

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ CENTRUM**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2017**

**Jaroslav Hrubý**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hrubý</u>	Jméno: <u>Jaroslav</u>	Osobní číslo: <u>409735</u>
Zadávací katedra: <u>Experimentální centrum</u>		
Studijní program: <u>Stavitelství</u>		
Studijní obor: <u>Realizace pozemních a inženýrských staveb</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Cementové kompozity vyztužené tkaninami a jejich vlastnosti při extrémním zatížení</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Cementitious composites reinforced by fabrics and their properties during extreme loading</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracování rešerše, výroba zkušebních vzorků, testování na extrémní zatížení, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.	
Seznam doporučené literatury: M. Tvarog, Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů, diplomová práce. T. Vavřiník, Experimentální a numerická analýza nárazu projektilu na cementový kompozit, diplomová práce	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>15.2.2017</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28.5.2017</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
<u>15.2.2017</u> Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze pod odborným vedením vedoucího Ing. Jindřicha Fornůska, Ph.D. a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 29. května 2017

.....

Jaroslav Hrubý

## **Poděkování**

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Jindřichovi Fornůskovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce. Rovněž bych rád vyjádřil své poděkování Ing. Evě Bartoňkové za cenné rady při vytvoření této práce a Ing. Janu Zatloukalovi, Ph.D. za pomoc při realizaci experimentální části. Také chci poděkovat rodině za podporu během studia.

**Cementové kompozity vyztužené tkaninami a jejich vlastnosti  
při extrémním zatížení**

Cementitious composites reinforced by fabrics and their properties  
during extreme loading

# Abstrakt

Odolnost posuzovaných vzorků je hodnocena na základě experimentální zkoušky, kde náraz projektilu vyvolává poškození prvků z vysokohodnotného betonu s rozptýlenou výztuží, přesněji množstvím 1,5 % objemové hmotnosti vláken, společně se skelnou tkaninou, nebo tkaninou Kevlar. Byly využity deformovatelné a nedeformovatelné projektily s celokovovým pláštěm střel, ráže 7,62 mm s hmotností 8 g, hlavnové rychlosti kolem 710 m/s a ráže 5,56 mm s hmotností 5 g, hlavnovou rychlostí 950 m/s. Projektily u zkoušek desek se skelnou tkaninou narážely do středu vzorků, v případě Kevlar tkaniny do pravé a levé části. Odolnosti zkoumaných desek ze skelné tkaniny byly stanoveny na dvanácti prvcích a třech vzorcích z tkaniny Kevlar. Vyhodnocení jednotlivých vzorků a stanovení jejich odolnosti proti lokálnímu poškození je obsaženo v závěru této práce.

## **Klíčová slova:**

Vysokohodnotný beton, drátkobeton, lokální poškození, náraz projektilu, skelné vlákno, Kevlar

# Abstract

The resistance of the samples examined is assessed on the basis of an experimental test where the impact of the projectile causes damage to a high-performance concrete elements with dispersed reinforcement, more precisely by 1.5 % of volume of the fibers, together with the glass fabric or the Kevlar fabric. Deformable and undeformable projectiles with a full-metal shell, 7.62 mm calibre, weight of 8 g with barrel speed about 710 m/s and 5.56 mm calibre, weight of 5 g with barrel speed of 950 m/s were used. The projectiles in the glass fiber plate tests strucked the middle of the samples and the right and left of the Kevlar fabric. The resilience of the glass fabrics examined was determined on twelve samples and three Kevlar fabric samples. Evaluation of individual samples and determination of their resistance to local damage is included in the conclusion of this paper.

## **Key words:**

High-grade concrete, wire-concrete, local damage, projectile impact, glass fiber, Kevlar

# Obsah

1	Úvod.....	13
1.1	Motivace.....	14
1.2	Cíl práce .....	14
2	Cementové kompozity vyztužené vlákny .....	15
2.1	Cement .....	16
2.1.1	Historie cementu .....	16
2.1.2	Výroba cementu .....	17
2.1.3	Suroviny používané při výrobě cementu .....	21
2.1.4	Cementářské moduly .....	22
2.1.5	Dělení cementů .....	22
2.2	Kompozity krátkovláknové - ocelová vlákna.....	25
2.2.1	Dělení ocelových vláken.....	25
2.2.2	Vlastnosti ocelových vláken .....	27
2.3	Kompozity dlouhovláknové – textilie.....	29
2.3.1	Skelná tkanina.....	31
2.3.2	Kevlarová tkanina .....	32
3	Experimentální část.....	34
3.1	Složení směsi UHPFRC .....	34
3.2	Tkaniny ze skelných vláken .....	35
3.2.1	Míchání směsi UHPFRC pro skelnou tkaninu.....	36
3.2.2	Vzorek 1: Jedna vrstva tkaniny ze skelných vláken .....	37
3.2.3	Vzorek 2: Dvě vrstvy tkaniny ze skelných vláken.....	38
3.2.4	Vzorek 3: Tři vrstvy tkaniny ze skelných vláken .....	39
3.3	Tkanina kevlar.....	39
3.3.1	Míchání směsi UHPFRC pro tkaninu kevlar .....	40
3.3.2	Vzorek 4: Prošité kapsy z kevlaru a jejich probetonování.....	41
3.4	Experiment: Odolnost proti vzniku lokálních poškození.....	44
3.4.1	Popis zkoušky .....	44

3.4.2	Vyhodnocení zkoušky.....	45
3.4.3	Zatřídění projektilu .....	46
3.4.4	Použité projektily .....	48
3.5	Výsledky posuzovaných vzorků.....	49
3.5.1	Vyhodnocení desek se skelnou tkaninou .....	49
3.5.2	Vyhodnocení desek s tkaninou Kevlar .....	51
4	Závěr .....	54



## Seznam obrázků

Obr. 2.1	Základní dělení vyztužených kompozitů [2] .....	15
Obr. 2.2	Schéma technologie výroby cementu suchým způsobem [7].....	18
Obr. 2.3	Tvarovaná ocelová vlákna[2] .....	26
Obr. 2.4	Vazba mezi vláknem a matricí [10].....	29
Obr. 2.5	Vazby tkanin [3] .....	30
Obr. 2.6	Háčkované tkaniny [3].....	31
Obr. 2.7	Pletené tkaniny [3] .....	31
Obr. 2.8	Schéma výroby skleněných vláken [2] .....	32
Obr. 2.9	Reakce 1,4-fenylen-diaminu s tereftaloyl chloridu [11].....	33
Obr. 3.1	Ocelová vysokopevnostní mikrovlákná použitá ve směsi UHPFRC .....	35
Obr. 3.2	Skelná tkanina použitá pro vyztužení betonových desek .....	36
Obr. 3.3	Talířová míchačka o objemu 40 l .....	37
Obr. 3.4	Schéma uložení skelné tkaniny ve zkoušené desce .....	38
Obr. 3.5	Schéma uložení dvou skelných tkanin ve zkoušené desce .....	38
Obr. 3.6	Schéma uložení tří skelných tkanin ve zkoušené desce.....	39
Obr. 3.7	Tkanina z kevlaru použitá pro vyztužení betonových desek .....	40
Obr. 3.8	Laboratorní míchačka o objemu 20 l.....	41
Obr. 3.9	Vybetonovaná deska směsi UHPFRC s tkaninou Kevlar.....	42
Obr. 3.10	Schéma uložení tkaniny z kevlaru .....	42
Obr. 3.11	Postup probetonování tkaniny z kevlaru: .....	43
Obr. 3.12	Schéma zkoušky na střelnici.....	44
Obr. 3.13	Použité náboje.....	48
Obr. 3.14	Čelní strana s dvěma vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm.....	50
Obr. 3.15	Zadní strana s dvěma vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm.....	50
Obr. 3.16	Čelní strana se třemi vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm.....	50
Obr. 3.17	Zadní strana se třemi vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm.....	50
Obr. 3.18	Čelní strana s tkaninou Kevlar posuzovaná na deformovatelný projektil 7,62x39 mm (vlevo), nedeformovatelný projektil 7,62x39 mm (vpravo).....	52
Obr. 3.19	Zadní strana s tkaninou Kevlar posuzovaná na deformovatelný projektil 7,62x39 mm (vpravo), nedeformovatelný projektil 7,62x39 mm (vlevo).....	52

Obr. 3.20 Čelní strana s tkaninou Kevlar posuzované na deformovatelný projektil 5,56x45 mm (vlevo), nedeformovatelný projektil 5,56x45 mm (vpravo).....	53
Obr. 3.21 Zadní strana s tkaninou Kevlar posuzované na deformovatelný projektil 5,56x45 mm (vpravo), nedeformovatelný projektil 5,56x45 mm (vlevo).....	53

# Seznam tabulek

Tabulka 2.1	Rozměry cementářských pecí v závislosti na způsobu výroby.....	20
Tabulka 2.2	Druhy cementů pro obecné použité a jejich složení dle ČSN EN 197-1 ed.2 [9].....	24
Tabulka 3.1	Složení směsi UHPFRC [19] .....	35
Tabulka 3.2	České zařídění projektilů [13] .....	46
Tabulka 3.3	Evropské zařídění projektilů [14] .....	47
Tabulka 3.4	Parametry použitých projektilů [15] [18] .....	48
Tabulka 3.5	Zařídění použitých projektilů pro skelnou tkaninu.....	49
Tabulka 3.6	Vyhodnocení UHPFRC se skelnou tkaninou dle ČSN 39 5360 .....	50
Tabulka 3.7	Vyhodnocení UHPFRC se skelnou tkaninou dle EN 1522 .....	51
Tabulka 3.8	Zařídění použitých projektilů pro tkaninu Kevlar .....	52
Tabulka 3.9	Vyhodnocení UHPFRC s tkaninou Kevlar dle ČSN 39 5360 .....	52
Tabulka 3.10	Vyhodnocení UHPFRC s tkaninou Kevlar dle EN 1522.....	53



# 1 Úvod

Beton se používal již v římských stěnách kolem roku 200 př. n. l. Je to relativně křehký materiál, který má vysokou pevnost v tlaku, ale podstatně nižší tahovou pevnost, která je přibližně 1/10 pevnosti v tlaku.

Od konce devatenáctého století se do betonu umisťují výztužné tyče, nebo ocelové profily, které v důsledku spolupůsobení betonu s ocelí napomáhají ke zvýšení tahové pevnosti [1]. Výztuž u obyčejného železového betonu je volně kladená. Pro překonání velkých rozponů se od roku 1920 využívá vnesení předpětí do betonu pomocí výztuže [1]. U předpjatého betonu je vneseno předpětí do výztuže při výrobě, nebo dodatečně na stavbě. Pro takto upravené betony se používají ocelové dráty s vysokou pevností a jejich aktivace se uskuteční pomocí předepínacích lisů.

Při dalším vývoji betonu byla snaha o zajištění přenesení tahu do všech směrů betonového prvku. Prutová výztuž působí jen ve směru jejího uložení, ale rozptýlená výztuž může vytvořit kompozitní materiál, který bude mít homogenní vlastnosti a vysokou tahovou pevnost ve všech směrech. První patent, kde byla použita ocelová vlákna v betonu, byl udělen v roce 1847, kdy Joseph Lambot popisoval použití ocelových vláken a drátěných sítí v betonu pro vytvoření železobetonu [1].

Spojení betonu a oceli využívá přednosti obou materiálů, pevnost betonu v tlaku a pevnost oceli v tahu. Oba materiály mají téměř totožný součinitel teplotní roztažnosti a mohou tak efektivně spolupůsobit i při změnách teplot bez vzniku vnitřního napětí. Další výhodou je ochrana oceli před korozí a vysokými teplotami vyvolanými v důsledku požáru. Dosud bylo provedeno mnoho výzkumů a aplikací využití drátků v cementových kompozitech pro optimalizaci vlastností ztvrdlého betonového materiálu.

Předmětem práce je posoudit kombinaci dlouhovláknové a krátkovláknové výztuže s cementovým kompozitem, pro zvýšení ochrany stávajících konstrukcí proti šokové a tlakové vlně výbuchu a nárazu projektilu [2].

## **1.1 Motivace**

V dnešní nejisté době, kdy propukají teroristické útoky, a vzniká napjatá situace mezi světovými velmocemi, je důležité podpořit vývoj ochranných konstrukcí před vlivem extrémního zatížení, jako jsou výbuchy a nárazy fragmentů či projektilů. Pro tento účel se běžně používají betonové a cementové směsi s velkými tloušťkami konstrukcí spojenou s velkou spotřebou materiálu. Užitím kombinace dvou vláknových výztuží s cementovým kompozitem, může mít nárůst ochranných schopností štíhlé konstrukce, vzhledem k výrazně lepším mechanickým vlastnostem posuzovaných materiálů a jejich velké utlumení energie.

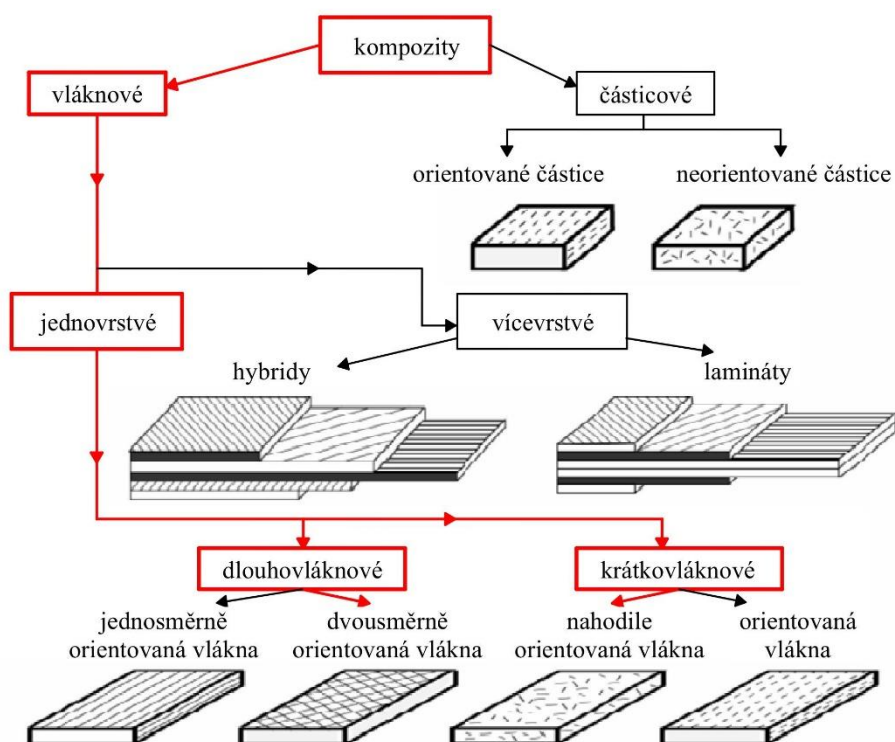
## **1.2 Cíl práce**

Tato práce si klade za cíl posoudit spolupůsobení dlouhovláknové a krátkovláknové výztuže v cementovém kompozitu pro využití v ochranných konstrukcích, které slouží pro zvýšení ochrany stávajících konstrukcí proti nárazu projektilu. Pomocí experimentů bylo sledováno chování těchto materiálů při extrémním dynamickém zatížení v podobě nárazu projektilu. Hodnoceny byly lokální poškození na jednotlivých vzorcích a jejich porovnání. Byl použit cementový kompozit s drátkovou výztuží v kombinaci se skelnou tkaninou v různém počtu vrstev a tkaninou Kevlar, ze které byly vyrobeny betonové desky.

## 2 Cementové kompozity vyztužené vlákny

Beton je kompozitní látka, která se skládá z cementu jako pojiva, hrubého a jemného kameniva jako plniva a vody. Kromě těchto základních složek se mohou do betonu přidávat i přísady a příměsi, které zlepšují vlastnosti tvrdého betonu, nebo jeho zpracovatelnost. Důležitý je zejména návrh betonové směsi, který umožňuje významně vylepšit parametry cementového kompozitu. Vyztužení kompozitu u subtilních konstrukcí je jeden ze způsobů, jak dosáhnout lepších hodnot v tahu a ve smyku.

Základní třídění vyztužených kompozitů je znázorněno na obr. 2.1 [2]. V rámci této práce byly zkoumány kompozity vláknové – jednovrstvé dlouhovláknové (s obousměrně orientovanými vlákny) a krátkovláknové (s nahodile orientovanými vlákny) a jejich spolupůsobení při extrémním zatížení. Kombinace těchto přísad do kompozitu je z důvodu lepšího smykového napětí a zvýšení únosnosti výsledného prvku.



Obr. 2.1 Základní dělení vyztužených kompozitů [2]

Vlastnosti cementového kompozitu ovlivňují především použité materiály pro výrobu vláken. Každý materiál má odlišné vlastnosti, a tudíž i jiné specifické použití. Základní druhy vláken dle potřebného materiálu pro výrobu a jejich způsob aplikace jsou následující [2] [3]:

Druhy vláken dle materiálu:

- *Ocelová:* aplikace ve stavebnictví, konstrukce průmyslových podlah
- *Čedičová:* ochranné oděvy odolné proti chemikáliím a ohni
- *Polymerní:* ochrana proti projektilům a zvýšeným teplotám
- *Skleněná:* zvyšuje pevnost tahu, za ohybu a rázu
- *Uhlíková:* odolné proti chemickému a mechanickému namáhání
- *Azbestová:* vysoká pevnost, vysoká korozní a abrazní odolnost

## 2.1 Cement

Cement je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletou anorganickou látku, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která následně tuhne a tvrdne v důsledku hydratační reakce. Po zatuhnutí na vzduchu dokáže tuhnout a tvrdnout i pod vodou při zachování stability a pevnosti [6].

### 2.1.1 Historie cementu

Za počátek výroby cementu je považován rok 1824, kdy byl udělen Josephu Aspdinovi patent na výrobu maltoviny, kterou známe jako portlandský cement. Svůj název nese podle města Portland v Anglii, kde byl těžen svrchnojurský vápenec, který byl použit jako stavební kámen.

V cementu jsou obsaženy jíly, které ovlivňují jeho hydraulické vlastnosti. Ty byly objeveny v osmnáctém a devatenáctém století (J. Smeaton, J. F. John a L. J. Vicat), když byly určeny poměry směsí, a to 75 – 70 % vápence a 25 – 30 % jílu. Zásadní vývoj si připsal právě Joseph Aspdin, který zavedl vypalování umělé směsi jílu a vápence. Šlo o pojivo podobné románským cementům. Vzniklý produkt nazval „Portlandský cement“. Koncem 19. století byly objeveny skryté hydraulické vlastnosti vysokopecní strusky. Poznotek vedl k zavedení produkce struskoportlandských cementů (obsah strusky do 30 %)



a vysokopecních cementů (obsah strusky více než 70 %). Použitím strusky jako příměsi byl položen základ k vývoji pojiv lépe odolávajících agresivnímu prostředí. Výzkumy o vlivu obsahu trikalciualuminátů na rezistenci vůči síranovému iontu směřovaly k výrobě tzv. síranovzdorných cementů [4].

## **2.1.2 Výroba cementu**

Technologie výroby cementu je zaměřena na výrobu slínku. Jde především o přípravu surovinové směsi, vhodného chemického složení s odpovídajícími moduly a stupněm nasycení vápnem. Surovinová směs musí být jemně umletá a homogenizovaná. Teplota, doba a prostředí následného výpalu jsou pak pro průběh reakcí rozhodující. Při správném dodržení chemického složení lze nevhodným vypalováním dospět k nekvalitnímu slínku [7].

Pro výrobu cementu se rozlišují dva základní způsoby výroby – mokrý a suchý. Jejich rozdílné postupy, výhody a nevýhody pro jednotlivé metody jsou uvedeny níže.

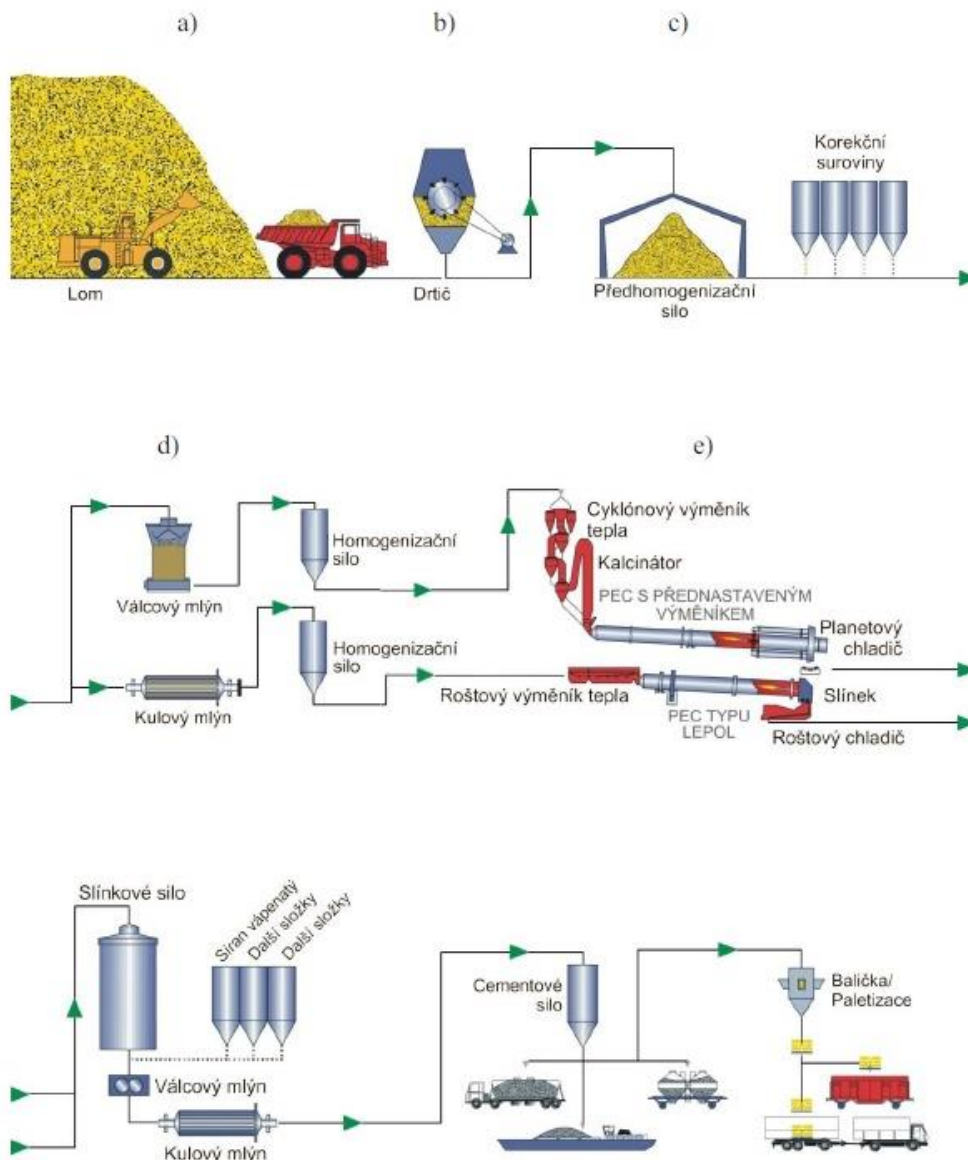
### ***2.1.2.1 Mokrý způsob výroby cementu***

Těžený vápenec se drtí za sucha, a poté se mele s přidáním vody v bubnových mlýnech. Obsah vody v surovinové suspenzi se pohybuje mezi 30 až 40 %. Suspenze se ukládá v kalových zásobnících, kde se promíchává, a tím je homogenizována. Poté se kal čerpá do menších zásobníků, odkud pokračuje do pecí. Kalová směs se nejprve vysušuje a následně se vypaluje do slinutí. Výhody mokré metody jsou lepší homogenizace suspenze a využití méně kvalitních i vlhkých surovin. Naopak nevýhodou je velká spotřeba vody a následně tepla pro vysušení suspenze před vypálením [7] [8].

### ***2.1.2.2 Suchý způsob výroby cementu***

Suroviny pro výrobu cementu se před vypálením vysušují. K vysušení dochází před mletím, nebo současně s mletím (v sušících mlýnech). Při mletí se ke slínku přidávají přísady (vysokopecní struska, popílek, apod.). Následovně se surovina dopravuje do

zásobníků (sil), kde se směs homogenizuje a upravuje se její složení. Prášková směs je pak předehřívána spalinami a dopravena do pece, kde probíhá slinutí. Výhodou suchého způsobu je výkonost výroby díky předehřátí práškové směsi před vypálením spalinami. Dále je přínosná podstatně nižší spotřeba tepla při sušení a pálení směsi. Oproti mokrému procesu je spotřeba tepla pouze 50 %. Nevýhodou představuje vyšší kvalita vstupních surovin, např. nízká vlhkost a méně kolísavé vlastnosti [7] [8].



Obr. 2.2 Schéma technologie výroby cementu suchým způsobem [7]

V devadesátých letech dvacátého století byly na území České republiky tři cementárny, které využívaly mokrou metodu výroby. V současné době se již využívá pouze suchý způsob výroby cementu, který není náročný na spotřebu vody a má nižší spotřebu tepla, tudíž je citlivější k životnímu prostředí. Proto si můžeme následně podrobněji popsat postup výroby suchou metodou (Obr. 2.2).

Podrobný postup výroby cementu suchým způsobem:

a) Těžba surovin

Suroviny pro výrobu cementu se těží povrchově v lomech. Tvrdá hornina je oddělována odstřely, následně je odebírána a dopravována na drtírnu. Při těžbě surovin jsou pravidelně prováděny průzkumy chemického složení se snahou docílit optimální směsi pro výrobu. Těžba probíhá ve většině případů v blízkosti cementárny, aby byly sníženy přepravní vzdálenosti a sníženy náklady na přepravu [7].

b) Drcení surovin

Podoba a počet stupňů drcení, je závislý na charakteru a vlastnostech suroviny s přihlédnutím na její následný postup využití. Aplikuje se jednostupňové drcení, které se uplatní u měkkých surovin (kladivové drtiče) a dvouступňové, jež se používá pro tvrdší suroviny, např. 1. stupeň – čelist'ové nebo kuželové drtiče, 2. stupeň – čelist'ové, kuželové, kladivové nebo odrazové drtiče [7].

c) Předhomogenizace směsi

Pro zaručení vysoké kvality cementového slínku a samotného cementu je zapotřebí vysoký stupeň homogenizace vstupních surovin směsi. Předhomogenizační skládka zajišťuje dostatečnou homogenitu i zásobu surovin. Požadovaná homogenita na předhomogenizační skládce, je zajišťována systémem zakládání a odebírání. Tento proces bývá řízen laboratorii, proto jsou na skládce vzorkovací stanice a celý provoz skládky je plně automatizován [7].

d) Mletí směsi

Během mletí je podrcená homogenizovaná surovina mleta na moučku vhodnou pro výpal v peci. Jemnost mletí má rozhodující význam na průběh procesu slinování a rychlost tvorby slínku při výpalu. V dnešní době se pro mletí používá jednostupňová mlýnice s mechanickým oběhem a současným sušením mleté homogenizované směsi. Nejčastěji se v cementárnách využívají pro zjemnění směsí, ale i cementu, mlýny s volnými tělesy, např. kulové mlýny. Kulové mlýny jsou duté válce obsahující volné, nejčastěji železné koule. Rotací válce dochází k pohybu koulí a ty drtí směs. Namletá surovina se ukládá v homogenizačních silech [7] [8].

e) Výpal slínku

Slínek se vypaluje v cementářských pecích. Používají se pece rotační, šachtové a roštové výměníky tepla. Rotační pec je nejpoužívanější, především díky jejímu vysokému výkonu a kvalitě vypalovaného slínku. Rotační pece se skládají z ocelového válce s vyloženými žárovzdornými tvarovkami. Rozměry pecí jsou závislé na způsobu výroby. Mokrý a suchý způsob se liší především délkou vypalovacích pecí (Tabulka 2.1). Výkon cementových pecí se pohybují v rozmezí 500 – 4000 tun slínku na den [7] [8].

Tabulka 2.1 Rozměry cementářských pecí v závislosti na způsobu výroby

Způsob výroby	Délka pecí	Maximální délka pecí	Průměr pecí	Sklon pece
Mokrý	100 – 180 m	230 m	3 – 7 m	3 – 7 °
Suchý	60 – 100 m	130 m	3 – 7 m	3 – 7 °

Slínek se posouvá celou délkou rotační pece, na jejím konci je umístěn plamenový hořák, který slínek postupně ohřívá z teploty 20°C na 1450°C. Právě při teplotě 1400 - 1450°C dochází ke slinutí mleté směsi, která je následně chlazena na roštovém chladiči na teplotu 1100°C [7] [8].

f) Mletí slínku

Po vychlazení slínku a jeho uskladnění v krytých halách, nebo velkých zásobnících dojde k jeho odležení, kde volné CaO se vzdušnou vlhkostí vyhasí a zkarbonatuje. Následně se slínek drtí a mele za přidání sádrovce nebo dalších hydraulických příměsí [7].

Jemnost namletého slínku zásadně ovlivňuje použití cementu. Jemněji mleté cementy mají větší měrný povrch, rychleji hydratují a mají větší počáteční a konečné pevnosti. Dále jsou při zpracování plastičtější a vyvíjejí vyšší hydratační teplo. Minimální jemnost mletí portlandského cementu je  $225 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  [7].

Mletí slínku se může provádět jednostupňově za použití troubových mlýnů s otevřeným nebo uzavřeným okruhem, nebo dvoustupňově, které se skládají ze dvou mlýnů pro hrubé a jemné mletí [7].

### **2.1.3 Suroviny používané při výrobě cementu**

Suroviny používané pro výrobu cementu můžeme rozdělovat z hlediska jejich významu na:

a) *Základní suroviny*

Látky tvoří většinu surovinové směsi. Patří mezi ně slinitý vápenec a kaolinitické jíly. Optimální obsah  $\text{CaCO}_3$  ve vápenci je stanoven v rozmezí 76 – 78 hm. %, zbylé množství je doplněno jíly [7] [8].

b) *Vedlejší suroviny*

Jsou to látky, které upravují obsah některého hydraulického oxidu, používají se např. ocelářské kaly, bauxit nebo křemičitý písek. Je snaha o použití levných odpadních látek, namísto drahých přírodních surovin. Tento jev se projevuje i na výsledných cenách cementu [7].

c) *Pomocné suroviny*

Jedná se o suroviny, které při malém procentuálním obsahu pomáhají upravovat vlastnosti surovinových směsí. Používají se [7]:

- Intenzifikátory pro výpal slínku – zkracují dobu mletí, snižují viskozitu kapalně fáze
- Mineralizátory – ovlivňují tvorbu slínkových materiálů
- Ztekucovadla – ztekucení surovinového kalu, při mokřím způsobu výroby
- Regulátory tuhnutí - slouží k regulaci průběhu tuhnutí

#### 2.1.4 Cementářské moduly

Hlavní komponenty cementu musejí být zastoupeny v surovinové směsi v určitých poměrech. Jedná se o oxid vápenatý (CaO), oxid křemičitý (SiO<sub>2</sub>), oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a oxid železitý (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [7] [8].

- Hydraulický modul – Poměr mezi CaO a sumou SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hodnota se pohybuje v rozmezí 1,7 – 2,3 [7] [8].

$$M_H = \frac{[CaO]}{[SiO_2] + [Al_2O_3] + [Fe_2O_3]} \quad (2.1)$$

- Silikátový modul – Poměr mezi SiO<sub>2</sub> a sumou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hodnota se pohybuje v rozmezí 1,7 – 2,7 [7] [8].

$$M_S = \frac{[SiO_2]}{[Al_2O_3] + [Fe_2O_3]} \quad (2.2)$$

- Aluminátový (hlinitanový) modul – Poměr mezi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hodnota se pohybuje v rozmezí 1,5 – 2,5 [7] [8].

$$M_A = \frac{[Al_2O_3]}{[Fe_2O_3]} \quad (2.3)$$

#### 2.1.5 Dělení cementů

Jednotlivé druhy cementů se od sebe liší použitými surovinami a složením slínku. Odlišnosti v mineralogickém a chemickém složení mají za následek rozdílnosti ve vlastnostech jednotlivých druhů cementu.

Z hlediska použitelnosti dělíme cementy na:

- *Cementy pro obvyčejné použití*
- *Cementy speciální*

#### ***2.1.5.1 Cementy pro obvyčejné použití:***

Tyto cementy definuje technická norma ČSN EN 197-1 ed.2, která je platná od 1.5.2012. Tato norma uvádí celkem 27 jmenovitých cementů (tab. 2.2) pro obecné použití, které jsou rozděleny do pěti skupin [9]:

- CEM I          Portlandský cement
- CEM II        Portlandský cement směsný
- CEM III        Vysokopecní cement
- CEM IV        Pucolánový cement
- CEM V        Směsný cement

Za druhovým označením cementu, vyznačeným římským číslem I –V se uvádí hodnota normalizované pevnostní třídy. V současnosti se u nás vyrábějí cementy se třemi pevnostními třídami – 32,5, 42,5 a 52,5. Číslo označuje dosaženou pevnost betonu po osmadvaceti dnech, jakožto měřítko při třídění cementů pro všechna použití. Cementy s rychlým nástupem počáteční pevnosti se navíc označují písmenem R (rychlouzný cement). Cementy s normálním nástupem pevnosti se označují písmenem N [7] [9].

Tabulka 2.2 Druhy cementů pro obecné použití a jejich složení dle ČSN EN 197-1 ed.2 [9]

Druh cem.	Název cementu	Označení cem.	Slínek (K)	Vysokopecní struska (S)	Křemičitý úlet (D) <sup>3)</sup>	Pucolán přírodní (P)	Pucolán průmyslový (Q) <sup>4)</sup>	Popílek křemičitý (V)	Popílek vápenatý (W)	Kalcinovaná břidlice (T)	Vápenec (L)	Doplňující složky <sup>2)</sup>	
I	Portlandský cement	I	95 – 100	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
II	Portlandský struskový cement	II/A-S	80 – 94	6 – 20	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
		II/B-S	65 – 79	21 – 35	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
	Portlandský cement s křemičitým úletem	II/A-D	90 – 94	~	6 – 10	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
	Portlandský pucolánový cement	II/A-P	80 – 94	~	~	6 – 20	~	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-P	65 – 79	~	~	21 – 35	~	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/A-Q	80 – 94	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-Q	65 – 79	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	~	0 – 5
	Portlandský popílkový cement	II/A-V	80 – 94	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-V	65 – 79	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	0 – 5
		II/A-W	80 – 94	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	0 – 5
		II/B-W	65 – 79	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	0 – 5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	II/A-T	80 – 94	~	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	0 – 5
		II/B-T	65 – 79	~	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	0 – 5
	Portlandský cement s vápencem	II/A-L	80 – 94	~	~	~	~	~	~	~	6 – 20	~	0 – 5
II/B-L		65 – 79	~	~	~	~	~	~	~	21 – 35	~	0 – 5	
Portlandský směsný cement	II/A-M	80 – 94	6 – 20 <sup>5)</sup>									0 – 5	
	II/B-M	65 – 79	21 – 35 <sup>5)</sup>									0 – 5	
	III/A	35 – 64	36 – 65	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
III	Vysokopecní cement	III/B	20 – 34	66 – 80	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
		III/C	5 – 19	81 – 95	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
IV	Pucolánový cement	IV/A	65 – 89	~	11 – 35				~	~	~	0 – 5	
		IV/B	45 – 64	~	36 – 55				~	~	~	0 – 5	
V	Směsný cement	V/A	40 – 64	18 – 30	~	18 – 30			~	~	~	0 – 5	
		V/B	20 – 39	30 – 50	~	30 – 50			~	~	~	0 – 5	

<sup>1)</sup> Hodnoty v tabulkách se vztahují na hlavní a doplňující složky cementu bez síranu vápenatého a přísad  
<sup>2)</sup> Jako doplňující složky mohou být použita plniva nebo jedna či více látek, používaných jako hlavní složky, pokud v cementu nejsou jako hlavní složky použity  
<sup>3)</sup> Obsah křemičitého úletu je limitován do 10 %  
<sup>4)</sup> Obsah jiných strusek než vysokopecní strusky je limitován do 15 %  
<sup>5)</sup> Obsah plniva je limitován do 5 %

### 2.1.5.2 Speciální cementy

Tyto cementy mají speciální vlastnosti a odlišné mechanismy tvrdnutí. Patří mezi ně [7]:

- Silniční cement – pevnost v tahu za ohybu minimálně 6,5 MPa
- Síranovzdorný cement – používá se pro prostředí s vysokou koncentrací síranových iontů
- Hlinitanový cement – používá se pro výrobu žárobetonů, ztrácí svou pevnost
- Rozpínavý cement – rozpojování hornin
- Bílý cement – vyrábí se z bílých vysokoprocentních vápenců



## 2.2 Kompozity krátkovláknové - ocelová vlákna

Vlastnosti kompozitu jsou dány nejen atributy jednotlivých komponentů, nýbrž i vzájemným poměrem příslušného dávkování. Vlákna mohou ovlivnit atributy v oblasti technologie (jako jsou návrh, výroba, zpracování a zkoušení), ale také v oblasti jejich použití. Ocelová vlákna zlepšují odolnost kompozitu proti vzniku trhlin v počátečním stádiu smršťování, ale i při zatížení konstrukce, kromě toho zlepšují dolnost betonu proti mechanickému namáhání (jako je obrus, nebo mechanické opotřebení aj.), namáhání vlivem teplot (např. požáru) a zvyšují odolnost v tahu i po vzniku trhlin [5].

### 2.2.1 Dělení ocelových vláken

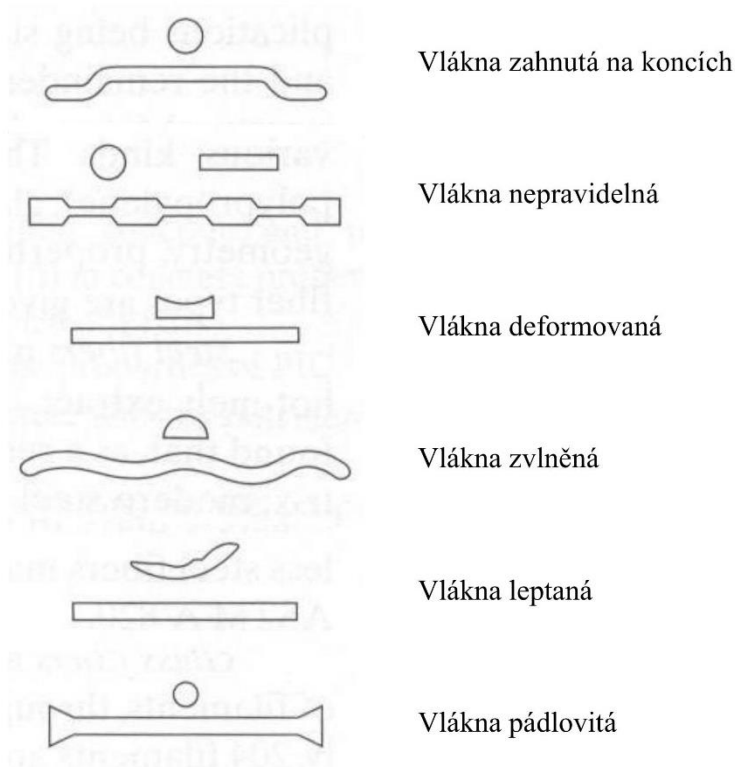
Ocelová vlákna se vyrábí různými postupy, od tvarování a řezání z ocelových produktů, po tváření z taveniny. Odlišné postupy výroby mají za následek rozdílné vlastnosti při zatěžování, odolnosti i působení vyšších teplot. Ocelová vlákna se dělí dle použitého základního materiálu pro výrobu do následujících skupin [5]:

- *Za studena tažený drát*
- *Vlákna stříhaná z plechu*
- *Vlákna oddělovaná z taveniny*
- *Vlákna protahovaná z drátu taženého za studena*
- *Vlákna frézovaná z ocelových bloků*

Vlivů ocelových vláken na cementový kompozit je hned několik. Mezi nežádoucí efekty patří nakypření směsi, které je potřeba nejen správně stanovit, ale také eliminovat zejména při větších velikostech zrn. Důležité parametry ovlivňující nakypření jsou tvar ocelového vlákna, přesněji poměr mezi délkou a tloušťkou  $L/d$ , a hmotnostní dávkou vláken na objemovou jednotku ( $m_v/V$ ). Pro vlákna totožného tvaru platí, čím větší je poměr  $L/d$ , tím je horší zpracovatelnost betonové směsi. V případě stejné velikosti poměru  $L/d$ , rozhoduje o zpracovatelnosti betonové směsi délka ocelových vláken. Kratší vlákna jsou lépe zpracovatelná [5].

Velikost ocelových vláken je propojena i s jejich povrchovou úpravou, resp. jejich vzhledem. Dle tvaru rozdělujeme ocelová vlákna na přímá a tvarovaná (Obr. 2.3) [2]. Tvarovaná vlákna slouží k lepšímu kotvení a vyšší soudržnosti v cementovém kompozitu.

Zdrsňený tvar slouží ke zvýšenému tření, tudíž ke zvýšené síle k jeho vytržení. Tvar jednotlivých druhů ocelových vláken je limitován zpracovatelností v betonovém kompozitu. I přímá vlákna při nedostatečné homogenizaci směsi mají tendenci se shlukovat do tzv. drátových ježků<sup>1</sup> a jejich přínos je nulový. S tím je spojený i způsob přidávání ocelových vláken do směsi. V případě nešetrného přidání, kdy je do míchacího zařízení nasypáno jednorázově velké množství vláken, dochází ke vzniku již zmiňovaných drátových ježků. Ocelová vlákna by se měla v ideálním případě dávkovat tak, aby na povrch betonové směsi dopadaly ve formě deště jednotlivých vláken [5]. Nejběžnější povrchové úpravy pro ocelová vlákna jsou [2]:



Obr. 2.3 Tvarovaná ocelová vlákna[2]

Při návrhu složení vláknobetonu s ocelovými vlákny je nutné vzít v úvahu jejich působení na zrna kameniva. Díky vláknům se kamenivo vzájemně oddaluje a brání kamenivu v jejich vzájemnému skloubení při zpracování čerstvého betonu do konstrukce [5].

<sup>1</sup> Drátový ježek: shluk drátkové výztuže

## 2.2.2 Vlastnosti ocelových vláken

Mezi důležité vlastnosti ocelových vláken patří pevnost vlákna v tahu. Ta se silou mezi povrchem vlákna (drátky) a matricí (betonové směsi) stanovuje tahovou pevnost kompozitu. Pevnost vlákna je určena druhem materiálu a povrchovou úpravou, např. legování oceli. Úpravy mohou vést ke změně chování původního materiálu, ale jsou finančně nákladnější, a proto se používají zejména pro výrobu vysokohodnotných betonů.

Běžně používaná ocelová vlákna mají pevností v tahu 400 až 1 450 N/mm<sup>2</sup>. Vysokopevnostní vlákna, která jsou použita v experimentální části této práce překračují hodnotu pevnosti 2 000 N/mm<sup>2</sup> a významně zvyšují pevnost v tahu a zabraňují vzniku mikrotrhlin. Používají se pro UHPFRC<sup>2</sup>.

Při použití ocelových vláken v betonové směsi je třeba znát kromě pevnosti i další parametry. Ty dokáží specifikovat množství, rozměry a přesné aplikace vláken. Mezi základní parametry patří tyto [2]:

- *Průřezový poměr*

Je stanoven jako délka vlákna k ekvivalentnímu průměru vlákna ( $L/d$ ). Tento poměr stanovuje, jakou má vlákno geometrii a zda bude docházet k tvoření tzv. ocelových neprobetonovaných ježků. Modul v rozmezí 50 – 150 zaručuje dobrou zpracovatelnost směsi. Proto je většina vyráběných ocelových vláken přizpůsobena tomuto rozměrovému poměru [10].

- *Kritická délka  $l_c$*

Určuje teoretickou délku vlákna, pro kterou je zapotřebí síla na přetržení vlákna menší, než síla nutná k jeho vytržení z matrice (vlákno se přetrhne dříve, než stačí být vytaženo). Pokud je teoretická délka menší než skutečná délka vlákna, je nutné použít vlákno většího poměru, nebo vyšší pevnosti. Pokud je naopak délka větší než skutečná délka vlákna,

---

<sup>2</sup> UHPFRC – ultravysokopevnostní beton vyztužený vlákny, z anglického: Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete.

je vlákno nevyužité a je vhodnější použít vlákno menšího průměru, nebo nižší pevnosti [10].

- *Faktor orientace*

Stanovuje, jakou účinnost mají tahově namáhaná náhodně orientovaná vlákna působící v jakémkoliv směru. Faktor je ovlivněn zejména homogenitou a preferovanou orientací vláken. Faktor orientace se pohybuje v rozmezí 0,2 – 1, hodnota 1 je pro zcela vyrovnaná vlákna kolmo na trhlinu [2] [10].

- *Rozdělovací faktor*

Pokud jsou vlákna v kompozitu dostatečně blízko u sebe, je mez tahu kompozitu výrazně vyšší než samotné matrice. Vlákna působí efektivněji a působící napětí se mezi nimi rovnoměrně rozdělí [2] [10].

- *První lomová síla*

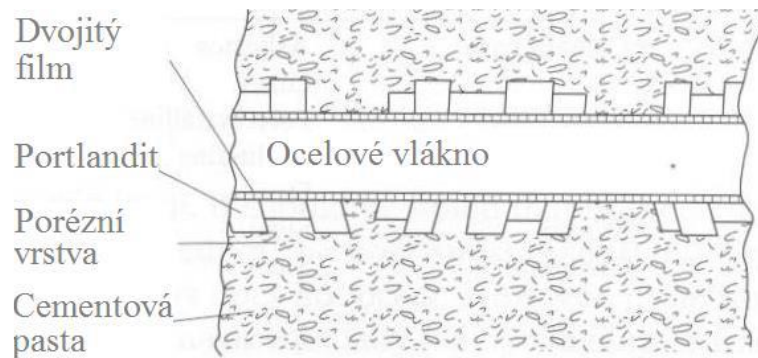
Síla odpovídající zatížení v tahu nebo ohybu, při kterém zatěžovací zařízení zaznamená první nelinearitu. Tato hodnota je závislá zejména na pevnosti matrice v tahu a může být zvýšena použitím materiálů s vysokou tahovou pevností, např. ocelových vláken. Vlákna přenesou zatížení ve vznikajících trhlinách, kde by vznikem trhlin v matrici nebyla schopná toto zatížení přenést [10].

Mechanické vlastnosti prvku závisí nejen na vlastnostech jednotlivých složek kompozitu, ale i na jejich vzájemném spojení [2]. Vazba mezi matricí a vláknem umožňuje přenášení zatížení větší než samotná pevnost matrice. Tyto vazby závisí na použitém materiálu, jeho povrchové úpravě a tvaru. Formy vazeb dle použitého materiálu, jsou následující [2]:

- *Ocelová vlákna*: adheze, tření, vzájemné mechanické spojení
- *Skelná vlákna*: chemické reakce
- *Organická vlákna*: vzájemné mechanické spojení

Důležité jsou i vlivy, které vazbu oslabují, a tudíž je vhodné s nimi při návrhu počítat. Na komplikovaném rozhraní matrice – vlákna (Obr. 2.4) působí například tyto jevy [2]:

- *Probíhající chemické reakce*
- *Změny chování v čase*
- *Objemové změny*
- *Přirozená tvorba vodou zaplněného prostoru kolem vláken v čerstvé záměsi*
- *U povrchu vláken je matrice poréznější než ve zbytku objemu*
- *Cementová zrna obtížně pronikají do prostoru mezi jednotlivými vlákny*



Obr. 2.4 Vazba mezi vláknem a matricí [10]

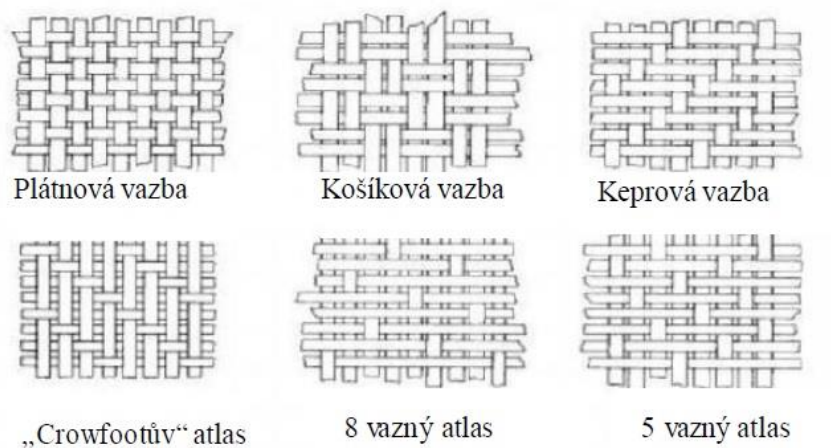
### 2.3 Kompozity dlouhvláknové – textilie

Vláknový kompozit (fibre-reinforced plastic zkr. FRP) je uměle vytvořený materiál obsahující vláknovou výztuž a plastické pojivo zvané matrice. Matrice je spojitá složka, díky které je stabilizována poloha vláken, adhezí mezi matricí a vláknem přenáší zatížení kompozitu [3].

V tenkých vláknech dochází k minimalizaci vrozených vad materiálu a také nebezpečí vzniku povrchových vad při malých příčných rozměrech je podstatně menší. Z toho vyplývá, že vlákna mají vždy vyšší pevnost, než je pevnost kompaktního materiálu [4]. Vlákna působí jen ve směru uložení, proto je snaha použít vlákna ve více směrech do textilií.

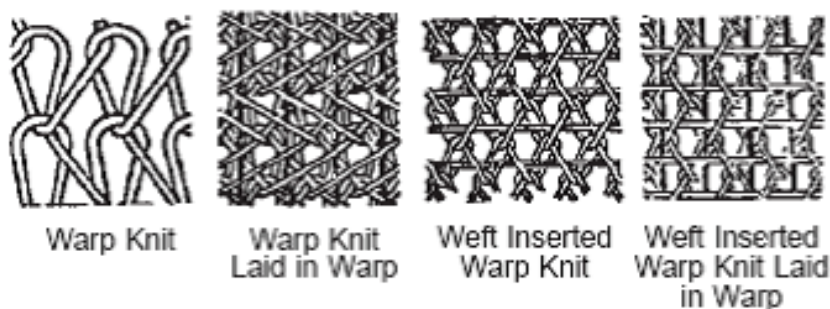
Jednotlivé nitě se tkají do textilií, které mají rozdílnou textilní vazbu. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří základní typy vazeb, které jsou vykresleny níže (Obr. 2.5) [3]:

- *Plátová vazba* (anglicky „plain“) – prameny v osnově i útku jsou stejně silné a stejně vzdálené. Pramen útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy. Tato vazba je nejpevnější vazba, která je použita v experimentální části této práce jak pro skelnou tkaninu, tak pro tkaninu Kevlar.
- *Košíková vazba* (anglicky „basket“) – volnější plátovou vazbou je vazba košíková, u které vytvářejí vazbu dva a více pramenů útku procházející pod dvěma nebo více nitěmi osnovy.
- *Keprová vazba* (anglicky „twill“) – je specifická tím, že útek překříží minimálně dva prameny osnovy a poté projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V následující řadě se útek posouvá doprava, nebo doleva, vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Tato vazba je pružnější než vazba plátová.
- *Atlasová vazba* (anglicky „satin“) – jeden pramen osnovy je překrytý čtyřmi a více prameny útku, v závislosti na počtu vazného atlasu, svrchní částí a jedním pramenem ze spodní strany. Povrch tkaniny je hladký a lesklý. Vazba umožňuje dosažení velkých objemových podílů vláken, tudíž je možné docílit větších pevností a tuhostí v kompozitu.

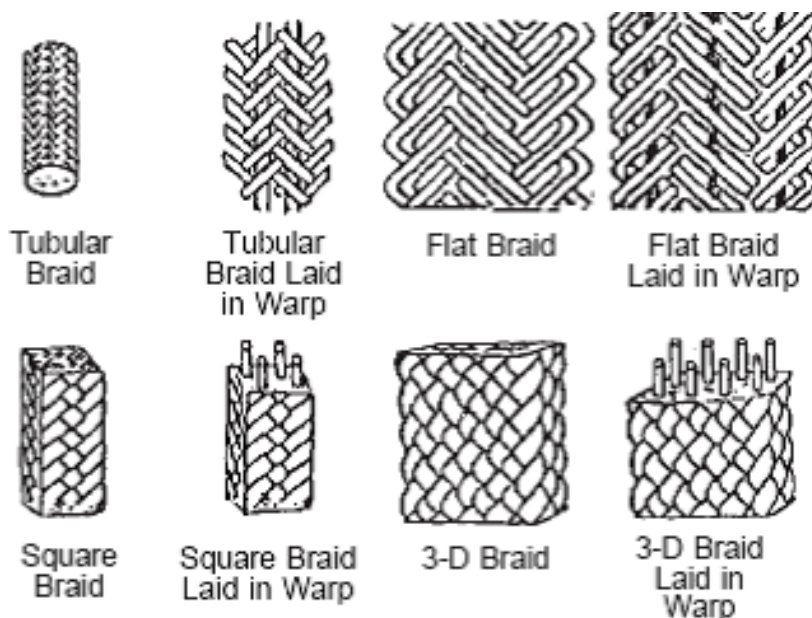


Obr. 2.5 Vazby tkanin [3]

Mimo textilních tkanin se využívají prostorové pletené tkaniny. Používá se háčkování (Obr. 2.6) a pletení (Obr. 2.7) z pramenů.



Obr. 2.6 Háčkové tkaniny [3]

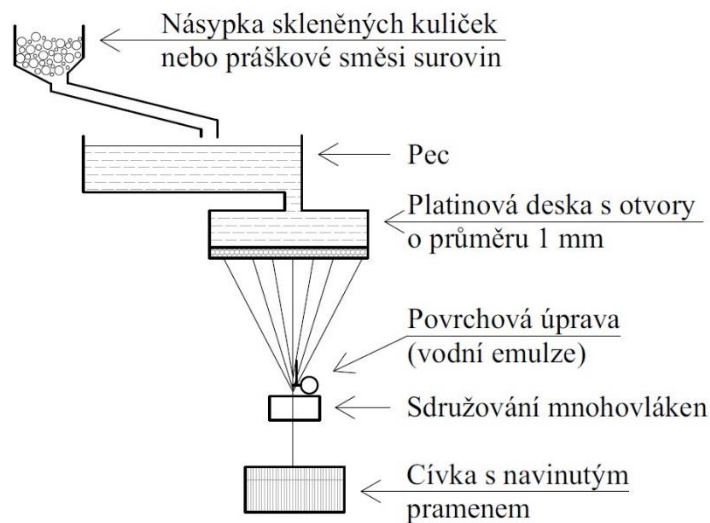


Obr. 2.7 Pletené tkaniny [3]

### 2.3.1 Skelná tkanina

Skleněná vlákna se vyrábí od konce devatenáctého století. Má silikátový základ z oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Vyrábí se tažením taveniny směsi oxidů křemíku a malým podílem alkalických kovů sodíku (Na) a draslíku (K). Průměr vláken je zajištěn tažením tekoucího skla skrz platino-rhodiové trysky o vnitřním průměru 1,5 – 4 mm. Konečný průměr je závislý na rychlosti výtoku tekoucího skla a rychlosti odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna jsou ošetřena povrchovou úpravou a následně se sdružují do pramenů a navíjejí se na cívku.

Sdružením pramenů vzniká pramenec (roving) [3]. Výroba vláken je naznačena na následujícím schématu (Obr. 2.8).



Obr. 2.8 Schéma výroby skleněných vláken [2]

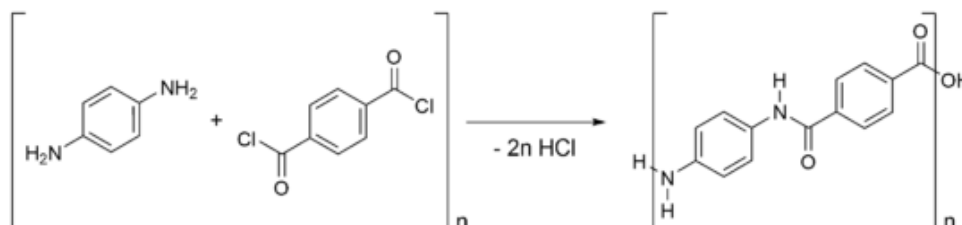
Pevnost čerstvě vyrobeného skla je vždy větší než pevnost vlákna s rovnoměrným obsahem vody danou vlhkostí okolní atmosféry. Vysoký podíl absorbované vody je překážkou vytvoření vazby mezi vláknem a matricí. Proto je nutné výrobky ze skleněných vláken chránit před vzdušnou vlhkostí. Navlhlá vlákna se musí před použitím vysoušet v horkovzdušné sušárně [3].

### 2.3.2 Kevlarová tkanina

Kevlar je ochranná známka para-aramidového vlákna, nejznámějšího aromatického polyamidu, vyvinuta společností DuPont (Stephanie Kwolekovi, 1965) [11]. Vyznačuje se relativně nízkou hustotou ( $1440 \text{ kg/m}^3$ ), velkou odolností proti abrazi a schopnosti se plasticky deformovat při působení extrémní síly kolmo k vláknům. Tkanina Kevlar má větší odolnost proti smykovému i tlakovému namáhání než skelná tkanina (modul pevnosti 3,6 – 4,1 GPa).



Kevlar v kondenzační reakci se syntetizuje z 1,4-fenylen-diamin monomeru a tereftaloyl chloridu. Vznikne kyselina chlorovodíková coby vedlejší produkt (Obr. 2.9). Tím vznikne aramid obsahující benzenová jádra a amidové skupiny, které jsou navázány náhodně. Dalšími úpravami se dosáhne materiálu s vlastnostmi tekutého krystalu, jehož polymerové řetězce jsou orientovány ve směru vlákna [11].



Obr. 2.9 Reakce 1,4-fenylen-diaminu s tereftaloyl chloridu [11]

Výroba vláken je nákladná, především díky používání koncentrované kyseliny sírové, která slouží pro udržení nerozpustných polymerů ve vodě při průběhu syntézy a spřádání [11].

Od objevení Kevlaru byly jeho technické vlastnosti zejména pro balistickou aplikaci vylepšovány, níže jsou sepsány Kevlar tkaniny s jejich využitím [12].

- Kevlar K-29 – použití v průmyslovém odvětví, kabely, náhrady azbestu, brzdové obložení, lana, ochranné oděvy, ochranné pracovní pomůcky aj.
- Kevlar K49 – použití v průmyslovém odvětví, kabely a lana, textilní zpracování, využití v letectví
- Kevlar K100 – barevné verze kevlaru, použité pro kabely, vázací pásy, rukavice a jiné ochranné pomůcky
- Kevlar K119 – flexibilní, vyšší pevnost v tahu, odolný proti únavě, používá se v automobilových pásech, pneumatikách a hadicích
- Kevlar K129 – vyšší pevnost v tahu, použití pro balistické aplikace, vysokotlaké hadice, využití v ropném a plynárenském průmyslu
- Kevlar AP – má o 15% vyšší pevnost v tahu než K29, použití pro průmyslové výrobky
- Kevlar KM2 – použití pro textilie, ochranné pomůcky pro vojenské využití
- Kevlar KM2 Plus – vysoká pevnost, vysoká tuhost s použitím jemnějšího vlákna, uplatnění ve spotřebitelských a průmyslových výrobcích

## 3 Experimentální část

Cílem práce je ověřit teoretické předpoklady využití cementových kompozitů v bezpečnostním inženýrství. Pomocí experimentů bylo sledováno chování těchto materiálů při extrémním dynamickém zatížení v podobě nárazu projektilu. Hodnocena byla lokální poškození na jednotlivých vzorcích a jejich porovnání. Byl použit vybraný cementový kompozit s drátkovou výztuží v kombinaci se skelnou tkaninou v různém počtu vrstev a tkaninou kevlar, ze které se vyrobily probetonované svislé trámečky.

Nejprve budou popsány testované materiály, jejich výroba, složení vzorků a použitý způsob vyšetření mechanických vlastností. Následně pak bude popsán daný experiment s vyhodnocením.

### 3.1 Složení směsi UHPFRC

Pro směs UHPFRC (tab. 3.1) byl použit: Portlandský cement CEM I 42,5R, křemičitý úlet (mikrosilika), jemný křemičitý písek s frakcí 0,1 – 0,6 mm a 0,3 – 0,8 mm, mletá křemičitá moučka, superplastifikátory a voda. Vodní součinitel byl stanoven na hodnotu 0,30. Při takto nízkém vodním součiniteli nemusí dojít ke 100% zhydratování pojiva. Nezhydratované pojivo pak plní funkci plniva. Jako rozptýlená výztuž byla použita ocelová vysokopevnostní mikrovlákná (Obr. 3.1) délky  $L_f = 13$  mm a průměru  $d = 0,13$  mm. Vlákná byla přímého tvaru o tahové pevnosti 2400 MPa. Množství vláken ve směsi UHPFRC bylo 1,5 % objemové hmotnosti.



Obr. 3.1 Ocelová vysokopevnostní mikrovlákná použítá ve směsi UHPFRC

Tabulka 3.1 Složení směsi UHPFRC [19]  
s dávkou vláken 120 kg/m<sup>3</sup> (1,5% objemové hmotnosti)

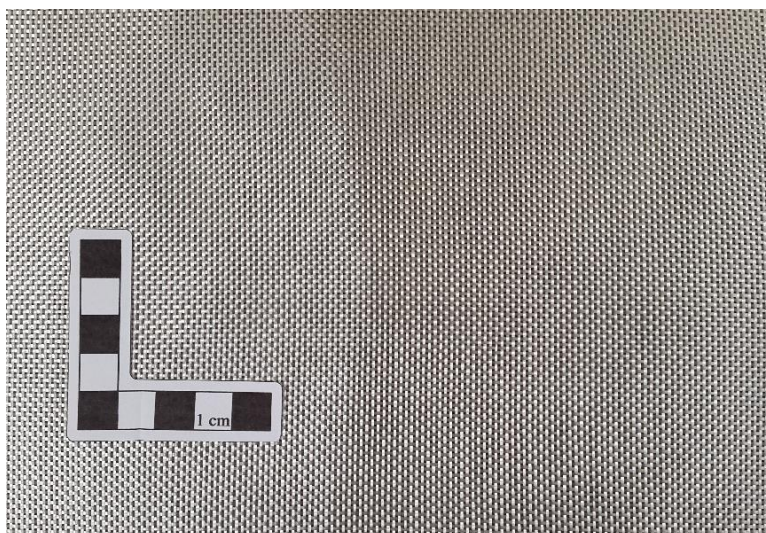
Složka	UHPFRC
Cement CEM I 42,5R	1
Voda	0,3
Mikrovlákná*	0,15
Mikrosilika	0,1
Křemičitá moučka	0,25
Křemičitý písek 0,1 – 1,2	1,6
Plastifikační přísady	0,01
Odpěňovací přísady	0,001

\*Množství mikrovlákná je uvedeno v poměru vůči objemu směsi

## 3.2 Tkaniny ze skelných vláken

Skleněná textilní vlákna se vyrábí od konce devatenáctého století. Díky odolnosti proti ohni, mnoha chemikáliím a nízkému oděru mají velké uplatnění jako ochranné oděvy, především pro provozy s vysokou teplotou. Pevnost v tahu je 2,0 – 4,5 GPa a modul pružnosti je 85 GPa.

Za získání posuzovaných tkanin vděčím Františku Vančurovi ze společnosti Veba se sídlem v Broumově, který se podílel na výrobě použitých tkanin pro tento experiment.



*Obr. 3.2 Skelná tkanina použita pro vyztužení betonových desek*

### **3.2.1 Míchání směsi UHPFRC pro skelnou tkaninu**

Míchání směsi probíhalo v talířové míchačce o objemu 40 l, která umožňovala důkladnou homogenizaci. Do míchačky byla nasypaná suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu dle patentového dokumentu CZ 30170 U1 [19], který obsahuje cement 42,5R, mikrosilikát, křemičitou moučku, různá síta mikropísku, plastifikátory a odpěňovač. Poté byla přidána podstatná část z celkového množství záměsové vody a následovala pětiminutová homogenizace směsi. Dále se vkládala ocelová mikrovlákna a zbylá část záměsové vody. Vlákna byla přidávána pozvolna, aby bylo zajištěno jejich oddělení. Každá fáze míchání probíhala 5 minut a před přidáním dalších složek byly zednickou lžící odstraněny přilepené a nepromíchané složky ze stěn míchačky, pro zajištění lepší homogenizace směsi.

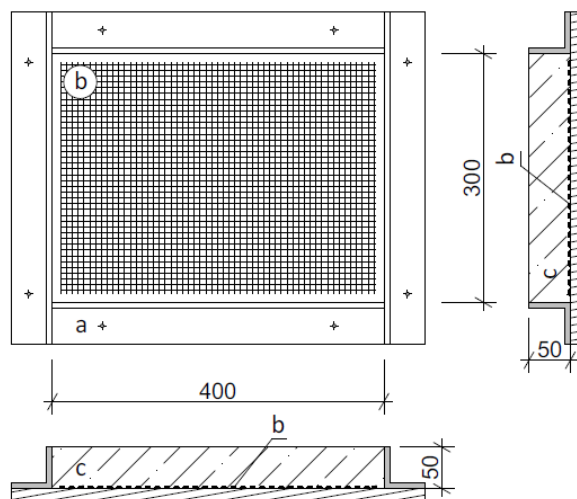


*Obr. 3.3 Talířová míchačka o objemu 40 l*

Hotová směs byla uložena do vodorovného bednění o velikosti 300 x 400 mm a výšky 50 mm, která byla vymazána odbedňovacím olejem. Pomocí připravené nádoby a zednické lžice byla betonová směs s vlákny umístěna do připraveného bednění. Následně byla finální směs ztuhněna dvacetivteřinovou vibrací. Formy byly do druhého dne ošetřovány v konstantní teplotě a zakryty fólií. Druhý den bylo provedeno odbednění forem a jejich očištění. Následujících 28 dní byly vzorky ošetřovány pro získání lepších mechanických vlastností.

### **3.2.2 Vzorek 1: Jedna vrstva tkaniny ze skelných vláken**

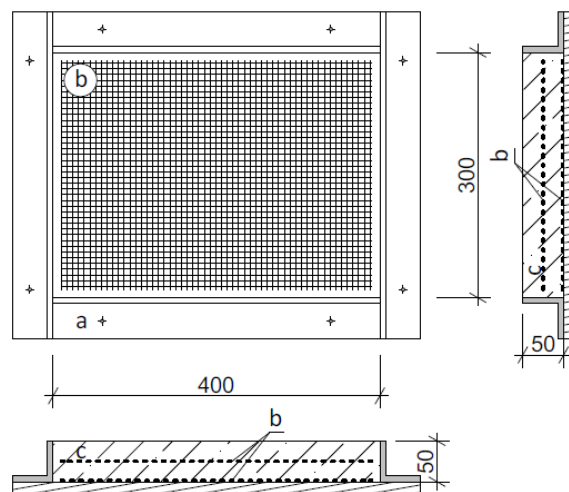
Do vymaštěného bednění se vložila skelná textilie, která se zalila homogenizovanou betonovou směsí. Naplněné bednění se po dobu dvaceti vteřin řádně zavibrovalo, pro zajištění kompaktní betonové hmoty bez vzduchových mezer. Poté byl vzorek přikryt fólií a druhý den odbedněn.



Obr. 3.4 Schéma uložení skelné tkaniny ve zkoušené desce  
*a – konstrukce bednění, b – skelná tkanina, c – betonová směs*

### 3.2.3 Vzorek 2: Dvě vrstvy tkaniny ze skelných vláken

Vzorek obsahoval dvě vrstvy skelné tkaniny, dle následujícího popisu. Do bednění se vložila skelná textilie, která byla následně zalita polovinou betonové směsi. Na tuto směs byla vložena druhá skelná tkanina a zbylá část betonové směsi. Plné bednění se po dobu dvaceti vteřin řádně zavibrovalo pro zajištění kompaktní betonové hmoty bez vzduchových mezer. Na konec byl vzorek přikryt folií a druhý den odbedněn.

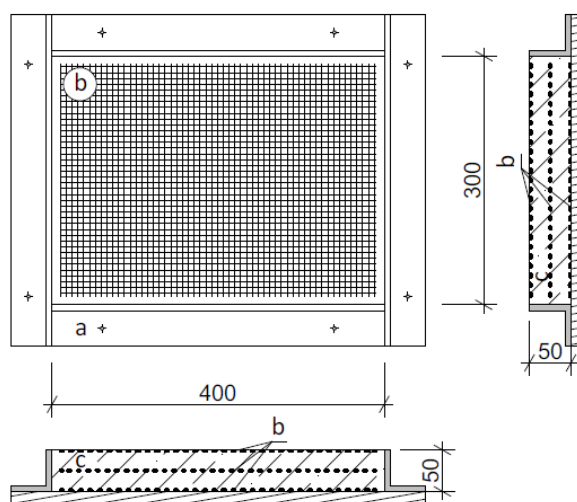


Obr. 3.5 Schéma uložení dvou skelných tkanin ve zkoušené desce  
*a – konstrukce bednění, b – skelná tkanina, c – betonová směs*



### 3.2.4 Vzorek 3: Tři vrstvy tkaniny ze skelných vláken

Ve vzorku byly umístěny tři vrstvy skelné tkaniny. Do bedněni se vložila skelná textilie, která byla následně zalita polovinou betonové směsi. V dalším kroku byla vložena druhá skelná tkanina a zbylá část betonové směsi. Nakonec se do naplněného bedněni položila i třetí skelná tkanina, která se zahladila zednickou lžicí. Plné bedněni se po dobu dvaceti vteřin řádně zavibrovalo pro zajištění kompaktní betonové hmoty bez vzduchových mezer. Stejně jako u předchozích vzorků byl vzorek přikryt folií a druhý den odbedněn.



Obr. 3.6 Schéma uložení tří skelných tkanin ve zkoušené desce  
a – konstrukce bedněni, b – skelná tkanina, c – betonová směs

## 3.3 Tkanina kevlar

Kevlar je ochranná známka para-aramidového vlákna, nejznámějšího aromatického polyamidu, vyvinutá společností DuPont (Stephanie Kwolekovi, 1965) [11]. Vyznačuje se relativně nízkou hustotou ( $1440 \text{ kg/m}^3$ ), velkou odolností proti abrazi a schopností se plasticky deformovat při působení extrémní síly kolmo k vláknům. Tkanina Kevlar má větší odolnost proti smykovému i tlakovému namáhání, než skelná tkanina (modul pevnosti 3,6 – 4,1 GPa). Popis použité tkaniny a postup betonáže naleznete v kapitole 3.3.2.



*Obr. 3.7 Tkanina z kevlaru použita pro vyztužení betonových desek*

### **3.3.1 Míchání směsi UHPFRC pro tkaninu kevlar**

Míchání této směsi bylo provedeno v automatické laboratorní míchačce s nádobou o kapacitě 20 l (Obr. 3.8), která umožňovala důkladnou homogenizaci. Postup přidávání jednotlivých složek je obdobný jako u předešlé směsi pro skelné tkaniny (kap. 3.2.1). Do míchačky byla nasypána suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu. Do suché směsi byla přidána podstatná část z celkového množství záměsové vody a po pětiminutové homogenizaci směsi byla přidána ocelová mikrovlákna a zbylá část záměsové vody. Vlákna byla přidávána pozvolna, aby bylo zajištěno jejich oddělení. Každá fáze míchání probíhala 5 minut a před přidáním dalších složek byly zednickou lžící odstraněny přilepené a nepromíchané složky ze stěn míchačky, aby byla zajištěna řádná homogenizace směsi.



Namíchaná betonová směs byla pomocí zednické lžice vkládána do svislého vystrojeného bednění o rozměrech 400 x 50 mm a výšky 300 mm a kevlarovou tkaninou s plechovými čtyřhrannými profily umístěnými na výšku bednění. Směs byla vkládána do plechových profilů. Po třetinách plnění, byla betonová směs vždy zhutněna dvaceti vpichy pomocí ocelové tyče profilu 8 mm. Po naplnění dvou třetin výšky bednění, byly odstraněny plechové čtyřhranné profily a směs byla následně zhutněna. Pokračovalo doplnění betonové směsi po okraj bednění a konečné zhutnění. Po dokončení betonáže se vzorky přikryly fólií a druhý den odbednily. Vybetonované desky se umístily na minimálně osmadvacet dní do kádí s vodou.



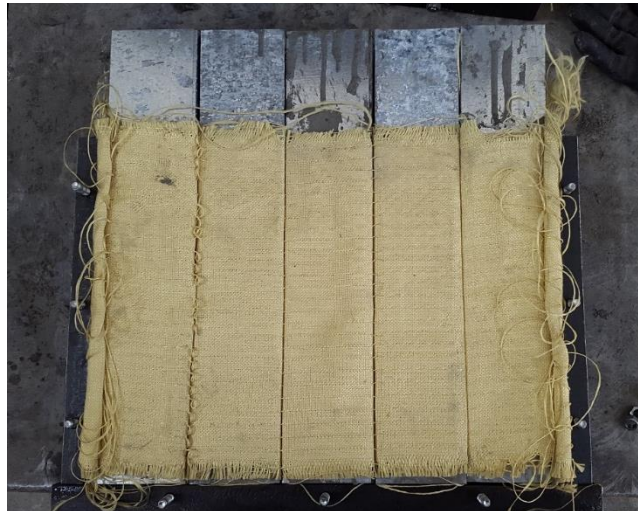
*Obr. 3.8 Laboratorní míchačka o objemu 20 l*

### **3.3.2 Vzorek 4: Prošité kapsy z kevlaru a jejich probetonování**

Textilie použitá v experimentu se skládala ze dvou vrstev tkaniny Kevlaru, které byly svisle prošity a vytvářely prostory (kapsy) určené k probetonování. Po navlečení tkaniny na plechové čtyřhranné profily byly dotaženy oboustranné vodorovné prameny Kevlaru zajišťující obdélníkový tvar plechového bednění. Plechové čtyřhranné profily držely tvar tkaniny a následně byly vloženy do svislého bednění, dle obrázku (3.10 A). Plechové bednění se po třetinách naplnilo betonovou směsí a řádně se zhutnilo ocelovou tyčí

(3.10 B). Následně se vysunulo plechové bednění (3.10 C) a svislé bednění se doplnilo betonovou směsí (3.10 D).

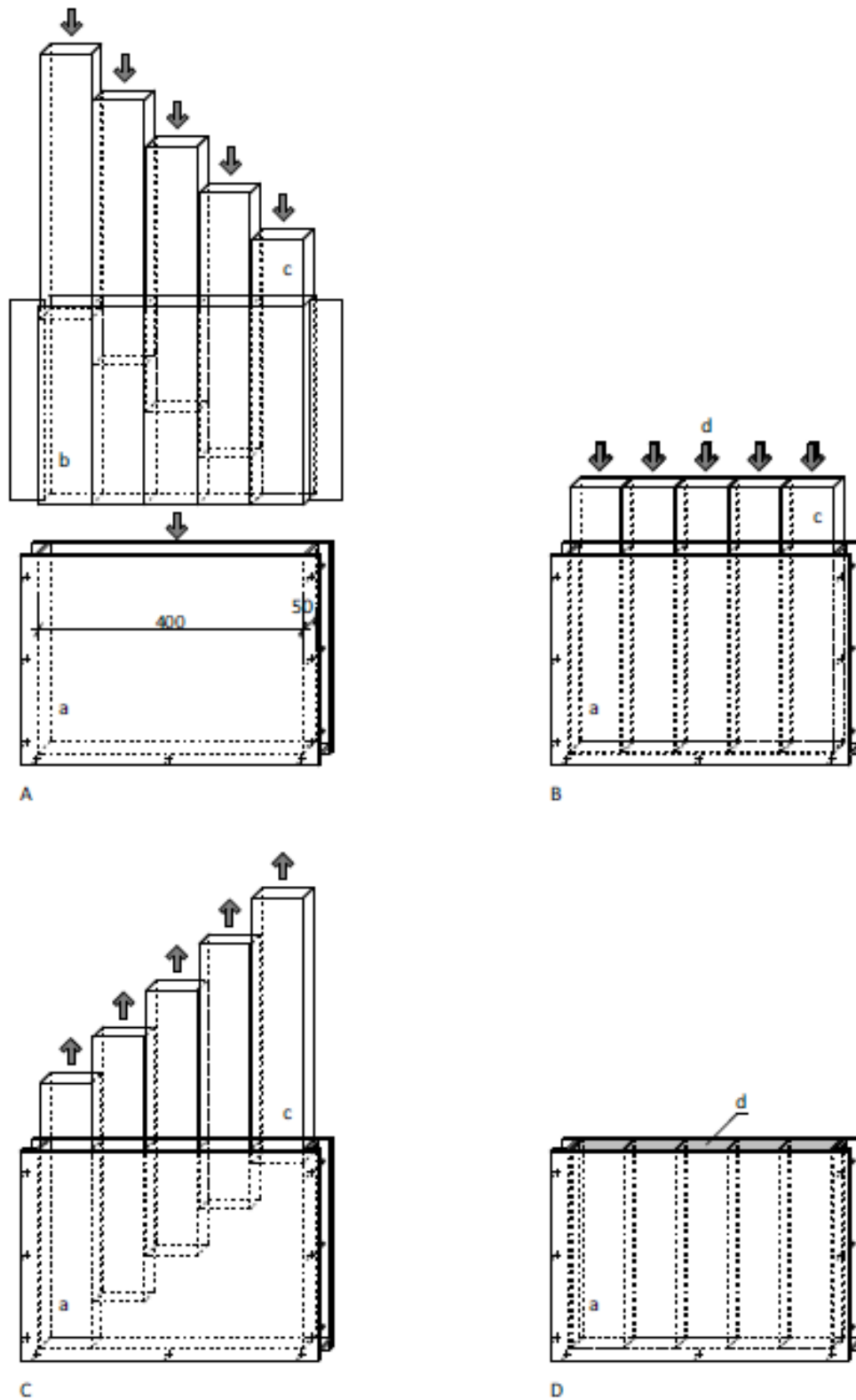
Za získání posuzovaných tkanin vděčím Františku Vančurovi ze společnosti Veba, který se podílel na výrobě a návrhu systému uložení tkaniny Kevlaru s vodorovnou stahující nití.



*Obr. 3.10 Schéma uložené tkaniny z kevlaru*



*Obr. 3 9 Vybetonovaná deska směsi UHPFRC s tkaninou Kevlar*



Obr. 3.11 Postup probetonování tkaniny z kevlaru:

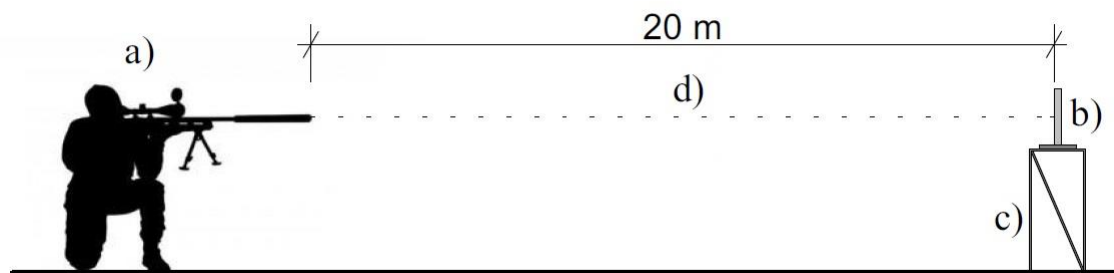
A – vložení plechového bednění do kevlarové textilie a do bednění; B – vylití plechového bednění betonovou směsí; C – odstranění plechového bednění; D – probetonování kevlarové tkaniny;  
 a – bednění, b – tkanina kevlar, c – plechové bednění, d – betonová směs

### 3.4 Experiment: Odolnost proti vzniku lokálních poškození

V experimentu byla vizuálně zkoumána lokální poškození vzniklá na deskách obdélníkového tvaru o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťky 50 mm. Prvky byly vystaveny extrémnímu zatížení v podobě vystřeleného projektilu ze střelné pušky umístěné ve vzdálenosti 20 metrů kolmo umístěné k přední ploše desky. Zkouška proběhla na střelnici ve Dvorech u Nymburka. Cílem tohoto experimentu bylo posouzení kombinace vysokohodnotného betonu s rozptýlenou výztuží, přesněji množstvím 1,5 % objemové hmotnosti vláken, společně se skelnou tkaninou nebo tkaninou Kevlar.

#### 3.4.1 Popis zkoušky

Experimentální střelba proběhla na střelnici v obci Dvory, smluvené střelnici fakultou stavební ČVUT. Vzorky byly umístěny do speciální ocelové konstrukce a bodově přichyceny v rozích zkoušených prvků ve vzdálenosti dvacet metrů od horizontálně umístěné zbraně (Obr. 3.12). Vzdálenost byla měřena homologovaným pásmem. Důležité je umístění střelné zbraně, která musí být v takové výšce, aby kulka dopadala v kolmém směru na plochu zkušebního prvku.



Obr. 3.12 Schéma zkoušky na střelnici

- a) Umístěn střelec, b) zkoušený prvek, c) konstrukce upevňující zkoušený prvek,  
d) směr dráhy projektilu

### 3.4.2 Vyhodnocení zkoušky

Projektily u střelby na desky se skelnou tkaninou byly směřovány do středu vzorků, v případě tkaniny Kevlar do pravé a levé části. Odolnosti zkoumaných desek ze skelné tkaniny byly stanoveny na dvanácti zkoumaných prvcích a třech vzorcích z tkaniny Kevlar. Vizualním zkoumáním byly desky zaříděny dle normy ČSN 39 5360 do těchto kategorií [13]:

- *Úplný průnik* – „stav, kdy střela, střepina nebo úlomek zkoušeného vzorku prorazí kontrolní desku definovaným způsobem“ [13]
- *Částečný průnik* – „stav, kdy střela, střepina nebo úlomek zkoušeného vzorku neprorazí kontrolní desku, ale poruší zadní stěnu vzorku“ [13]
- *Neprůnik* – „stav, kdy střela, střepina nebo úlomek zkoušeného vzorku neprorazí kontrolní desku, ani neporuší zadní stěnu vzorku“ [13]

Norma ČSN EN 1523 [16] popisuje vyhodnocení zkoušek vizualním způsobem po lokálním poškození projektilem dle kategorií:

- *Bez poškození*

Posuzovaný prvek po provedení zkoušky je bez vzniklého poškození na obou stranách prvku.

- *S poškozením* – „NS“ (bez úlomků ze zadní strany)

Prvek po uskutečnění zkoušky je ze zadní strany bez porušení, bez chybějících úlomků.

- *S poškozením* – „S“ (s úlomky ze zadní strany)

Posuzovaný prvek po zkoušce má z obou stran porušení.

### 3.4.3 Zatřídění projektilu

Určení kalibru slouží pro zatřídění stupnice balistické odolnosti použitých na zkoumaných vzorcích.

#### 3.4.3.1 České zatřídění projektilu

Pro stanovení třídy projektilu se používá norma ČSN 39 5360 [13] (Tabulka 3.2). Toto zatřídění jednotlivých projektilů je sestaveno vzestupně dle odolnosti vůči perforaci. Třída 1 má nejnižší odolnost proti střele, třída 7 a 7 CZ má naopak odolnost nejvyšší. V tabulce jsou mimo jiné i testovací podmínky, informace specifikující projektil a jeho váhu.

Tabulka 3.2 České zatřídění projektilů [13]

Zatřídění	Druh zbraně	Kalibr	Střela		Testovací podmínky
			Druh	Váha [g]	Rychlost střely [m/s]
1	malorážka	22LR	Pbj / O	2,6 ± 0,1	300 ± 10
2	pistole	9 mm Luger	CP / Pbj / O	8 ± 0,1	400 ± 10
2 CZ	pistole	7,62 x 25	CP / Pbj / O	5,5 ± 0,1	470 ± 10
3	pistole	357 Magnum	CP / Pbj / KK	10,2 ± 0,1	430 ± 10
3 CZ	pistole	9 mm Luger	CP / Fej / O	6,45 ± 0,1	440 ± 10
4	pistole	44 Rem. Mag.	CP / Pbj / KK	15,6 ± 0,1	550 ± 10
4 CZ		7,62 x 25	CP / Fej / O	5,5 ± 0,1	820 ± 10
5		223 Rem.	CP / Pbj	4 ± 0,1	920 ± 10
5 CZ		7,62 x 39	CP / Fej	8 ± 0,1	710 ± 10
6	puška	7,62 x 51	CP / Pbj	9,5 ± 0,1	830 ± 10
6 CZ	puška	223 Rem.	CP / Fej	3,95 ± 0,1	950 ± 10
7	puška	7,62 x 51	CP / Fej	9,8 ± 0,1	820 ± 10
7 CZ	puška	7,62 x 54 R	CP / Fej	9,75 ± 0,1	860 ± 10
CP	Celoplášťová střela				
Fej	Ocelové jádro				
Pbj	Olověné jádro				
O	Ogívalní špička střely				
KK	Rotační komolý kužel				

#### 3.4.3.2 Evropské zatřídění projektilu

Možné je použít i normu ČSN EN 1522 [14] (Tabulka 3.3). Tabulka popisuje obdobně jako norma ČSN 39 5360 zatřídění jednotlivých projektilů. Třída FB1 má nejnižší odolnost proti perforaci projektilu, třída FB7 má naopak odolnost nejvyšší. V tabulce jsou stanoveny testovací podmínky s hlavnovou rychlostí střely, dopadové energie a zkušební vzdáleností.



Obdobně jako v české normě jsou v tabulce obsaženy informace s druhy střeliva, přibližnou vahou a odchylkou váhy projektilu.

Tabulka 3.3 Evropské zatřídění projektilů [14]

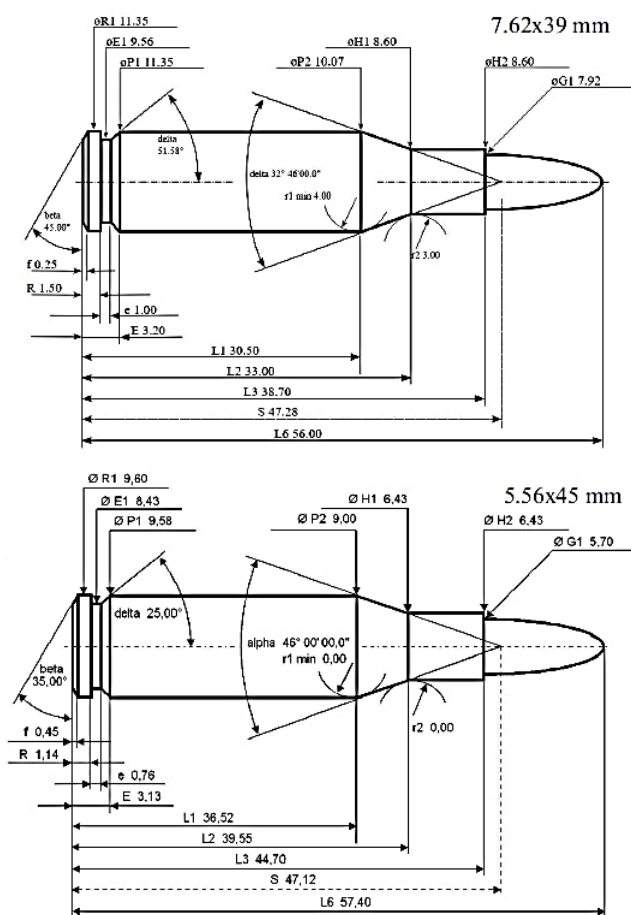
Zatřídění	Druh zbraně	Kalibr	Střela		Testovací podmínky		
			Druh	Váha [g]	Vzdálenost [m]	Rychlost střely [m/s]	Dopadová energie
FB1	malorážka	22LR	LB/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10	170 J
FB2	pistole	9 mm Luger	FJ <sup>(1)</sup> / RN / SC	8 ± 0,1	5,00 ± 0,5	400 ± 10	640 J
FB3	pistole	357 Magnum	FJ <sup>(1)</sup> / CB / SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940 J
FB4	pistole	357 Magnum	FJ <sup>(1)</sup> / CB / SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940 J
	pistole	44 Rem. Mag.	FJ <sup>(2)</sup> / FN / SC	15,6 ± 0,1	5,00 ± 0,5	440 ± 10	1510 J
FB5	puška	5,56 x 45	FJ <sup>(2)</sup> / PB / SCP1	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	1800 J
FB6	puška	5,56 x 45	FJ <sup>(2)</sup> / PB / SC	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	1800 J
	puška	7,62 x 51	FJ <sup>(1)</sup> / PB / SC	9,5 ± 0,1	10,00 ± 0,5	830 ± 10	3270 J
FB7	puška	7,62 x 51	FJ <sup>(2)</sup> / PB / HC1	9,8 ± 0,1	10,00 ± 0,5	820 ± 10	3280 J
LB	Lead Bullet - celoolověná střela		FJ <sup>(1)</sup> = full steel jacket (played)				
FJ	Full Metal Jacket - celokovový plášť		-plášť celokovový ocelový				
FN	Flat Nose - plochá špička		FJ <sup>(2)</sup> = full copper alloy jacket				
RN	Round Nose - ogivální špička střely		-plášť celokovový se slitinou mědi				
CB	Cone Bullet - kuželovitá střela						
PB	Pointed Bullet - ostrá střela						
SC	Soft Core (lead)						
SCP1	Soft Core (lead) Steel Penetrator (type SS109)						
HC1	Steel hard core						

### 3.4.4 Použité projektily

Byly využity deformovatelné a nedeformovatelné projektily s celokovovým pláštěm střel (Tabulka 3.4), ráže 7,62 mm s hmotností 8 g, hlavňové rychlosti kolem 710 m/s a ráže 5,56 mm s hmotností 5g, hlavňovou rychlostí 950 m/s (Obr. 3.13). Projektily u zkoušených desek se skelnou tkaninou narážely do středu vzorků, v případě tkaniny Kevlar do pravé a levé části. Odolnosti zkoumaných desek ze skelné tkaniny byly stanoveny na dvanácti prvcích a třech vzorcích z tkaniny Kevlar.

Tabulka 3.4 Parametry použitých projektilů [15] [18]

Typ projektilu	Kalibr [mm]	Diametr [mm]	Jádro	Hmotnost [g]	Úst'ová rychlost [m/s]
deformovatelný nedeformovatelný	7,62 x 39	7,92	olověné ocelové	8,00	950
deformovatelný nedeformovatelný	5,56 x 45	5,70	olověné ocelové	9,00	710



Obr. 3.13 Použité náboje

7.62x39 mm [17], 5.56x45 mm [18]



### 3.5 Výsledky posuzovaných vzorků

Vizuálně byly zkoumány lokální poškození vzniklé na deskách obdélníkového tvaru o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťky 50 mm. Zkoumané prvky obsahovaly směs UHPFRC betonu s rozptýlenou výztuží (Tabulka 3.1), přesněji množstvím 1,5 % objemové hmotnosti vláken, společně se skelnou tkaninou nebo tkaninou Kevlar.

Prvky byly vystaveny extrémnímu zatížení v podobě vystřeleného projektilu ze střelné pušky. Vyhodnocování jednotlivých vzorků proběhlo dle normy ČSN 39 5360 (kap. 3.4.3.1), a ČSN EN 1522 (kap. 3.4.3.2).

#### 3.5.1 Vyhodnocení desek se skelnou tkaninou

Odolnosti zkoumaných desek ze skelné tkaniny byly stanoveny na devíti vzorcích, ve třech provedeních pro jednotlivé počty vrstev skelných tkanin. Byly využity deformovatelné a nedeformovatelné projektily s celokovovým pláštěm střel, ráže 7,62 mm s hmotností 8 g, hlavnové rychlosti kolem 710 m/s. Zatřídění projektilu 7.62x39 mm je stanoveno v tabulce níže (Tabulka 3.8). Projektily u zkoušených desek se skelnou tkaninou byly umístěny do středu vzorků. Výsledky naleznete v následujících tabulkách (Tabulka 3.6, Tabulka 3.7)

Tabulka 3.5 Zatřídění použitých projektilů pro skelnou tkaninu

Kalibr [mm]	Diametr [mm]	Jádro	Hmotnost [g]	Ústňová rychlost [m/s]	Zatřídění dle ČSN 39 5360	Zatřídění dle EN 1522
7,62 x 39	7,92	olověné ocelové	8,00	710	5 5 CZ	FB 4 FB 5

Vyhodnocení bylo stanoveno dle ČSN 39 5360 [13]. Z tabulky (Tabulka 3.6) je zřejmé, že nejvyšší odolnost proti vystřelenému projektilu má vzorek s použitou směsí UHPFRC, 1,5% objemové hmotnosti vláken a třemi vrstvami skelné tkaniny. Tato tkanina byla umístěna po obou površích a v jejím středu zkoumaného vzorku. Odolnost při extrémním zatížení je srovnatelná se směsí UHPFRC v kombinaci s obsahem 4,0 % objemové hmotnosti vláken [20] při stejných velikostech zkoumaných prvků.

Tabulka 3.6 Vyhodnocení UHPFRC se skelnou tkaninou dle ČSN 39 5360

Posuzovaný prvek	Zatřídění							
	4	4 CZ	5	5 CZ	6	6 CZ	7	7 CZ
Skelná tkanina 1 vrstva			●					
Skelná tkanina 2 vrstvy			●	●				
Skelná tkanina 3 vrstvy			●	●	●			

● Úplný průnik   ● Částečný průnik   ● Neprůnik



Obr. 3.14 Čelní strana s dvěma vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm



Obr. 3.15 Zadní strana s dvěma vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm



Obr. 3.16 Čelní strana se třemi vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm



Obr. 3.17 Zadní strana se třemi vrstvami skelné tkaniny posuzované na deformovatelný projektil 7,62x39 mm

Za povšimnutí stojí i druhý zkoumaný prvek, který byl vyztužen pouze dvěma tkaninami, v jejím rubu a středu vzorku. V porovnání se vzorkem s nejvyšší odolností

chybí vyhodnocení částečného průniku, na který může mít vliv absence umístění tkaniny v líci prvku. Prvek s vyztužením jedné vrstvy skelné tkaniny, v rubu desky, dopadl v testu nejhůře a nevyhověl ani základnímu náboji 7,62x39 mm s deformovatelným projektilem.

Druhé vyhodnocení bylo provedeno dle ČSN EN 1522. V této normě jsem se zaměřil pouze na zařazení dle skupin z důvodu neodpovídající střelné vzdálenosti a tudíž nesprávným energiím dopadu stanovené v této normě. Z tabulky (Tabulka 3.7) vyplývá, že vzorky se dvěma a třemi vrstvami skelné tkaniny mají totožné zařazení odolnosti proti vystřelenému projektilu.

Tabulka 3.7 Vyhodnocení UHPFRC se skelnou tkaninou dle EN 1522

Posuzovaný prvek	Zařazení						
	FB 1	FB 2	FB 3	FB 4	FB 5	FB 6	FB 7
Skelná tkanina 1 vrstva				●			
Skelná tkanina 2 vrstvy				●	●		
Skelná tkanina 3 vrstvy				●	●		

● *S poškozením S*   ● *S poškozením NS*   ● *Bez poškození*

### 3.5.2 Vyhodnocení desek s tkaninou Kevlar

Odolnosti zkoumaných desek byly stanoveny na třech vzorcích z tkaniny Kevlar. Byly využity deformovatelné a nedeformovatelné projektily s celokovovým pláštěm střel, ráže 7,62 mm s hmotností 8 g, hlavňové rychlosti kolem 710 m/s a ráže 5,56 mm s hmotností 5 g, hlavňovou rychlostí 950 m/s. Zařazení projektilu 5.56x45 mm a projektilu 7.62x39 mm je stanoveno v tabulce níže (Tabulka 3.8). Projektily u zkoušených desek s tkaninou Kevlar byly umístěny do pravé a levé části. V následujících tabulkách jsou vyznačeny výsledky (Tabulka 3.9, Tabulka 3.10)



Tabulka 3.8 Zatřídění použitých projektilů pro tkaninu Kevlar

Kalibr [mm]	Diametr [mm]	Jádro	Hmotnost [g]	Ústřední rychlost [m/s]	Zatřídění dle ČSN 39 5360	Zatřídění dle EN 1522
7,62 x 39	7,92	olověné	8,00	710	5	FB 4
		ocelové			5 CZ	FB 5
5,56 x 45	5,7	olověné	9,00	950	6	FB 5
		ocelové			6 CZ	FB 6

Vyhodnocení bylo stanoveno dle ČSN 39 5360 [13]. Kde z tabulky (Tabulka 3.9) je zřejmé, že vzorky s kombinací směsí UHPFRC, 1,5 % objemové hmotnosti vláken a prošivanou tkaninou Kevlar mají vyšší odolnosti proti projektilu, než vzorky ze skelné tkaniny. Při dalším porovnávání odolnosti při extrémním zatížení je tento posuzovaný vzorek srovnatelný se vzorkem UHPFRC v kombinaci s obsahem 4,7 % objemové hmotnosti vláken [20].

Tabulka 3.9 Vyhodnocení UHPFRC s tkaninou Kevlar dle ČSN 39 5360

Posuzovaný prvek	Zatřídění							
	4	4 CZ	5	5 CZ	6	6 CZ	7	7 CZ
Tkanina Kevlar			●	●	●	●		

● Úplný průnik   ● Částečný průnik   ● Neprůnik



Obr. 3.18 Čelní strana s tkaninou Kevlar posuzovaná na deformovatelný projektil 7,62x39 mm (vlevo), nedeformovatelný projektil 7,62x39 mm (vpravo)



Obr. 3.19 Zadní strana s tkaninou Kevlar posuzovaná na deformovatelný projektil 7,62x39 mm (vpravo), nedeformovatelný projektil 7,62x39 mm (vlevo)



Obr. 3.21 Zadní strana s tkaninou Kevlar posuzované na deformovatelný projektil 5,56x45 mm (vpravo), nedeformovatelný projektil 5,56x45 mm (vlevo)



Obr. 3.20 Čelní strana s tkaninou Kevlar posuzované na deformovatelný projektil 5,56x45 mm (vlevo), nedeformovatelný projektil 5,56x45 mm (vpravo)

Druhé vyhodnocování bylo provedeno dle ČSN EN 1522. V této normě jsem se opět zaměřil pouze na zařazení dle skupin z důvodu nesprávné energie dopadu stanovené v této normě vlivem odlišné střelené vzdálenosti. V tabulce (Tabulka 3.10) naleznete zařazení popisující odolnosti proti vystřelenému projektilu dané skupiny.

Tabulka 3.10 Vyhodnocení UHPFRC s tkaninou Kevlar dle EN 1522

Posuzovaný prvek	Zařazení						
	FB 1	FB 2	FB 3	FB 4	FB 5	FB 6	FB 7
Tkanina Kevlar				●	●	●	

● S poškozením S    ● S poškozením NS    ● Bez poškození

## 4 Závěr

Cílem a obsahem této práce bylo stanovit odolnost posuzovaných vzorků při extrémním zatížení, jejichž složení bylo vysokohodnotný beton s rozptýlenou výztuží, přesněji s obsahem 1,5 % objemové hmotnosti vláken, společně s různým počtem a umístěním skelné tkaniny, nebo prošivané tkaninou Kevlar. Odolnost byla stanovena na základě experimentální zkoušky, která byla vyvolána nárazem projektilu, a jejím vyhodnocením dle norem ČSN 39 5360 a ČSN EN 1523. Bylo vyrobeno dvanáct desek ze skelné tkaniny a třech vzorcích z tkaniny Kevlar o shodných rozměrech 400 x 300 x 50 mm (Š x V x Tl.).

Rostoucím počtem vrstev skelné tkaniny se zvyšuje odolnost vzorku na extrémní zatížení vyvolané projektilem. Nejvyšší odolnost má vzorek s použitou směsí UHPFRC, 1,5 % objemové hmotnosti vláken a třemi vrstvami skelného vlákna, umístěnými po obou površích a středu zkoumaného vzorku ve směru kolmém k umístění střelné zbraně. Odolnost při extrémním zatížení je srovnatelná se vzorkem UHPFRC s obsahem 4,0 % objemové hmotnosti vláken [20], při stejných velikostech zkoumaných prvků. Důležité je umístění jednotlivých vrstev tkaniny, protože namáhání desky se v jejích průřezech (vodorovné a svislé) mění. Prvek je při líci (straně zásahu) namáhán tlakem po nárazu projektilu, a při rubu (zadní straně) kombinací tahového a smykového napětí. Kombinace vysokopevnostních mikrovláken se skelnou tkaninou (při zadní straně) mají za následek zvýšení tahové i smykové únosnosti zkoumaného vzorku.

Desky se směsí UHPFRC, 1,5 % objemové hmotnosti vláken a prošivanou tkaninou Kevlar mají vyšší odolnosti vůči extrémnímu zatížení vyvolané projektilem, než vzorky ze skelné tkaniny. Toto porovnání se dalo odvodit již díky vyšší smykové a tahové pevnosti Kevlaru. Při dalším porovnávání odolnosti při extrémním zatížení je tato posuzovaná směs srovnatelná se směsí UHPFRC s obsahem 4,7 % objemové hmotnosti vláken [20].

V návaznosti na tuto práci bych rád pokračoval v experimentálním centru na rozšíření výzkumu o měření porovnávací pevnosti kompozitu v závislosti na vzdálenosti pramenů v tkaninách. Domnívám se, že zvětšení vzdáleností mezi prameny může mít za následek zvýšení pevnosti matrice. Nabízí se i použití jiných typů 3D tkanin, které mohou být pletené nebo háčkované. I u těchto 3D tkanin je možné posuzovat jejich pevnosti v závislosti na vzdálenosti jednotlivých pramenů.

## Použité zdroje

[1] BEDDAR, Miloud. Fibre-reinforced concrete. Concrete [online]. 2004, vol. 38, no. 4, s. 47. ISSN 00105317.

[2] PAVLÍKOVÁ Milena. Vláknobetony. [přednáška]. Praha: ČVUT, 5.října 2014. In: ČVUT [online]. [vid. 12. 10. 2015].  
Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS7a.pdf>

[3] Vlákna pro kompozity. *Mujweb.cz* [online]. Praha: KOŘÍNEK Michal, 2016 [cit. 2017-05-26].  
Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf?redirected=1493476206>

[4] Historie cementu | eBeton - Specialista na beton. eBeton | eBeton - Specialista na beton [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/historie-cementu>

[5] VODIČKA Jan, VESELÝ Vladimír, KRÁTKÝ Jiří. Specifika z technologie vláknobetonu In: Beton TKS [online]. 2010, 02, pp. 38-42. ISSN 12133116. [vid. 21 November 2013].  
Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-38\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-38_0.pdf)

[6] Cement | eBeton - Specialista na beton. *eBeton* | eBeton - Specialista na beton [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>

[7] Anorganická pojiva. *Geologie.vsb.cz* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [cit. 2017-05-26].  
Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html#cementy](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html#cementy)

[8] K123-Katedra stavebních materiálů [online]. Copyright © [cit. 26.05.2017].  
Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS2.pdf>

[9] ČSN EN 197-1: *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[10] TVAROG, Michal. *Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů 2016*. Praha, 2016. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ČVUT. Vedoucí práce Jindřich Fornůsek.

- [11] Kevlar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kevlar#cite\\_note-12](https://en.wikipedia.org/wiki/Kevlar#cite_note-12)
- [12] KEVLAR® FIBERS. *Www.dupont.com* [online]. USA: Dupont, 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html>
- [13] ČSN 39 5360: *Zkoušky odolnosti ochranných prostředků. Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním. Technické požadavky a zkoušky*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [14] ČSN EN 1522: *Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Požadavky a klasifikace*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [15] Váš výrobce střeliva — *Sellier & Bellot* [online]. Copyright © Sellier [cit. 26.05.2017]. Dostupné z: <http://www.sellier-bellot.cz/produkty/kulove-naboje/kulove-naboje-training-fmj/seznam-produktu/detail/216/>
- [16] ČSN EN 1523: *Okna, dveře, uzávěry a rolety - Odolnost proti průstřelu - Zkušební metody*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [17] 7,62 × 39 mm. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/7,62\\_%C3%97\\_39\\_mm](https://cs.wikipedia.org/wiki/7,62_%C3%97_39_mm)
- [18] 5.56×45mm NATO. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/5.56%C3%9745mm\\_NATO](https://en.wikipedia.org/wiki/5.56%C3%9745mm_NATO)
- [19] *Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu*. 2016. Česká republika. CZ 30170 U1 Užité vzor. Zapsáno 20.12.2016.
- [20] POLÁČEK, Michal. *Vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České Vysoké Učení Technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Jindřich Fornůšek.