



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Civil Engineering

**Ochranné konstrukce z pokročilých vláknů  
vyztužených cementových kompozitů**

**Protective structures made of advanced  
fibre-reinforced cementitious composites**

DOC. ING. Bc. **RADOSLAV SOVJÁK**, PH.D., LL.M.

Praha, 2023

# Summary

The lecture deals with the basic aspects of the design and testing of ultra-high-performance fibre-reinforced concretes against extreme loads. Specifically, laboratory methods for studying impact loading on cementitious composites are mentioned, as well as the effects of vehicle ramming attack, projectile impact, and blast. Concrete and other cementitious materials are commonly used as construction materials for protective structures and in the manufacturing of prefabricated structural elements to enhance the protection of existing systems against shock and blast waves, fragments or projectile impact. By using fibre-reinforced concrete and modern cementitious composites, the protective capability of structures can be further enhanced due to the significantly improved mechanical properties of these materials and their remarkable ability to dissipate energy from impulsive shock loads, as well as their ability to localize damage to a relatively small area.

# Souhrn

Přednáška se zabývá základními aspekty návrhu a testování ultra vysokohodnotných vláknů vyztužených betonů vůči mimořádným zatížením. Konkrétně jsou zmíněny laboratorní metody pro studium rázového zatížení na cementové kompozity a dále účinky nárazu automobilu, nárazu projektilu a výbuchu. Beton a jiné cementové materiály jsou běžně používány jakožto stavební materiály při výstavbě ochranných konstrukcí a při výrobě prefabrikovaných konstrukčních prvků, které slouží pro zvýšení ochrany stávajících konstrukcí proti šokové a tlakové vlně výbuchu, nárazu fragmentu či projektilu. Užitím drátkobetonu a nových cementových kompozitů může být ochranná schopnost konstrukcí ještě více zvýšena vzhledem k výrazně lepším mechanickým vlastnostem těchto materiálů a jejich velké schopnosti disipace energie od impulsivního rázového zatížení a také schopnosti lokalizovat poškození do relativně malé oblasti.

## Klíčová slova

cementové kompozity, vláknitá výztuž, UHPC, ochranné konstrukce, fyzická bezpečnost, balistické zatížení, náraz vozidla, výbuch

## Keywords

cementitious composites, fibre reinforcement, UHPC, protective structures, physical safety, ballistic loading, vehicle-ramming attack, explosion

# Obsah

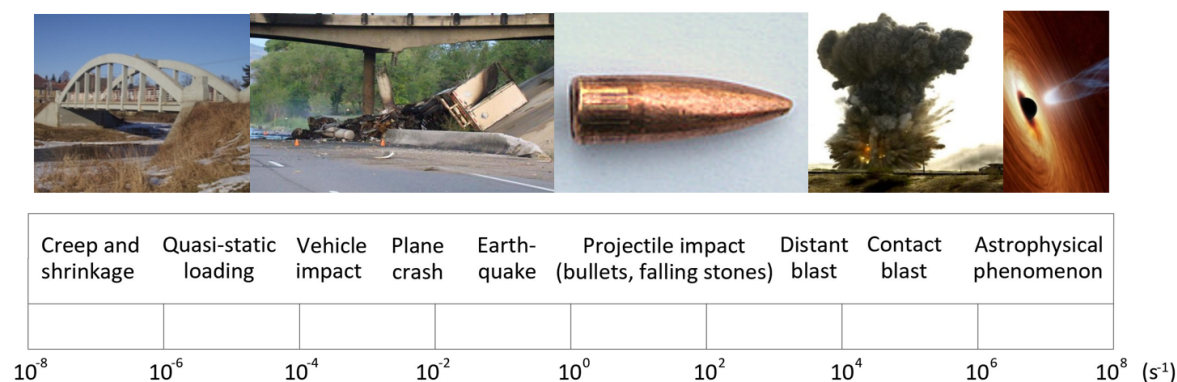
<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>6</b>
1.1	Ultra vysokohodnotné betony . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Laboratorní testování</b>	<b>13</b>
2.1	Rázové kyvadlo . . . . .	13
2.2	Crash komín . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Náraz automobilu</b>	<b>18</b>
3.1	Zábrana proti vjezdu automobilu . . . . .	18
3.2	Sjezd s integrovanou deformační zónou . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Balistické zatížení</b>	<b>24</b>
4.1	Polonekonečné cíle . . . . .	26
4.2	Tenké konstrukce . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Výbuch</b>	<b>32</b>
5.1	Tenké desky . . . . .	33
5.2	Košě . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Strukturovaný životopis autora</b>	<b>44</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Ochranné konstrukce jsou navrhovány tak, aby odolaly extrémnímu zatížení, stále zajišťovaly svou statickou funkci a zabránily vzniku progresivního kolapsu po mimořádné události. Druhou podmínkou bývá minimalizace uvolňovaných fragmentů při působení extrémního zatížení na konstrukci, které mají velmi vysokou rychlost a vysoký zraňující potenciál. Aby bylo zabráněno kolapsu konstrukcí a zranění lidí, musí mít konstrukce z vysokopevnostních materiálů mnohem větší odolnost vůči zatížení nárazem. Je známo, že tradiční, vlákny vyztužený beton (FRC) s normální pevností matrice, má vysokou kapacitu absorpce energie [47]. Někteří autoři [16, 2] však naznačují, že UHPC má mnohem větší schopnost absorbovat energii, a to při kvazistatickém i dynamickém zatížení.

Nárazy předmětů, technologické havárie, výbuchy muničních skladů a nedávné teroristické útoky jasně naznačily, že objekty vojenského a strategického významu musí být schopné odolat rázům a explozím. Takovými událostmi mohou být například rázy nahodilých předmětů, generované silnými poryvy větru, nárazy vozidel, pády letadel a fragmenty generované haváriemi technologických zařízení, jako např. turbín, potrubí a plynovodů. Stranou nezůstávají ani fragmenty generované záměrně umístěnými výbušninami, které mohou zasáhnout široké okolí až do vzdálenosti několika stovek metrů. S neustále se rozšiřující infrastrukturou roste i pravděpodobnost takové nahodilé události. S těmito důvody přirozeně roste zájmem o vývoj stavebních prvků z pokročilých kompozitních materiálů, které by byly schopny absorbovat a disipovat maximum energie výbuchu a rázu, a tím snížit škody na majetku a újmy na zdraví a životech osob. Nahodilé předměty, fragmenty či projektily generované různými událostmi (dále jen projektily) se mohou vzájemně lišit svou hmotností, rychlostí, tvarem, tuhostí a trajektorií letu [40]. Projektil generovaný výbuchem, ať se jedná o technologickou havárii nebo teroristický útok, bude mít zřejmě vysokou rychlost, podmíněnou relativně nízkou hmotností samotného projektilu. Projektil generovaný technologickou havárií má nižší rychlost než projektil generovaný improvizovanou výbušninou.



Obrázek 1.1: Rychlosti poměrného přetvoření.

Mezi extrémní zatěžovací jevy můžeme řadit taková zatížení, která jsou velmi prudká a zpravidla se odehrávají v řádu milisekund. Extrémní účinky zatížení jsou tedy velmi rychlé, dynamické neopakující se jevy. Ty lze rozlišovat pomocí tzv. rychlosti poměrného přetvoření, které vyvodí působením na konstrukci. (Obrázek 1.1), anglicky tzv. „strain-rate“. Protože se jedná o rychlost nárůstu poměrného přetvoření, je jednotka pro „strain-rate“  $s^{-1}$ . Při dynamickém zatížení dochází k velmi vysokým rychlostem deformace a obecně lze konstatovat, že rychlosti deformací u rázových dějů jsou až  $10^6$  vyšší než u kvazistatického zatěžování.

V dalších částech přednášky jsou nastíněny typické zatěžovací jevy, které jsou na sebe navázány vzestupně podle výše zmíněných rychlostí poměrného přetvoření. Prvním a relativně nejpomalejším druhem zatížení je náraz automobilu, pokračuje balistické zatížení a posledním extrémním a nejrychlejším jevem je výbuch. Každé takovéto impulsivní zatížení je velmi specifické a rychlost poměrného přetvoření je jen základním ukazatelem, který se používá pro jeho základní začlenění. Vedle samotné rychlosti je nutné sledovat, jestli jde o zatížení úzce lokální, distribuované na širší část konstrukce, nebo globální, působící na celou konstrukci. V některých případech jsou některá tato zatížení sdružená a působí společně.

Náraz projektilu lze například v širším slova smyslu chápat jako úlomek vzniklý z vysokorychlostního rotujícího stroje, explozí generovaný fragment a v neposlední řadě projektil generovaný z přímého ozbrojeného útoku. Dopad projektilu lze považovat za zatížení způsobující vysokou rychlost deformace v řádu  $1 \times 10^0$  až  $1 \times 10^3 s^{-1}$ . Toto zatížení je způsobeno objektem pohybujícím se vysokou rychlostí a majícím relativně nízkou hmotnost. Tento druh zatížení je dále možno charakterizovat rychlým nárůstem uvolněné energie ve velmi krátkém čase. Existuje několik mechanismů poškození během průniku střely, které jsou aktivovány najednou, jako je stlačení, víceosý stav napjatosti, tah za ohybu a smyk. Složitost je dále umocněna tím, že účinek rychlosti deformace

se liší pro různé typy namáhání každého mechanismu. Pro simulaci účinků vyvolaných nárazem střely byla použita řada testů a využito střelných zbraní s ostrým střelivem.

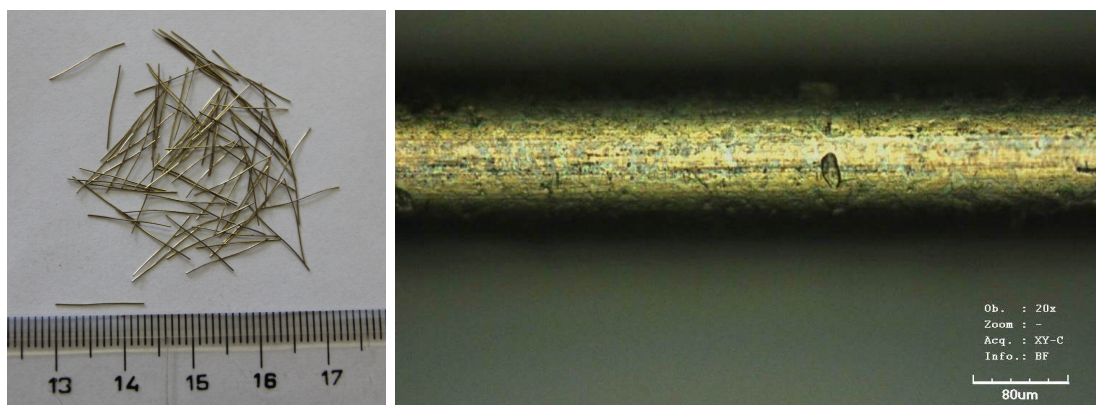
U všech konstrukcí, které byly v rámci této přednášky pod vysokorychlostním zatížením zkoumány, se prolíná jeden společný prvek, kterým je testovaný materiál. Byť se jednalo o různé konstrukce, vždy byl pro jejich výrobu použit ultra vysokohodnotný vlákny vyztužený cementový kompozit s vnitřní rozptýlenou ocelovou výztuží. Z anglického Ultra-High-Performance Steel-Fibre-Reinforced-Cementitious-Composite (UH-PSFRCC) bude používán pouze jednodušší akronym UHPC (Ultra-High-Performance-Concrete). Jedná se o beton s velmi hutnou mikrostrukturou, což přirozeně vede k výborné odolnosti vůči klimatickým vlivům. Jeho přirozenou vlastností je samozhutnitelnost. Typické jsou velmi vysoké pevnosti i v raných stádiích tuhnutí a tvrdnutí.

Odezva materiálů a konstrukcí na rázová zatížení je v důsledku velmi rychlého průběhu síly diametrálně odlišná ve srovnání s kvazistatickým zatěžováním. Mnoho materiálů se při rázovém zatížení chová více křehce, než je tomu při kvazistatickém zatěžování. Většina nárazové síly se při vysokorychlostním zatížení spotřebuje na lom materiálu, než aby se spotřebovala na deformaci zatěžovaného prvku. Použití výztuže je tedy z pohledu mimořádných událostí v tomto případě nezbytné. V této práci bylo využito vláknité rozptýlené výztuže a objemové zastoupení ocelových mikrovláken bylo nastaveno jako hlavní proměnná veličina.

Nároky na efektivní uplatnění prvků, a to nejen z UHPC, na obranné či ochranné konstrukce, jsou tři: cena, výkon a hmotnost. Obecně lze pro většinu stavebních materiálů využívaných pro ochranné konstrukce konstatovat, že se dají naplno využít pouze dva z těchto parametrů, přičemž třetí zůstává víceméně nenaplněn.

Ochranná konstrukce může být velmi lehká a účinná, bude ale extrémně drahá. Například aramidové nebo jiné kompozitní vrstvy, které by jako samostatné konstrukce nebyly realizovatelné. Různé textilní vrstvy se používají například u neprůstřelných vest. Na druhou stranu lze prokázat, že potenciálním uplatněním, které by dokázalo splnit všechny tři parametry, je nalepení těchto tkanin jako přídatné vrstvy na ochrannou konstrukci. V jiném případě může být konstrukce levná a účinná, ale bude velmi těžká a objemná. Typickým příkladem jsou těžké betonové bloky rozmísťované do měst, které ve svém důsledku představují složitý logistický problém kvůli přepravě na dané místo nebo jakémukoli dalšímu přemístění či sebemenšímu posunu. Konstrukce lehká a levná nemusí být vůbec účinná vůči účinkům palných zbraní, nárazu automobilu nebo výbuchu. Těchto příkladů bychom jistě našli nejvíce, jako například plynosilikáty, sádrokartony, atd. [41].





Obrázek 1.2: Využívaná ocelová mikrovlákna  $14 \times 0.13$  mm a detail jejich povrchu.

Právě využití materiálu na bázi UHPC nabízí velmi zajímavý prostor pro rozumné naplnění všech parametrů poskytujících cenově dostupné, flexibilní a odolné řešení.

## 1.1 Ultra vysokohodnotné betony

Ultra vysokohodnotné betony (UHPC) nebo cementové kompozity jsou velmi jemné betony, vykazující oproti konvenčním betonům velmi vysokou pevnost, která je doprovázena křehkým chováním při porušení statickém i dynamickém. Vysoká pevnost je při návrhu ochranných konstrukcí důležitým parametrem, ale musí být doprovázena dodatečnou duktilitou, což je v kontraindikaci s křehkým chováním těchto vysokopevnostních materiálů. UHPC obsahuje typicky 500-800 kg cementu na  $1m^3$ , vysoký obsah mikrosiliky, která dává UHPC typicky tmavě šedou barvu, vysoký obsah stavební chemie a velmi jemné frakce písků, pohybujících se v intervalu 0,1-1,2 mm [15, 50]. Vodní součinitel těchto směsí bývá mnohem nižší než v případě konvenčních betonů běžných pevností. Typicky se pohybuje v rozmezí 0,2-0,3 [35, 8]. Poslední důležitou složkou je dispergovaná výztuž, používaná ve formě krátkých vláken z různých materiálů [46, 32]. Často se pro specifické účely využívá i hybridního vyztužení, a to s využitím vláken dvou různých velikostí nebo dvou různých materiálů. Každý materiál je vhodnější pro jiné využití. Pro zatížení typu náraz nebo výbuch je nejvhodnějším materiálem pro rozptýlenou výztuž ocel [42].

Křehké chování čisté směsi bez drátků je tedy možné velmi výrazně eliminovat pomocí rozptýlené výztuže ve formě mikro ocelových drátků (Obrázek 1.2), které jsou rovnoměrně rozptýleny po objemu celého tělesa. Experimentálně bylo ověřeno, že ocelová rozptýlená výztuž je pro rychlé dynamické zatížení nejvhodnějším materiálem z pohledu absorpce energie, a proto budou v této přednášce posuzovány pouze prvky s touto



Obrázek 1.3: Rozlitá čerstvá směs UHPC měřená na setřásacím stolku.

variantou drátků. Vedle samotného rovnoměrného rozptýlení je zásadní otázkou orientace samotných vláken. Zatímco rovnoměrného rozložení je možné dosáhnout důsledným technologickým procesem a pomalým rozhazováním drátků během míchání, orientaci samotných vláken lze ovlivňovat až při ukládání do směsi nebo těsně po jejím uložení. V prvním případě se jedná o různé techniky mechanické orientace způsobů lití, a to při využití pomůcek jako např. trychtýřů nebo obdobných nalévacích mechanismů [37, 52]. V druhém případě se jedná o orientaci vláken pomocí elektromagnetického pole [6, 7].

Právě orientace krátké rozptýlené výztuže pomocí elektromagnetického pole je jedním z nejnovějších trendů v řízeném návrhu vysokohodnotných cementových kompozitů odolných vůči mimořádným událostem [1]. Usměrnování výztuže probíhá v čerstvé stavu cementové matrice ještě nezatuhlé směsi, kdy je samotná směs v plastovém bednění protahována přes cívku, která vyvíjí elektromagnetické pole.

Největším problémem je naladění směsi nejenom na určitou pevnost, především ale jde o zajištění vhodné zpracovatelnosti (Obrázek 1.3), aby magnetické pole bylo schopno s drátkem v cementové matrici pohnout a zorientovat je do nejúčinnější pozice vůči zamýšlenému zatížení. Vedle správného naladění směsi musí být velmi přesně naladěno i samotné elektromagnetické pole, aby dokázalo přetlačit odpor směsi a narovnat drátek do požadovaného směru, zároveň nesmí být příliš silné, aby ocelové drátky nebyly vytahovány ze směsi ven na povrch.

Většina prvků v této studii obsahovala 1,5% až 2% vláken z obsahu celku, tzn.

(120 kg až 160 kg vláken na 1  $m^3$ ) Směs byly míchána ve vertikálním robotu a obsahovala zpravidla 3 frakce jemného kameniva, vysokou dávku cementu, mikrosiliku, značné množství stavební chemie, jako jsou superplastifikátory, odvzdušňovací přísady, rozptýlenou mikrovýztuž o rozměru  $0.13 \times 14$  mm a vodu. V několika předchozích studiích bylo dokázáno, že mikrovýztuž s největším štíhlostním poměrem (cca 108:1) má nejlepší výkon pro dosažení nejvyšších mechanických parametrů a dokáže poskytnout výsledné směsi nejlepší odolnost ve smyslu disipované energie [43, 44]. Při míchání UHPC je velmi důležité dosáhnout dobré zpracovatelnosti, distribuce částic a hustoty. Ve srovnání s betonem normální pevnosti obsahuje UHPC více složek a má větší podíl jemných částic.

Rovná vlákna byla vybrána proto, že jsou nejlepším kompromisem ve snaze o dosažení co nejlepších mechanických vlastností a dobré zpracovatelnosti kompozitu. Je velmi důležité, aby při poškození vzorku byla vlákna z matrice vytahována. Přetržení vláken vede k relativně křehčí odezvě UHPC, než když jsou vlákna z matrice postupně vytahována. Tento mód porušení vede k výrazně vyšší absorpci energie při rázovém zatížení [2], neboť vytahování vláken z matrice je obecně považováno za mnohem více energeticky náročnější mód porušení, než když jsou vlákna přetržena. To byl také hlavní důvod pro použití vysokopevnostních vláken, aby bylo zajištěno vytažení a oddáleno přetržení.

Směs byla míchána zprvu bez drátků po dobu 3 až 4 minut, aby bylo docíleno dokonalého rozmístění všech jemných složek, jako jsou písky všech frakcí, cementu, mikrosilika a skelného prachu. Následně byly do směsi přidány postupným rozhazováním ocelové drátky a směs byla míchána další 2 až 3 minuty. Směs měla výborné samozhutnitelné vlastnosti a byla dále ošetřována v prostředí s vysokou relativní vlhkostí nejméně po dobu 28 dní od betonáže. Při vyšších procentuálních objemech rozptýlené výztuže nad 2% byla pozorována zhoršující se zpracovatelnost. Všechny vzorky byly testovány ve stáří 28 až 56 dní.

Mechanické parametry dosahovaly 150 MPa v jednoosém tlaku na krychli 150 mm při maximálním 2% obsahu vláken z celku. Se zmenšujícím se zastoupením vláknité výztuže tlaková pevnost mírně klesala v řádu deseti až patnácti procent [11]. Na druhou stranu tahové vlastnosti, jako je tah za ohybu a jednoosý tah, jsou velmi silně závislé na objemovém zastoupení vláknité výztuže (Obrázek 1.4). Vliv dispergované mikrovýztuže je pro tahové charakteristiky lineární a při přidavku jednoho procenta drátků se pevnost v tahu může zvednout v řádech vyšších desítek procent [22]. Vliv rozptýlené výztuže je tedy mnohem silnější u tahových charakteristik než u tlakových [28].



Obrázek 1.4: Zkoušení lomové energie UHPC a vytahování drátů z matrice.

V případě betonu je dobře známo, že pevnost v tahu i tlaku roste se zvyšující se rychlostí deformace [18, 14]. Tento jev se kvantifikuje pomocí součinitele dynamického nárůstu DIF (Dynamic Increase Factor), který vyjadřuje poměr pevnosti naměřené v podmínkách zatěžování zvýšenou rychlostí deformace k pevnosti, naměřené v kvazistatických podmínkách zatěžování. Je také známo, že mechanické vlastnosti v tahu jsou citlivější na rychlost deformace ve srovnání s mechanickými vlastnostmi v tlaku [19]. Přesné důvody tohoto chování materiálu nebyly dosud jednoznačně prozkoumány [3, 33]. Vývoj křivky postihující DIF faktor v závislosti na rychlosti poměrného přetvoření je přibližně bilineární. Druhá, strmější větev bilineárního diagramu, začíná většinou kolem rychlosti poměrné deformace  $1 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$ . V mnoha případech je křivka postihující DIF získána interpolací mezi experimentálně naměřenými daty s relativně velkým rozptylem, převážně u vyšších rychlostí deformace. DIF se využívá hlavně při modelování nárazů, výbuchů a jiných extrémních zatížení betonu. Tlakové parametry betonu mohou při vysokých rychlostech deformace dosahovat až trojnásobku svých pevností získaných při kvazistatickém zatěžování. Tahové parametry pak mohou dosáhnout až dvanáctinásobku své původní kvazistatické hodnoty.

# Kapitola 2

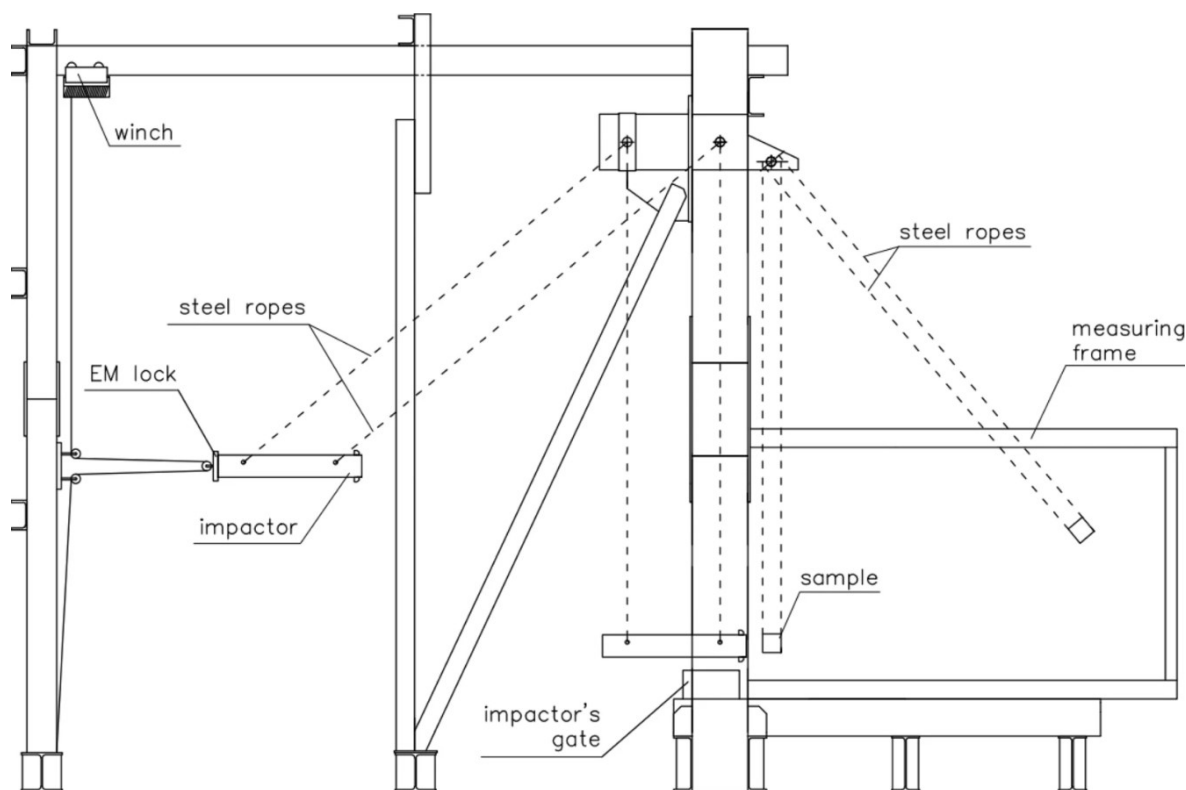
## Laboratorní testování

Laboratorní testování vysokorychlostních dynamických jevů není pro zatvrdlé betonové vzorky do dnešní doby plně normováno a existují různá zařízení pro měření odezvy malých vzorků vůči rázovému zatížení. Nejčastěji se jedná o rázová padala [48] nebo rázová kyvadla [53], která vycházejí z dobře známého Charpyho kladiva. Další možností je testování pomocí dělené Hopkinsonovy tyče, a to jak v jedno dimenzionální konfiguraci [30], tak i ve dvou směrech [38]. Testování UHPC ve víceosém stavu napjatosti při vysokých rychlostech deformace je velmi blízké skutečným podmínkám rázového děje. Největším úskalím pro víceosé testování rychlých dynamických jevů je dokonalý souběh rázové vlny ve vzorku z více směrů ve stejný čas.

### 2.1 Rázové kyvadlo

Rázové kyvadlo (Obrázek 2.1) bylo zvoleno a postaveno na Fakultě stavební ČVUT z několika důvodů. Tím nejdůležitějším bylo poskytnutí volných okrajových podmínek, které velmi silně ovlivňují výsledek zkoušky a které nelze při vertikální konfiguraci rázového padala odstranit. Při poskytnutí volných okrajových podmínek je možné využít mnohem čistšího provedení rázových zkoušek za pomoci bilance mechanických energií a většinu vyhodnocení automatizovat [24]. Rázové kyvadlo je dimenzováno na nárazy při rychlostech pohybujících se kolem 1 m/s a s energiemi dopadu do 1000 J. Zatěžování vzorku probíhá v horizontální rovině, což je velmi blízké skutečným podmínkám a nedochází tak k opakovaným dopadům závaží na jeden vzorek. Měření probíhá vytažením závaží do požadované výšky a jeho následným uvolněním. Závaží opisuje dráhu kružnice až do spodní úvratí, kde narazí do připraveného vzorku (Obrázek 2.2).

Vzorek není nijak podepřen a je zavěšen na dvojici lan, které mají podobný poloměr jako padaající závaží (Obrázek 2.2). Po nárazu závaží (beranu) do vzorku je část mecha-

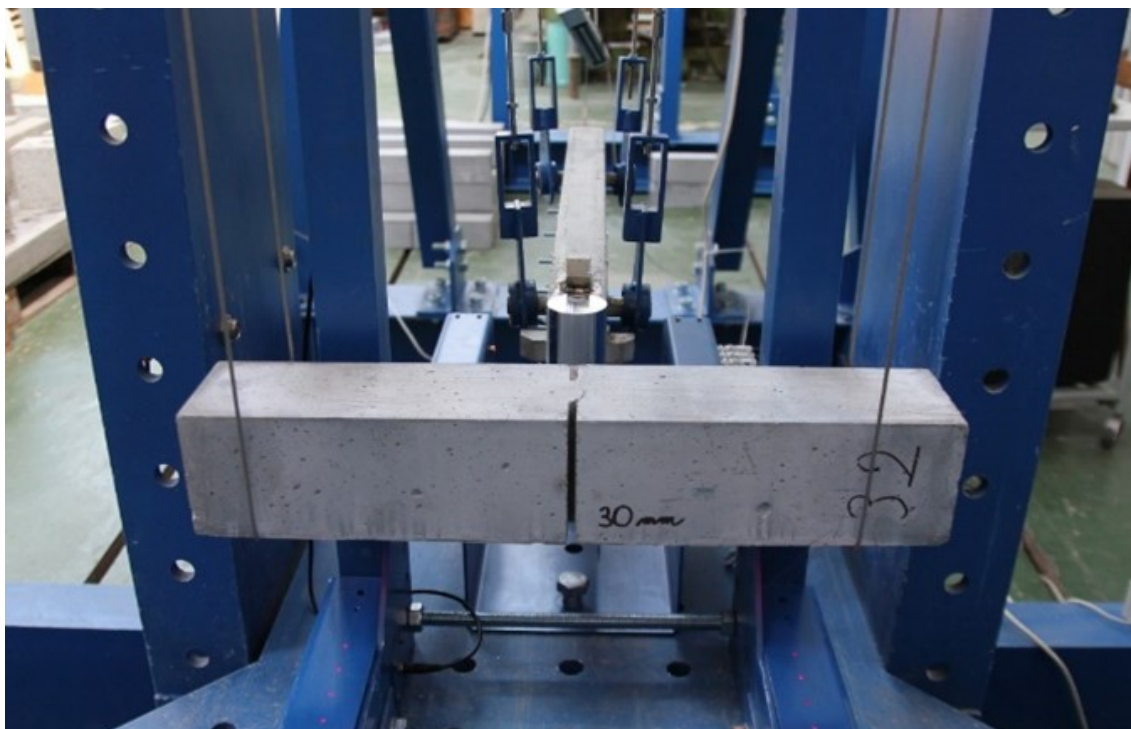


Obrázek 2.1: Schéma rázového kyvadla se zavěšeným vzorkem bez podpor a snímacím rámem pro automatizované vyhodnocené absorbované energie.

nické energie spotřebována na poškození vzorku a dále na pohyb vzorku po kružnici. Na rozdíl od Charpyho kladiva nedochází k rozlomení vzorku při prvním rázu, ale k postupné destrukci jednoho vzorku sérií nárazů.

Výstupem rázového kyvadla je za pomoci bilance kinetických energií určit míru schopnosti cementového kompozitu absorbovat a disipovat mechanickou energii rázu. Vzorek je volně zavěšen a není mu nijak bráněno v pohybu. Měřena je rychlost beranu před dopadem a rychlost beranu a vzorku po nárazu. Z bilance mechanických energií je pro každý dopad určena míra absorbované a disipované energie včetně změřeného poškození. Výstupem je graf znázorňující míru absorbované energie a šířky trhliny [26].

Bylo zjištěno, že větší objemové zastoupení vláken v betonu vykazuje nejvyšší hodnoty a větší nárůst absorbované mechanické energie. Poškození matrice hrálo také významnou roli, protože silnější matrice lépe ukotvuje vlákna, která z ní musí být vytažena.



Obrázek 2.2: Vzorek UHPC o velikosti  $100 \times 100 \times 550$  mm s vrubem 30 mm, zavěšený na dvojici lan.

## 2.2 Crash komín

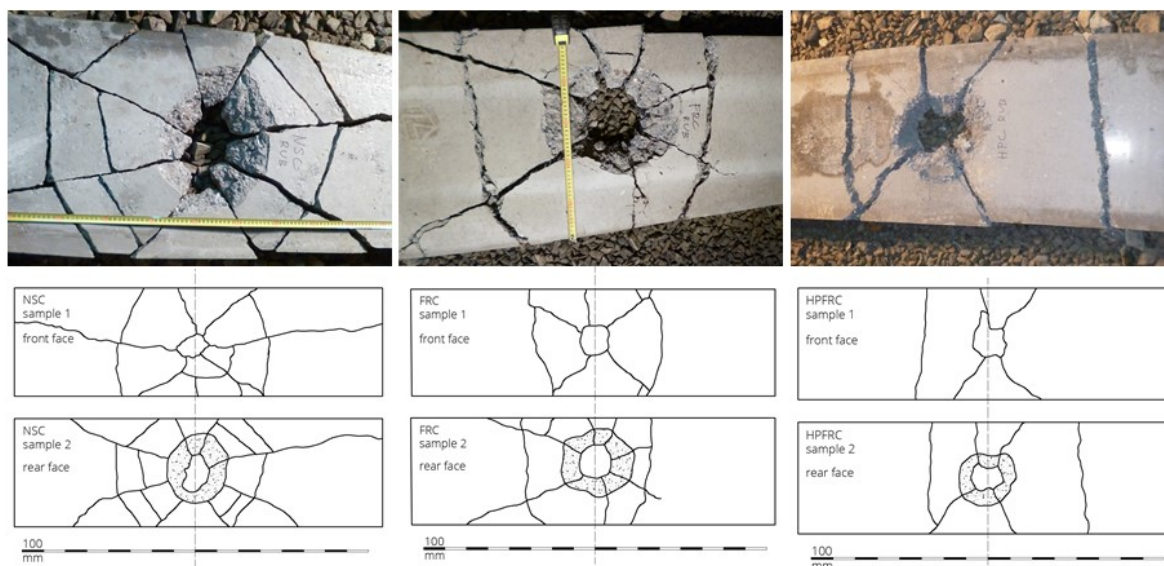
Crash komín je laboratorní zařízení postaveno a zprovozněno ve ŠtOLE Josef. Využívá volný pád tělesa z výšky až 40 metrů, které původně sloužilo jako vertikální propojení dvou šachet nad sebou. Dopadová rychlost u paty komína je kolem 28 m/s (cca 100 km/h), délka letu závaží je 2.8 sekundy, energie dopadu je do 37 000 J. V rámci experimentální kampaně byly testovány vzorky nejen UHPC, ale také konvenčního drátkobetonu (FRC) a betonu běžných pevností (NCS). Výhodou crash komínu jsou stálé klimatické podmínky, umožňující nastavit přesný dopad projektilu na střed vzorku.

Padající projektil vážil 95,4 kg a průměr sférického nosu byl 150 mm (Obrázek 2.3). Testované vzorky měly podobu desky s čistým rozpětím 1500 mm, byly 500 mm široké a 70 mm vysoké. Na svých koncích byly podepřeny liniovou podporou. Proces nárazu byl zaznamenán dvěma vysokorychlostními kamerami se vzorkovací frekvencí 600 fps a 4000 fps. Projektil visel na laně a byl z horní části šachty odpojen pomocí plamene, který přetrhl kabel. Plamen sloužil k udržení stability střely při přetržení lana. Projektil volně padal do středu desky na dně šachty rychlostí blízkou 100 km/h. Pro každou směs byly testovány dva vzorky, které byly po experimentu složeny jednotlivými fragmenty k sobě (Obrázek 2.4).

Z vysokorychlostních kamer byla spočítána rychlost při kontaktu projektilu se vzor-



Obrázek 2.3: Detail ocelového projektilu s křídly, celkovou hmotností 95,4 kg, délkou 70 cm, hemisférickým nosem o poloměru 7 cm a jeho usazení nad středem zkušebního betonového vzorku ve tvaru desky s čistým rozpětím 1500 mm.



Obrázek 2.4: Fotografie poškození pořízené ze zadní strany desky a schéma průběhu trhlin na deskách NSC, FRC a UHPC z přední a zadní strany po dopadu projektilu. Chybějící materiál ve středu desky byl vyražen projektilem a roztříštěn na velmi malé části a nebylo možné jej sestavit zpět.



	NSC	FRC	UHPC
Vzorek 1 - rychlost před/po (km/h)	100.6 / 91.5	100.9 / 90.3	99.1 / 79.30
Vzorek 2 - rychlost před/po (km/h)	101.9 / 92.7	101.7 / 89.6	98.4 / 75.25
Nárazová energie - vzorek 1/2 (kJ)	37.25 / 38.22	37.47 / 38.07	36.15 / 35.64
$\Delta E_k$ - vzorek 1/2 (kJ)	6.43 / 6.59	7.46 / 8.52	13.00 / 14.80
$\Delta E_k/t$ (K) - průměr (J/mm)	93	114	199

Tabulka 2.1: Dopadové a zbytkové rychlosti projektilu včetně bilance mechanických energií před a po průchodu projektilu deskou.

kem a úbytek rychlosti při perforaci projektilu vzorkem. Průběh trhlin v deskách NSC, FRC a UHPC je znázorněn na obrázku 2.4. Beton normální pevnosti je kvazikřehký materiál, což mělo za následek vznik mnoha trhlin, které rozdělily desku na mnoho částí. V případě FRC bylo zjištěno méně trhlin a méně úlomků, což je pravděpodobně důsledkem zvýšené duktility, a tedy i zvýšené ohybové houževnatosti materiálu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v případě UHPC, který vykazoval nejvyšší ohybovou houževnatost, pevnost v tlaku a měl za následek nejméně trhlin mezi testovanými betony. Vylepšené chování těží především z jemné mikrostruktury a rozptýlené vláknové výztuže, která byla hlavním inhibitorem poškození [39].

Rychlost střely byla zaznamenána při každém nárazu a taktéž během průniku střely betonovou deskou. S hmotností a rychlostí projektilu před a po průchodu byl stanoven rozdíl kinetické energie  $\Delta E_k$  v Joulech, který byl vztažen k tloušťce desek ( $\Delta E_k/t$ ) a je uveden v Joulech na mm. Tento rozdíl je dále označován jako K. Z výpočtu bilance kinetických energií bylo konstatováno, že schopnost UHPC rozptýlit kinetickou energii střely je více než dvakrát vyšší než u NSC, a více než 1,7krát vyšší ve srovnání s FRC. To lze doložit hodnotou K, která reprezentuje bilanci kinetických energií přepočtenou na jednotku tloušťky materiálu. Hodnota K byla stanovena na 93 J/mm, 114 J/mm a 199 J/mm pro NSC, FRC a UHPC (Tabulka 2.1).

# Kapitola 3

## Náraz automobilu

Mezi různými impulsivními jevy je náraz automobilu vnímám jako relativně pomalejší zatěžovací stav, což je dáno deformačními zónami, které jsou integrovány v automobilu a mají za úkol snížit amplitudu impulsu zpomalení přes delší časový úsek. Při nárazu automobilu byla využita norma PAS 68, definující rychlosti kolize typické pro crashtesty, jež se pohybuje na úrovni 30 mph (cca 48 km/h). Auto bylo roztlačeno na požadovanou rychlost pomocí systému kladek a roztažné dráhy protijedoucím vozidlem. Vůči nárazu automobilu byly vyvinuty a testovány jednak zábrany, které předpokládají úmyslné najetí, a také samostatný deformační sjezd, který předpokládá neúmyslné najetí a následný střet.

### 3.1 Zábrana proti vjezdu automobilu

Zábran pro omezení nebo úplné zastavení vozidla je do dnešní doby na trhu mnoho. Tyto prostředky lze rozdělit na mobilní a stacionární. Mobilní lze sestavit s pomocí lidí bez nutnosti povolávat na místo těžkou techniku. Jedním z takových je český ježek, vyrobený z UHPC a tvarově i konstrukčně optimalizovaný vůči běžnému osobnímu automobilu.

Původní geometrie byla na základě numerických simulací uznána za nevhodnou pro zastavení běžného silničního vozidla, pohybujícího se relativně vysokou rychlostí. Byla navržena hybridní konstrukce, kombinující různé délky segmentů zábrany. Jedná se o konstrukci 3 samostatných prvkových elementů, které jsou uprostřed spojeny sérií ocelových šroubů a na svých koncích posíleny ocelovou koncovkou.

Protože se jedná o relativně lehký prvek působící vůči násobně těžšímu a navíc pohybujícímu se objektu, zásadní mechanismem zastavení je tření zábrany a její zapříčení vůči podkladu, na kterém ježek stojí (Obrázek 3.1). V rámci optimalizačního procesu



Obrázek 3.1: Mobilní zábrana během nárazu [25].

byla na konci snížena dvojice noh a byl odzkoušen nesymetrický model s jednou delší nohou. Tato nová konstrukce byla testována na dvou konfiguracích různě rozmístěných bariér. Nejlépe se bariéry osvědčily, když byly umístěny dále od sebe a vzájemně se neovlivňovaly (Obrázek 3.2).

Propojení bariér pomocí lana je výhodné, protože bariéra, která není přímo zasažena, může přispět k odezvě sousední zasažené bariéry. Samotná směs UHPC není schopna odolat vyvolanému namáhání a musí být zesílena dalšími ocelovými tyčemi. Přesto je využití UHPC směsi stále výhodné. Díky ní je povrch segmentů odolný proti poškození, pružnější a umožňuje opakované použití. Další výhodou zůstává trvanlivost UHPC, umožňující skladování zábrany prakticky kdekoli bez nutnosti umístit ji pod střechu.

Lze předpokládat, že běžný beton by se při nárazu roztříštil a pravděpodobně by se některé části mohly odlomit. S ohledem na všechna tato pozorování mohou zábrany účinně zastavit jedoucí vozidlo i v případě, že je použita pouze jedna řada zábran. Konečná konstrukce zábran kombinuje účinnost různých konstrukcí ocelových zábran s nižšími náklady na jejich výrobu a velkých betonových svodidel. V porovnání s běžnými jerseyovými betonovými zábranami je hmotnost nižší přibližně o 160%, což je výhodné z hlediska dopravy a manipulace.

Přesto není bariéra příliš malá ani lehká, aby ji bylo možné rychle odstranit nebo odcizit. V porovnání s ocelovými zábranami podobné velikosti jsou náklady nižší přibližně o 30 až 40%. Je zřejmé, že toto řešení zábrany není vhodné jako trvalá překážka pro prostředí městské zástavby. Jeho estetická stránka je poměrně špatná a pravděpodobně by mohlo vyvolat zbytečnou obavu, že se v okolí očekává velké bezpečnostní ohrožení. Nicméně návrh splnil nezbytné podmínky pro úspěšnou mobilní bariéru. Lze ji demonstrovat, snadno přepravovat, skladovat a používat a rychle čelit přicházející hrozbě [25].



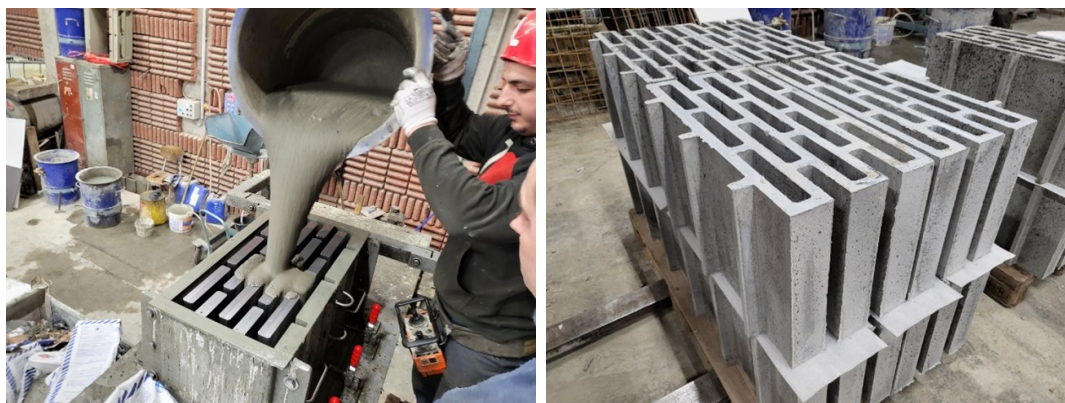
Obrázek 3.2: Mobilní zábrana po kontaktu s vozidlem a po jeho zastavení.

Náraz vozidla do bariéry lze rozdělit do tří fází. Ihned po nárazu bylo pozorováno, že první řada zábran se úspěšně zapřela o povrch a zůstala nepoškozená. Tato první fáze je rozhodující pro správnou účinnost bariéry. Výsledkem bylo pootočení bariéry, zvednutí nejdelšího segmentu pod vozidlo a zvednutí přední části vozidla směrem nahoru. Tato fáze skončila přibližně 0,1 s po nárazu. V tomto okamžiku se první řada zábran přestala zařezávat do povrchu a byla posunuta před vozidlo. Během této doby se přední část vozidla nadále pohybovala vzhůru. Tato fáze skončila přibližně 0,3 s po nárazu, kdy první řada zábran narazila do druhé řady. První řada zábran byla díky druhé řadě zatlačena více pod vozidlo. Během třetí fáze se přední část vozidla začala pohybovat zpět dolů. Zbytková kinetická energie vozidla se v této poslední fázi rozptýlila díky bariérám, které byly částečně zablokovány pod vozidlem. Tyto zábrany se začaly zařezávat do povrchu, neboť je hmotnost vozidla tlačila dolů. Poté, co se vozidlo zcela zastavilo, zůstala první řada bariér zaklíněna pod vozidlem. Vozidlo bylo mírně poškozeno v oblasti motoru. Všechny bariéry zůstaly nepoškozeny.

Je zřejmé, že účinnost bariér je silně závislá na vlastnostech povrchu. Pravděpodobně lze předpokládat, že moderní mobilní zábrana bude použita v městském prostředí, a proto bude většinou umístěna na asfaltové vrstvě. Další výzkum by se měl zabývat možnostmi použití těchto zábran na površích, jako je betonová a kamenná dlažba, protože zábrana by měla být univerzální.

### 3.2 Sjezd s integrovanou deformační zónou

Samostatné sjezdy jsou budovány napříč ČR a podle statistik jsou jedním z velmi nebezpečných elementů a nezanedbatelnou příčinou úmrtí při opuštění jízdního pruhu vozidlem. Náraz do samostatného sjezdu je srovnatelný s nárazem do zdi. Při rychlostech nad 50 km/h má fatální následky. Cílem řešení je poskytnout konstrukci s integrovanou deformační zónou, jejíž aktivace předchází aktivaci deformačních zón v



Obrázek 3.3: Betonování deformačního bloku a základní deformační blok.

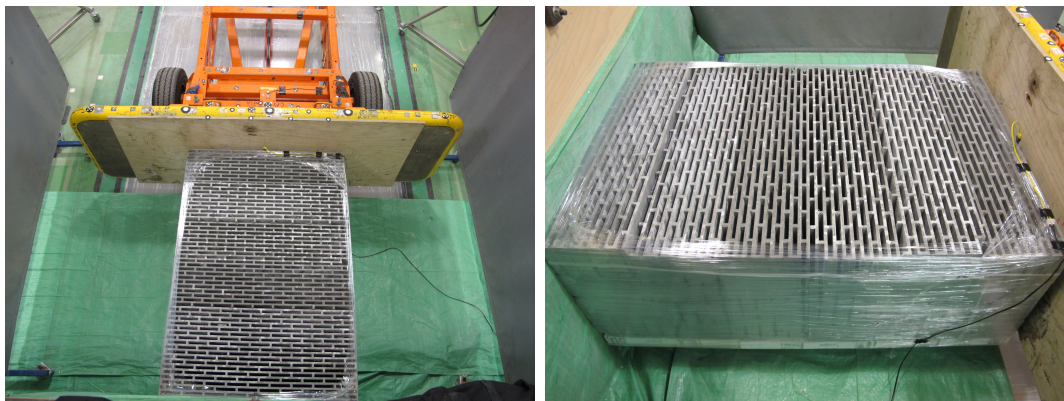
automobilu. Tím se prodlouží čas nárazu a výrazně se sníží vzniklé přetížení působící při nárazu na osádku vozidla.

Kvůli trvanlivosti celé konstrukce, která musí být dostatečně odolná vůči CHRL, zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům a dalším látkám, které samostatným sjezdem protékají, bylo zvoleno řešení na bázi UHPC (Obrázek 3.3). Jedná se o stavebnicový systém s vnitřními dutinami, které se v případě nárazu do sebe naskládají a dokáží dissipovat značnou část kinetické energie vozidla. Pro ověření funkčnosti zamýšleného systému byly provedeny zkoušky ve zkušebně i reálných podmínkách dopravní infrastruktury s modelem celého samostatného sjezdu.

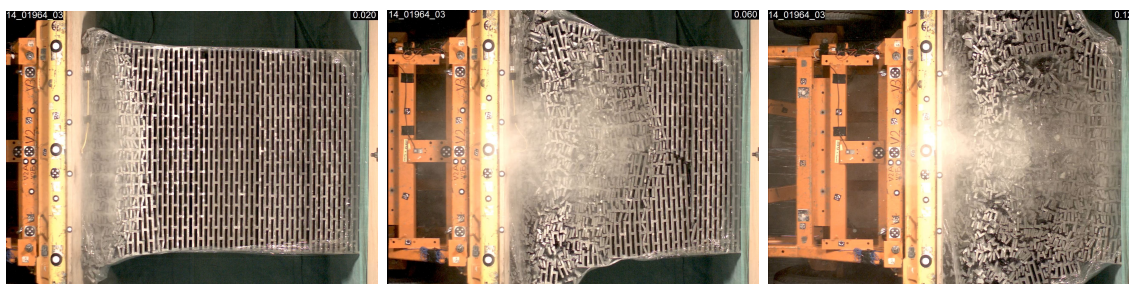
Bylo provedeno několik experimentálních kampaní, ve zkušebně pomocí nárazového vozíku a v reálném prostředí pomocí automobilu [21]. Byly ověřeny biomedicínské parametry na figurínách osazených v pozici řidiče a spolujezdce v zadní řadě.

Nárazová zkouška ve zkušebně společnosti ŠKODA auto v plném měřítku byla provedena pomocí nedeformovatelného nárazového vozíku s plochýmnosem o hmotnosti 1000 kg a nárazovou rychlostí 30 km/h (8,33 m/s), čímž byla stanovena nárazová energie 34,7 kJ (Obrázek 3.4). Zkoušený vzorek byl sestaven z 24 deformačních bloků, 4 na výšku a 6 na délku. Přední strana celého vzorku byla 1000 mm a 500 mm (šířka na výšku) a jeho délka byla 1500 mm. Nárazová zkouška byla sledována několika vysokorychlostními kamerami pracujícími s frekvencí 3000 snímků za sekundu a akcelerometrem umístěným na přední nárazového vozíku. Kolem vzorku nebylo zajištěno žádné boční omezení a jeho pohyb ve směru nárazu byl omezen pevnou podpěrou za ním.

Pro ověření návrhu samostatného sjezdu v reálných podmínkách byly použity parametry ASI (Acceleration Severity Index – Index prudkosti nárazu), hodnotící účinky nárazu na lidské tělo [20]. ASI je využíváno pro hodnocení silničních záchytných systémů



Obrázek 3.4: Nastavení modelu samostatného sjezdu ve zkušebně s nárazovým vozíkem.



Obrázek 3.5: Postupné praskání buněčné struktury po nárazu zkušebním vozíkem v časech 20 ms, 60 ms a 120 ms po kontaktu s čelem energii absorpčního systému.

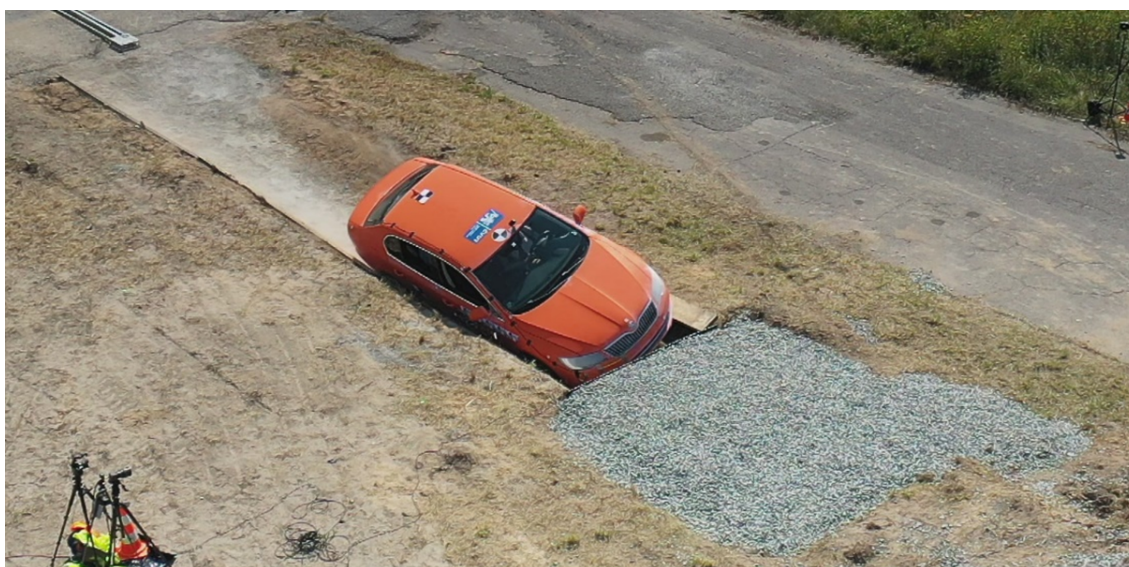
a určuje míru závažnosti pulsu působícího na člověka sedícího v blízkosti měřeného bodu vozidla. Využitím deformačních bloků se výrazně snižuje míra přetížení na osádku vozidla ve srovnání s nárazem do čela tuhého propustku.

Výsledky experimentů prokázaly příznivý vliv systému na pohlcování kinetické energie vozidla a na zpomalení vozidla během nárazu. Zpomalení bylo možné rozdělit do dvou základních režimů. První režim disipace mechanické energie byl identifikován jako proces, kdy docházelo ke křehkému lámání vnitřní struktury deformačních UHPC bloků. Druhý režim, kdy docházelo k absorpci a disipaci mechanické energie, lze vysvětlit akumulací materiálu před vozidlem během nárazu (Obrázek 3.5). Zpomalení vozíku bylo rovněž experimentálně měřeno akcelerometrem umístěným na přídi vozíku. Síly působící na vozík při nárazu byly kolem 111 kN, což spadá hluboko pod úroveň, kde je iniciována deformační zóna vozidla.

Bylo prokázáno, že je možné vyvinout systém pohlcující energii z ultra vysokohodnotného betonu s řízenou deformací a zpomalením (Obrázek 3.6). Tato experimentální kampaň spolu se schopností přenášet zatížení od projíždějících vozidel a dlouhodobou životností předurčila vyvinutý systém pro širokou škálu aplikací včetně těch, kde nelze použít v současnosti vyráběné absorbéry energie (Obrázek 3.7). Experimentálně bylo



Obrázek 3.6: Jednotlivé deformační bloky usazené vedle sebe a samostatný sjezd v modelové situaci pro crash test.



Obrázek 3.7: Crash test samostatného sjezdu.

ověřeno, že síly, které působí na vozidlo, spadají relativně hluboko pod úroveň, kde dochází k aktivaci deformačních zón vozidla. Kromě toho mělo vozidlo na konci nárazu do tohoto systému velmi nízkou zbytkovou rychlost.

# Kapitola 4

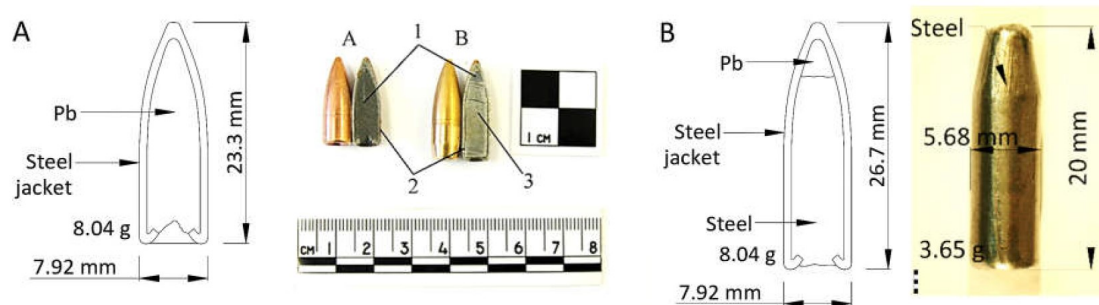
## Balistické zatížení

Balistické zatížení stavebních konstrukcí a materiálů je velmi rychlé, dynamické a impulsivní zatížení, které je charakteristické svým lokálním účinkem na značně omezenou část stavební konstrukce [4, 31, 51]. Zatížení rázem je velmi rychlý dynamický jev, odehrávající se v řádu milisekund [36, 49]. Přestože se jedná o velice rychlé zatížení, dokáže způsobit nezanedbatelné účinky na stavební konstrukci a významně ohrozit zdraví a život personálu [27, 23]. Zatížení dopadem projektilu je řádově mnohem rychlejší než například náraz automobilu a má velmi blízko svou rychlostí k zatížení výbuchem.

Obranné a ochranné konstrukce musí být navrženy tak, aby chránily obyvatele a uživatele budov od zranění způsobených balistickým útokem a detonací. Většina útočné munice obsahuje rozbušku, a proto obranné a ochranné konstrukce musí být připraveny absorbovat a disipovat kinetickou energii samotné střely a navíc pohltit energii výbuchu. Moderní zbraně jsou dnes navrženy tak, aby se maximálně přiblížily k cílovému objektu. Lze předpokládat, že detonace proběhne při maximální penetraci projektilu. Pasivní ochranný systém budov musí v co největší možné míře předcházet účinkům dopadu projektilu snížením penetrační hloubky, aby byl zajištěn co největší odstup uživatelů budov od centra výbuchu. Ochranný systém musí absorbovat kinetickou energii samotného dopadu a projektil zastavit při nejmenší míře penetrace. K zastavení projektilu dochází poškozením materiálu, který tímto odebírá jeho kinetickou energii. U křehkých materiálů dochází k drčení a rozlomení konstrukčního prvku na několik částí.

Odolnost proti průniku projektilu včetně různě velkých a různě rychle letících předmětů má svůj význam ve strategicky významných budovách, jaderných elektrárnách i jiných zařízeních, kde by mohl relativně malý předmět letící vysokou rychlostí způsobit neproporcionálně velké škody. Letící předmět může být generován jako nahodilá událost nebo jako záměrný útok. Právě v druhém případě má odolnost proti průniku projektilu



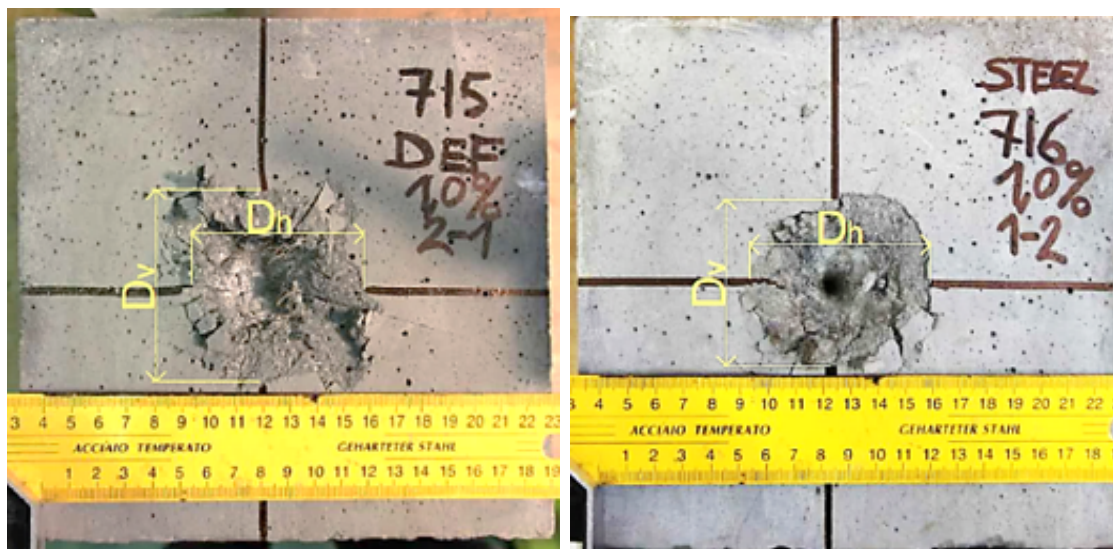


Obrázek 4.1: Projektily využívané v rámci experimentální kampaně: (A) ogivální projektil s ocelovým pláštěm a měkkým olověným jádrem a (B) ogivální projektil s ocelovým pláštěm a polotvrdým ocelovým jádrem.

velmi vysoký význam. V případě letícího projektilu bude pravděpodobně střela obsahovat výbušnou hlavici, která má za cíl v co nejvyšší možné míře poškodit funkčnost objektu. V takovém případě bude pro konstrukci mnohem příznivější, dojde-li k výbuchu na povrchu stavebního prvku než-li uvnitř materiálu poté, kdy dojde k určité penetraci nebo v nejhorším případě ke kompletní perforaci. Lai a kol. [29] ve své studii dokázali, že účinek výbušniny je pro konstrukci tím nebezpečnější, čím je hloubka penetrace vyšší.

Balistické zatížení je rozděleno do jednotlivých tříd balistické odolnosti. Úrovně balistického zatížení charakterizují normy ČSN EN 1522 a STANAG 4569. Pro experimentální kampaň byla zvolena střelba přes optická hradla monitorující skutečnou rychlost střely, která se může lišit od deklarovaných hodnot až o 20 m/s. Bezpečná vzdálenost střelce byla kvůli odrazení testovaného materiálu a střely zvolena na 20 metrů. Dopadová rychlost střely při kontaktu se vzorkem byla oproti ústové rychlosti vždy zmenšena o 22 m/s [27].

Náraz byl simulován jako zásah deformovatelným a nedeformovatelným projektilem vystřeleným ze samonabíjecí pušky CZ 858, ráže 7,62×39 mm na desku. Jedná se o civilní variantu původně vojenské zbraně, útočné pušky SA vz.58. Vzdálenost střelce od desky byla 20 metrů. Ústová rychlost střely byla měřena chronografem umístěným přibližně 2 metry od ústí zbraně. Byla použita munice s měkkým (olověným) jádrem a ocelovým pláštěm, dále označována jako deformovatelný projektil, a polotvrdým (ocelovým) jádrem a ocelovým pláštěm, dále označována jako nedeformovatelný projektil. Oba typy projektilu jsou schváleny pro civilní použití. Hmotnost projektilu byla v obou případech 8,04 g. Pro deformovatelný projektil byla použita munice 7.62×39 mm FMJ s měkkým olověným jádrem, zatímco pro nedeformovatelný projektil byla použita munice s polotvrdým ocelovým jádrem s mezí kluzu pohybující se okolo 550 MPa (Obrázek 4.1). Průměrná dopadová rychlost se u obou projektilů pohybovala okolo 710 m/s.



Obrázek 4.2: Polonekonečné cíle po zásahu projektilem. Kráter vzniklý zásahem měkké střely s měkkým olověným jádrem a kráter s tunelovacím kanálkem vzniklý zásahem střely s ocelovým jádrem.

## 4.1 Polonekonečné cíle

Jako polonekonečné cíle byly testovány kostky s délkou hrany 200 mm, kde se předpokládalo, že hloubka penetrace nebude větší než 20 procent hloubky cíle a průměr kráteru nebude výrazněji zasahovat do hran testovaného vzorku (Obrázek 4.2). Cílem zkoušení je zjednodušit testovací proceduru ve smyslu odstranění zadního kráteru. Pro naplnění cílů bylo monitorováno poškození na přední straně vzorku za účelem ověření vlivu objemového zastoupení vláknité výztuže. Byl využita jedna z nejpoužívanějších střel  $7.62 \times 39$  mm. Pro účely balistického zatížení byly využity dva druhy střel, a to střela s ocelovým jádrem s pevností okolo 550 MPa, druhá střela byla s měkkým olověným jádrem. Obě střely měly stejný průměr i hmotnost 8.04 g a totožný ogivální tvar nosu.

Při nárazu střely na čelní stranu vzorku dochází k erozi materiálu a tvorbě kráteru, který má tvar komolého kužele. Penetrace projektilu skrz betonový prvek je velmi složitým mechanismem. V nárazové oblasti dochází současně k víceosému tlaku a tvorbě tahových trhlin. Komplexita problému je dále zvětšena tím, že pro každý mechanismus poškození platí jiná závislost na rychlosti zatěžování. Zvýšení odolnosti proti průniku projektilu je možno dosáhnout právě takovým materiálem, který má vysokou pevnost v tlaku a v tahu, vysokou smykovou kapacitu a je dostatečně duktilní. Takovým materiálem může být právě UHPC. V případě dopadu střely s měkkým olověným jádrem je střela v průběhu nárazu deformována, neboť její pevnost je nižší než pevnost zkoumaného betonu. V případě nárazu střely s ocelovým jádrem je ze střely svlečen pouze její plášť, samotné jádro střely penetruje vzorek. Kromě vzniku předního kráteru (tzv.



Obrázek 4.3: Řez polonekonečným cílem po zásahu střely s ocelovým jádrem a tvorbou čelního kráteru s tunelovacím kanálkem.

spalling) dochází k tvorbě tunelovacího kanálku, který má průměr stejný jako je průměr jádra střely (Obrázek 4.3).

U polonekonečných cílů bylo pozorováno, že se zvyšujícím se podílem vláknité výztuže není příliš ovlivněna hloubka penetrace ani jedné varianty střely. Na druhou stranu je velmi ovlivněna plocha kráteru a velmi silně je ovlivněn materiál, který je vyražen z přední strany vzorku. Zmenšující se plocha poškození je velmi důležitým aspektem pro více zásahů do stejné oblasti. Čím menší je oblast poškození a s tím související kráter, tím lépe bude materiál odolávat dalším zásahům ve svém nejbližším okolí.

Výsledky ukázaly vývoj poškození kráteru způsobeného nárazem střely při reálných podmínkách ozbrojeného útoku. Ve všech případech byla hloubka průniku menší než 20% z celkové velikosti, což potvrzuje předpoklad o tzv. polonekonečnosti cíle. Při dopadu střely s olověným jádrem vznikl pouze čelní kráter, zatímco tunelovací kanálek byl pozorován při dopadu střely s ocelovým jádrem. U běžných betonů byl tunelový úsek neznatelný.

Vlákna mají zásadní vliv na vývoj poškození, zejména na objem vytvořeného kráteru. Hloubka průniku byla vlákny rovněž pozitivně ovlivněna, jejich dominantní vliv je však patrný z vývoje objemu kráterů.

Vlákna hrají významnou roli při vzniku mikrotrhlin a při přemostění těchto defektů svoji schopností přenášet tahová napětí i po vzniku trhlin. Díky své vysoké pevnosti vlákna nepraskají, ale jsou vytahována z cementové matrice, čímž spotřebovávají velké množství mechanické energie z nárazu střely. Ve všech případech vedlo zvýšení objemového obsahu vláken vždy ke snížení stupňů poškození, ať už se jednalo o hloubku průniku, plochu a objem kráteru nebo úhel porušení kužele.

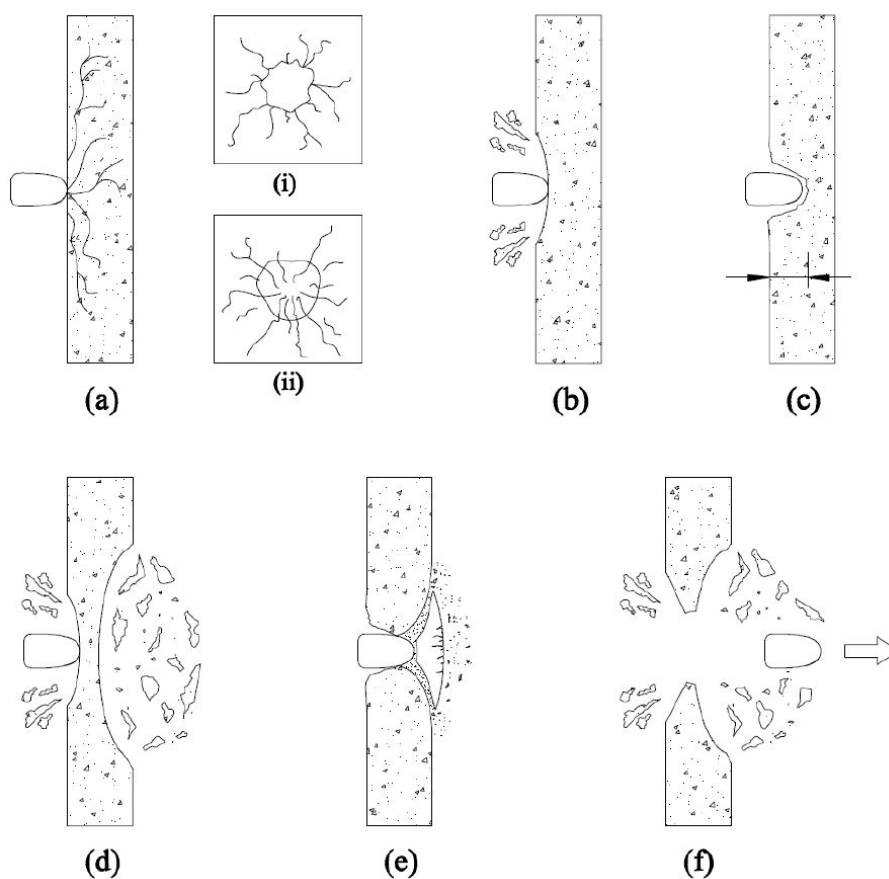
## 4.2 Tenké konstrukce

Tenké konstrukce jsou mnohem více blíže ke skutečnému využití a tudíž lépe reprezentují reálný stav ochranných konstrukcí. Jako tenké cíle byly testovány vzorky s různým procentuálním zastoupením vláknité výztuže. Byly navrženy tloušťky mezi 4 až 5 cm. Obdobně jako u polonekonečných cílů byly testovány obě varianty střel  $7.62 \times 39$  mm. Testované vzorky byly uchyceny do rámu speciálně vyvinutého pro potřeby této studie, s cílem zabránit pohybu vzorků během zásahu. Rám byl vybaven osmi šrouby, pomocí kterých byly v rozích, přibližně 50 mm od obou okrajů, vzorky z obou stran zafixovány. Bylo tak simulováno bodové podepření.

V případě tenkých konstrukcí je nutné počítat s vlivem tloušťky a odrazu tlakové vlny od zadní strany vzorku. Tlaková vlna se šíří vlivem nárazu projektilu na vzorek a od zadní strany je odražena jako vlna tahová (Obrázek 4.4). Toto způsobuje dost významná tahová napětí na zadní straně materiálu. V případě překročení tahové kapacity dochází k vyražení materiálu ze zadní strany (tzv. scabbing) a formaci zadního kráteru [31, 36].

Při vyražení zadního materiálu dochází k podstatnému oslabení tloušťky vzorku a může tím dojít k perforaci. Odhaduje se, že pokud je penetrace u tenkých vzorků vyšší než 50 až 60% z tloušťky, dochází k vyražení zadního materiálu a propojení předního i zadního kráteru [12, 13]. Při různých procentuálních zastoupení vláknité výztuže byly pozorován výrazný účinek na chování tenkých UHPC desek. Vzhledem k faktu, že jsou při nárazu projektilu silně aktivována tahová napětí na zadní straně vzorku, má zvyšující se objemové zastoupení na toto působení pozitivní vliv (Obrázek 4.5). Se zvyšujícím se procentuálním zastoupením vláknité výztuže lineárně vzrůstá i tahová pevnost. Při maximálním objemovém zastoupení, které se v této studii pohybovalo na úrovni 2%, nedošlo k vyražení žádného materiálu ze zadní strany zkoumaného vzorku [45, 34].

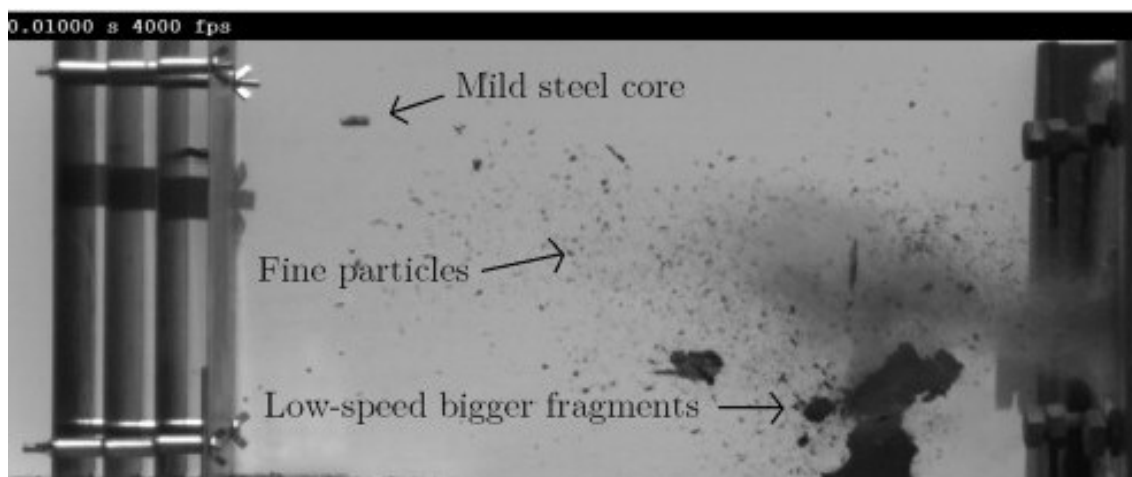
Přídavek ocelových mikrovláken do matrice UHPC radikálně změnil chování materiálu při kvazistatickém a rázovém zatížení díky efektu vláken přemostujících vzniklé trhliny. Lokální poškození u vzorků z UHPC bylo proto výrazně zmenšeno. Desky z UHPC obsahující 1 % ocelových mikrovláken v objemu směsi vykázaly velmi dobrou odolnost vůči nárazu projektilu. Spalling byl významně omezen, ale byl stále doprovázen menším množstvím trhlín. Hlavního zlepšení bylo dosaženo v redukci scabbingu. Při scabbingu již nevznikaly celé krátery a oblast poškození byla malá. Na zadní straně byly současně vytvořeny paprskovité trhliny rozbíhající se ze středu poškození. Významný je i fakt, že žádný vzorek nebyl perforován.



Obrázek 4.4: Typy lokálních poškození na tenkých konstrukcích. (a) tvorba radiálních trhlin na (i) přední a (ii) zadní straně, (b) vznik předního kráteru a odražení materiálu (spalling), (c) tvorba tunelovacího kanálku bez vyražení materiálu, (d) vznik předního kráteru a odražení materiálu (spalling) a odražení materiálu ze zadní strany (scabbing), (e) vyražení materiálu ve tvaru zvonu (tzv. shear plugging), (f) kompletní perforace vzorku.



Obrázek 4.5: Řez tenkou deskou po nárazu projektilu s olověným jádrem a vnikem předního kráteru. Materiál na zadní straně vzorku je porušen, ale nedošlo k jeho uvolnění díky využití vláknité výztuže.



Obrázek 4.6: Perforace tenké UHPC desky polotvrdým jádrem projektilu  $7.62 \times 39$  mm s tvorbou sekundárních fragmentů v podobě jemných částic a větších fragmentů s nízkou rychlostí.

Zbytková rychlost projektilu po průchodu deskou byla spočítána ze záznamů vysokorychlostní kamery. Samotné sledování střely bylo relativně jednoduché, neboť zbytková rychlost střely byla ve většině případů větší než rychlost fragmentů odloupených ze zadní strany desky. Bylo pozorováno, že střela vycházející ze zadní strany kompozitní desky nesledovala původní směr, ale téměř vždy byla odkloněná od původního vektoru dopadu. Odklon od původní trajektorie byl pravděpodobně způsoben anizotropním lomovým procesem v kompozitní desce [5]. Další autoři se domnívají, že tento odklon může být zapříčiněn drobnými nestabilitami střely nebo rozptylem mechanických vlastností materiálu v oblasti dopadu projektilu [31]. Konečná zbytková rychlost byla spočítána z prostorového úhlu, který byl určen z vysokorychlostní kamery a otisku střely v baterii plechů, umístěné 600 mm za zadní stranou desky (Obrázek 4.6).

Relativní zbytková rychlost projektilu byla stanovena jako 37 % dopadové rychlosti v případě, kdy nebyla ve směsi použita vlákna. Významné zlepšení bylo pozorováno, když obsah vláken přesáhl 1,5 % z objemu ztvrdlého betonu. Je pozoruhodné, že největší zlepšení se nachází mezi 1,5 % a 2,0 % objemu vláken ve směsi (22 % a 9 % dopadové rychlosti), avšak k žádnému významnému zlepšení nedošlo v případě, kdy obsah vláken přesáhl 2 % z objemu ztvrdlého betonu.

Zvýšení množství mikrovláken na 2 % v objemu směsi přineslo další zvýšení odolnosti proti nárazu projektilu. Spalling byl minimalizován, byl pozorován jen v blízkém okolí vlastního kráteru od probíjení projektilu vzorkem (Obrázek 4.7). Na čelní straně vzorku nebyly vytvořeny žádné ohybové ani jiné trhliny. Poškozený materiál byl díky působení vláken zadržen v tělese vzorku, čímž nevznikly prakticky žádné nebezpečné



Obrázek 4.7: Kompletní perforace tenké UHPC desky s výrazně omezeným lokálním poškozením bez tvorby radiálních trhlin.

fragmenty, které by mohly ohrozit prostor za vzorkem. Vysokou odolnost vzorku z UHPC s 2% obsahem vláken proti nárazu projektilu potvrzuje i minimální úbytek hmotnosti vzorku

Vysokohodnotný vlákny vyztužený beton je materiálem splňujícím vysoké požadavky na odolnost vůči působení mimořádných zatížení, tak i požadavky na cenu a hmotnost, neboť již relativně tenká vrstva dokáže velmi dobře ochránit před účinky palných zbraní. Vlákna hrají v tomto směru naprosto zásadní roli.

# Kapitola 5

## Výbuch

Výbuch je jedním z nejrychlejších extrémních dynamických jevů. Obecně řečeno: jedná se o globální zatížení působící na velkou část stavební konstrukce. Výjimkou mohou být výbušniny umístěné tzv. na přílož, kde je výbušnina umístěna přímo na konstrukční prvek. V takovém případě se jedná o lokálněji působící druh zatížení, kdy rychlost ztížení je nejvyšší. Ze zvětšující se vzdáleností se rychlost rázové vlny zmenšuje a zatížení začíná působit více globálně na větší část konstrukce. V obou případech se ale jedná o jeden z nejrychlejších zatěžovacích jevů.

Tlaková vlna je označení pro tlak a proudění vznikající v důsledku rychlého uvolnění velkého množství energie v lokalizovaném objemu. Proudové pole šířící se nadzvukovou rychlostí je vedeno rázovou vlnou. Tlaková vlna vzniká po detonaci silných výbušnin. V podstatě je tlaková vlna typem pohyblivé rázové vlny vyvolané výbuchem [17, 10].

Při výbuchu se velmi často uplatňuje sdružený účinek, kdy vedle samotné tlakové vlny působící na konstrukci účinkují i tzv. sekundární fragmenty [9]. Při explozi vysoce výbušných zařízení, jako jsou letecké pumy, rakety, dělostřelecké granáty a improvizovaná výbušná zařízení, dochází ke vzniku primárních střepin z materiálu pláště (těla) zařízení. Tyto střepiny jsou tlakovou vlnou vrženy do okolí. Současně může být šokovou či tlakovou vlnou do okolí vržen i materiál z přímého okolí a z povrchu země, např. kameny mohou být velmi nebezpečnými. Jedná se také o střepiny a šrapnely, které jsou generovány přímo výbušninou nebo i jinou obálkou, která je při výbuchu roztrhána na malé části a tlakovou vlnou uvolněna do nejbližšího okolí. Z toho důvodu je potřeba zkoumat tyto účinky společně. Vždy záleží na vzdálenosti mezi výbušninou a ochrannou konstrukcí, aby bylo možné charakterizovat a určit, co zasáhne ochrannou konstrukci dříve. V případě menších vzdáleností (nižší jednotky metrů) jako první konstrukci zasáhne tlaková vlna a poté fragmenty, u větších vzdáleností dorazí ke konstrukci nejprve fragmenty a pak teprve tlaková vlna.



Nálož (g TNT)	Kontakt	Vzdálenost (mm)				
		250	375	500	750	1000
75	LD	FE	FE	FE	NO	NO

Tabulka 5.1: Odezva desek na zatížení výbuchem 75 g TNT.

SOD (mm)	Nálož (g TNT)									
	75	150	225	300	400	600	800	1200	1600	2000
1000	NO	NO	NO	NO	FE	FE	FE	GF	GF	GF

Tabulka 5.2: Odezva na různé nálože z odstupové vzdálenosti 1000 mm.

## 5.1 Tenké desky

Výbušnina byla zavěšena na speciální dřevěné trojnožce, která přesně zajišťovala vzdálenost odstupu (Stand-off-Distance - SOD) od testovaných panelů (Obrázek 5.1). Výbušnina byla zavěšena pomocí provázku na vrchol trojnožky a délka provázku byla nastavena na přesnou vzdálenost mezi výbušninou a panelem, tj. na předem definovanou SOD. Panely UHPC byly podepřeny na dvou dřevěných hranolech, světlé rozpětí bylo přibližně 1260 mm. Pro provedení všech zkoušek výbuchem v jednom okamžiku bylo zkonstruováno několik trojnožek. Konfigurace výbuchového experimentu s určitou vzdáleností od desky UHPC je znázorněna na obrázku 5.1 vlevo a kumulativní výbuch nad jednotlivými deskami je znázorněn na obrázku 5.1 vpravo.

Odezva desek na zatížení výbuchem 75 g TNT je uvedena v tabulce 5.1 a odezva na různé nálože z odstupové vzdálenosti 1000 mm je uvedena v tabulce 5.2.

Poškození, které bylo na desce vyvoláno, bylo klasifikováno podle několika možných scénářů jako lokální poškození (Local Damage - LD), globální porucha (Global Failure - GF), čelní eroze (Front Erosion - FE) a žádné viditelné poškození (No Damage - NO).



Obrázek 5.1: Umístění nálože a její pozice nad zkoušenou deskou na dřevěné trojnožce a provedení výbuchového experimentu na více deskách současně.



Obrázek 5.2: Lokální poškození (LD) desky UHPC v důsledku kontaktního výbuchu 75 g TNT (vlevo) a čelní eroze (FE) desky UHPC v důsledku výbuchového experimentu 400 g TNT z 1 m (vpravo).



Obrázek 5.3: Globální porušení (GF) desky UHPC v důsledku výbuchu 1,2 kg TNT ze vzdálenosti 1 m (vlevo) a globální porušení (GF) desky UHPC v důsledku experimentu s výbuchem 2 kg TNT ze vzdálenosti 1 m (vpravo).

Lokální poškození (LD) lze charakterizovat jediným kráterem s úplnou perforací desky (Obrázek 5.2 vlevo), který ukazuje kráter na obou stranách desky. Čelní erozi (FE) lze charakterizovat mapou menších kráterů, které jsou rozprostřeny po čelní ploše cíle, kde nedochází k perforaci, bez strupovitosti (scabbinu) ze zadní plochy desky (Obrázek 5.1 vpravo). Tyto krátery mají obvykle průměr 1-2 cm a hloubku nejvýše 5 mm. Globální selhání (GF) je charakterizováno lomem po celé šířce panelu bez zbytkové kapacity panelu UHPC (Obrázek 5.3). Pokud není pozorováno žádné makroskopické poškození bez trhlin nebo jakékoliv eroze na obou stranách panelu, je vzorek klasifikován jako bez viditelného poškození (NO).

## 5.2 Koše

Odpadkový koš může být využíván také jako místo pro umístění improvizovaného výbušného zařízení, proto je nutné odpadkové koše v rušných lokalitách navrhovat jako koše odolné proti výbuchu. Směs vysokohodnotného silikátového kompozitu obsahovala cement, mikrosiliku a tři frakce jemných písků. Dále směs obsahovala rozptýlenou výztuž v podobě vysokopevnostních vláken v objemu 2% z celku cementového kompozitu. Koš se zvýšenou balistickou odolností je ve tvaru válce a je vysoký 900 mm. Vnější průměr koše je 700 mm. Tloušťka stěny koše a tloušťka dna je 150 mm. Celková

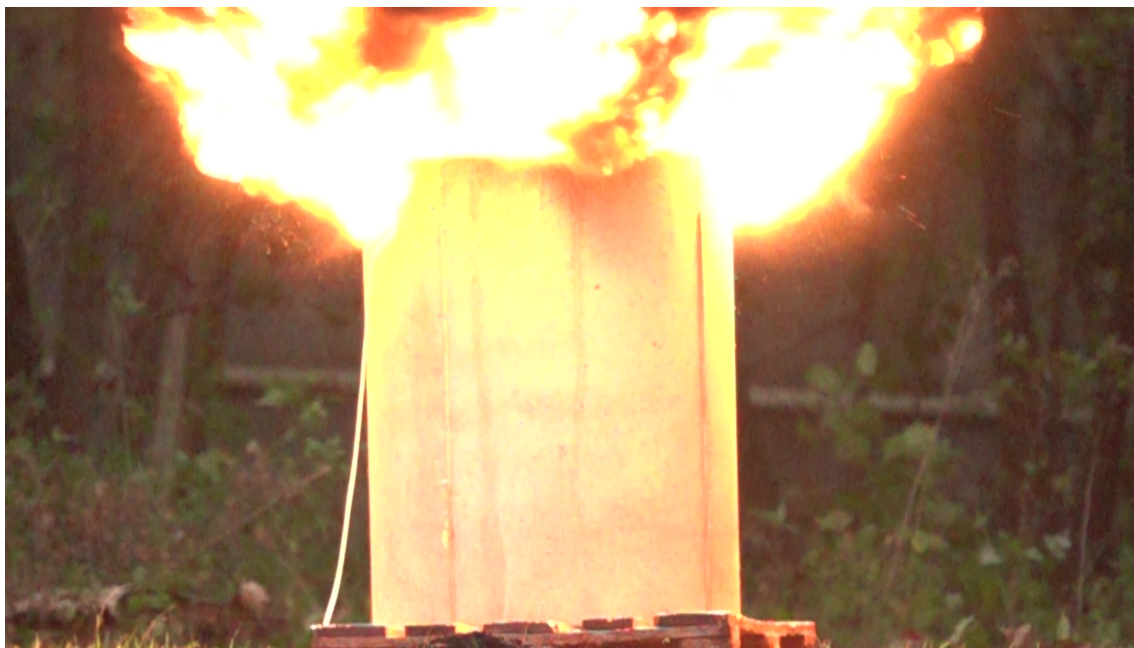
	Nálož	Pozice	Poškození
Vzorek 1	200 g ekvivalentu TNT	2/3 koše (450 mm) – zavěšeno v prostoru	Nepoškozeno
Vzorek 2	300 g ekvivalentu TNT	2/3 koše (450 mm) – zavěšeno v prostoru	Nepoškozeno
Vzorek 3	500 g ekvivalentu TNT	Úžlabí koše (0 mm) – na přílož	Nepoškozeno
Vzorek 4	800 g ekvivalentu TNT	2/3 koše (450 mm) – zavěšeno v prostoru	Nepoškozeno
Vzorek 5	500 g ekvivalentu TNT	střed koše (350 mm) – na přílož ke stěně	Mikrotrhliny
Vzorek 6	1000 g ekvivalentu TNT	střed koše (350 mm) – na přílož ke stěně	Mikrotrhliny
Vzorek 7	1500 g ekvivalentu TNT	střed koše (350 mm) – na přílož ke stěně	Výtrž u nálože
Vzorek 8	1500 g ekvivalentu TNT	střed koše (350 mm) – na přílož ke stěně	Výtrž u nálože – otevřený otvor
Vzorek 9	760 g ekvivalentu TNT	Úžlabí koše (0 mm) – na přílož	Výtrž u nálože

Tabulka 5.3: Umístění nálože a výsledek výbuchové zkoušky.

hmotnost koše je 620 kg.

Pro zjištění balistické odolnosti košů byly provedeny výbuchové zkoušky na full-scale vzorcích. Umístění a velikost nálože je popsáno v tabulce 5.3. Při zkouškách byla postupně zvyšována síla nálože pro ověření numerických modelů. Umístění nálože odpovídalo numerickým simulacím – zavěšená nálož v ose prostoru pro odpadky, 1/3 výšky od dna koše. Toto umístění nálože nevykázalo naprosto žádné poškození koše. Po dosažení 1,0 kg TNT bylo zvoleno umístění na dně v rohu. Až zde se projeví nepatrné trhliny na koši. Při síle nálože 1,5 kg TNT, umístěné na dně v rohu, došlo k vytržení materiálu a otevření malého otvoru v koši.

Celkově se vzorky chovaly nad očekávání dobře. Energie výbuchu byla vždy směřována směrem vzhůru a nikoli do stran (Obrázek 5.4). Až při síle nálože, se kterou se při numerických simulacích nepočítalo, došlo k poškození koše (Obrázek 5.5). Celkově se dá experimentální část hodnotit za velmi úspěšnou. Devět vzorků bylo vystaveno výbuchovým zkouškám. Tyto zkoušky potvrdily správnost koncepce konstrukčního řešení a potenciál košů odolávat výbuchu nástražného zařízení o velikosti až 1,5kg TNT. Experimenty byly vyhodnoceny jako velmi úspěšné.



Obrázek 5.4: Průběh výbuchového experimentu odpadkového koše z UHPC se vznikem tzv. fireball - extrémně horká a vysoce svítivá kulovitá hmota vzduchu a plyných zbytků.



Obrázek 5.5: Stav koše po zkoušce: 500 g TNT na střed koše na přílož ke stěně – bez poškození a 1500 g TNT na střed koše na přílož ke stěně – výtrž u nálože.

# Kapitola 6

## Závěr

Díky svým konstrukčním schopnostem a odolnosti vůči rázovému tlaku se beton běžně používá jako technické řešení pro použití v různých opevňovacích, bariérových nebo jiných ochranných prvcích. Další vývoj v této oblasti vyústil v ultra vysokohodnotné betony, které se nyní hojně využívají při ochraně infrastruktury. Díky své vysoké pevnosti a tažnosti jsou vhodné pro extrémní zatěžovací stavy, jako je například rázové zatížení nebo výbuch.

UHPC je možno charakterizovat jako kompozitní materiál s vysokým podílem ocelových vláken, nízkým poměrem vody k pojivu (pojivovým součinitelem), vysokým obsahem mikrosiliky a absencí kameniva se zrny většími než 4 mm. Takový beton má vynikající materiálové charakteristiky, jakými jsou samozhutnitelnost, mimořádně vysoké mechanické vlastnosti a nízká permeabilita, která se projevuje výbornou odolností proti vlivům okolního prostředí. Typické jsou pro tento materiál pevnosti v tlaku 150 až 200 MPa a 7 až 15 MPa v jednoosém tahu. Navíc tyto materiály vykazují při namáhání v tahu zpevnění a vysokou schopnost absorpce energie. Kromě toho mají v porovnání s konvenčním betonem lepší konstrukční vlastnosti a nižší sklon k drobení a odlupování při zatížení v důsledku rázu. Zlepšení odolnosti vůči extrémním zatěžovacím jevům může být dosaženo snížením vodním součinitelem a vyšší pevností betonu v tlaku. Přidání ocelových vláken do směsi vede obecně ke zmenšení poškození.

Ultra vysokohodnotné cementové kompozity jsou velmi vhodným materiálem pro uplatnění v ochranných konstrukcích vůči celému spektru impulsivních zatěžovacích stavů. Jsou výhodné jak z hlediska cenové dostupnosti, tak i flexibility a vysoké odolnosti, která je určena především využitím rozptýlené kovové mikrovýztuže. Naprosto vitálním předpokladem je využití krátké rozptýlené výztuže ve formě mikrodrátků, rozmístěné rovnoměrně po celém objemu ochranné konstrukce.

Jedním z největších přínosů vláken je tedy jejich pravidelné rozložení v tělese ma-

teriálu. Jelikož místo nárazu je vždy neznámé, jejich uniformní rozložení v objemu UHPC zajišťuje rovnoměrnou úroveň ochrany v celé konstrukci. To je zásadní rozdíl oproti běžným výztužným ocelovým prutům, který dává UHPC termín materiálu s vyšší perspektivou pro použití v ochranných konstrukcích.

Vynikající mechanické vlastnosti UHPC a duktilita zajištěná efektem působících mikrovláken silně redukovaly lokální poškození. Nejvyšší odolnosti proti nárazu projektilu bylo dosaženo s 2% mikrovláken v objemu směsi UHPC. Bylo zjištěno, že vlákna mají zásadní vliv na spalling, scabbing a vznik a propagaci trhlin. Vlákna však neměla žádný vliv na hloubku penetrace.

Správné rozptýlení a orientace drátků je tedy zásadním předpokladem pro úspěšné využití těchto kompozitů při rychlých dynamických jevech. Efektivnějšího využití bude možné dosáhnout pomocí elektromagnetické orientace. Využitím elektromagnetického pole pro orientaci vláken lze dosáhnout mnohem větší kapacity u statického zatížení. Existuje předpoklad, že totéž platí i u vysokorychlostního zatížení. Dále elektromagnetická orientace vede k výsledkům s menšími rozptyly naměřených pevností nebo disipovaných energií. Na druhou stranu je nutné poznamenat, že elektromagnetická orientace drátků je mnohem více technologicky náročná než konvenční postupy mechanické orientace, avšak poskytuje mnohem větší míru přesnosti a kontroly nad finálním produktem.

Základní motivací zůstává i fakt, že při úspěšné orientaci vláken do směru hlavních tahových napětí je možné výrazně snížit procentuální zastoupení rozptýlené vláknité výztuže při zachování stejné kapacity, nebo naopak výrazně kapacitu prvku navýšit. Jedná se o nejmodernější prvek pro návrh cementových kompozitů s rozptýlenou vláknitou výztuží s obrovskou mírou potenciálních aplikací, a to nejenom do ochranných konstrukcí.

# Literatura

- [1] A. Abrishambaf, M. Pimentel, and S. Nunes. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 97:28–40, 2017.
- [2] V. Bindiganavile, N. Banthia, and B. Aarup. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite. *ACI Materials Journal*, 99(6), 2002.
- [3] P.H. Bischoff and S.H. Perry. Compressive behaviour of concrete at high strain rates. *Materials and Structures*, 24(6):425–450, 1991.
- [4] C. Bludau, M. Keuser, and A. Kustermann. Perforation resistance of high-strength concrete panels. *ACI Structural Journal*, 103(2), 2006.
- [5] T. Borvik, M. Langseth, O.S. Hopperstad, and M.A. Polanco-Loria. Ballistic perforation resistance of high performance concrete slabs with different unconfined compressive strengths. In *Proceedings of first international conference on high performance structures and composites. Sevilla, Spain: WIT press (ISBN 1-85312-904-6)*, pages 273–282, 2002.
- [6] K. Carrera, K. Künzel, P. Konrád, M. Mára, P. Kheml, J. Fornůsek, V. Papež, and R. Sovják. Mechanical properties of high-performance concrete with steel fibers oriented by an electromagnetic field. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34, 2022.
- [7] K. Carrera, K. Künzel, P. Konrád, M. Mára, P. Kheml, V. Papež, and R. Sovják. The effect of magnetic field parameters on fibre orientation in high-performance fibre-reinforced concrete. *Mechanics of Materials*, 177:104534, 2023.
- [8] N. Cauberg, J. Piérard, and O. Remy. Ultra high performance concrete: Mix design and practical applications. In *Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society*, 2008.
- [9] M. Foglar, R. Hajek, M. Kovar, and J. Štoller. Blast performance of rc panels with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 94:536–546, 2015.

- [10] M. Foglar and M. Kovar. Conclusions from experimental testing of blast resistance of frc and rc bridge decks. *International Journal of Impact Engineering*, 59:18–28, 2013.
- [11] B.A. Graybeal. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 104(2):146, 2007.
- [12] H. Grisaro and A.N. Dancygier. Assessment of the perforation limit of a composite rc barrier with a rear steel liner to impact of a non-deforming projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 64(0):122 – 136, 2014.
- [13] H. Grisaro and A.N. Dancygier. Assessment of residual deformation of rear steel plate in {RC} barriers subjected to impact of non-deforming projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 77(0):42 – 58, 2015.
- [14] Y.B. Guo, G.F. Gao, L. Jing, and V.P.W. Shim. Quasi-static and dynamic splitting of high-strength concretes – tensile stress–strain response and effects of strain rate. *International Journal of Impact Engineering*, 125:188–211, 2019.
- [15] K. Habel, J.P. Charron, S. Braiike, R.D. Hooton, P. Gauvreau, and B. Massicotte. Ultra-high performance fibre reinforced concrete mix design in central canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(2):217–224, 2008.
- [16] K. Habel and P. Gauvreau. Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (uhpfr) to impact and static loading. *Cement and Concrete Composites*, 30(10):938–946, 2008.
- [17] R. Hajek, M. Foglar, and J. Fladr. Influence of barrier material and barrier shape on blast wave mitigation. *Construction and Building Materials*, 120:54–64, 2016.
- [18] Y. Hao and H. Hao. Influence of the concrete dif model on the numerical predictions of rc wall responses to blast loadings. *Engineering Structures*, 73:24–38, 2014.
- [19] J. Hong, Q. Fang, L. Chen, and X. Kong. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified kc material model. *Construction and Building Materials*, 155:1013–1024, 2017.
- [20] P. Hála, M. Frydrýn, P. Máca, and R. Sovják. Comparative study on the crashworthiness of brittle blocks with thin-walled cellular structures. *Thin-Walled Structures*, 148:106578, 2020.
- [21] P. Hála, R. Sovják, M. Frydrýn, and T. Mičunek. Energy absorbing system made of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 139:64–80, 2017.



- [22] S.T. Kang, Y. Lee, Y.D. Park, and J.K. Kim. Tensile fracture properties of an ultra high performance fiber reinforced concrete (uhpfrc) with steel fiber. *Composite Structures*, 92(1):61–71, 2010.
- [23] B.P. Kneubuehl. *Wound Ballistics*. Springer, 2008.
- [24] P. Konrád. Characterization of high-performance fibre-reinforced cementitious composites subjected to high deformation rates. *Disertační práce, Fakulta stavební ČVUT v Praze*, 2021.
- [25] P. Konrád, M. Mára, J. Fornůšek, L. Nouzovský, J. Zatloukal, T. Kohout, P. Vrtal, R. Sovják, and P. Konvalinka. Mobile anti-vehicle barrier made of high-performance fibre-reinforced concrete. *Advances in Structural Engineering*, 24(11):2364–2374, 2021.
- [26] P. Konrád and R. Sovják. Energy-based approach for studying fibre-reinforced concrete subjected to impact loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16, 2022.
- [27] T. Krauthammer. *Modern protective structures*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [28] S. Kravanja and R. Sovják. Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under high-velocity projectile impact. part i. experiments. *Acta Polytechnica*, 58:232–239, 2018.
- [29] J. Lai, X. Guo, and Y. Zhu. Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 84(0):1 – 12, 2015.
- [30] L. Leicht, T. Fíla, P. Máca, and M. Curbach. Dynamic beam-end tests: Investigation using split hopkinson bar. *International Journal of Impact Engineering*, 172:104417, 2023.
- [31] Q.M. Li, S.R. Reid, H.M. Wen, and A.R. Telford. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1):224–284, 2005.
- [32] V.C. Li and T. Kanda. Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2):66–69, 1998. cited By 57.
- [33] O. Mosig and M. Curbach. The influence of water saturation on the static and dynamic compressive strength of concrete. *Beton- und Stahlbetonbau*, 114(3):168–175, 2019.

- [34] P. Máca, R. Sovják, and P. Konvalinka. Mix design of uhpfrc and its response to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 63:158–163, 2014.
- [35] P. Máca, J. Zatloukal, and R. Sovják. Design Of A Novel Horizontal Impact Machine For Testing Of Concrete Specimens. In *WIT Transactions on The Built Environment*, page 10, 2014.
- [36] H. Pahl. Penetration of projectiles into finite thick reinforced concrete targets. In *Proceedings of the 4th international symposium on interaction of non-nuclear munitions with structures, Panama City Beach, FL*, page 55, 1989.
- [37] W. Pansuk, H. Sato, Y. Sato, and R. Shionaga. Tensile behaviors and fibre orientation of uhpc. In *Proceedings of second international symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany*, pages 161–168, 2008.
- [38] M. Quast and M. Curbach. Concrete under biaxial dynamic compressive loading. *Procedia Engineering*, 210:24–31, 2017. Performance of materials and structures under extreme conditions.
- [39] R. Sovják, J. Fládr, J. Stástka, and M. Frydrýn. Impact response of various concretes at 2.8-second drop shaft. *MATEC Web Conf.*, 352:00005, 2021.
- [40] L. Heng Soon, K.W. Kang, S.C. Fan, Q.J. Yu, and Y.W. Yang. A review: Numerical modeling of the debris throw of reinforced concrete structures under internal explosions. In *34th DoD Explosive Safety Seminar, Portland, Oregon*, pages 1–10, 2010.
- [41] R. Sovják, O. Koutný, and P. Hála. Penetration resistance of building materials against 7.62-mm armor-piercing projectile. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9):1–8, 2022.
- [42] R. Sovják, S. Kravanja, and J. Zatloukal. Using steel fibres to increase the projectile impact resistance of cementitious composites. *Recent Developments in High Strain Rate Mechanics and Impact Behavior of Concrete, An ACI Technical Publication*, 347:39 – 58, 2021.
- [43] R. Sovják, P. Máca, and T. Imlauf. Effect of fibre aspect ratio and fibre volume fraction on the effective fracture energy of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete. *Acta Polytechnica*, 56:319327, 2016.
- [44] R. Sovják, P. Máca, and T. Imlauf. Effect of fibre length on the fracture energy of uhpfrc. *Procedia Engineering*, 193:74–79, 2017. International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures.

- [45] R. Sovják, T. Vavříník, J. Zatloukal, P. Máca, T. Mičunek, and M. Frydrýn. Resistance of slim uhpfr targets to projectile impact using in-service bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 76:166–177, 2015.
- [46] E. Vejmelková, P. Konvalinka, P. Padevìt, L. Kopecký, M. Keppert, and R. Èerný. Mechanical, hygric, and thermal properties of cement-based composite with hybrid fiber reinforcement subjected to high temperatures. *International Journal of Thermophysics*, 30(4):1310–1322, 2009.
- [47] N. Wang, S. Mindess, and K. Ko. Fibre reinforced concrete beams under impact loading. *Cement and Concrete Research*, 26(3):363–376, 1996.
- [48] Z. Wang, J. Yan, Y. Lin, F. Fan, and M. Sun. Experimental and analytical study on the double steel plates-uhpc sandwich slabs under low-velocity impact. *Thin-Walled Structures*, 184:110548, 2023.
- [49] S. Werner, K.C. Thienel, and A. Kustermann. Study of fractured surfaces of concrete caused by projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 52(0):23 – 27, 2013.
- [50] K. Wille, A.E. Naaman, and G.J. Parra-Montesinos. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 mpa (22 ksi): a simpler way. *ACI Materials Journal*, 108(1):46–54, 2011.
- [51] H. Wu, Q. Fang, J. Gong, J.Z. Liu, J.H. Zhang, and Z.M. Gong. Projectile impact resistance of corundum aggregated uhp-sfrc. *International Journal of Impact Engineering*, (0):–, 2015.
- [52] J. Wuest, E. Denarié, and E. Brühwiler. Measurement and modelling of fibre distribution and orientation in uhpfr. In *Proc. of HPRCC5, Proceedings PRO 53, Mainz*, pages 259–266, 2007.
- [53] Y. Zhou, J. Yang, X. Luo, H.-J. Hwang, H. Chen, J. Sun, W. Yi, and S.-M. Kang. Pendulum impact loading tests of precast concrete columns with various column base connections. *Engineering Structures*, 252:113736, 2022.

# Kapitola 7

## Strukturovaný životopis autora

**SOVJÁK, Radoslav, doc. Ing. Bc., Ph.D., LL.M.**

- nar. 21. srpna 1982 v Praze, radoslav.sovjak@cvut.cz, +420 776 595 587

### Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti

- 2021-2022 (LL.M.), Vysoká škola CEVRO Institut, postgraduální právní studium v oboru Alternativní řešení sporů, závěrečná práce byla vypracována na téma „Mimosoudní řešení sporů v ČR ve stavebnictví dle podmínek FIDIC“.
- 2016-2020 (Bc.), Právnická fakulta, Masarykova univerzita, bakalářské studium v oboru Veřejná správa, bakalářská práce byla vypracována na téma „Veřejnoprávní smlouvy jako pramen práva“.
- 2018 (doc.), Experimentální centrum, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, habilitace v oboru Teorie stavebních konstrukcí a materiálů, habilitační práce byla vypracována na téma „Balistická odolnost ultra vysokohodnotných cementových kompozitů“.
- 2007-2010 (Ph.D.), Experimentální centrum, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, doktorské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby, doktorská práce byla vypracována na téma „Nekovová výztuž pro betonové konstrukce“.
- 2003-2004, Studijní pobyt na zahraniční univerzitě (získáno 10 měsíční stipendium), TU Delft, Fakulta stavební, Nizozemí.
- 2001-2007 (Ing.), Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, magisterské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby, diplomová práce byla vypracována na téma „Náhrada ocelové výztuže výztuží na bázi kompozitů“.

## Zaměstnání

- Od roku 2018 docent v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze, zodpovědný za vedení vědeckých týmů, fundraising, komunikaci s průmyslovými partnery a koordinaci prací v projektových konsorciích, vedení doktorandů v oborech Konstrukce a dopravní stavby, Fyzikální a materiálové inženýrství a Integrální bezpečnost.
- 2010 - 2018, odborný asistent v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze, zodpovědný za experimentální analýzu stavebních materiálů a konstrukcí, sběr, vyhodnocování a analýzu dat, vede a vedl projekty zaměřené na experimentální vývoj stavebních materiálů a konstrukčních prvků a chování prvků vystavených rázovému zatížení, vedení závěrečných prací studentů v bakalářských a navazujících magisterských studijních programech Stavitelství a Stavební inženýrství.
- 2007-2010, technik v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze, získal rozsáhlé zkušenosti v experimentální diagnostice stavebních materiálů a konstrukcí, experimentálním vyšetřování stavebních materiálů a konstrukcí, sběru, vyhodnocování a analýze dat, realizaci širokého spektra zatěžovacích testů, zahrnujících kvazistatické a únavové zkoušky materiálů.
- 2005-2007, RECOC, s.r.o., statická kancelář, pracoval na několika projektech, získal zkušenosti v navrhování a realizaci betonových prefabrikovaných prvků a konstrukcí v ČR i v zahraničí.

## Výzkumná činnost

- Nekonvenční destruktivní experimenty.
- Zatížení staveb a stavebních prvků rázem.
- Vývoj prvků odolných vůči nárazu vozidla.
- Terminální balistika vláknových kompozitů.
- Odolnost staveb vůči extrémnímu zatížení.
- Experimentální vývoj ultra vysokohodnotných cementových kompozitů.
- Použití nekovové výztuže na bázi kompozitů v betonových konstrukcích.
- Diagnostika stavebních materiálů a konstrukcí.

## Odkazy

- ORCID: 0000-0001-6165-1251
- Researcher ID: L-2602-2015
- Scopus Author ID: 35218246700

## Vybrané grantové projekty

- 2020-2022 Studie vlivu elektromagnetického pole na chování rozptýlené výztuže v cementovém kompozitu, GA ČR.
- 2017-2020 Výzkum, vývoj, testování a hodnocení prvků kritické infrastruktury, MV ČR.
- 2016-2018 Zavedení ochranné bariéry z vysokohodnotného betonu do průmyslové výroby, MPO ČR.
- 2014-2018 COST Action TU 1404 Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures.
- 2014-2015 Bezpečnost a Obrana pro InovaSEED.
- 2013-2017 COST Action TU 1301 NORM for Building materials.
- 2013-2015 Snížení materiálových a energetických nákladů konvenčně ražených tunelů s využitím spolupůsobení primárního a sekundárního ostění s cílem zvýšení efektivity nosných prvků konstrukce tunelů, TA ČR.
- 2012-2018 Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích, GA ČR.
- 2012-2016 Vláknové kompozity na bázi cementu pro vysokoteplotní aplikace, GA ČR.
- 2012-2015 Metodika stanovení vlivu proměnlivého prostředí na degradaci historického zdiva, MK ČR.
- 2012-2015 Chování vysokohodnotných vláknů vyztužených cementových kompozitů vystavených extrémnímu zatížení, MŠMT ČR.
- 2010-2014 Experimentální vývoj vysokohodnotného betonu se zvýšenou odolností proti zatížení rázem a vysokou schopností absorpce a disipace energie výbuchu, MV ČR.

## Vybrané aplikační výstupy

- Fornůsek, J. - Mára, M. - Sovják, R., - Zatloukal, J. Mobilní systém pro výcvik střelby a taktiky v uzavřených prostorách. Patent CZ 308949. 2021-08-18.
- Sovják, R. - Fornůsek, J. - Mára, M. - Zatloukal, J., - Jelínek, V. Balistická soustava. Patent CZ 308773. 2021-03-31.
- Sovják, R. - Fornůsek, J. - Mára, M. - Zatloukal, J., - Jelínek, V. Ballistic panel and ballistic system. United States of America. Patent US10648780. 2020-05-12.
- Marek, J. - Smrt, L. - Fornůsek, J. - Konvalinka, P. - Mára, M. - Sovják, R., - Zatloukal, J. Forma pro odlévání deskových prvků. Patent CZ 308309. 2020-03-18.
- Konvalinka, P. - Sovják, R. - Fornůsek, J. - Mára, M., - Konrád, P. Mobilní zábrana pro zpomalení a/nebo zastavení a/nebo zamezení vjezdu vozidla. Patent CZ 308333. 2020-04-09.
- Hadraba, D. - Sovják, R. - Hošek, J. - Černý, R. - Vejmelková, E., - Konvalinka, P. Způsob měření délkových změn stavebních materiálů v extrémních podmínkách a zařízení k provádění tohoto způsobu. Patent CZ 307020. 2017-10-04.
- Hořejší, J. - Mařík, L. - Pešková, Š. - Šmilauer, V. - Procházka, P. - Konvalinka, P. - Vogel, F., - Sovják, R. Dvouplášťové ostění podzemních děl a způsob stanovení únosnosti tohoto ostění. Patent CZ 306781. 2017-05-24.
- Mičunek, T. - Sovják, R. - Frydrýn, M., - Máca, P. Vnitřní struktura deformačního bloku, zejména stavebního prvku dopravních sjezdů. Patent CZ 306613. 2017-02-15.
- Sovják, R. - Fornůsek, J. - Máca, P., - Litoš, J. Zařízení pro stanovení odezvy desek z vysokohodnotných betonů při zatížení rázem. Patent CZ 305331. 2015-06-24.
- Fornůsek, J. - Konvalinka, P. - Máca, P. - Maršík, V. - Sovják, R. - Vavříník, T., - Zatloukal, J. Univerzální zkušební zařízení pro stanovení mechanických parametrů, odezvy a poškození pokročilých kompozitních materiálů za vysokých rychlostí deformace. Patent CZ 305246. 2015-05-20.
- Litoš, J. - Neubauer, E. - Sovják, R., - Máca, P. Zařízení pro měření délkových změn stavebních materiálů. Patent CZ 305319. 2015-06-17.
- Konvalinka, P. - Máca, P., - Sovják, R. Vysokohodnotný cementový kompozit. Patent CZ 305168. 2015-04-15.

## Vybrané publikace

- Carrera, K. - Künzel, K. - Konrád, P. - Mára, M. - Kheml, P. - Papež, V., - Sovják, R. The effect of magnetic field parameters on fibre orientation in high-performance fibre-reinforced concrete. *Mechanics of Materials*. 2023, ISSN 1872-7743.
- Carrera, K. - Künzel, K. - Konrád, P. - Mára, M. - Kheml, P. - Fornůsek, J. - Papež, V., - Sovják, R. Mechanical properties of high-performance concrete with steel fibres oriented by an electromagnetic field. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*. 2022, 34(9), 1-8. ISSN 0899-1561.
- Konrád, P. - Sovják, R. Energy-Based Approach for Studying Fibre-Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2022, 16 ISSN 2234-1315.
- Sovják, R. - Kravanja, S., - Zatloukal, J. Using Steel Fibres to Increase the Projectile Impact Resistance of Cementitious Composites. In: *Recent Developments in High Strain Rate Mechanics and Impact Behavior of Concrete*. Michigan: American Concrete Institute, 2021. p. 39-58. An ACI Technical Publication. vol. 347. ISSN 0193-2527. ISBN 978-1-64195-134-0.
- Sovják, R. - Koutný, O., - Hála, P. Penetration resistance of building materials against 7.62 mm armour piercing projectile. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*. 2021, 33(9), 1-11. ISSN 0899-1561.
- Konrád, P. - Mára, M. - Fornůsek, J. - Nouzovský, L. - Zatloukal, J. - Kohout, T. - Vrtal, P. - Sovják, R., - Konvalinka, P. Mobile anti-vehicle barrier made of high-performance fibre-reinforced concrete. *Advances in Structural Engineering*. 2021, 24(11), ISSN 2048-4011.
- Sovják, R. - Pešková, Š. - Šmilauer, V. - Mára, M. - Růžička, P. - Černá Vydrová, L., - Konvalinka, P. Utilization of crumb rubber and FBC-based ternary binder in shotcrete lining. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, 11 1-12. ISSN 2214-5095.
- Konrád, P. - Sovják, R. Experimental procedure for determination of the energy dissipation capacity of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under localized impact loading. *International Journal of Protective Structures*. 2019, 10(2), 251-265. ISSN 2041-4196.
- Sovják, R. - Havlásek, P., - Vitek, J. Long-term behavior of concrete slabs prestressed with CFRP rebars subjected to four-point bending. *Construction and Building Materials*. 2018, 188 781-792. ISSN 0950-0618.



- Kravanja, S. - Sovják, R. Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under high-velocity projectile impact. Part I. Experiments. *Acta Polytechnica*. 2018, 58(4), 232-239. ISSN 1210-2709.
- Kravanja, S. - Sovják, R. Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under high-velocity projectile impact. Part II. Applicability of prediction models. *Acta Polytechnica*. 2018, 58(6), 355-364. ISSN 1210-2709.
- Hála, P. - Sovják, R. - Mičunek, T. - Frydrýn, M., - Nouzovský, L. Fracture behaviour of ceramic blocks with thin-walled cellular structures under dynamic loadings. *Thin-Walled Structures*. 2018, 122s. 597-605. ISSN 0263-8231.
- Vogel, F. - Sovják, R., - Pešková, Š. Static response of double shell concrete lining with a spray-applied waterproofing membrane. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, 68s. 106-112. ISSN 0886-7798.
- Hála, P. - Sovják, R. - Frydrýn, M., - Mičunek, T. Energy absorbing system made of high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2017, 139s. 64-80. ISSN 0950-0618.
- Sovják, R. - Vavříník, T. - Zatloukal, J. - Máca, P. - Mičunek, T., - Frydrýn, M. Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets. *International Journal of Impact Engineering*. 2015, 76(76), s. 166-177. ISSN 0734-743X.
- Máca, P. - Sovják, R., - Konvalinka, P. Mix Design of UHPFRC and its Response to Projectile Impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2014, 63(63), s. 158-163. ISSN 0734-743X.
- Sovják, R. - Máca, P., - Imlauf, T. Effect of fibre aspect ratio and fibre volume fraction on the effective fracture energy of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete. *Acta Polytechnica*. 2016, 56(4), s. 319-327. ISSN 1210-2709.
- Sovják, R. - Korecký, T., - Gundersen, A. An experimental investigation into moisture-induced expansion of plasters. *Acta Polytechnica*. 2015, 55(3), s. 187-192. ISSN 1805-2363.
- Sovják, R. - Rašíňová, J., - Máca, P. Effective fracture energy of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under increased strain rates. *Acta Polytechnica*. 2014, 54(5), s. 358-362. ISSN 1210-2709.
- Sovják, R. - Vogel, F., - Beckmann, B. Triaxial Compressive Strength of Ultra High Performance Concrete. *Acta Polytechnica*. 2013, 53(6), s. 901-905. ISSN 1210-2709.

- Sovják, R. - Máca, P., - Imlauf, T. Effect of Fibre Length on the Fracture Energy of UHPFRC. In: *Procedia Engineering. International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures*. Gliwice, 05.06.2017 - 07.06.2017. Amsterdam: Elsevier B.V.. 2017, s. 74-79. sv. 193. ISSN 1877-7058.
- Sovják, R. - Shanbhag, D. - Konrád, P., - Zatloukal, J. Response of Thin UHPFRC Targets with Various Fibre Volume Fractions to Deformable Projectile Impact. In: *Procedia Engineering. International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures*. Gliwice, 05.06.2017 - 07.06.2017. Amsterdam: Elsevier B.V.. 2017, s. 3-10. sv. 193. ISSN 1877-7058.
- Kravanja, S. - Sovják, R. - Konrád, P., - Zatloukal, J. Penetration Resistance of Semi-infinite UHPFRC Targets with various Fiber Volume Fractions against Projectile Impact. In: *Procedia Engineering. International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures*. Gliwice, 05.06.2017 - 07.06.2017. Amsterdam: Elsevier B.V.. 2017, s. 112-119. sv. 193. ISSN 1877-7058.
- Sovják, R. - Vavříník, T. - Máca, P. - Zatloukal, J. - Konvalinka, P., - Song, Y. Experimental Investigation of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Slabs Subjected to Deformable Projectile Impact. In: *Procedia Engineering. Concrete and Concrete Structures 2013. Terchivá - Vrátná dolina*, 23.10.2013 - 25.10.2013. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.. 2013, s. 120-125. ISSN 1877-7058.
- Máca, P. - Sovják, R., - Vavříník, T. Experimental Investigation of Mechanical Properties of UHPFRC. In: *Procedia Engineering. Concrete and Concrete Structures 2013. Terchivá - Vrátná dolina*, 23.10.2013 - 25.10.2013. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.. 2013, s. 14-19. ISSN 1877-7058.