

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza lehkých drátkobetonů zatížených mimořádným  
zatížením

Bc. Filip Kosinka

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Kosinka**  
Osobní číslo: **D18437**  
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**  
Téma práce: **Experimentální analýza drátkobetonů zatížených mimořádným zatížením**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

### Zásady pro vypracování

V zadané tématice se požaduje zpracovat rešerše stávající míry poznání v ČR a v zahraničí.  
Pro potřeby vlastních experimentálních prací je možné provést modifikaci referenční receptury typového betonu.

V experimentální části práce je požadováno stanovit pevnostní charakteristiky související se simulací výbuchu, která bude provedena ve spolupráci s Fakultou chemicko-technologickou, Ústavem energetických materiálů. Vlastní experimentální práce budou probíhat na autorem zhotovených zkušebních tělesech.

#### **Požadované výstupy:**

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí

2) Experimentální část

Výroba drátkobetonu (SFRC)

Provedení zkoušek čerstvého SFRC (stanovení konzistence, objemová hmotnost)

Provedení zkoušek ztvrdlého SFRC (ohybové zkoušky drátkobetonových trámů, stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových deskových zkušebních těles)

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

## Seznam doporučené literatury:

- ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 14488-5. Zkoušení stříkaného betonu – Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- ČSN P 73 2450, 2015. Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN P 73 2451, 2015. Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN P 73 2452, 2015. Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- TKP staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy, 2016.
- TKP staveb státních drah: Kapitola 17: Beton pro konstrukce. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2013.
- BAREŠ, Richard A., 1988. Kompozitní materiály. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury. Redakce stavební literatury. Typové číslo L17-B3-IV-31/72231.
- COLLEPARDI, M., 2009. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- KRÁTKÝ, J., K. TRTÍK a J. VODIČKA, 1999. *Drátkobetonové konstrukce: Úvodní část a příklady použití: Směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí.* Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.
- MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.
- PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- SCHUTTER, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMONE, John GIBBS a Rudolf HELA, 2008. *Samozhutnitelný beton.* Praha: ČBS Servis. ISBN 978-1904445-30-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.**  
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce: **26. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **31. ledna 2020**

L.S.

---

**doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.**  
vedoucí katedry



Prohlašuji:

Práci s názvem Experimentální analýza lehkých drátkobetonů zatížených mimořádným zatížením jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 7. 2021

Bc. Filip Kosinka v.r.

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D., za odborné vedení, za věcné připomínky a rady při zpracování této diplomové práce. Mé poděkování patří též panu doc. Ing. Jiřímu Pachmanovi, Ph.D. z Ústavu energetických materiálů, Fakulty chemicko-technologické za odbornou a technickou pomoc při provádění zkoušky. Další poděkování patří za technickou pomoc Ing. Martině Hankové a Michalovi Konířovi z firmy Cemex Czech Republic s.r.o. Závěrem bych chtěl poděkovat studentovi Bc. Janu Fadrhonsovi a Bc. Martinu Drajerovi za pomoc v experimentální části.

Závěrečná práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS\_2019\_010, SGS\_2020\_009, SGS\_2021\_010.

## ANOTACE

Diplomová práce je věnována teorii a zkoušení lehkých samozhutnitelných drátkobetonu destruktivními metodami. Experimentální část lehkých samozhutnitelných drátkobetonů je zaměřena na mimořádná zatížení, která jsou zjišťována zkouškami: stanovení kapacity absorbované energie drátkobetonových deskových zkušebních těles, měření materiálových hodnot pomocí výbuchu, pevnost v tahu za ohybu, kterou se stanoví hodnoty reziduální pevnosti po vzniku trhliny. Ke stanovení pevnostních charakteristik bude ještě doplněna zkouška pevnosti v tlaku. Zkoušení je prováděno na lehkých samozhutnitelných betonech s různým druhem vyztužením. Získané výsledky jednotlivých záměsí jsou mezi sebou vzájemně porovnány.

## KLÍČOVÁ SLOVA

výbuch, rázová vlna, deflagrace, detonace, absorbovaná energie, zbytková pevnost vláknobeton, drátkobeton, ocelové vlákno, syntetické vlákno

## TITLE

Experimental Analysis of Lightweight Wire Concrete Structures Subjected to Extraordinary Loads

## ANNOTATION

The thesis is devoted to the theory and testing of lightweight self-compacting wire concrete by destructive methods. The experimental part of lightweight self-compacting wirecrete is focused on the extraordinary loads, which are detected by tests: determination of the absorbed energy capacity of wirecrete slab test bodies, measurement of material values by means of explosion, tensile strength in bending, which is used to determine the values of residual strength after formation of a tear. A compressive strength test will be added to determine the strength characteristics. Testing is carried out on lightweight self-compacting concrete with various types of reinforcement. The results obtained for the individual mixtures are compared with each other.

## KEYWORDS

blast, shock wave, deflagration, detonation, absorbed energy, residual strength, fibre concrete, wire concrete, steel fibre, synthetic fibre

# Obsah

ÚVOD .....	15
CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	16
TEORETICKÁ ČÁST .....	17
1. Teorie lehkých samozhutnitelných drátkobetonů .....	17
1.1. Historie lehkých samozhutnitelných drátkobetonů .....	17
1.2. Současnost.....	18
1.2.1. Složení lehkého samozhutnitelného vláknobetonu .....	18
1.2.1.1. Kamenivo .....	20
1.2.1.1.1. Pórovité kamenivo .....	20
1.2.1.1.2. Přírodní pórovité kamenivo .....	20
1.2.1.1.3. Umělé pórovité kamenivo .....	21
1.2.1.2. Voda.....	24
1.2.1.3. Cement .....	25
1.2.1.4. Přísady .....	25
1.2.1.5. Příměsi .....	25
1.2.1.6. Rozptýlená výztuž .....	26
2. Teorie mimořádných zatížení – výbuchy .....	28
2.1. Úvod .....	28
2.2. Praktické ukázky, kde po výbuchu došlo k demolici .....	30
2.3. Výbuch.....	32
2.4. Zkušební tělesa jako simulace reálných konstrukcí .....	36
2.5. Popis zatížení od výbuchu.....	37
2.5.1. Extrémní návrhové situace .....	38
2.6. Chování betonových konstrukcí během výbuchu .....	39
2.7. Využití přetvárných vlastností drátkobetonu proti výbuchu.....	43
2.8. Zásady návrhu .....	44
2.9. Absorbovaná energie.....	45
2.9.1. Zkoušení absorbované energie .....	45
2.9.2. Absorbovaná energie v betonových konstrukcích .....	45
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	48
3. Definice záměsí betonu .....	48
3.1. Výroba vlastních experimentálních těles .....	49
3.2. Přehled vyrobených záměsí .....	49
3.2.1. Záměs LWSCC 1 Betonárna .....	49
3.2.2. Záměs LWSCC 1 Laboratoř VVCD .....	49

3.2.3.	Záměs LWSCC 2 .....	50
3.2.4.	Záměs LWSCC 3 .....	50
3.2.5.	Záměs LWSCC 4 .....	50
3.2.6.	Přehled vyztužení jednotlivých záměsí .....	50
3.3.	Stanovení potřebného objemu betonu .....	50
3.4.	Postup míchání a ukládání čerstvého betonu .....	51
4.	Zkoušení čerstvého betonu .....	54
4.1.	Zkouška sednutí-rozlitím kužele .....	54
4.2.	Objemová hmotnost čerstvého betonu .....	57
5.	Zkoušení ztvrdlého betonu .....	58
5.1.	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu .....	58
5.2.	Zkouška - pevnost v tlaku .....	63
5.3.	Zkouška - pevnost v tahu za ohybu .....	66
5.3.1.	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 1 Betonárna .....	67
5.3.2.	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 2 .....	68
5.3.3.	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 3 .....	72
5.3.4.	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 4 .....	74
5.3.5.	Zkouška pevnost v tahu za ohybu – porovnání jednotlivých záměsí .....	77
5.4.	Zkouška absorbované energie .....	79
5.4.1.	Zkouška absorbované energie pro záměs LWSCC 2 .....	79
5.4.2.	Zkouška absorbované energie ze záměsí LWSCC 3 .....	81
5.4.3.	Zkouška absorbovaná mechanická energie u záměsí LWSCC 4 .....	83
5.4.4.	Porovnání výsledků zkoušky absorbované energie .....	85
5.5.	Odolnost LWSCC proti výbuchu .....	87
5.5.1.	Zatížení 25 g výbušniny .....	88
5.5.2.	Zatížení 50 g výbušniny .....	91
5.5.3.	Zatížení 100 g výbušniny .....	93
5.5.4.	Zatížení 150 g výbušniny .....	96
ZÁVĚR	.....	99
CITACE	.....	103
DOKLADOVÁ ČÁST	.....	108



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Vlevo segregující LWSCC beton směrem k povrchu, ve srovnání vpravo s nese segregujícím LWSCC [12] .....	19
Obrázek 2 Nese segregující lehký samozhutnitelný beton [vlastní foto] .....	19
Obrázek 3 Keramické kamenivo Liapor (frakce 8-16 mm) [19].....	22
Obrázek 4 Expandovaný perlit [18].....	23
Obrázek 5 Kamenivo Rugen 8/16 [vlastní foto].....	24
Obrázek 6 Rozdělení rozptýlené výztuže [vlastní] .....	27
Obrázek 7 Drátky do betonu o různém tvaru a délce [40].....	27
Obrázek 8 Výbuch v panelovém domě na Slovensku v Prešově. [43] .....	31
Obrázek 9 Následky výbuchu nákladního automobilu s pyrotechnikou na dálničním mostě [45] .....	31
Obrázek 10 Šíření rázové vlny z místa výbuchu: a) vzdušný výbuch, b) pozemní výbuch [31] .....	35
Obrázek 11 Zkušební těleso o rozměrech 600x600x100 mm [vlastní foto].....	36
Obrázek 12 Zkušební těleso o rozměrech 300x1500x6000 mm [25].....	37
Obrázek 13 Výbuch ve větší vzdálenosti od tělesa [24].....	40
Obrázek 14 Výbuch v blízkosti od tělesa [24].....	41
Obrázek 15 Výbuch v bezprostřední blízkosti tělesa [24].....	42
Obrázek 16 Prefabrikovaný sendvičový panel [49].....	43
Obrázek 17 Výroba vlastních těles o rozměrech 600x600x100 mm [vlastní foto] .....	49
Obrázek 18 Postup přípravy nasyceného kameniva k odvozu do betonárny [vlastní foto] 52	
Obrázek 19 Objemově naměřené lehké kamenivo těsně před mícháním čerstvého betonu [vlastní foto] .....	52
Obrázek 20 Míchání čerstvého betonu v 1 m <sup>3</sup> míchačce [vlastní foto].....	53
Obrázek 21 Odvoz betonu pomocí vysokozdvizného vozíku [vlastní foto].....	53
Obrázek 22 Ruční promíchání čerstvého betonu s výztuží [vlastní foto].....	54
Obrázek 23 Naplněné formy čerstvým betonem [vlastní foto] .....	54
Obrázek 24 Zkouška rozlití kužele u záměsi LWSCC 1 Lab. [vlastní foto] .....	55
Obrázek 25 Rozměr d <sub>2</sub> u záměsi LWSCC 1 Lab. [vlastní foto] .....	55
Obrázek 26 Objemová hmotnost čerstvého betonu - záměs LWSCC 1 Lab [vlastní foto] 57	
Obrázek 27 Řezání krychlí z hranolů použitých ke zkoušce v tahu za ohybu [vlastní foto] .....	60

Obrázek 28 Zkouška pevnost v tlaku vzorku [vlastní foto].....	63
Obrázek 29 Zaznamenávání dat pomocí měřicí ústředny Controls automax [vlastní foto]	66
Obrázek 30 Uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [vlastní].....	67
Obrázek 31 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu vzorku 2b ze záměsi LWSCC 2 [vlastní foto].....	71
Obrázek 32 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu vzorku 3b ze záměsi LWSCC 3 [vlastní foto].....	73
Obrázek 33 Zkušební lis Controls 50-C1201/BFR a automatická řídicí jednotka [vlastní foto].....	79
Obrázek 34 Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSCC 2 [vlastní foto].....	80
Obrázek 35 Vzorek ze záměsi LWSCC 2b [vlastní foto].....	81
Obrázek 36 Zkouška absorbované energie zkušební desky 3a [vlastní foto].....	83
Obrázek 37 Zkušební deska 3a [vlastní foto].....	83
Obrázek 38 Zkušební deskové těleso 4b [vlastní foto].....	85
Obrázek 39 Zkouška odolnost LWSCC proti výbuchu [vlastní foto].....	87
Obrázek 40 Ocelový rám pro zkoušku odolnosti LWSCC proti výbuchu [vlastní foto] ...	88
Obrázek 41 Kontaktní strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 25 g výbušniny [vlastní foto].....	89
Obrázek 42 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 25 g výbušniny [vlastní foto].....	90
Obrázek 43 Kontaktní strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 50 g výbušniny [vlastní foto].....	92
Obrázek 44 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 50 g výbušniny [vlastní foto].....	92
Obrázek 45 Kontaktní strana vzorku ze záměsi LWSCC 4 zatížena 100 g výbušniny [vlastní foto].....	94
Obrázek 46 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 4 zatížena 100 g výbušniny [vlastní foto].....	95
Obrázek 47 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 4 zatížena 150 g výbušniny [vlastní foto].....	97

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Tlakový TNT ekvivalent některých výbušnin [38, 39] .....	36
Tabulka 2 Přehled různých druhů vyztužení v jednotlivých záměsích .....	50
Tabulka 3 Potřeba betonu k plánovaným zkouškám .....	51
Tabulka 4 Přehled výsledků zkoušky sednutí-rozlítím kužele .....	55
Tabulka 5 Objemové hmotnosti čerstvého betonu jednotlivých záměsí .....	57
Tabulka 6 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu.....	61
Tabulka 7 Naměřené krychelné pevnosti v tlaku jednotlivých těles .....	64
Tabulka 8 Naměřené rozměry vzorků ze záměsi LWSCC 2 .....	68
Tabulka 9 Naměřené hodnoty zatížení pro vzorky ze záměsi LWSCC 2 .....	69
Tabulka 10 Pevnost v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 2 .....	71
Tabulka 11 Rozměry vzorků pro zkušební tělesa ze záměsi LWSCC 3 .....	72
Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro záměs LWSCC 3 .....	72
Tabulka 13 Pevnost v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 3 .....	74
Tabulka 14 Změřena zkušební tělesa ze záměsi LWSCC 4 .....	74
Tabulka 15 Naměřené hodnoty ze záměsi LWSCC 4 .....	75
Tabulka 16 Pevnost v tahu za ohybu LWSCC4 .....	76
Tabulka 17 Přehled hodnot pevnosti v tahu za ohybu .....	77
Tabulka 18 Změřena zkušební desky pro zkoušku absorbované energie.....	80
Tabulka 19 Hodnoty měření zkušebních těles LWSCC 3 .....	82
Tabulka 20 Rozměry zkušebních deskových těles ze záměsi LWSCC 4.....	83
Tabulka 21 Vyhodnocení betonu při zatížení 25 g výbušniny .....	89
Tabulka 22 Vyhodnocení betonu při zatížení 50 g výbušniny .....	91
Tabulka 23 Vyhodnocení betonu při zatížení 100 g výbušniny .....	94
Tabulka 24 Vyhodnocení záměsi betonu při zatížení 150 g výbušniny .....	96

## Seznam grafů

Graf 1 Graf znázorňuje rostoucí trend v počtu úmrtí v důsledku teroristických útoků. [41]	29
Graf 2 Graf vyjadřující válcové pevnostní třídy. [42]	30
Graf 3 Friendladerova rovnice - časový průběh tlaku v dané vzdálenosti od místa výbuchu [31], [32]	34
Graf 4 Průběh maximální přetlaku v různých vzdálenostech od místa výbuchu za daný časový interval [31]	35
Graf 5 Porovnání různých betonů v tahu za ohybu [24, 44]	44
Graf 6 Pracovní diagram v tahu drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) [13]	46
Graf 7 Rozlití kužele v čase $t_{500}$	56
Graf 8 Naměřené rozlití u zkoušky sednutí-rozlitím kužele	56
Graf 9 Objemová hmotnost čerstvého betonu	58
Graf 10 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu jednotlivých záměsí (jak bylo dodáno)	60
Graf 11 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po vysušení	62
Graf 12 Graficky znázorněny výsledné krychelné pevnosti jednotlivých záměsí	64
Graf 13 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro obyčejný LWSCC 1 Betonárna	67
Graf 14 Průměrný diagram pro záměs LWSCC 2	68
Graf 15 Charakteristický diagram odolnosti odvozené ze zkoušek ohybem	69
Graf 16 Průměrný diagram odolnosti pro záměs LWSCC 3	72
Graf 17 Průměrný a charakteristický diagram záměsi LWSCC 3	73
Graf 18 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu ze záměsi LWSCC 4	75
Graf 19 Průměrný a charakteristický diagram odolnosti LWSCC 4	75
Graf 20 Porovnání průměrných hodnot záměsí	77
Graf 21 Porovnání pevnosti v tahu za ohybu	78
Graf 22 Závislost zatížení na průhybu ze záměsi LWSCC 2	80
Graf 23 Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSSC 2	81
Graf 24 Závislost zatížení na průhybu ze záměsi LWSCC 3	82
Graf 25 Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSCC 3	82
Graf 26 Závislost zatížení na průhybu ze záměsi LWSCC 4	84
Graf 27 Absorbovaná energie ze záměsi LWSCC 4	84
Graf 28 Porovnání průměrných křivek v závislosti zatížení na průhybu	85
Graf 29 Porovnání výsledků absorbované energie	86

Graf 30 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 25 g výbušiny .....	91
Graf 31 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 50 g výbušiny .....	93
Graf 32 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 100 g výbušiny .....	95
Graf 33 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 150 g výbušiny .....	97



# ÚVOD

Tématem této diplomové práce je problematika lehkých samozhutnitelných vláknobetonů se zaměřením na pevnostní charakteristiky způsobené mimořádným zatížením. Speciální beton, kterým lehký vláknobeton je, lze využít jako beton konstrukční či tepelně izolační. Velikou výhodou je, že jeho objemová hmotnost je oproti prostému betonu výrazně nižší. Vylehčení probíhá pomocí lehkého kameniva, které je buď přírodní nebo umělé. Kombinace lehkého samozhutnitelného vláknobetonu není u nás častá, ale vyskytuje se, především k výrobě prefabrikátů.

Vláknobeton je dnes čím dál tím více využívaným kompozitem v oblasti stavitelství. Vlastnost kompozitních materiálů s rozptýlenou výztuží nacházíme v oblastech, které jsou namáhané rázem, otřesem či výbuchem.

Diplomová práce je koncipována do dvou hlavních částí. V první části se práce zabývá teorií v oblasti chování vláknobetonu při mimořádných zatížení jako je například výbuch. Dále v této první části bude řešena teorie absorbované energie, která úzce souvisí s hodnocením výbuchové odolnosti těles, kde se proti sobě staví schopnost tlumit rázové vlny a pevnost.

Část druhá, experimentální, se zabývá destruktivním zkoušením jednotlivých zkušebních těles. Různě vyztužená tělesa jsou v experimentální části vystavená mimořádným zatížením, a to konkrétně výbuchům. V této experimentální části týkající se výbuchů jsou řešeny zkoušky absorbované energie, zkouška pevnosti v tlaku nebo zkouška pevnosti v tahu za ohybu jako klíčové pro závěrečné vyhodnocení odolnosti vůči výbuchu.

# CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle diplomové práce jsou následující:

- Zachytit historický, současný a budoucí stav poznání lehkých samozhutnitelných drátkobetonů
- Popsat teorii mimořádných zatížení - výbuchy
- Shrnout zkoušky potřebné ke stanovení odolnosti vůči výbuchu
- Zkouškou objemové hmotnosti ztvrdlého betonu ověřit třídu objemové hmotnosti 1,8
- Zkouškami - pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu vyhodnotit a porovnat pevnostní charakteristiky lehkého samozhutnitelného betonu o různém druhu vyztužení
- Zkouškami týkajících se odolnosti vůči výbuchu vyhodnotit a porovnat lehký samozhutnitelný beton o různém druhu vyztužení
- Popsat závěrečné vyhodnocení zkoušek a jejich ohlas do praxe

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Teorie lehkých samozhutnitelných drátkobetonů

### 1.1. Historie lehkých samozhutnitelných drátkobetonů

**Vláknobeton** je materiál, který pokročil od drobných aplikací k využití v konstrukcích. Jeho rozvoj v uplatnění je umožněn neustálým zdokonalováním vlastností drátků či vláken. Všeobecné přimíšení vláken za účelem zvýšení pevnosti stavební hmoty je dávný vynález, který má svůj počátek ve starověké civilizaci. Vytvořit kompozit se zvýšenou houževnatostí a pevností se v dávné historii tvořila pomocí přírodních vláken například slámy. Využití drátkobetonu jako kompozitního materiálu s rozptýlenými ocelovými vlákny započal v šedesátých letech 20. století. Problém však nastal v nedostatku ocelových vláken na trhu. V devadesátých letech 20. století se výroba ocelových drátku začala značně rozvíjet. Dnes se výrobou zabývá řada výrobců jak v tuzemsku, tak v zahraničí. [16]

**Lehké betony** mají svůj počátek také už v dávné historii. Už během období 3000 let př. n. l., teda v období začátku doby bronzové se lehké betony podílely na výstavbě slavných měst Mohenjo-Daro a Harappa. Kamenivo používané pro výrobu lehkého betonu bylo sopečného původu. V Evropě se lehký beton nejprve využil v Římě k budování slavných staveb jako jsou Pantheon či Koloseum. Římané používali přírodní kamenivo nejen do stavebních konstrukcí, ale i do tzv. římského litého zdiva. Použité přírodní lehké kamenivo „pemza“ nachází své uplatnění i dnes ve vyspělých zemích jako jsou Itálie, Německo, Japonsko či Island. Poptávka po přírodním lehkém kamenivu neustále narůstala, jako reakce na rostoucí poptávku se po celém světě začaly vyvíjet technologie na výrobu přírodních lehkých kameniv. Stephen J. Hayde v roce 1918 zavedl technologii expandace břidlic, kterou vzniklo kamenivo „Haydite“. Toto umělé kamenivo se dodnes v USA vyrábí a nachází uplatnění v prostém, železovém i předpjatém betonu. Kolem roku 1960 byl v Evropě velký rozvoj ve výrobě kameniva na bázi expandovaných jílu. V šedesátých letech 20. století byly dokonce pořádány konference v tehdejší Československu týkající se výroby tohoto kameniva. Po roce 1968 však byla mezinárodní spolupráce z politických důvodů ukončena. V některých evropských zemích se pro výrobu lehkého kameniva používal elektrárenský popílek. [14]

**Samozhutnitelný beton (Self-Compacting Concrete) SCC** je řazen do speciálních betonů. Tento speciální beton nebo jemu podobné jsou prakticky využívány od roku 1975,

a to v několika zemích po světě. Mezi prvními bylo však Japonsko, kde první recepturu v roce 1988 představil Kazumasa Ozawa z Univerzity v Tokiu. Tento beton byl nejprve řazen jako vysokohodnotný až po nějaké době byl název upraven na SCC, název si nese až dodnes. V Evropě se tato technologie speciálních betonů dostává kolem roku 1985. Postupně se v Japonsku a následně v ostatních zemích po světě začíná tato technologie využívat na stavbách většího měřítka. V druhé polovině 90. let se nově založená technická skupina nazývaná TC145-WSM (později TC145-SCC) pod vedením mezinárodního technického výboru RILEM, pracuje na sjednocení zkoušení a pravidel SCC. V roce 2000 na základě studií a různých konferencí vzniká Evropská směrnice pro samozhutnitelný beton. [15]

## **1.2. Současnost**

### **1.2.1. Složení lehkého samozhutnitelného vláknobetonu**

Lehký samozhutnitelný vláknobeton je složen ze tří speciálních stavebních materiálů. Požadavky na lehké samozhutnitelné betony s výjimkou požadavků na nízkou objemovou hmotnost jsou identické, jako u běžných samozhutnitelných betonů. Rozdíl oproti běžnému samozhutnitelnému betonu je v kamenivu, kde u lehkých SCC betonů je používáno pórovité kamenivo, díky němuž se objemová hmotnost betonu výrazně snižuje. Norma „ČSN EN 206 +A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba“ a shoda definuje lehký beton s objemovou hmotností do 2000 kg/m<sup>3</sup>. [12]

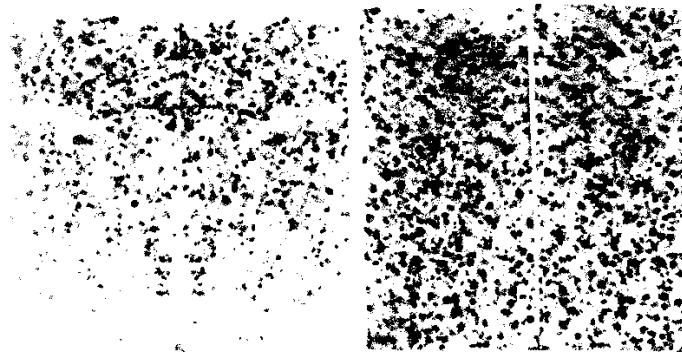
Složení lehkého samozhutnitelného betonu vychází z vyššího poměru cementové matrice ku kamenivu, než je tomu u betonu prostého. To znamená že objem cementové matrice musí být vyšší než kamenivo, aby docházelo k pohybu kameniva vlivem gravitační síly či vlivem tlaku během čerpání betonu. U složky kameniva tak musí dojít ke zmenšení jak velikosti maximálního zrna, tak i k celkovému objemu hrubého kameniva.

V Japonsku došli k názoru, že pro úspěšnou výrobu SCC je nutné respektovat následující pravidla:

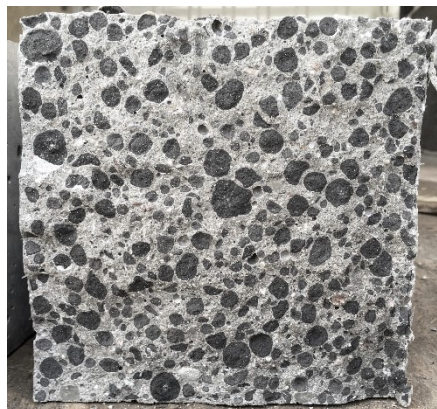
- 1) Objem cementu + příměsí (musí ležet v intervalu 170-200 l/m<sup>3</sup>)
- 2) Objemový poměr záměsové vody / (cement + příměsí)  $\neq$  {0,85 – 1,20}
- 3) Objem hrubého kameniva by měl být do 340 l/m<sup>3</sup> a  $d_{\max} \leq 20$  mm.

Lehký samozhutnitelný beton nachází své uplatnění například v lehkých izolačních dílech pro realizaci rodinných domů. Největším problémem při výrobě těchto lehkých samozhutnitelných dílů byla segregace kameniva z expandovaných jílu. Zabránění segregace se zajistila pomocí stabilizačních přísad. Segregaci zvyšuje i nadbytek jemných materiálů (cement + například jemně mletý vápenec), což činí směs příliš viskózní a snižuje její mobilitu. Dále segregaci kameniva zvyšuje poměr vody/jemným složkám (2), jakmile je hodnota vyšší než 1,20, tak je směs příliš řídká, kdežto pod hodnotou 0,85 naopak moc hustá.

Dále bylo prokázáno, že ocelové drátky nemají vliv na segregaci lehkého kameniva. [6, 12]



*Obrázek 1 Vlevo segregující LWSCC beton směrem k povrchu, ve srovnání vpravo s nese segregujícím LWSCC [12]*



*Obrázek 2 Nese segregující lehký samozhutnitelný beton [vlastní foto]*

Lehký samozhutnitelný beton vyztužený vlákny má stále plno neznámých. Této oblasti se věnoval například Mazaheripour a kolektiv [47], který prokázal, že polypropylenová vlákna nemají žádný vliv na chování pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. U vysokého přídavku ocelových vláken do směsi však může dojít k poklesu pevnosti v tlaku, a to v důsledku snížení



hutnosti. Nicméně v pevnosti v tahu za ohybu dochází ke zvýšení pevnosti v důsledku přítomnosti polypropylenových vláken.

Lehké samozhutnitelné vláknobetony jsou velmi náročné na zpracovatelnost. Přidáním ocelových vláken nad 2% vyztužení záměsi klesá zpracovatelnost LWSCC pod stanovené limity. U lehkého samozhutnitelného vláknobetonu bylo prokázáno zkouškou V-funnel test, že ocelová vlákna mají za následek zpomalení tekutosti betonu. S vysokým procentem vyztužením ocelových vláken se tak snižuje průchodnost skrz výztuž. [35], [46]

Směsi z lehkého samozhutnitelného kameniva obsahující vysoký obsah lehkého pórovitého kameniva mají za následek snížení pevnosti v tlaku a ohybu. [46]

### **1.2.1.1.Kamenivo**

Ve stavebnictví se kamenivo používá jako plnivo, které s vhodnými pojivy tvoří finální stavební materiál. Kamenivo by dále mělo splňovat pevnostní charakteristiky, zejména odolnost vůči tlaku. Požadavky na kamenivo jsou specifikovány v normách. Kameniva dělíme na těžké, hutné a pórovité. V lehkých betonech se využívá pórovité kamenivo, které je specifikované v evropské normě „ČSN EN 13055 Pórovité kamenivo“. Kamenivo je sypký materiál, který zaujímá kolem 75 % objemu betonu. Snaha kameniva vytvořit pevnou kostru v betonu s minimální mezerovitostí se provádí pomocí různě velkých zrn ve vhodném poměru. Pro výrobu betonu se používají zrna o maximální velikosti 32 mm. U lehkých betonů je velikost maximálního zrna 16 mm. Kamenivo použité do betonu musí být v souladu s „ČSN EN 12620 + A1 Kamenivo do betonu“.

#### **1.2.1.1.1. Pórovité kamenivo**

Pórovité kamenivo nachází uplatnění při výrobě lehkých betonů. Objemová hmotnost pórovitých kameniv je do 2000 kg.m<sup>-3</sup>. Kamenivo jako zrnitý anorganický materiál má původ přírodní nebo umělý. Pórovité kamenivo dodává betonům lepší tepelněizolační vlastnosti, což nachází velké uplatnění například v prefabrikovaných dílech stěn pozemních staveb. [17, 18, 46]

#### **1.2.1.1.2. Přírodní pórovité kamenivo**

Na rozdíl od umělého pórovitého kameniva lze přírodní pórovité kamenivo využít ihned po vytěžení, podrcení a roztřídění. Jakmile se tato aplikace provede je kamenivo po transportu do

betonárny připravené k výrobě čerstvého betonu. Lehké přírodní kamenivo má mikro až makropórovitou strukturu. [17, 18]

- **Přírodní lehké pórovité kamenivo**

Výroba lehkých betonů s anorganickými plnivy je složena z přírodního kameniva vulkanického původu. Nejznámějšími typy přírodního pórovitého kameniva jsou Vulkanické tufy a tufity, Vulkanická láva a pemza či Diatomity.

**Vulkanické tufy a tufity** jsou horniny sopečného původu s výskytem na Slovensku. Drcený tuf obsahuje prach, který se odstraňuje praním zrn. Jeho objemová hmotnost se pohybuje v suchém stavu od 1000 kg/m<sup>3</sup> až 1600 kg/m<sup>3</sup>.

**Vulkanická láva a pemza** vznikly při vulkanických erupcích. **Láva** se vyskytovala na Slovensku a odtamtud se dovážela i na Moravu. Zbarvení lávy je nejčastěji do hněda, šedomodra až šedočerna. Většina pórů je uzavřená, protože při vzniku její pórovitost vznikla díky prudkému uvolnění plynů a par z magnátu. Objemová hmotnost v suchém stavu se pohybuje od 750 až po 1700 kg/m<sup>3</sup>. **Pemza** na rozdíl od lávy má zbarvení více do bělavé, šedavé či žlutavé barvy. Vyskytuje se především v Arménii či v severním Kavkaze. Pórovitost dosahuje až 80 %, čímž není schopna pohlcovat vzdušnou vlhkost, jelikož velmi rychle vysychá. Objemová hmotnost písku se pohybuje od 550-800 kg/m<sup>3</sup> a drti od 300-600 kg/m<sup>3</sup>.

**Diatomity** neboli křemelina vznikla sedimentací křemičitých skořápek. Křemelina se vyskytuje v mnoha zemích například v Rusku, v USA, ve Francii či v ČR. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 600-900 kg/m<sup>3</sup>. [17], [18]

### 1.2.1.1.3. Umělé pórovité kamenivo

Umělé lehké pórovité kamenivo se nejčastěji vyrábí tepelným zpracováním přírodních materiálů např. (jílu či břidlice), průmyslových produktů např. (skla) a průmyslových vedlejších produktů např. (popílku).

## 1. Umělé lehké pórovité kamenivo z přírodních látek

Nejznámějšími typy umělého pórovitého kameniva vyráběného z přírodních látek jsou **Liapor, Leca či Perlit**.

V ČR se nejčastěji pro výrobu lehkých betonů využívá lehké kamenivo z expandovaného jílu, které se prodává pod obchodní značkou **Liapor**. Z Liaporu se vyrábí jak hutné lehké

betony, tak mezerovité lehké betony. Keramické kamenivo Liapor je vyráběno v Evropě, a to z plastifikovaných třetihorních jííl pomocí vypalování v rotačních pecích. Produkt je závislý na vstupních surovinách, kterými jsou tvrdší břidlice, anebo plastické jíly. Vynikající vstupní surovinou jsou třetihorní cypřišové jíly ze sokolovské pánve, ze které se v závodu Lias Vintířov vyrábí kamenivo Liapor. V závodu Vintířov, který leží v okrese Chomutov je lehké keramické kamenivo vyráběno plastickým postupem bez jakýchkoliv přísad. Díky vynikajícím vlastnostem jílu i technologii zpracování je Liapor jedním z nejlehčích kameniv na světě. Jíl je nejprve v několika stupních drcen a plastifikován. Následně vytvořené granule v rotační peci při teplotě okolo 1150 °C expandují. Expandovaný granulát je zchlazen a následně pomocí třídící linky tříděn na jednotlivé frakce. Jednotlivé frakce jsou uloženy v uzavřených silech. Kamenivo Liapor má velkou využitelnost ve stavebnictví a z tohoto důvodu musí být pečlivě kontrolován z hledisek mechanicko-fyzikálních a chemických vlastností nebo také z hlediska zdravotní nezávadnosti. Z Liaporu tak lze vyrobit jak tepelněizolační lehký beton, tak konstrukční lehký beton. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 700-1700 kg.m<sup>3</sup>. Pevnost v tlaku se mění v závislosti na objemové hmotnosti, běžný rozsah pevnosti je od 10 do 35 MPa. [19], [20], [21]



*Obrázek 3 Keramické kamenivo Liapor (frakce 8-16 mm) [19]*

**Expandovaný perlit** je přírodní lehké kamenivo zbarvené do šedobíla. Vyniká především výbornými tepelnými a zvukověizolačními vlastnostmi či velkou tepelnou odolností a nízkou objemovou hmotností. Expandovaný perlit má hustotu okolo 2350 kg.m<sup>3</sup>, má velmi dobré tepelněizolační vlastnosti, ale naopak velkou nasákavost a malou pevnost. Jeho výroba je z rozemletého vulkanického skla. Má díky tomu velmi podobné vlastnosti i chemické složení jako sklo, neboť patří ke kyselým vulkanickým sklům jako je například pemza. Při teplotách

900–1300 °C perlit expanduje na granule ve formě drobných dutých kuliček o maximální velikosti 4 mm. [17], [18], [21]



*Obrázek 4 Expandovaný perlit [18]*

## 2. Umělé lehké pórovité kamenivo z průmyslových odpadů

Uměle upravené průmyslové odpady jsou vhodné především z hlediska hygienických limitů. Naopak nevýhodou kameniv z průmyslových odpadů je kolísavost složení, která následně ovlivňuje kvalitu betonu. Nejznámějšími typy z hlediska používání jsou struska, recyklát z lehkého betonu, Agloporit, Rugen, škvára a spékané popílký.

**Spékané popílký** se vyrábí z popílký a vody, které se postupně vypalují na granulačních talířích. Hotové granule se suší a vypalují při teplotě 1100-1250 °C, jejich sypná hmotnost je 640-920 kg.m<sup>-3</sup>. Nasákavost se pohybuje kolem 18 % a to z důvodu poměrně uzavřeného povrchu granulí.

**Škvára** je odpad, který vzniká ze spalování pevných paliv (uhlí). Při spalování se všechna škvára nespálí a vzniknou tak nebezpečné zbytky, které jsou limitovány maximálním obsahem 10 %. Sypná hmotnost škváry se pohybuje okolo 850 kg.m<sup>-3</sup>.

**Struska** vzniká roztavením kovové rudy a náhle prudkým zchlazením žhavé strusky vodou. Do betonu se využívá jako kamenivo nadrcená struska v požadovaných frakcích, a to bez hydraulických vlastností.

**Agloporit** je druh pórovitého kameniva, který vzniká z elektrárenského popílký vypálením na aglomeračním roštu. Jeho uplatnění je jak pro tepelněizolační betony, tak pro konstrukční betony. Nasákavost je hodně obdobná jako u spékaných popílků, a to v rozmezí 17-21 %.

Objemová hmotnost agloporitu se pohybuje v hodnotách 1000-1500 kg.m<sup>-3</sup>. Výroba v ČR je v současnosti pozastavena pro ekonomickou náročnost. [21], [22]

**Rugen** je lehké umělé kamenivo, které se vyrábí z jemných odpadních materiálů v energetickém průmyslu za přirozených teplot. Kamenivo Rugen se dodává v různých frakcích od 0/2, 2/4, 4/8 a 8/16. Mezi výhody patří vysoká pevnost naproti konkurenci, mimořádně rychlá nasákavost, nehořlavost či nízká objemová hmotnost. Jeho sypaná objemová hmotnost je přibližně od 600 kg.m<sup>-3</sup>. Kamenivo Rugen lze použít pro výrobu lehkých hutných betonů, porizovaných betonů, mezerovitých betonů či samozhutnitelných betonů.[23]



*Obrázek 5 Kamenivo Rugen 8/16 [vlastní foto]*

### **1.2.1.2.Voda**

Voda používaná při výrobě lehkého samozhutnitelného drátkobetonu musí splňovat kvalitativní požadavky a zároveň musí být v souladu s „ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu“. Zdroje vody používané pro výrobu betonu jsou následující: pitná, podzemní, povrchová, odpadní průmyslová či mořská voda. Pitná voda může být jako jediná použitelná bez zkoušení. Voda splašková není pro výrobu vhodná. Při výrobě drátkobetonu se vodní součinitel doporučuje do 0,5. Voda v betonářské technologii plní dvě funkce, a to hydratační a reologickou. Hydratační funkce znamená, že cement díky vodě hydratuje a tím vytváří tuhou strukturu cementu. Zdroje uvádí, že minimální množství vody pro hydrataci cementu je 23% hmotnosti cementu. Reologickou funkcí je vytvoření tvárného čerstvého betonu. Důležité je použití ošetřovací vody pro udržení betonu ve vlhkém stavu. [20]



### 1.2.1.3. Cement

Pro výrobu lehkého samozhutitelného drátkobetonu lze použít cement, který je v souladu jak s kvalitativními požadavky, tak s evropskou normou „ČSN EN 197-1 ed.2 Cement“. Výběr správného použití cementu se stanoví dle požadované: tlakové pevnosti, rychlost hydratace, agresivitu prostředí a samozřejmě také cenu cementu. Cement je hydraulické pojivo, které po styku s vodou vytváří hmotu, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Pokud dojde k dovršení minimální pevnosti zachovává svoji pevnost a stálost i ve vodě. [1], [20].

### 1.2.1.4. Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, používající se do betonu během míchání v množství 0,2 – 5 % hmotnosti cementu. Hlavní důvod použití přísad v betonu je modifikace vlastností čerstvého nebo tvrdnoucího betonu. Výrobce přísad stanovuje maximální dávkování, které se nesmí překročit. V případě, že množství tekuté přísady převyšuje 3 l/m<sup>3</sup> betonu, pak se musí zohlednit množství vody pro výpočet vodního součinitele. Pokud se použije více jak jedna přísada, tak je důležité ověřit při průkazných zkouškách jejich vzájemnou snášenlivost. Řada evropských norem se zabývájí přísadami do betonu, například: „ČSN EN 934 Přísady do betonu, malty a injektážní malty“.

Rozdělení přísad: plastifikační, superplastifikační, stabilizační, provzdušňovací, urychlující tuhnutí, urychlující tvrdnutí, zpomalující tuhnutí, těsnící a ostatní.

Pro drátkobeton s vyššími pevnostními charakteristikami lze přísady využít k ovlivňující zpracovatelnosti drátkobetonové směsi. Přítomnost přísad je vyvolána vyššího obsahu vláken.

Při výrobě lehkých betonů se občas využívá stabilizační přísada k omezení náchylnosti lehkého betonu k rozměšování a odsávání vody. Plynotvorné a pěnotvorné přísady se používají při výrobě mezerovitých lehkých betonů, a to ke zvýšení obsahu pórů. [1], [20]

### 1.2.1.5. Příměsi

Příměsi, které se přidávají do betonu jsou jemné anorganické nebo organické látky. Cílem použití příměsí v betonu je zlepšit jeho vlastnosti nebo dosáhnout požadovaných vlastností. Dle normy „ČSN EN 206 +A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba“ rozeznáváme dva typy

příměsí. Typ I.: Jsou to téměř inertní příměsí, např. (filery či pigmenty). Typ II.: Jsou to pucolány nebo latentní hydraulické příměsí, např. (popílek či struska). Typ II. má skrytou schopnost se hydratace zúčastnit, kdežto typ I. se procesu hydratace nezúčastňuje. Při výrobě drátkobetonu se setkáváme s využitím příměsí častěji, nežli je tomu u klasických obyčejných betonů. Cílem je zlepšení požadovaných vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Příměsí se většinou dávkuje ve větším množství než přísady, proto se musí zohlednit objemové skladby cementu. [1], [20]

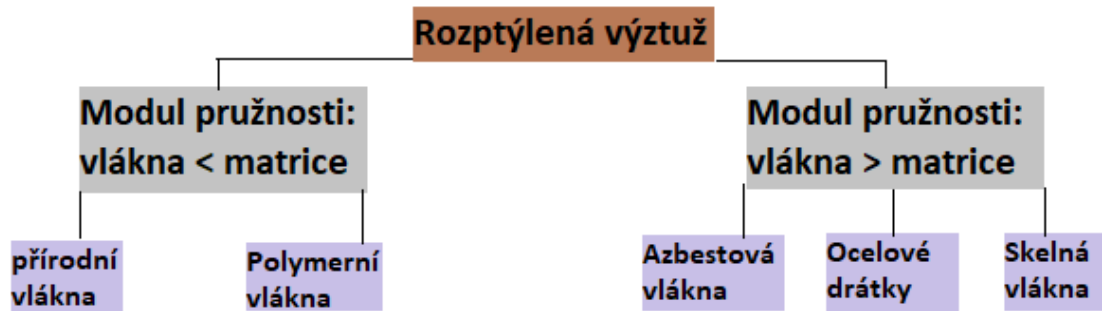
#### **1.2.1.6. Rozptýlená výztuž**

Rozptýlená výztuž má dvě základní funkce. První je vyloučení nebo alespoň omezení vzniku trhlin, a to jak během zrání, tak i v průběhu užívání. Druhou funkcí je zvýšení pevnosti v tahu v době zralosti. Betony doplněna o rozptýlenou výztuž dosahují lepších fyzikálně mechanických vlastností, a to v důsledku zabránění smršťovacích trhlin v prvních hodinách hydratačního procesu. Samonivelační podlahové betony vyztužené rozptýlenou výztuží vytváří houževnatý pevný materiál bez trhlin. [12, 21]

Záměsí z lehkého samozhutitelného betonu vyztužené rozptýlenou výztuží výrazně zvyšují houževnatost po vzniku makrotrhlin. Rozptýlená výztuž přemostuje vzniklé trhliny a tím napomáhá ke zvýšení houževnatosti navržené směsi. [48]

Modul pružnosti hraje značnou roli při výběru rozptýlené výztuže pro různé druhy použití. Nízkomodulová organická vlákna mají schopnost vyztužit beton v prvních hodinách tuhnutí a tím zabránit povrchovému odpařování vody. V tomto směru jsou skleněná vlákna na tom o něco ještě o něco lépe. Nejlépe však tuto funkci plní ocelové drátky nebo skleněná vlákna či skleněné provazce. Ve všech případech vyztužení rozptýlenou výztuží hraje roli stanovení technologie a ekonomické hledisko. [12, 21]

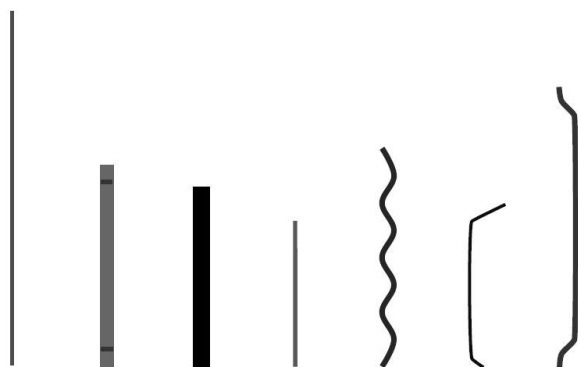
V této práci jsou zmíněny pouze nejběžnější typy rozptýlené výztuže viz. obr 6.



Obrázek 6 Rozdělení rozptýlené výztuže [vlastní]

**Polymerová vlákna** spadají do skupiny syntetických vláken. Tato vlákna jsou velmi jemná a jsou balena v rozmezí od 0,6 do 1 kg. Optimální dávkování těchto vláken se pohybuje okolo  $1 \text{ kg/m}^3$ . Vlákna s matricí vytvoří všesměrnou vlákennou mříž, která zabraňuje vzniku trhlin. Dále přispívají ke zvýšení výsledné pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v rázu či požární odolnosti. [12, 21]

**Ocelová vlákna** jsou nejstarším typem používaných vláken s matricí. Ocelové drátky jsou vyráběny z válcovaného materiálu od kruhových, oválných přes čtvercové a obdélníkové průřezy. Ocelové drátky se vyrábějí v různých délkách a tvarech. Tvar i délka mají značný vliv na soudržnost s matricí. [12, 13, 21]



Obrázek 7 Drátky do betonu o různém tvaru a délce [40]

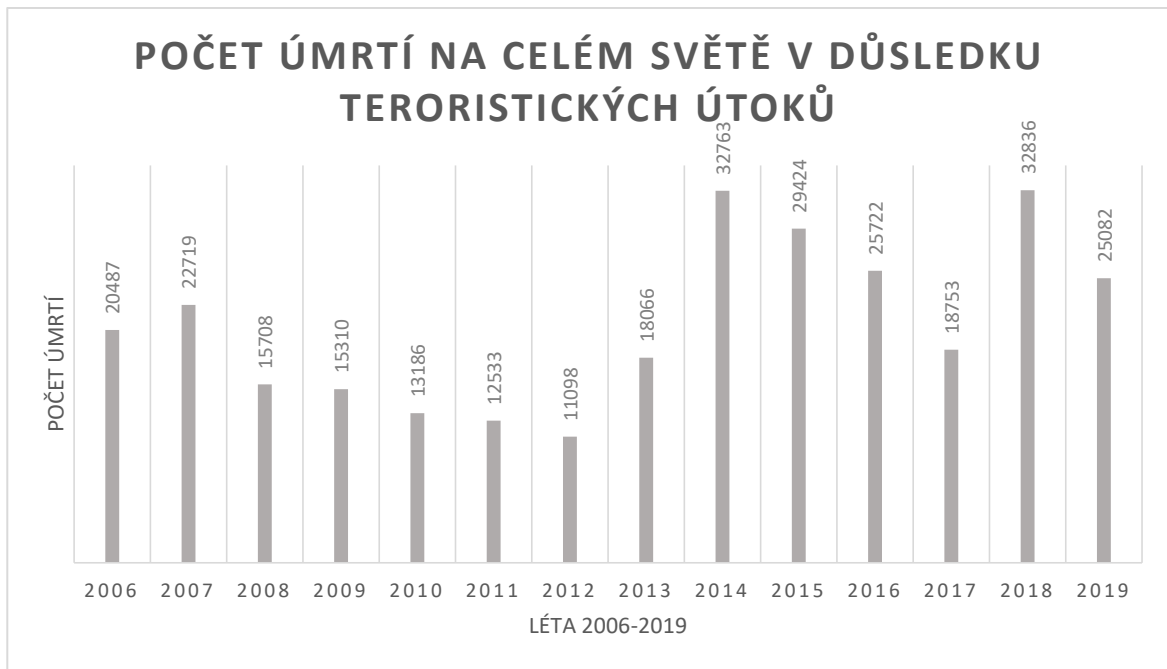
Dávkování ocelových drátů se pohybuje v rozmezí od 30 do 90  $\text{kg/m}^3$ , a to podle požadavku na výslednou pevnost. Při správném použití ocelových drátů v cementovém betonu se zlepšují vlastnosti jako pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem nebo pevnost ve smyku. Dále se zvyšuje odolnost proti rázům nebo výbuchům. Ocelové drátky dnes nacházejí čím dál vyšší uplatnění v různých typech staveb.

## 2. Teorie mimořádných zatížení – výbuchy

### 2.1. Úvod

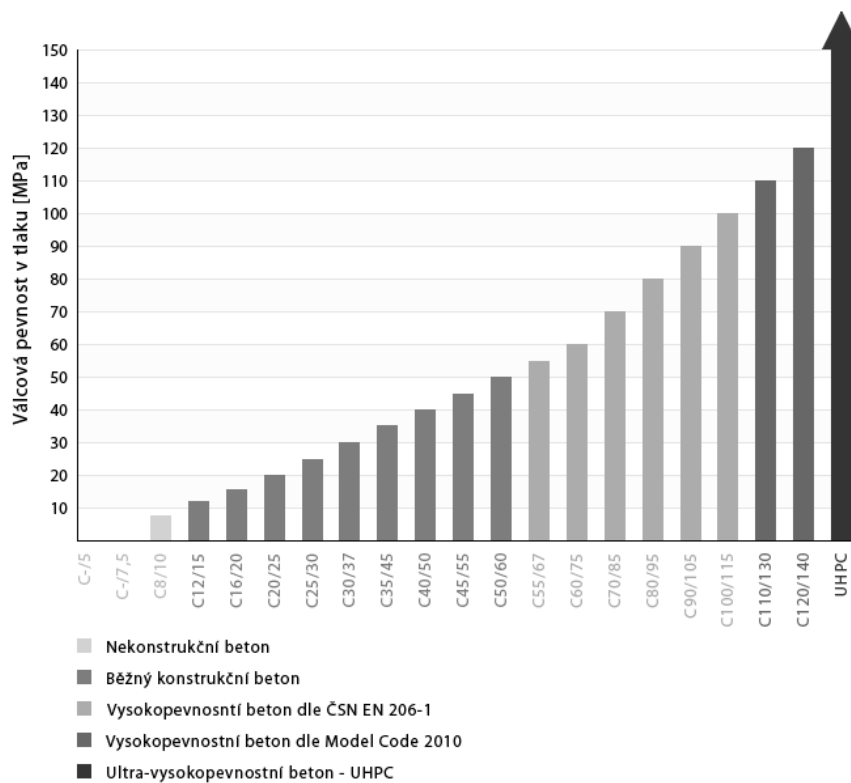
V posledních letech se o hrozbě teroristických útoků stále více hovoří i píše. Nedostatečné zabezpečení strategický cílů v jednotlivých zemích se považuje za poměrně nebezpečné. Spojené státy americké od roku 2005 sledují a vydávají zprávy o vývoji terorismu ve světě. Mezi teroristické metody patří například atentáty, výbuchy či únosy osob. Ze statistik úmrtí v důsledku teroristických útoků je pozorován rostoucí trend útoků. Útoky bývají zaměřené hlavně na veřejné budovy, jejichž stavební řešení má nižší ochranné prvky před účinky výbuchových vln. [25]

Použití vhodného materiálu a konstrukčního řešení může být vhodnou a jednoduchou volbou v odolnosti staveb vůči útokům. Stavby, které mají nosný systém řešen pouze z železového betonu (prutová výztuž) nejsou nejvhodnějším návrhem vůči těmto teroristickým nebezpečím. Beton, který společně s prutovou železovou výztuží vytváří nosný prvek však v prostoru mezi pruty zůstává stále kvazi-křehkým materiálem (v okamžiku dosažení meze pevnosti materiál ztrácí schopnost přenášet další zatížení a tím dochází k jeho naprostému porušení), a tím dochází k proražení betonu. Lze konstatovat, že ani případný nárůst objemu použité betonářské prutové výztuže nemůže značně zvýšit odolnost vůči výbuchu. Změna skladby betonu, a to zejména přidáním rozptýlené výztuže může napomoci zvýšit odolnost materiálu vůči výbuchu. [25]



*Graf 1 Graf znázorňuje rostoucí trend v počtu úmrtí v důsledku teroristických útoků. [41]*

V souvislosti současných politických situací po celém světě a růstu počtu úmrtí v důsledku teroristických útoků na objekty dopravní a veřejné infrastruktury je nutné věnovat pozornost odolnosti staveb vůči výbuchu. Například mostní stavby představují nebezpečí, které představují militantní extrémisti všeho druhu. V posledních letech se věda snaží zabývat zkoumáním materiálů, které by mohli být co nejvíce účinné jako prevence vůči teroristickým útokům. Jedním z materiálů je ultra vysokopevnostní vláknobeton, který je relativně nový konstrukční materiál a dosahuje především vyšších tlakových pevností nebo houževnatosti. Houževnatost je dosažena především přidáváním ocelových vláken do betonové směsi. Výsledkem jsou pevnosti, které jsou v tlaku vyšší jak 150 MPa a v tahu přibližně 30 MPa. Výhodou tohoto vláknobetonu je teda vysoká pevnost, která umožňuje zmenšit průřezy konstrukcí a tím i snížit hmotnost celé konstrukce, či umožnit realizaci architektům a plnit jejich požadavky. Obrovskou výhodou je i delší životnost, která se obecně uvádí více než 200 let. V grafu 2 je možné si všimnout nevyztuženého ultra vysokopevnostního betonu a jeho pevnostní dominanci. [25]



Graf 2 Graf vyjadřující válcové pevnostní třídy. [42]

Konstrukce zatížené výbuchy nevznikají pouze od teroristických útoků, ale také výbuchy od výbušných látek, výbušných plynů nebo kapaliny tvořící výbušné páry. Relativně často k výbuchu dochází při výbuchu plynu v obytných budovách (například v zimě roku 2019 výbuch plynu v panelovém domě v Prešově).

## 2.2 Praktické ukázky, kde po výbuchu došlo k demolici

**Výbuch v Prešově** byl zapříčiněn nejspíše rekonstrukcí, která narušila plynové potrubí. Následně došlo k nahromadění plynu v horních částech budovy až došlo k explozi. Velký problém nastal při evakuaci obyvatel domu, kde došlo vlivem výbuchu ke zřícení schodiště, a tím pádem ke zpomalené záchraně lidských životů.



*Obrázek 8 Výbuch v panelovém domě na Slovensku v Prešově. [43]*

V roce 2013 došlo v **Čínské provincii Che-nan** tragická nehoda, kde na dálničním mostě vybuchl nákladní automobil převážející zábavní pyrotechniku. Most se částečně zřítil a s sebou strhl několik projíždějících vozidel. Při tragédii zemřelo nejméně 8 lidí a dalších 11 bylo vážně zraněno. Výbuch tak zapříčinil zřícení části mostu a tím i ke ztrátě lidských životů.



*Obrázek 9 Následky výbuchu nákladního automobilu s pyrotechnikou na dálničním mostě [45]*

Tato neštěstí jen potvrzují, jak důležitý je samotný návrh konstrukce, tak použitý materiál.

### 2.3. Výbuch

Definice výbuchu je popsána jako fyzikální jev, při kterém dochází k rychlému uvolnění energie a k rychlému lokálnímu zvýšení teploty a tlaku. Tento fyzikální jev probíhá v řádu milisekund, tudíž například k zaznamenání průběhu jevu je nutné mít vysokorychlostní kamery, které jsou schopny jev zaznamenat. Tento prudký nárůst tlaku, který se šíří do okolí se nazývá rázová vlna. Rázová vlna je zpravidla doprovázena zvukovým a světelným efektem. [32] Výbuchy se v principu dělí na:

1. Jaderné, kde k výbuchu dochází přestavbou atomových jader
2. Fyzikální, kde k výbuchu dochází ze změny skupenství látky nebo hybnosti
3. Chemické kde k výbuchu dochází pomocí chemické reakce

Výbuchy se dále podrobněji dělí dle tří parametrů: druhu, původu uvolněné energie a podle geometrie ve které k výbuchu dochází. Na parametry vygenerovaných rázových vln má velký vliv prostředí, v nichž k výbuchu dojde. [32] Rozlišují se tři druhy prostředí:

1. Volné prostranství, což představuje 3-D geometrii
2. Uzavřené objekty,
3. Potrubí a tunely, což představuje 1-D geometrii

Základní mechanismy výbušné přeměny spojené s uvolněním chemické energie jsou společné pro výbuchy kondenzovaných výbušnin, plynných oblaků i prachových disperzí. Tyto základní mechanismy jsou hodnoceny dle závislosti rychlosti děje, jeho tlakového projevu a také vzdálenosti, na které se účinky projevují. [31] Jedná se o tyto mechanismy:

1. deflagraci (neboli explozivní hoření)
2. přechod od deflagrace (hoření) do detonace
3. detonace

**Deflagrace** neboli explozivní hoření se vyznačuje s rychlostmi hoření v rozmezí od mm/s až do desítek m/s. Dále se vyznačuje nízkými tlaky od zanedbatelného přetlaku až do tlaku o několika MPa. Vzhledem k vysokým hodnotám rychlosti hoření tlaková vlna předbíhá reakční pásmo. [32]



**Přechod od deflagrace do detonace** charakterizuje děj dosahující tlaku o několika stovek MPa a rychlosti o několika stovek m/s. Tento děj je natolik komplikovaný, že na jehož vysvětlení zatím nebyla vytvořena ucelená teorie. [32]

**Detonace** je děj probíhající o rychlosti vyšších než 1000 m/s a je doprovázen rázovou vlnou, která je v čele tlakového pole. Rázová vlna tak způsobuje okamžitý nárůst tlaku na hodnotu jednotek až desítek GPa a v tomto případě dochází k iniciaci reakce prudkým stlačením reakční směsi či látky rázovou vlnou. Reakční pásmo tak bezprostředně doprovází rázovou vlnu. [32]

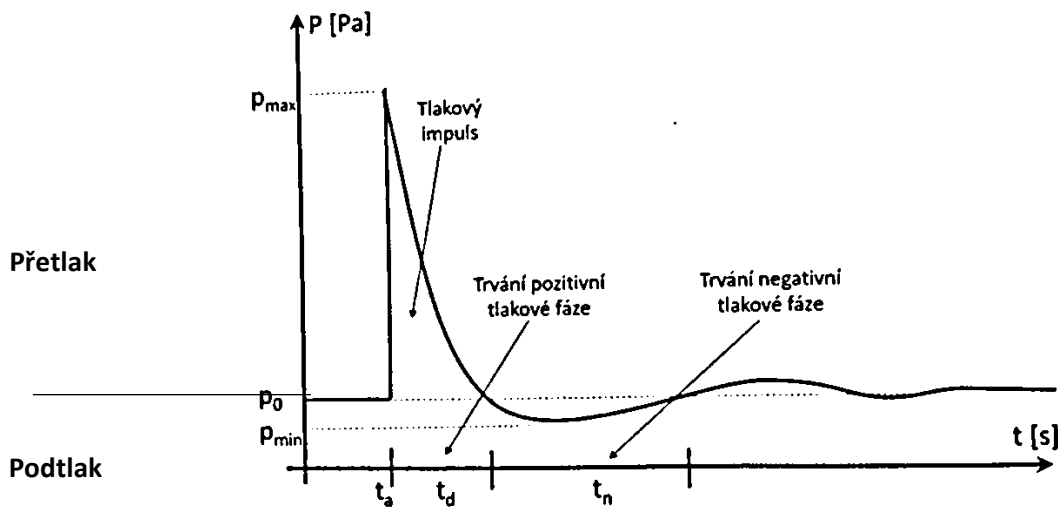
V případě hodnocení účinků výbuchu na okolí se rozlišuje několik typů výbuchu, které mají právě odlišné účinky:

- Vzdušný výbuch
- Pozemní výbuch
- Podzemní výbuch
- Podvodní výbuch

**Vzdušný výbuch (air blast)** v nichž dochází k rázové vlně, je charakterizována přetlakem v čele tlakové vlny, dále tlakovým impulsem, dynamickým tlakem a charakteristickým časovým průběhem. **Zemní výbuch (ground-shock)** v nichž dochází k rázové vlně, je charakterizována uvolněnou energií do země, která se šíří geologickým prostředím jako objemové vlnění. Pomocí geologických vrstev a terénu se energie šíří jako povrchové vlnění. Ihned při výbuchu, primárně vznikají **střepiny (fragments)** z obalu výbušniny. Sekundárně vznikají letící trosky, které jsou způsobeny tlakovou vlnou šířící se od výbuchu. Důležité je uvažovat nad jejich hmotností a vysokou rychlostí, která dosahuje rychlosti v řádu desítek až stovek m/s. Po výbuchu vzniká účinek nazývaný **kráter (crater ejecta)**, který je charakterizován hloubkou a průměrem rozrušené zeminy a výškou valu, která vznikne od výhozu zeminy. Tepelný účinek - **Teplo (heat)**, je charakterizováno v těsném okolí výbuchu, který je zapříčiněn vznikem ohnivé oblasti. [31]

Většina účinků od výbuchu se vztahují k maximálnímu přetlaku, který se nachází v čele vzdušné rázové vlny. Jejichž průběh je popsán v závislosti tlaku na čase v dané vzdálenosti od místa výbuchu pomocí Friedlanderové rovnice. Friedlanderova rovnice je zachycena v grafu 3. V grafu jsou uvedeny následující důležité parametry rázové vlny: maximální přetlak (v grafu  $p_{max}$ ), čas příchodu rázové vlny (v grafu  $t_a$ ), čas detonace (což odpovídá  $t_0$ ) a doba trvání

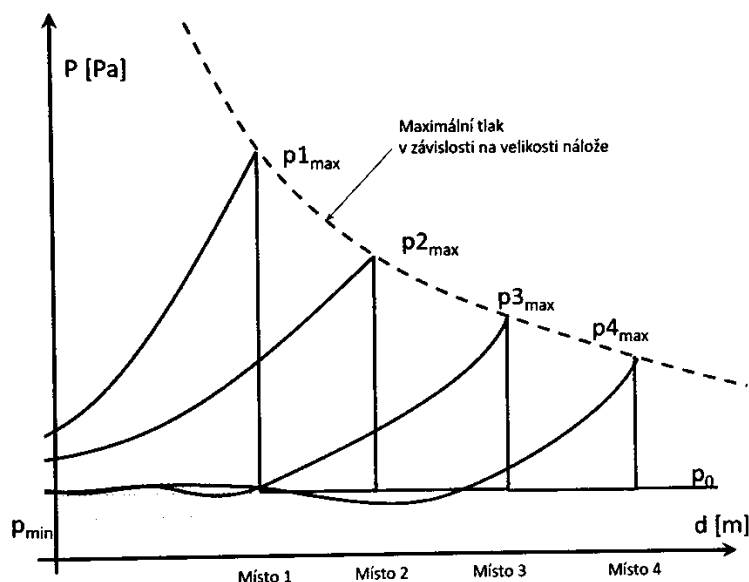
pozitivní přetlakové fáze (v grafu  $t_d$ ). Pro snadnější představu lze průběh tlaku na čase zjednodušit na trojúhelníkový tvar. [31, 32]



*Graf 3 Friendladerova rovnice - časový průběh tlaku v dané vzdálenosti od místa výbuchu [31], [32]*

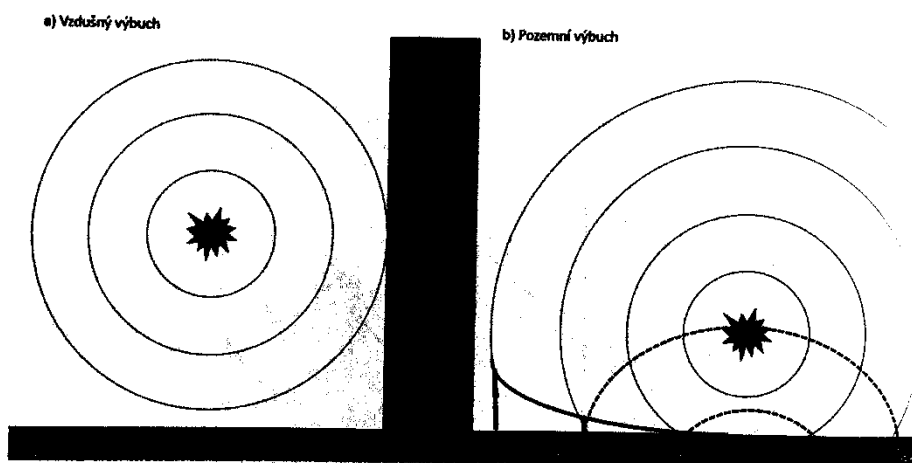
Při výpočtu základních parametrů tlakových vln pomocí rovnic jako je například: rychlost rázové vlny, rychlost částic nebo maximum dynamického tlaku, jsou závislé na hodnotě maximálního přetlaku  $p_{max}$ . Z toho vyplývá, že maximální přetlak  $p_{max}$  hraje klíčovou roli při zjednodušených postupech hodnocení potenciálních škod způsobených výbuchem, je to základní parametr posuzování. Výpočet této hodnoty se liší podle typu výbuchu, jako jsou: kondenzované výbuchy, fyzikální výbuchy a výbuchy neohrazeného oblaku par.

Často je však nutné řešit tento průběh v závislosti maximálního přetlaku a vzdálenosti od místa výbuchu. Průběh je pak popsán několika různými typy aproximačních křivek, většinou empirických, které se však mohou od různých autorů lišit. Tento průběh je graficky znázorněn v grafu 4.



Graf 4 Průběh maximální přetlaku v různých vzdálenostech od místa výbuchu za daný časový interval [31]

Při hodnocení účinků je důležité a potřebné rozlišovat, zda se jedná o výbuch vzdušný (sferický), kde se tlaková vlna šíří všemi směry stejně nebo zda se jedná o výbuch pozemní, kdy se uvolněná energie šíří po hemisférických plochách a intenzita je dvojnásobná. [31]



Obrázek 10 Šíření rázové vlny z místa výbuchu: a) vzdušný výbuch, b) pozemní výbuch [31]

Typ výbušnin hraje značnou roli v uvolnění množství energie při výbuchu a především na její měrné energii. To znamená, že různé typy výbušnin při výbuchu vytvoří rázovou vlnu o různé energii, rychlosti a tlaku. Z historického vývoje výbušnin, kdy většina empirických

vztahů byla odvozena pro TNT (trinitrotoluen). Výbušnina TNT je tak považována za etalon, ke kterému se vypočítává tzv. tritolový ekvivalent. Tento ekvivalent vyjadřuje, kolik kilogramu výbušniny TNT je potřeba, aby mělo stejné energetické účinky jako popisovaný výbuch. Ekvivalent lze vyjádřit jednak v kilogramech, ale také v poměru k použité výbušnině, a to v případě popisu účinků daného typu výbušniny [37, 31]

*Tabulka 1 Tlakový TNT ekvivalent některých výbušnin [38, 39]*

Výbušnina	Výbuchové teplo $Q_x$	TNT ekvivalent $Q_x/Q_{TNT}$
	[kJ/kg]	[-]
Amonit 1	5190,02	1,239
Azid olova	1594,68	0,382
Černý prach	2456,89	0,587
Dinitronaftalen	2908,9	0,695
Dynamit	5022,6	1,198
Hexogen	6278,25	1,499
Třaskavá rtuť	1540,26	0,368
Nitroglykol	7073,5	1,687
Semtex	5660	1,25
TNT	4520	1

#### 2.4. Zkušební tělesa jako simulace reálných konstrukcí



*Obrázek 11 Zkušební těleso o rozměrech 600x600x100 mm [vlastní foto]*

Bylo zjištěno v oblasti výbuchové odolnosti prvků ze železobetonu a vláknobetonu, že drtivá většina experimentů byla prováděna na relativně malých vzorcích. Pouze malá řada zkušebních těles je používána o jednom rozměru větším jak 2 metry. Příčiny jsou pochopitelné, a to nejen z finančních důvodů, ale také ze zkoušení i přepravy zkušebních těles. Z těchto důvodů se nejčastěji používají vzorky o ploše do 1 m<sup>2</sup>. Ovšem nevýhodou je, že používané nálože pro zkušebnictví, neodpovídají skutečným naložím, které mohou být dopraveny například pěšky jednotlivým útočníkem. [25]



Obrázek 12 Zkušební těleso o rozměrech 300x1500x6000 mm [25]

## 2.5. Popis zatížení od výbuchu

Výbuchy se musí zohlednit v návrhu konstrukce ve všech částí pozemních a inženýrských staveb, ve kterých se využívá plyn nebo se skladují výbušné látky.

Mimořádné návrhové situace, které jsou uvedeny v „ČSN EN 1990 ed. 2 Zásady navrhování konstrukcí“ se rozdělují do následujících třech tříd dle rozsahu následků poruch.

- CC1 jsou malé následky poruchy, které nevyžadují zvláštní opatření a nemusejí se tak účinky od výbuchu uvažovat
- CC2 jsou střední následky poruch, u kterých je vhodné provést zjednodušený výpočet pomocí ekvivalentních modelů zatížení

- CC3 jsou velké následky poruchy, kde je nutno provést detailní rozbor případu, pro dostačující úroveň spolehlivosti a analýzy konstrukce. U těchto konstrukcí by se měla použít dynamická analýza.

Cílem rozdělení návrhových situací do jednotlivých tříd jako prevence či ochranné opatření je odstranění nebo zmenšení porušení konstrukce. Lze to provést následným přeřazením do nižší kategorie.

Během návrhu konstrukce vystavené tlakem od výbuchu na nosnou konstrukci je nutné zohlednit reakce vnášené od nenosných částí do nosných částí konstrukce. [26]

### **2.5.1. Extrémní návrhové situace**

Návrhové situace je pojem, který je definován v „ČSN EN 1990 ed. 2 (730002). Zásady navrhování konstrukcí“ jako „soubory fyzikálních podmínek, které reprezentují skutečné podmínky vyskytující se v určitém časovém intervalu, pro který se v návrhu prokazuje, že příslušné mezní stavy nejsou překročeny“.

Stavby a stavební výrobky musí být navrženy tak, aby splňovaly určité požadavky, které jsou popsány v Eurokódech. Požadavky se zaměřují například na mechanickou odolnost, stabilitu, protipožární odolnost či stupeň robustnosti (celistvost konstrukce). Velmi důležité hledisko je robustnost konstrukce, které v normách dosud nenachází podrobnější návody pro návrhové situace na celistvé chování nosných konstrukcí staveb. Jelikož došlo k několika závažným kolapsům v inženýrských i pozemních staveb po celém světě, začalo se této problematice více věnovat. K rozvoji různých metodických postupů navrhování robustnosti a ověřování konstrukce přispělo v posledním desetiletí častější teroristické útoky. Robustnost je definována jako schopnost odolat nepříznivým jevům jako jsou výbuchy, požáry, nárazy nebo jako následek lidské chyby. [31]

Návrhové situace se klasifikují s ohledem na okolnosti, za kterých se požaduje, aby konstrukce plnila svou funkci. Klasifikace jako: trvalé návrhové situace (k běžnému používání), dočasné návrhové situace (například během opravy nebo výstavby), mimořádné návrhové situace (například výbuch, náraz nebo požár) a seizmické návrhové situace (vztaheny k podmínkám, jimiž je konstrukce vystavena během seizmických událostí). [27]

Navrhování podle mezních stavů je popsáno v ČSN EN 1990 ed. 2 (730002). Zásady navrhování konstrukcí“. V případě překročení mezních stavů již příslušná konstrukce nesplňuje

návrhová kritéria. Dělí se na mezní stav únosnosti (MSÚ) a mezní stav použitelnosti (MSP). Tyto mezní stavy se musí vztahovat k návrhovým situacím, které se kvalifikují jako trvalé, dočasné nebo mimořádné. [27]

1. MSÚ souvisí se zřícením konstrukce nebo jiným druhem poruchy konstrukce
2. MSP odpovídají podmínkám, při jejichž překročení dochází k porušení stanovených provozních požadavků na konstrukci či nosný prvek

Mezní stavy únosnosti se týkají bezpečnosti, a to jak u osob, tak u konstrukce. Mezní stavy použitelnosti se týkají konstrukce či nosných prvků během používání, pohody osob během užívání a vzhledu stavby. MSP se rozlišují na vratné a nevratné. Při navrhování konstrukcí podle mezních stavů je nutné, aby žádný mezní stav nebyl překročen. Ověření musí proběhnout pro všechny zatěžovací stavy i příslušné návrhové situace.

## 2.6. Chování betonových konstrukcí během výbuchu

Vliv výbuchu ve skutečném prostředí nám pomáhá s určitou mírou přesnosti vytvořit matematické modely, které můžeme odvodit pro idealizovaná prostředí. Prostředí můžeme rozdělit:

- a) podle stlačitelnosti (stlačitelné a nestlačitelné)
- b) podle omezenosti povrchu (s omezeným či neomezeným povrchem)

V čase  $t_0$  výbuchu dojde k uvolnění energie, jež se okamžitě přemění z energie výbuchu na energii výbuchové vlny, která se ihned rozptýlí do celého okolního prostředí. Během rázové vlny dochází ke stlačení a pohybu vzduchových molekul. Dopad normálové vlny na pevné těleso způsobí hydrostatický přetlak a náraz částic, přičemž přetlak vlny před dopadem je menší než přetlakový odraz. Vzorec sloužící k výpočtu přetlaku rázové vlny:

$$\Delta P_s = \frac{93,2}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3} \quad (1)$$

kde:  $Z$  ... redukovaná vzdálenost, která se vypočítá ze vzorce

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

$R$  ... vzdálenost tělesa od ohniska výbuchu

*W ... hmotnost nálože (např. trinitrotoluen)*

Dnes se uplatňují pro výpočet mnoha úloh numerické metody, pomocí kterých může být řešena i problematika rázových vln, a to prostřednictvím rychlých dynamických jevů, jenž vycházejí z řešení této pohybové rovnice:

$$M \times u''(t) + C \times u'(t) + K \times u(t) = p(t) \quad (3)$$

*kde: M ... matice hmotnosti*

*C ... matice útlumu*

*K ... matice tuhosti*

*u ... vektor posunů*

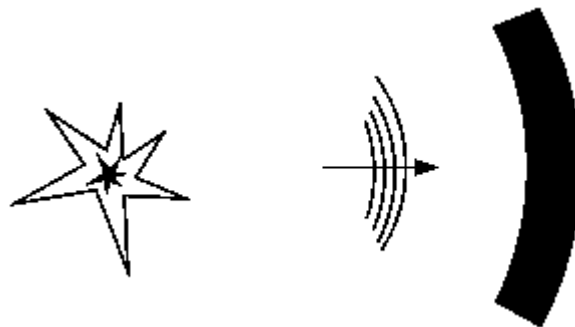
*p ... zatížení přetlakem rázové vlny*

Vláknobeton na rozdíl od železobetonu vykazuje větší schopnost vzdorovat zatížení výbuchem či nárazem. Odolnost těles vůči výbuchu či nárazu velmi ovlivňuje vzdálenost těles od epicentra výbuchu. Rozlišujeme tři případy:

- a) výbuch ve větší vzdálenosti od tělesa*
- b) výbuch v menší vzdálenosti od tělesa*
- c) výbuch v těsné blízkosti tělesa [24], [25]*

**a) Výbuch ve větší vzdálenosti od tělesa**

Výbuch v tomto případě působí velmi podobně jako homogenní plošné zatížení (např. podobné zatížení větrem). Kolaps betonového nevyztuženého prvku může dojít zpravidla v důsledku ohybového namáhání. [24]

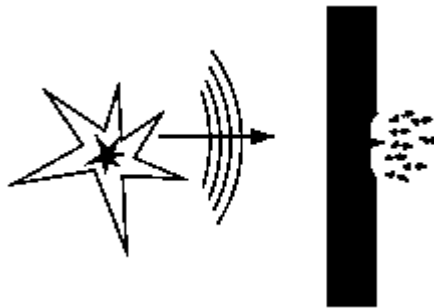


*Obrázek 13 Výbuch ve větší vzdálenosti od tělesa [24]*



## b) Výbuch v menší vzdálenosti od tělesa

Výbuch, který není v blízkosti ani ve větší vzdálenosti od tělesa způsobí tlakovou vlnu, která velkou rychlostí nalétne do tělesa. Když tlaková vlna narazí do tělesa, rozdělí se její energie na dvě části. Část se odrazí od tělesa a putuje do prostoru a druhá část energie prochází betonovým prvkem. Pokud má tlaková vlna takovou energii, že ji betonový prvek neztlumí, začne se opět tlaková vlna dělit na dvě části. Hlavní část tlakové vlny vyjde do prostoru za betonovým prvkem a druhá část se odrazí. Ovšem tento odraz tlakové vlny vyvolá tahové napětí, které má za následek odlupování krycí vrstvy výztuže, včetně vystřelování použitého kameniva. Zde nastává problém u železobetonového materiálu, betonářská výztuž tomuto odlupování krycí vrstvy nemůže zabránit. Pokud však jsou do železobetonu přidána vlákna, která zvýší jak tahovou pevnost, tak i houževnatost, lze zatížení výbuchem či rázem značně redukovat. Zde nachází velké uplatnění právě vláknobeton. [24]



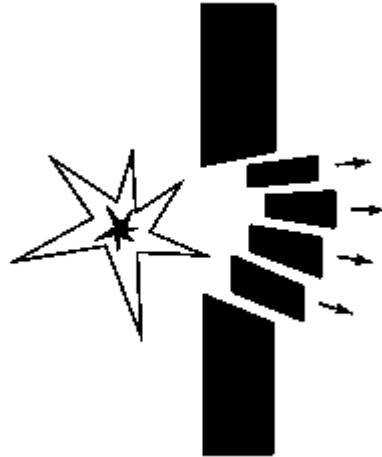
Obrázek 14 Výbuch v blízkosti od tělesa [24]

## c) Výbuch v těsné blízkosti tělesa

Výbuch v úplné blízkosti tělesa způsobí většinou lokální porušení tělesa v důsledku jeho smykového selhání. V počátku působení výbuchu dojde pouze k místnímu poškození, což je zapříčiněno velkou tuhostí a setrvačné hmoty betonového tělesa. Během poškození nedojde k přenosu do vzdálenějších částí tělesa – ohybu. Výbuch v bezprostřední blízkosti železobetonového tělesa je podobný zatížení nárazu projektilu (např. granát, výstřel kulky ze zbraně). V místě výbuchu dojde k lokálnímu narušení betonu a rozpadu jeho částí. [24]

V případě, kdy výbušnina neprovede čistý průraz, tak vytvoří pomocí napěťové vlny (stress wave) na kontaktní straně (rubové) tzv. nálevku. Vlna dále prochází skrze betonové těleso, až do doby, kdy dojde na druhou stranu (lícovou) tělesa. Vlna pružných deformací prochází skrze těleso po kulových plochách až do doby, kdy se odrazí od vnitřního líce a odrazí se zpět. Zde nastanou velká tahová napětí, které betonové těleso má problémy přenést. Tímto vznikají

střepiny či odštěpky, které jsou z tělesa vymrštěny velkou rychlostí. Tento jev je znám řadu let, a proto se navrhuje takzvané protiodštěpkové vrstvy. Do takzvaných protiodštěpkových vrstev se nejčastěji využívá vrstvený pancíř, pomocí přidání materiálu na bázi plastu či keramiky. Vlna pružných deformací je tak na styku dvou materiálů velmi zbrzděna a tím nedochází ke vzniku odštěpků. [36]



*Obrázek 15 Výbuch v bezprostřední blízkosti tělesa [24]*

Ve výbuchové odolnosti betonu proti výbuchu byla řešena řada experimentů. Například byly mezi sebou vzájemně porovnávány prefabrikovaný betonový sendvičový panel s izolační vrstvou uprostřed spojený kolmou nebo šikmou výztuží (PCSP) a prefabrikovaná betonová konstrukce (PSP). Výzkum byl proveden na základě numerické studie s cílem prozkoumat jejich chování při výbuchu. Experimentem bylo zjištěno, že v odolnosti proti výbuchu je více zranitelný prefabrikovaný sendvičový panel v důsledku spojení kolmé nebo šikmé výztuže. Dále byl řešen vliv tloušťky izolační vrstvy na dynamické chování, kde výsledky ukázaly, že tloušťka izolační vrstvy má malý vliv na dynamické chování. [49]



Obrázek 16 Prefabrikovaný sendvičový panel [49]

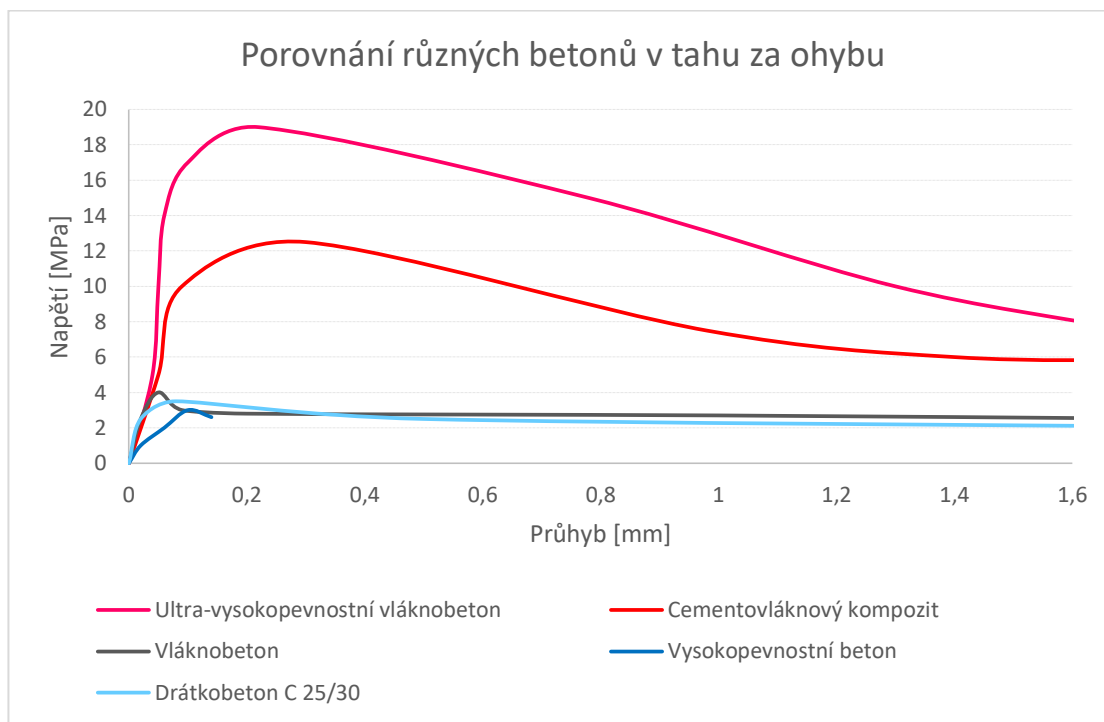
## 2.7. Využití přetvárných vlastností drátkobetonu proti výbuchu

Je dobře známo, že obyčejný beton má výborné vlastnosti v tlaku, ale na druhé straně ho omezuje ve větším uplatnění jeho křehkost. Právě proto se do obyčejného betonu přidávají vlákna nebo betonářská vyztuž, aby využitelnost betonu nebyla omezená pouze pro tlakově namáhané konstrukce. Obecně beton má velmi malou duktilitu, čímž dochází vlivem relativně malých přetvoření k poklesu tuhosti. Značným problémem je tak tvoření a šíření trhlin, které způsobuje například smrštění či změna teploty. Neméně značným problémem je fakt, že železobeton namáhaný při dynamických zatíženích, jako jsou výbuchy či rázy, se někdy nebezpečným způsobem porušuje. Jako jedno z více řešení se jeví beton doplněn o rozptýlenou vyztuž. [24]

Beton doplněn o rozptýlenou vyztuž (vláknobeton) dosahuje vyšších pevností tlakových i tahových. Na vláknobeton lze nahlížet jako na houževnatý materiál, než jakým je obyčejný beton. Vláknobeton nachází své uplatnění v místech, kde dochází k rázům nebo v místech dynamicky namáhaných konstrukcí (například vozovky, podlahy průmyslových hal, apod.). [21]

Je zřejmé z pracovního diagramu, viz Graf 5, že betony obsahující vlákna dosahují lepších pevnostních v tahu za ohybu než obyčejné betony. Lze tím konstatovat, že vláknobeton má několika násobně větší potenciál absorbovat energii díky vlastnostem, kterých dosahuje v tomto způsobu namáhání. V důsledku dobrých pevností v tahu za ohybu dochází ke schopnosti vzdorovat větším přetvořením na rozdíl od obyčejných betonů. Vysokopevnostní beton, který

je podle „ČSN EN 206 +A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda“ kategorizován od pevnostní třídy v tlaku C 55/67, nedosahuje tak dobrých přetvárných vlastností jako u drátkobetonu z běžné pevnostní třídy C 25/30 viz Graf 5.



Graf 5 Porovnání různých betonů v tahu za ohybu [24, 44]

Vláknobeton se jak v tuzemsku, tak v zahraničí již uplatnil ve více projektech technických i občanských, jako materiál odolný vůči rázům i výbuchům. Dnes se na vláknobeton nahlíží jako na konstrukční materiál s jasně definovanými pevnostními a přetvárnými vlastnostmi stejně tak, jako na obyčejný či železový beton. Velkou výhodou tohoto pokroku je, že lze plně využít jeho nejlepší vlastnosti, čímž je schopnost přenosu tahových napětí po vzniku trhliny. [24]

## 2.8. Zásady návrhu

Pokud dojde v otevřeném prostoru k výbuchu nálože, tak působení tlakové vlny na konstrukci je závislé na umístění konstrukce vůči ohnisku výbuchu, na vlastnostech zatížené konstrukce nebo parametrech nálože. Výbuch uvnitř konstrukcí lze zjednodušeně přepočítat z výbuchu v otevřeném prostoru. Aby zatížení konstrukce rázovou vlnou bylo možné vypočítat, zavádí se mnoho zjednodušení a předpokladů. Výpočty umožňují použití empirických vztahů, které jsou však těmito zjednodušeními a předpoklady výrazně zatíženy.

## **2.9. Absorbovaná energie**

### **2.9.1. Zkoušení absorbované energie**

Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových těles ze stříkaného betonu vychází z evropské normy „ČSN EN 14488-5 Zkoušení stříkaného betonu – část 5“. Tato část evropské normy popisuje metodu pro stanovení funkce veličin (zatížení/průhyb) pro výpočet kapacity absorbované energie. [5]

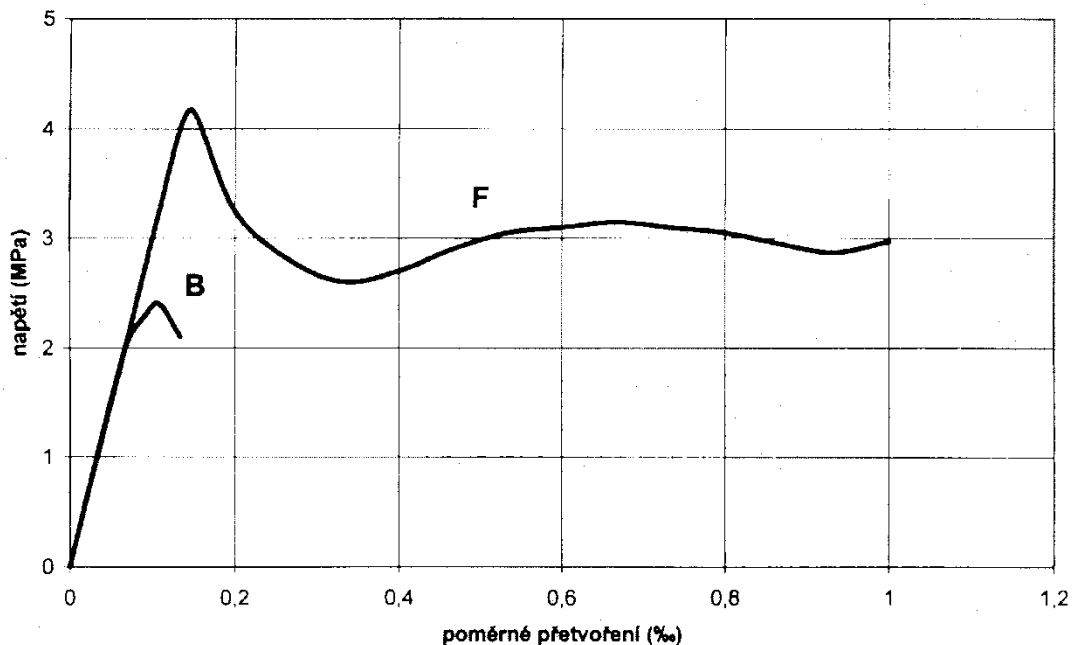
Podstata zkoušky vláknobetonového zkušební tělesa spočívá ve vystavení zatížení při kontrole průhybu použitím tuhého ocelového bloku, který je umístěn uprostřed desky. Desky zkušební tělesa jsou nastříkány dle „ČSN EN 14488-1“. Zkouška se provádí do momentu, kdy křivka zatížení/průhyb dosáhne minimálně 30 mm uprostřed desky. Ze zaznamenané křivky zatížení/průhyb se vypočte druhá křivka, která udává absorbovanou energii jako funkci průhybu desky. [5]

Pro možné uskutečnění zkoušky je nutné, aby zkušební lis umožňoval zaznamenávat průhyb a aby tuhost zatěžovacího zařízení byla nejméně 200 kN/mm. Nedílnou součástí zkoušky je kalibrováný elektronický snímač s rozlišovací schopností délky nejméně 0,02 mm. Zkušební tělesa jsou vyráběna ve formě o rozměrech 600 x 600 x 100 mm. [5]

### **2.9.2. Absorbovaná energie v betonových konstrukcích**

Železobeton neřeší úplně všechny nedostatky obyčejného betonu bez vyztužení v oblasti malých tahových pevností. Například jeden z hlavních problémů je tvorba šíření trhlin, které jsou způsobeny v důsledku smršťování, změnou teploty, vysycháním nebo dynamickým zatěžováním. Již řadu let se řeší zamezení šíření trhlin v průmyslových podlahách či podzemním stavitelstvím, kde může docházet k velkým dynamickým rázům, vibracím nebo otřesům. Jedno z nejčastějších řešení je rozptýlená výztuž (vlákna), které vytvoří houževnatější materiál a tím oproti klasickému železobetonu zlepší přetvárné vlastnosti. Houževnatost je důležitým ukazatelem pro měření mechanické absorbované energie. Beton s rozptýlenou výztuží v podobě ocelových drátků má v technologii průmyslových a inženýrských staveb nezastupitelné místo. Přesto všechno lze konstatovat, že krátká ocelová vlákna nemohou nahradit klasickou kontinuální, orientovanou betonářskou výztuž pro přenos všech tahových napětí. Oba druhy vyztužení mají v betonu rozdílnou, ale neméně důležitou roli. Z pracovních diagramů pro vláknobeton a prostý beton je patrné, že vláknobeton má mnohem vyšší duktilitu

viz. graf 6. Vyztužením ve většině případů nezvýšíme pevnost, ale zvýšíme pomocí zvýšení duktility i houževnatost, což je schopnost absorbovat mechanickou energii. Když se tak správně zkombinují například vysokohodnotné betony s rozptýlenou výztuží, lze tím dosáhnout lepší schopnosti absorbovat energii a zároveň zvýšit pevnost. [32, 34, 35, 48]



Graf 6 Pracovní diagram v tahu drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) [13]

V případě drátkobetonu se jedná o kombinaci křehké betonové matrice a duktilního vlákna. Vlákno přemostuje rozevírající trhlinu a zamezuje náhlé porušení. Účinnost na správné využití vláken má velký vliv soudržnost matrice a vlákna, orientace nebo rozměry vlákna a jejich rozmístění. Velký vliv na duktilitu matrice má i samotné vlákno. Vlákno s relativně velkým modulem pružnosti je křehké a v případě přemostění trhlín jsou přetrženy. Logicky, když dojde k přetržení vlákna před jeho vytažením dojde i ke snížení duktility betonové matrice. Pro deformaci vlákna musí vytvořit působící síla dostatečnou práci, která je přičtena do celkové absorbované energie. Důležitým faktorem je druh použité betonové matrice. V případě nízké pevnostní třídy může docházet k odlupování betonu, čímž se výrazně snižuje odolnost proti vytažení vlákna. Například vysokohodnotný drátkobeton má menší problém s odlupováním, což má za následek příznivý vliv na pevnost a schopnost absorbovat mechanickou energii. [32]

Pravděpodobně nejdůležitějším faktorem ovlivňující schopnost absorbovat energii je množství vláken v betonové matrici. Je obecně známo, že jak na tlakové pevnosti, tak na zvýšení modulu pružnosti se vlákna výrazně nepodílejí. Největší rozdíly jsou však shledány

u pevnosti v tahu a pevnosti v tahu za ohybu, kde by pevnosti měly přibližně růst lineárně s procentem vyztužení. Tím by měla s rostoucím procentem vyztužením významně růst i schopnost absorbovat energii nebo i schopnost vyššímu odolnosti proti výbuchům. Nebezpečí u vyšších procent vyztužení jsou shluky vláken, což má z následek například snížení pevnosti v tlaku. Tímto důvodem je omezeno maximální procento vyztužení. [13, 34, 35]

# EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této diplomové práce popisuje zkoušky čerstvého i ztvrdlého betonu. Zkoušky čerstvého betonu byly provedeny jako doplňující, naopak zkoušky ztvrdlého betonu patří mezi hlavní cíle této diplomové práce. Tělesa byla vyrobena z kombinace tří speciálních betonů (lehký beton, samozhutnitelný beton a beton vyztužený vlákny. Výsledný lehký samozhutnitelný vláknobeton měl být pevnostní třídy alespoň LC 25/28 D 1,8 - XC1 - Cl 0,2 - D<sub>max</sub>16 - SCC (SF1).

## 3. Definice záměsí betonu

Vzorky byly vyrobené z pěti záměsí, které jsou tvořeny lehkým samozhutnitelným betonem. Byla použita receptura z typového betonu. Specifikace lehkého samozhutnitelného betonu jsou ve shodě s požadavky „ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018“.

LWSCC 25/28, XC1

Konzistence:	SF1
Největší frakce kameniva:	D <sub>max</sub> = 16 mm
Obsah chloridů:	Cl 0,2
Složení betonu:	Cement: CEM I 42,5 R
	Lehké kamenivo: 4/8 Rugen, 8/16 Rugen
	Písek: 0/4
	Voda
	Super-plastifikátor: MasterGlenium Ace 446
	Stabilizační přísada: RheoMATRIX 100
	Velmi jemně mletý vápenec



### 3.1. Výroba vlastních experimentálních těles

Pro zkoušky výbuchu a absorbovanou energii byla vyrobena zkušební tělesa. Beton byl plněn do autorem zhotovené vodovzdorné překližky. Zkušební tělesa o rozměrech 600 mm x 600 mm x 100 mm byla vyrobena v souladu s „ČSN EN 14488-5 Zkoušení stříkaného betonu – Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles“. [5]



*Obrázek 17 Výroba vlastních těles o rozměrech 600x600x100 mm [vlastní foto]*

### 3.2. Přehled vyrobených záměsí

Celkem bylo namícháno 5 záměsí, z nichž záměsí 1 až 4 byly namíchány v betonárce IDA Malé Svatoňovice a zbylá pátá záměs byla namíchána v laboratorní míchačce v laboratoři Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD) Univerzity Pardubice.

#### 3.2.1. Záměs LWSCC 1 Betonárna

Tato záměs byla zhotovena v betonárce IDA z předem navrhnutého lehkého betonu. Tato záměs byla bez vyztužení.

#### 3.2.2. Záměs LWSCC 1 Laboratoř VVCD

Záměs LWSCC 1 Laboratoř VVCD byla zhotovena v laboratoři a byla také bez vyztužení.

### 3.2.3. Záměs LWSCC 2

Tato záměs je opět ze stejné receptury jako záměsi 1 s rozdílem, že do čerstvého betonu byla přidána ocelová vlákna Dramix 3D 45/50 BL. Ocelová vlákna Dramix 3D 45/50 BL byla do betonu přidána v množství 50 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.2.4. Záměs LWSCC 3

Záměs LWSCC 3 je tvořena opět ze základní typové receptury, ale doplněna o ocelová vlákna Dramix 3D 45/50 BL, ale pouze v množství 25 kg/m<sup>3</sup> a dále syntetická mikrovlákna v množství 1 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.2.5. Záměs LWSCC 4

Tato poslední záměs je opět ze stejné receptury jako předešlé záměsi, ale doplněna o syntetická mikrovlákna v množství 1 kg/m<sup>3</sup> a o rabicové pletivo.

### 3.2.6. Přehled vyztužení jednotlivých záměsů

*Tabulka 2 Přehled různých druhů vyztužení v jednotlivých záměsích*

Záměs	Dramix 3D 45/50 BL	Syntetická mikrovlákná	Rabicové pletivo
LWSCC 1 Bet	0	0	0
LWSCC 1 Lab	0	0	0
LWSCC 2	50 kg/m <sup>3</sup>	0	0
LWSCC 3	25 kg/m <sup>3</sup>	1 kg/m <sup>3</sup>	0
LWSCC 4	0	1 kg/m <sup>3</sup>	ANO

## 3.3. Stanovení potřebného objemu betonu

Před samotným mícháním proběhlo nejprve stanovení potřebného objemu betonu. Výchozími body pro stanovení potřebného množství betonu jsou plánované zkoušky a k jejímž stanovením počet a rozměry těles. Mezi hlavní cíle DP byla zkouška stanovení odolnosti vůči výbuchu. Odolnost byla zkoušena na čtvercových deskách o délce hrany 600 mm a tloušťce 100 mm, která vyháží z normy „ČSN EN 14488-5. Zkoušení stříkaného betonu – Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles“. Důležitou roli pro stanovení výbuchové odolnosti je stanovení absorbované

energie, která byla také zkoušena na stejných čtvercových těles o délce hrany 600 mm a tloušťce 100 mm. Výroba zkušebních desek pro zkoušky výbuchové odolnosti byla doplněna o zkušební tělesa, která sloužila k ověření mechanických vlastností lehkého samozhutitelného betonu. Jednalo se o krychle o délce hrany 150 mm pro stanovení pevnosti v tlaku a o hranoly o rozměrech 150 x 150 x 700 mm pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Počty těles pro jednotlivé zkoušky jsou stanoveny v tabulce 3.

*Tabulka 3 Potřeba betonu k plánovaným zkouškám*

Těleso	Rozměry [mm]	Počet těles [ks]	Objem tělesa [dm <sup>3</sup> ]	Plánovaná zkouška	Potřeba betonu [dm <sup>3</sup> ]
Krychle	150x150x150	15	3,375	Pevnost v tlaku	51
Hranol	150x150x700	12	15,75	Pevnost v tahu za ohybu	189
Deska	600x600x100	6	36	Absorbovaná energie	216
Deska	600x600x100	12	36	Odolnost vůči výbuchu	432
Válec	Ø150x300	10	5,3	Doplňkové tělesa mimo DP	53
Celkem potřeba betonu + 35% ztratného					1268

Uvažované množství betonu bylo rozděleno do čtyřech záměsí na betonárce o množství 307 dm<sup>3</sup> a jedné v laboratoři Univerzity Pardubice o množství 40 dm<sup>3</sup>. Zpracování záměsí LWSCC 1 Betonárna a LWSCC 3 proběhlo 1. 12. 2020. Záměsí LWSCC 2 a LWSCC 4 byly zpracovány 2. 12. 2020. Zpracování záměsí LWSCC 1 Laboratoř proběhla 7. 12. 2020.

### 3.4. Postup míchání a ukládání čerstvého betonu

Pro velké množství potřebného betonu bylo přistoupeno k výrobě v betonárce. Betonárka IDA Malé Svatoňovice poskytla prostory, pro výrobu těchto čtyř záměsí. Celkové množství odebraného čerstvého betonu se blížilo k 1,5 m<sup>3</sup>, které bylo rozdělené do čtyř záměsí v betonárce a jedné záměsí v laboratoři Univerzity Pardubice. Samotné míchání betonu probíhalo způsobem, kde se nejprve do 1 m<sup>3</sup> míchačky ručně vložilo objemově naměřené nasycené lehké kamenivo a následně promíchalo s přesným množstvím cementu.



18



19

*Obrázek 18 Postup přípravy nasyceného kameniva k odvozu do betonárny [vlastní foto]*

*Obrázek 19 Objemově naměřené lehké kamenivo těsně před mícháním čerstvého betonu [vlastní foto]*

Následně byly dávkovány ostatní suroviny receptury a to písek, vápenec, voda, stabilizační přísada a super-plastifikační přísada. Po důsledném promíchání se čerstvý beton odvezl pomocí vysokozdvížného vozíku a nádoby o objemu cca 0,4 m<sup>3</sup> do haly, kde byl čerstvý beton zpracován do forem.



20



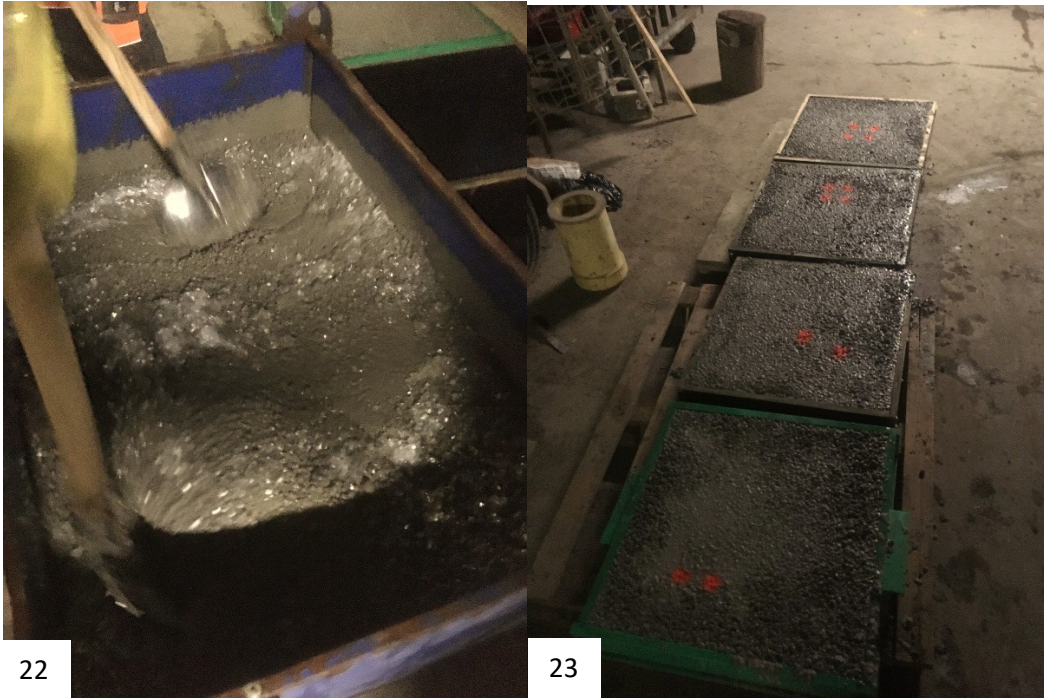
21

*Obrázek 20 Míchání čerstvého betonu v 1 m<sup>3</sup> míchačce [vlastní foto]*

*Obrázek 21 Odvoz betonu pomocí vysokozdvížného vozíku [vlastní foto]*

Po urychleném dovozu do haly se čerstvý beton ručně promíchal s předem naměřenou výztuží. Jakmile byl důkladně čerstvý beton s výztuží ručně promíchán, tak se zároveň provedlo jak ukládání čerstvého betonu do forem, tak zkoušky čerstvého betonu. Z velké časové náročnosti na zpracovatelnost SCC betonu bylo přistoupeno pouze ke zkoušce sednutí-rozlitím kužele. Samotná betonáž byla provedena v 5 lidech a trvala necelých 25 minut od odebrání betonu do nádoby až po zpracování betonu. Vždy druhý den po betonáži byla tělesa odformována, popsána a zabalena do strečové fólie. Tělesa byla ve strečové fólii zabalena po celou dobu, než byla odzkoušena. Z důvodu pandemické situace a zákazu přístupu do laboratoře byla tělesa zkoušena ne po 28 dnech, ale až ve větším stáří zkušebních těles.





22

23

*Obrázek 22 Ruční promíchání čerstvého betonu s výztuží [vlastní foto]*

*Obrázek 23 Naplněné formy čerstvým betonem [vlastní foto]*

## 4. Zkoušení čerstvého betonu

Lehký samozhutnitelní vláknobeton lze v čerstvém stavu charakterizovat řadou měření. Při zjištění potřebného množství betonu v jedné záměsi bylo přistoupeno pouze k měření nejpopulárnější zkoušky, a to sednutí-rozlitím kužele.

### 4.1. Zkouška sednutí-rozlitím kužele

Zkouška rozlití kužele popisuje tekutost a průtokovou rychlost samozhutnitelného betonu. Tato zkouška se provádí v souladu s „ČSN EN 12350-8 (731301) Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím“. Zkouška spočívá ve stanovení času  $t_{500}$ , který se vypočte ze vzorce 4.

$$SF = \frac{d1+d2}{2} \quad (4)$$

kde:

SF je rozlití [mm]

d1 je největší průměr rozlití [mm]

$d_2$  je průměr rozlití ve směru kolmém na  $d_1$  [mm]

Před samotnou zkouškou bylo na nerezovou podložku nakreslen kruh o průměru 500 mm. Abramsův kužel byl naplněn až po okraj a umístěn na střed vyznačeného kruhu. Od zvednutí kužele se začal měřit čas a jakmile čerstvý beton překročil vyznačený kruh, tak bylo získáno času  $t_{500}$ .

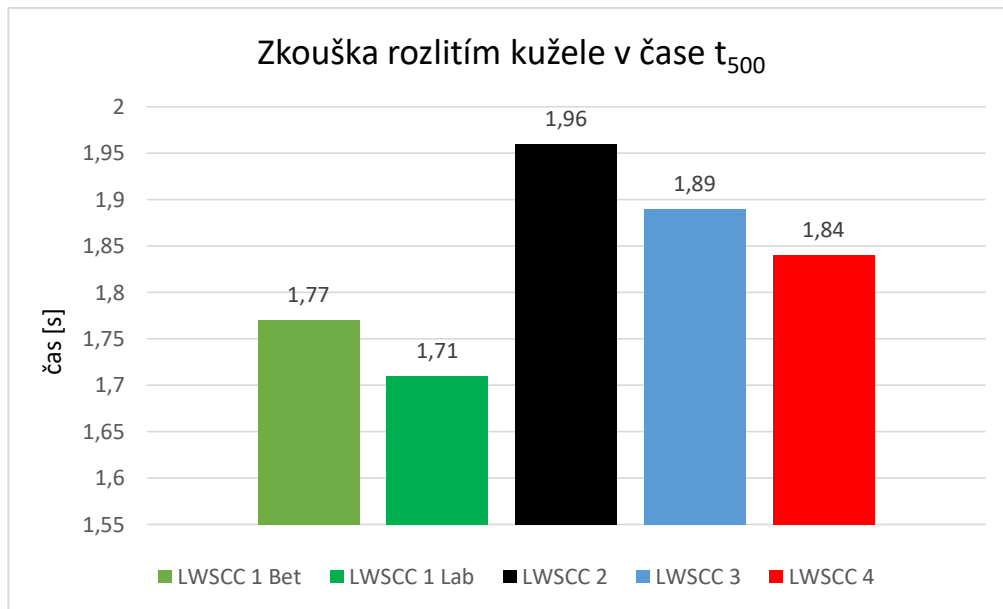


Obrázek 24 Zkouška rozlití kužele u záměsi LWSCC 1 Lab. [vlastní foto]

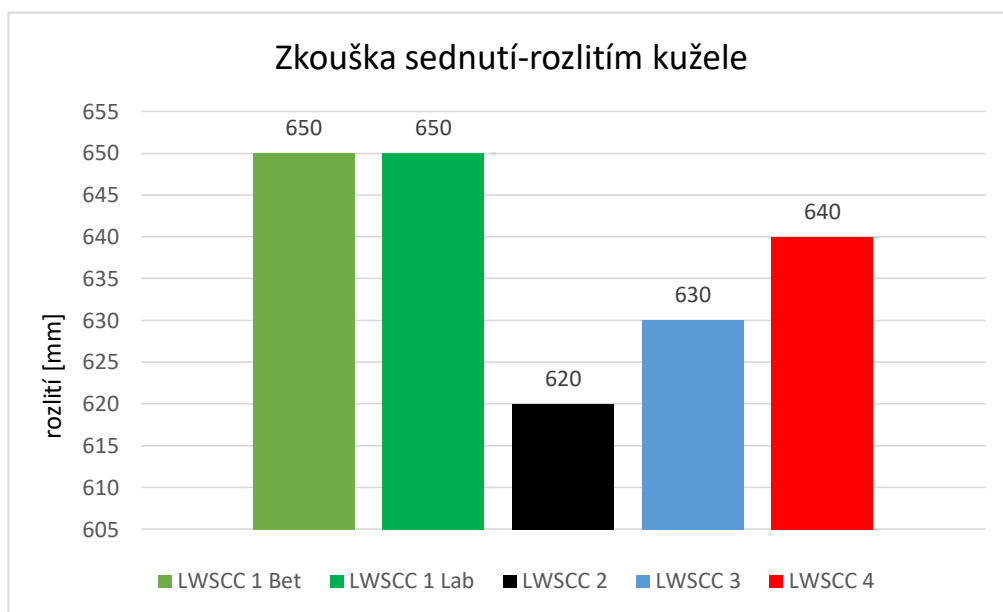
Obrázek 25 Rozměr  $d_2$  u záměsi LWSCC 1 Lab. [vlastní foto]

Tabulka 4 Přehled výsledků zkoušky sednutí-rozlitím kužele

Záměsi	Čas $T_{500}$ [s]	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	Aritmetický průměr [mm]	Rozlití SF [mm]
LWSCC 1 Bet	1,77	640	660	650	SF1 - 650
LWSCC 1 Lab	1,71	640	650	645	SF1 - 650
LWSCC 2	1,96	610	620	615	SF1 - 620
LWSCC 3	1,89	625	630	627,5	SF1 - 630
LWSCC 4	1,84	635	635	635	SF1 - 640



*Graf 7 Rozlití kužele v čase  $t_{500}$*



*Graf 8 Naměřené rozlití u zkoušky sednutí-rozlitím kužele*

**Výsledky** zkoušky rozlitím jsou znázorněny v grafech 7 a 8, kde je patrné, že největší rozlití dosahovaly záměsi bez vyztužení. Tyto záměsi LWSCC 1 byly na hranici požadované konzistencí SF1.



## 4.2. Objemová hmotnost čerstvého betonu

Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu byla stanovena dle „ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost“. Objemová hmotnost čerstvého betonu byla provedena využitím spodní části z tlakového hrnce. Nádoba o objemu 8 dm<sup>3</sup> a hmotnosti prázdné nádoby 4,34 kg. Nádoba byla naplněna čerstvým betonem a následně zvážena. Objemová hmotnost čerstvého betonu byla určena pomocí vztahu (5).

$$\rho = \frac{(m_{\text{plná}} - m_{\text{prázdná}})}{V} \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \quad (5)$$

Výsledky jednotlivých záměsí byly zaokrouhleny na nejbližších 10 kg.m<sup>-3</sup> a jsou stanoveny v tabulce 5.

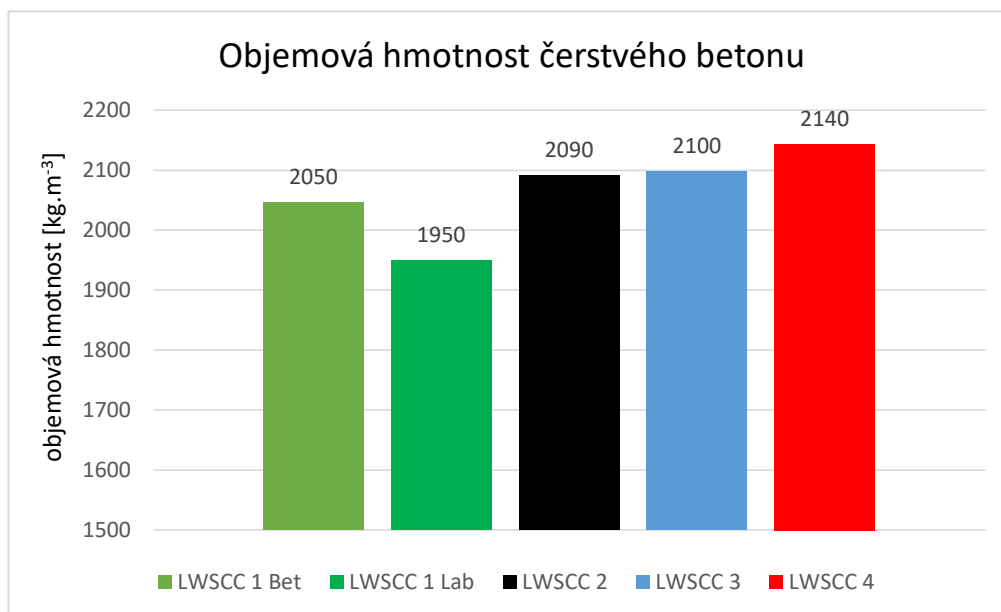
Tabulka 5 Objemové hmotnosti čerstvého betonu jednotlivých záměsí

Záměsí	m <sub>plná</sub> [kg]	m [kg]	V [dm <sup>3</sup> ]	ρ [kg.m <sup>-3</sup> ]
LWSCC 1 Bet.	20,71	4,34	8	2050
LWSCC 1 Lab.	19,94	4,34	8	1950
LWSCC 2	21,07	4,34	8	2090
LWSCC 3	21,12	4,34	8	2100
LWSCC 4	21,49	4,34	8	2140



Obrázek 26 Objemová hmotnost čerstvého betonu - záměs LWSCC 1 Lab [vlastní foto]

Výsledky jednotlivých záměsí jsou graficky znázorněny v grafu 9. Z grafu vyplývá, že podle předpokladu záměsí bez vyztužení dosahují o něco menších hodnot.



Graf 9 Objemová hmotnost čerstvého betonu

## 5. Zkoušení ztvrdlého betonu

### 5.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu je stanovena podle „ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu“. Tato norma vysvětluje tři různé způsoby, jak stanovit objemovou hmotnost ztvrdlého betonu.

1. Jak bylo dodáno (po konci ošetřování)
2. Nasyceno vodou
3. Po vysušení v sušárně

V této práci byl řešen první a třetí způsob stanovení. První způsob „jak bylo dodáno“ byl stanoven na krychlích o délce hrany 150 mm. Zkušební tělesa byla po celou dobu ošetřování zabalena stretch fólií. Objemová hmotnost byla stanovena na základě změření skutečných rozměrů a následně vypočtena ze vztahu (6).

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (6)$$

kde:

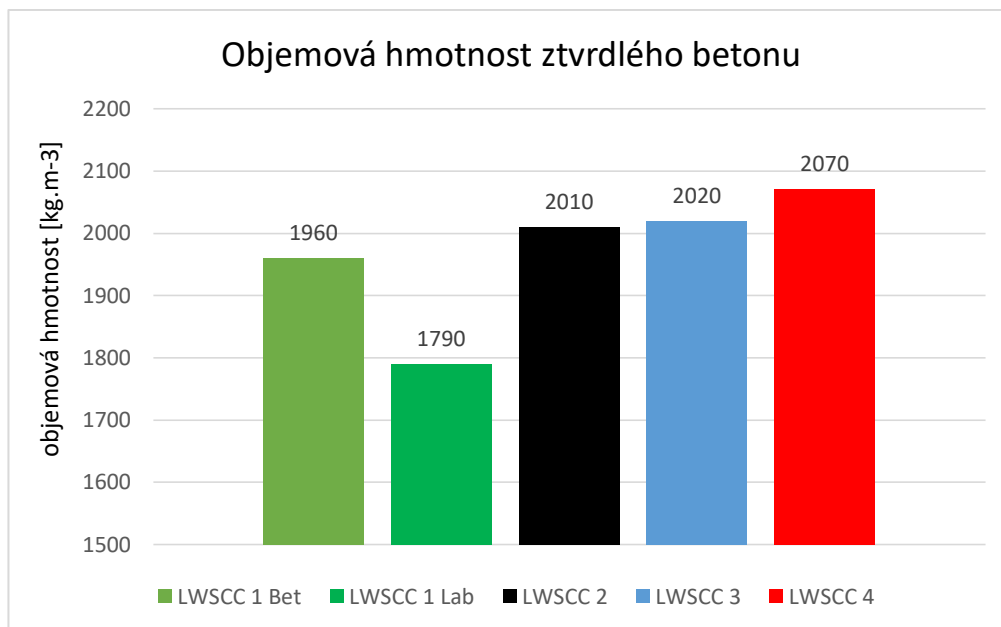
$\rho_d$  objemová hmotnost vzorku (jak bylo dodáno)

$m_d$  hmotnost vzorku (jak bylo dodáno)

$V$  vypočítaný objem tělesa ze skutečných rozměrů

*Tabulka 4 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu (jak bylo dodáno)*

Záměs	Vzorek	$m_d$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
<b>LWSCC 1 Bet.</b>	1a Bet	6,531	0,00334	1960
	1b Bet	6,578	0,00337	1950
	1c Bet	6,542	0,00333	1960
	<b>Ø</b>			<b>1960</b>
<b>LWSCC 1 Lab.</b>	1a Lab	5,987	0,00327	1830
	1b Lab	5,762	0,00324	1780
	1c Lab	5,751	0,00327	1760
	<b>Ø</b>			<b>1790</b>
<b>LWSCC 2</b>	2a	6,975	0,00340	2050
	2b	6,681	0,00337	1980
	2c	6,72	0,00336	2000
	<b>Ø</b>			<b>2010</b>
<b>LWSCC 3</b>	3a	6,691	0,00333	2010
	3b	6,98	0,00343	2040
	3c	6,879	0,00340	2020
	<b>Ø</b>			<b>2020</b>
<b>LWSCC 4</b>	4a	6,773	0,00334	2030
	4b	6,838	0,00329	2080
	4c	6,987	0,00332	2100
	<b>Ø</b>			<b>2070</b>



*Graf 10 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu jednotlivých záměsí (jak bylo dodáno)*

Objemové hmotnosti jednotlivých záměsí vykazují vzájemně velmi obdobné hodnoty až na záměs vyrobenou v laboratoři. Objemové hmotnosti ztvrdlého betonu se liší především o hmotnost výztuže.

Třetí způsob stanovení objemové hmotnosti, a to po vysušení v sušárně do ustálené hmotnosti byla stanovena na krychlích o délce hrany 150 mm. Tyto krychle byly nařezány z hranolů, které byly vyrobeny pro pevnost v tahu za ohybu. Nařezány byly pomocí pily s diamantovým kotoučem.



*Obrázek 27 Řezání krychlí z hranolů použitých ke zkoušce v tahu za ohybu [vlastní foto]*

Tělesa byla v sušárně ponechána při teplotě 115 °C celkem 4 dny. Po prvním dni v sušárně tělesa nedosahovala požadovanou třídu objemové hmotnosti, která měla být do D 1,8. Během dalších dní objemová hmotnost opět klesala až se po čtyřech dnech ustálila, a to v požadované třídě objemové hmotnosti.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu byla stanovena ze vztahu (7):

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (7)$$

kde:

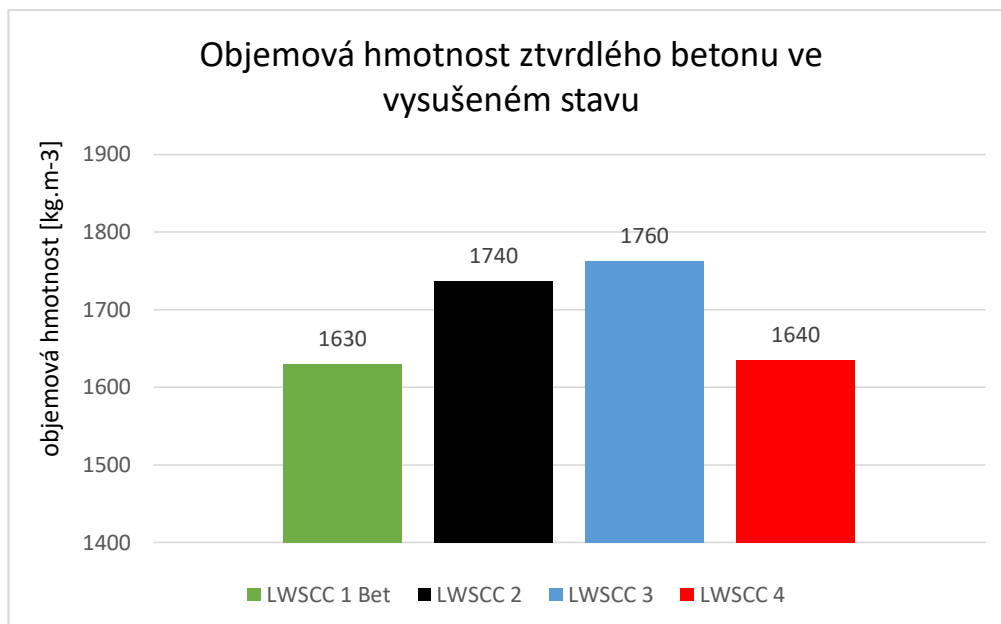
$\rho_s$  objemová hmotnost vzorku ve vysušeném stavu (po vysušení v sušárně)

$m_s$  hmotnost vzorku ve vysušeném stavu (po vysušení v sušárně)

$V$  vypočítaný objem tělesa ze skutečných rozměrů

*Tabulka 6 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu*

Záměs	Vzorek	$m_s$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
<b>LWSCC 1 Bet</b>	1a Bet	5,431	0,00334	1628
	1b Bet	5,475	0,00337	1625
	1c Bet	5,455	0,00333	1636
	Ø			<b>1630</b>
<b>LWSCC 2</b>	2a	6,018	0,00342	1760
	2b	5,794	0,00338	1717
	2c	5,853	0,00338	1734
	Ø			<b>1740</b>
<b>LWSCC 3</b>	3a	6,037	0,00344	1753
	3b	5,969	0,00344	1734
	3c	6,317	0,00351	1800
	Ø			<b>1760</b>
<b>LWSCC 4</b>	4a	5,435	0,00335	1621
	4b	5,569	0,00344	1618
	4c	5,738	0,00344	1667
	Ø			<b>1640</b>



*Graf 11 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po vysušení*

Zkouška ztvrdlého betonu jednotlivých záměsí je vyjádřena v grafu 11 a tabulce 6. Jednotlivé vzorky ve vysušeném stavu vykazují hodnoty splňující požadavek v zatřídění objemové hmotnosti alespoň do D 1,8. Rozdíly v objemových hmotnostech jsou především dány výztuží.

## 5.2. Zkouška - pevnost v tlaku

Zkouška pevnost v tlaku byla stanovena v souladu s normou „ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles“ [30]. Zkušební tělesa byla vyrobena jako krychle o délce hrany 150 mm. Před samotným zkoušením pevnosti v tlaku byla tělesa změřena posuvným měřítkem s přesností  $\pm 1,5$  mm a zvážena. Zkušební tělesa byla očištěna od nečistot a vložena do lisu tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr plnění forem. Zkoušení bylo provedeno pomocí zkušebního lisu od firmy Controls s maximální kapacitou až 4000 kN. Zkušební lis odpovídá zkušební normě „ČSN EN 12390-4 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy“.

Pevnost v tlaku je vyjádřena pomocí vztahu (8).

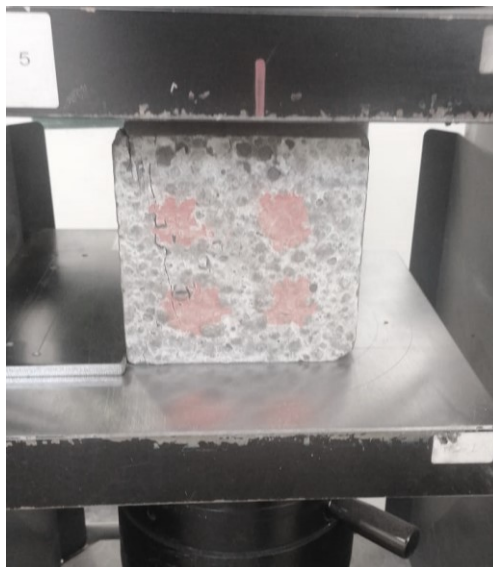
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (8)$$

kde:

$f_c$  je pevnost v tlaku [MPa]

$F$  je maximální zatížení při porušení [kN]

$A_c$  je průřezová plocha, na kterou zatížení působí v tlaku [mm<sup>2</sup>]

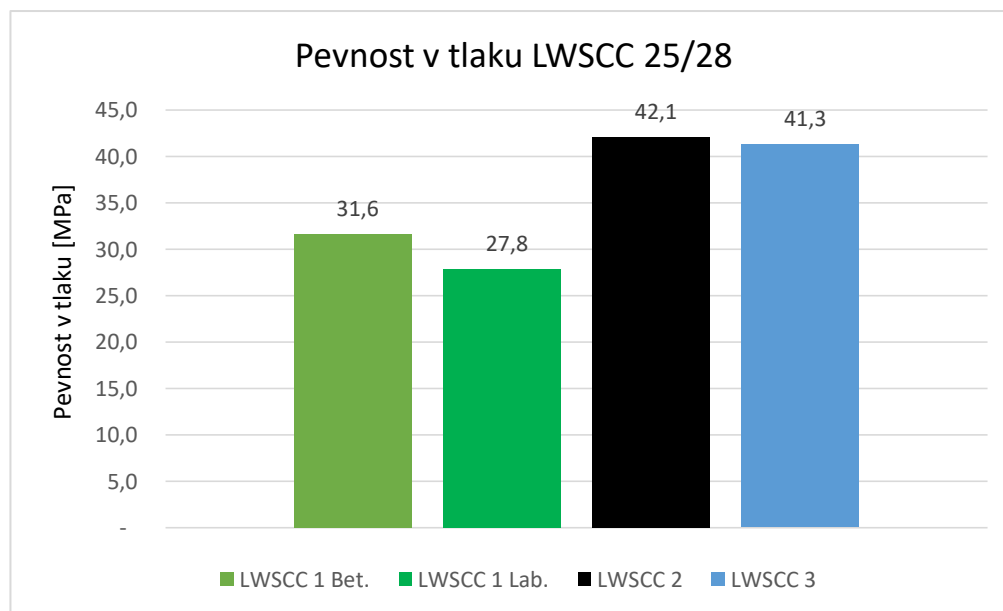


Obrázek 28 Zkouška pevnost v tlaku vzorku [vlastní foto]

Zkouška pevnost v tlaku jednotlivých těles je podrobně popsána v tabulce 7, kde výsledná pevnost v tlaku je zaokrouhlena na nejbližších 0,1 MPa.

Tabulka 7 Naměřené krychelné pevnosti v tlaku jednotlivých těles

Záměs	Vzorek	Fmax [kN]	Pevnost [MPa]
LWSCC 1 Bet	1a Bet	726,79	32,6
	1b Bet	756,34	33,6
	1c Bet	640,82	28,7
	Ø	<b>707,98</b>	<b>31,6</b>
LWSCC 1 Lab.	1a Lab	610,11	27,9
	1b Lab	607,11	28
	1c Lab	605,15	27,6
	Ø	<b>607,46</b>	<b>27,8</b>
LWSCC 2	2a	960,51	42,5
	2b	901,15	39,8
	2c	990,07	44
	Ø	<b>950,58</b>	<b>42,1</b>
LWSCC 3	3a	902,03	40,3
	3b	893,52	39
	3c	1016,76	44,6
	Ø	<b>937,44</b>	<b>41,3</b>



Graf 12 Graficky znázorněny výsledné krychelné pevnosti jednotlivých záměsí



**Vyhodnocení** pevnosti v tlaku je znázorněno v grafu 12. Vyztužení, které bylo přidáno do jednotlivých záměsí má dle výsledků pozitivní vliv na pevnost v tlaku. Záměsí s ocelovými drátky Dramix 3D dosahují až o více jak 10 MPa lepších výsledků pevnosti v tlaku než záměsí bez vyztužení. Nejlepších výsledků dosahuje záměs LWSCC 2 s výztuží ocelových drátků v dávkování  $50 \text{ kg/m}^3$ , kde pevnost v tlaku odpovídá 42,1 MPa.

Výsledky jsou stanoveny ze 3 zkušebních vzorků, aby výsledky odpovídaly co nejreálnějším hodnotám.

### 5.3. Zkouška - pevnost v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla provedena v souladu s předběžnou českou normou ČSN P 73 2452, která popisuje zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Tato norma uvádí čtyřbodovou zkoušku ohybem. Zkouška se provádí na normalizovaných trámčích o rozměrech 150 x 150 x 700 mm. Před provedením zkoušky byla zkušební tělesa změřena a následně uložena na předem připravený zkušební lis. Rozpětí dvou podpěrných válečků byla stanovena na  $l = 600$  mm a horní zatěžovací břemena byla umístěna ke středu rozpětí v osové vzdálenosti 200 mm. Uspořádání zkoušky je schematicky vyobrazeno na obrázku 30. Zkouška byla provedena na zkušebním lisu Controls 50-C1201/BFR ve zkušební laboratoři Cemex Pardubice a následně zaznamenána pomocí automatické řídicí jednotky. Zatěžování bylo nastaveno na konstantní rychlost  $v_{ft} = 0,2$  mm/min do momentu ukončení zkoušky.

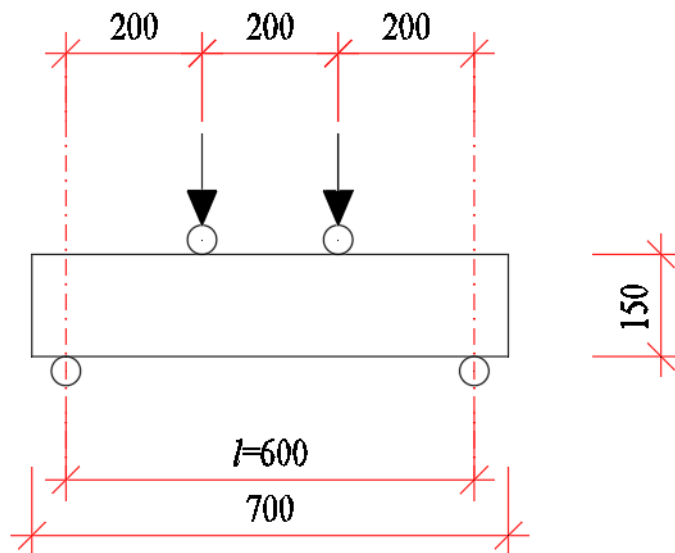


Obrázek 29 Zaznamenávání dat pomocí měřicí ústředny Controls automax [vlastní foto]

$$v_{ft} \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \text{ [mm/min]} \quad (9)$$

kde:

- $\Delta\delta$       přírůstek průhybu normalizovaného trámce uprostřed rozpětí při zatěžování  
 $\Delta t$       doba intervalu zatěžování

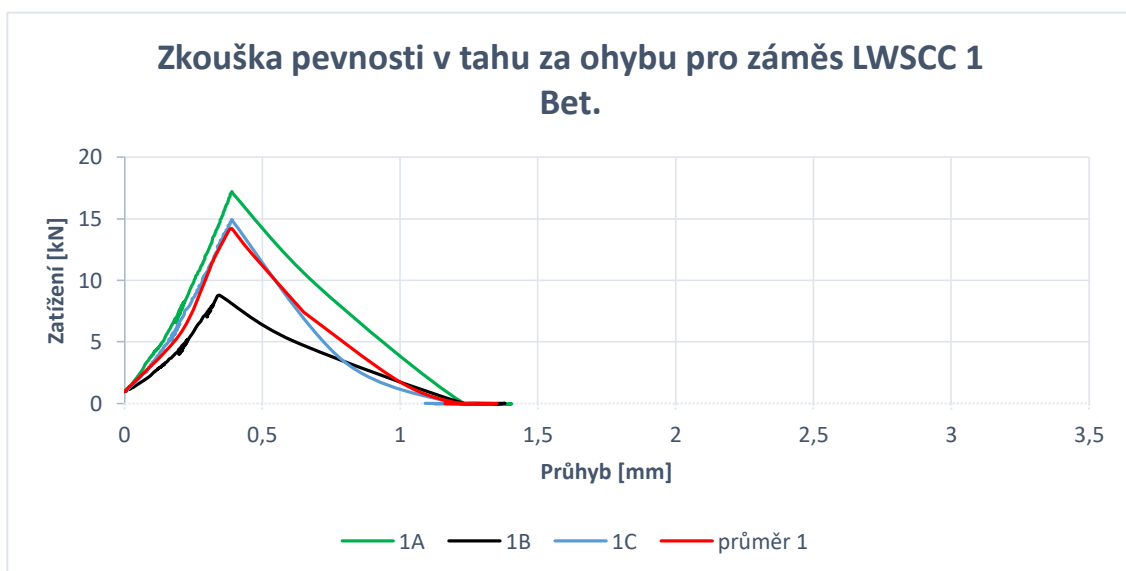


Obrázek 30 Uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [vlastní]

**Vyhodnocení** bylo provedeno na základě získaného průběhu záznamu diagramu, pomocí kterého se získají ze statistických vyhodnocení průměrný a charakteristický diagram odolnosti, dle kterého se stanoví pevnostní třídy.

### 5.3.1. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 1 Betonárna

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla stanovena i pro obyčejný lehký samozhutnitelný beton bez vyztužení. Zkouška byla provedena pro tento typ betonu, jako doprovodná ke zbývajícím třem záměsím.



Graf 13 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro obyčejný LWSCC 1 Betonárna

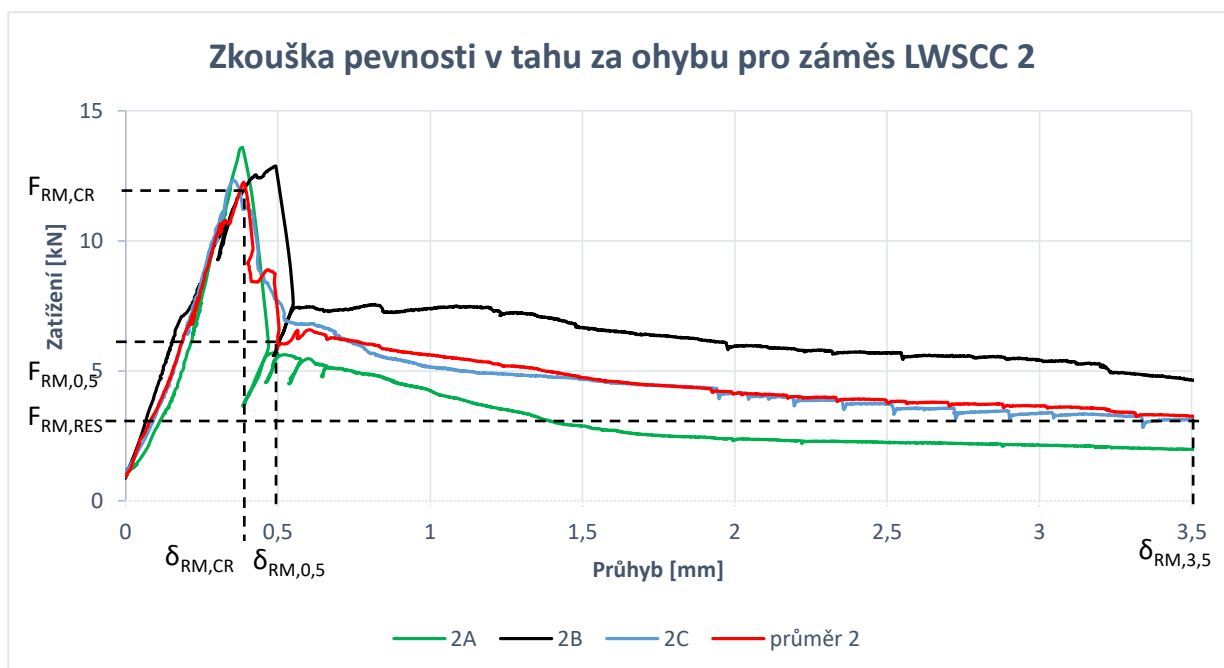
### 5.3.2. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 2

Před provedením samotné zkoušky pevnosti v tahu za ohybu, byly všechny rozměry vzorků změřeny. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 8

Tabulka 8 Naměřené rozměry vzorků ze záměsi LWSCC 2

LWSCC 2	[mm]		
	Vzorky	délka	šířka
2a	700	150	149
2b	700	150	151
2c	700	150	151

Pro záměs LWSCC 2 byly využity tři zkušební tělesa, která byla jednotlivě zkoušena a zaznamenávána. Průměrný diagram je vyjádřen z těchto tří vzorků v grafu 14.



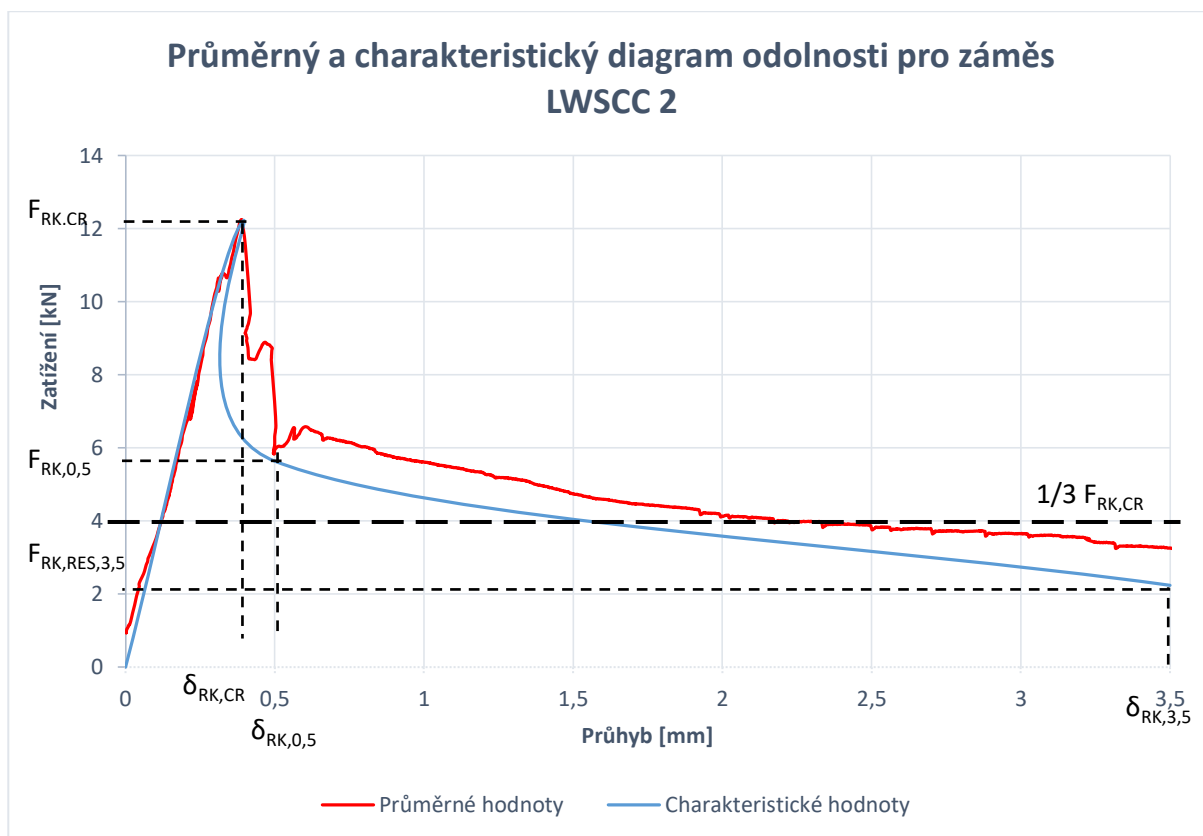
Graf 14 Průměrný diagram pro záměs LWSCC 2

Tabulka 9 Naměřené hodnoty zatížení pro vzorky ze záměsi LWSCC 2

LWSCC 2	Fi [kN]			
Průhyb $\delta$	2a	2b	2c	Ø
$\delta_{RM,CR}$	13,4	12,9	12,1	12,8
$\delta_{RM,0,5}$	5,6	6	7,7	6,4
$\delta_{RM,3,5}$	2,1	4,9	3,5	3,5

Průběh průměrného diagramu odolnosti je statisticky vyjádřen ze třech jednotlivých normalizovaných trámců (2a, 2b, 2c), které uvádí tabulka 9. Z průměrného diagramu (graf 14) byly stanoveny tři odolnosti při třech dohodnutých průhybech:

1.  $F_{RM,CR} = 12,8$  kN, při průhybu na mezi makrotrhliny  $\delta_{RM,CR}$
2.  $F_{RM,0,5} = 6,4$  kN, při dohodnutém průhybu  $\delta_{0,5} = 0,5$  mm
3.  $F_{RM,3,5} = 3,5$  kN, při dohodnutém mezním průhybu  $\delta_{3,5} = 3,5$  mm



Graf 15 Charakteristický diagram odolnosti odvozené ze zkoušek ohybem

Z charakteristického diagramu (graf 15) odolnosti byly stanoveny následující charakteristické hodnoty, pomocí kterých se ověřuje možnost využití vláknobetonu v nosných

konstrukcích. Použití vláknobetonu jako konstrukčního materiálu lze v případě, kdy je splněna podmínka v každém bodě charakteristického diagramu odolnosti:  $F_{RK,res,i} \geq 1/3 F_{RK,CR}$ . V případě, že podmínka splněna není, je nutné předpokládat chování prostého betonu.

$$F_{RK,CR} = 12,2 \text{ kN}$$

$$F_{RK,0,5} = 5,6 \text{ kN}$$

$$F_{RK,3,5} = 2,2 \text{ kN}$$

Charakteristické pevnosti trámce v tahu za ohybu jsou vypočteny ze tří stavů napjatosti vláknobetonu:

### 1) Do vzniku makrotrhliny při dohodnutém zatížení $F_{RK,CR}$

Kde pevnost v tahu za ohybu je vypočtena pomocí vztahu:

$$f_{fc,tk,CR} = \frac{F_{RK,CR} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (10)$$

kde:

$f_{fc,tk,CR}$  charakteristická pevnost trámce v tahu za ohybu [MPa]

$F_{RK,CR}$  charakteristická odolnost trámce při vzniku makrotrhliny [kN]

$l, b, h$  rozměry zkušební trámce [mm]

### 2) Po vzniku makrotrhliny v dohodnutém průhybu $\delta_{RK,0,5}$

Pevnost v tahu za ohybu při průhybu 0,5 mm je vyjádřena vztahem:

$$f_{fc,tk,0,5} = 0,45 \frac{F_{RK,0,5} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (11)$$

kde:

$f_{fc,tk,0,5}$  charakteristická pevnost trámce v dostředném tahu [MPa]

$F_{RK,0,5}$  charakteristická odolnost trámce při průhybu  $\delta_{0,5} = 0,5$  mm [kN]

$l, b, h$  rozměry zkušební trámce [mm]

### 3) Reziduální pevnost v tahu za ohybu při dohodnutém průhybu $\delta_{RK,3,5}$ je vyjádřen vztahem:

Reziduální pevnost vláknobetonu v dostředném tahu při průhybu 3,5 mm se stanoví ze vztahu:

$$f_{fc,tk,3,5} = 0,36 \frac{F_{RK,3,5} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (12)$$

kde:

$f_{fc,tk,3,5}$  charakteristická pevnost zkušebního trávce v dostředném tahu [MPa]

$F_{Rk,3,5}$  charakteristická odolnost trávce při průhybu  $\delta_{3,5} = 3,5$  mm [kN]

$l, b, h$  rozměry zkušebního trávce [mm]

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.

Tabulka 10 Pevnost v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 2

Pevnost v tahu za ohybu	
LWSCC 2	[MPa]
$f_{fc,tk,CR}$	2,2
$f_{fc,tk,0,5}$	0,5
$f_{fc,tk,3,5}$	0,2



Obrázek 31 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu vzorku 2b ze záměsi LWSCC 2 [vlastní foto]

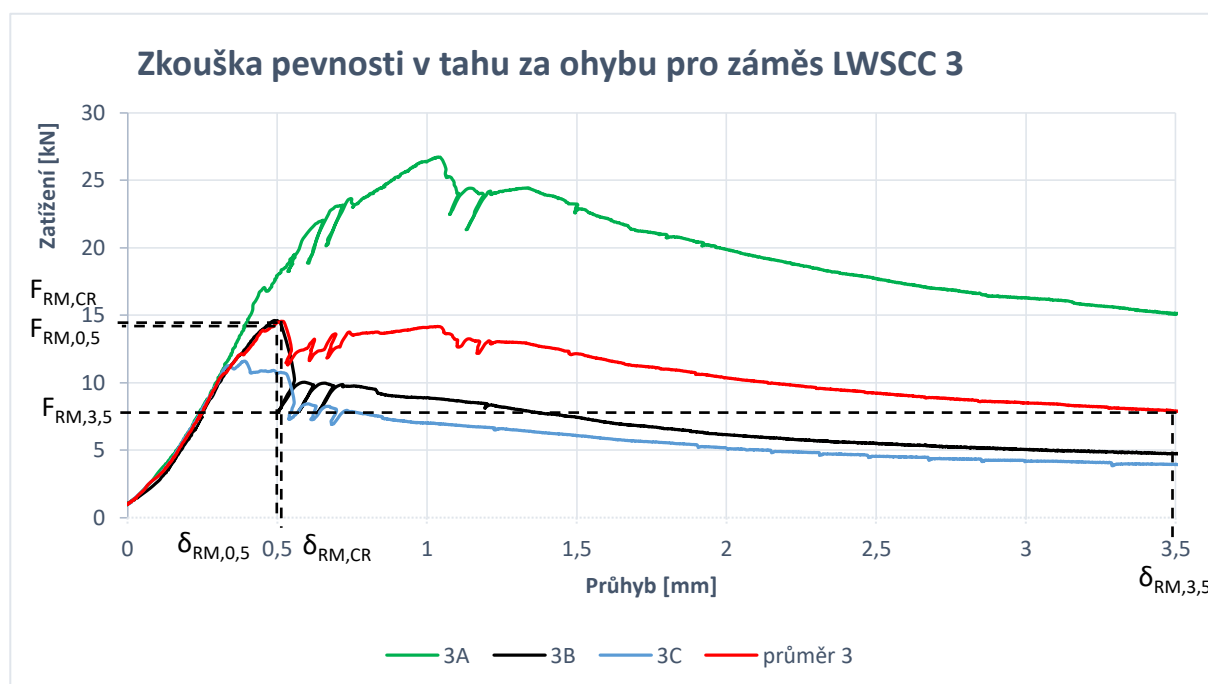
**Vyhodnocení** zkoušky pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 2. V této záměsi dosahoval nejlepších výsledků vzorek 2b, který neklesl ve smluvních průhybech pod hodnotu zatížení 4,9 kN. Naopak nejhorších výsledků dosahoval vzorek 2a, který v mezním průhybu 3,5 mm byl roven 2,1 kN. Od průhybu 1,5 mm klesla charakteristická hodnota pod hranici  $1/3 F_{Rk,CR}$ , což má za následek, že v záměsi LWSCC 2 lze označit účinek drátků za zanedbatelný, a to v případě, kdyby byla záměs použita do nosných konstrukcí.

### 5.3.3. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 3

Před provedením zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla zkušební tělesa změřena.

Tabulka 11 Rozměry vzorků pro zkušební tělesa ze záměsi LWSCC 3

LWSCC 3	[mm]		
Vzorky	délka	šířka	výška
3a	700	150	150
3b	700	150	150
3c	700	150	151



Graf 16 Průměrný diagram odolnosti pro záměs LWSCC 3

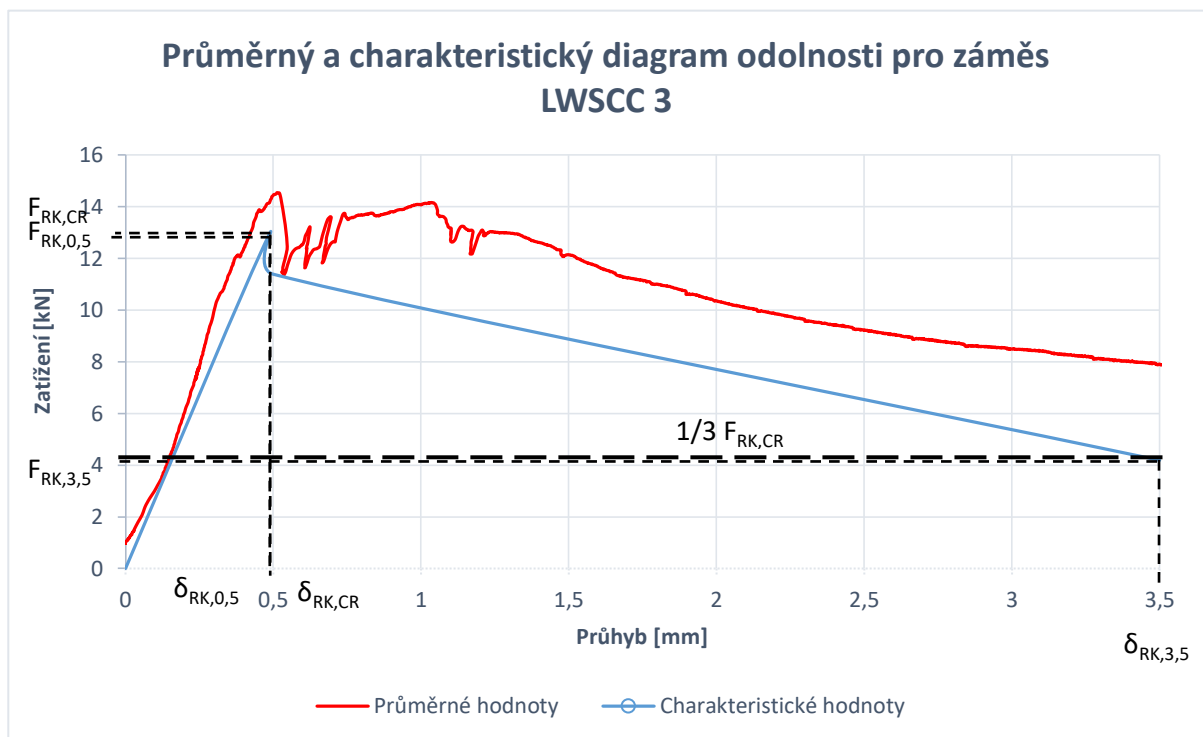
Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro záměs LWSCC 3

LWSCC 3	F <sub>i</sub> [kN]			
Průhyb δ	3a	3b	3c	Ø
δ <sub>RM,CR</sub>	26,5	14,9	12,8	14,7
δ <sub>RM,0,5</sub>	17,5	14,9	11	14,4
δ <sub>RM,3,5</sub>	15	5,00	4,1	8





Obrázek 32 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu vzorku 3b ze záměsi LWSCC 3 [vlastní foto]



Graf 17 Průměrný a charakteristický diagram záměsi LWSCC 3

Z charakteristického diagramu odolnosti (graf 17) byly stanoveny následující hodnoty:

$$F_{RK,CR} = 13,0 \text{ kN}$$

$$F_{RK,0,5} = 11,4 \text{ kN}$$

$$F_{RK,3,5} = 4,2 \text{ kN}$$

Tabulka 13 Pevnost v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 3

Pevnost v tahu za ohybu	
LWSCC 3	[MPa]
$f_{fc,tk,CR}$	2,3
$f_{fc,tk,0,5}$	0,9
$f_{fc,tk,3,5}$	0,3

Výsledná pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena pomocí vztahů (10), (11) a (12), která je popsána v tabulce 13.

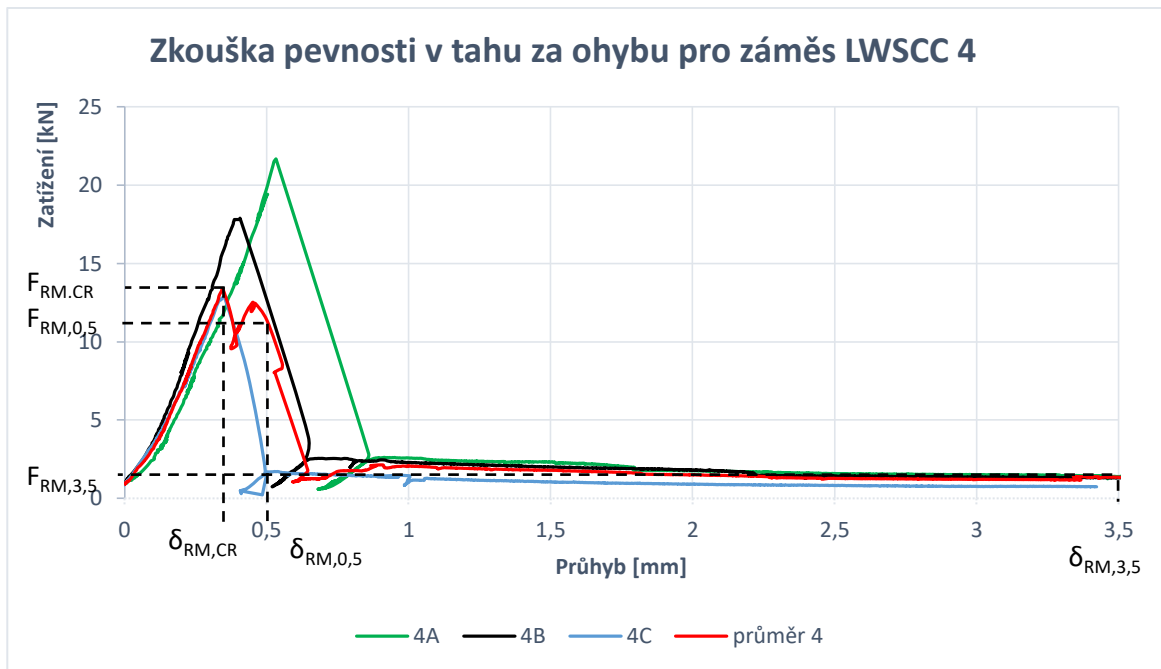
**Vyhodnocení** záměsi LWSCC 3 pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu je výrazně ovlivněno vzorkem 3a, který dosahoval výrazně vyšších hodnot než u vzorku 3b a 3c. Po detailní vizuální prohlídce vzorků 3a, 3b a 3c bylo zjištěno, že vzorek 3a obsahoval více ocelových drátů, než zbylé dva vzorky. Charakteristické hodnoty, které vycházejí z těchto průměrných ukazují, že se pohybují celou dobu nad hranicí  $1/3 F_{RK,CR}$ , což má za následek, že by bylo možné počítat s touto záměsí jako s konstrukčním materiálem.

#### 5.3.4. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu pro záměs LWSCC 4

Před samotnou zkouškou pevnosti v tahu za ohybu byla zkušební tělesa změřena viz. tab. 14.

Tabulka 14 Změřena zkušební tělesa ze záměsi LWSCC 4

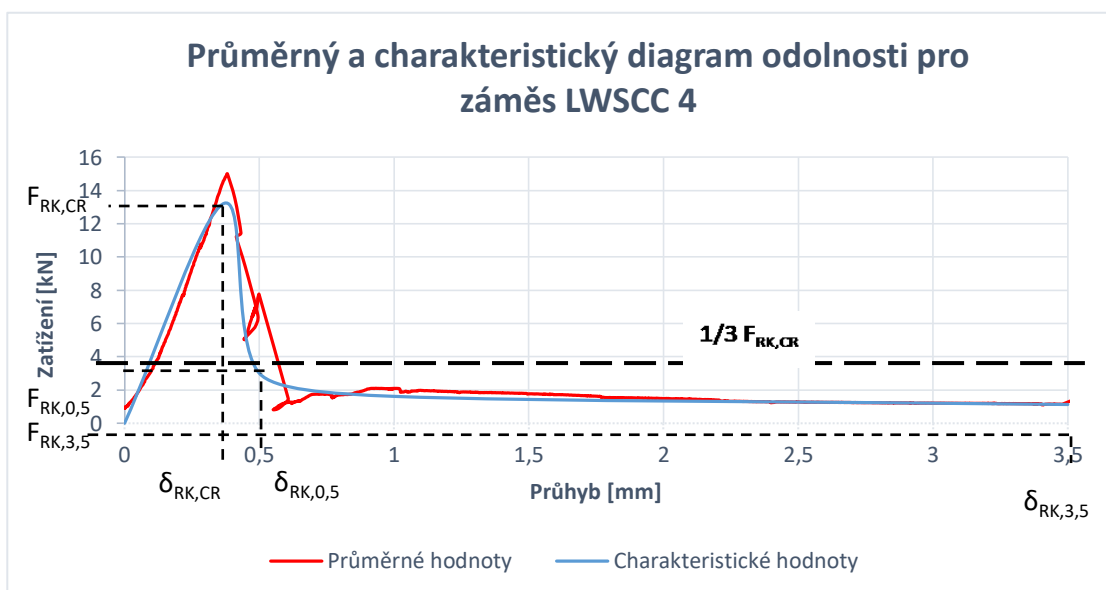
LWSCC 4	[mm]		
Vzorky	délka	šířka	výška
4a	700	150	149
4b	700	150	150
4c	700	150	150



*Graf 18 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu ze záměsi LWSCC 4*

*Tabulka 15 Naměřené hodnoty ze záměsi LWSCC 4*

LWSCC 4	F <sub>i</sub> [kN]			
Průhyb δ	4a	4b	4c	Ø
$\delta_{RM,CR}$	21,9	18	12,7	14,9
$\delta_{RM,0,5}$	19,5	13	1,9	11,4
$\delta_{RM,1,0}$	2,8	2,7	1,5	2,3
$\delta_{RM,3,5}$	1,5	1,4	1,1	1,3



*Graf 19 Průměrný a charakteristický diagram odolnosti LWSCC 4*

Z charakteristického diagramu odolnosti (graf 19) byly stanoveny následující hodnoty:

$$F_{RK,CR} = 13,2 \text{ kN}$$

$$F_{RK,0,5} = 3,0 \text{ kN}$$

$$F_{RK,1,0} = 1,6 \text{ kN}$$

$$F_{RK,3,5} = 1,1 \text{ kN}$$

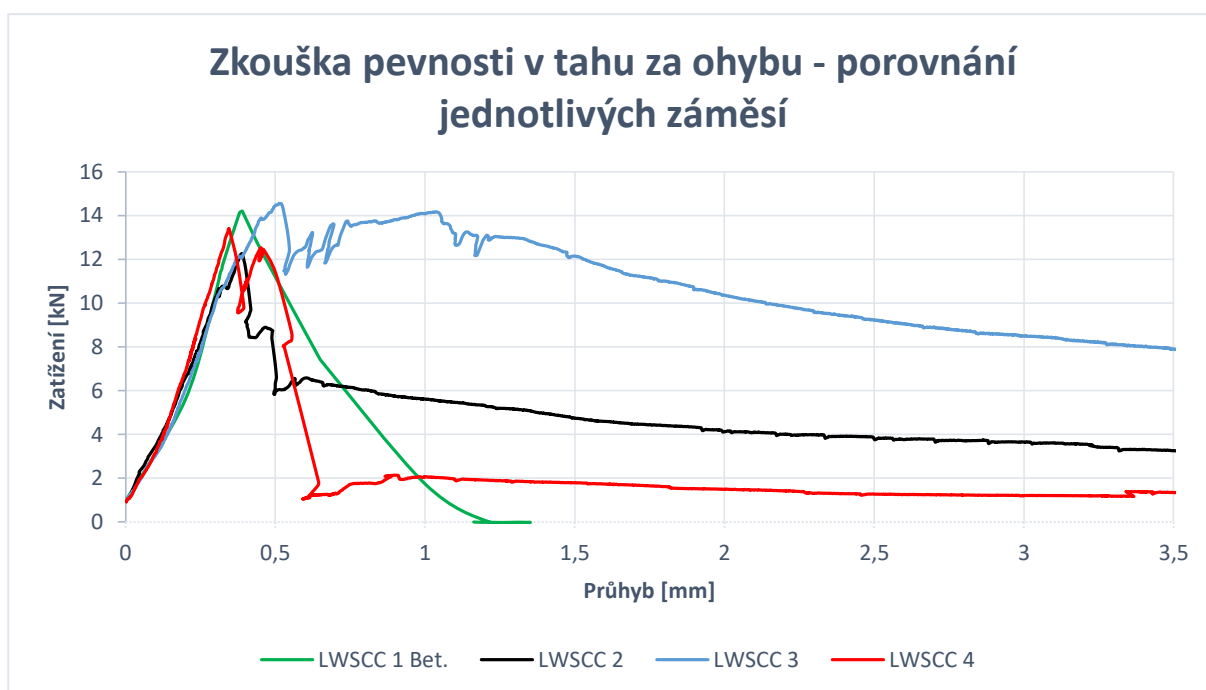
*Tabulka 16 Pevnost v tahu za ohybu LWSCC4*

Pevnost v tahu za ohybu	
LWSCC 4	[MPa]
$f_{fc,tk,CR}$	2,6
$f_{fc,tk,0,5}$	0,6
$f_{fc,tk,3,5}$	0,1

Výsledná pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena pomocí vztahů (10), (11) a (12), která je popsána v tabulce 16.

**Vyhodnocení** zkoušky pevnost v tahu za ohybu pro tělesa ze záměsí LWSCC 4. Z charakteristického diagramu je patrné, že s touto záměsí nelze počítat jako s materiálem konstrukčním. Náhlé poklesy, které můžeme u této záměsí pozorovat jsou způsobeny velmi rychlým snížením tuhosti trámce. Tato tuhost se snižuje vlivem křehkého porušení betonové matrice a je ovlivněna procentem vyztužením, kde platí, že čím menší procento vyztužení, tím se více projevuje nepoměr tuhosti trámce bez trhliny a s trhlinou.

### 5.3.5. Zkouška pevnost v tahu za ohybu – porovnání jednotlivých záměsí

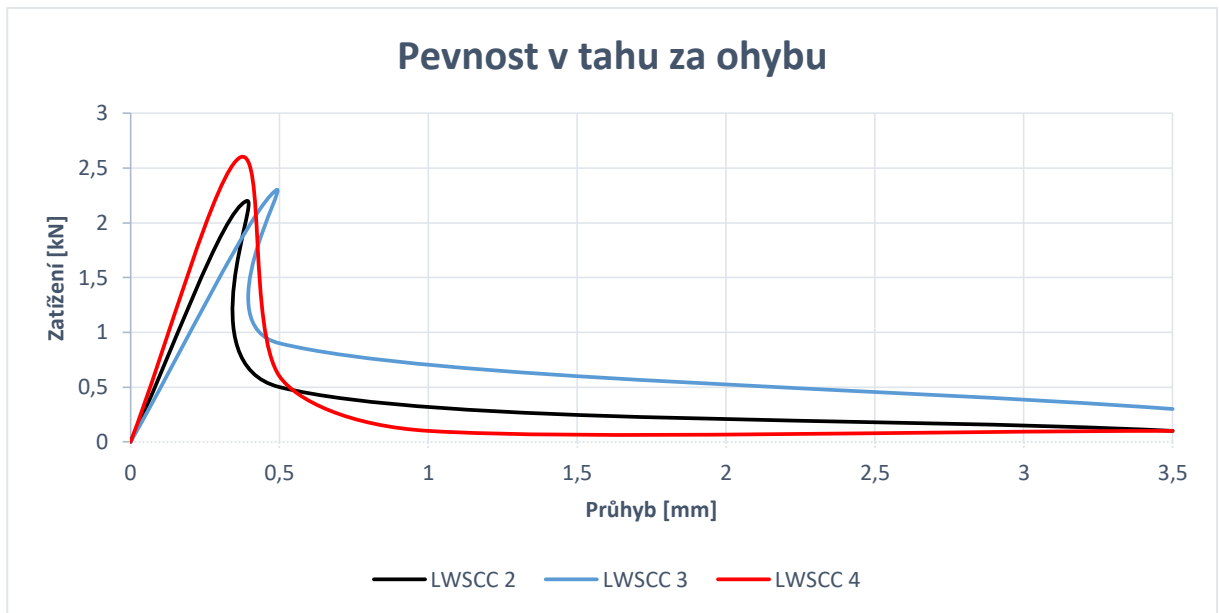


Graf 20 Porovnání průměrných hodnot záměsí

Nejvyšších hodnot zatížení při porušení byla dosažena u záměsí LWSCC 3 a LWSCC 1 Betonárna. V reziduální oblasti je však vidět, že ocelové drátky jednoznačně mají pozitivní vliv na odolnost zatížení. Nejlépe odolává zatížení ze záměsí LWSCC 3, kde však zapříčiněním většího shluku drátků u jednoho z těles jsou výsledky zkresleny.

Tabulka 17 Přehled hodnot pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu			
[MPa]	LWSCC 2	LWSCC 3	LWSCC 4
$f_{fe,tk,CR}$	2,2	2,3	2,6
$f_{fe,tk,0,5}$	0,5	0,9	0,6
$f_{fe,tk,3,5}$	0,1	0,3	0,1



Graf 21 Porovnání pevnosti v tahu za ohybu

## 5.4. Zkouška absorbované energie

Zkouška absorbované energie byla provedena v souladu s evropskou normou „ČSN EN 144878 – 5 Zkoušení stříkaného betonu – část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles“ [5], která popisuje metodu pro stanovení funkce zatížení/průhyb ze které se vypočte kapacita absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles. Zkoušení bylo provedeno ve zkušební laboratoři Cemex v Pardubicích pomocí zkušebního lisu Controls 50-C1201/BFR a automatické řídicí jednotky. Zkušební lis byl sestaven z čtvercového tuhého ocelového rámu o vnitřních rozměrech 500 x 500 mm a čtvercového ocelového zatěžovacího bloku o rozměrech 100 x 100 mm. Průhyb uprostřed desky ve vztahu k opěrnému rámu byl měřen pomocí elektromechanického snímače. Zkouška byla provedena na zkušebních deskových tělesech o rozměrech specifikovaných normou (600 x 600 x 100 mm). Před provedením zkoušky byla zkušební tělesa změřena a následně uložena na předem připravený zkušební lis. Zatěžování bylo nastaveno na konstantní rychlost  $v_{\dot{\epsilon}} = 1 \text{ mm/min}$  do dosažení průhybu nejméně 30 mm.



Obrázek 33 Zkušební lis Controls 50-C1201/BFR a automatická řídicí jednotka  
[vlastní foto]

### 5.4.1. Zkouška absorbované energie pro záměs LWSCC 2

Zkouška absorbované energie pro záměs LWSCC 2 byla zkoušena pouze na dvou zkušebních tělesech (2a a 2b), která byla před provedením zkoušky změřena.

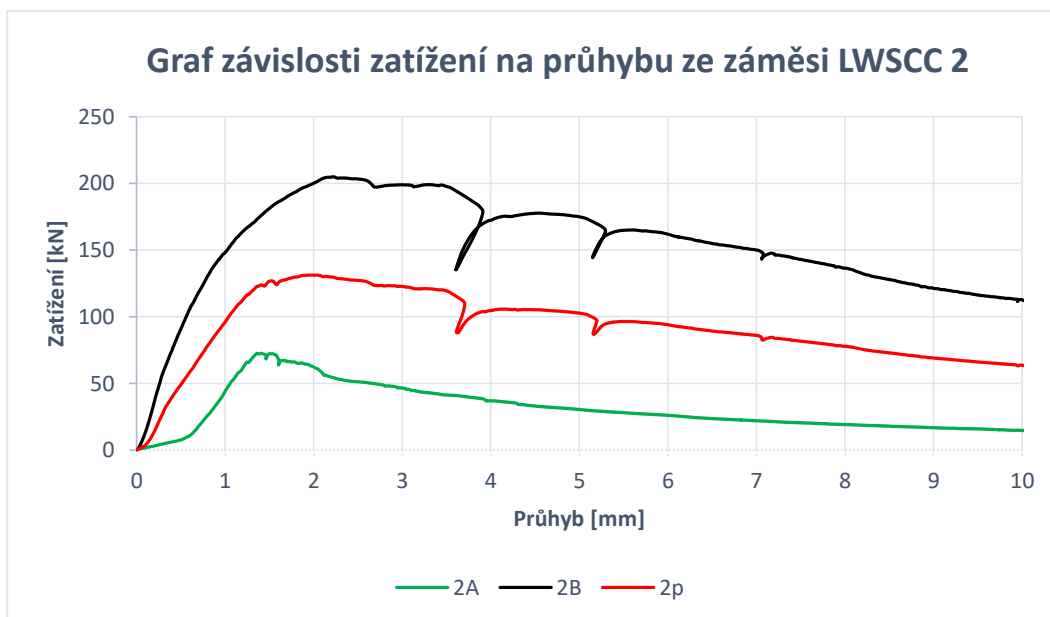
Tabulka 18 Změřena zkušební desky pro zkoušku absorbované energie

LWSCC 2	[mm]		
Vzorky	délka	šířka	tloušťka
2a	600	600	104
2b	600	600	104



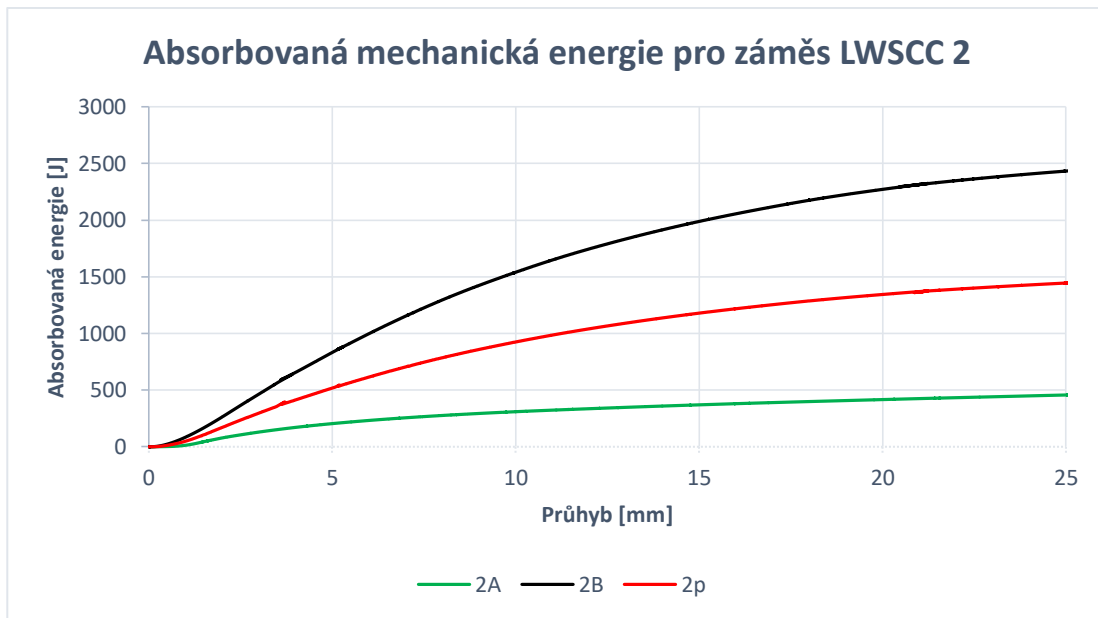
Obrázek 34 Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSCC 2 [vlastní foto]

Průběhy absorbované energie ze záměsi LWSCC 2 jsou znázorněny v grafu 22. Pro zkoušku absorbované energie byly použity pouze dvě tělesa. Vzorek 2b dosahuje až 5x vyšší absorbované energie než vzorek 2a. Na obrázku 34 je zřejmé, že zkušební deska 2b obsahovala vyšší zastoupení ocelových drátků, než vzorek 2a.



Graf 22 Závislost zatížení na průhybu ze záměsi LWSCC 2





*Graf 23 Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSCC 2*



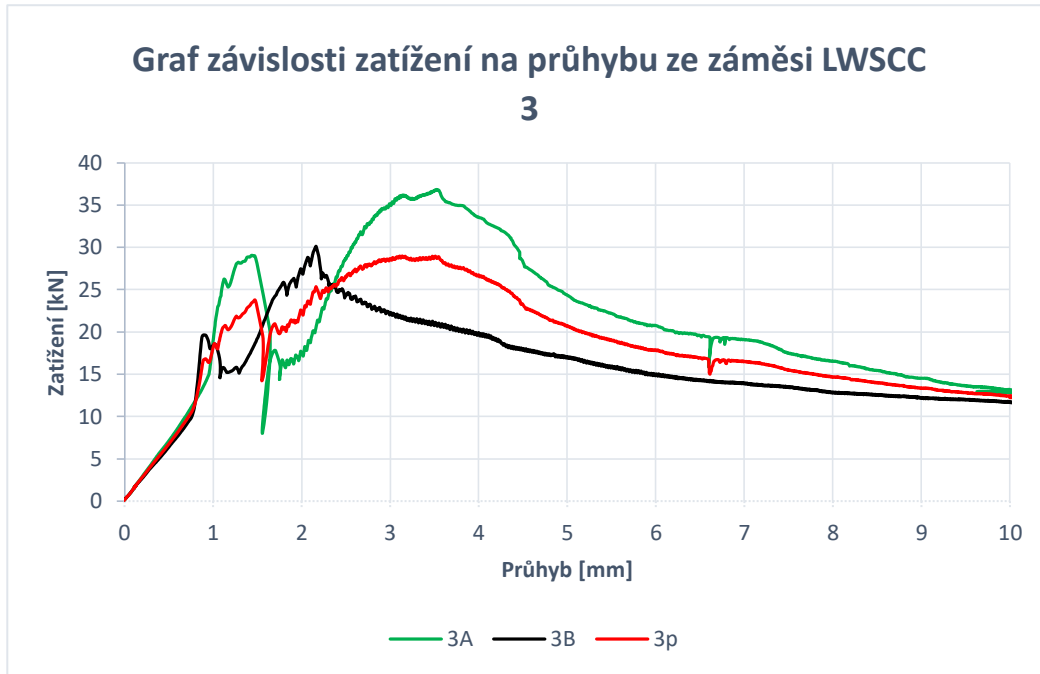
*Obrázek 35 Vzorek ze záměsi LWSCC 2b [vlastní foto]*

#### **5.4.2. Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSCC 3**

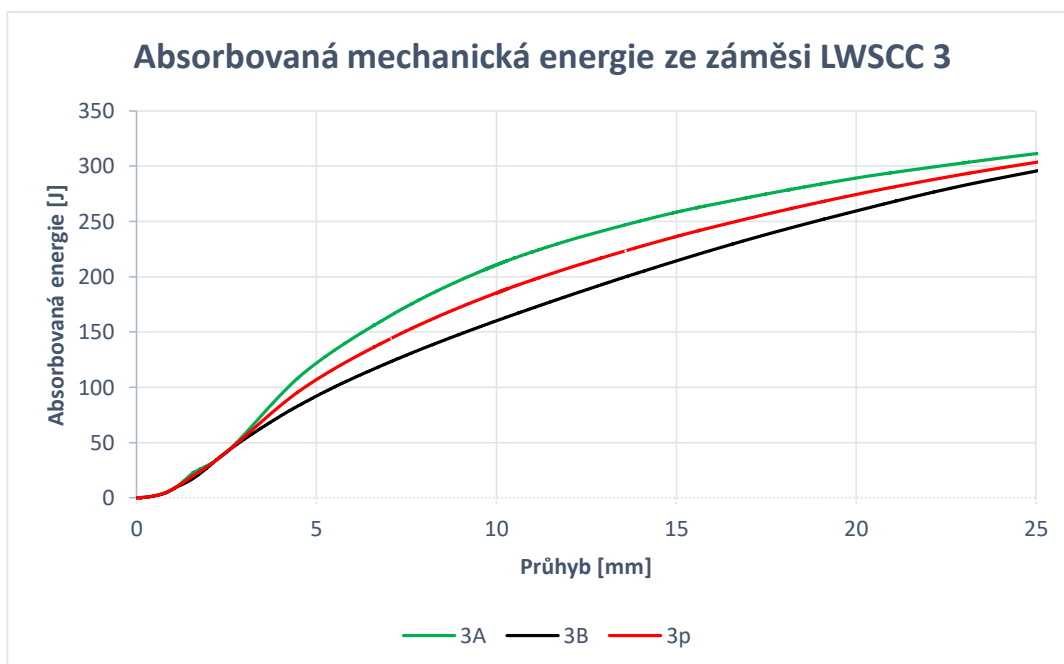
Zkouška absorbované energie pro záměs LWSCC 3 byla zkoušena opět pouze na dvou zkušebních tělesech (3a a 3b). Zkušební desková tělesa byla před provedením zkoušky změřena.

Tabulka 19 Hodnoty měření zkušebních těles LWSCC 3

LWSCC 3	[mm]		
Vzorky	délka	šířka	tloušťka
3a	600	600	105
3b	600	600	103



Graf 24 Závislost zatížení na průhybu ze záměsi LWSCC 3



Graf 25 Zkouška absorbované energie ze záměsi LWSCC 3



Obrázek 36 Zkouška absorbované energie zkušební desky 3a [vlastní foto]

Obrázek 37 Zkušební deska 3a [vlastní foto]

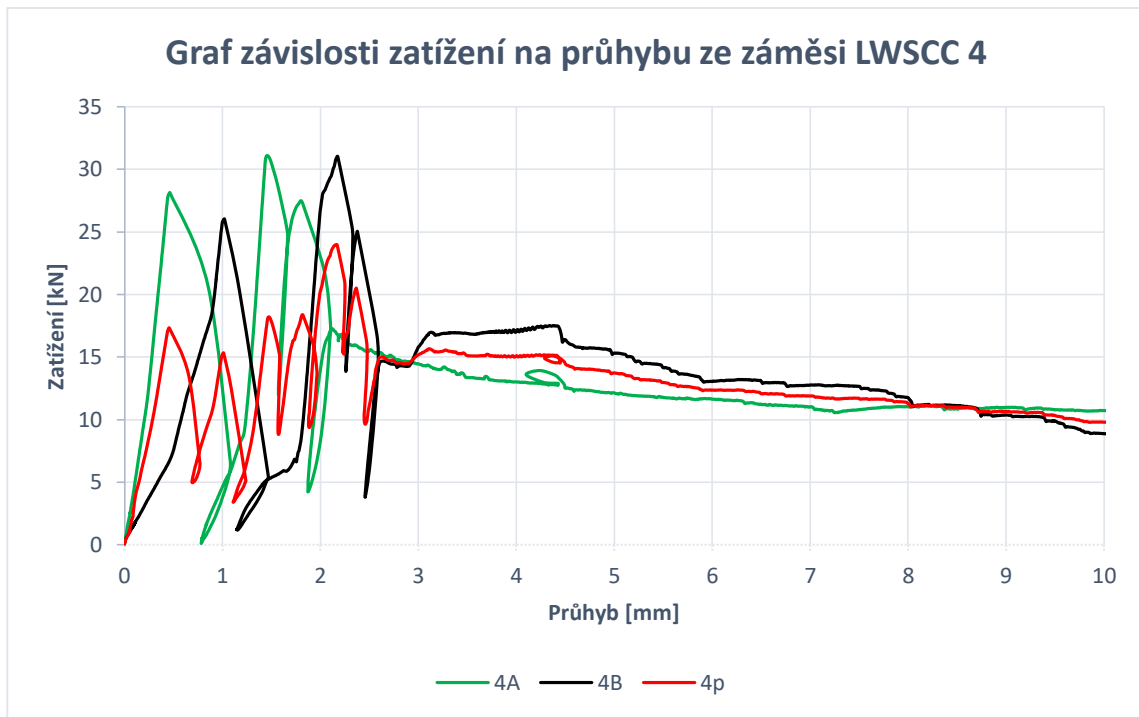
Průběh zkoušky absorbované energie u záměsi LWSCC 3 je znázorněno v grafu 25. V grafu 25 je patrné, že výsledky absorbované energie obou zkušebních těles jsou velmi obdobné, a to při 25 mm průhybu 300 J.

#### 5.4.3. Zkouška absorbovaná mechanická energie u záměsi LWSCC 4

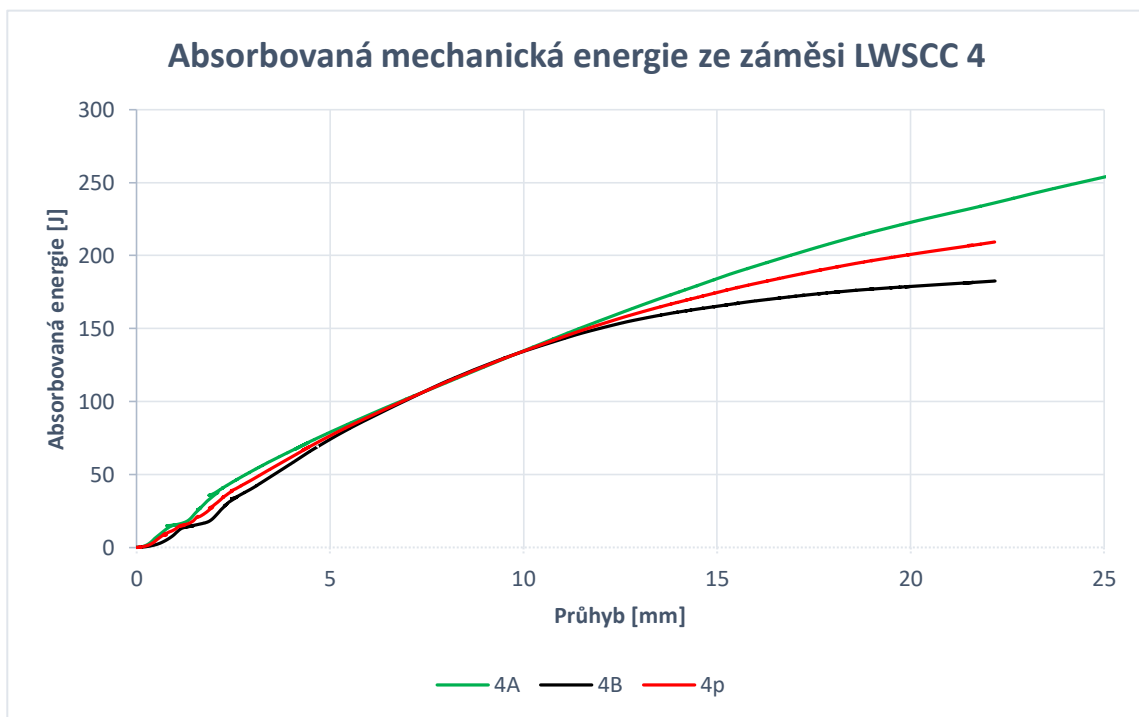
Před samotnou zkouškou absorbované energie byla tělesa řádně změřena, viz. tabulka 20. Zkouška absorbované energie pro záměs LWSCC 4 byla zkoušena na dvou zkušebních tělesech (4a a 4b).

Tabulka 20 Rozměry zkušebních deskových těles ze záměsi LWSCC 4

LWSCC 4	[mm]		
Vzorky	délka	šířka	tloušťka
4a	600	600	104
4b	600	600	105



*Graf 26 Závislost zatížení na průhybu ze záměsi LWSCC 4*



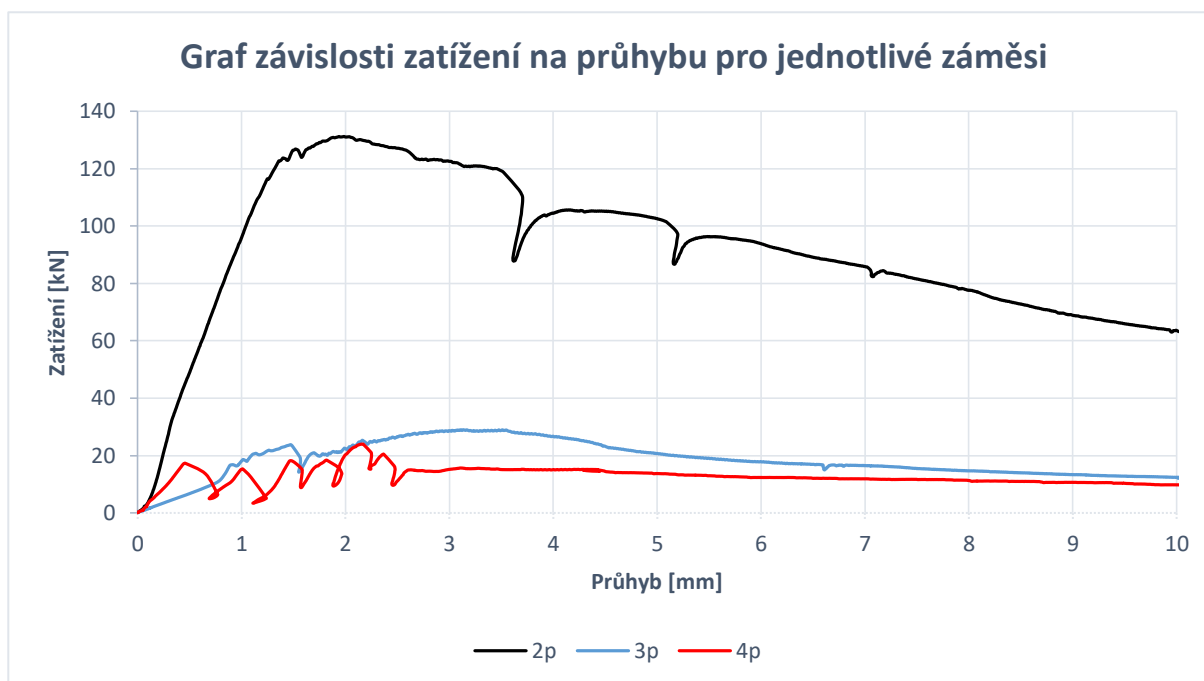
*Graf 27 Absorbovaná energie ze záměsi LWSCC 4*



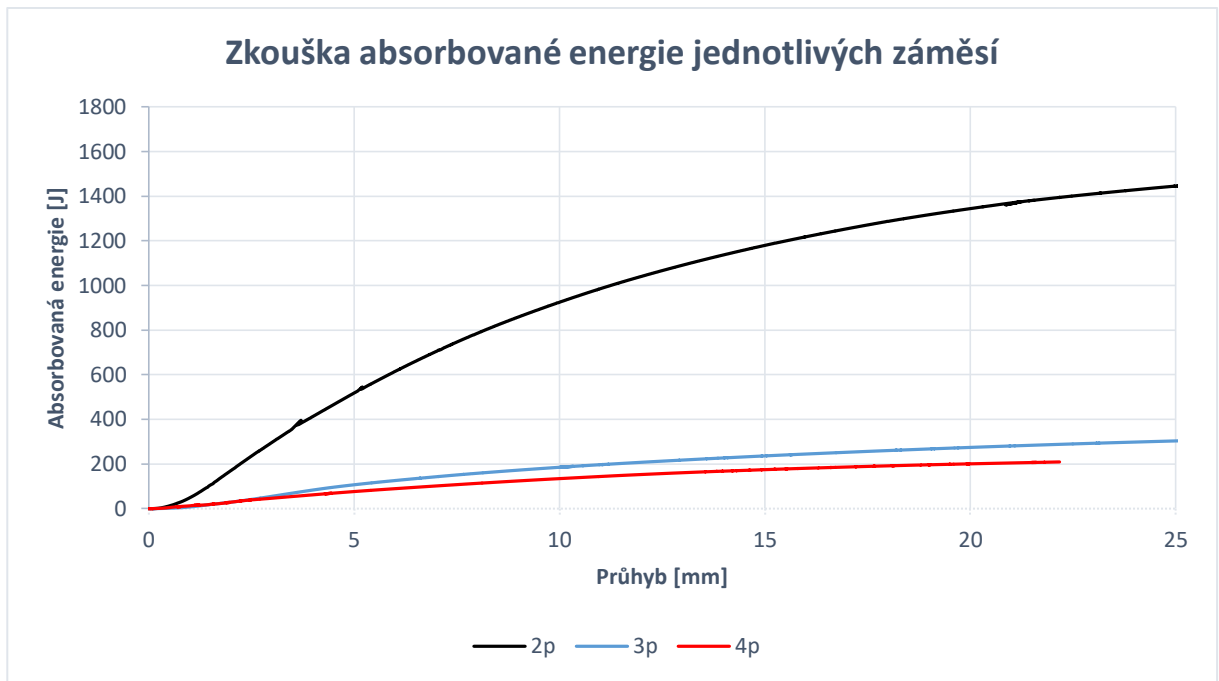
Obrázek 38 Zkušební deskové těleso 4b [vlastní foto]

#### 5.4.4. Porovnání výsledků zkoušky absorbované energie

V grafu 28 jsou znázorněny výsledky průměrných křivek v závislosti zatížení na průhybu. Z této křivky byl vypočten diagram absorbované energie viz. graf 29.



Graf 28 Porovnání průměrných křivek v závislosti zatížení na průhybu



*Graf 29 Porovnání výsledků absorbované energie*

Porovnání výsledků absorbované mechanické energie je vyjádřen v grafu 29. Nejlepších výsledků dosahuje záměs LWSCC 2, kde k tomu výrazně napomohl vzorek 2b. Na obrázku 35 je vyfocen vzorek 2b po absolvování zkoušky absorbované energie, kde je zřejmé velké zastoupení ocelových drátků, které razantně ovlivnili průběh průměrného diagramu ze záměsí LWSCC 2. Z toho je však patrné, že ocelové drátky s vyšším zastoupením mají pozitivní vliv na absorbovanou energii.



## 5.5. Odolnost LWSCC proti výbuchu

Zkouška odolnosti proti výbuchu byla provedena na Univerzitě Pardubice ve spolupráci s Fakultou chemicko–technologickou. Během zkoušení bylo celkem použito přes 1,5 kg výbušniny. Výbuch byl vytvořen pomocí výbušniny Semtex 1A.



*Obrázek 39 Zkouška odolnost LWSCC proti výbuchu [vlastní foto]*

Odolností běžného betonu proti výbuchu je celkem známa záležitost. V diplomové práci je řešena kombinace speciálních betonů ztužených různým drátkovým vyztužením v odolnosti proti výbuchu. Ztužení ocelovými vlákny významně ovlivňuje přetvárné vlastnosti, a proto byla navrhnutá tři odlišná vyztužení, které jsou mezi sebou porovnávány. Experiment je testován na výbuchovou odolnost pouze při kontaktním výbuchu, a to v odlišných zatěžovacích podmínkách, které jsou dány změnou hmotnosti nálože v rozmezí od 25 g až po 150 g. Výsledky byly vyhodnoceny na základě vizuálního pozorování a na měření poškození jednotlivých zkušebních vzorků. Zkouška odolnosti LWSCC proti výbuchu byla odzkoušena na 14 zkušebních vzorcích o rozměrech 600 x 600 x 100 mm. Rozměr zkušebních vzorků byl stanoven na základě nižší hmotnosti, tím lepší manipulaci a v souladu s evropskou normou „ČSN EN 144878–5 Zkoušení stříkaného betonu – část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles“. [5]

Pro uskutečnění zkoušky odolnosti LWSCC proti výbuchu bylo nutné vytvořit rám pro deskové zkušební tělesa, který zároveň musel odolat zatížení výbuchem. Rám byl vyroben

z ocelových U profilů a svařen ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě. Vyhodnocení je stanoveno pouze na základě vizuálním pozorováním a případným měřením.



*Obrázek 40 Ocelový rám pro zkoušku odolnosti LWSCC proti výbuchu [vlastní foto]*

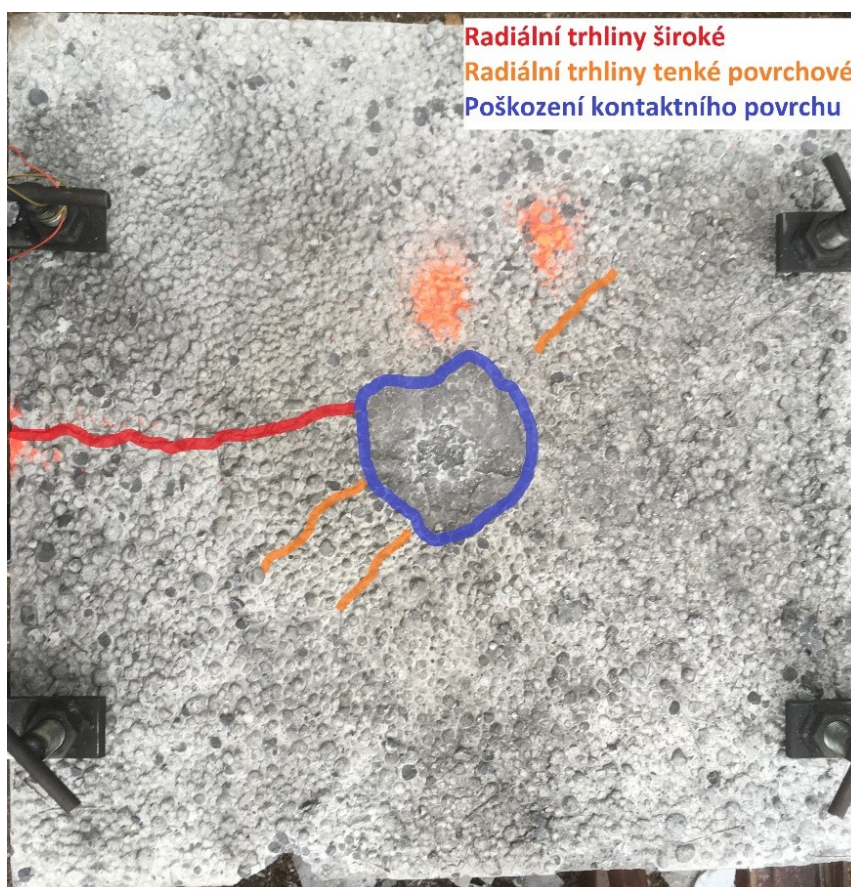
### **5.5.1. Zatížení 25 g výbušniny**

Zatížení 25 g výbušniny Semtex 1A bylo provedeno na 3 vzorcích po jednom ze záměsí LWSCC 2, LWSCC 3 a LWSCC 4. Jednotlivá zkušební tělesa byla před provedením zkoušky změřena. Po výbuchu všech zkušebních těles byl změřen objem porušení jak na straně kontaktní s výbušninou, tak i na straně odvrácené. Objem porušení z obou stran byl sečten a následně odečten od objemu vzorku. Výsledný objem je tak zůstatek betonu po výbuchu.



Tabulka 21 Vyhodnocení betonu při zatížení 25 g výbušniny

Číslo odstřelu	Záměs	Objem vzorku	Objem porušení kontaktního povrchu	Objem porušení odvráceného povrchu	Výsledný objem	Hmotnost nálože	Vzdálenost nálože od vzorku	Typ porušení
[-]	[-]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[g]	[mm]	[-]
25g (2d)	LWSCC 2	36,36	0,1969	0,0126	<b>36,2</b>	25	0	poškození obou povrchů
25g (3d)	LWSCC 3	36	0,1008	0,0016	<b>35,9</b>	25	0	poškození obou povrchů
25g (4d)	LWSCC 4	36	0,1575	0,0182	<b>35,8</b>	25	0	poškození obou povrchů

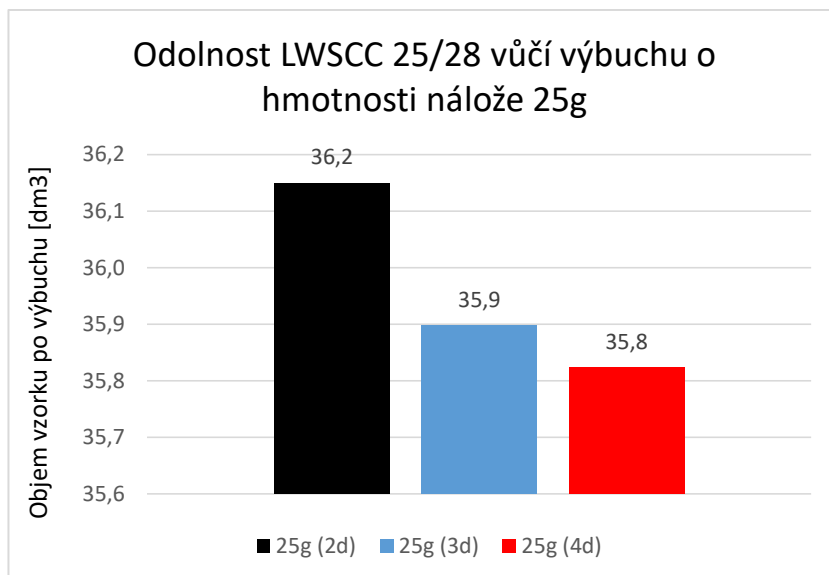


Obrázek 41 Kontaktní strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 25 g výbušniny  
[vlastní foto]



Obrázek 42 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížená 25 g výbušniny  
[vlastní foto]

Při zatížení vzorků 25 g výbušniny se objevily u všech vzorků dva typy trhlin. Oranžovou a červenou barvou jsou vyznačeny (obr. 41 a 42) trhliny, které lze nazvat jako radiální. Oranžové vyznačení představuje trhliny, které jsou složeny z tenkých povrchových trhlin. Tyto trhliny neprostupovaly zkušební tělesem a jejich šířka je v řádech desetin milimetrů. Červené vyznačení představuje trhliny, které jsou složeny ze širokých trhlin. Tyto trhliny často prostoupily zkušební vzorek. U zkušebních těles zatížených 25 g výbušniny odraz přetlakové vlny způsobil velmi malé poškození na odvrácené straně.



*Graf 30 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 25 g výbušiny*

Při zatížení 25 g výbušiny dle výpočtu objemu nejlépe odolává záměs LWSCC 2 viz. graf 30. Všechny vzorky byly poškozeny na kontaktním i odvráceném povrchu. Na vzorcích ze záměsí LWSCC 2 a LWSCC 4 byla zjištěna 2 cm segregace lehkého kameniva na odvrácené straně (což je při plnění čerstvým betonem dno formy).

### 5.5.2. Zatížení 50 g výbušiny

Zatížení 50 g výbušiny Semtex 1A bylo provedeno na 3 vzorcích po jednom z každé záměsí (LWSCC 2, LWSCC 3, LWSCC 4). Jednotlivá zkušební tělesa byla před provedením zkoušky změřena. Po výbuchu všech zkušebních těles byl změřen objem porušení jak na straně kontaktní s výbušninou, tak i na straně odvrácené. Objem porušení z obou stran byl sečten a následně odečten od objemu vzorku. Výsledný objem je tak zůstatek betonu po výbuchu.

*Tabulka 22 Vyhodnocení betonu při zatížení 50 g výbušiny*

Číslo odstřelu	Záměs	Objem vzorku	Objem porušení kontaktního povrchu	Objem porušení odvráceného povrchu	Výsledný objem	Hmotnost nálože	Vzdálenost nálože od vzorku	Typ porušení
[-]	[-]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[g]	[mm]	[-]
50g (2a)	LWSCC 2	37,8	0,3327	0,1331	<b>37,3</b>	50	0	<b>poškození obou povrchů</b>
50g (3a)	LWSCC 3	37,44	0,3327	0,5324	<b>36,6</b>	50	0	<b>poškození obou povrchů</b>
50g (4a)	LWSCC 4	37,8	0,2382	0,6300	<b>36,9</b>	50	0	<b>poškození obou povrchů</b>



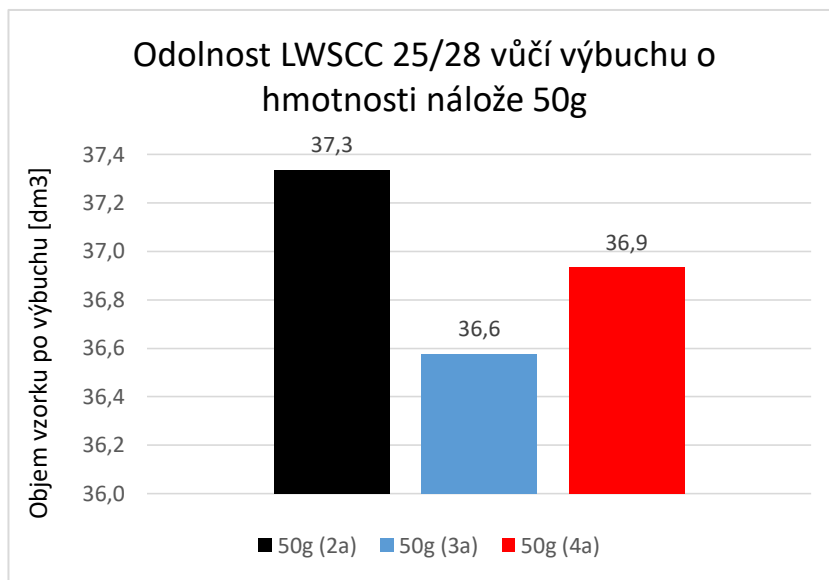


Obrázek 43 Kontaktní strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 50 g výbušniny  
[vlastní foto]



Obrázek 44 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 2 zatížena 50 g výbušniny  
[vlastní foto]

Při zatížení vzorků 50 g výbušniny se objevily u všech vzorků také dva typy trhlin viz obr. 43 a 44. Radiální trhliny o různé velikosti. Oranžově vyznačené trhliny jsou radiální trhliny povrchové a červeně vyznačené jsou radiální trhliny široké, které často prostupovaly skrze celou tloušťku desky. U tohoto zatížení 50 g výbušniny došlo u všech zkušebních těles na odvrácené straně k poškození, které zapříčinil odraz přetlakové vlny.



Graf 31 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 50 g výbušniny

Při zatížení 25 g výbušniny dle výpočtu objemu nejlépe odolává záměs LWSCC 2 viz. graf 31. Všechny vzorky byly poškozeny na kontaktním i odvráceném povrchu. Na zkušebních tělesech ze záměsí LWSCC 4 při zatížení 50 g byla zjištěna lehká 1 cm segregace lehkého kameniva na odvrácené straně.

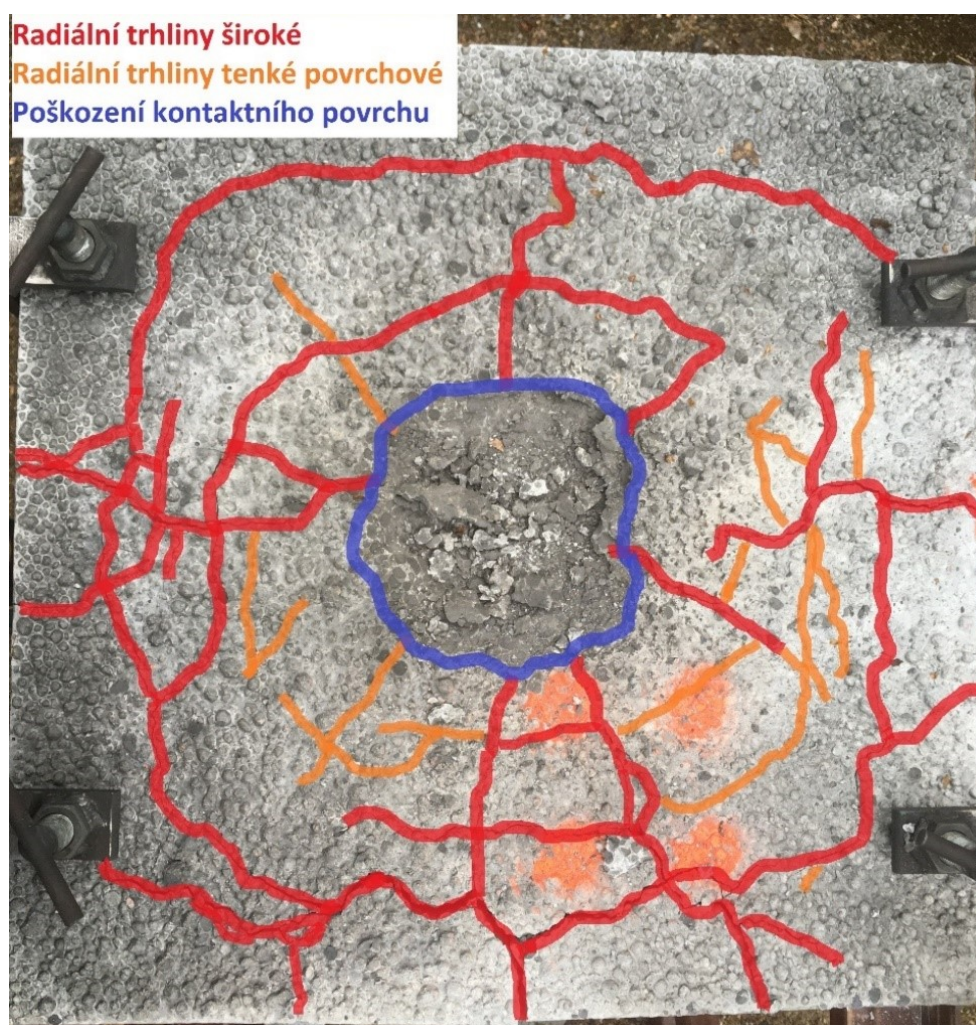
### 5.5.3. Zatížení 100 g výbušniny

Zatížení 100 g výbušniny Semtex 1A bylo provedeno na 4 vzorcích po jednom z každé záměsí (LWSCC 2, LWSCC 3, LWSCC 4) + doplněno o vzorek SCC 45/55 s ocelovými vlákny Dramix 3D s dávkováním 70 kg/m<sup>3</sup>. Toto těleso bylo vyrobeno v rámci diplomové práce Bc. Janem Fadrhensem. Jednotlivá zkušební tělesa byla před provedením zkoušky změřena. Po výbuchu všech zkušebních těles byl změřen objem porušení jak na straně kontaktní s výbušninou, tak i na straně odvrácené. Objem porušení z obou stran byl sečten a následně odečten od objemu vzorku. Výsledný objem je tak zůstatek betonu po výbuchu.



Tabulka 23 Vyhodnocení betonu při zatížení 100 g výbušniny

Číslo odstřelu	Záměs	Objem vzorku	Objem porušení kontaktního povrchu	Objem porušení povrchu	Výsledný objem	Hmotnost nálože	Vzdálenost nálože od vzorku	Typ porušení
[-]	[-]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[g]	[mm]	[-]
100g (2b)	LWSCC 2	36,36	0,5402	1,4175	<b>34,4</b>	100	0	<b>poškození obou povrchů</b>
100g (3b)	LWSCC 3	36	0,2756	1,5876	<b>34,1</b>	100	0	<b>poškození obou povrchů</b>
100g (4b)	LWSCC 4	37,8	0,6174	2,3956	<b>34,8</b>	100	0	<b>poškození obou povrchů</b>
100g (5b)	SCC + 70	36	0,3087	1,1025	<b>34,6</b>	100	0	<b>poškození obou povrchů</b>

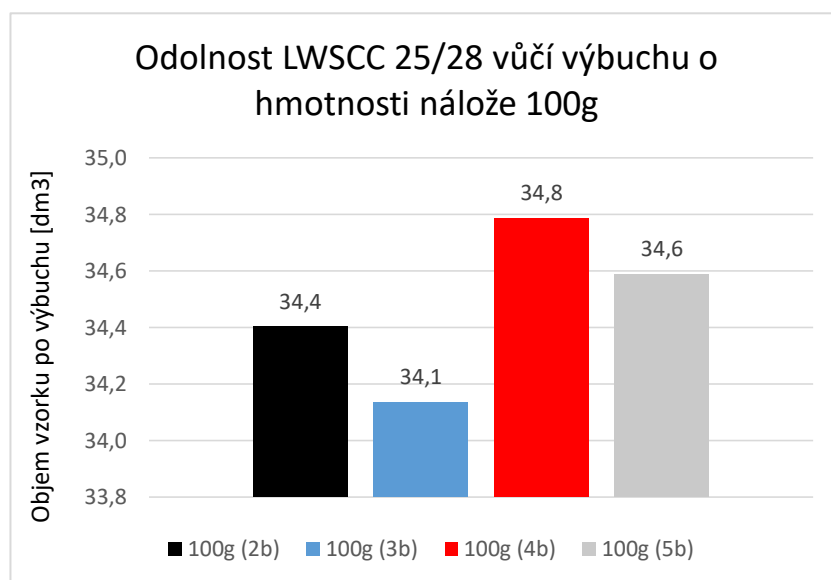


Obrázek 45 Kontaktní strana vzorku ze záměsi LWSCC 4 zatížena 100 g výbušniny  
 [vlastní foto]

Rozhraní prvního odrazu přetlakové vlny  
Rozhraní druhého odrazu přetlakové vlny



Obrázek 46 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 4 zatížena 100 g výbušniny  
[vlastní foto]



Graf 32 Graficky znázorněna odolnost záměsi LWSCC při zatížení 100 g výbušniny

Při zatížení 100 g výbušniny byly všechny vzorky výrazně zničeny, a to především na odvrácené straně. Důvodem je odraz přetlakové vlny od spodního povrchu (rozhraní beton-

vzduch). Na obrázku 46 jsou vyznačeny dvě rozhraní odrazu přetlakové vlny, které byly identifikovány na základě zlomů, které byly po vizuálním zkoumání nalezeny. Zkušební vzorek ze záměsi LWSCC 4 obsahoval větší segregaci lehkého kameniva. Segregace se vyskytovala na odvrácené straně v tloušťce 4 cm. U zkušebního tělesa ze záměsi SCC 45/55 a ocelovými drátky Dramix 3D nedocházelo k tak velkým radiálním trhlinám jako u těles ze záměsí LWSCC. Výsledný objem porušení byl však velmi obdobný u všech porovnávaných se těles.

#### 5.5.4. Zatížení 150 g výbušniny

Zatížení 150 g výbušniny Semtex 1A bylo provedeno na 4 vzorcích po jednom z každé záměsi (LWSCC 2, LWSCC 3, LWSCC 4) + doplněno o vzorek SCC 45/55 s ocelovými vlákny Dramix 3D s dávkováním 70 kg/m<sup>3</sup>. Zkušební těleso bylo vyrobeno Bc. Janem Fadrhensem, který vzorek vyrobil v rámci jeho diplomové práce. Jednotlivá zkušební tělesa byla před provedením zkoušky změřena. Po výbuchu všech zkušebních těles byl změřen objem porušení jak na straně kontaktní s výbušninou, tak i na straně odvrácené. Objem porušení z obou stran byl sečten a následně odečten od objemu vzorku. Výsledný objem je tak zůstatek betonu po výbuchu

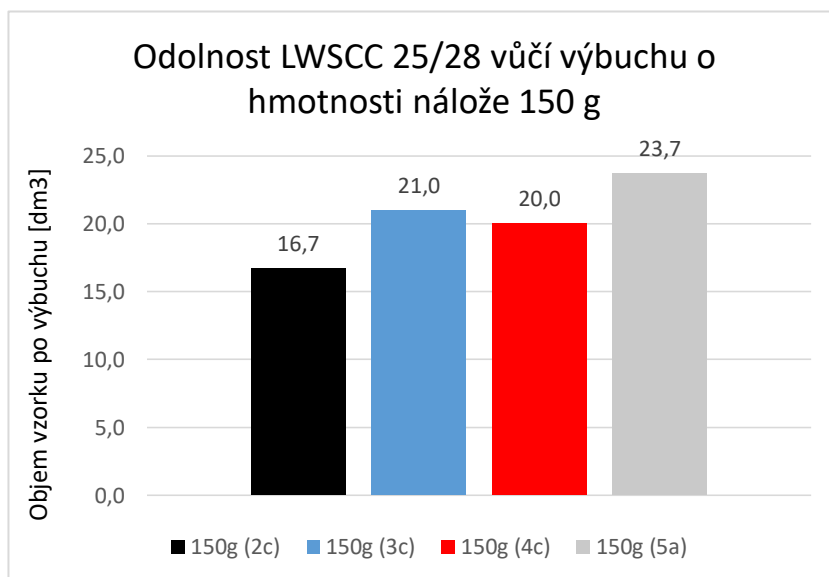
Tabulka 24 Vyhodnocení záměsi betonu při zatížení 150 g výbušniny

Číslo odstřelu	Záměs	Objem vzorku	Objem porušení (průraz)	Výsledný objem	Hmotnost nálože	Vzdálenost nálože od vzorku	Typ porušení
[-]	[-]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[g]	[mm]	[-]
150g (2c)	LWSCC 2	36,36	19,6875	<b>16,7</b>	150	0	<b>průraz</b>
150g (3c)	LWSCC 3	36,72	15,7500	<b>21,0</b>	150	0	<b>průraz</b>
150g (4c)	LWSCC 4	37,08	17,0625	<b>20,0</b>	150	0	<b>průraz</b>
150g (5a)	SCC +70	36	12,3375	<b>23,7</b>	150	0	<b>průraz</b>





Obrázek 47 Odvrácená strana vzorku ze záměsi LWSCC 4 zatížena 150 g výbušniny  
[vlastní foto]



Graf 33 Graficky znázorněna odolnost záměsí LWSCC při zatížení 150 g výbušniny

Při zatížení 150 g výbušniny došlo na všech vzorcích k průrazu. Důvodem je odraz přetlakové vlny od spodního povrchu (rozhraní beton-vzduch). Na obrázku 47 jsou vyznačeny tři rozhraní odrazu přetlakové vlny, které byly identifikovány na základě zlomů, které byly po

vizuálním zkoumání nalezeny. Nejlepších výsledků dosahovalo zkušební těleso ze záměsi SCC 45/55 a ocelovými drátky Dramix 3D.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo porovnání různých druhů vyztužení lehkých samozhutnitelných betonů mimořádným zatížením. Diplomová práce byla koncipována na teoretickou a experimentální část. V teoretické části bylo hlavními cíli popsat teorii lehkých samozhutnitelných betonů a popsat základní souvislosti v teorii mimořádných zatížení, a to konkrétně výbuchy.

Lehký samozhutnitelný beton byl vyroben z receptury typového betonu a doplněn o různé druhy vyztužení, které se mezi sebou vzájemně porovnávaly. Zkoušky byly provedeny jak pro čerstvý, tak pro ztvrdlý beton. U zkoušky čerstvého betonu bylo přistoupeno z důvodu velké časové náročnosti zpracování čerstvého betonu pouze ke zkoušce sednutí-rozlítím kužele a k měření objemové hmotnosti. U zkoušek ztvrdlého betonu byl kladen největší důraz na porovnání různého druhu vyztužení lehkého samozhutnitelného betonu v odolnosti proti výbuchu. K co nejpřesnějšímu stanovení odolnosti proti výbuchu bylo přistoupeno k doplňujícím zkouškám: zkouška pevnost v tlaku, zkouška pevnost v tahu za ohybu a zkouška mechanické absorbované energie. Dalším důležitým cílem byla zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, kde byl požadavek na objemovou hmotnost po vysušení do  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Výstupem bylo vyrobit záměs, která by odolávala co nejlépe mimořádným zatížením (pomocí vláken), která by byla dobře zpracovatelná (pomocí SCC) a která by čerpala výhody lehkých betonů (pomocí lehkého pórovitého kameniva).

**Nejprve byly vyhodnoceny zkoušky čerstvého betonu.** Zkouška sednutí-rozlítím kužele vycházela u všech záměsů v konzistenci SF1. Drátky měly mírně za následek zpomalení rozlití, takže záměsi bez vyztužení dosahovaly o něco většího rozlití viz tabulka 4. Objemová hmotnost čerstvého betonu byla u všech záměsů velmi obdobná a pohybovala se okolo  $2100 \text{ kg/m}^3$ . Záměsi doplněné o výztuž svoji objemovou hmotnost díky výztuži navýšily. Nejnižší objemovou hmotnost dosáhla dle předpokladu záměs bez vyztužení.

Z důvodu epidemiologické situace v ČR, a tím uzavřeným laboratořím bylo ke zkoušení ztvrdlého betonu přistoupeno až po čtyřech měsících od betonáže. **Zkoušení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu** bylo provedeno ve dvou variantách: V první variantě byla objemová hmotnost stanovena postupem „jak bylo dodáno“. V té druhé variantě objemová hmotnost byla stanovena až „po vysušení“. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu v první variantě „jak bylo dodáno“ dosahovala hodnot okolo  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Jedním z cílů diplomové práce bylo stanovit objemovou hmotnost typové receptury po vysušení v třídě D1,8. V této

druhé variantě po vysušení všechna zkušební tělesa pro tuto zkoušku objemové hmotnosti dosahovala požadovaných  $1800 \text{ kg/m}^3$  a méně. Záměsi LWSCC 2 a LWSCC 3 měla objemovou hmotnost vyšší než záměsi LWSCC 1 betonárna a LWSCC 4, což bylo zapříčiněno především vyztužením.

**Pevnostní zkouška v tlaku** byla řešena pro čtyři záměsi LWSCC 1 betonárna, LWSCC 1 laboratoř, LWSCC 2 a LWSCC 3. Vyztužení, které bylo přidáno do jednotlivých záměsí má dle výsledků pozitivní vliv na pevnost v tlaku. Záměsi s ocelovými drátky Dramix 3D nebo kombinací těchto drátků se syntetickými mikrovlákny dosahují až o více jak 10 MPa lepších výsledků pevnosti v tlaku než záměsi bez vyztužení. Nejlepších výsledků dosahuje záměs LWSCC 2 s výztuží ocelových drátků v dávkování  $50 \text{ kg/m}^3$ , kde pevnost v tlaku odpovídá 42,1 MPa.

Z hlediska ohybových zkoušek drátkobetonu byla využita čtyřbodová **zkouška pevnosti v tahu za ohybu**. U této zkoušky byly zkoušeny celkem čtyři záměsi LWSCC 1 betonárna, LWSCC 2, LWSCC 3 a LWSCC 4. Porovnání výsledků u záměsí LWSCC 2 a LWSCC 3 v pevnosti v tahu za ohybu jsou celkem obdobné. Pokud by bylo vyřazeno těleso ze záměsí LWSCC 3a, které dosahuje z důvodu vyššího zastoupení ocelových vláken výrazně vyšších hodnot, tak zbylá tělesa z této záměsí dosahovala obdobných výsledků jako zkušební tělesa ze záměsí LWSCC 2. Hodnoty zatížení při porušení byly u všech záměsí velmi obdobné. Velký rozdíl nastává v reziduální oblasti, kde záměsi s ocelovými drátky Dramix 3D jednoznačně dosahují vyšších zatížení. Jednoznačně lze konstatovat, že ocelové drátky, hrají v reziduální oblasti klíčovou roli, kde přemostují trhliny v betonu. U záměsí s ocelovými drátky Dramix 3D docházelo po vzniku makrotrhliny k pozvolnému snížení pevnosti, kdežto u záměsí s rabicovým pletivem nastal prudké snížení pevnosti. V reziduální oblasti tak dosahovala záměs LWSCC 4 nižší odolnosti zatížení než záměsi s ocelovými drátky Dramix 3D (LWSCC 2 a LWSCC 3)

**Zkouška mechanické absorbované energie** byla provedena na třech záměsích LWSCC 2, LWSCC 3 a LWSCC 4. Z výsledků je patrné, že zkušební tělesa vyztužená ocelovými drátky mnohem lépe absorbují mechanickou energii. Zkušební tělesa ze záměsí LWSCC 2 vykazovala velmi odlišné výsledky absorbované energie. Důvodem bylo nerovnoměrné zastoupení drátků v jednotlivých zkušebních tělesech. Vzorky tak vykazovaly různé způsoby porušení. Z dosud provedených výsledků je patrné, že vyztužení ve formě ocelových drátku Dramix 3D více přispívají ke zvýšení absorbované energie u jednotlivých vzorků. Rabicové pletivo v kombinaci

s mikrosyntetickými vlákny, které bylo použito v záměsi LWSCC 4 nedokáže, tak efektivně přemostovat makrotrhliny jako ocelová vlákna. Je však nutné konstatovat, že záměs s rabicovým pletivem dosahuje u jednotlivých zkušebních těles velmi obdobné výsledky, kdežto záměsi vyztužené rozptýlenou výztuží dosahují u některých zkušebních těles naopak velmi rozdílné výsledky.

**Odolnost LWSCC proti výbuchu** byla stanovena vizuálním pozorováním a měřením objemu porušeného betonu. V rámci zkoušky byly všechny vzorky zatíženy pouze kontaktním výbuchem. Celkem bylo během zkoušky výbuchu použito 14 zkušebních deskových těles. Zkušební tělesa byla zatížena 25 g, 50 g, 100 g a 150 g výbušniny. Zkušební tělesa zatížena do 100 g výbušniny byla poškozena na obou stranách povrchů. U všech zkušebních těles zatížených 150 g výbušniny bylo poškození typu průrazu. Na vzorcích vystavených výbuchu byly pozorovány dva typy trhlin. První typ byl složen z radiálních hlubokých trhlin, často tyto trhliny prostupovaly skrze celou tloušťku desky. Druhý typ byl složen z malých povrchových trhlin, které byly v řádech desetin milimetru. Podrobným vizuálním hodnocením bylo vyzorováno, že při vyšším zatížení výbuchem rabicové pletivo v kombinaci se syntetickými mikrovlákny odolává výbuchu o něco lépe než ocelová vlákna. Rabicové pletivo i přes průraz drží LWSCC více pospolu než LWSCC vyztužený pouze ocelovými vlákny. Nebezpečí u vyztužení ocelovými vlákny je ve vymrštění odštěpku vysokou rychlostí, které by se mohly změnit v projektily. Ve zkoušce odolnosti proti výbuchu byla dále porovnávána zkušební tělesa z LWSCC s tělesem vyrobeného z typového betonu SCC 45/55. I přesto, že typový beton z SCC 45/55 dosahoval o něco menších porušení, tak rozdíl nebyl nijak razantní. Na základě dosud provedených experimentů lze konstatovat, že LWSCC vyroben z typové receptury LC 25/28 vyztužen ocelovými drátky nebo rabicovým pletivem v kombinaci se syntetickými mikrovlákny je téměř srovnatelný s typovým betonem SCC 45/55 vyztuženým stejným typem drátků v odolnosti proti výbuchu.

Vzniknuté dva problémy během zpracování čerstvého betonu do zkušebních těles jako poučení pro případný další experimentální činnosti v této oblasti.

První problém vznikl při betonáži samozhutitelného betonu, kde došlo k problému správného promíchání ocelových drátků. Ocelové drátky ve velmi hutném lehkém samozhutitelném betonu měly tendenci se více shlukovat a vytvářet tzv. ježky.

Druhým problémem byla segregace lehkého kameniva opačným směrem. Segregace lehkého kameniva vznikla pouze u deskových zkušebních těles. V další experimentální činnosti

je doporučeno řešení příčiny segregace lehkého kameniva opačným směrem např. (vliv ocelových drátů na segregaci).

### **Ohlas do praxe**

Na základě dosud provedených experimentálních prací lze konstatovat, že lehkýsamozhutnitelný vláknobeton má velký potenciál ve využití v praxi. V praxi by tato směs mohla nalézt uplatnění především v prefabrikaci. Prefabrikáty vyrobené z tohoto speciálního betonu by mohly nalézt uplatnění v podzemních stavbách. Prefabrikované dílce by mohly být použity v ostění, kde by zajistily svými vlastnostmi stabilní ostění. Vlastnosti tohoto betonu jako jsou nižší hmotnost, vyšší pevnost v rázech by mohly najít uplatnění v tomto směru. V pozemních stavbách by své uplatnění mohly najít ve výstavbě domů zejména prefabrikovaných dílů.

### **Směřování dalšího výzkumu**

Směřování dalšího výzkumu v odolnosti LWSCC proti výbuchu by tak mohlo být v detailnější analýze chování zkušebního tělesa během výbuchu. Původním záměrem této diplomové práce mělo být měření výbuchu pomocí vysokorychlostních 3D DIC kamer, pomocí kterých by bylo možné měřit napětí, které se na zkušebním tělese během výbuchu objevují. DIC kamery jsou schopny dále měřit povrchové deformace, monitorování stavebních konstrukcí a jiné zajímavé aplikace. Dalším námětem na směřování výzkumu by tak mohlo být zaměření se na samotný lehkýsamozhutnitelný vláknobeton. Zabývat se konkrétně soudržnosti LWSCC a vlákna, orientací vláken v LWSCC nebo řešení problematiky zabránění segregace lehkého kameniva, která při výrobě čerstvého betonu nastala. Dalším námětem by tak mohl být výzkum v oblasti vyztužení rabicovým pletivem v kombinaci s polymerovými nebo skelnými vlákny.

## CITACE

[1] ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[2] ČSN P 73 2404. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[3] ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[4] ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[5] ČSN EN 14488-5. Zkoušení stříkaného betonu - Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[6] ČSN P 73 2450, 2015. Vláknobeton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[7] ČSN P 73 2451, 2015. Vláknobeton - Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[8] ČSN P 73 2452, 2015. Vláknobeton - Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[9] TKP staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy, 2016.

[10] TKP staveb státních drah: Kapitola 17: Beton pro konstrukce. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2013.

[11] BAREŠ, Richard A., 1988. Kompozitní materiály. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. Redakce stavební literatury. Typové číslo L17-B3-IV-31/72231.

[12] COLLEPARDI, M., 2009. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

[13] KRÁTKÝ, J., K. TRTÍK a J. VODIČKA, 1999. Drátkobetonové konstrukce: Úvodní část a příklady použití: Směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.

[14] HUBERTOVIÁ, Michala. Lehký Beton. Betonové konstrukce 21. století. 2012, 2012(12), 107-119.

[15] Schutter, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMODE, John GIBBS a Rudolf HELLA. Samozhutnitelný beton. Praha: ČBS servis, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.

[16] Peter JM BARTOŠ, Betonové konstrukce 21. století – Betony s přidanou hodnotou – Vlákno-beton. 2012, vyd 7, s 68 – 78.

[17] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: skriptum*. Brno: VUT v Brně, fakulta stavební, 2005.

[18] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky: skriptum*. Brno: VUT v Brně, fakulta stavební, 2006.

[19] Liapor. Co je liapor [online]. Vintířov [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz/co-je-liapor>

[20] KŘÍŽOVÁ, Katarína. Betonové konstrukce I. Praha: Sobotáles, 2010. ISBN 978-80-86817-39-2.

[21] SVOBODA, Pavel a Josef DOLEŽAL. Průmyslové podlahy a podlahy v objektech pozemních staveb. Bratislava: JAGA GROUP, 2007. ISBN 978-80-8076-054-0.

[22] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty [online]. 3. vydání. Praha, 2013 [cit. 2020-12-30]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodah/sh/>

[23] Rugen leták: Lehké umělé kamenivo. Beton.cz [online]. Praha: CEMEX Czech Republic, 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.beton.cz/files/Default/cemex-rugen-letak.pdf>



[24] FOGLAR, Marek, Eva KARASOVÁ, Vladimír KŘÍSTEK a Alena KOHOUTKOVÁ. Beton TKS 10: Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem a nárazy. 2010, první (2), 71-73.

[25] FOGLAR, Marek. Výbuchová odolnost železobetonových prvků a prvků z vláknobetonu. 2013, 1-25.

[26] ČSN EN 1991-1-7 (730035). Zatížení konstrukcí - Část 1-7: Obecná zatížení - Mimořádná zatížení. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[27] ČSN EN 1990 ed. 2 (730002). Zásady navrhování konstrukcí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2015.

[28] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[29] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[30] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[31] JUNG, Karel, Miroslav SÝKORA, Milan HOLICKÝ, Jana MARKOVÁ, Pavel MAŇAS, Zdeněk VINTR a Lubomír KROUPA. Hodnocení bezpečnosti a rizik silničních mostů a tunelů. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06516-7.

[32] MAKOVIČKA, Daniel, Břetislav JANOVSÝ a Milan ČERNÍN. Příručka protivýbuchové ochrany staveb. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04090-4.

[33] BENTUR Arnon, Sidney MINDESS. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007. ISBN 9780203088722.

[34] SOVJÁK, Radoslav, Tomáš VAVŘINÍK, Jan ZATLOUKAL, Petr MÁCA, Tomáš MIČUNEK a Michal FRYDRÝN. Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets. International journal of impact engineering [online]. Elsevier,

2015, 76, 166-177 [cit. 2021-6-24]. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.10.002.

[35] KHALOO, Alireza, Elias MOLAEI RAISI, Payam HOSSEINI a Hamidreza TAHSIRI. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. Construction & building materials [online]. Elsevier, 2014, 51(C), 179-186 [cit. 2021-6-24]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054

[36] ŠTOLLER Jiří,. Beton TKS 10: Reakce na článek “Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem a nárazy“. 2010, pátý (5), 84-86.

[37] VÁVRA, Pavel a Jiří VÁGENKNECHT. UNIVERZITA PARDUBICE. KATEDRA TEORIE A TECHNOLOGIE VÝBUŠIN. Teorie působení výbuchu: licenční studium. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008, 105 s. ISBN 978-80-7395-125-2

[38] ULLAH, Aleem, Furqan AHMAD, Heung-woon JANG, Sung-wook KIM a Jung-wuk HONG. Review of analytical and empirical estimations for incident blast pressure. KSCE Journal of Civil Engineering [online]. Seoul: Korean Society of Civil Engineers, 2017, 21(6), 2211-2225 [cit. 2021-6-25]. ISSN 1226-7988. Dostupné z: doi:10.1007/s12205-016-1386-4

[39] HENRYCH, J. Dynamika výbuchu a její užití. První. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1973. ISBN 509-21-875.

[40] Ebeton. Ocelová vlákna do betonu [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/ocelova-vlakna-do-betonu>

[41] Terrorism - number of fatalities worldwide 2006-2019. Statista [online]. [cit. 2021-6-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/202871/number-of-fatalities-by-terrorist-attacks-worldwide/>

[42] Ultra-vysokopevnostní betony – UHPC: Kategorizace pevnostních tříd. Tbg-metrostav [online]. [cit. 2021-6-25]. Dostupné z: <http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-betony-uhpc>

[43] [online]. [cit. 2021-6-25]. Dostupné z: [https://cdn.xsd.cz/resize/8d70bae2581c367ab357085c52088a4f\\_resize=480,320\\_.jpg?hash=bbf4a42c9fa48e4889971ac54f170144](https://cdn.xsd.cz/resize/8d70bae2581c367ab357085c52088a4f_resize=480,320_.jpg?hash=bbf4a42c9fa48e4889971ac54f170144)

[44] KOSINKA, Filip. *Drátkobetony – porovnání vlivu délky drátků na pevnostní charakteristiky*. Pardubice, 2018. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera.

[45] [online]. [cit. 2021-7-04]. Dostupné z: [https://1gr.cz/fotky/idnes/13/021/cl6/AHA48f042\\_Rescuers.JPG](https://1gr.cz/fotky/idnes/13/021/cl6/AHA48f042_Rescuers.JPG)

[46] GRABOIS, Thiago Melo, Guilherme Chagas CORDEIRO a Romildo Dias TOLEDO FILHO. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 104, 284-292 [cit. 2021-7-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060

[47] *Construction and Building Materials*. Reigate: Scientific and Technical Press, 1987-. ISSN 09500618.

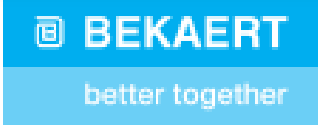
[48] LI, Jingjun, Enjia ZHAO, Jiangang NIU a Chaojun WAN. Study on mixture design method and mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **267** [cit. 2021-7-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121019

[49] YE, Xin, Chunfeng ZHAO, Kaicheng HE, Lei ZHOU, Xiaojie LI a Jingfeng WANG. Blast behaviors of precast concrete sandwich EPS panels: FEM and theoretical analysis. *Engineering Structures* [online]. 2021, **226** [cit. 2021-7-11]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2020.111345

# **DOKLADOVÁ ČÁST**


Obsah dokladové části:


A. Technický list ocelového vlákna Dramix 3D 45/50 BL



**BEKAERT**  
better together

# Dramix®





## 3D

Dramix

# 45/50

## BL

Aspect ratio
Length
Height
Loops

### DATASHEET

#### Characteristics


**Material properties**


Nom. tensile strength: 162 ksi (1,115 MPa)


Young's modulus: 29,000 ksi (200,000 MPa)


Strain at ultimate strength: 0.8 %

**Geometry**

Fiber family: **3D** 

Length (l): 2.0 in. (50 mm) 

Diameter (d): 0.04 in. (1.03 mm) 

Aspect ratio (l/d): 45 

**Minimum EN 14889-1 dosage**

34 lb/yd<sup>3</sup> (20 kg/m<sup>3</sup>)

**Fiber network**

7,369 lb/yd<sup>3</sup> at 34 lb/yd<sup>3</sup> (punch area) or 20 kg/m<sup>3</sup>







1,290 fibers/lb (punch towing)

**Dramix® family**

3D Typical SFRC applications  
4D Supreme serviceability control  
5D Advanced structural applications

	5D	4D	3D
Tensile strength	█	█	█
Wire ductility	█	█	█
Anchorage strength	█	█	█

#### Product certificates \*










\*Product certificates are plant specific.

#### Product conformity


Dramix® conforms to ASTM A820, EN 14889-1 and ISO 13270 Class A.

#### System certificates





All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

#### Packaging





**BAGS**  
44 lb  
20 kg



**BIG BAG**  
1,760 - 2,420 lb  
800 - 1,100 kg

#### Handling

#### DRAMIX® 3D 45/50BL

**The original anchorage**

Dramix® 3D is the cost-efficient fiber for standard statically indeterminate concrete structures that are submitted to regular static, fatigue and dynamic loadings.

**Bekaert construction support**

You can count on our support for each step of your project, from concept design to on-site quality support. Our services include recommendations on slab design, construction detailing, concrete optimization and automatic total quality control procedures. We are also happy to share our knowledge with you and your team.

Feel free to ask us for a workshop or training on the topic of steel fiber reinforcement in your offices.

Bekaert reserves the right to modify, discontinue or rebrand this product at any time with or without notice. All information contained herein is general and may not be complete. For further details, please contact the local Bekaert office.

Download: 3D 45/50 BL 2014 US 20191019