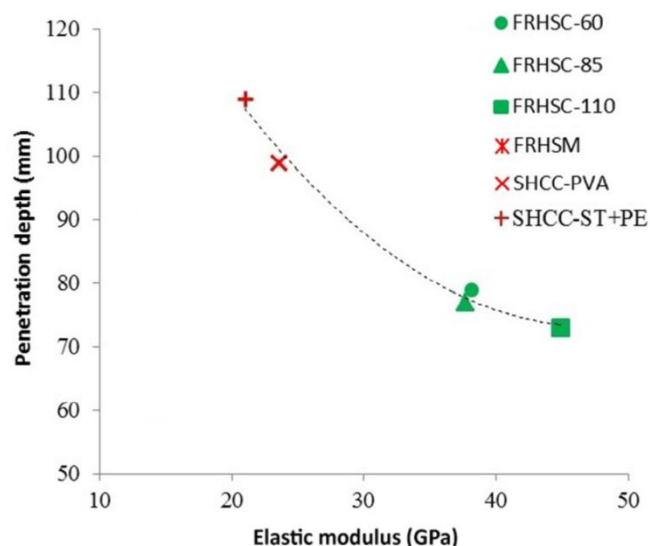
2.5 Odolnost ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu vůči dopadu projektilu

V posledních dekáдах je téma balistické odolnosti materiálů na bázi cementu čím dál více probíráno a laboratoře po celém světě mají ve svém experimentálním programu zahrnuto objasnění procesu dopadu projektilu a jeho účinky v cíli. Vznikají tak i matematické simulace, které jsou častokrát doplněny daty z experimentálních měření pro jejich ověření.

Pokud u materiálu na bázi cementu chceme zajistit danou míru balistické odolnosti a zároveň musíme zohlednit maximální tloušťku konstrukce, musíme zajistit takové vlastnosti daného materiálu, jenž takové podmínky splňuje. Proto se uchylujeme k použití ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu, který disponuje vysokými pevnostmi v tlaku (> 150 MPa). [27; 28] Nevyztužený ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) je ale velmi křehký materiál. [28; 29; 30; 31; 32] Pro snížení křehkosti, tedy zvýšení duktility, je nutné ke složení takového betonu přidat rozptýlenou výztuž. V rámci vývoje materiálů s balistickou odolností je používáno rovných ocelových vláken s délkou kolem 10 mm a průměrem v řádu desetin milimetrů [28; 29; 30; 31; 32; 33], polymerních vláken jako např. PE a PVA [29; 33] i kombinací obou typů vláken [33].

Vyšší pevnost v tahu, větší smyková pevnost a vyšší houževnatost díky obsahu vláken zvyšuje odolnost proti penetraci projektilem. Vzorky po dopadu vykazují větší celistvost a mají méně a menší trhliny. [29; 33] Redukce křehkosti cementového kompozitu vede k menší ploše kráteru způsobeném dopadem střely [28].

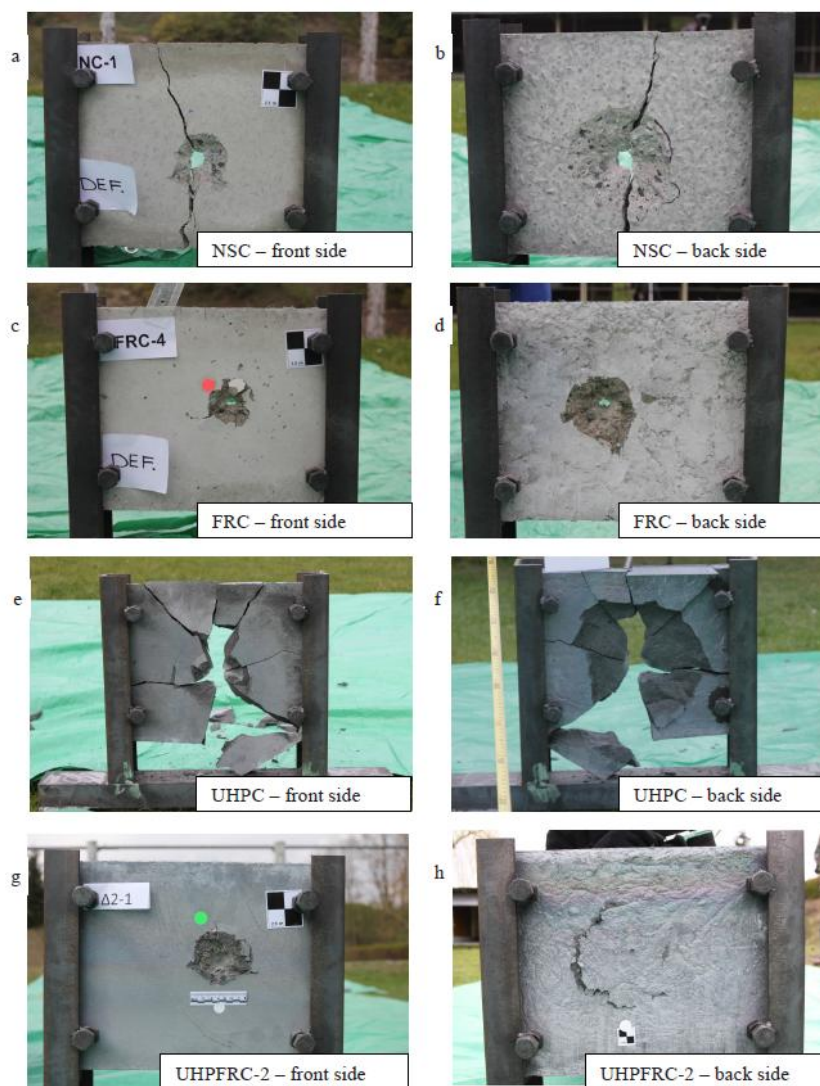
Nejčastěji vyhodnocovaným parametrem lokálního poškození je hloubka penetrace. Ta je primárně redukována tlakovou pevností cementového kompozitu. S větší pevností v tlaku se snižuje hloubka penetrace cíle. [29; 30; 31; 32] Podle experimentálních výsledků Wang a kol. [33] klesá hloubka penetrace s růstem modulu pružnosti testovaného materiálu, jak je zachyceno na obr. 16, kde je na svislé ose zaznamenána hloubka penetrace v milimetrech a na vodorovné ose modul pružnosti v gigapascálech.



Obrázek 16: Závislost hloubky penetrace na modulu pružnosti testovaného materiálu [33]

U některých materiálů je hloubka penetrace redukována použitím hrubšího kameniva, např. korundu. [33; 34] Naopak s vyšší rychlostí projektilu se hloubka penetrace zvyšuje [30; 31; 32; 33; 34; 35].

Většina autorů srovnává výsledky vlákny vyztuženého cementového kompozitu s výsledky prováděných na tom samém, ale nevyztuženém materiálu, na betonu „normálních“ pevností nebo na běžném vláknobetonu. Příkladem tomu může být práce Sovjáka a kol. [30], kde jsou srovnávané výsledky z experimentální zkoušky odolnosti vůči deformovatelnému projektilu (konkrétně se jedná o střelu $7,62 \times 39$ s olověným jádrem a počáteční rychlostí kolem $710 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) na deskách o rozměrech 300×400 mm a tloušťce 50 mm. K dispozici byly desky vyrobené ze směsi UHPC o pevnostech v tlaku kolem 150 MPa, vyztužené ocelovými vlákny délky 13 mm a průměrem 0,13 mm s objemovým zastoupením 1 %, 2 %, 3 % a bez vláken. Dále byly k porovnání desky z běžného betonu s pevností v tlaku 43 MPa (NSC) a vláknobetonu s drátky délky 30 mm se zahnutými konci a průměru 0,375 mm (FRC). Následky dopadu projektilu jsou na obr. 17, kde je patrná perforace desky NSC, scabbing na zadní straně a celkový zlom desky. U vzorku FRC je poškození obdobné, jen s tím rozdílem, že nedošlo k lomu desky díky přítomnosti drátků, jenž materiálu dodávají duktilní vlastnosti. U desky z nevyztuženého UHPC, který je křehčí než NSC kvůli vyšší tlakové pevnosti, došlo po dopadu projektilu ke vzniku mnoha trhlin a tím k rozpadu celého vzorku na několik částí. Nakonec je zde zobrazen následek dopadu projektilu na desku z UHPC vyztuženou 2 % ocelových vláken. Zde je patrný kráter na čelní straně desky a drobné porušení zadní strany desky. [30]



Obrázek 17: Poškození desek na čelní a zadní straně způsobené dopadem projektilu [30]

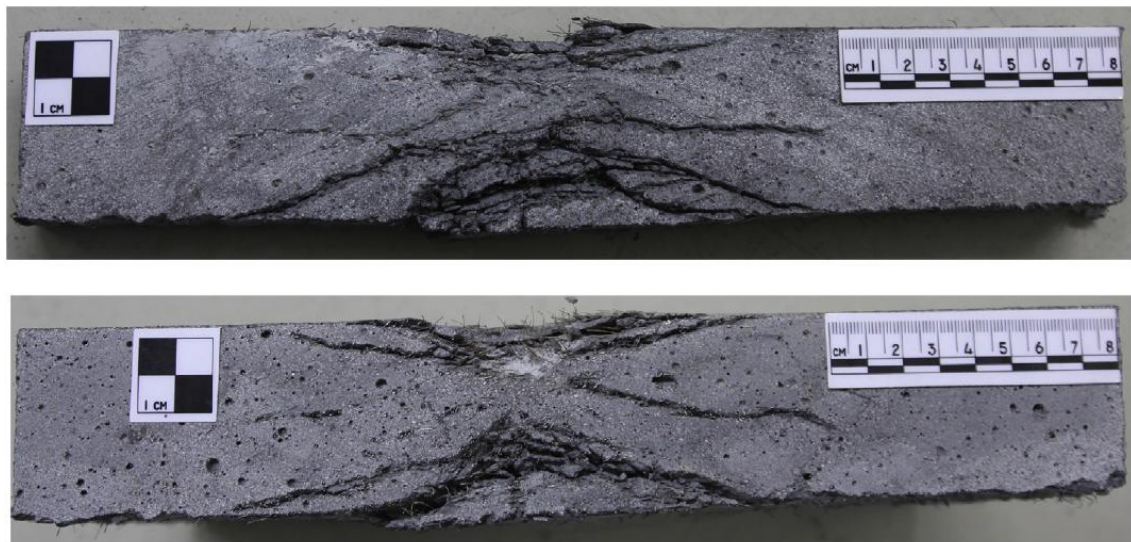
V případě desek z UHPC s 1 % a 3 % vláken také nedošlo k perforaci. Hloubka penetrace se snížila z 20,5 mm na 20,0 a 19,0 mm u desek s objemovým zastoupením vláken 1 %, 2 % a 3 %. Z těchto výsledků plyne, že navýšení počtu vláken nad 1 % má pouze malý dopad na odolnost materiálu vůči dopadu projektilu, co se týká hloubky penetrace. Průměr kráteru je u vzorků z vyztuženého UHPC o 50 % menší než u nevyztuženého. Není ale patrný rozdíl mezi velikostí průměru kráteru u vzorků se 2 % a 3 % vláken. [30]

Obdobné zkoušky provedl též Máca a kol. [31]. Na obr. 18 vlevo je zachycen detail zadní strany desky, kde se nachází zaseknuté ocelové jádro nedeformovatelné střely $7,62 \times 39$. Střela neměla dostatečnou rychlost na perforaci cíle a můžeme tvrdit, že je na hranici perforačního limitu. Vpravo je zadní strana desky zasažené střelou $7,62 \times 39$ s olověným jádrem. Na obr. 19 je řez dvou desek po dopadu střely $7,62 \times 39$

s olověným jádrem po balistické zkoušce provedené Sovjákem a kol. [32]. Je zde patrný kráter po dopadu projektilu (na obrázku při horním povrchu desek) a dále velice rozvinutá síť trhlin. Díky rozptýlené výztuži, která překleneje tyto trhliny, nedošlo k vytržení materiálu na zadní straně desky (na obrázku při dolním povrchu desek).



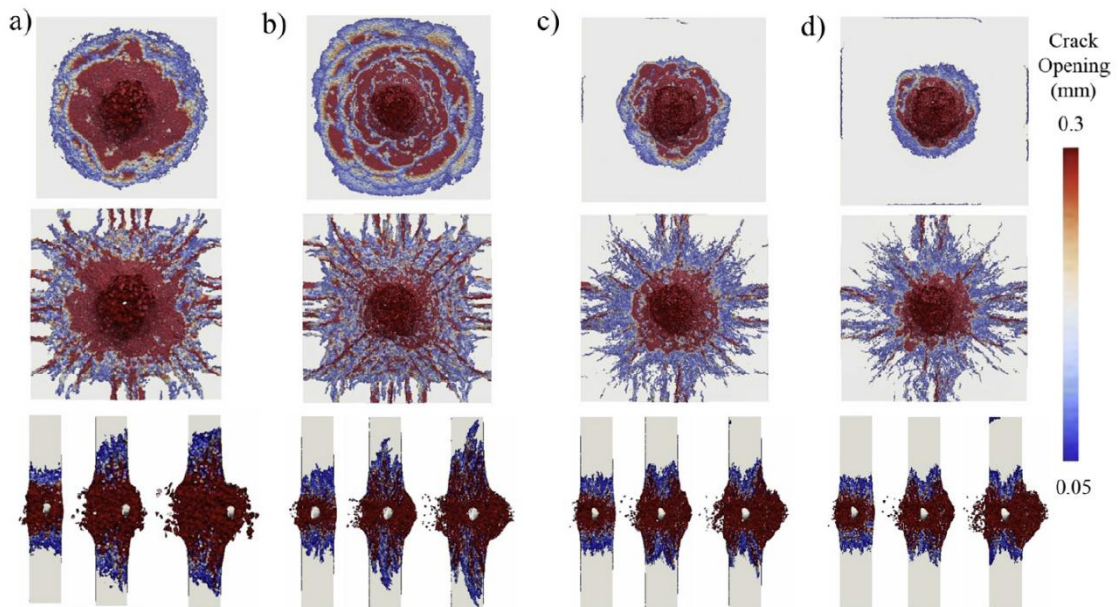
Obrázek 18: Zadní strana desky zasažená střelou 7,62×39 s ocelovým a olověným jádrem [31]



Obrázek 19: Řez krátery dvou desek zasažených střelou 7,62×39 s olověným jádrem [32]

Podobných výsledků je dosaženo také v práci [28], kde se pomocí LDPM-F (Lattice Discrete Particle Model pro vyztužený beton), který je kalibrován a ověřený pro použití u materiálu z UHPC, simulují dopady projektilu. V tomto případě jde o desku o rozměrech cca 305×305 mm s tloušťkou cca 51 mm z UHPC zvaného COR - TUF s pevností v tlaku přes 200 MPa. Na obr. 20 je zobrazeno porovnání poškození na zadní straně (scabbing) čtyř různých materiálů a při dvou módech nastavení okrajových podmínek. V první řadě obrázků je v programu nastaveno ukotvení desky po jejím obvodu, v druhé řadě je ponecháno volnému pohybu desky. Sloupec a) je pro beton běžných pevností (NSC), sloupec b) pro nevyztužené UHPC,

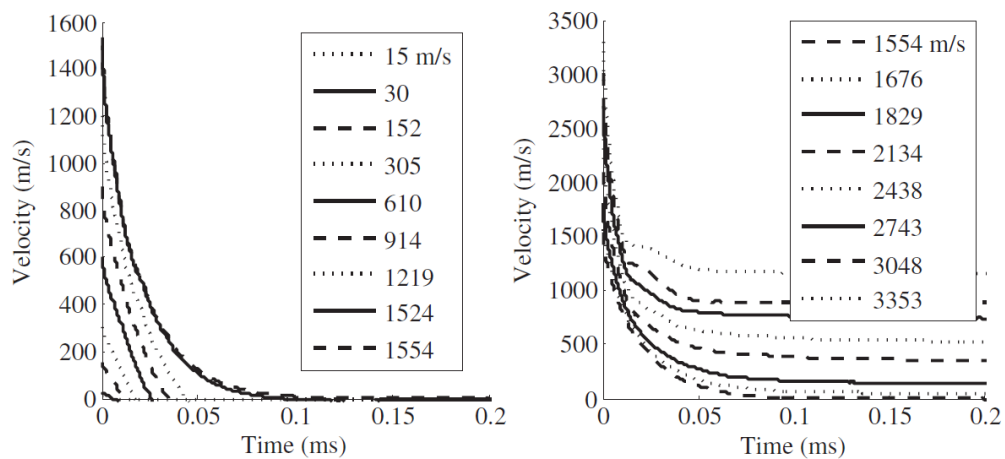
sloupec c) pro UHPC se 3 % ocelových vláken a sloupec d) pro UHPC s 5 % ocelových vláken. [28]



Obrázek 20: Porovnání poškození na zadní straně pro NSC, UHPC a UHPC s 3% a 5% vláken [28]

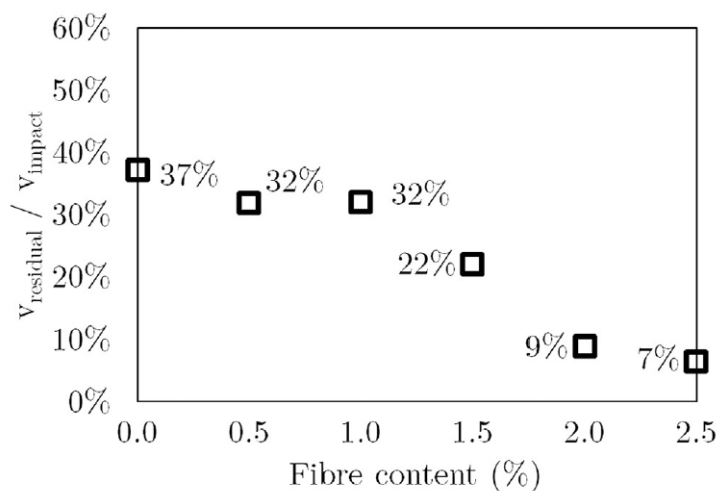
Z výsledků je patrná větší velikost kráteru u materiálu z UHPC oproti tomu z NSC. Může za to pevnější materiál s velmi drobným plnivem, který obsahuje méně inkluzí, zapříčínujících propagaci trhlin skrz vzorek. [28] Klade se zde ale na mysl porovnání s experimentálním výsledkem práce Sovjaka [30], kde došlo u nevyztuženého UHPC k naprostému rozpadu vzorku. Scabbing je dobře redukovatelný za pomoci vláken, jak je vidět ve sloupci c) a d). Zvýšení % vláken z 3 na 5 % ale nezpůsobí znatelné zlepšení odolnosti panelu. U desek bez omezení pohybu po jejich obvodu se vyskytují radiální trhliny šířící se z místa dopadu projektilu. Jsou intenzivnější u křehkého UHPC a opět dobře redukovatelné za pomoci přidání ocelových vláken. [28]

Z této simulace také vyplívají výsledky zbytkové rychlosti, kterou má projektil v případě perforace desky. Na obr. 21 jsou vlevo zaznamenány rychlosti pod balistický limit (rychlost je nedostatečná pro perforaci cíle) pro materiál simulovaný v této práci a vpravo rychlosti nad balistický limit a tedy s reziduální rychlostí po perforaci cíle. Na svislé ose je rychlost v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a na vodorovné ose čas v milisekundách. Jak je patrné z grafu, pro UHPC COR-TUF je tento balistický limit roven $1554 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [28] U strel s rychlostí nad balistickým limitem má přidání vláken jen velmi malý vliv na snížení jejich zbytkové rychlosti. [28]



Obrázek 21: Závislost rychlosti projektilu na čase po dopadu na cíl [28]

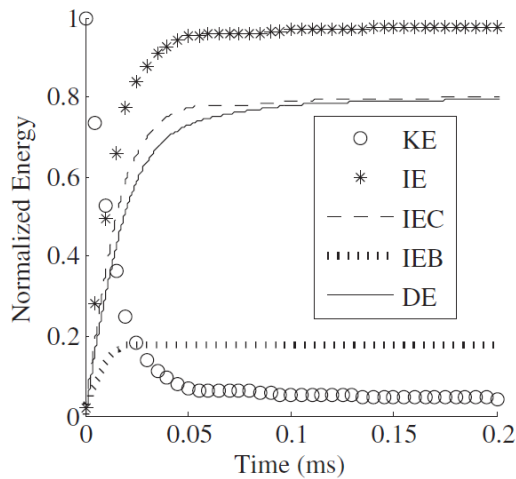
Zbytkovou rychlost také měřil Sovják a kol. [32]. K dispozici je zde měření zbytkové rychlosti po dopadu nedeformovatelného projektilu ($7,62 \times 39$ s ocelovým jádrem) na desky o rozměrech 300×400 mm a tloušťce 45 mm. Desky byly vyrobeny z UHPC a obsahovaly od 0,5 až 2,5 % ocelových vláken. Na obr. 22 je zaznamenaná residuální rychlost vztahovaná k dopadové rychlosti v závislosti na procentuálním zastoupení ocelových vláken v použitém UHPC. [32]



Obrázek 22: Závislost residuální rychlosti vztahované na rychlost dopadu na obsahu vláken [32]

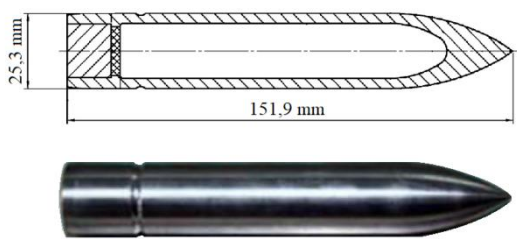
S dopadem střely na cíl také souvisí změna energie soustavy. Graf na obr. 23 tuto změnu zachycuje. Na svislé ose je normalizovaná hodnota energie a na vodorovné ose čas v milisekundách. Kinetická energie (KE), energie dodávaná systému, se snižuje s poklesem rychlosti projektilu, jelikož je přímo úměrná její druhé mocnině. Vnitřní

energie (IE) se vztahuje na práci vykonanou vnitřními silami, jejichž výsledkem je obnovitelná elastická energie a energie disipovaná. Vnitřní energie se skládá z vnitřní energie desky (IEC) a projektilu (IEB). Disipovaná energie (DE) je neobnovitelná a je menší než vnitřní energie desky. [28]

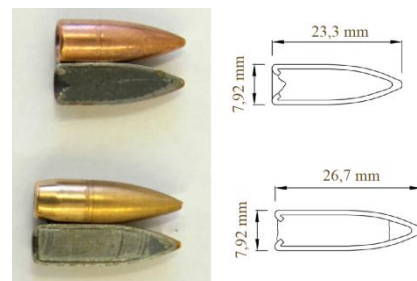


Obrázek 23: Časová změna energie systému projektil – deska [28]

Odolnost cementového kompozitu vůči dopadu projektilu se nehodnotí pouze na tenkostěnných deskách. V řadě případů se jako testovací tělesa používají válce o průměru 750 mm a výšce 700 mm nebo obdobně velkých rozměrů, které jsou v ocelové objímce. [29; 34; 35] Na tyto válce jsou pak vystřelovány ocelové projektily opět mnohem větších rozměrů než v pracích [30; 31; 32]. Tyto ocelové projektily (obr. 24) mají průměr 25 mm a délku 152 mm. Jsou vyrobené z legované oceli a mají hmotnost kolem 330 g. K porovnání je na obr. 25 deformovatelný a nedeformovatelný projektil použit v pracích [30; 31; 32] s hmotností přibližně 8 g.



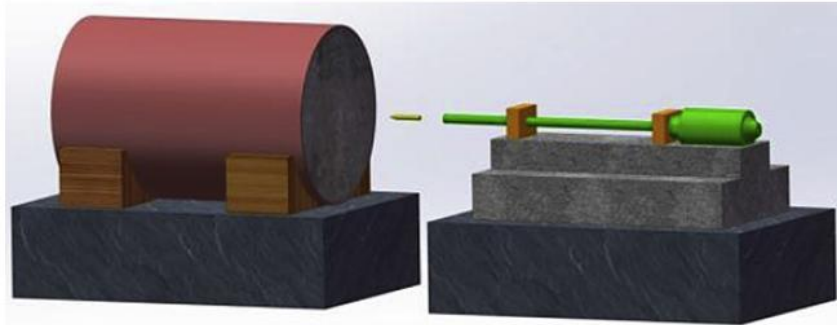
Obrázek 24: Projektil z legované oceli [35]



Obrázek 25: 7,62×39 s olověným a ocelovým jádrem [32]

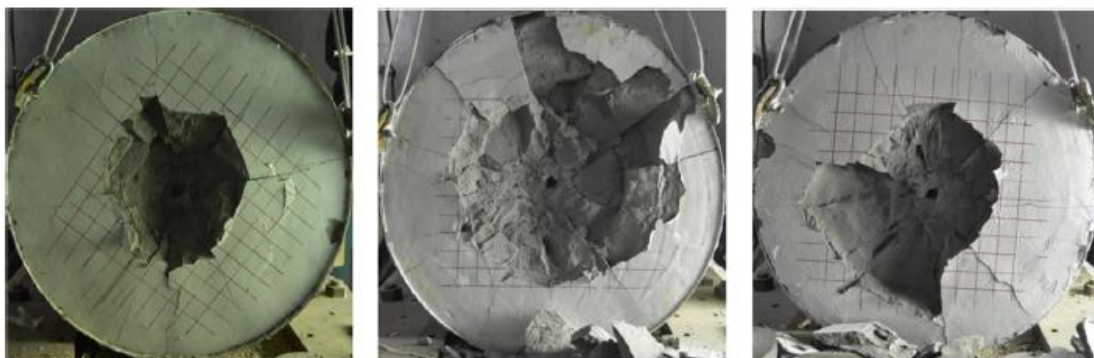
Liu a kol. [29] vyšetřoval takto připravené vzorky z UHPC se 3 % ocelových vláken a pevností v tlaku kolem 150 MPa a UHPC s 3% vláken z PE s ultravysokou molekulovou hmotností a pevností v tlaku kolem 120 MPa. K sadám UHPC potom pro

porovnání také připravil sadu z běžného betonu. Testovacím tělesem byl tedy válec o průměru 750 mm a výšce 700 mm, orientovaný horizontálně. Namísto ruční palné zbraně, jako je tomu v pracích [30; 31; 32], je zde projektil (obr. 24) vystřelován tlakem vzduchu. Tělesa byla odstřelována rychlostí kolem 550, 675 a 800 m.s⁻¹. Schéma zkoušky je zobrazeno na obr. 26.



Obrázek 26: Schéma zkoušky UHPC [34]

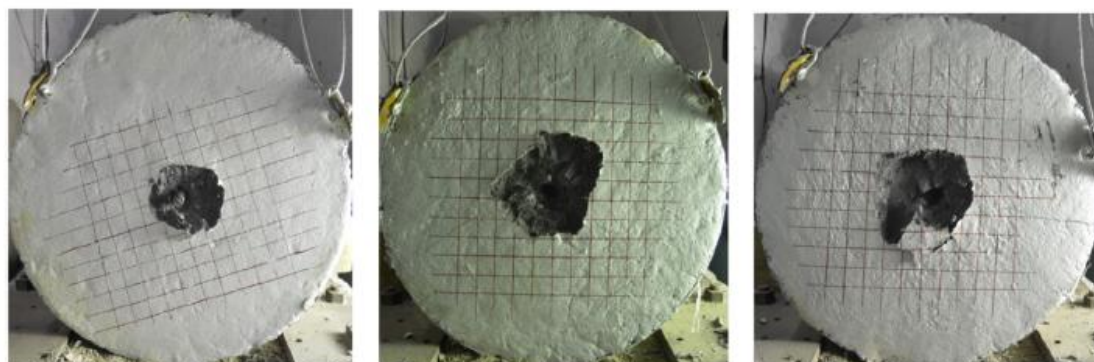
Z výsledků experimentu vyplývá, že s vyšší rychlostí projektilu se zvětšuje hloubka penetrace. Hodnota hloubky penetrace je vyšší u vzorků s PE vlákny než u vzorků s vlákny ocelovými. Poškození po nárazu projektilu je u běžného betonu křehkého charakteru. Kolem místa dopadu jsou patrné velké i malé trhliny. U vzorků z UHPC jsou krátery po dopadu střely mnohem menšího průměru než u běžného betonu. Přítomná vlákna dokážou velmi efektivně zabránit šíření trhlin v materiálu. Vzorky UHPC s vyšší pevností v tahu a lepší lomovou houževnatostí zvládnou absorbovat mnohem více dopadové energie a tím redukovat velikost kráteru. Na obr. 27 jsou pod písmeny a), b) a c) vzorky běžného betonu s pevností v tlaku kolem 70 MPa, poškozeny dopadem projektilu rychlostí kolem 550, 675 a 800 m.s⁻¹. Pod písmeny d), e) a f) jsou vzorky UHPC s PE vlákny s pevností v tlaku 120 MPa, odstřelované stejnými rychlostmi a nakonec pod písmeny g), h), a i) jsou vzorky UHPC s ocelovými vlákny s pevností v tlaku 150 MPa, odstřelovány též totožnými rychlostmi. Pro tak rozměrná tělesa je možné hodnotit pouze charakter poškození v místě dopadu. Neprojeví se zde scabbing na odvrácené straně vzorku kvůli tloušťce tělesa, jenž redukuje intenzitu odražené tlakové vlny.



(a)

(b)

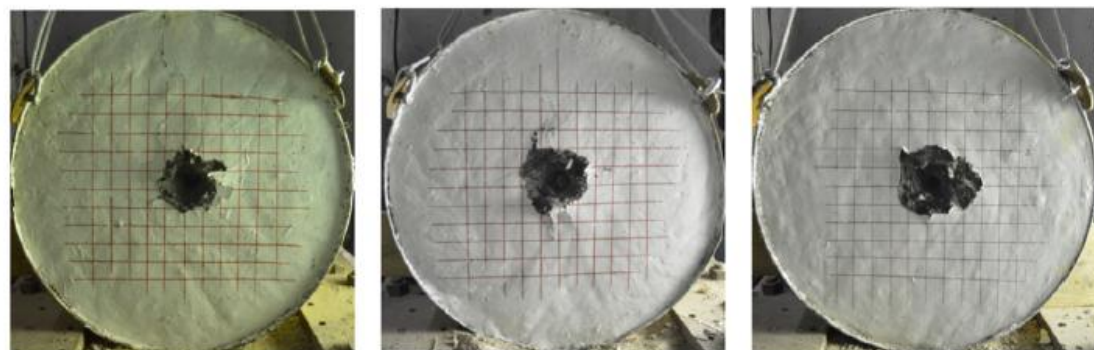
(c)



(d)

(e)

(f)



(g)

(h)

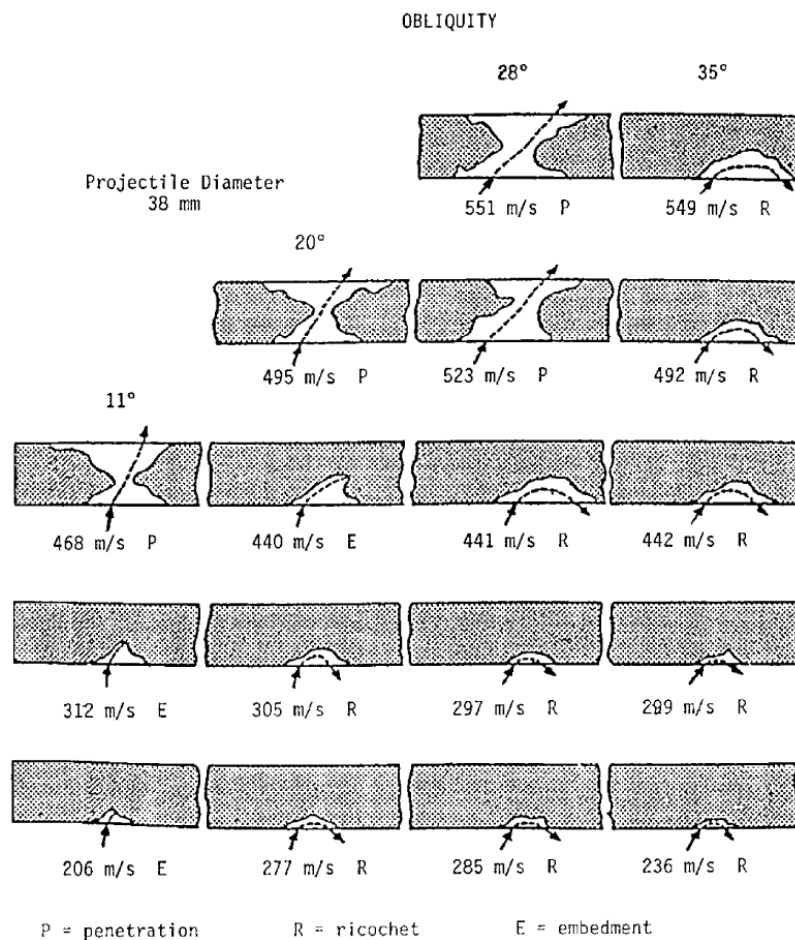
(i)

Obrázek 27: Poškození vzorků po dopadu projektilu [29]

2.6 Šikmý dopad projektilu

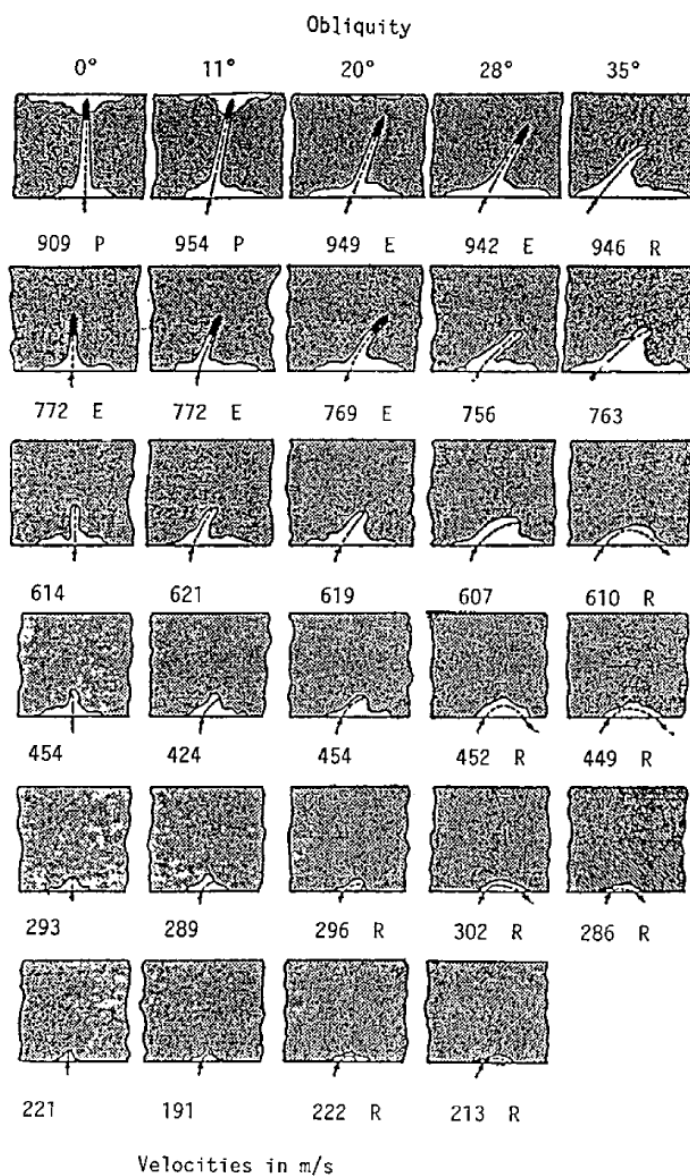
2.6.1 Experimentální přístup

Již za druhé světové války byl prováděn výzkum v oblasti neideálního dopadu projektilu na betonový cíl. Jedna z takových studií byla realizována Úřadem vědeckého výzkumu a vývoje (OSRD), což byla agentura federální vlády Spojených států, vytvořená za účelem koordinace vědeckého výzkumu pro vojenské účely během druhé světové války. Předmětem výzkumu byl dopad 38 mm M80 AP projektilu (hmotnost 771 g) pod různými úhly, na desky z betonu s pevností v tlaku 39 MPa a tloušťce 226 resp. 559 mm. (V novodobé prezentaci výsledků s metrickými jednotkami v práci Goldsmithe [36] nebo v původní studii OSRD s originálními výsledky v imperiálních jednotkách [37]). Na obr. 28 je zobrazen proces dopadu projektilu na betonovou desku tloušťky 226 mm různými rychlostmi pod úhlem 11°, 20°, 28° a 35°. Je zde zachycen odraz projektilu (R), zaseknutí střely v cíli (E) a perforace (P). Také je zde zobrazen vzniklý kráter na přední a zadní straně cíle a trajektorie střely.



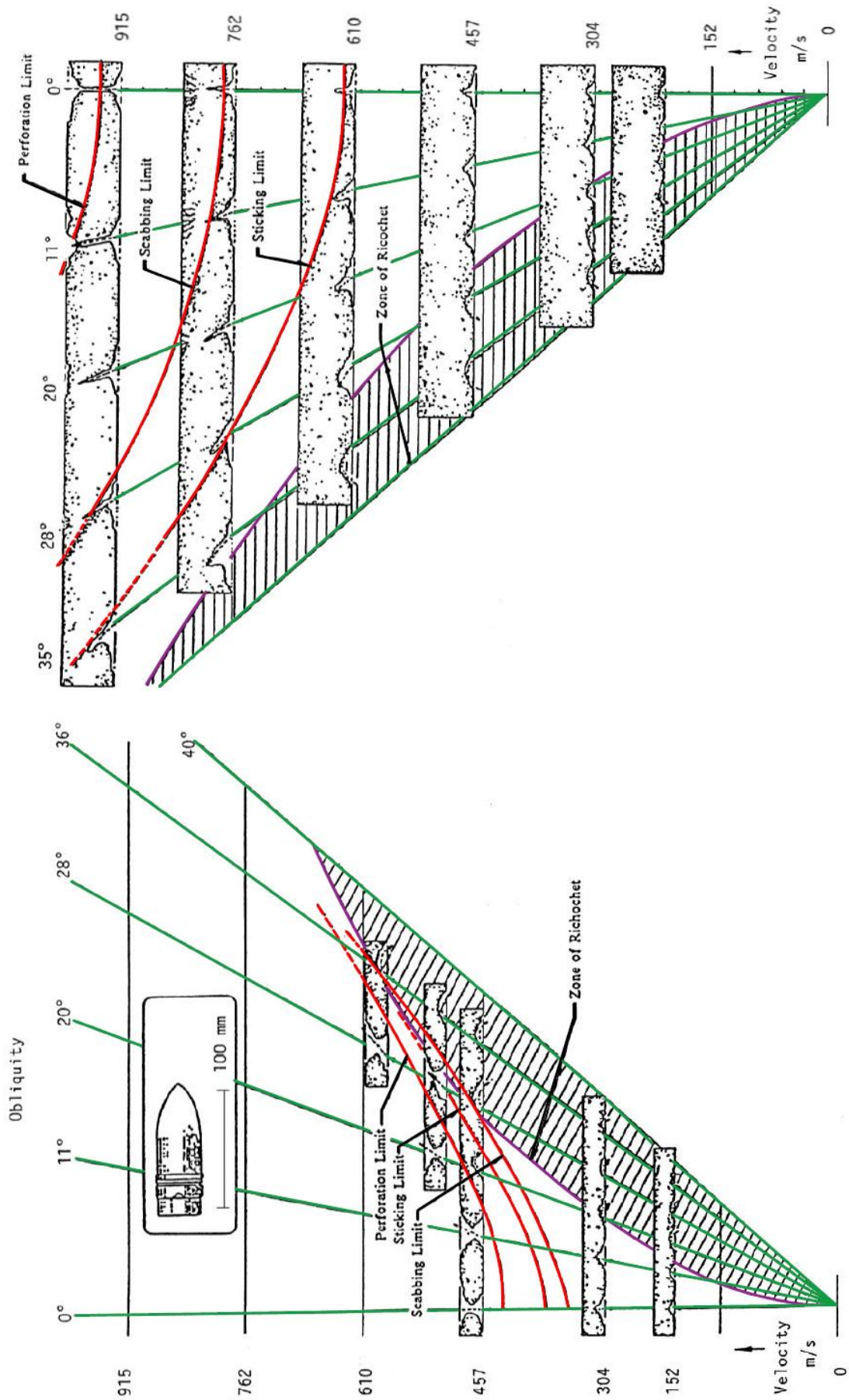
Obrázek 28: Dopad 38 mm M80 AP projektilu na betonovou desku o tloušťce 226 mm [36; 37]

Obdobné chování vykazuje též betonová deska o tloušťce 559 mm (obr. 29), kde maximální rychlost projektilu při dopadu dosahovala přes $900 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z výsledných dat bylo možné, pro betonové desky daných rozměrů a pevnosti v tlaku, určit balistické charakteristiky, jako je perforační limit, scabbing limit a oblast, kde dochází k zaseknutí, resp. odrazu střely. Všechny tyto charakteristiky jsou pro jednotlivé tloušťky betonové desky závislé na rychlosti a úhlu dopadu projektilu. Graf těchto závislostí je zobrazen na obr. 30. Na svislé ose je zanesena rychlost projektilu v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, dále jsou zde zakresleny desky tloušťky 226 a 559 mm s krátery vzniklými po kolmém dopadu střely a dopadem pod úhlem 11° , 20° , 28° , 36° a 40° . Červenou barvou jsou vyznačeny křivky pro perforační limit, scabbing limit a mez, při které dojde



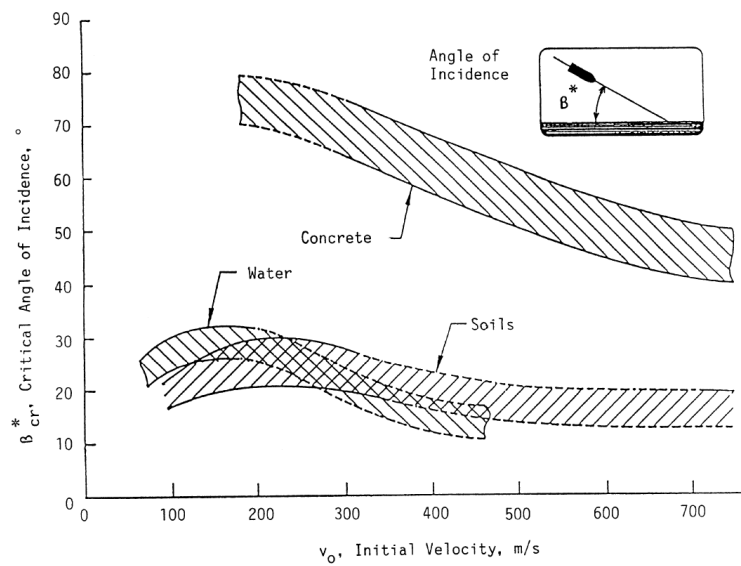
Obrázek 29: Dopad 38 mm M80 AP projektilu na betonovou desku o tloušťce 559 mm [36; 37]

k zaseknutí střely. Fialovou barvou je ohraničena oblast odrazu střely. Z porovnání grafů pro obě betonové desky je zřejmé, že při 2,5 násobku tloušťky se hodnoty balistických charakteristik přibližně zdvojnásobují.



Obrázek 30: Graf závislosti balistických charakteristik a rychlosti, resp. úhlu dopadu [36; 37]

Z druhoválečné studie [37] je též závislost tzv. kritického úhlu dopadu na rychlosti projektilu, stanovená experimentálně pro různé materiály. Kritický úhel dopadu je v této práci definován jako úhel, při kterém dojde k odrazu střely po jejím dopadu na cíl. Na obr. 31 jsou zaznamenány křivky, resp. oblasti vymezené horní a dolní mezí, pro beton, vodu a zeminy. U dopadů projektilu pod oblast vymezenou křivkou dolní meze lze očekávat odraz, nad oblast vymezenou křivkou horní meze nikoliv. Dále je zde přechodná oblast, jejíž šířka je dána výsledky experimentálních dat, které obsahovaly jak odraz tak i zaseknutí střely či průstřel.



Obrázek 31: Kritický úhel dopadu pro beton, vodu a zeminy [36; 37]

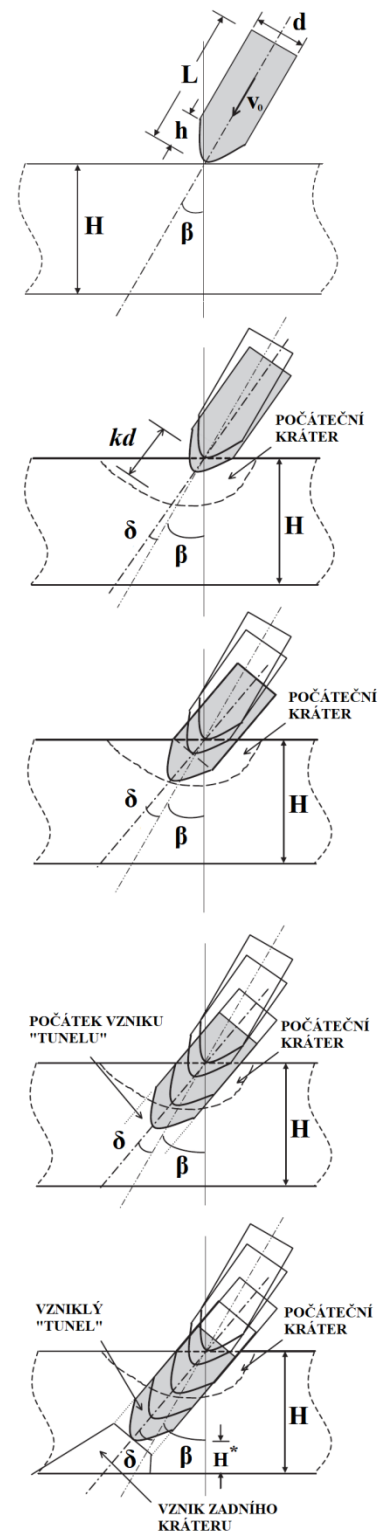
2.6.2 Analytický přístup

Dalším přístupem k předpovědi procesu deformace betonové konstrukce po dopadu projektilu je využití analytických modelů, kde je odvozována odporová síla, jež je na projektil aplikována při vnikání do materiálu zasaženého cíle. Vhodný a často využívaný je model založený na teorii dynamické expanze kavity. Této teorii využívá práce Chena a kol. [38], která popisuje šikmý dopad projektilu na betonový prvek. V této práci je popisován běžný nevyztužený beton s tloušťkou, při které dojde k perforaci. Není uvažováno poškození v důsledku odražené tahové vlny od volného povrchu na zadní straně betonového cíle.

Předpověď chování betonové konstrukce zahrnuje tři fáze procesu penetrace projektilem. První fází je vznik kráteru v místě dopadu střely, druhou fází je penetrace cílem za vzniku válcového otvoru s průměrem o málo větším než je průměr projektilu a poslední, třetí fází, je vznik kráteru na odvrácené straně cíle, způsobený perforací projektilu do hloubky, kde hodnota smykového napětí překračuje smykovou pevnost materiálu. (Nezaměňovat třetí fázi – vznik zadního kráteru, s porušením vlivem odražené napěťové tahové vlny – scabbingem)

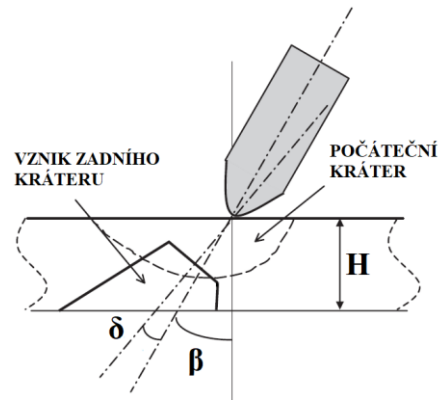
Na obr. 32 je tento proces v krocích zaznamenán. Úhel dopadu β je definován jako rozdíl od kolmého dopadu. Tloušťka cíle je značena H a parametry projektilu jsou: průměr d , celková délka L , délka přední zaoblené části střely h a počáteční rychlost v_0 . [38]

V první fázi střela penetruje cíl spolu s odkloněním její trajektorie o úhel δ a vzniká kráter válcovitého tvaru s osovou hloubkou $k \cdot d$, kde d je průměr střely a k je dle [39] rovno $(0,707 + h/d) \cdot \cos\beta$. (h , d a β jsou popsány v textu výše) [38]



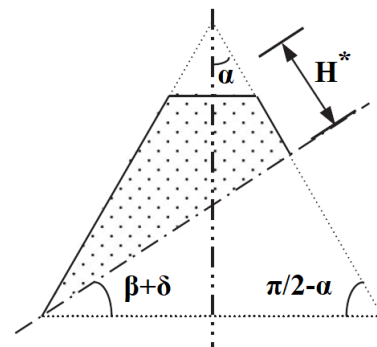
Obrázek 32: Proces perforace projektilem a jeho tři fáze [38]

Druhá fáze, fáze průniku projektilu do materiálu za vzniku otvoru válcovitého tvaru, může i nemusí být přítomna. Záleží na tloušťce a materiálových charakteristikách betonového cíle. Pokud jsou některé parametry nedostatečné, může dojít k přeskočení druhé fáze a vzniku kráteru na odvrácené straně cíle k dopadu projektilu. Tento případ je zaznamenán na obr. 33. V opačném případě dochází ke vzniku onoho válcovitého otvoru, tzv. tunelu, zobrazeném na obr. 32. [38]



Obrázek 33: Proces perforace cíle bez jeho druhé fáze [38]

V případě, že rychlost dopadu projektilu je dostatečně vysoká, dochází ke vzniku kráteru na odvrácené straně cíle. Tento proces je shrnut do třetí fáze perforace cíle. Při kolmém dopadu je zadní kráter idealizován jako kužel s úhlem sklonu α . Tento úhel se pohybuje obvykle kolem 60° [25]. Stejně je úhel α definován u šikmého dopadu, kde je osa idealizovaného kužele natočena pod úhlem β spolu s úhlem odklonění trajektorie střely δ . Schéma kužele charakterizujícího kráter na odvrácené straně cíle od místa dopadu projektilu je na obr. 34. H^* značí stejně jako na obr. 32 tloušťku zadní části betonového cíle, která po vyražení po dopadu střely vytvoří zadní kráter. Porušení materiálu je čistě smykové. K vyražení materiálu dojde, jakmile se překročí jeho smyková pevnost. V reálných podmínkách je materiál



Obrázek 34: Schéma zadního kráteru [38]

ze zadního kráteru vždy roztržštěný na mnoho částí kvůli nízké tahové pevnosti betonu. Rozpadnutí je důsledkem tahovým napětím způsobeným odražením tlakové napěťové vlny od volného povrchu, které předchází smykovému poškození materiálu. [38]

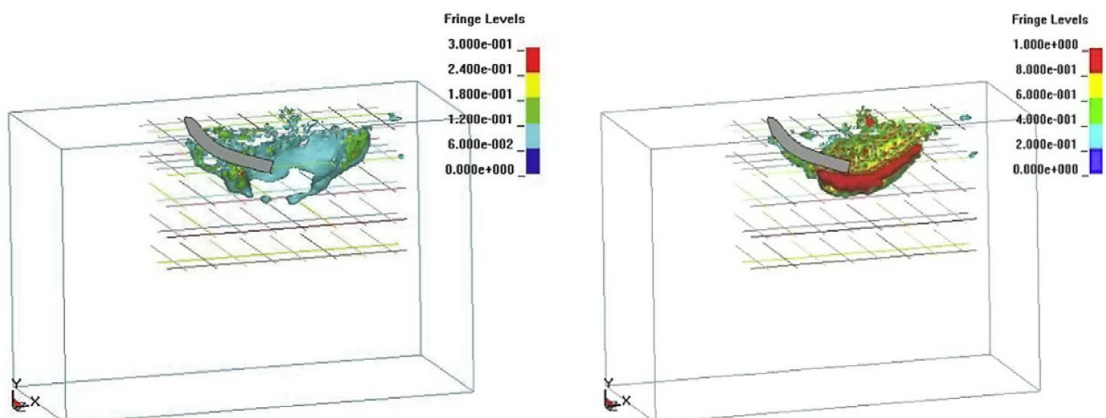
Z teorie dynamické expanze kavity vyplývá, že odporová síla, která je na projektil aplikována při vnikání do materiálu zasaženého cíle, je velmi ovlivněna dvěma bezrozměrnými funkcemi. První je označována jako funkce impaktu. Ta je závislá na hmotnosti projektilu, počáteční rychlosti projektilu, průměru projektilu a tlakové pevnosti betonu. Druhá, označována jako funkce geometrie, je závislá na hmotnosti projektilu, objemové hmotnosti betonového cíle, průměru projektilu a faktoru zohledňujícího tvar špičky projektilu. [38]

2.6.3 Přístup pomocí numerické simulace

V dnešní době výpočetní techniky je optimální simulovat dopad projektilu pomocí programů umožňujících popis složitého chování prostředí, například pomocí metody konečných prvků. Tak je možné objasnit proces porušení materiálu, předpovídat trajektorii střely a balistické charakteristiky jako je hloubka penetrace, penetrační limit nebo scabbing limit.

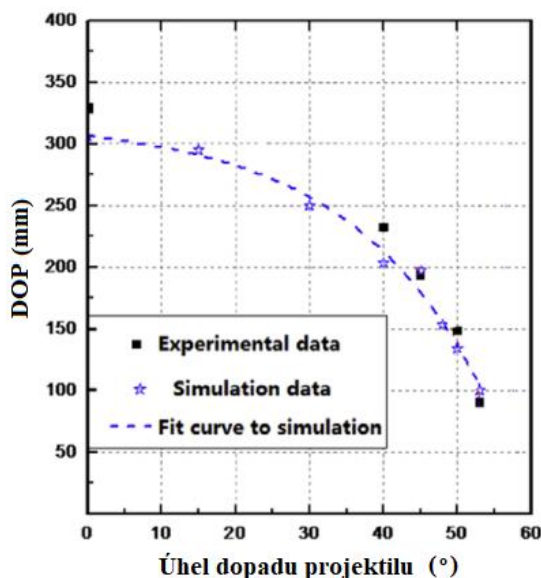
Jedním z takto řešených projektů je simulace dopadu střely od Liu a kol. [40]. Ti kombinují model Taylora a kol. (TCK model) pro proces penetrace betonu projektilem s modelem Holmquista a kol. (HJC model) popisujícím kompresní chování betonu při velkém namáhání s ohledem na vliv hydrostatického tlaku, rychlost deformace a pevnost materiálu. TCK model je schopný předpovídat křehký lom betonu při tahovém namáhání ale odezva materiálu na tlakové namáhání je zde popsána pomocí jednoduchých rovnic uvažujících beton jako elasticko-plastický materiál. Naopak HJC model dobře popisuje tlakovou odezvu materiálu, ale s porušením způsobené tahem nikterak nepočítá. [40; 41]

Za pomoci programu LS-DYNA [40] simulují běžný beton vyztužený výztužnou sítí s průměrem 4 mm. Vzdálenost mezi pruty je 50 mm. Projektil uvažují délky 180 mm a průměru 20 mm. Na obr. 35 je zaznamenáno tahové poškození (vlevo) a tlakové poškození (vpravo) po dopadu projektilu pod úhlem 53° rychlostí $540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v čase $1500 \mu\text{s}$. Je zde patrné tahové porušení poblíž povrchu simulovaného vzorku a tlakové porušení koncentrované kolem projektilu. Také je zjevné z vyznačených oblastí se stejnou hodnotou tahového, resp. tlakového poškození, že porušení tlakem je soustředěnější v menší oblasti oproti porušení tahem. [40]



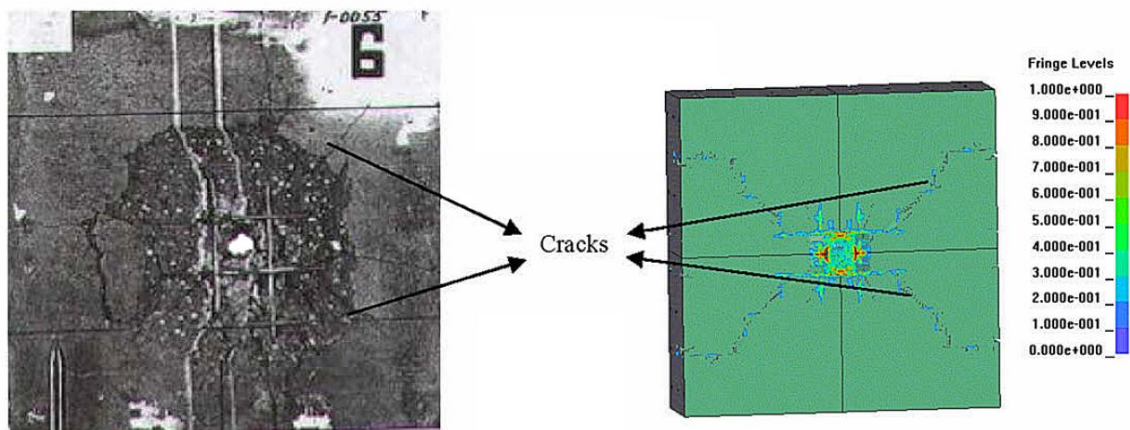
Obrázek 35: Tahové a tlakové přetvoření od nárazu projektilu [40]

Tato simulace je porovnána s experimentálními výsledky hloubky penetrace (DOP) závislé na úhlu dopadu projektilu. Z grafu na obr. 36 je zřejmé, že pro tento typ materiálu a střely simulace dobře předpovídá odolnost vyztužené betonové konstrukce vůči dopadu projektilu. [40]

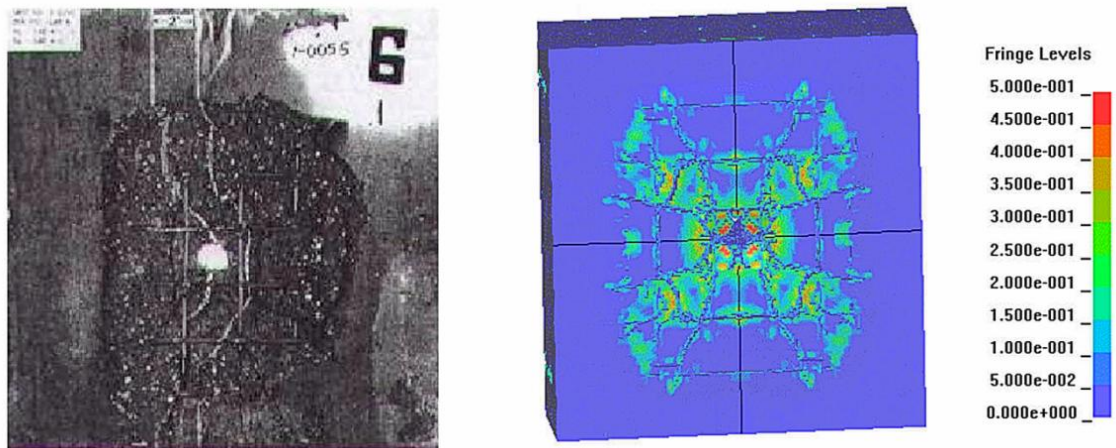


Obrázek 36: Srovnání simulace s experimentálními daty [40]

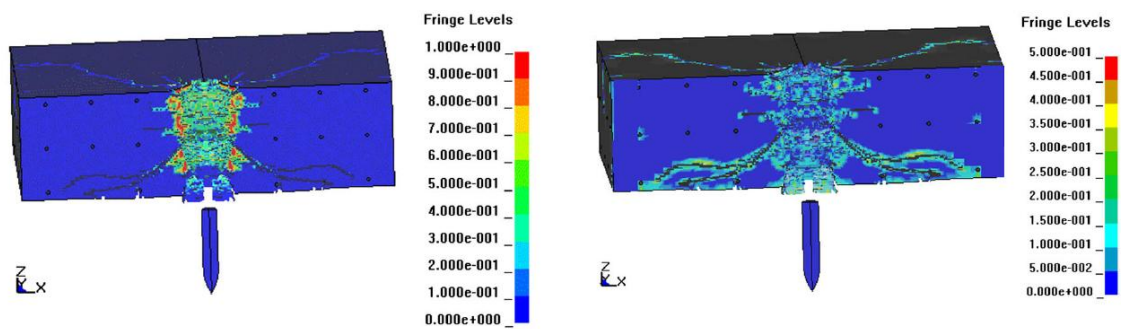
V další simulaci Liu a kol. [41] pomocí modelu kombinující TCK a HJC model nejprve ověřují funkčnost tak, že simulují charakteristiky materiálů a podmínky, které v experimentálním výzkumu použil Hanchak a kol. [42] Uvažuje se ocelový projektil délky 143,7 mm o průměru 26,4 mm. Jako testovací objekt je modelován blok o rozměrech 610 × 610 mm a tloušťce 175 mm z betonu vyztuženého sítí s osovou vzdáleností prutů 76,2 mm. Rychlost projektilu je 743 m.s⁻¹ a dopad kolmý k testovacímu tělesu. Porovnání čelní a zadní strany perforovaného vzorku z experimentu a simulace je na obr. 37 a 38. Na čelní straně je patrné tlakové poškození vzorku a na odvrácené straně poškození způsobené tahovým namáháním. Při porovnání simulace a experimentu je patrné, že rozsah porušení na čelní straně je menší než na straně odvrácené, že na obou se vyskytují radiální trhliny na čelní straně způsobené tlakovými vlnami a radiální s tangenciálními trhlinami na odvrácené straně způsobené tahovými vlnami. Na obr. 39 je zobrazen řez simulovaným vzorkem, vlevo je zaznamenána deformace tlakovým a vpravo deformace tahovým namáháním. [41]



Obrázek 37: Tlakové porušení přední strany desky a její simulace [41]

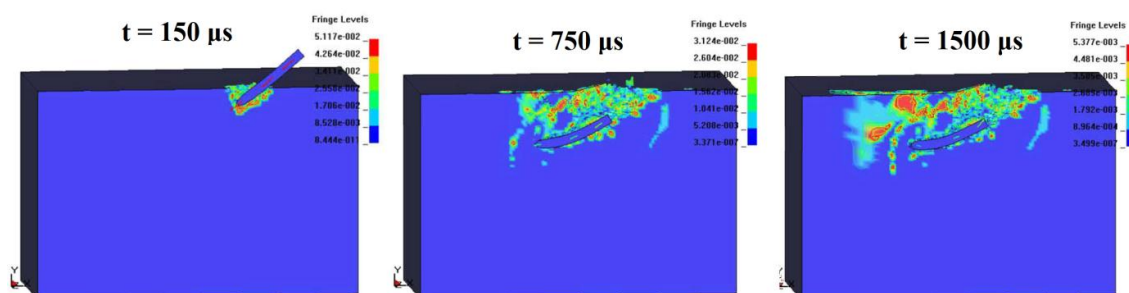


Obrázek 38: Tahové porušení zadní strany desky a její simulace [41]



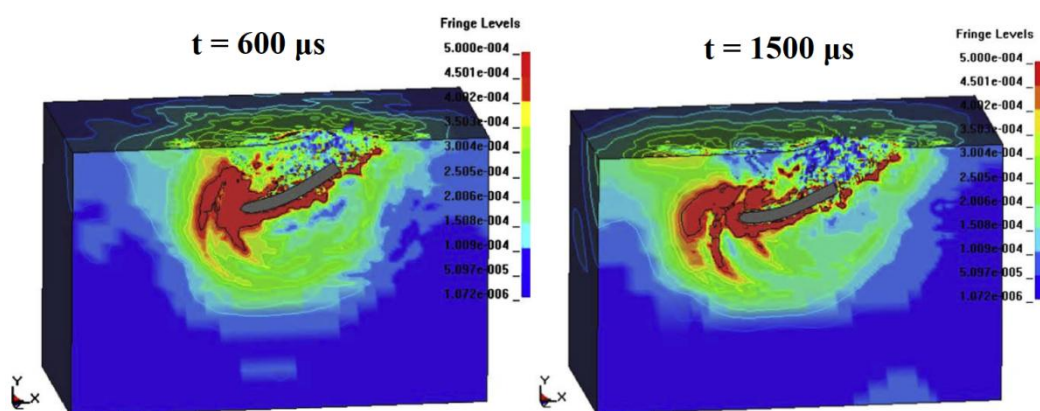
Obrázek 39: Řez simulovaným cílem s rozdělením tlakového a tahového poškozením [41]

Po ověření funkčnosti modelu přešel Liu a kol.[41] k simulaci šikmého dopadu projektilu. Namodelován byl vzorek s tloušťkou 800 mm z betonu s objemovou hmotností 2280 kg.m^{-3} a pevností v tlaku 30 MPa. Projektil je uvažován délky 180 mm a průměru 20 mm. Na obr. 40 je zobrazen časový vývoj tahového porušení betonu a deformace projektilu při dopadové rychlosti 540 m.s^{-1} pod úhlem 43° . [41]



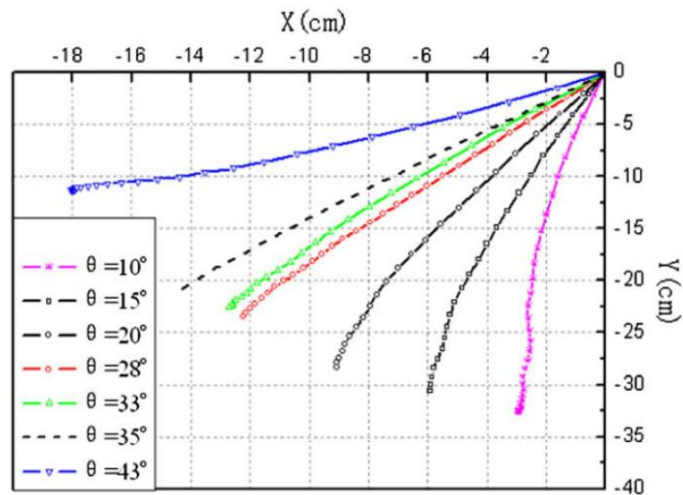
Obrázek 40: Tahové porušení vzorku po dopadu projektilu [41]

V počáteční fázi procesu penetrace je patrné vyražení materiálu způsobené vysokou rychlostí střely. S růstem hloubky penetrace klesá rychlost projektilu. U povrchu dopadu projektilu se objeví tahové poškození způsobené odraženou tahovou napětíovou vlnou. Pokud tahové napětí překročí pevnost materiálu v tahu, dojde k rozvoji trhlin a oslabení materiálu. Toto oslabení vede ke změně směru pohybu střely, jelikož se pohybuje ve směru nejmenšího odporu. Na obr. 41 je zobrazeno von Misesovo efektivní napětí, které ukazuje nesymetričnost napětíových vln během penetračního procesu. Je patrné, že efektivní napětí je větší v oblasti přední části projektilu. [41]



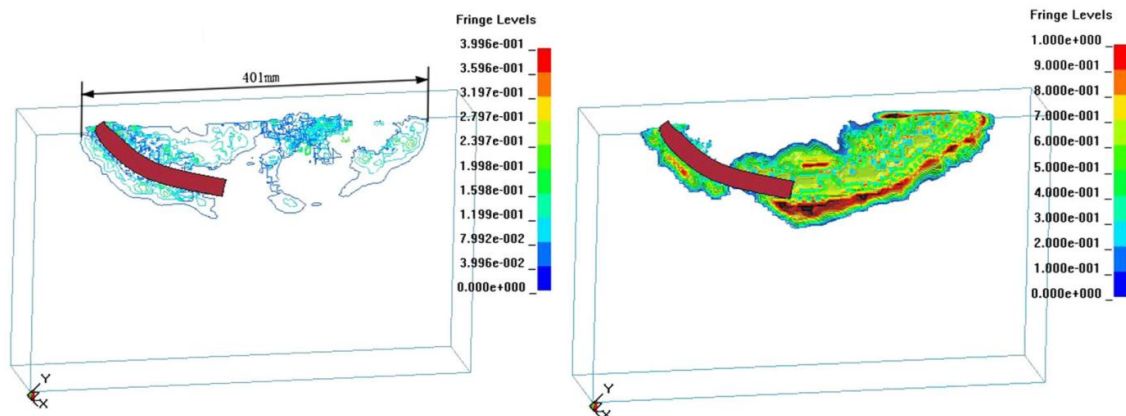
Obrázek 41: Von Misesovo efektivní napětí ($\times 100 \text{ GPa}$) [41]

Z analýzy dopadu projektilu vyplývají také jeho trajektorie závislé na úhlu, pod kterým zasáhl cíl. Tyto trajektorie jsou zaznamenány na obr. 42, z nichž je patrné, že se zvětšujícím se úhlu dopadu klesá hloubka penetrace. [41]



Obrázek 42: Trajektorie čela projektilu po zasazení cíle [41]

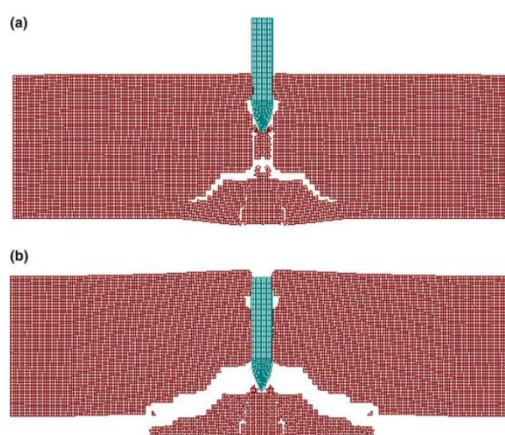
Při úhlu 45° došlo při simulaci k odrazu střely. Tento případ je zaznamenán na obr. 43, kde je deformace projektilem rozdělena na deformaci způsobenou tahovým a tlakovým napětím. Je zde znát, že oblast tahového přetvoření se nachází u povrchu zasazeného vzorku a oblast tlakového přetvoření v blízkosti projektilu. [41]



Obrázek 43: Tahové a tlakové přetvoření po nárazu projektilu [41]

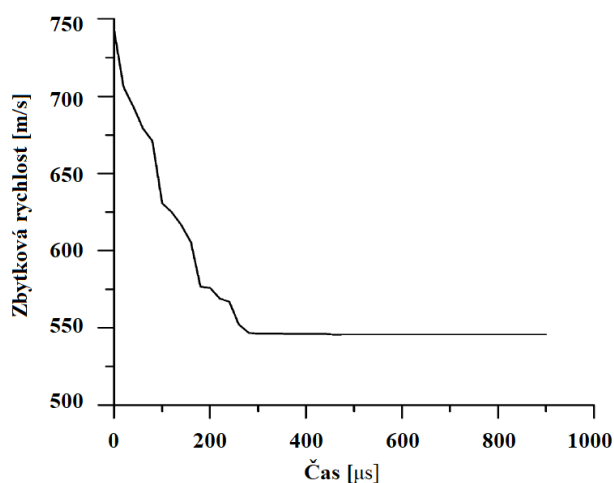
Jako referenční práci Hanchaka [42] využil také Teng a kol. [43] ve své 2D simulaci pomocí metody konečných prvků. Simulována je betonové konstrukce o rozměrech $610 \times 610 \times 178$ mm s výztužnou sítí s průměrem prutu 5,69 mm. Projektilem je ocelová střela s předním ogiválem s celkovou délkou 143,7 mm a průměrem 25,4 mm. Objemovou hmotnost betonu uvažují 2520 kg.m^{-3} , modul pružnosti 20,68 GPa a Poissonovo číslo 0,18. Pomocí metody Mori-Tanaka autoři odvozují ekvivalentní tenzor poddajnosti zohledňující základní betonovou matici a inkluze v podobě výztužné sítě. [43]

Na obr. 44 je zaznamenána simulace kolmého dopadu s počáteční rychlostí 382 m.s^{-1} v časech 300 a 1050 μs po dopadu střely na cíl. Je zde patrné, že do času 300 μs projektil částečně penetruje cíl a projeví se také scabbing. Z toho plyne, že rychlost napěťové vlny je mnohem větší než pohyb projektilu. V čase 1050 μs je zřejmé vytlačování části betonu porušené scabbingem. Dochází ke smykovému porušení materiálu a vzniku kráteru na odvrácené straně k dopadu projektilu. [43]



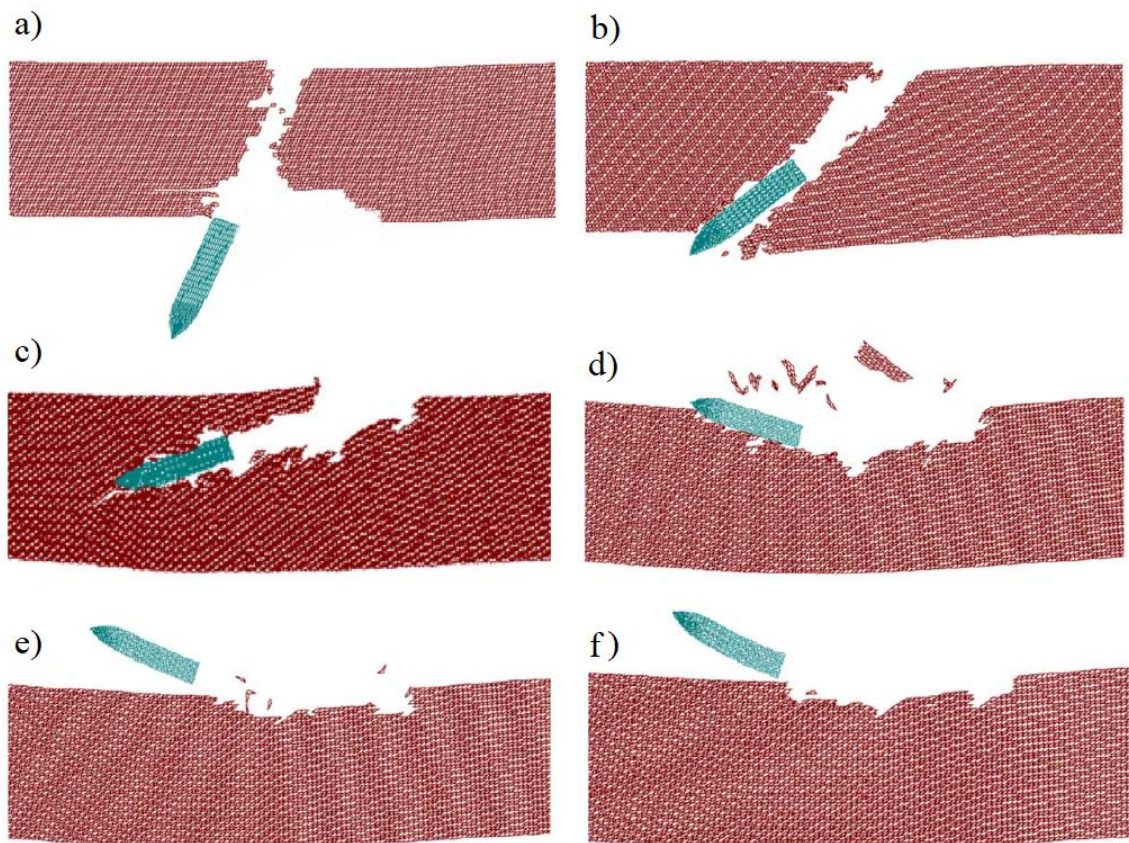
Obrázek 44: Kolmý dopad v čase 300 a 1050 μs [43]

Ze simulace vyplývá také závislost změny rychlosti projektilu na čase (obr. 45). Tentokrát je uvažována počáteční rychlost 743 m.s^{-1} a v tomto případě, po penetraci cíle, má střela zbytkovou rychlost rovnou přibližně 550 m.s^{-1} . Z grafu je zřejmé, že rychlost neklesá lineárně. Velikost zpomalení projektilu koresponduje s mechanismem porušení železobetonového cíle.



Obrázek 45: Změna rychlosti projektilu v čase [43]

V dalším kroku je simulován šikmý dopad projektilu s dopadovou rychlostí 743 m.s^{-1} . Úhel dopadu je definován jako rozdíl od kolmého dopadu a čas „nula“ jako čas dopadu projektilu na cíl. Na obr. 46-a je zaznamenána perforace pod úhlem 20° v čase $580 \mu\text{s}$. V tomto případě je patrné, že projektil nezměnil po čas perforace cíle svojí trajektorii a dále velký účinek tahového poškození na odvrácené straně. Na obr. 46-b je zaznamenána perforace pod úhlem 40° v čase $480 \mu\text{s}$. Projektil penetroval cíl a jeho trajektorie se mírně odklonila od počátečního směru. Autoři uvádějí, že poloměr oblouku, jenž trajektorie opisuje, závisí na tvaru špičky projektilu a dopadové rychlosti. Na obr. 46-c je zachycen dopad pod úhlem 55° v čase $640 \mu\text{s}$. Při tomto úhlu dojde k zaseknutí střely v materiálu. Obr. 46-d až 46-f zaznamenávají dopad projektilu v čase $720 \mu\text{s}$ pod úhlem $58, 60$ a 61° . V prvním případě dojde k penetraci cíle do přibližně třetinové tloušťky cíle s razantní změnou trajektorie střely. Ve druhém případě je kráter po dopadu střely mnohem menších rozměrů. V posledním případě tangenciální složka vektoru rychlosti (směrem vlevo) převyšuje nad normálovou složkou (směrem dolů), a proto se trajektorie střely odkloní od cíle ve směru hodinových ručiček. Toto otáčení závisí na velikostech složek vektoru rychlosti, na velikosti rotace střely kolem podélné osy a třecí síle mezi střelou a materiálem cíle. [43]



Obrázek 46: 2D simulace šikmého dopadu projektilu na železobetonový cíl [43]

3 Praktická část

V rámci experimentálního programu výzkumu šikmého dopadu na cementový kompozit vyztužený rozptýlenou výztuží je navrženo využít jako testované vzorky desky o rozměru 300×400 mm. Deska s těmito rozměry se v oboru výzkumu balistické odolnosti již několikrát osvědčila. Byla použita například v práci Máci [31] nebo Sovjaka [30; 32] a také v mnoha bakalářských a diplomových pracích, jejichž autory jsou studenti ČVUT. [44; 45; 46; 47; 48; 49]

Tloušťka desky je zvolena 40 mm. Důvodem jsou výsledky dat z experimentálního programu [31] a [32], kde byly testovány desky z obdobného materiálu, jenž je použit v této diplomové práci. V těchto pracích byly použity desky o tloušťkách 45 a 50 mm. V případě tloušťky 50 mm nedošlo v některých případech k perforaci desky při kolmém dopadu střely, což je v rozporu s požadavkem této práce. Pro zaručení perforace desky při kolmém dopadu střely je proto zvolena tloušťka 40 mm.

Ze zkušeností z výše zmíněných prací vyplývá také volba použitého typu střely. Projektil ráže $7,62 \times 39$ mm se stal již běžnou součástí experimentů v tomto oboru. Konkrétně je zvolena varianta střely s ocelovým jádrem, z důvodu její vyšší průbojnosti oproti projektilu s čistě olovenou výplní.

Šikmý dopad je realizován střelbou pod dopadovým úhlem v rozmezí 20° a 60° . K tomu jsou vzorky otestovány kolmým dopadem projektilu z důvodu srovnání s jeho šikmým dopadem.

V rámci porovnání vzniklého poškození je měřena hloubka penetrace projektilem, povrch kráteru, jeho rozměry a objem. Dále je vyhodnocován také tvar vzniklého kráteru.

K naměření těchto charakteristik je využito mimo jiné také 3D skeneru David a laserového senzoru optoNCDT 1302. Data z těchto zařízení jsou následně vyhodnocována za pomoci dalších programů, jako jsou například tabulkové procesory, program CAD nebo MeshLab. Objem kráteru je měřen jeho vysypáváním jemným pískem.

Pro pochopení vzniku poškození vlivem dopadu projektilu je práce doplněna také o záznam z vysokorychlostní kamery.

3.1 Materiál a jeho komponenty

Materiálem použitým na výrobu testovaných vzorků je ultra-vysokohodnotný beton vyztužený ocelovými vlákny dle [50]. Skládá se z běžných surovin na výrobu betonu tohoto typu a je charakteristický nízkým poměrem vody k pojivu, tzv. vodním součinitelem. Hlavními složkami jsou portlandský cement, mikrosilika, křemičitá moučka, křemičitý písek plynulé granulometrie 0,1 až 1,2 mm a plastifikátor ve formě prášku. Jako rozptýlená výztuž byla použita vysokopevnostní ocelová vlákna přímého tvaru o délce 14 mm a průměru 0,13 mm. Materiál, z něhož jsou vlákna vyrobená, má hustotu 7850 kg.m^{-3} modul pružnosti 200 GPa a pevnost v tahu 2800 MPa. Ve výsledném materiálu byla rozptýlená výztuž zastoupena ve 2 % objemových.

Takto navržený cementový kompozit, použitý i v práci Kravanji a Sovjaka [51], má objemovou hmotnost 2420 kg.m^{-3} , disponuje pevností v tlaku 144 MPa, pevností v jednoosém tahu 6,52 MPa, pevností v tahu za ohybu 26,1 MPa a lomovou energií $17,7 \text{ kJ/m}^2$.¹

3.2 Výroba vzorků

Pro výrobu byla použita předem připravená suchá směs vyrobena firmou STACHEMA CZ s.r.o. dávkovaná v pytlích. Tato prefabrikovaná suchá směs byla promíchána po dobu 5 minut ve vertikální laboratorní míchačce o objemu 20 l, poté byla přidána část připravené vody a mícháno po dobu dalších 5 minut. Po uplynutí tohoto času byly přidány vysokopevnostní ocelové drátky a zbytek záměšové vody (výsledný vodní součinitel v/c roven 0,25). Toto kompletní složení bylo mícháno dalších 5 minut a celková doba míchání byla tedy 15 minut.

Připravené formy opatřené odbedňovacím přípravkem byly poté naplněny do poloviny výšky čerstvou směsí, uloženy na vibrační stůl a vibrovány po dobu 10 s. Poté se formy doplnily a na vibračním stole vibrovaly opět po dobu 10 s. Naplněné formy byly poté zakryty PE folií pro zamezení nadměrného odpařování vody a odformovány po cca 45 hodinách. Následně byly uloženy do nádoby vodního uložení s výškou

¹ Tlaková pevnost určena na krychlích $100 \times 100 \text{ mm}$, pevnost v jednoosém tahu na vzorcích typu dog bone s minimální průřezovou plochou $100 \times 50 \text{ mm}$, pevnost v tahu za ohybu při 4 bodové zkoušce na trámcích o rozměrech $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ se vzdáleností mezi dolními podporami 450 mm. Lomová energie byla vypočtena jako plocha pod grafem závislosti deformace na napětí po vzniku trhliny při zkoušce tahu za ohybu.

hladiny vody 10 cm, kde je udržována relativní vlhkost vzduchu 95 % a teplota 20 °C. Zde byly vzorky ponechány až do dne zkoušky balistické odolnosti.



Obrázek 47: Komponenty UHPFRC, forma, laboratorní míchačka a uložená čerstvá směs

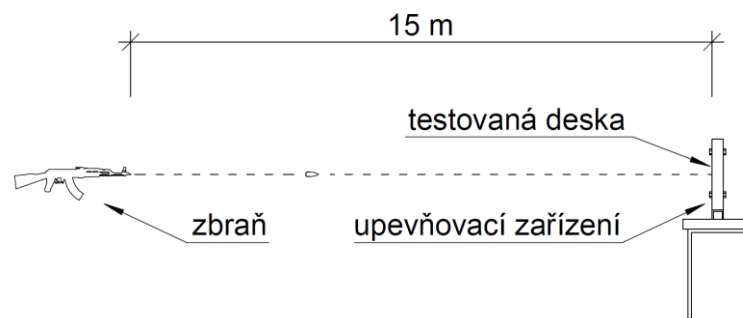
3.3 Mechanické vlastnosti

Součástí výroby desek pro určení jejich balistické odolnosti vůči dopadu projektilu pod různým úhlem byla vyrobena sada zkušebních těles o rozměru 40×40×160 mm. Jejich výroba a ošetřování proběhlo obdobně jako u desek. Účelem výroby těchto zkušebních těles bylo ověření mechanických vlastností daného materiálu. Po 28 dnech od výroby byly tyto vzorky změřeny a zváženy pro určení objemové hmotnosti cementového kompozitu a dále podrobeny zkoušce v tahu trojbodovým ohybem dle normy ČSN EN 196-1. Zde se však musí brát v potaz fakt, že velikost trámce výrazně ovlivňuje výsledek získané pevnosti v tahu za ohybu. Pevnosti zjištěné na malých trámcích rozměru 40×40×160 mm vykazují vyšší hodnoty (přibližně 1,5 až 2 násobek) ve srovnání s výsledkem zkoušky na stejném materiálu provedené na trámcích rozměru 150×150×700 mm s vrubem dle normy ČSN EN 14651+A1. U menších trámců se patrně výrazněji projevuje stěnový efekt, který se vyznačuje preferovanou orientací vláken u stěn formy. Po zkoušce ohybem byly vzorky vyzkoušeny v jednoosém tlaku.

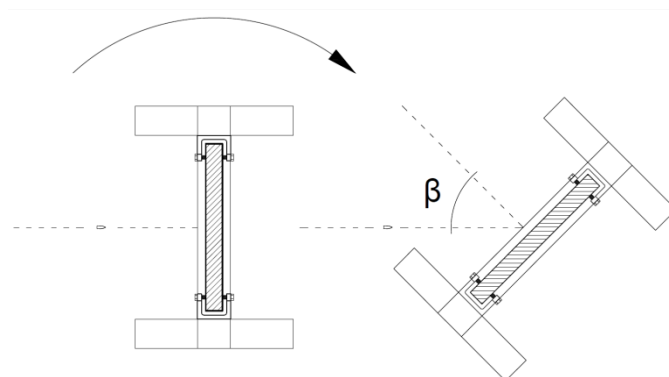
Ze zkoušek vlastností zkušebních trámců o rozměru 40×40×160 mm vyplývá, že použitý materiál má objemovou hmotnost v rozmezí 2420 až 2460 kg.m⁻³. Pevnost v tlaku vykazovaly vzorky od 147 do 151 MPa a pevnost v tahu za ohybu od 34 do 37 MPa. Jak už bylo zmíněno, pevnost v tahu za ohybu je značně ovlivněna rozměry zkušebního tělesa. Z výsledků je možné potvrdit shodné vlastnosti cementového kompozitu s 2 % ocelových vláken použitým v práci Kravanji a Sovjaka [51].

3.4 Zkouška balistické odolnosti

Zkouška balistické odolnosti proběhla na střelnici, kde byla připravena sestava upevňující desku do vertikální polohy. Vzdálenost mezi ústím hlavně použité zbraně a cílem byla nastavena na 15 m. Schéma zkoušky je zobrazeno na obr. 48. Šikmý dopad projektilu β je definován jako rozdíl od kolmého dopadu na cíl. Tento úhel byl nastaven pomocí natačení celého upevňovacího systému, jak je znázorněno na obr. 49. Takto byla deska natočena pod úhlem 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 a 60°.



Obrázek 48: Schéma zkoušky balistické odolnosti



Obrázek 49: Natačení systému pro zajištění šikmého úhlu dopadu

Jako zbraň byla použita poloautomatická puška CZ 858 ráže 7,62 × 39 mm, což je civilní verze bývalé československé vojenské útočné pušky SA-58. Vystřelovaný projektil je celoplášťový s ocelovým jádrem a olověnou špičkou a košilkou. Na obr. 50 je zachycen řez konstrukčními vrstvami projektilu 7,62 × 39. Celková hmotnost střely je 8,04 g, přičemž košilka má hmotnost 4,15 g, špička 0,24 g a ocelové jádro 3,65 g. Vnější průměr střely je 7,92 mm a průměr ocelového jádra je 5,68 mm. Ústovou rychlost střely lze uvažovat přibližně 720 m.s⁻¹ a její ztrátu na vzdálenost 15 m zanedbatelnou, tudíž lze předpokládat, že dopadová energie je přibližně 2000 J.

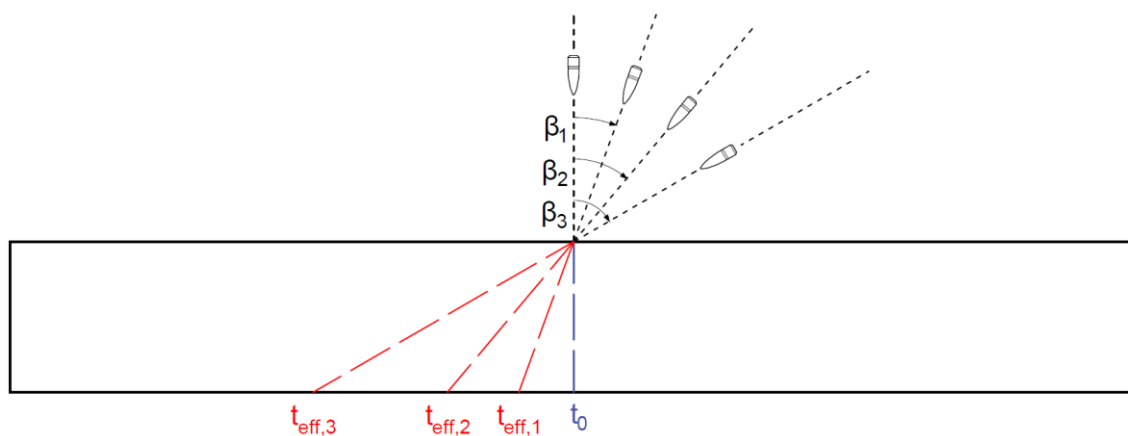
Každá z desek byla zasažena až na výjimky dvakrát a zároveň pro každý zvolený úhel byly až na výjimky k dispozici 2 desky, tzn. z každého testovaného úhlu dopadu projektilu je možné získat 4 sady dat příslušných charakteristik vzniklého poškození.



- A – ocelové jádro
- B – olověná košilka
- C – ocelový plášť

Obrázek 50: Řez střelou 7,62 × 39 [14]

S narůstajícím úhlem dopadu se zvětšuje vzdálenost, kterou by měl teoreticky projektil penetrovat skrz materiál. Pro tuto vzdálenost je použit termín efektivní tloušťka cíle. Je vypočítána jako tloušťka testované desky, tedy 40 mm, vynásobená kosinem dopadového úhlu β . Znázornění efektivní tloušťky cíle je zobrazeno na obr. 51. Hodnoty efektivní tloušťky náležející uhlům dopadu projektilu vyskytující se v této práci jsou vyčísleny v tab. 4.



Obrázek 51: Efektivní tloušťka cíle

Tabulka 4: Efektivní tloušťka cíle

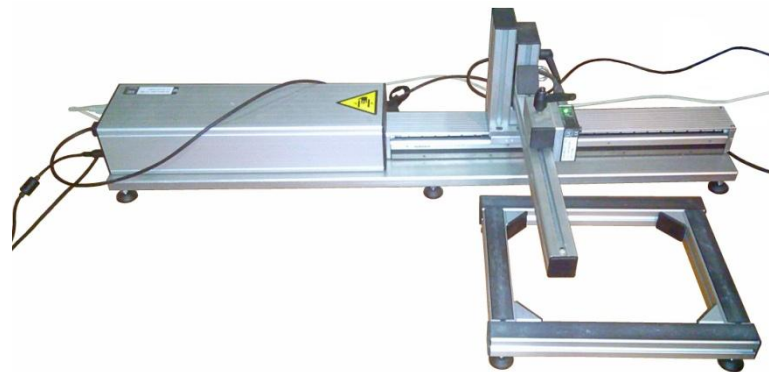
Úhel dopadu β [°]	0	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Efektivní tloušťka [mm]	40,0	42,6	44,1	46,2	48,8	52,2	56,6	62,2	69,7	80,0

3.5 Metody vyhodnocení experimentu

Součástí praktické části této práce je vyhodnocení několika charakteristik typických pro kráter vzniklý po dopadu projektilu. Je to hloubka penetrace vzorku projektilem, rozměry a povrch kráteru v rovině dopadové plochy testovaného vzorku, celkový povrch stěny vzniklého kráteru, objem kráteru a jeho celkový tvar.

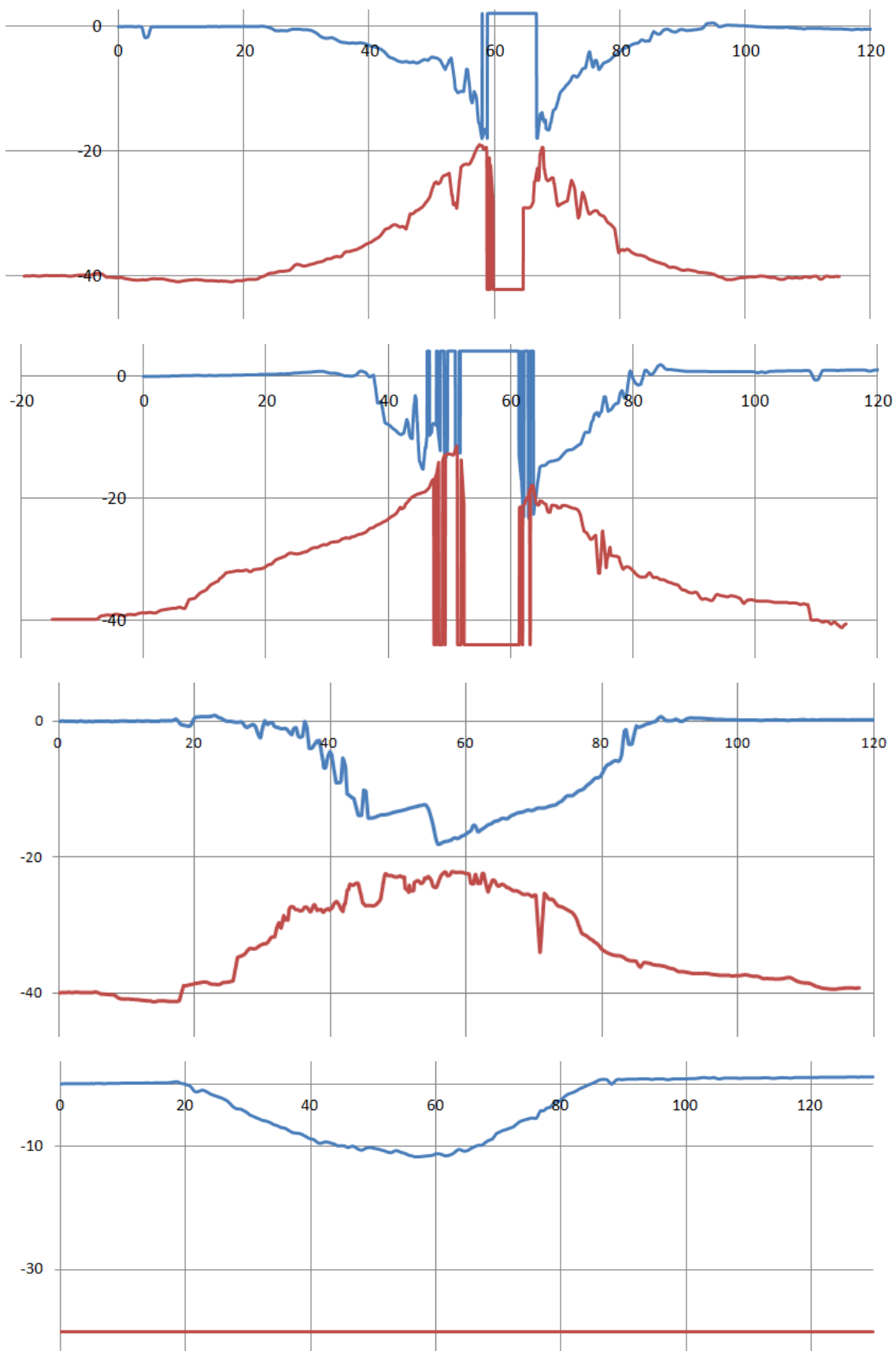
3.5.1 Hloubka penetrace a profil kráteru

Hloubka penetrace byla měřena pomocí laserového senzoru optoNCDT 1302 upevněného na pohyblivý hliníkový rám (obr. 52). Deska s krátery po dopadu projektilu se položila na podložku, proběhlo nastavení softwaru pro vyhodnocení měření laserovým snímačem a následně proběhlo samotné měření, kdy se rameno se senzorem pohybovalo nad kráterem za současného zaznamenávání informací o jeho hloubce.



Obrázek 52: Senzor optoNCDT 1302 na pohyblivém hliníkovém rameni

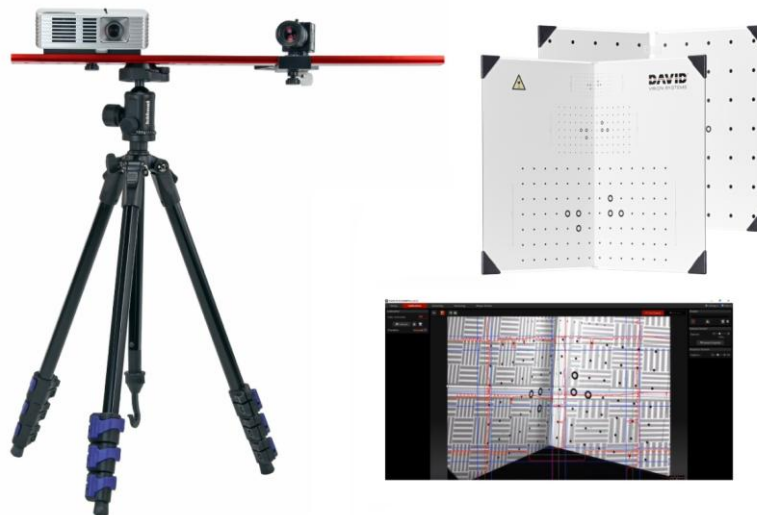
Pomocí tohoto zařízení byla získána data pro vyhodnocení celkového profilu vzniklého kráteru ve směru dopadu střely na cíl. Tato data byla vložena do tabulkového procesoru. Povrch desky, který byl zasažen projektilem, byl nastaven na hladinu rovnou nule, potom povrch desky odvrácený tomuto dopadu je nastaven na hladinu -40 . Na obr. 53 jsou zaznamenány 4 příklady skenu kráteru vyhodnocené v tabulkovém procesoru. Konkrétně se jedná o desku zasaženou kolmo a poté pod úhlem 30 , 40 a 55° . Na křivkách zobrazeného profilu povrchu kráteru jsou evidentní píky, které vznikly při tom, když laserový snímač místo povrchu zaznamenal vyčnívající ocelový drátek. Dále jsou v místě průstřelu desky patrné oblasti křivky, kdy se měřená vzdálenost dostala mimo rozsah měřicího zařízení. Pro lepší grafický výstup byly tyto profily vloženy do CAD programu, kde byly tyto vady odstraněny. Konečné vyhodnocení profilu kráteru desek zasažených projektilem pod různým úhlem dopadu je na obr. 62.



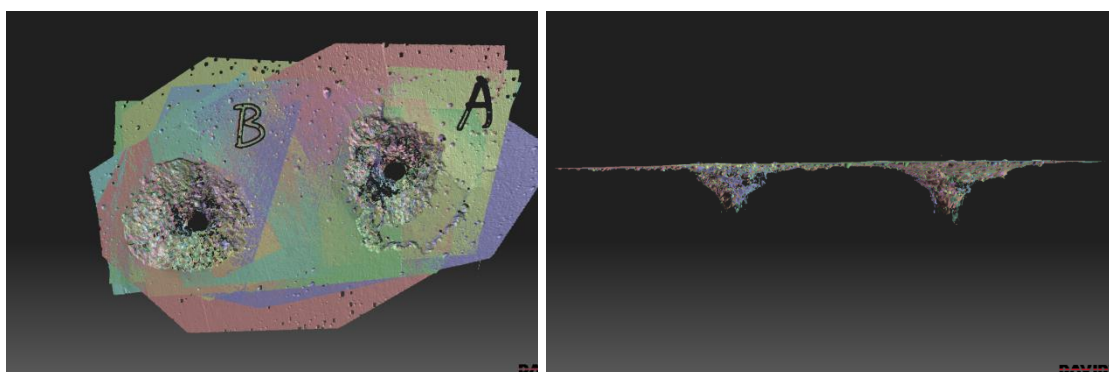
Obrázek 53: Skeny profilu kráteru ve směru dopadu střely zobrazeny v tabulkovém procesoru

3.5.2 Povrch kráteru a jeho celkový tvar

Pro vyhodnocení tvaru kráteru a určení jeho povrchu byl použit 3D skenovací systém David SLS-2. Tento systém umožňuje naskenovat předmět, v tomto případě desku s krátery vzniklými při dopadu projektilu, a následně sken převést do 3D objektu, se kterým je možno dále pracovat v jiném softwaru. Na obr. 54 je zobrazen projektor a snímací kamera na stativu, kalibrační deska a náhled na plochu softwaru při kalibraci. Obr. 55 zobrazuje celkový sken sloučený z několika jednotlivých skenů vzniklých zaznamenáním tvaru kráteru snímaného pod různými úhly. Tímto systémem byly naskenovány všechny krátery vzniklé při dopadu projektilu.



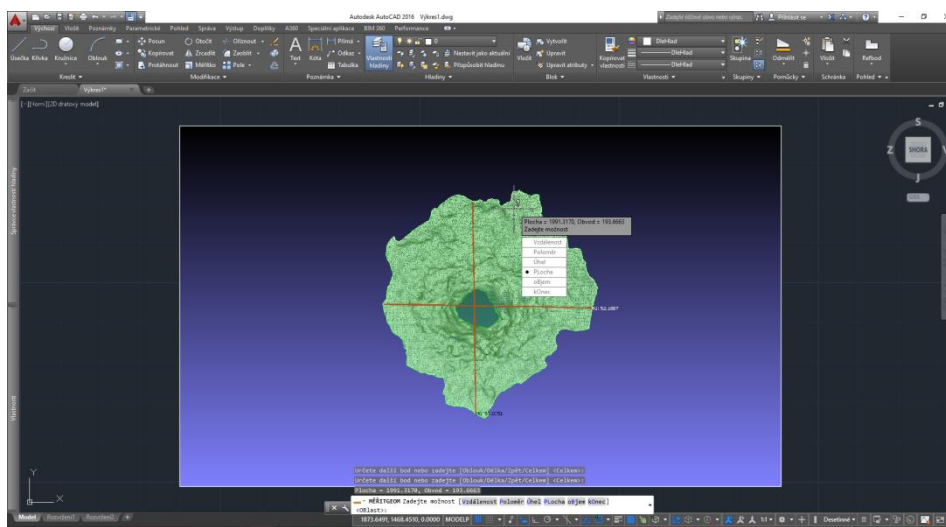
Obrázek 54: Software David SLS a jeho příslušenství



Obrázek 55: Sloučené skeny pro vytvoření 3D objektu v předním a bočním pohledu

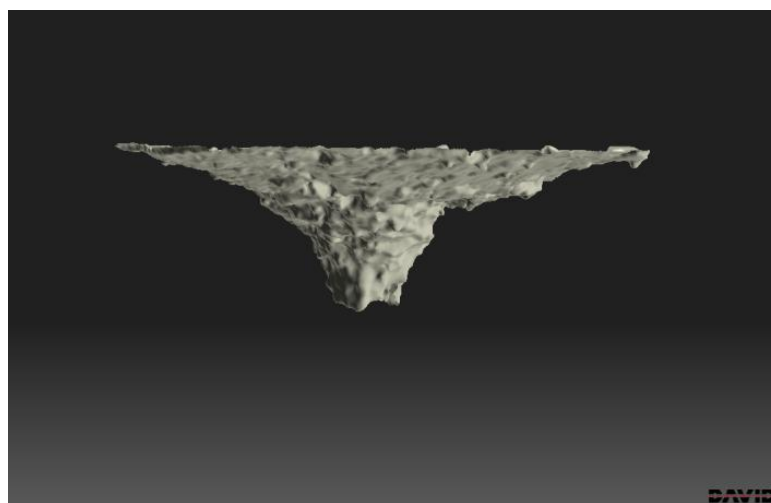
Program umožňuje vyříznutí samotného kráteru. V momentě, kdy je 3D objekt tvořen pouze kráterem je možné přímo z programu David získat informace o jeho povrchu – tzv. 3D povrchu, tzn. povrchu stěn kráteru. Co se týká povrchu kráteru v rovině dopadové plochy testované desky, bylo nutné provést řady dalších úkonů.

Vzniklý 3D objekt jednotlivých kráterů byl vložen do prohlížeče umožňujícího takové formáty prohlížet, následně byl natočen tak, aby rovina kráteru byla rovnoběžná s rovinou průmětu na obrazovce. Takto natočený kráter byl zaznamenán do grafického souboru a ten poté vložen do CAD programu, kde bylo nastaveno jeho skutečné měřítko. Nakonec byl přes funkci měření povrchu vybrán obvod kráteru a změřen tzv. 2D povrch. Na obr. 56 je zaznamenána poslední fáze měření 2D povrchu pomocí CAD programu.



Obrázek 56: Měření 2D povrchu kráteru pomocí CAD programu

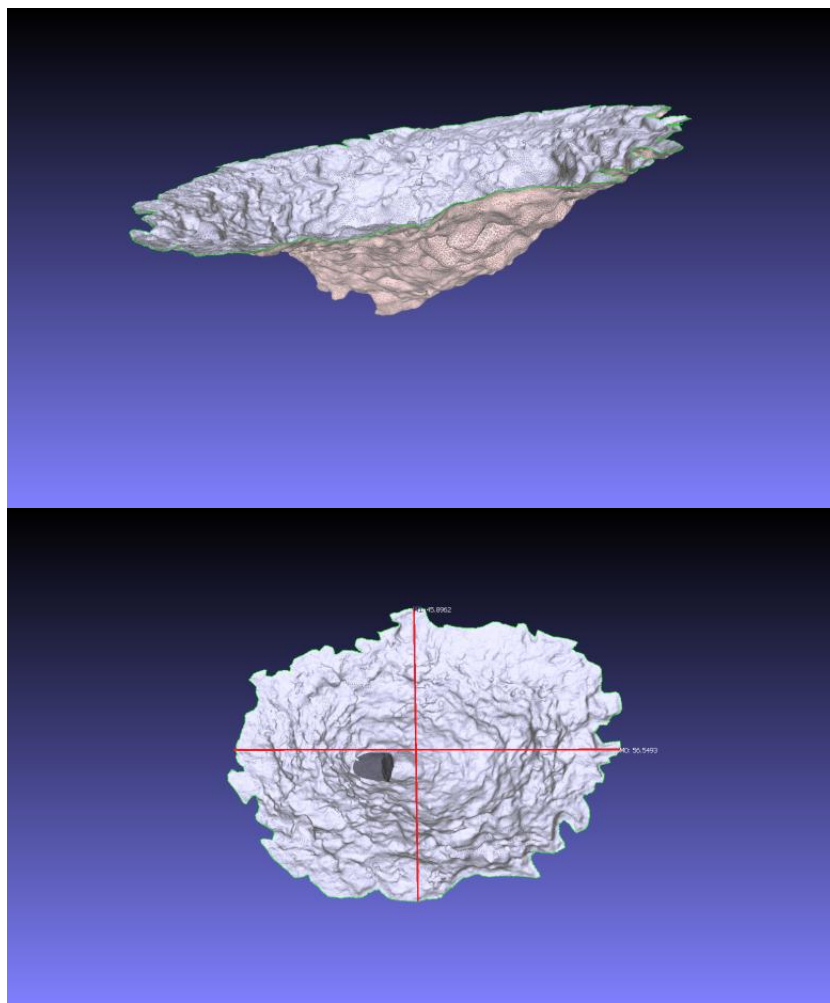
Samotný tvar 3D objektu vzniklého kráteru dává informace o poškození a jeho průběhu při dopadu projektilu na cíl. Porovnání kráterů vzniklých po dopadu střely pod různými úhly nalezneme na obr. 63. Na obr. 57 je zobrazen 3D objekt vzniklý spojením několika skenů, který byl následně vyříznut.



Obrázek 57: 3D objekt kráteru v programu David

3.5.3 Rozměry kráteru

Jednou ze základních charakteristik kráteru vzniklého po dopadu projektilu je jeho rozměr. V této práci bylo zvoleno měření dvou na sebe kolmých délek, jedné ve směru horizontálním – ve směru dopadu projektilu, a druhé ve směru vertikálním. Jelikož se zvětšujícím se úhlem dopadu se mění charakter kráteru, je také vypočítán poměr těchto délek, ze kterého lze odvodit přibližná změna tvaru kráteru. K měření rozměrů bylo použité buďto posuvné měřítko nebo software, který má funkci měření rozměrů u 3D objektů vygenerovaných z programu David. Program MeshLab, který již posloužil v generování grafického podkladu k měření povrchu kráteru v rovině dopadové plochy desky, má tuto funkci k dispozici. Na obr. 58 je zaznamenán pohled na kráter, grafické zvýraznění zaraženého jádra projektilu a měření rozměrů kráteru v programu MeshLab.



Obrázek 58: Prohlížení, grafická úprava a měření rozměrů v programu MeshLab

3.5.4 Objem kráteru

Stejně jako v pracích Liua [29] a Kravanji[52] byl objem kráteru měřen jeho plněním jemnozrnným pískem. V případě této práce bylo zvoleno křemičitého písku frakce 0,1 – 0,3 mm. Injekční stříkačka o objemu 20 ml (obr. 59) byla naplněna jemnozrnným pískem a poté s ní byl postupně vyplněn prostor kráteru s průběžným potřesením deskou k zajištění distribuce písku do všech prostor. V případě, že byla deska projektilem perforována a měla tedy otvor skrz celou svou tloušťku, byl tento otvor utěsněn, aby bylo odděleno měření objemu předního kráteru od zadního. Objem byl měřen s přesností na 0,5 ml. Na obr. 60 jsou zobrazeny krátery na zadní straně desky po měření objemu pomocí jemnozrnného písku.



Obrázek 59: Injekční stříkačka pro plnění kráteru pískem



Obrázek 60: Krátery vysypané jemnozrnným pískem

3.6 Výsledky

V této části diplomové práce budou prezentována naměřená data charakteristik poškození způsobeného dopadem projektilu doplněná o jejich závislost na úhlu dopadu a popsán charakter poškození testovaných vzorků.

3.6.1 Obecný charakter poškození a chování střely po dopadu na cíl

Za účelem vyšetření charakteru poškození po dopadu projektilu desek z cementového kompozitu vyztuženého ocelovou rozptýlenou výztuží byl zvolen interval úhlu 5° počínající úhlem 20° a končící úhlem 60° . Pro porovnání byly desky zasažené pod úhlem doplněny o referenční vzorky – desky s kolmým dopadem projektilu. Do každé desky až na výjimky byly vypáleny dva projektily ráže $7,62 \times 39$ s ocelovým jádrem. Nutno zmínit, že ocelový plášť střely se při dopadu deformuje a na penetraci cílem se poté podílí pouze ocelové jádro. Z výsledků dopadu projektilu na cíl vzešly tři základní typy chování:

- 1) Střela zcela perforuje cíl a pokračuje s reziduální rychlostí po trajektorii, která se může lišit oproti původní;
- 2) Střela penetruje desku a její jádro zůstane zaražené ve vzorku;
- 3) Střela se od vzorku odrazí.

Tabulka 5 zobrazuje chování projektilu po dopadu na cíl pod různým úhlem. Je zde patrný přechod mezi zmíněnými typy chování mezi úhlem 25° a 40° .

Tabulka 5: Chování projektilu po zásahu cíle

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40		45		50		55		60		
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	7	4N	6	5N	3N	1N	5		
Chování v cíli	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	ZS	CP	ZS	CP	ZS	ZS	ZS	O	O	O	O	O	O	O

Vysvětlivky k tabulce:

CP	Celková perforace desky
ZS	Jádro střely zaražené v desce
O	Odražení střely od desky

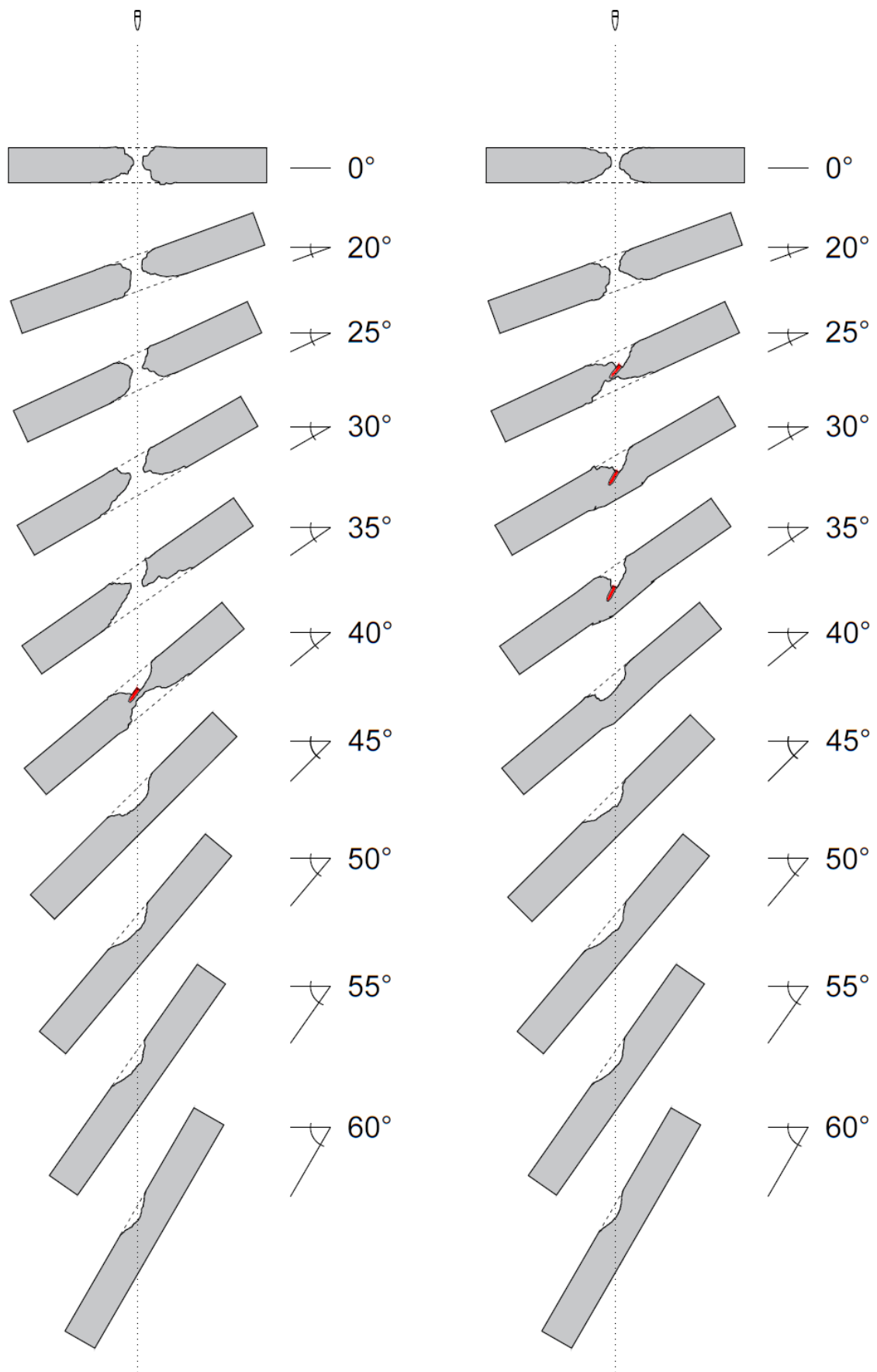
Po dopadu projektilu 7,62×39 na desku z ultra-vysokohodnotného kompozitu vyztuženého ocelovou rozptýlenou výztuží bylo patrné charakteristické poškození popsané v kap. 2.4. Desky tedy obsahovaly kráter na čelní straně způsobený převážně tlakovým namáháním, při dopadech pod větším úhlem se i na čelní straně výrazně projevovaly účinky tahového namáhání. Dále se vyskytoval kráter na odvrácené straně způsobený buďto čistě tahovým namáháním (tzv. scabbing) nebo namáháním tahovým v kombinaci se smykovým namáháním (smykové vyražení materiálu cíle). Mezi těmito krátery byl u některých úhlů dopadu patrný charakteristický „tunel“. Detailněji bude způsob poškození v závislosti na úhlu dopadu popsán v diplomové práci dále.

Na následující straně je zobrazena závislost chování střely a tvaru kráteru na úhlu dopadu projektilu (obr. 62). Zobrazení je výsledkem komplexního zpracování 3D objektů z programu David a dat získaných z měření hloubky penetrace pomocí laserového senzoru optoNCDT 1302. Obrázek 62 tedy zachycuje skutečný výsledek v reálném měřítku. Bylo doplněno jádro projektilu (červeně zbarveno) též ve skutečném měřítku, které v některých případech zůstalo zaraženo v desce. K jednomu úhlu přísluší jedna deska zasažena dvěma projektily. Pro přehlednost byly jednotlivé zásahy do jedné desky odděleny. Rozdělení zásahů nebylo náhodné, v pravém sloupci jsou zobrazeny z hlediska balistické odolnosti případy s příhodnějším výsledkem, v levém sloupci je tomu naopak. Pro toto zobrazení byly vybrány takové desky, aby bylo pokryto nejširší spektrum typů chování projektilu po dopadu na cíl.

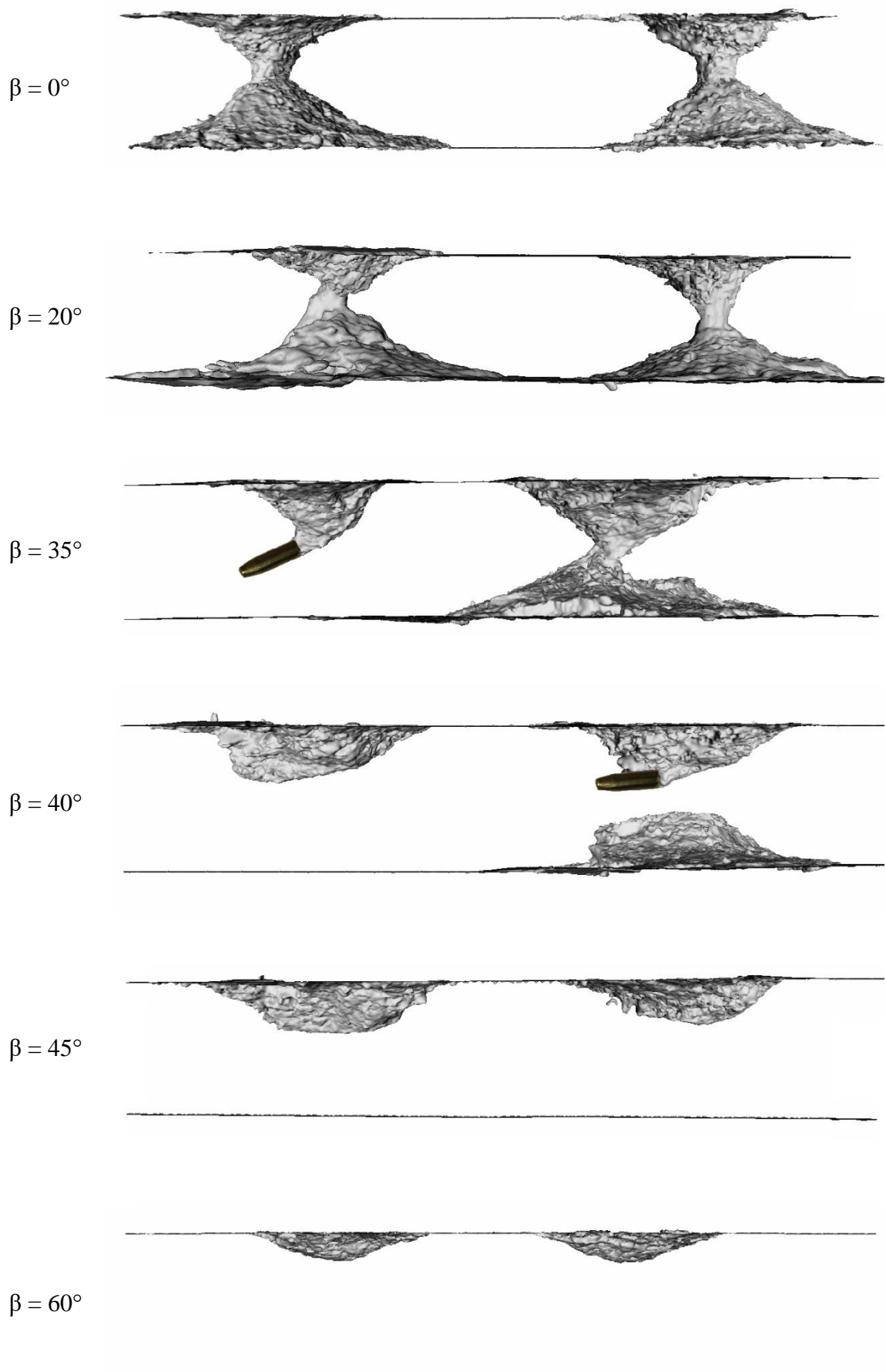
Poté jsou na obr. 63 zobrazeny tvary vzniklých kráterů získané z jednotlivých 3D objektů kráterů z programu David zpracované přes program MeshLab a doplněné o zobrazení ocelového jádra, které bylo natočeno tak, aby kopírovalo svojí část naskenovaného povrchu. Některá jádra střel byla nalezena v blízkosti testovaných desek a jsou zobrazena na obr. 61. Je zde patrné poškození přední části v porovnání s nepoškozeným ocelovým jádrem zobrazeným vpravo.



Obrázek 61: Ocelová jádra střel 7,62×39 mm



Obrázek 62: Řezy UHPFRC desek a jejich poškození způsobené dopadem projektilu 7,62×39 mm



Obrázek 63: Tvar kráterů po zásahu projektilem pod úhlem 0, 20, 35, 40, 45 a 60°

Na následujících obrázcích jsou zaznamenány různé typy chování projektilu v cíli od celkové penetrace desky, přes zaražení jádra v desce až po odraz střely od desky. Vždy je na obrázku vlevo zobrazena čelní strana a vpravo zadní strana testované desky. Dále jsou zaznamenány různé speciální případy.

Na obr. 64 je zobrazen průstřel desky při dopadovém úhlu $\beta = 20^\circ$, v otvoru je patrný „svlečený“ plášť střely.



Obrázek 64: Průstřel desky při dopadovém úhlu $\beta = 20^\circ$

Na obr. 65 je zobrazeno zaražené ocelové jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 40^\circ$. Na zadní straně je patrný scabbing s vyraženým materiálem.



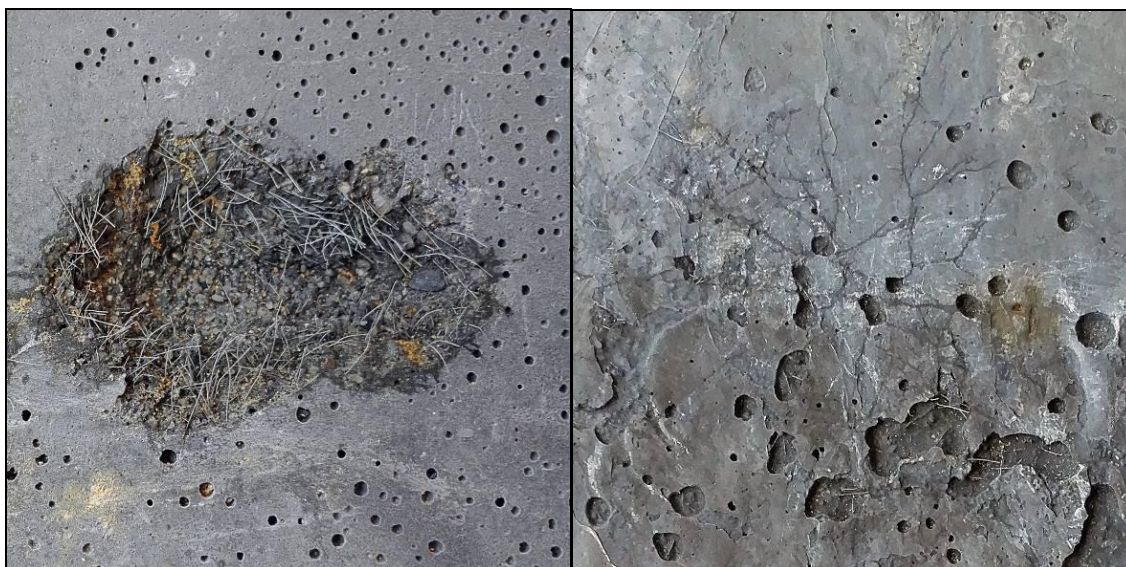
Obrázek 65: Zaražené jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 40^\circ$

Na obr. 66 je zobrazeno zaražené ocelové jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 35^\circ$. Na zadní straně je patrné tahové poškození materiálu.



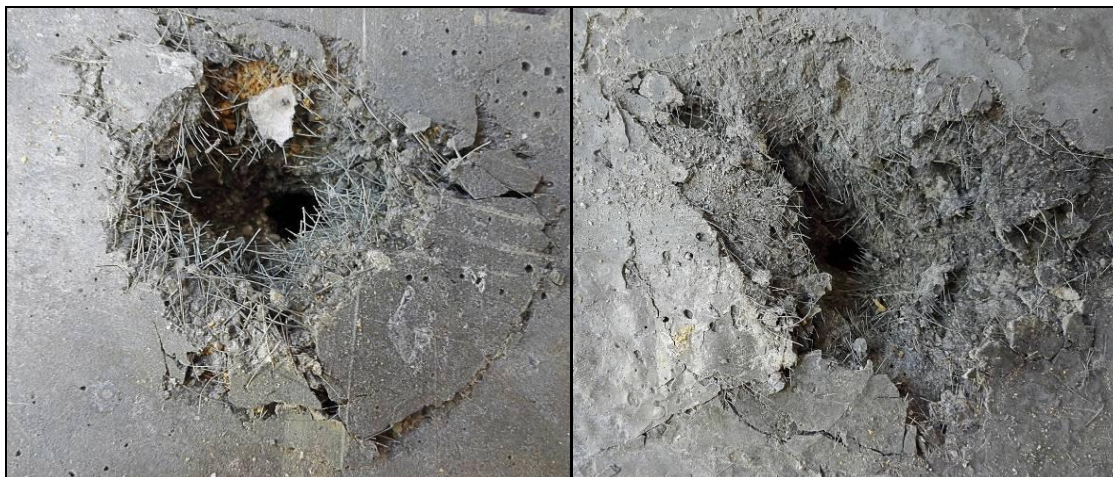
Obrázek 66: Zaražené jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 35^\circ$

Na obr. 67 je zobrazen kráter na čelní straně desky vzniklý po odrazu střely při dopadovém úhlu $\beta = 55^\circ$. Na zadní straně desky jsou patrné pouze drobné radiální trhliny.



Obrázek 67: Příklad odražení střely od desky při dopadovém úhlu $\beta = 55^\circ$

Speciálním případem porušení je na první pohled průstřel desky při dopadovém úhlu $\beta = 25^\circ$ zobrazeném na obr. 68. Při detailním pohledu na zadní stranu desky ale můžeme zpozorovat zaražené ocelové jádro střely, to je zobrazeno na obr. 69. V tomto případě došlo ke vzniku předního kráteru se současným scabbingem a došlo k propojení takto vzniklých kráterů. Střela ale změnila po dobu penetrace svoji trajektorii natolik, že již neměla dostatečnou energii jak pro pohyb daným směrem, tak i na porušení materiálu desky.



Obrázek 68: Poškozená deska při dopadovém úhlu $\beta = 25^\circ$



Obrázek 69: Zaražené jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 25^\circ$

3.6.2 Hloubka penetrace

Hodnoty hloubky penetrace desky z UHPFRC, projektilem ráže 7,62×39 mm s ocelovým jádrem pod úhlem $\beta = 0^\circ$ až $\beta = 60^\circ$ jsou zaznamenány v tabulce 6. Hloubka penetrace byla uvažována a měřena v případě, kdy došlo k zaražení jádra střely nebo k odrazu střely.

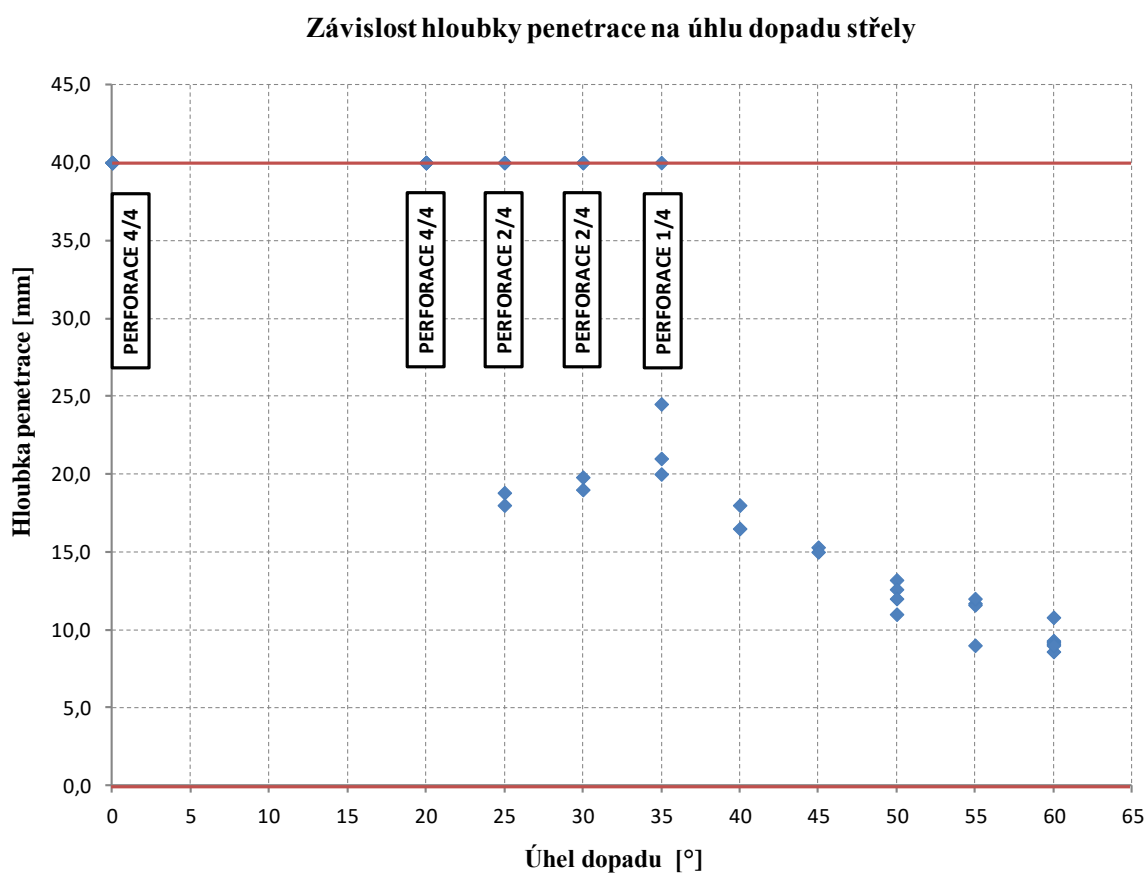
Tabulka 6: Hodnoty hloubky penetrace v závislosti na dopadovém úhlu β

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40		45		50		55		60														
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	4N	7	6	5N	3N	1N	5														
Hloubka penetrace [mm]	CP	CP	CP	CP	18,8	CP	18,0	CP	19,0	CP	19,8	CP	24,5	21,0	20,0	18,0	16,5	15,3	15,0	13,2	12,6	12,0	11,0	11,7	11,6	12,0	9,0	10,8	9,3	9,2	9,1	8,6	9,0

Vysvětlivky k tabulce:

CP Celková perforace desky

V grafu závislosti hloubky penetrace na dopadovém úhlu na obr. 70 jsou zaznamenány jak hodnoty penetrace v případě, kdy nedošlo k perforaci desky, tak i maximální hodnota rovna 40 mm pro celkovou perforaci desky.



Obrázek 70: Graf závislosti hloubky penetrace na dopadovém úhlu β

Červené je v grafu vyznačena celková tloušťka zkoušených vzorků. V případě kolmého dopadu a dopadu pod úhlem $\beta = 20^\circ$ došlo ve všech případech k celkové perforaci desky, při dopadových úhlech 25° a 30° došlo k perforaci desky ve dvou případech ze čtyř a při úhlu 35° došlo k perforaci pouze v jednom případě ze čtyř. Při dalším zvyšování hodnoty dopadového úhlu již nedocházelo k případu celkové perforace desky.

Nutno zmínit, že do hloubky penetrace není započítána hloubka zaražení ocelového jádra. Tato skutečnost velmi ovlivňuje výsledky a závislost hloubky penetrace na dopadovém úhlu β pro interval úhlů 25° až 40° . Proto by bylo možná správné hodnotit naměřené hodnoty nikoliv jako hloubku penetrace ale hloubku impaktního kráteru vzniklého tlakovým zatížením po dopadu projektilu. Toto téma je dále probíráno v kapitole 4.3, kde je hloubka zaražení ocelového jádra střely zohledněno, a je interpretována nová závislost hloubky penetrace na dopadovém úhlu β .

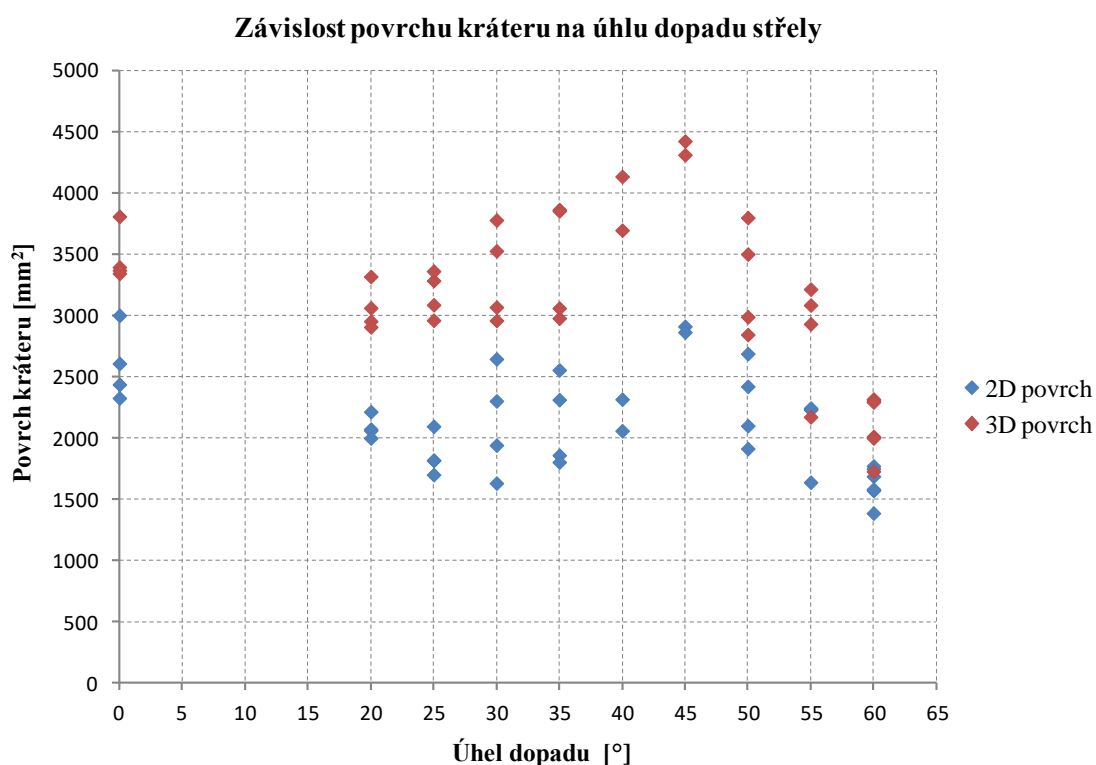
3.6.3 Povrch krátera

Povrch krátera v rovině plochy dopadu projektilu na cíl, tzv. 2D povrch a povrch stěn krátera, tzv. 3D povrch byl měřen pouze na dopadové straně testované desky. Jejich hodnoty v jednotkách mm^2 jsou zaznamenány v tabulce 7.

Tabulka 7: Hodnoty 2D a 3D povrchu kráterů na dopadové straně testované desky

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40		45		50		55		60																																								
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	4N	7	6	5N	3N	1N	5																																								
2D povrch krátera [mm^2]	3003	2328	2610	2439	2216	2074	2063	2001	2097	1819	1820	1702	2647	2304	1633	3070	1943	3866	2557	1861	2314	3062	1805	3698	2061	4137	2318	4314	2913	4426	2866	3801	2690	3503	2423	2991	2102	2846	1915	2933	2233	2174	1640	3087	2235	3217	2246	2319	1689	2014	1573	2308	1773	2295	1751	2001	1584	1729	
3D povrch krátera [mm^2]	3811	3397	3346	3371	3320	2955	3064	2908	3287	3364	2963	3089	3781	3529	2961	3070	1943	3866	2557	2980	1861	2314	3062	1805	3698	2061	4137	2318	4314	2913	4426	2866	3801	2690	3503	2423	2991	2102	2846	1915	2933	2233	2174	1640	3087	2235	3217	2246	2319	1689	2014	1573	2308	1773	2295	1751	2001	1584	1729

V grafu na obr. 71 je modrou barvou zaznamenána závislost velikosti 2D povrchu, červenou barvou pak závislost velikosti 3D povrchu na dopadovém úhlu β .



Obrázek 71: Graf závislosti 2D a 3D povrchu krátera na dopadovém úhlu β

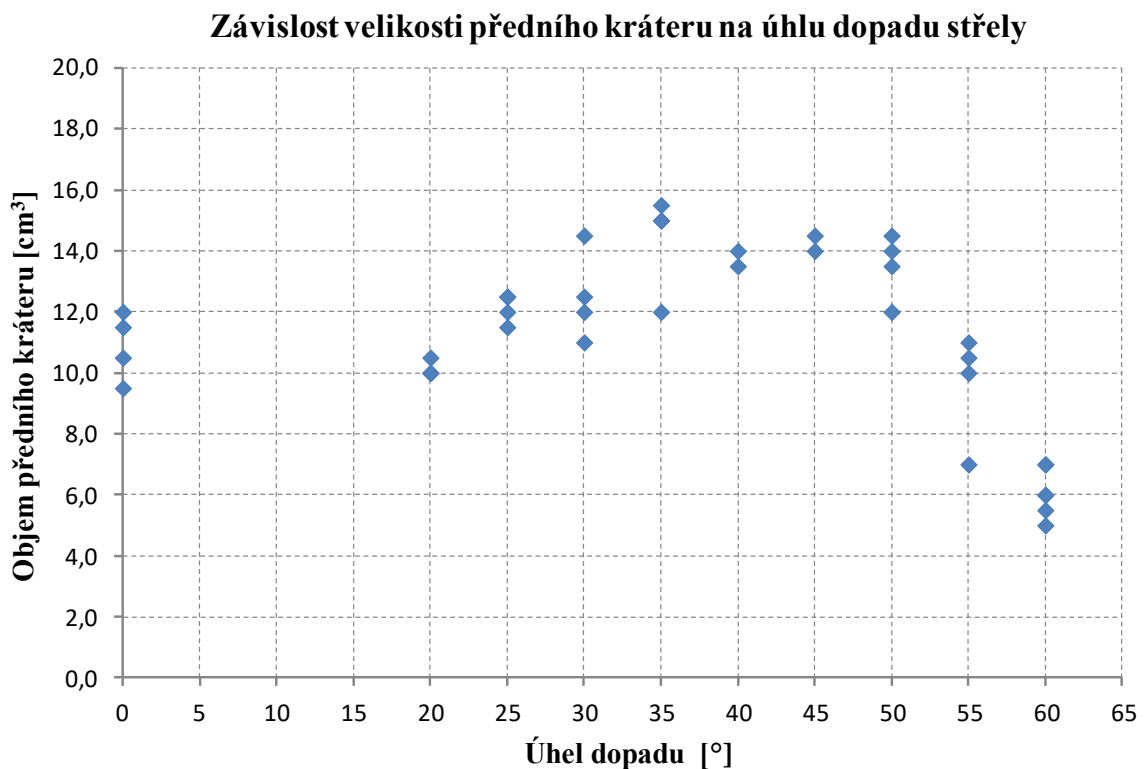
I když je rozptyl měřených hodnot poměrně velký, tak i z této závislosti lze vyvodit vzrůstající tendenci obou povrchů mezi úhlem $\beta = 20^\circ$ a $\beta = 45^\circ$. Poté nastane rychlý pokles velikosti povrchů krátera. Nutno si všimnout také větších hodnot při kolmém dopadu oproti dopadovému úhlu 20° . Tento interval doporučuji následovníkům této práce doplnit chybějícími daty, jinak je o něm možné pouze spekulovat.

3.6.4 Objem čelního kráteru

Tabulka 8 uvádí hodnoty velikosti objemu v jednotkách cm^3 , kráteru vzniklého po dopadu projektilu na čelní stranu testované desky. Závislost velikosti tohoto kráteru na dopadovém úhlu β je zobrazen na obr. 72. Do objemu je započítán pouze samotný kráter vzniklý počátečním impaktem, nikoliv tzv. tunel vzniklý v další fázi penetrace cíle projektilem, který se v některých případech vyskytoval. Objem tohoto tunelu byl určen z jeho rozměrů a jeho hodnota se pohybuje kolem $0,5 \text{ cm}^3$.

Tabulka 8: Hodnoty velikosti objemu čelního kráteru

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40		45		50		55		60																				
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	4N	7	6	5N	3N	1N	5																				
Objem čelního kráteru [cm^3]	12,0	9,5	11,5	10,5	10,5	10,0	10,0	10,0	11,5	12,0	12,5	14,5	12,5	12,0	11,0	15,5	15,0	15,0	12,0	13,5	14,0	14,0	14,5	13,5	12,0	14,0	14,5	10,0	10,0	7,0	10,5	11,0	7,0	6,0	6,0	6,0	7,0	5,5	5,0



Obrázek 72: Graf závislosti objemu čelního kráteru na dopadovém úhlu β

V intervalu úhlu dopadu $\beta = 20^\circ$ až $\beta = 35^\circ$ je u hodnoty objemu opět patrný nárůst velikosti stejně jako u předešlých charakteristik. Poté se hodnota objemu kráteru pohybuje kolem velikosti 14 cm^3 až po dopadový úhel 45° . Do hodnoty úhlu 60° pak trend strmě klesá. Opět je nutné si všimnout, že velikost kráteru při kolmém dopadu je v průměru mírně větší než u dopadu pod úhlem 20° .

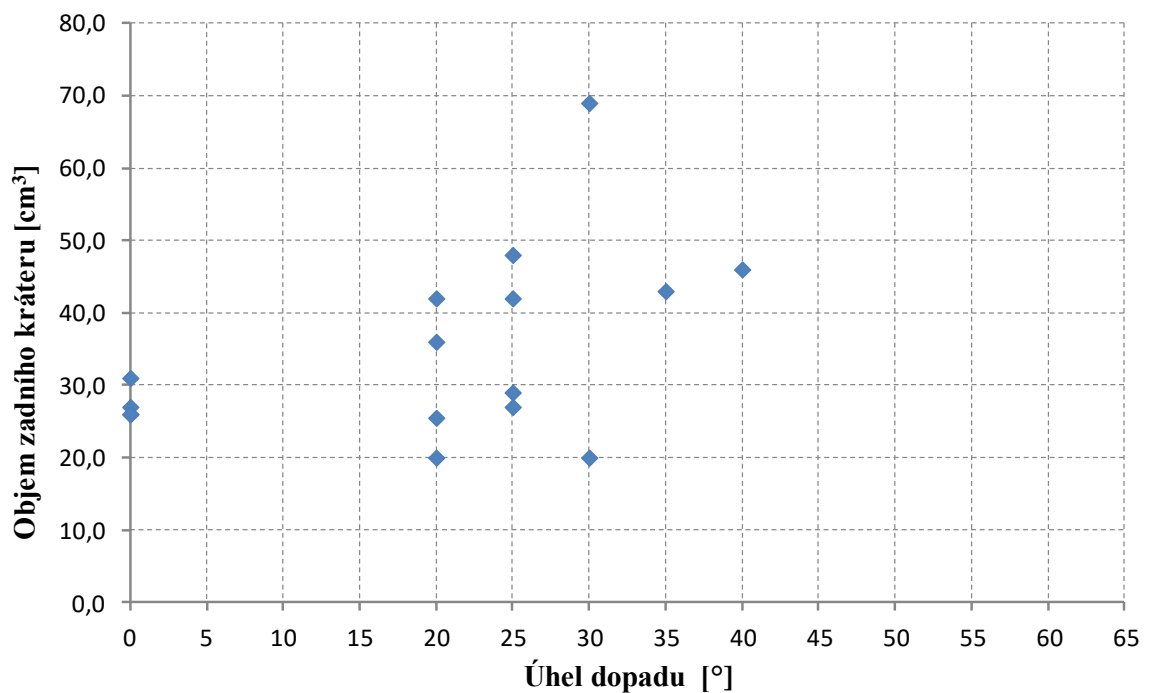
3.6.5 Objem zadního kráteru

Kráter na odvrácené straně desky k místu dopadu projektilu se u testovaných desek objevil v případě její celkové perforace nebo v případě vyražení materiálu vlivem tahových napětí šířících se deskou po dopadu projektilu jako napěťová vlna. Poškození na zadní straně desky se objevilo z důvodu celkové perforace v případě kolmého dopadu, dopadu pod úhlem 20° a poté v některých případech při dopadovém úhlu $\beta = 25, 30$ a 35° . Scabbing se objevil v některých případech při dopadu projektilu pod úhlem 25 a 40° . V ostatních případech jevíla zadní strana desky drobné poškození v podobě radiálních a tangenciálních trhlin s drobným odchlípnutím materiálu, které se se zvětšujícím úhlem dopadu zmenšovalo. V ojedinělých případech při úhlu dopadu $45, 50, 55^\circ$ a v případě dopadového úhlu 60° nejevila zadní strana desky žádné poškození. Tabulka 9 zobrazuje naměřené hodnoty objemu kráteru na zadní straně desky. Tyto hodnoty jsou poté vyneseny v grafu na obr. 73, kde je patrný jejich velký rozptyl.

Tabulka 9: Hodnoty velikosti objemu zadního kráteru

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40	45	50		55		60			
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	4N	7	6	5N	3N	1N	5	
Objem zadního kráteru [cm ³]	27,0	26,0	26,0	31,0	25,5	20,0	36,0	42,0	29,0	27,0	48,0	20,0	69,0	43,0						

Závislost velikosti zadního kráteru na úhlu dopadu střely



Obrázek 73: Závislost velikosti objemu zadního kráteru na dopadovém úhlu β

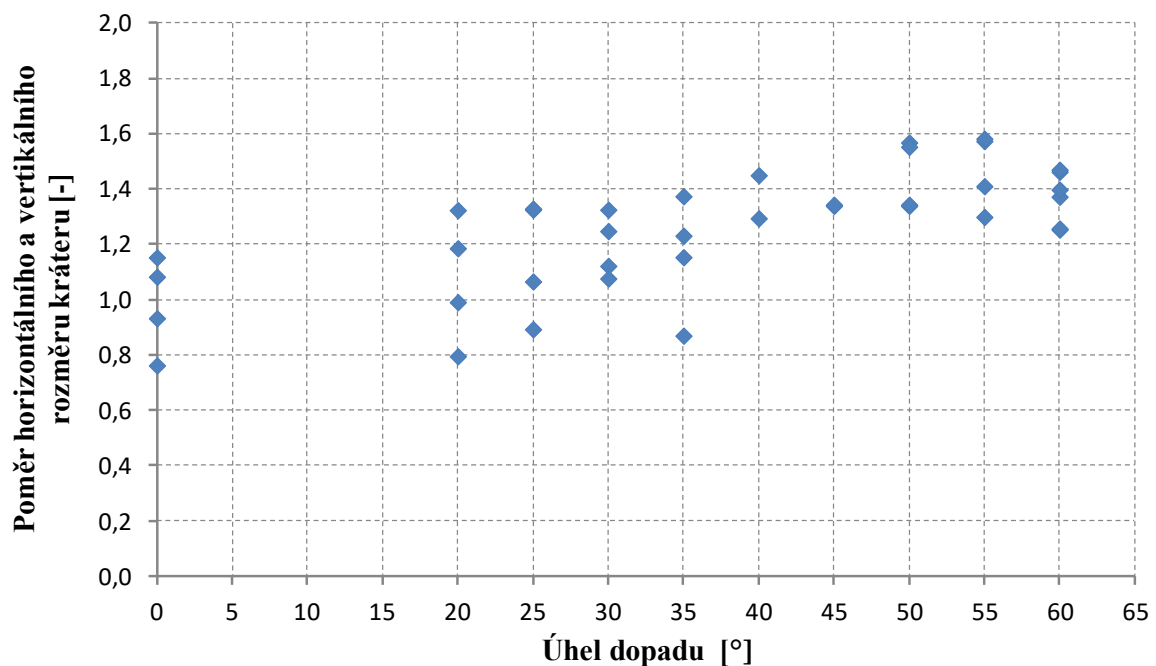
3.6.6 Rozměry kráteru a jejich poměr

Pro určení rozsahu poškození v rovině plochy dopadu slouží již uvedený 2D povrch. Po dokončení experimentu byla však zaznamenána změna tvaru kráteru na podlouhlý ve směru trajektorie dopadu projektilu. Tato změna se zvětšovala se zvětšujícím se úhlem dopadu. O tvaru kráteru vypovídá hodnota poměru horizontálního a vertikálního rozměru. Poměr roven jedné lze považovat za kruhový tvar, hodnota menší než jedna charakterizuje podlouhlost kráteru ve směru vertikálním a hodnota větší než jedna podlouhlost ve směru horizontálním – směr trajektorie dopadu projektilu. Tento trend nebyl dodržen v každém případě, výsledné hodnoty vykazují velký rozptyl, nicméně průměrná hodnota se zvyšuje až do úhlu 50° a poté se mírně zmenšuje. Rozměry kráteru jsou uvedeny v tabulce 10 a vyneseny do grafu závislosti jejich poměru na dopadovém úhlu zobrazeném na obr. 74. Na obr. 75 jsou zobrazeny příklady tvaru kráteru v rozmezí dopadového úhlu $\beta = 0^\circ$ až $\beta = 60^\circ$.

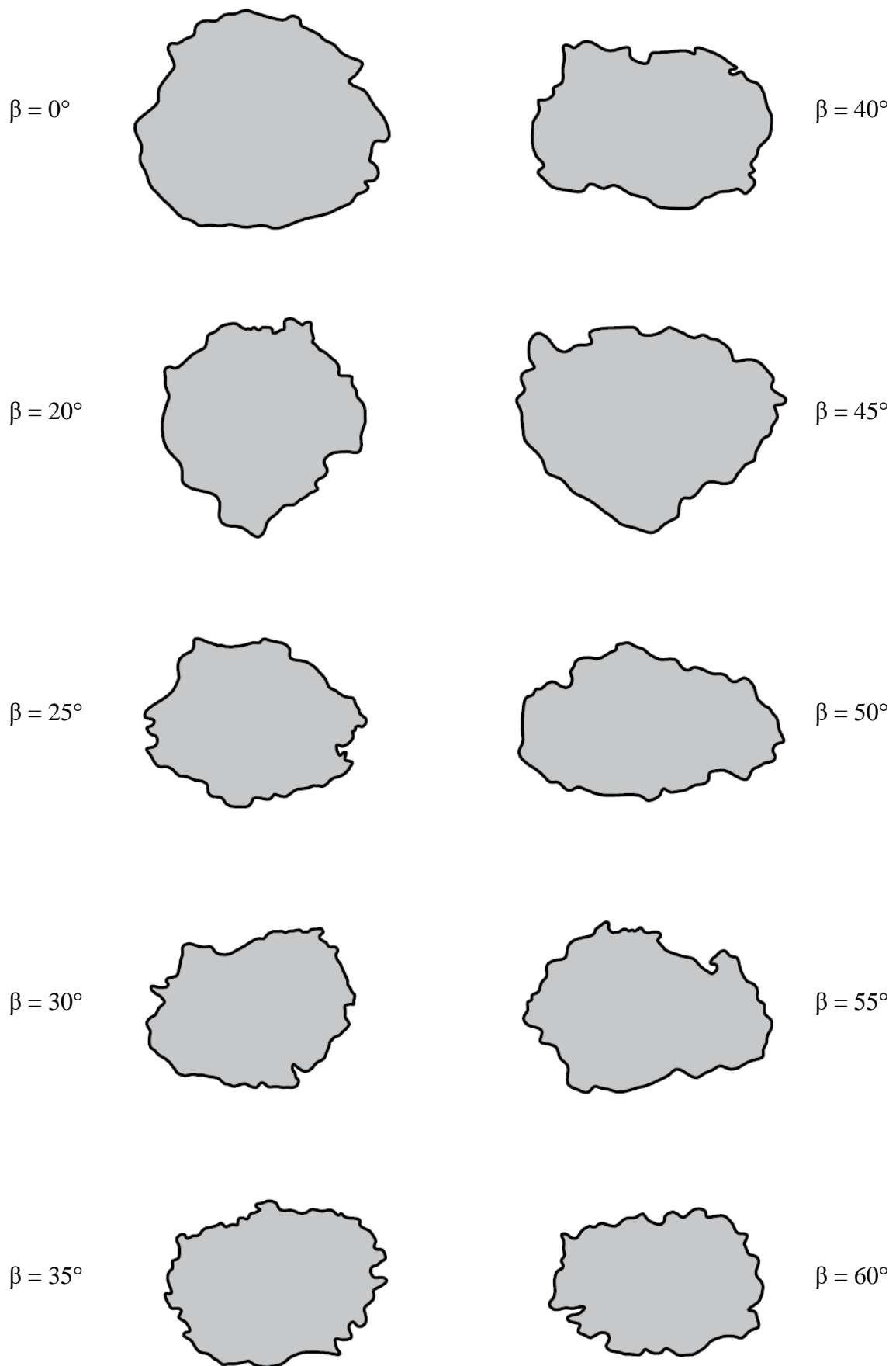
Tabulka 10: Hodnoty rozměrů kráteru na přední straně a jejich poměr

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40	45	50		55		60						
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	4N	7	6	5N	3N	1N	5				
Horizontální rozměr [mm]	66,5	48,3	69,5	62,0	48,2	56,6	63,6	52,4	68,5	61,4	61,9	72,3	75,1	74,0	56,4	68,8	58,2	58,2	46,0				
Vertikální rozměr [mm]	57,7	63,4	60,7	52,3	54,0	42,6	56,7	42,0	59,4	45,9	42,7	54,0	48,7	55,1	40,0	50,2	41,5	39,8	36,6				
Poměr rozměrů kráteru [-]	1,15	0,76	1,08	1,19	1,32	0,99	1,12	1,08	1,25	1,15	1,45	1,34	1,57	1,34	1,41	1,30	1,58	1,37	1,25	1,40	1,46	1,47	1,26

Závislost poměru rozměrů kráteru na úhlu dopadu střely



Obrázek 74: Závislost poměru rozměrů kráteru na dopadovém úhlu β



Obrázek 75: Změna tvaru kráteru v intervalu dopadového úhlu $\beta = 0^\circ$ až $\beta = 60^\circ$

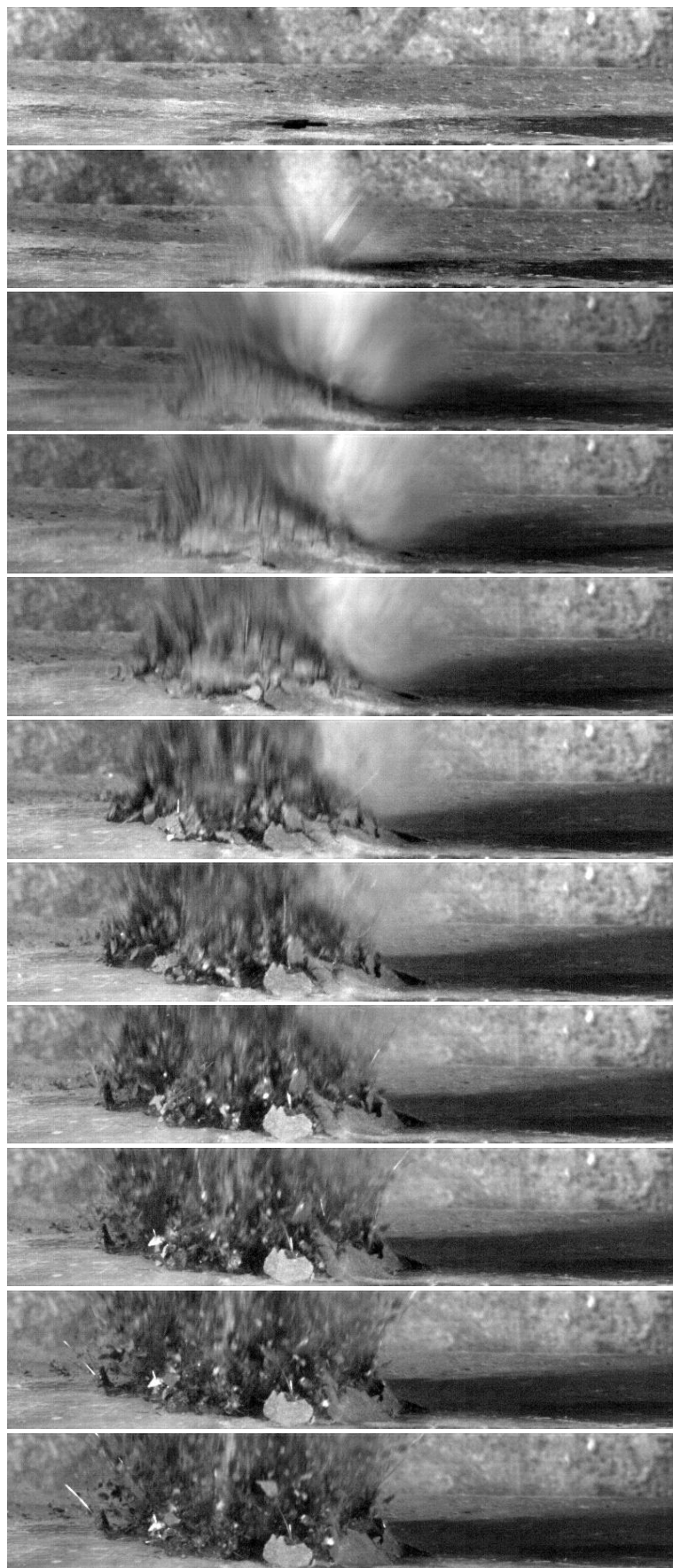
3.6.7 Vysokorychlostní záznam dopadu projektilu

Součástí experimentu byl také pokus zaznamenat dopad projektilu na cíl spolu se sledováním jeho trajektorie. Za tímto účelem byla nad upínací zařízení s testovanou deskou umístěna vysokorychlostní kamera. Celkem byly testovány tři různé hodnoty její snímkovací frekvence – 2000, 3000 a 10000 fps. Při snímání 2000 snímků za sekundu bylo možné pro pořízení dostatečně kvalitního záznamu využít velikost záběru pouze 200×120 mm. Se zvyšováním snímkovací frekvence bylo nutné velikost záběru dále snižovat.

Předpokládejme dopadovou rychlost projektilu $710 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Střela s touto rychlostí urazí vzdálenost jednoho metru za 0,00141 sekundy. Délku záběru, kterou bylo možné pomocí vysokorychlostní kamery snímat, potom střela urazí za 0,00028 sekundy. Pomocí použité kamery lze zaznamenat snímek každých 0,0005, 0,0003 nebo 0,0001 sekundy při snímkovací frekvenci 2000, 3000 a 10000 fps. Z toho vyplývá, že u prvních dvou zmiňovaných frekvencí je možné projektil zachytit maximálně jednou a to dokonce jen v případě, že okamžik vzniku snímku bude náležet intervalu 0 až 0,00028 sekundy pro průlet střely. V případě nejvyšší možné snímkovací frekvence je možné zaznamenat projektil právě dvakrát.

Bylo zjištěno, že pro určení změny trajektorie střely při jejím odrazu není použité zařízení vhodné. Nicméně na pořízených záznamech byly možné pozorovat jiné zajímavé skutečnosti spojené s dopadem projektilu na cíl z ultra-vysokohodnotného cementového kompozitu vyztuženého ocelovou rozptýlenou výztuží. Jak bylo popsáno v teoretické části této práce zabývající se střelivem, projektil je po dobu letu stabilizován rotací kolem své podélné osy. Při dopadu střely dojde v části materiálu cíle k jejímu přeměnění na prach vlivem mnohem většího tlakového namáhání než je její pevnost. Tento prach je poté vymrštěn a ze záznamů vysokorychlostní kamery bylo zjištěno, že rotuje ve stejném směru jako střela. Déle je z pořízených videozáznamů patrný vlnový charakter přetvoření testované desky, tlakové a tahové poškození v místě dopadu projektilu.

Na obr. 76 jsou zaznamenány snímky pořízené s frekvencí 10000 za sekundu. Je zde zobrazen okamžik dopadu projektilu a vznik kráteru až po konec nárůstu jeho rozměrů. Z toho vyplývá, že vznik onoho kráteru trvá pouhých 0,001 sekundy. Dále už jen nastává vymrštění porušeného materiálu směrem od místa dopadu projektilu.

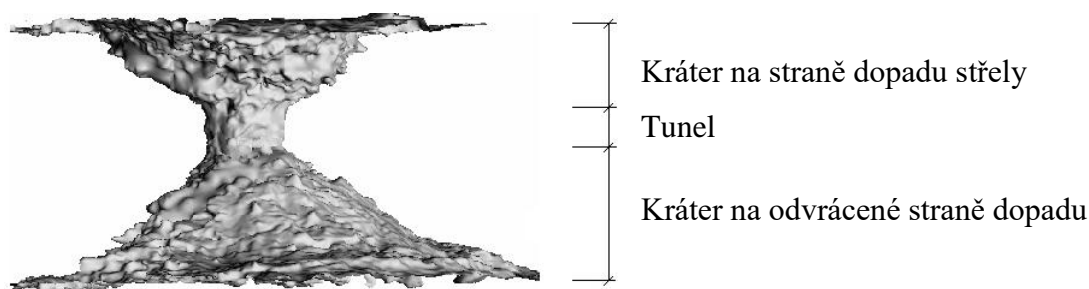


Obrázek 76: Záznam dopadu projektilu se snímkovací frekvencí 10000 fps

4 Diskuze

4.1 Tvar kráteru

V první řadě je nutné zmínit, že po dopadu projektilu na cíl vždy vzniká charakteristické poškození v podobě impaktního kráteru. Jeho tvar a objem se liší s dopadovým úhlem β . Dále se poškození liší, dle velikosti úhlu dopadu střely. V případě perforace desky, zejména při kolmém dopadu, se objevuje typický tunel ve střední části perforovaného cíle popsany v kapitole 2.6.2. Zde je popsáno chování běžného betonu, kde se předpokládá, že při malých tloušťkách cíle je fáze vzniku tunelu přeskočena a na čelní kráter přímo navazuje kráter na zadní straně cíle. Sami autoři uvádějí, že v případě lepších materiálových charakteristik betonu se může typ poškození lišit. Výsledky experimentální části této diplomové práce tedy dokazují, že u desek vyrobených z ultra - vysokohodnotného cementového kompozitu vyztuženého ocelovými vlákny s tloušťkou pouhých 40 mm, tento tunel válcovitého tvaru, vzniká. Takto vzniklé poškození zobrazuje obr. 77.



Obrázek 77: Tvar celkového kráteru při kolmém dopadu střely

Tento tunel je patrný i v případě perforace cíle pod dopadovým úhlem $\beta = 20^\circ$ až $\beta = 35^\circ$. S narůstající velikostí úhlu dopadu se ale jasná hranice mezi krátery a tunelem vytrácí.

Dále se také uvádí, že průměr tunelu bývá o něco menší, než je průměr střely. [38] Jak již bylo zmíněno, na penetraci cíle se v případě střely $7,62 \times 39$ mm účastní pouze její ocelové jádro. Plášť, košilka a olověná špička se deformují ihned po dopadu. V některých případech lze deformovaný plášť, jehož rub je otočen vně, nalézt v místě kráteru. Tunel vzniklý po dopadu tohoto typu střely má průměr okolo 10 mm a je tedy přibližně dvakrát větší než je průměr ocelového jádra.

4.2 Efektivní tloušťka a změna trajektorie střely

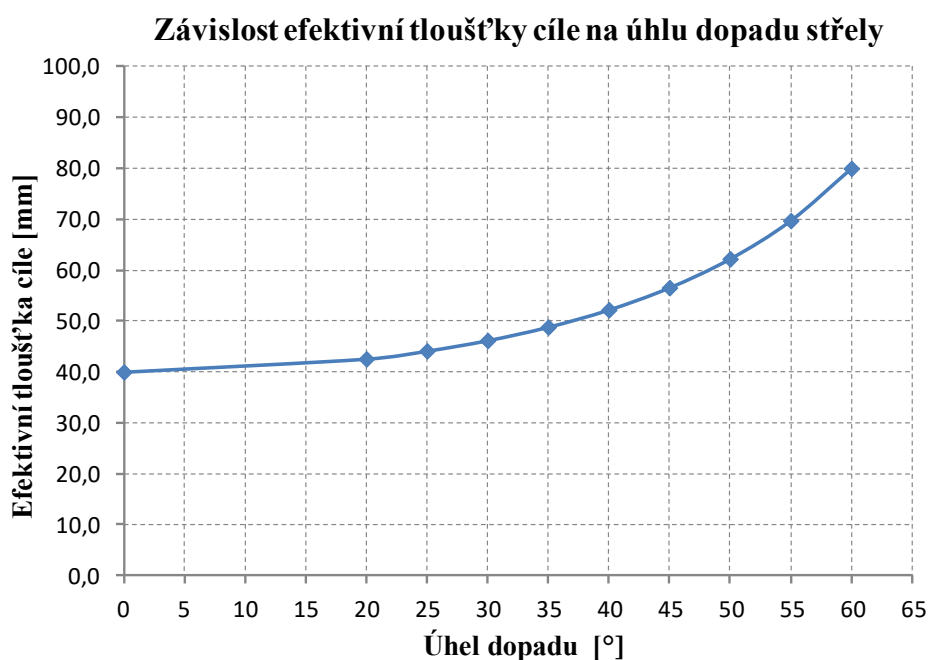
Na úvod zopakují tabulku, ze které je patrný přechod z perforace desky na odražení projektilu od desky. Nejzajímavější je pro tuto chvíli přechodová část mezi dopadovým úhlem $\beta = 25^\circ$ a $\beta = 40^\circ$.

Úhel dopadu [°]	0		20		25		30		35		40	45	50		55		60																	
Ozn. vzorku	9N	8N	10N	5	13	12	14	11	15	10	9	8	7	4N	6	5N	3N	1N	5															
Chování v cíli	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	ZS	CP	ZS	CP	ZS	ZS	ZS	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Vysvětlivky k tabulce:

CP	Celková perforace desky
ZS	Jádro střely zaražené v desce
O	Odražení střely od desky

Jelikož střela dopadá na cíl šikmo, její uražená dráha nutná na celkovou perforaci desky se se zvyšujícím se dopadovým úhlem zvětšuje. Závislost mezi dopadovým úhlem a efektivní tloušťkou je znázorněna na obr. 78. Výše zmiňovaná přechodná oblast se tedy nachází mezi hodnotou efektivní tloušťky rovné 44,1 mm a 52,2 mm.



Obrázek 78: Závislost efektivní tloušťky cíle na dopadovém úhlu β

Nutno podotknout, že ačkoliv byl v experimentálním programu této diplomové práce navrhnout konstantní krok mezi jednotlivou hodnotou dopadového úhlu roven 5° , tak je z grafu patrné, že nárůst efektivní tloušťky není lineární. Mezi krokem 20° a 40° efektivní tloušťka naroste o přibližně 10 mm. O stejnou hodnotu efektivní tloušťka

naroste mezi krokem 40° a 50°, mezi krokem 50° a 60° pak efektivní tloušťka naroste o téměř 20 mm na konečnou hodnotu 80 mm, což je dvojnásobek základní tloušťky cíle.

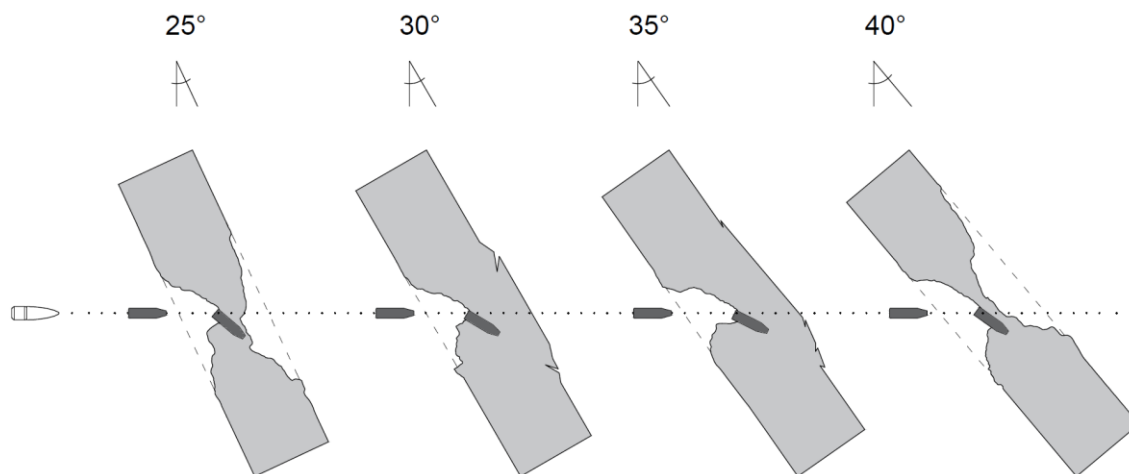
Výsledky odolnosti desek je možné porovnat s pracemi Máci a Sovjaka [31; 32], kde byla použita obdobná směs na výrobu testovaných desek, stejné objemové zastoupení vláken (2%) a tloušťka desky 45 mm a 50 mm. Ve všech případech se jednalo o kolmý dopad střely 7,62×39 mm s ocelovým jádrem. V případě 45 mm desky došlo k její celkové perforaci a v případě 50 mm desky došlo v polovině případů (celkem 6 střel) k zaražení jádra v desce a v druhé polovině k celkové perforaci desky. Tyto tloušťky desek leží v intervalu přechodové oblasti mezi perforací a odrazem projektilu v této diplomové práci. V případě 45 mm se jedná o efektivní tloušťku mezi dopadovým úhlem 25° a 30°, v případě 50 mm pak 35° a 40°. V prvním zmiňovaném intervalu došlo v rámci experimentálního programu v 50 % případů k perforaci desky a v 50 % případů k zaražení jádra střely v desce. Ve druhém zmiňovaném intervalu došlo k jedné perforaci, čtyřem zaraženým jádrům v desce a jednomu odrazu projektilu od desky. Z výsledků je patrné, že desky zasažené pod úhlem mají vyšší odolnost vůči dopadu střely, než desky zasažené kolmo, přestože se jejich teoretická dráha uražená střelou skrz materiál rovná.

Z tohoto závěru lze vyvodit, že k odolnosti desky vůči dopadu nedeformovatelného projektilu nepřispívá pouze efektivní tloušťka, ale i jiné faktory. Dalším vlivem je jistě změna trajektorie střely, resp. jejího ocelového jádra.

Jádro střely se zákonitě pohybuje ve směru nejmenšího odporu. Ovlivňujícím činitelem může být nehomogenní prostředí materiálu cíle nebo také nestejněměrná míra porušení materiálu v okolí jádra, kde se jádro vychýlí ve směru více rozrušeného materiálu. Tato změna byla zaznamenána jak u desek zasažených pod úhlem, tak u desek zasažených kolmo.

V některých případech byla za testované desky umístěna sada plechů. Po perforaci desky tedy došlo k zasažení plechu jádrem střely a bylo možné určit, v jaké poloze jádro na plech dopadlo díky tvaru obtisku jádra do plechu či tvaru otvoru vzniklého perforací plechu. Z těchto jednoduchých pokusů bylo možné vypořádat, že i v případě desek zasažených kolmo dochází k velké změně orientace osy střely po procesu penetrace cílem. V některých případech dokonce jádro dopadlo na desku celou svou délkou, tzn. pootočení osy jádra o 90° vůči původní trajektorii. Tato změna je jistě následkem působením okolního materiálu cíle.

Velmi dobře je změna trajektorie ocelového jádra zachycena v případech jeho zaražení v desce, kde lze zrekonstruovat jeho konečnou polohu za pomoci 3D a 2D skenování kráteru. Na obr. 79 jsou zobrazeny čtyři případy zaraženého ocelového jádra pro dopadové úhly $\beta = 25^\circ$ až $\beta = 40^\circ$. Je zde vyznačena počáteční orientace jádra před dopadem střely na cíl a jeho konečná orientace.

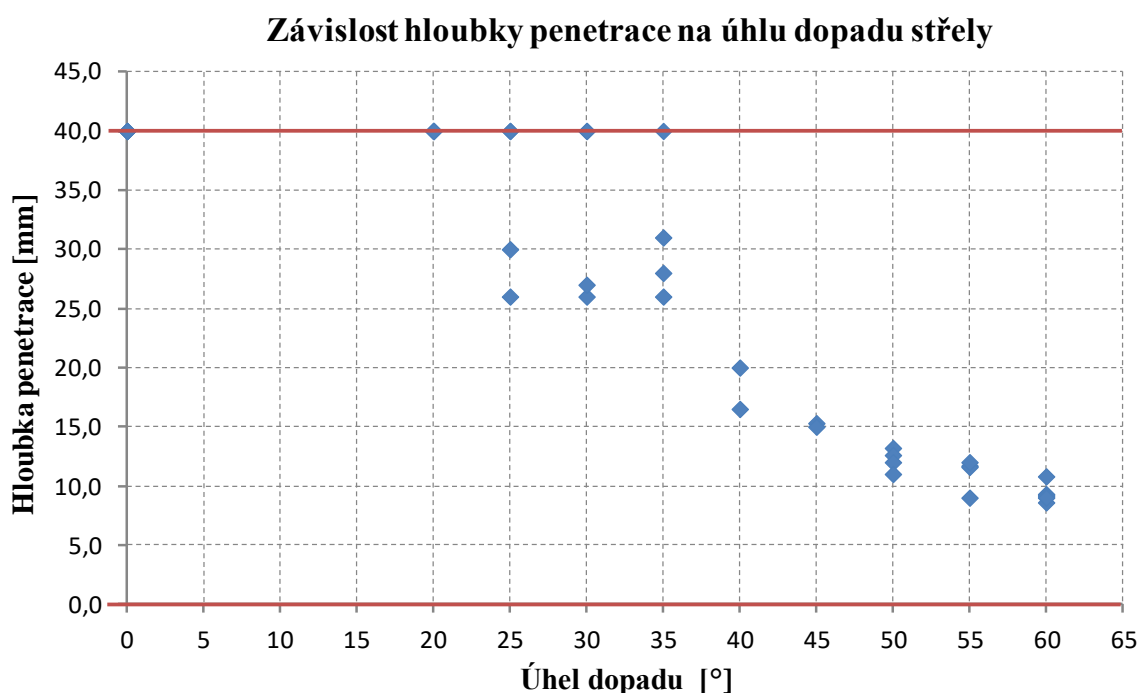


Obrázek 79: Změna trajektorie jádra střely

Z těchto případů by se dalo na první pohled vyvodit, že při nižším úhlu dopadu se jádro střely stáčí více a se zvětšujícím se úhlu dopadu se stáčení snižuje. Do tohoto trendu ale nezapadá případ pro dopadový úhel $\beta = 40^\circ$ a také by pro to neměl být žádný důvod. Dle mého názoru je změna orientace způsobena převážně drobnými nehomogenitami v materiálu, které mají za následek různé pevnosti a další materiálové charakteristiky v oblasti zasažené mechanickým napětím. Proto se jedná spíše o vnitřní strukturu každého jednotlivého testovaného tělesa, než o vstupní hodnotu dopadového úhlu.

Tato velká změna trajektorie může být vysvětlením, proč dochází k zaražení jádra střely i při poměrně nízkých hodnotách dopadového úhlu β , konkrétně $\beta = 25^\circ$ a 30° . Připomeňme, že při těchto dopadových úhlech je efektivní tloušťka rovna 44,1 mm a 46,2 mm. V těchto případech se mohly projevit přítomné nehomogenity, projevující se například menší tahovou pevností materiálu při povrchu testovaného vzorku. Takovou nehomogenitou může být i rozložení rozptýlené výztuže, která v prostoru zaujímá nepříhodnou orientaci pro překlenutí trhlin vniklých tahovým napětím v betonu. Povrch se poté deformuje více a střela se stáčí tímto směrem.

Zaražené jádra střel také zkreslují naměřenou hloubku penetrace pro desky, kde k této situaci došlo. Je to konkrétně v případech desek zasažených pod úhlem 25° až 40° . Hloubka penetrace po započtení délky hloubky zaražení jádra se může v těchto případech navýšit až o cca 7 mm. Vyplyvá to z měření hloubky penetrace u desek zobrazených na obr. 79. V případech těchto čtyř desek by hloubka penetrace narostla z hodnot 18,9 mm, 19,8 mm, 24,5 mm a 18,1 mm na hodnotu přibližně 26, 27, 31 a 20 mm. Po zohlednění hloubky zaražení ocelového jádra ve všech případech takto porušených desek, za pomoci porovnání 3D objektů vytvořených v programu David, je možné předložit novou závislost hloubky penetrace na dopadovém úhlu β :

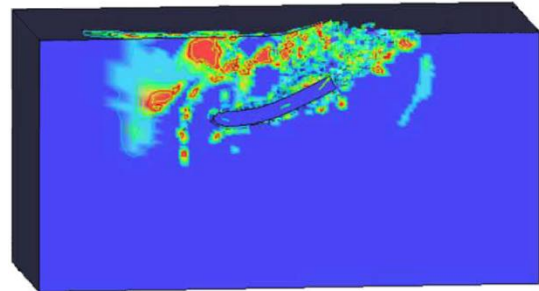


Zde je patrné, že pokud nedojde v intervalu dopadového $\beta = 25^\circ$ až $\beta = 35^\circ$ k perforaci desky, tak se hodnota hloubky penetrace pohybuje v průměru kolem 28 mm. Tyto konečné hodnoty hloubky penetrace by mohly polemizovat s tvrzením Krauthammera [53], že při penetraci do 63 % hloubky testovaného vzorku se může očekávat celková perforace cíle. Při průměrné hodnotě hloubky penetrace rovné 28 mm je deska penetrována do 70 % její tloušťky, pokud vezmeme v úvahu maximální hodnotu penetrace rovné 31 mm, tak je deska penetrována z více než 77 % její tloušťky. Na druhou stranu došlo v tomto intervalu, převážně tedy u dopadového úhlu 25° a 30° , k celkové perforaci desky v 50 % případech. S jistotou lze tedy jen tvrdit, že mohou existovat případy, kdy projektil penetruje cíl do větší hloubky, aniž by došlo k celkové perforaci.

4.3 Mechanismus poškození

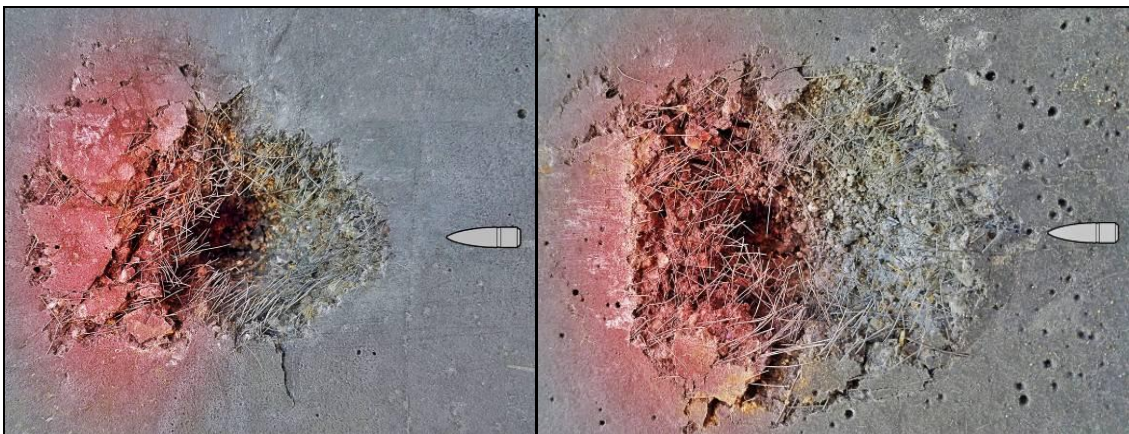
V této části se nabízí srovnání práce Lia a kol. [41], jehož numerická simulace byla představena již v kapitole 2.6.3. Připomeňme si tedy rozdělení tahového a tlakového poškození po dopadu nedeformovatelné střely na cíl z běžného betonu vyztuženého svařovanou výztužnou sítí.

Jako první je tu obrázek znázorňující pouze tahové deformace vzniklé po dopadu projektilu pod úhlem 43° . Je zde patrná větší koncentrace porušení při povrchu vzorku. V tomto případě došlo při simulaci k zaražení střely v testovaném vzorku.

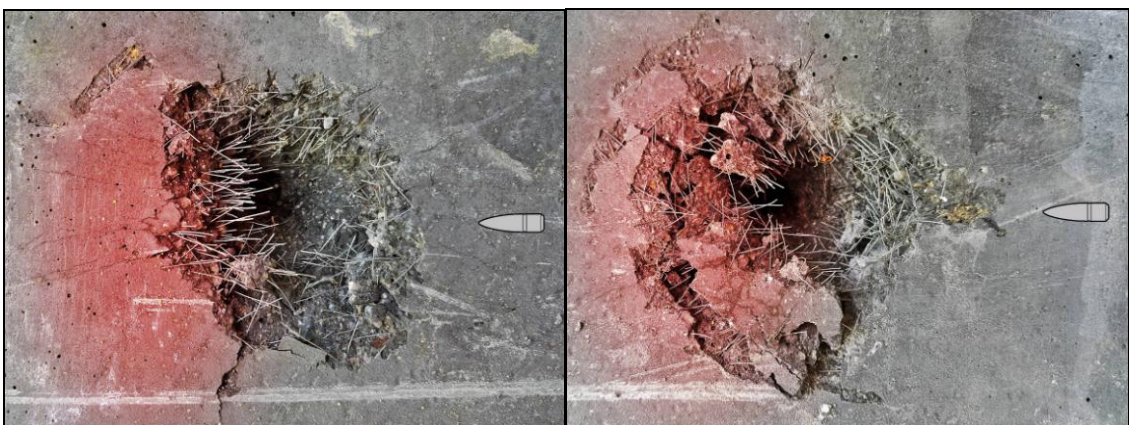


Obrázek 80: Tahové poškození podle Lia [41]

K porovnání je na obr. 81 a 82 zobrazen pohled na čelní kráter po dopadu projektilu pod úhlem 25° (horní vlevo), 30° (horní vpravo) a 35° (dolní). Symbolem střely je naznačen směr dopadu na cíl. Stejně jako v simulaci Lia je zde patrné tahové poškození vyznačené červeně, které se nachází převážně oproti místu dopadu projektilu.

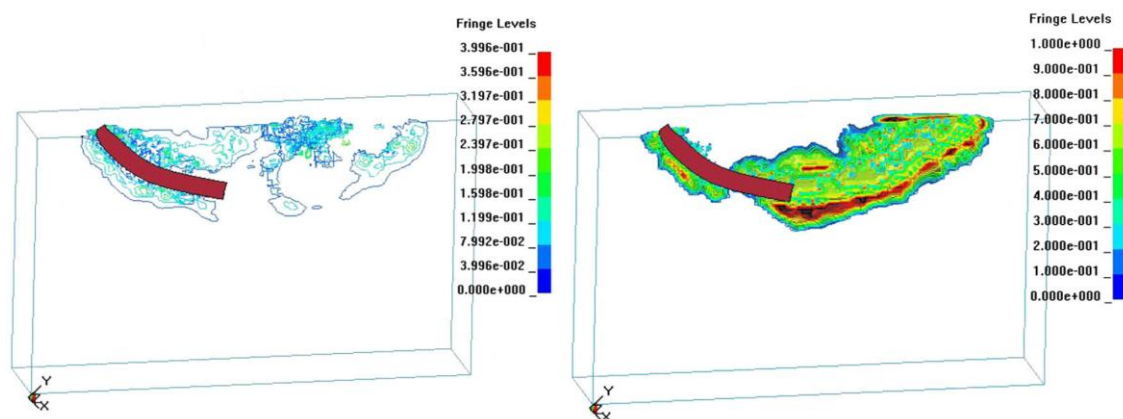


Obrázek 81: Tahové poškození



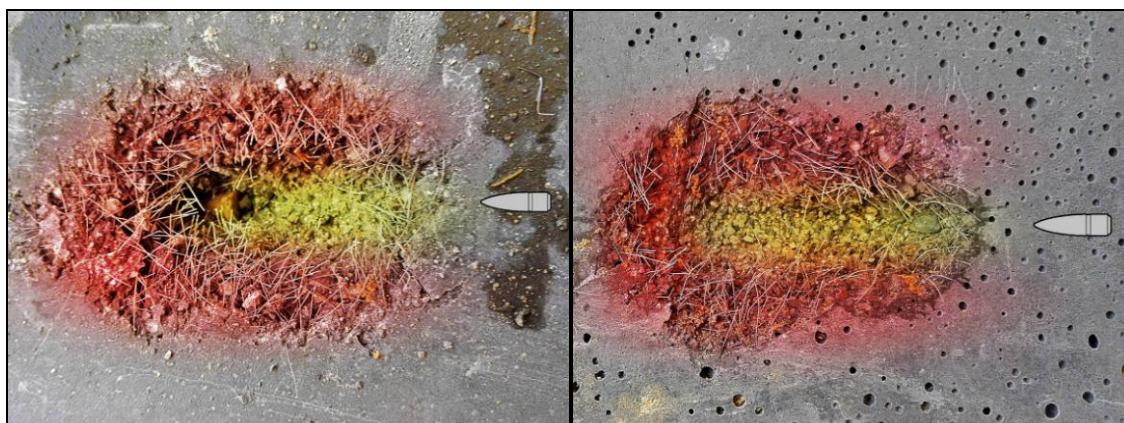
Obrázek 82: Tahové poškození

Pro další srovnání simulace Lia [41] s výsledky experimentálního programu této diplomové práce využijeme rozdělení poškození na obr. 83 na tahové (vlevo) a tlakové (vpravo). Tahové poškození se vyskytuje v kráteru oproti místu dopadu projektilu a také po bocích při povrchu zasaženého cíle. Tlakové poškození se koncentruje nejvíce v dráze trajektorie střely a jejího okolí.

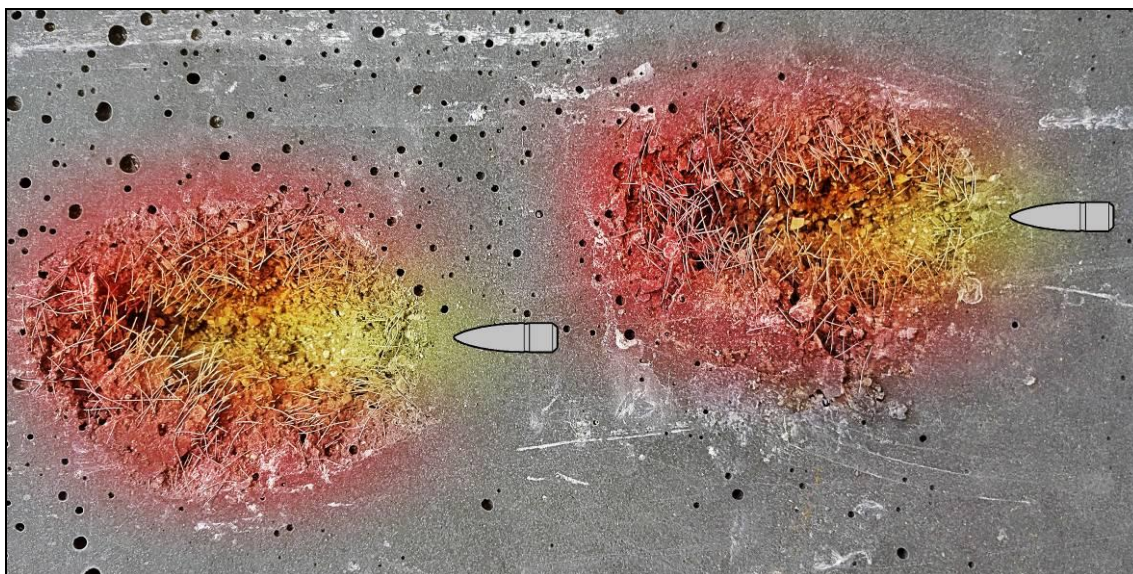


Obrázek 83: Tahové a tlakové poškození podle Lia [41]

Jednoduše lze vizuálně oddělit poškození způsobené tlakovým a tahovým napětím také ze vzniklých kráterů v experimentálním programu. Tlakové poškození se vyznačuje jasně viditelnou drážkou způsobenou drcením materiálu pronikajícím ocelovým jádrem. Proto se zde nevyskytují žádné drátky, jelikož jsou v tomto místě zpřetrhány. Naopak tomu je u poškození způsobeném tahovým namáháním, kde je rozptýlená výztuž z matrice vytažena a proto jsou v těchto místech kráteru patrné vystupující drátky. Na obr. 84 je zobrazen kráter po dopadu projektilu pod úhlem 40° (vlevo) a 55° (vpravo). Červenou barvou jsou vyznačeny oblasti tahového přetvoření s charakteristickými vystupujícími drátky, žlutou barvou pak drážka tlakového přetvoření. Stejně tomu je na obr. 85.

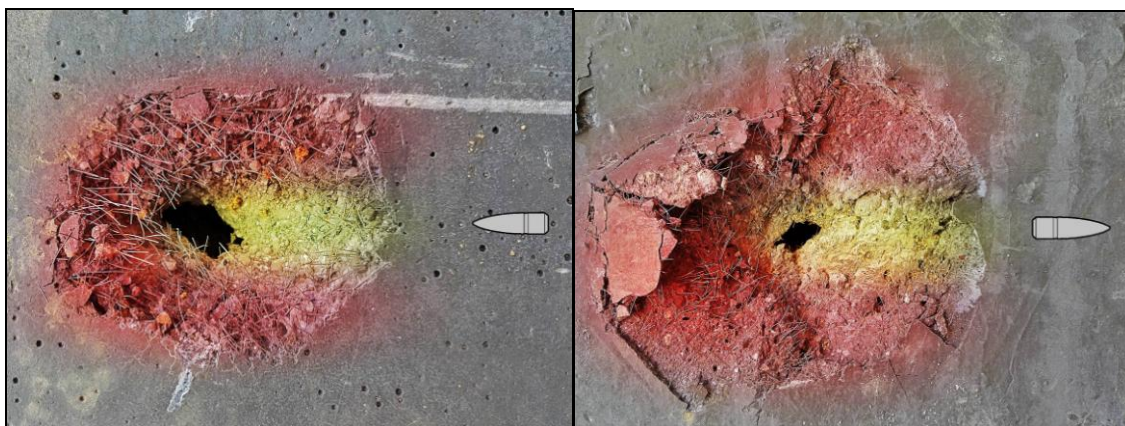


Obrázek 84: Znázornění tahové a tlakové deformace



Obrázek 85: Znárodnění tahové a tlakové deformace – dopadový úhel $\beta = 45^\circ$

V případě perforace pod úhlem je tlaková drážka patrná též na zadní straně zasaženého cíle. Tato situace je na obr. 86, který zachycuje perforaci desky při dopadovém úhlu $\beta = 30^\circ$. Kráter na zadní straně desky vykazuje stejné známky poškození, tedy tlakovou drážku s přetřhanými drátky a oblast tahového poškození s viditelnými drátky, kde je ve většině případů zachycen i materiál.



Obrázek 86: Znárodnění tlakové a tahové deformace v případě perforace desky

Na zadní straně desky se může po dopadu projektilu projevit scabbing. Ten vzniká odraženou tlakovou vlnou od zadního povrchu desky, která následně působí jako vlna tahová. Tato vlna se po dopadu šíří rychlostí zvuku v daném materiálu. Pokud je pevnost v tahu materiálu desky překonána, projeví se toto zatížení vznikem tahových trhlin. Poté přichází na řadu rozptýlený ocelová výztuž, která má zamezit zvětšování trhlin a tyto trhliny překlenovat. Když je překonána i soudržnost výztuže s matricí, dochází k odtržení materiálu a vzniku kráteru na zadní straně cíle. Tento kráter se

vyznačuje mnohem větším průměrem, než má impaktní kráter a malou hloubkou. Jelikož je ale tento proces realizován rychlostí zvuku v daném materiálu (v betonu $\sim 1700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [54]), předchází proto procesu penetrace desky ocelovým jádrem projektilu, které má při dopadu rychlost kolem $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a s hloubkou penetrace se dále snižuje. Můžeme tedy uvažovat, že pokud kráter od scabbingu vznikne, je tloušťka materiálu vzdorující ocelovému jádru okamžitě oslabena. V případě, že kráter nevznikne, záleží na rozvoji tahových trhlin a jejich velikosti, které materiál desky oslabí. Má-li projektil dostatečnou energii, dojde poté ke smykovému vyražení scabbingem oslabeného materiálu. Zadní kráter vzniklý tahovou vlnou je zobrazen na obr. 87. Vlevo je zachycen kráter po dopadu projektilu pod úhlem 25° vpravo pak pod úhlem 40° . V těchto případech nedošlo k perforaci desky.



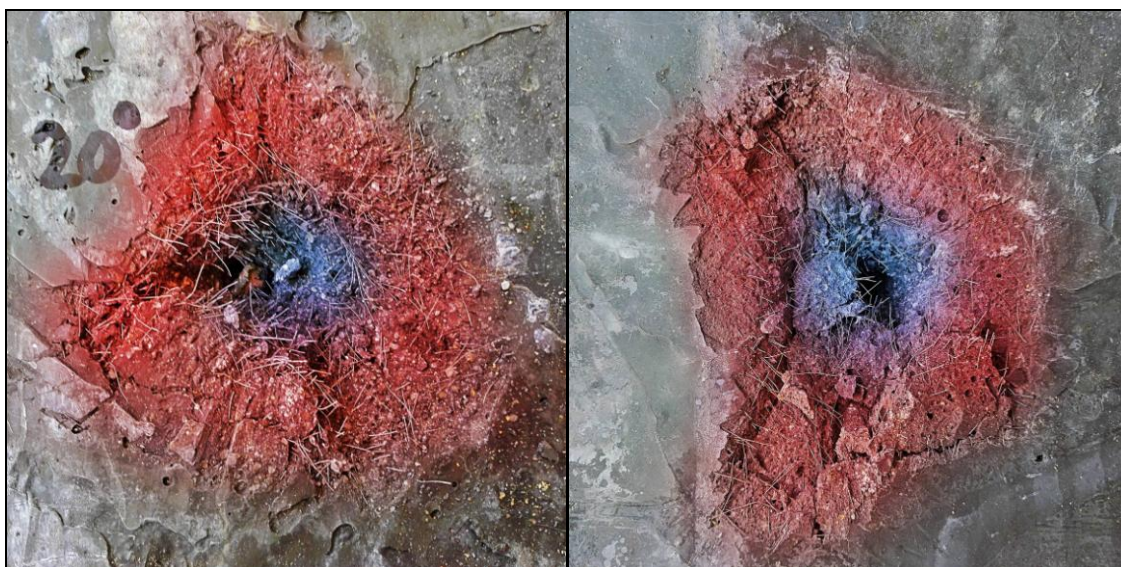
Obrázek 87: Zadní kráter - scabbing

V případě, že rozptýlená výztuž dokáže překlenout vzniklé tahové trhliny, vznikne na zadní straně cíle pouze vypouklina s více či méně doprovodným poškozením, nebo se mohou projevit pouze drobné trhliny. Při větších dopadových úhlech ($\beta \geq 45^\circ$) se poškození na zadní straně desky vizuálně vytrácí. Pro zhodnocení vnitřní struktury desky by bylo nutné provést důkladnější analýzu. Poškození na zadní straně desky, kde nedošlo k vytržení materiálu je zaznamenáno na obr. 88. Vlevo je zobrazeno poškození vzniklé po dopadu projektilu pod dopadovým úhlem $\beta = 30^\circ$, vpravo pak pod dopadovým úhlem $\beta = 35^\circ$.



Obrázek 88: Poškození na zadní straně desky - vypuklina vzniklá scabbingem

Pokud je materiál desky více rozrušen tahovým napětím, nebo pokud má jádro střely dostatečně velkou zbytkovou energii, dochází ke smykovému vyražení materiálu a dojde tak k celkové perforaci desky. Na obr. 89 je zobrazen kráter na zadní straně desky. Vlevo po dopadu projektilu pod úhlem 20° a vpravo pod úhlem 25° . Červeně je vyznačena oblast poškození vzniklá scabbingem, modře potom oblast smykem vyraženého materiálu. Oblast tahového poškození je mělká a v místě smykového vyražení poté se kráter prohlubuje. Samozřejmě nelze určit přesnou hranici mezi jednotlivými typy poškození, ale dá se předpokládat, že v jednotlivých oblastech převládá tahové, resp. smykové poškození.

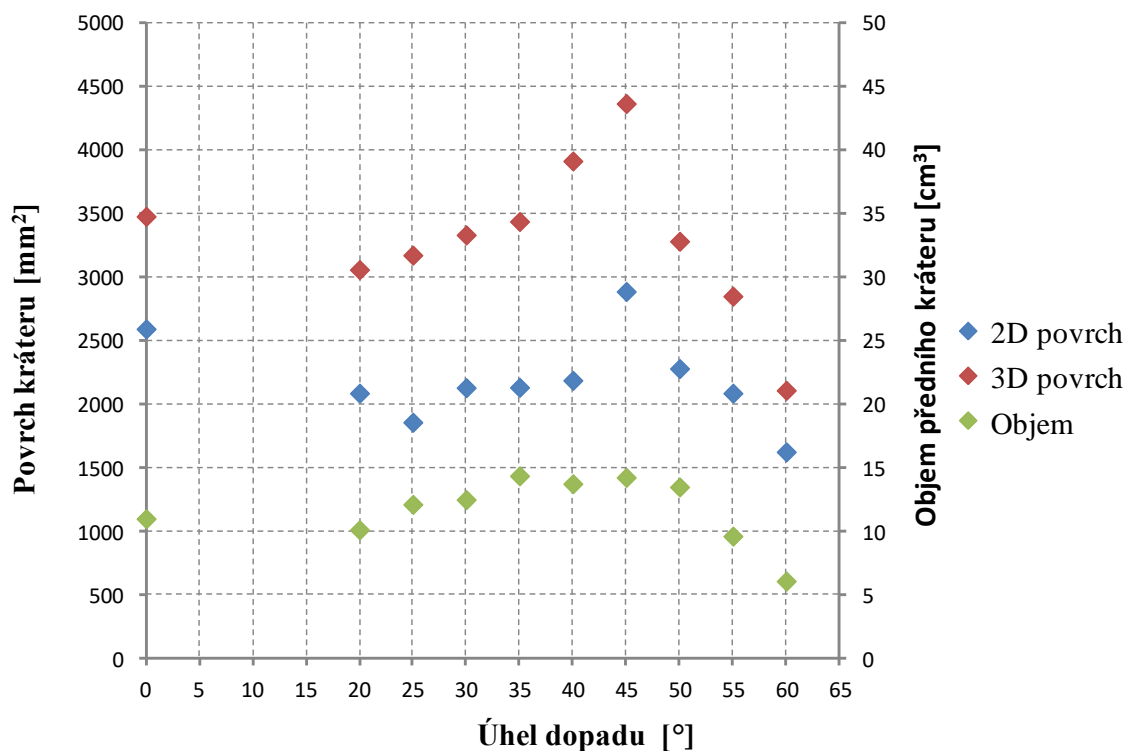


Obrázek 89: Perforace desky smykovým vyražením materiálu

Pokud budeme uvažovat objem krátera za nejrelevantnější charakteristiku popisující poškození desky, musíme vyvodit, z jakého důvodu dochází v intervalu dopadového úhlu $\beta = 20^\circ$ až $\beta = 35^\circ$ k nárůstu jeho velikosti, poté se s dalším nárůstem dopadového úhlu až po úhel $\beta = 50^\circ$ udržuje na hodnotě přibližně 14 cm^3 , a následně se snižuje.

Pro názornost je zde uveden graf jak závislosti povrchů impaktního krátera, tak zároveň i jeho objemu. Tyto charakteristiky spolu úzce souvisí a tento graf to také dokazuje. Z naměřených hodnot 2D povrchu krátera vyplývá, že jeho velikost se významně nemění (s výjimkou dopadového úhlu $\beta = 45^\circ$) a mění se pouze jeho tvar. 3D povrch narůstá až po dopadový úhel $\beta = 45^\circ$. Pokud se 2D povrch nemění a zároveň narůstá jeho 3D povrch, musí zákonitě docházet k nárůstu objemu krátera, což je také patrné z uvedeného grafu.

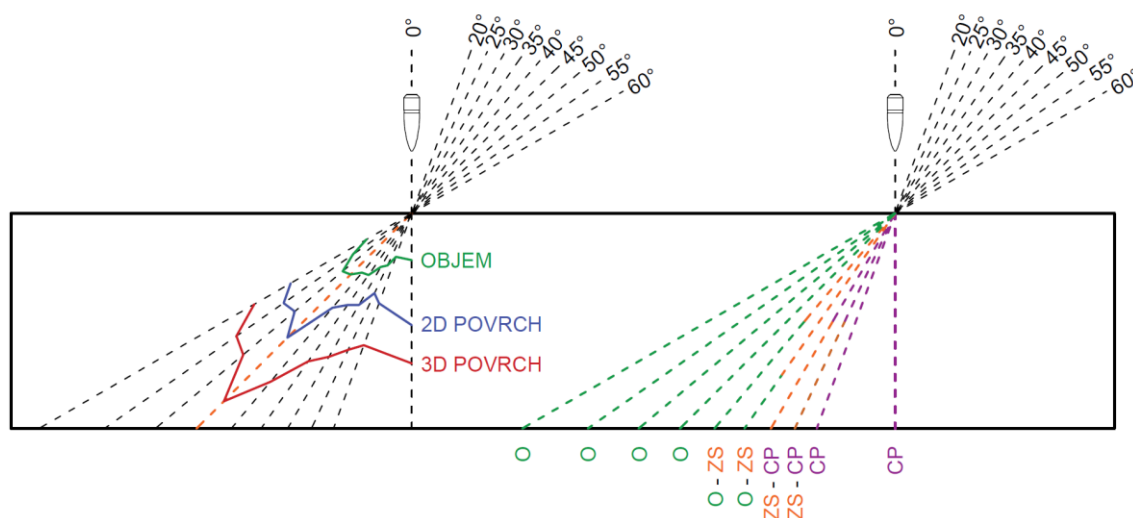
Závislost povrchu a objemu krátera na úhlu dopadu střely



Zopakována je zde také tabulka závislosti efektivní tloušťky desky na dopadovém úhlu β , pro lepší představu o efektivní tloušťce cíle při daném dopadovém úhlu.

Úhel dopadu β [°]	0	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Efektivní tloušťka [mm]	40,0	42,6	44,1	46,2	48,8	52,2	56,6	62,2	69,7	80,0

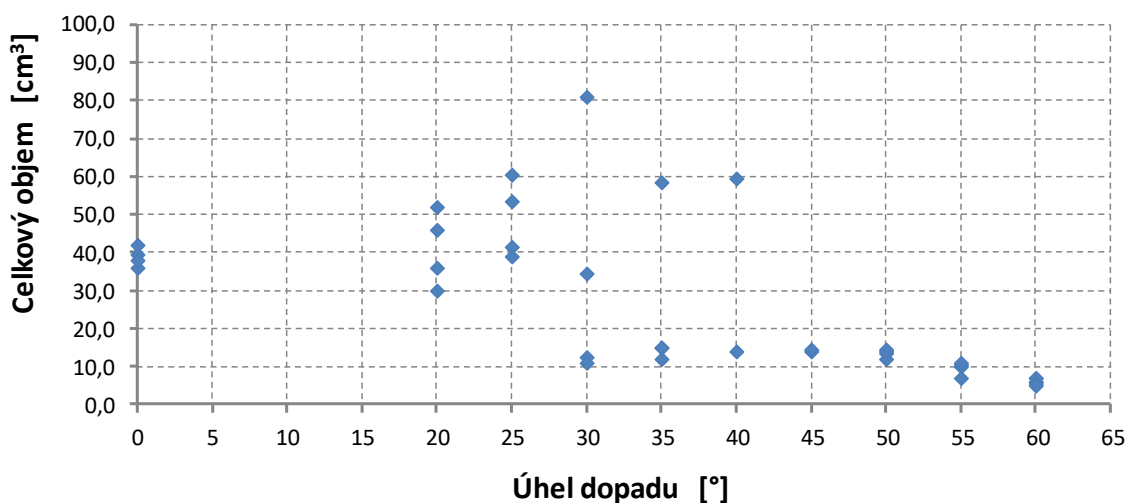
Dále je pro komplexnější představu o chování desky po dopadu projektilu uveden obr. 90. Jsou zde zakresleny trajektorie projektilu v rozmezí dopadového úhlu $\beta = 0^\circ$ až $\beta = 60^\circ$ a teoretické trajektorie penetrace skrz desku, což odpovídá efektivním tloušťkám cíle. Schematicky jsou zde zakresleny závislosti 2D povrchu, 3D povrchu a objemu kráteru na dopadovém úhlu β . Nakonec jsou zobrazeny a barevně odděleny 3 módy chování projektilu v cíli (CP – celková perforace desky, ZS – zaražené jádro střely v desce, O – odraz projektilu od desky)



Obrázek 90: Efektivní tloušťka, povrch, objem a chování projektilu v cíli

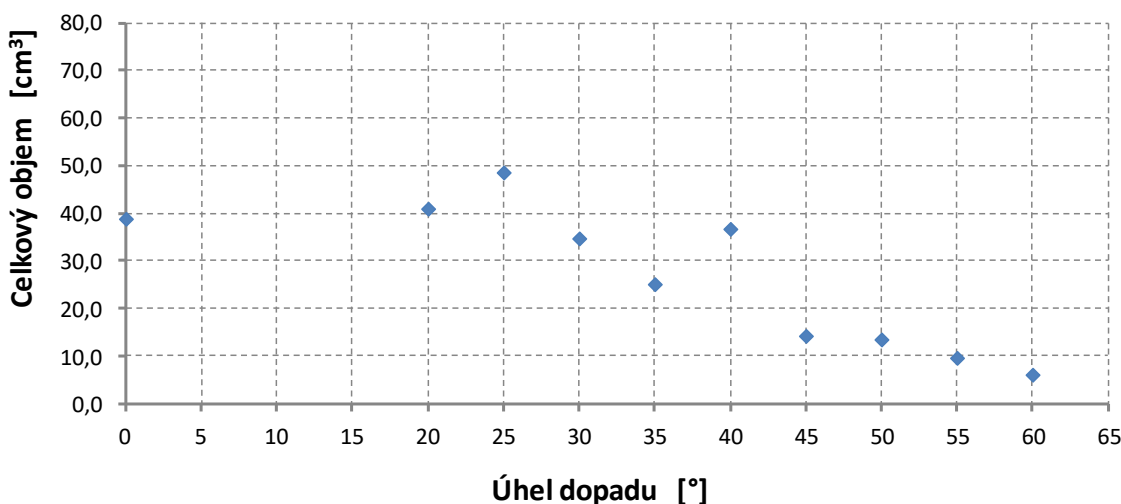
Začneme s uvědoměním si skutečnosti, že v případě celkové perforace desky nevystihuje objem předního kráteru její celkové porušení. Proto fakt, že objem předního kráteru se v nějaký interval dopadového úhlu zvětšuje, je zajímavý, ale pro popis porušení desky dopadem projektilu bychom měli brát v úvahu celkové porušení, tedy celkový objem odstřeleného materiálu. Z toho důvodu je proveden součet objemů kráteru na čelní a odvrácené straně zasažené desky. Na obr. 91 je zobrazena závislost celkového objemu odstřeleného materiálu v závislosti na dopadovém úhlu β . Hodnoty vykazují velký rozptyl při hodnotách dopadového úhlu, při nichž se vyskytovaly různé případy poškození. Například při dopadovém úhlu $\beta = 30^\circ$ došlo jak k zaražení jádra střely bez vzniku scabbingu na zadní straně, tak i k celkové perforaci. Podobně je tomu tak i v případě úhlu $\beta = 35^\circ$ a $\beta = 40^\circ$. Pokud provedeme zprůměrování hodnot, můžeme tvrdit, že celkové porušení desky se s narůstajícím dopadovým úhlem β snižuje, jak je patrné na obr. 92.

Závislost velikosti celkového poškození na úhlu dopadu



Obrázek 91: Závislost celkového objemu kráterů na dopadovém úhlu β

Závislost velikosti celkového poškození na úhlu dopadu

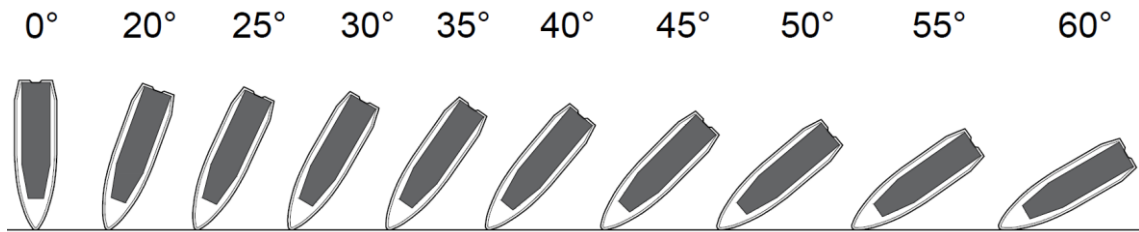


Obrázek 92: Průměry hodnot celkového objemu kráterů v závislosti na dopadovém úhlu β

Nicméně i tak je dobré se impaktním kráterem a jeho objemem zabývat. Obecně velikost poškození závisí od přeměny dopadové energie střely. Otázkou je, kolik energie je spotřebováno na porušení materiálu a jakého typu toto poškození je.

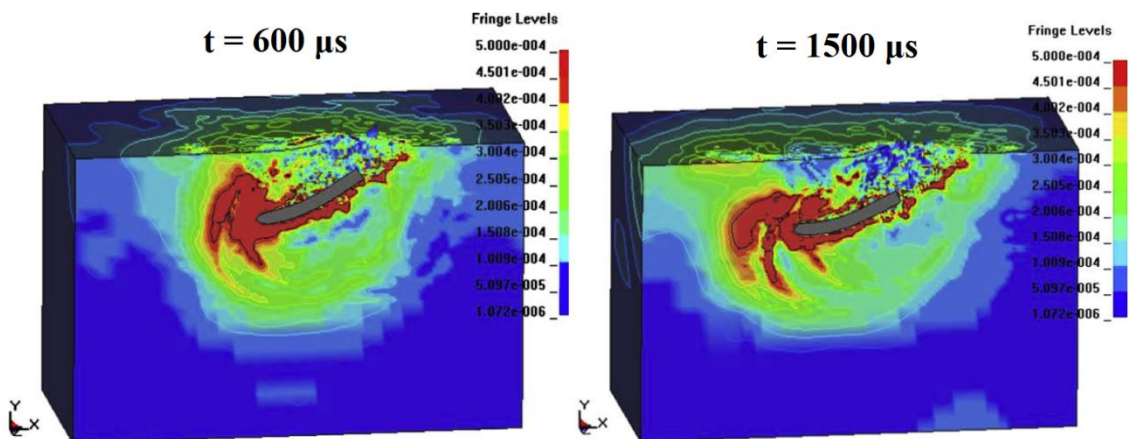
Odráží bych se od myšlenky změny trajektorie střely, resp. jejího jádra po dobu penetrace cílem. Směr pohybu ocelového jádra potom určuje, na jaký typ poškození bude jeho energie spotřebována. Začneme s místem dopadu projektilu na cíl. Obr. 92 zobrazuje projektil 7,62×39 mm v místě jeho dopadu na cíl. Připomeňme, že projektil se skládá z ocelového pláště, olověné košilky a špičky a ocelového jádra. Po dopadu na cíl se měkké olovo deformuje a dochází k rozpadu pláště. Je evidentní, že již při dopadu na

cíl dochází nutně ke změně orientace osy ocelového jádra, které je hlavním činitelem procesu penetrace cílem. Samotné ocelové jádro je v přední části zkosené, což také přispívá k další změně trajektorie po dobu penetrace, zejména při vyšších hodnotách dopadového úhlu.



Obrázek 93: Dopad projektilu 7,62×39 mm na cíl

V závislosti na směr pohybu projektilu po dobu penetrace cílem je nutné připomenout simulaci Lia [41], který v tomto směru zaznamenal zvýšenou koncentraci napětí, jak je patrné na obr. 94.

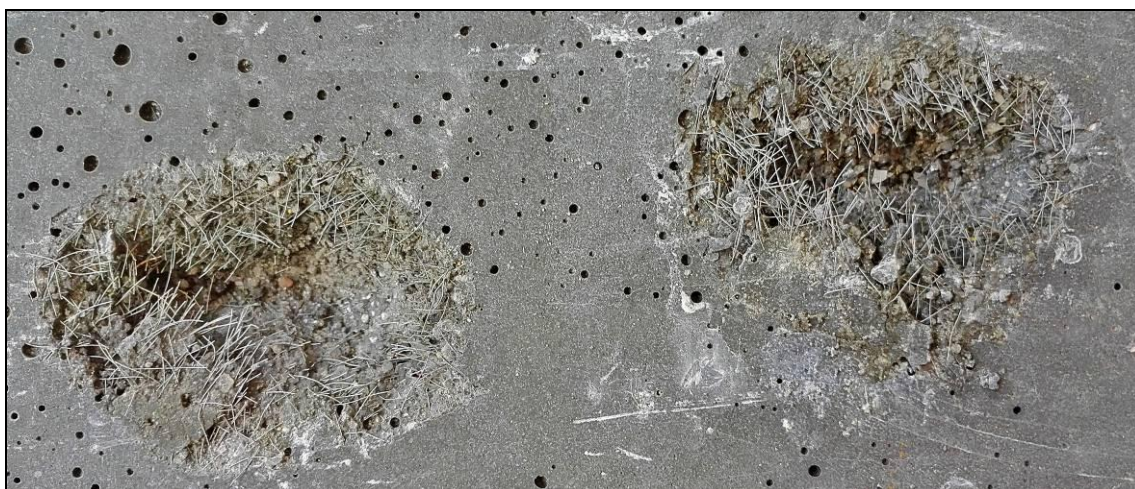


Obrázek 94: Efektivní napětí dle Lia [41]

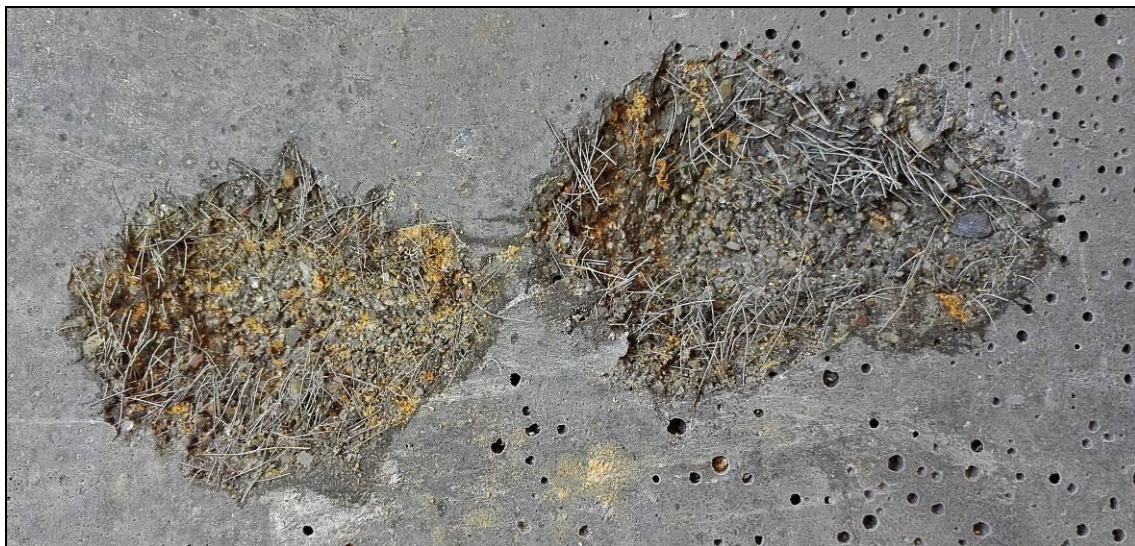
S vědomím, že při nárůstu dopadového úhlu narůstá tahové poškození u povrchu cíle před čelem projektilu, a při skutečnosti, že projektil se pohybuje po dobu penetrace po dráze nejmenšího odporu, můžeme uvést následující tvrzení: Jakmile je překročena tahová pevnost materiálu, dojde k jeho porušení a tato oslabená oblast vyvolá změnu trajektorie střely (obdobně jako na simulaci Lia – obr. 94).

Konečné poškození závisí především na počáteční orientaci ocelového jádra při započetí penetračního procesu a celkové dráze uražené materiálem desky. Při kolmém dopadu je disipace energie nejmenší, projektilu vzdoruje pouze základní tloušťka materiálu. Jak se úhel dopadu zvyšuje ($\beta = 20^\circ$ až $\beta = 35^\circ$), materiál odolává penetraci vyšší tloušťkou a dochází k nárůstu velikosti předního kráteru. K zaražení jádra střely dochází v případě, kdy tahové poškození na čelní straně desky není dostatečně velké,

aby se dráha ocelového jádra změnila natolik, aby opustilo cíl na dopadové straně desky. Stejně tak ale musí mít cíl dostatečnou efektivní tloušťku, aby nedošlo k celkové perforaci. S nárůstem úhlu dopadu se zmenšuje povrchová vrstva desky, která odolává tahovému napětí. Čím více je tato vrstva poškozována, tím více dochází ke stáčení trajektorie ocelového jádra po dobu penetrace, až dojde nejprve k zastavení střely a jejímu vypadnutí zpět z impaktního kráteru (obr. 95 – krátery po dopadu střely pod úhlem $\beta = 45^\circ$) a nakonec k odrazu střely, která má nezanedbatelnou zbytkovou rychlost (obr. 96 – krátery po dopadu střely pod úhlem $\beta = 55^\circ$). Toto je také vysvětlení pro zmenšování velikosti objemu impaktního kráteru od hodnoty dopadového úhlu $\beta = 50^\circ$.



Obrázek 95: Vypadnutí jádra střely z kráteru



Obrázek 96: Odraz střely od desky

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navržení a provedení experimentálního programu, který by měl po svém vyhodnocení dodat potřebná data k řešení problematiky šikmého dopadu projektilu na ultra-vysokohodnotný cementový kompozit vyztužený ocelovou rozptýlenou výztuží.

Proto bylo navrženo následující:

- Jako zkušební vzorek byla použita deska z ultra-vysokohodnotného betonu, vyztužena 2 objemovými procenty vysokopevnostní ocelovou rozptýlenou výztuží v podobě drátků délky 14 mm a průměru 0,13 mm. Deska měla rozměry 300×400 mm a tloušťku 40 mm, což zajistilo požadavek perforace desky při kolmém zásahu vzorku.
- Za projektil byla zvolena střela $7,62 \times 39$ mm s ústřovou energií kolem 2100 J, konkrétně střela s ocelovým jádrem, zajišťující lepší průbojné vlastnosti.
- Šikmý dopad byl realizován v rozmezí dopadového úhlu $\beta = 20^\circ$ až $\beta = 60^\circ$, kde jeden krok činil 5° .

Následně byly vyhodnoceny tyto charakteristiky porušení:

- Tvar celkového poškození,
- Chování projektilu po zasažení cíle,
- Hloubka penetrace,
- 2D a 3D povrch impaktního kráteru,
- Objem impaktního kráteru,
- Objem kráteru na odvrácené straně dopadu projektilu,
- Poměr rozměrů kráteru určující jeho tvar.

Z vyhodnocení vzešly tři základní scénáře dopadu projektilu na cíl. Celková perforace desky jádrem projektilu, zaražení jádra projektilu v desce a odraz projektilu od desky. Celkové poškození se v závislosti na dopadovém úhlu snižovalo, i když v některých případech byl pro konkrétní úhel dopadu zaznamenán velký rozptyl hodnot naměřeného poškození.

Jako základní parametry předurčující konečnou deformaci cíle byly určeny: efektivní tloušťka cíle, která souvisí s dopadovým úhlem β a změna trajektorie

penetrujícího ocelového jádra střely související převážně s tahovou deformací desky na straně dopadu projektilu.

Na základě této diplomové práce je doporučeno provést obdobný výzkum s jiným typem projektilu. Nabízí se projektil ráže 7,62×39 mm s čistě olovenou výplní, kde při dopadu na cíl dochází k větší disipaci energie než u střely s ocelovým jádrem. Dále by se mohl výzkum zabírat různými tvary přední části projektilu, které částečně předurčují stáčení trajektorie střely po dopadu na cíl. V rámci dalšího výzkumu by bylo také vhodné určit výstupní dráhu projektilu s jeho zbytkovou rychlostí.

Doporučuje se také podrobení důkladnější analýzy vzniklého poškození k určení převládajícího druhu zatížení, jenž toto poškození způsobilo. V nejlepším případě pak vytvoření simulace po vzoru Lia a kol. [41], která by přinesla zásadní poznatky.

6 Citovaná literatura

1. **Kusumawardaningsih, Yuliarti, Fehling, Ekkenhard a Ismail, Mohammed.** UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube? *ScienceDirect*. [Online] [Citace: 8. 9 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815034827>.
2. **Aïtcin, Pierre Claude.** *Vysokohodnotný beton*. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2005. 978-80-86769-39-4.
3. **Wu, Chengqing, a další.** Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *ScienceDirect*. [Online] [Citace: 8. 9 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029609001151#!>.
4. **Yu, Rui, Spiesz, P. a Brouwers, H.J.H.** Energy absorption capacity of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) in quasi-static mode and under high velocity projectile impact. *ScienceDirect*. [Online] [Citace: 10. 9 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516300245#!>.
5. **Riisgaard, Benjamin, a další.** Dynamic Increase Factors for High Performance Concrete in Compression using Split. *DTU Orbit*. [Online] 2007. [Citace: 12. 9 2018.]
http://orbit.dtu.dk/files/2899083/DIF_HPC_FraMCoS_ver_2.0.pdf.
6. **Li, Qingming, a další.** Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *ScienceDirect*. [Online] 2005. [Citace: 15. 9 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X05000692#!>.
7. **Pająk, Malgorzata.** The influence of the strain rate on the strength of concrete taking into account the experimental techniques. *Researchgate*. [Online] 2011. [Citace: 12. 9 2018.]
https://www.researchgate.net/publication/257610043_The_influence_of_the_strain_rate_on_the_strength_of_concrete_taking_into_account_the_experimental_techniques.
8. **Comité euro-international du béton.** *CEB-FIP model code 1990 : design code*. London : T. Telford, 1993. 0727716964.
9. **Tedesco, J. W. a Ross, C. A.** Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 1998.
10. **Grote, D. L., Park, S. W. a Zhou, M.** Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization. *International Journal of Impact Engineering* . 2001.

11. **Henrych, Josef.** *Dynamika výbuchu a její užití.* Praha : Academia nakladatelství Československé akademie věd, 1973. 509-21-875.
12. **Bartoš, Josef, a další.** Trhací práce a jejich vliv na stabilitu závěrných lomových stěn. *DOCZZ.* [Online] [Citace: 9. 9 2018.] <http://doczz.cz/doc/208491/trhac%C3%AD-pr%C3%A1ce-a-jejich-vliv-na-stabilitu-z%C3%A1v%C4%9Brn%C3%BDch-lomov%C3%BDc....>
13. **Komenda, Jan.** *Střelivo loveckých, sportovních a obranných zbraní.* Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita , 2006. 80-248-1254-1.
14. *Ocelová jádra střel. Střelecká revue.* 11/2006, Praha : Pražská vydavatelská společnost s.r.o., 2006. 0322-7650.
15. **The Ammo Channel.** AK47 Armor Piercing -VS- Steel Core 7.62x39 Incendiary Chinese. *YouTube.com.* [Online] 7. 8 2012. [Citace: 15. 9 2018.] <https://www.youtube.com/watch?v=7jqfRlSoK60>.
16. **Krčma, Vít.** *Atlas nábojů do ručních palných zbraní.* Praha : Naše vojsko, 2016. 978-80-206-1628-9.
17. **Zbraně.cz.** Sellier & Bellot 7,62 × 39 123 grs FMJ. *Zbraně.cz.* [Online] VOID CZ s.r.o., 2018. [Citace: 5. 10 2018.] <https://www.zbrane.cz/strelivo/naboje/sellier-bellot-7,62-39-123-grs-fmj-149>.
18. —. Sellier & Bellot 7,62 × 39 123 grs SP. *Zbraně.cz.* [Online] VOID CZ s.r.o., 2018. [Citace: 15. 9 2018.] <https://www.zbrane.cz/strelivo/naboje/sellier-bellot-7,62-39-123-grs-sp-148>.
19. —. 7,62 × 39 mm. *Zbraně.cz.* [Online] VOID CZ s.r.o., 2018. [Citace: 15. 9 2018.] <https://www.zbrane.cz/strelivo/raze/7,62x39-mm>.
20. *Test nábojů 7,62×39. Střelecká revue.* 2/2010, Praha : Pražská vydavatelská společnost s.r.o., 2010. 0322-7650.
21. **Termit.** Balistická ochrana, norma pro klasifikaci odolnosti. *diverzanti.cz.* [Online] [Citace: 28. 10 2018.] https://www.diverzanti.cz/cl_085e#zobraz2.
22. *bodyarmornews.com.* [Online] [Citace: 28. 10 2018.] <https://www.bodyarmornews.com/wp-content/uploads/2013/10/EN-1522.pdf>.
23. Armouring atandards. *freedom.eu.com.* [Online] Freedom Caravans Limited, 2017. [Citace: 28. 10 2018.] <http://freedom.eu.com/armouring-standards/#1499863417580-f804c7d3-fa36>.

24. **Kennedy, Robert P.** A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *ScienceDirect*. [Online] [Citace: 20. 9 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549376900157#!>.
25. **Yankelevsky, David.** Local response of concrete slabs to low velocity missile impact. *Science Direct*. [Online] 1997. [Citace: 12. 9 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X96000413#!>.
26. **Kong, Xiangzhen, a další.** Rigid and eroding projectile penetration into concrete targets based on an extended dynamic cavity expansion mode. *ScienceDirect*. [Online] 2017. [Citace: 20. 9 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X16300732#!>.
27. **Renade, Ravi, a další.** Impact resistance of high strength-high ductility concrete. *Science Direct*. [Online] 2017. [Citace: 15. 10 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884616300345#!>.
28. **Smith, Jovanca, a další.** Discrete modeling of ultra-high-performance concrete with application to projectile penetration. *Science Direct*. [Online] 2014. [Citace: 8. 10 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X13002017#!>.
29. **Liu, Jian, a další.** Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts. *Science Direct*. [Online] 2018. [Citace: 10. 15 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617337227#!>.
30. **Sovják, Radoslav, a další.** Experimental Investigation of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Slabs Subjected to Deformable Projectile Impact. *Science Direct*. [Online] 2013. [Citace: 3. 9 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813015282>.
31. **Máca, Petr, Sovják, Radoslav a Konvalinka, Petr.** Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact. *Science Direct*. [Online] 2014. [Citace: 20. 9 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X13001589#!>.
32. **Sovják, Radoslav, a další.** Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets. *Science Direct*. [Online] 2015. [Citace: 5. 10 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X14002346>.
33. **Wang, Shasha, a další.** Resistance of high-performance fiber-reinforced cement composites against high-velocity projectile impact. *Science Direct*. [Online] 2016. [Citace: 15. 10 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X16302159#!>.

34. **Wu, Hao, a další.** Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC. *Science Direct*. [Online] 2015. [Citace: 1. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X15000925#!>.
35. **Wu, Hao, a další.** Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320 m/s. *Science Direct*. [Online] 2015. [Citace: 12. 9 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814011854#!>.
36. **Goldsmith, Werner.** Non-ideal projectile impact on targets. *Science Direct*. [Online] 1999. [Citace: 5. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X98000311>.
37. **National Defense Research Committee.** Effect of impact and explosions. *Defense Technical Information Center*. [Online] 1946. [Citace: 5. 11 2018.]
<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/221586.pdf>.
38. **Chen, Xiaowei, Fan, Sau Cheong a Li, Qingming.** Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile. *Science Direct*. [Online] 2004. [Citace: 10. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X0300099X#!>.
39. **Li., Q. M. a Chen, Xiaowei.** Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *Science Direct*. [Online] 2003. [Citace: 20. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X02000374#!>.
40. **Liu, Yan, Huang, Fenglei a Ma, Aie.** Numerical simulations of oblique penetration into reinforced concrete targets. *Science Direct*. [Online] 2011. [Citace: 1. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122110006929#!>.
41. **Liu, Yan, Ma, Aie a Huang, Fenglei.** Numerical simulations of oblique-angle penetration by deformable projectiles into concrete targets. *Science Direct*. [Online] 2009. [Citace: 1. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X08001231>.
42. **Hanchak, Stephen J., a další.** Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths. *Science Direct*. [Online] 1992. [Citace: 2. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X9290282X#!>.
43. **Teng, Tsoliang, a další.** Numerical analysis of oblique impact on reinforced concrete. *Science Direct*. [Online] 2005. [Citace: 5. 11 2018.]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504001349#!>.

44. **Hurtig, Karel.** Vliv orientace vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení . *ČVUT DSpace*. [Online] 2017. [Citace: 14. 12 2018.] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70773>.
45. **Poláček, Michal.** Vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení . *ČVUT DSpace*. [Online] 2017. [Citace: 14. 12 2018.] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70776>.
46. **Kheml, Přemysl.** Vliv tloušťky vlákny vyztuženého kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení . *ČVUT DSpace*. [Online] 2017. [Citace: 14. 12 2018.] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70766>.
47. **Pommer, Vojtěch.** Balistická odolnost vysokohodnotného vlákny vyztuženého cementového kompozitu vůči vícenásobnému dopadu projektilu . *ČVUT DSpace*. [Online] 2017. [Citace: 14. 12 2018.] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70660>.
48. **Petřík, Filip.** Vliv hrubého kameniva ve vysokohodnotném betonu na odolnost proti nárazu projektilu . *ČVUT DSpace*. [Online] 2017. [Citace: 14. 12 2018.] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70565>.
49. **Vavřínek, Tomáš.** Experimentální a numerická analýza nárazu projektilu na cementový kompozit . *ČVUT DSpace*. [Online] 2014. [Citace: 14. 12 2018.] <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/23771>.
50. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 6. *Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu*. Česká republika. Užitiný vzor CZ 30 170 U1 20.12.2016.
51. **Kravanja, Sebastjan a Sovják, Radoslav.** ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE UNDER HIGH-VELOCITY PROJECTILE IMPACT. PART I. EXPERIMENTS. *Acta polytechnica*. [Online] 2018. [Citace: 2. 10 2018.] <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/4922/4780>.
52. **Kravanja, Sebastjan, a další.** Penetration Resistance of Semi-infinite UHPFRC Targets with various Fiber Volume Fractions against Projectile Impact. *Science Direct*. [Online] 2017. [Citace: 29. 11 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817327418>.
53. **Krauthammer, Theodor.** *Modern Protective Structures*. místo neznámé : CRC Press, 2008. 9780824725266.
54. **Bureš, Jiří.** Rychlost zvuku v pevných látkách. *conVERTER.cz*. [Online] [Citace: 5. 1 2019.] <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-pevne.htm>.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Mechanické vlastnosti běžného betonu (NSC) a ultra-vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny (UHPFRC) při zatížení tlakem, resp. tahem [3].....	14
Obrázek 2: Hlavní parametry UHPFRC při 4-bodém zatěžování [4]	14
Obrázek 3: Oblasti zatížení dle rychlosti přetvoření [5]	15
Obrázek 4: DIF v závislosti na rychlosti přetvoření u zatížení tahem [7].....	16
Obrázek 5: Porovnání empirických vztahů pro výpočet DIF [6]	16
Obrázek 6: Závislost tlakových napětí na poměrné objemové deformaci pro tuhá tělesa [11].....	17
Obrázek 7: Změna profilu napěťové vlny v pevném tělese se vzdáleností [11]	18
Obrázek 8: Schéma rozrušení horniny při výbuchu nálože v blízkosti volného povrchu [11].....	20
Obrázek 9: Vnitřní uspořádání střel a jejich zkrácené označení [13].....	22
Obrázek 10: Pušková průbojná jádrová střela[13]	23
Obrázek 11: Celoplášťové střely pro služební náboje [13].....	24
Obrázek 12: Náboj 7,62 × 39 [17] [18].....	25
Obrázek 13: Různé druhy nábojů 7,62 × 39 [20].....	26
Obrázek 14: Typy poškození materiálu po nárazu střely [6], [24].....	31
Obrázek 15: Empirické modely pro hloubku penetrace a perforaci [25]	32
Obrázek 16: Závislost hloubky penetrace na modulu pružnosti testovaného materiálu [33].....	34
Obrázek 17: Poškození desek na čelní a zadní straně způsobené dopadem projektilu [30].....	35
Obrázek 18: Zadní strana desky zasažená střelou 7,62×39 s ocelovým a olověným jádrem [31]	36
Obrázek 19: Řez krátery dvou desek zasažených střelou 7,62×39 s olověným jádrem [32]	36
Obrázek 20: Porovnání poškození na zadní straně pro NSC, UHPC a UHPC s 3% a 5% vláken [28].....	37
Obrázek 21: Závislost rychlosti projektilu na čase po dopadu na cíl [28]	38
Obrázek 22: Závislost residuální rychlosti vztažené na rychlost dopadu na obsahu vláken [32]	38
Obrázek 23: Časová změna energie systému projektil – deska [28].....	39
Obrázek 24: Projektil z legované oceli [35]	39
Obrázek 25: 7,62×39 s olověným a ocelovým jádrem [32]	39
Obrázek 26: Schéma zkoušky UHPC [34].....	40
Obrázek 27: Poškození vzorků po dopadu projektilu [29].....	41
Obrázek 28: Dopad 38 mm M80 AP projektilu na betonovou desku o tloušťce 226 mm [36; 37].....	42
Obrázek 29: Dopad 38 mm M80 AP projektilu na betonovou desku o tloušťce 559 mm [36; 37].....	43
Obrázek 30: Graf závislosti balistických charakteristik a rychlosti, resp. úhlu dopadu [36; 37]	44
Obrázek 31: Kritický úhel dopadu pro beton, vodu a zeminy [36; 37].....	45
Obrázek 32: Proces perforace projektilem a jeho tři fáze [38].....	46
Obrázek 33: Proces perforace cíle bez jeho druhé fáze [38].....	47
Obrázek 34: Schéma zadního kráteru [38].....	47
Obrázek 35: Tahové a tlakové přetvoření od nárazu projektilu [40]	48
Obrázek 36: Srovnání simulace s experimentálními daty [40]	49
Obrázek 37: Tlakové porušení přední strany desky a její simulace [41]	50

Obrázek 38: Tahové porušení zadní strany desky a její simulace [41]	50
Obrázek 39: Řez simulovaným cílem s rozdělením tlakového a tahového poškozením [41]	50
Obrázek 40: Tahové porušení vzorku po dopadu projektilu [41]	51
Obrázek 41: Von Misesovo efektivní napětí ($\times 100$ GPa) [41]	51
Obrázek 42: Trajektorie čela projektilu po zasažení cíle [41].....	52
Obrázek 43: Tahové a tlakové přetvoření po nárazu projektilu [41]	52
Obrázek 45: Změna rychlosti projektilu v čase [43].....	53
Obrázek 44: Kolmý dopad v čase 300 a 1050 μ s [43]	53
Obrázek 46: 2D simulace šikmého dopadu projektilu na železobetonový cíl [43]	54
Obrázek 47: Komponenty UHPFRC, forma, laboratorní míchačka a uložená čerstvá směs	57
Obrázek 48: Schéma zkoušky balistické odolnosti	58
Obrázek 49: Natáčení systému pro zajištění šikmého úhlu dopadu	58
Obrázek 50: Řez střelou 7,62 \times 39 [14]	59
Obrázek 51: Efektivní tloušťka cíle	59
Obrázek 52: Senzor optoNCDT 1302 na pohyblivém hliníkovém rameni	60
Obrázek 53: Skeny profilu kráteru ve směru dopadu střely zobrazeny v tabulkovém procesoru	61
Obrázek 54: Software David SLS a jeho příslušenství	62
Obrázek 55: Sloučené skeny pro vytvoření 3D objektu v předním a bočním pohledu	62
Obrázek 56: Měření 2D povrchu kráteru pomocí CAD programu	63
Obrázek 57: 3D objekt kráteru v programu David.....	63
Obrázek 58: Prohlížení, grafická úprava a měření rozměrů v programu MeshLab	64
Obrázek 59: Injekční stříkačka pro plnění kráteru pískem	65
Obrázek 60: Krátery vysypané jemnozrnným pískem	65
Obrázek 61: Ocelová jádra střel 7,62 \times 39 mm	67
Obrázek 62: Řezy UHPFRC desek a jejich poškození způsobené dopadem projektilu 7,62 \times 39 mm	68
Obrázek 63: Tvar kráterů po zásahu projektilem pod úhlem 0, 20, 35, 40, 45 a 60°	69
Obrázek 64: Průstřel desky při dopadovém úhlu $\beta = 20^\circ$	70
Obrázek 65: Zasažené jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 40^\circ$	70
Obrázek 66: Zasažené jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 35^\circ$	71
Obrázek 67: Příklad odrazení střely od desky při dopadovém úhlu $\beta = 55^\circ$	71
Obrázek 68: Poškozená deska při dopadovém úhlu $\beta = 25^\circ$	72
Obrázek 69: Zasažené jádro střely při dopadovém úhlu $\beta = 25^\circ$	72
Obrázek 70: Graf závislosti hloubky penetrace na dopadovém úhlu β	73
Obrázek 71: Graf závislosti 2D a 3D povrchu kráteru na dopadovém úhlu β	75
Obrázek 72: Graf závislosti objemu čelního kráteru na dopadovém úhlu β	76
Obrázek 73: Závislost velikosti objemu zadního kráteru na dopadovém úhlu β	77
Obrázek 74: Závislost poměru rozměrů kráteru na dopadovém úhlu β	78
Obrázek 75: Změna tvaru kráteru v intervalu dopadového úhlu $\beta = 0^\circ$ až $\beta = 60^\circ$	79
Obrázek 76: Záznam dopadu projektilu se snímkovací frekvencí 10000 fps	81
Obrázek 77: Tvar celkového kráteru při kolmém dopadu střely	82

Obrázek 78: Závislost efektivní tloušťky cíle na dopadovém úhlu β	83
Obrázek 79: Změna trajektorie jádra střely.....	85
Obrázek 81: Tahové poškození.....	87
Obrázek 82: Tahové poškození.....	87
Obrázek 80: Tahové poškození podle Lia [41].....	87
Obrázek 83: Tahové a tlakové poškození podle Lia [41].....	88
Obrázek 84: Znázornění tahové a tlakové deformace.....	88
Obrázek 85: Znázornění tahové a tlakové deformace – dopadový úhel $\beta = 45^\circ$	89
Obrázek 86: Znázornění tlakové a tahové deformace v případě perforace desky.....	89
Obrázek 87: Zadní kráter - scabbing.....	90
Obrázek 88: Poškození na zadní straně desky - vypuklina vzniklá scabbingem.....	91
Obrázek 89: Perforace desky smykovým vyražením materiálu.....	91
Obrázek 90: Efektivní tloušťka, povrch, objem a chování projektilu v cíli.....	93
Obrázek 91: Závislost celkového objemu kráterů na dopadovém úhlu β	94
Obrázek 92: Průměry hodnot celkového objemu kráterů v závislosti na dopadovém úhlu β	94
Obrázek 93: Dopad projektilu 7,62×39 mm na cíl.....	95
Obrázek 94: Efektivní napětí dle Lia [41].....	95
Obrázek 95: Vypadnutí jádra střely z kráteru.....	96
Obrázek 96: Odraz střely od desky.....	96

Seznam tabulek

Tabulka 1: ČSN 39 5360 - Klasifikace a požadavky na testování s pistolemi a puškami [21]	27
Tabulka 2: EN 1522 - Klasifikace a požadavky pro testování s pistolemi a puškami [22]	28
Tabulka 3: Doplnění tabulky pro klasifikaci a požadavky pro testování s pistolemi a puškami [22]	28
Tabulka 4: Efektivní tloušťka cíle	59
Tabulka 5: Chování projektilu po zásahu cíle.....	66
Tabulka 6: Hodnoty hloubky penetrace v závislosti na dopadovém úhlu β	73
Tabulka 7: Hodnoty 2D a 3D povrchu kráterů na dopadové straně testované desky.....	75
Tabulka 8: Hodnoty velikosti objemu čelního kráteru.....	76
Tabulka 9: Hodnoty velikosti objemu zadního kráteru.....	77
Tabulka 10: Hodnoty rozměrů kráteru na přední straně a jejich poměr.....	78

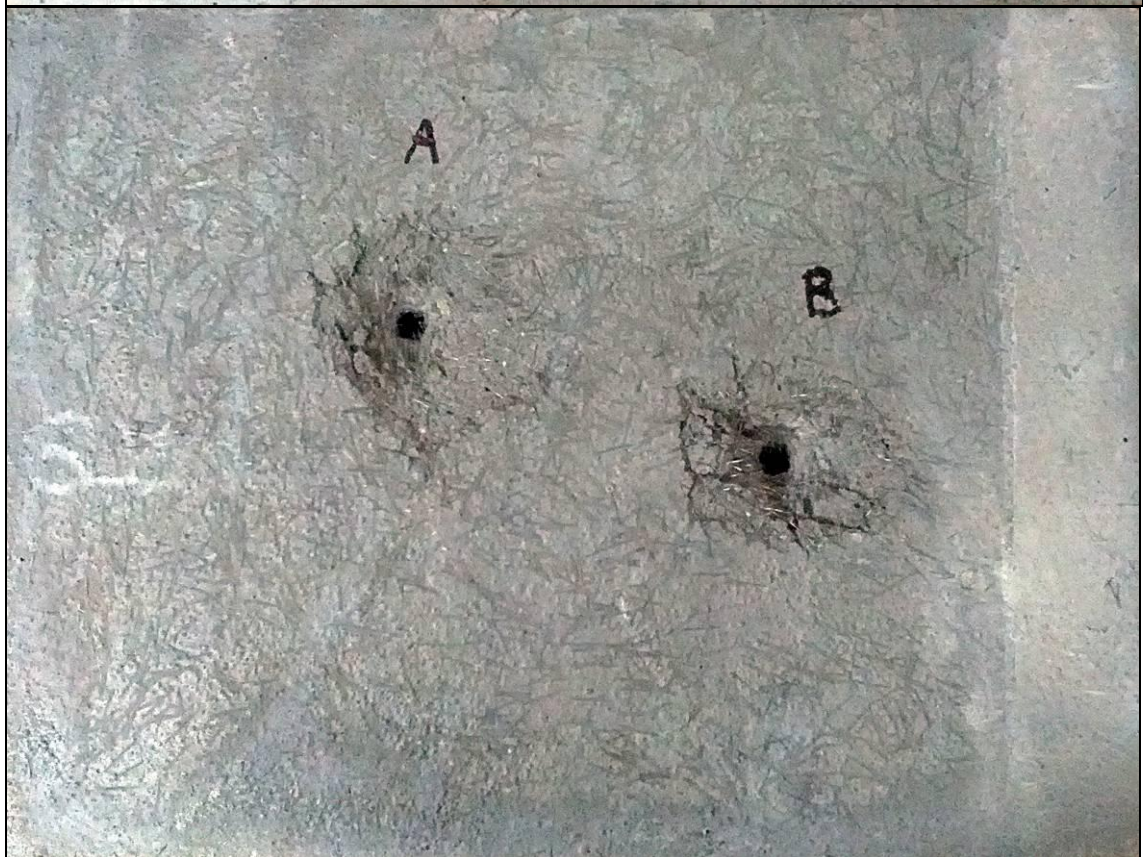
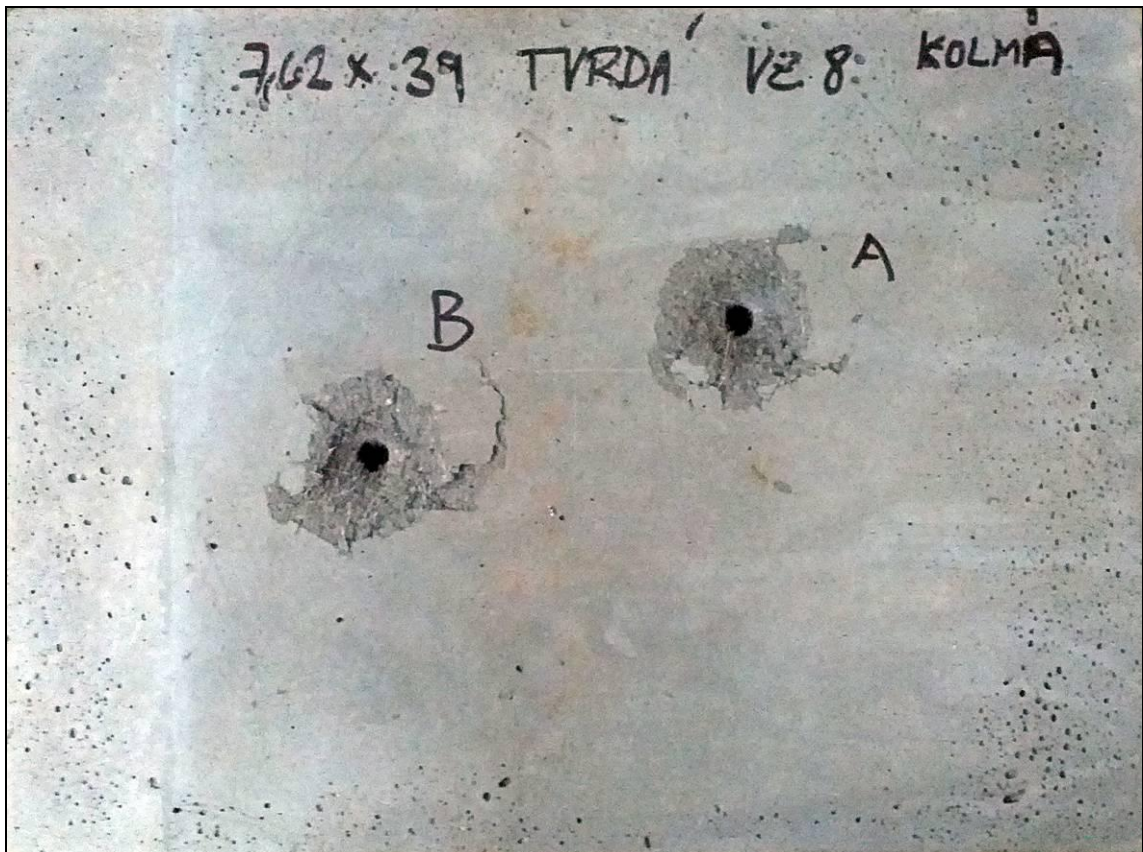
Seznam příloh

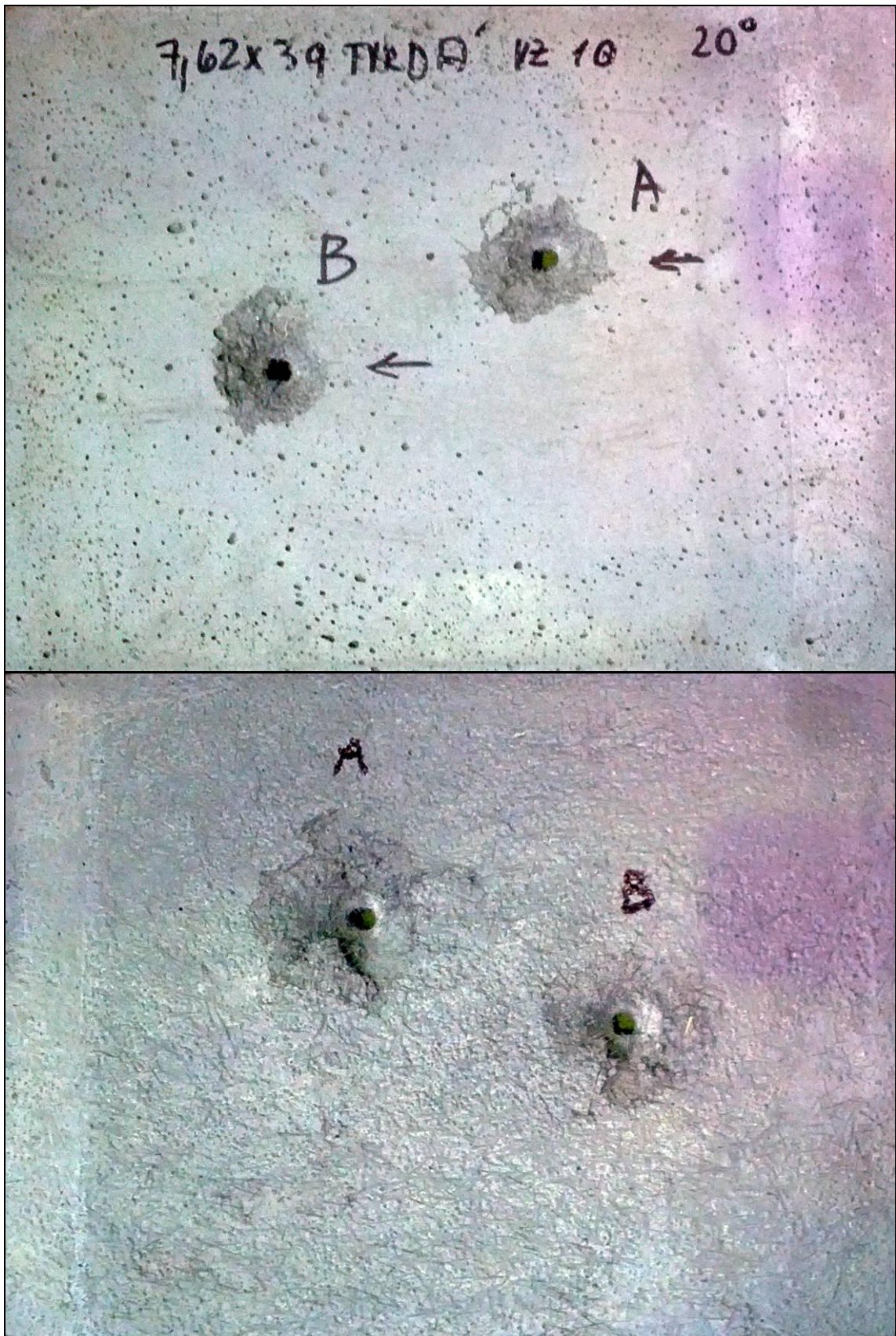
Příloha 1: Komplexní tabulka všech měřených charakteristik.....	108
Příloha 2: VZ. 8N - dopadový úhel $\beta = 0^\circ$	109
Příloha 3: VZ. 10N - dopadový úhel $\beta = 20^\circ$	110
Příloha 4: VZ. 13 - dopadový úhel $\beta = 25^\circ$	111
Příloha 5: VZ. 11 - dopadový úhel $\beta = 30^\circ$	112
Příloha 6: VZ. 10 - dopadový úhel $\beta = 35^\circ$	113
Příloha 7: VZ. 9 - dopadový úhel $\beta = 40^\circ$	114
Příloha 8: VZ. 8 - dopadový úhel $\beta = 45^\circ$	115
Příloha 9: VZ. 4N - dopadový úhel $\beta = 50^\circ$	116
Příloha 10: VZ. 5N - dopadový úhel $\beta = 55^\circ$	117
Příloha 11: VZ. 3N - dopadový úhel $\beta = 60^\circ$	118

7 Přílohy

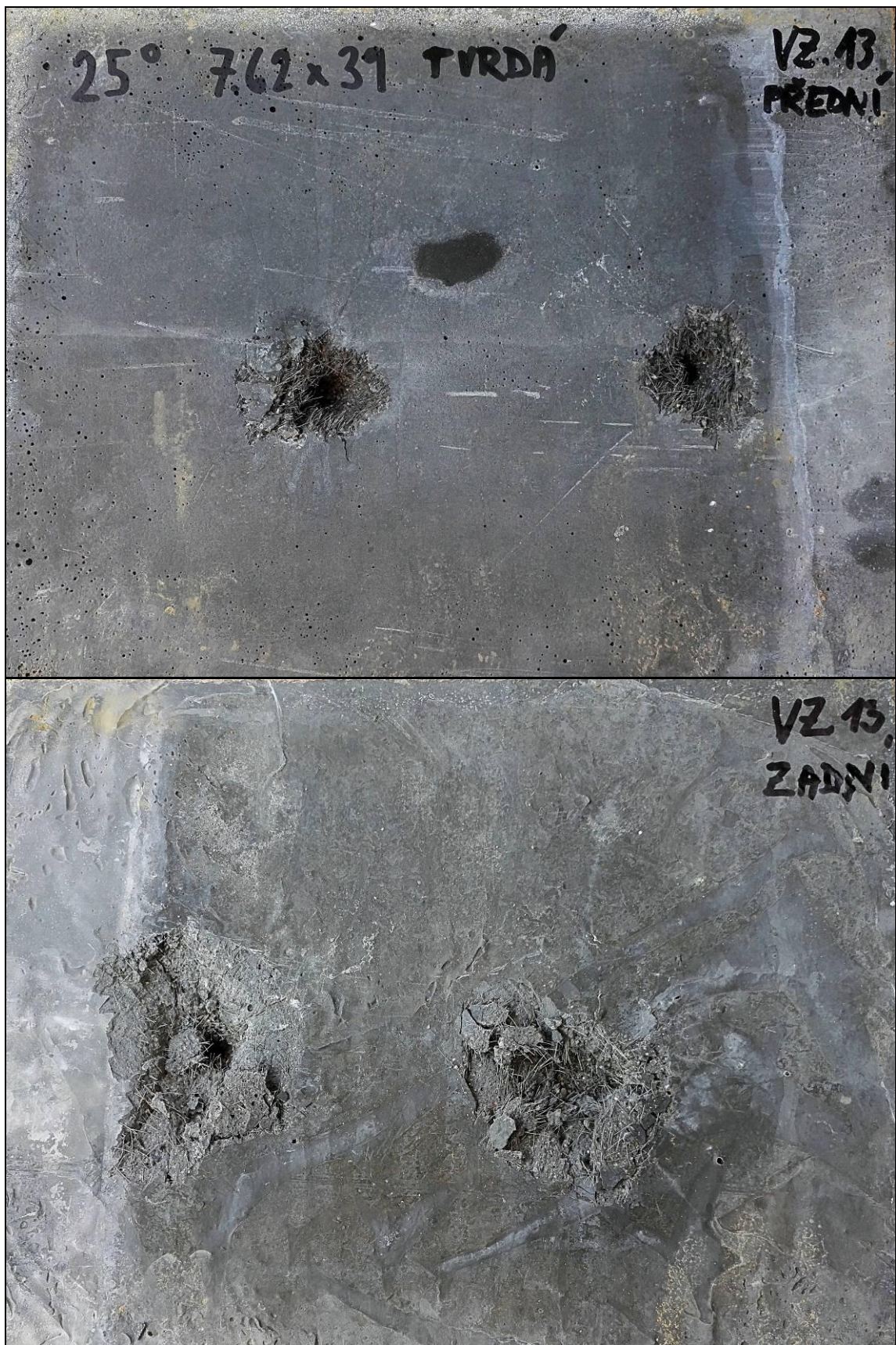
Příloha 1: Komplexní tabulka všech měřených charakteristik

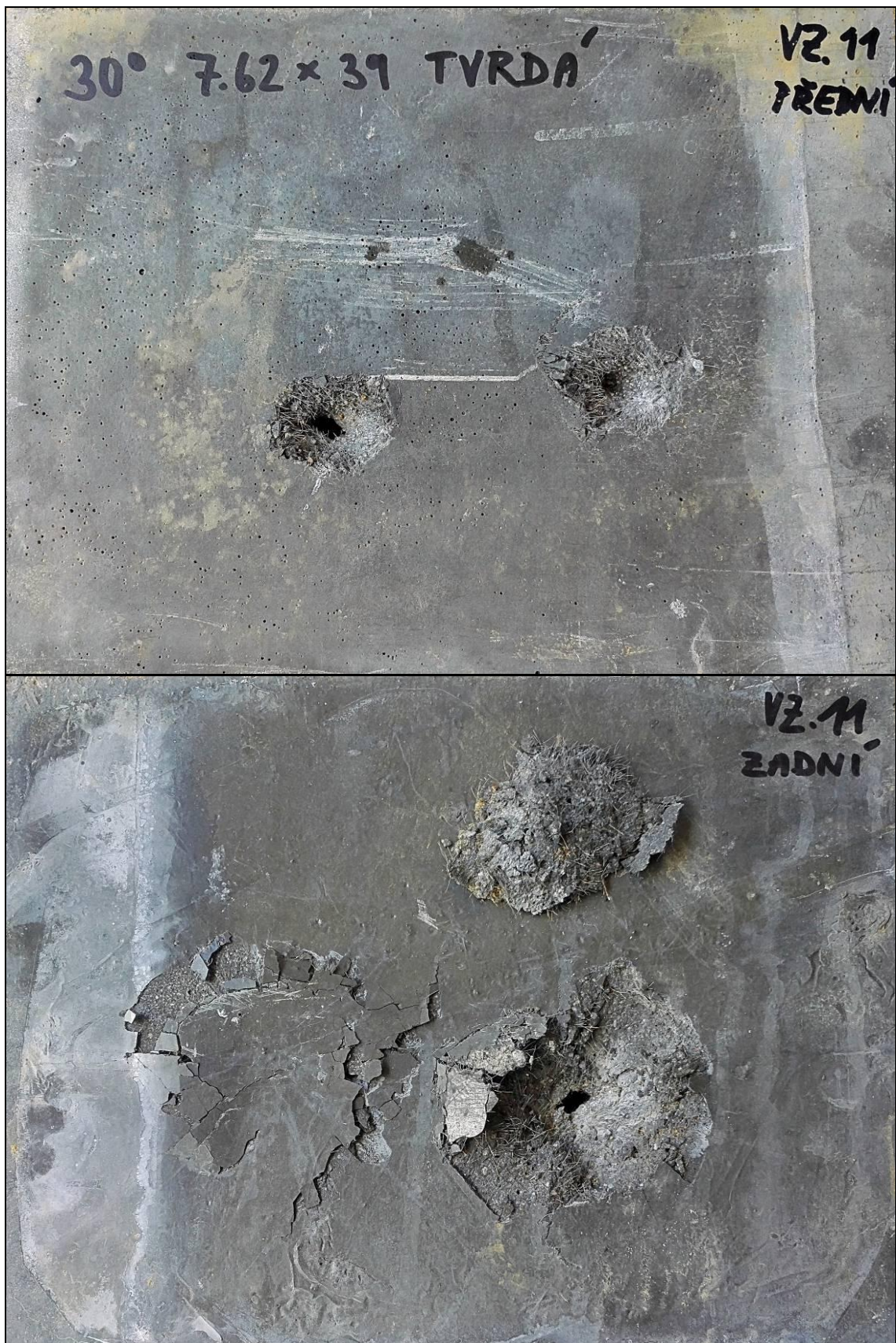
Číslo vzorku	Dopadový úhel [°]	Chování střely	Hloubka penetrace [mm]	2D povrch předního kráteru [mm ²]	3D povrch předního kráteru [mm ²]	Horizontální rozměr kráteru <i>a</i> [mm]	Vertikální rozměr kráteru <i>b</i> [mm]	Poměr <i>a/b</i> [-]	Objem předního kráteru [cm ³]	Objem zadního kráteru [cm ³]
5	60	O	9,0	1388	1729	46,0	36,6	1,26	5,0	
1N	60	O	8,6	1584	2001	53,2	36,2	1,47	5,5	
		O	9,1	1751	2295	58,2	39,8	1,46	7,0	
3N	60	O	10,8	1689	2319	55,7	40,6	1,37	7,0	
		O	9,2	1773	2308	58,0	41,5	1,40	6,0	
		O	9,3	1573	2014	52,0	41,5	1,25	6,0	
6	55	O	9,0	1640	2174	56,4	40,0	1,41	7,0	
		O	12,0	2233	2933	67,8	43,1	1,57	10,0	
5N	55	O	11,7	2235	3087	65,2	50,2	1,30	10,5	
		O	11,6	2246	3217	68,8	43,5	1,58	11,0	
7	50	O	12,0	2102	2991	58,0	42,1	1,38	10,5	
		O	11,0	1915	2846	58,0	39,6	1,46	10,0	
4N	50	O	13,2	2690	3801	75,1	47,9	1,57	13,5	
		O	12,6	2423	3503	75,6	48,7	1,55	12,0	
8	45	O	15,3	2913	4314	72,3	54,0	1,34	14,0	
		O	15,3	2866	4426	74,0	55,1	1,34	14,5	
9	40	O	16,5	2318	4137	67,8	52,4	1,29	14,0	
		ZS	18,0	2061	3698	61,9	42,7	1,45	13,5	46,0
10	35	ZS	20,0	1805	3062	56,5	45,9	1,23	12,0	
		ZS	21,0	2314	3856	61,4	44,7	1,37	15,0	
15	35	ČP		2557	3866	68,5	59,4	1,15	15,5	43,0
		ZS	24,5	1861	2980	44,6	51,3	0,87	15,0	
11	30	ZS	19,8	1943	3070	57,5	43,4	1,32	11,0	
		ČP		1633	2961	52,4	42,0	1,25	12,0	69,0
14	30	ČP		2647	3781	63,6	56,7	1,12	14,5	20,0
		ZS	19,0	2304	3529	55,1	51,2	1,08	12,5	
12	25	ČP		1820	2963	48,8	45,8	1,07	12,0	27,0
		ZS	18,0	1702	3089	56,6	42,6	1,33	12,5	48,0
13	25	ČP		2097	3287	48,2	54,0	0,89	11,5	42,0
		ZS	18,8	1819	3364	65,2	49,2	1,33	12,5	29,0
5	20	ČP		2001	2908	52,2	53,0	0,98	10,0	42,0
		ČP		2063	3064	61,0	46,1	1,32	10,0	36,0
10N	20	ČP		2216	3320	62,0	52,3	1,19	10,5	25,5
		ČP		2074	2955	48,5	61,0	0,80	10,0	20,0
8N	0	ČP		2439	3371	56,6	60,7	0,93	10,5	31,0
		ČP		2610	3346	69,5	64,2	1,08	11,5	26,0
9N	0	ČP		2328	3397	48,3	63,4	0,76	9,5	26,0
		ČP		3003	3811	66,5	57,7	1,15	12,0	27,0





Příloha 4: VZ. 13 - dopadový úhel $\beta = 25^\circ$



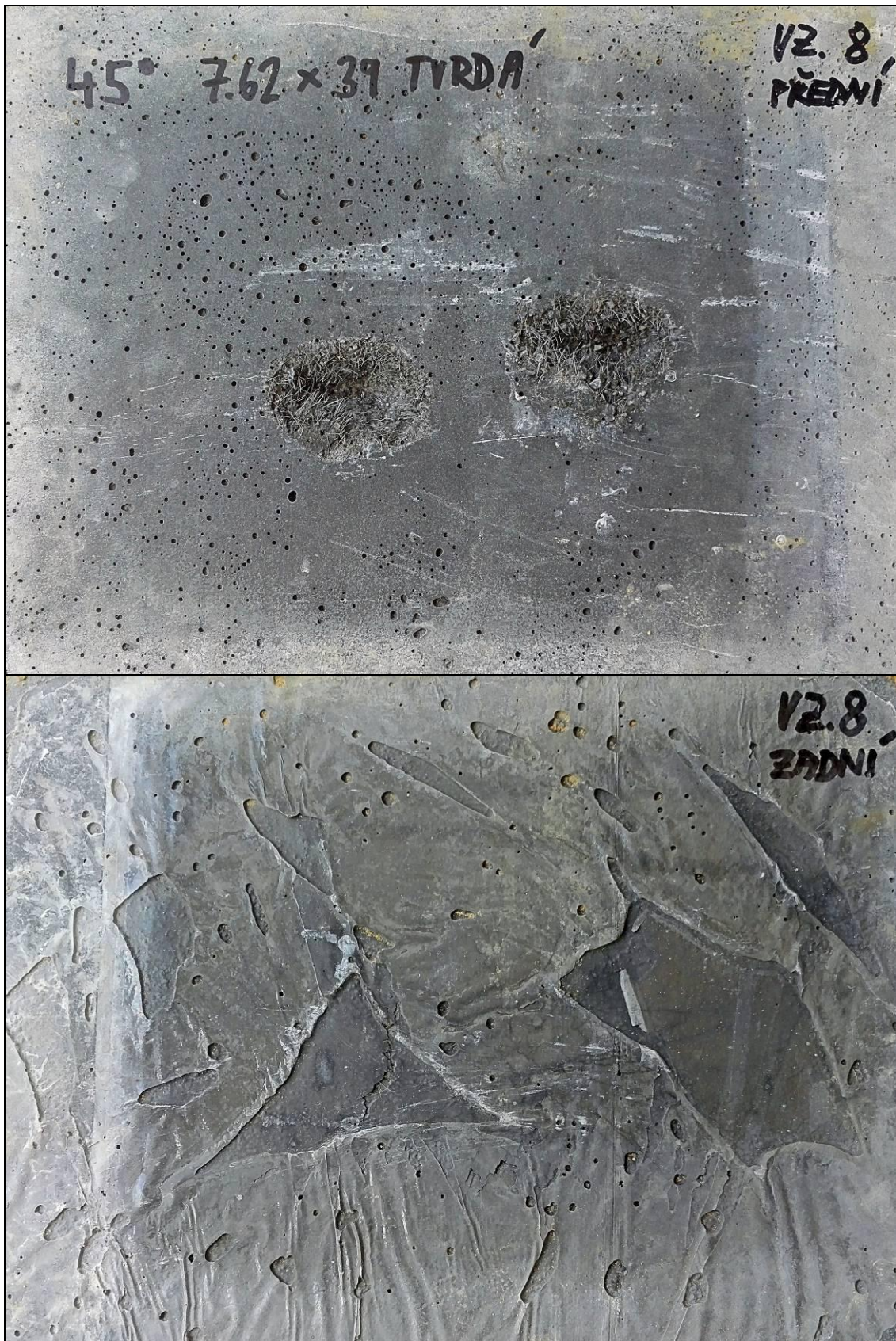


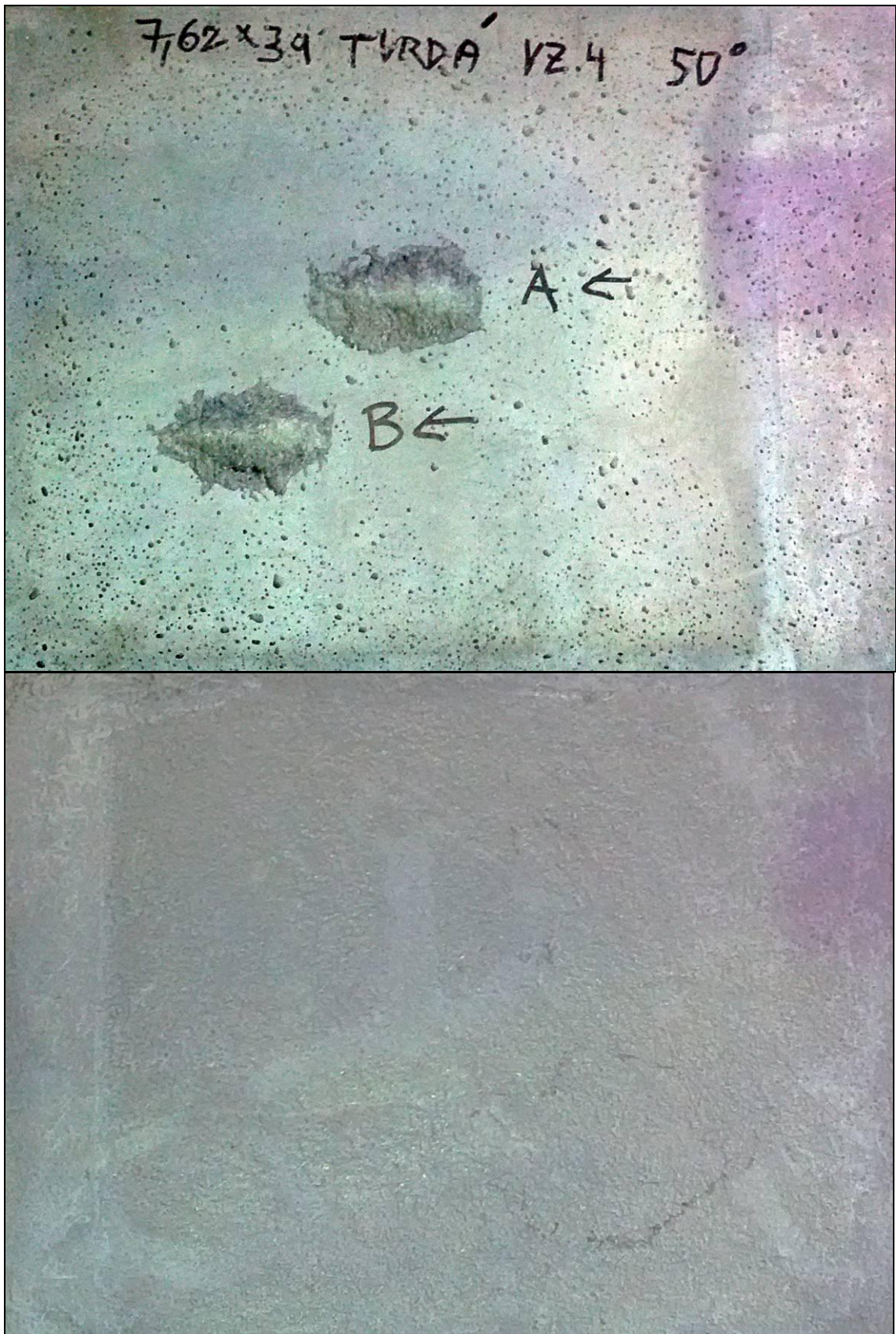
Příloha 6: VZ. 10 - dopadový úhel $\beta = 35^\circ$

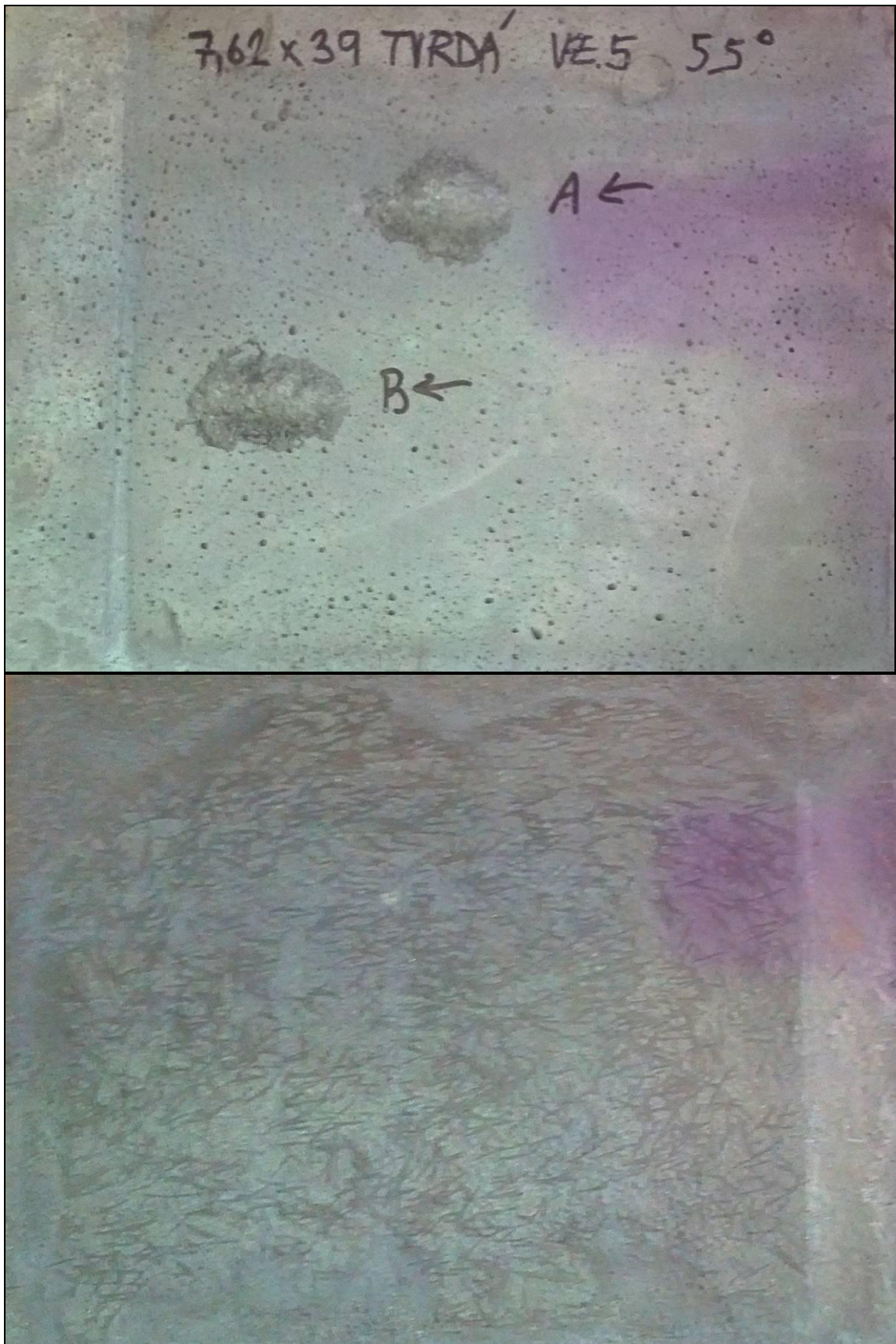




Příloha 8: VZ. 8 - dopadový úhel $\beta = 45^\circ$







Příloha 11: VZ. 3N - dopadový úhel $\beta = 60^\circ$

