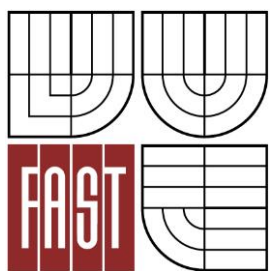




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

STUDIUM VLIVU SLOŽENÍ LEHKÝCH VLÁKNOBETONŮ NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE LIGHTWEIGHT FIBER
CONCRETE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID ŠINDELEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2016

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student David Šindelek

Název Studium vlivu složení lehkých vláknobetonů na fyzikálně-mechanické vlastnosti

Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru,
- Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2014

Zásady pro vypracování

Betony s rozptýlenou výztuží z ocelových vláken se zatím výrazně uplatňují u normálních betonů hlavně v průmyslových podlahách. Kombinace lehkých konstrukčních betonů a rozptýlené výztuže z ocelových vláken se zatím průmyslově nevyužívá. Naskýtá se možnost nahradit v některých nosných konstrukcích klasickou výztuž vhodnými ocelovými vlákny. Problematický je ovšem způsob jejich rovnoměrného rozmíchání a poté zhutnění lehkého betonu při dávkách vláken vyšších než 20 kg/m³ a při délkách nad 35 mm.

Cílem vaší bakalářské práce bude vypracovat podrobnou rešerši poznatků ze zahraničních i tuzemských odborných zdrojů vztahujících se k navrhování a vlastnostem lehkých betonů s pevnostmi vyššími než 35 MPa a objemovou hmotností ve třídě D 1,8. Zjistěte jaké typy, délky a hlavně dávky ocelových vláken se ve světě pro vyztužování lehkých betonů využívají. Popište ve světě používané metodické postupy zkoušení mechanických vlastností lehkých vláknobetonů, hlavně pro posouzení jejich výkonosti do vzniku a po vzniku trhlin.

V experimentální části navrhnete receptury lehkých betonů LC 35/38, D1, 8 a LC 45/50, D, 1,8 konzistence S3, zvolte vhodný typ ocelových vláken délky 50 a 60 mm a ověřte jejich dopad na vývoj pracovních diagramů a pevnosti v tlaku na tělesech 150x150x700mm při dávkování 25 a 30 kg/m³ betonu.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá studiem lehkých konstrukčních betonů doplněných o ocelová vlákna, kde sleduje jejich dopad na fyzikální a mechanické vlastnosti. Práce je rozdělena do dvou částí, teoretickou a praktickou. Teoretická část je zaměřena na vlastnosti a navrhování lehkých betonů v pevnostní třídě nad 35MPa s objemovou hmotností ve třídě D 1,8. Dále se zaměřuje na zvýšení houževnatosti cementových kompozitů, formou aplikace ocelových vláken v různých dávkách a délkách. V praktické části byly navrženy receptury ve dvou pevnostních třídách 35/38 D 1,8 a 45/50 D 1,8 s použitím ocelových vláken KrampeHarex v dávkách 25 a 30 kg/m³, kde byl sledován jejich dopad na vývoj pracovního diagramu a pevnost v tlaku po 28 dnech.

Klíčová slova

Beton, lehký beton, lehké kamenivo, ocelová vlákna, pevnost v tlaku, pevnost v tahu

Abstract

This bachelor thesis deals with a study of light construction concrete with an addition of steel fibre which monitors its impact of the physical mechanical properties. The work is divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical part is focused on characteristics and a design of light concrete within the class 35MPa and over with the density within the class of D1,8. Furthermore, it focuses on the increase of toughness of cementitious composites with the form of application of steel fibre in different doses and lengths. In the practical part, formulas of two strength classes 35/38 D 1,8 and 45/50 D1,8 were designed with the help of the steel fibre Krampeharex in doses of 25 and 30 kg/m³, and where there were both its impact of the working diagram as well as the compressive strength monitored for the duration of twenty-eight days.

Keywords

Concrete, lightweight concrete, lightweight aggregate, steel fibers, compressive strength, post-cracking flexural tensile strength

Bibliografická citace VŠKP

David Šindelek *Studium vlivu složení lehkých vláknobetonů na fyzikálně-mechanické vlastnosti*. Brno, 2016. 73 s., 7 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje

V Brně dne 28. 5. 2016

.....

podpis autora
David Šindelek

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce panu prof. Ing Rudolfu Helovi, CSc. za odborné vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Dále všem pracovníkům ústavu THD, zejména panu Klímovi za pomoc s praktickou částí práce a všem ostatním zaměstnancům ÚTHD FAST VUT Brno, kteří se na realizaci mé práce podíleli.

Obsah

ÚVOD	1
I. TEORETICKÁ ČÁST	2
1 LEHKÉ BETONY – LIGHT WEIGHT CONCRETE (LWC)	2
1.1 Druhy lehkých betonů z hlediska pórů	2
1.1.1 Hutné lehké betony	2
1.1.2 Mezerovité betony	3
1.2 Základní vlastnosti Lehkých betonů	4
1.2.1 Objemová hmotnost.....	4
1.2.2 Pevnost v tlaku.....	4
1.2.3 Modul pružnosti.....	5
1.3 Základní složky lehkých betonů	6
1.3.1 Cement.....	6
1.3.2 Voda.....	6
1.3.3 Kamenivo.....	9
1.3.4 Liapor.....	11
1.3.5 Příměsi	19
1.4 Příměs druhu II aktivní příměsi	20
1.4.1 Popílký.....	20
1.4.2 Vysokoteplotní popílek.....	20
1.4.3 Nízkoteplotní fluidní popílký	21
1.4.4 Mikrosilika, nanosilika	24
1.4.5 Mletá granulovaná vysokopecní struska.....	27
1.4.6 Přísady	28
1.4.7 Výztuž v betonu	30
1.4.8 Vláknobetoný (FRC)	31
1.5 Vláknobeton s ocelovými vlákny (SFRC)	33
1.5.1 Vlastnosti drátkobetonu s ocelovými vlákny.....	34
1.5.2 Složky drátkobetonové směsi	35
1.6 Vliv dávky vláken na vlastnosti lehkého betonu	36
1.7 Vliv délky vláken na vlastnosti lehkého betonu	38
1.8 Vliv tvaru vlákna na vlastnosti lehkého betonu	40
1.9 Zkoušení lehkého konstrukčního vláknobetonu	44
1.9.1 Zkoušky čerstvého lehkého vláknobetonu	44
1.9.2 Zkoušení zatvrdlého lehkého vláknobetonu	45
II. PRAKTICKÁ ČÁST	49
2 POUŽITÉ SUROVINY	49
2.1 Cement.....	49
2.2 Voda	49
2.3 Popílek	50
2.4 Kamenivo.....	50
2.5 Vlákna.....	50
2.6 Superplastifikační přísada	51
3 RECEPTY	51
3.1 Provedené zkoušky a výsledky	53
3.1.1 Zkoušky čerstvého betonu	53
3.1.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu	54
3.1.3 Zkoušky zatvrdlého betonu	55
3.1.4 Pevnost v tlaku.....	57
ZÁVĚR	59

4	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
5	SEZNAM POUŽITÝCH NOREM.....	67
6	SEZNAM PŘÍLOH	68
6.1	Seznam grafů.....	68
6.2	Seznam obrázků.....	69
6.3	Seznam tabulek.....	70
6.4	Seznam použitých zkratek	70
	PŘÍLOHY	73

Úvod

Beton stále patří mezi nejrozšířenější stavební materiál a jeho modifikace nacházejí uplatnění takřka ve všech oblastech. Použití lehkého betonu pro stavební aplikaci přitahuje velký zájem kvůli jeho významné výhodě z hlediska návrhové flexibility a celkových nákladů.

Lehký beton má řadu materiálových a technických předností jakými jsou především vysoká pevnost, nízká objemová hmotnost a dobré tepelně izolační vlastnosti. Nicméně z konstrukčního hlediska čeká na stále širší využití, kterých lze docílit přidáním nejen ocelových vláken.

Kombinací lehkého betonu a ocelových vláken, vznikne kompozitní materiál, který je charakteristický odlišnými pevnostními a přetvárnými vlastnostmi, oproti obyčejnému lehkému betonu. Tyto rozdílné vlastnosti mezi lehkým betonem a lehkým vláknobetonem jsou řešeny v dané bakalářské práci.

V teoretické části bakalářské práce jsou popsány vlastnosti lehkých betonů v kombinaci s ocelovými vlákny v různých dávkách, délkách s dopadem na jejich fyzikální a mechanické vlastnosti.

V praktické části jsou navrženy dvě receptury lehkých betonů ve dvou pevnostních třídách v kombinaci s ocelovými vlákny, kde je sledován jejich dopad na pevnost tlaku a vývoj pracovního diagramu.

I. Teoretická část

1 Lehké betony – Light weight concrete (LWC)

Lehké betony označované jako LWC je speciální skupina betonů, který má po vysušení objemovou hmotnost nižší než 2000 kg/m^3 . Ve své struktuře jsou vylehčeny přímo v cementovém kameni s větším objemem pórů, které můžeme vytvořit použitím plynotvorných či pěnotvorných přísad nebo použitím přírodního a umělého lehkého kameniva. Tyto způsoby vylehčení vytváří oproti normálnímu betonu sníženou objemovou hmotnost zatvrdlého betonu. ^[1]

1.1 Druhy lehkých betonů z hlediska pórů

Lehké betony dělíme z hlediska obsahu pórů ve zhutněném betonu na hutné a mezerovité. Důležitý je objem pórů ve zhutněném betonu, který by měl být podle různých norem v rozmezí 3-4 %. Do tohoto objemu se započítává objem mezer mezi zrny vzniklých nedokonalým zhutněním betonu, mezerovitostí kameniv nebo napěněním maltové složky pomocí napěňovacích přísad, nedostatečným obsahem malty v betonu, záměrně vysokou mezerovitostí kameniv. Do tohoto objemu však nezapočítáváme objem pórů v maltě vzniklé odpařením vody nenavázané na cement a objem pórů v kamenivu. Dále se nezapočítává objem záměrně vytvořených provzdušňovacích pórů, které jsou vytvořeny během míchání pomocí napěňovacích a provzdušňovacích přísad za účelem zvýšení odolnosti betonu proti rozmrazovacím solím a mrazu. ^[13]

1.1.1 Hutné lehké betony

U hutných lehkých betonů docílíme snížení objemové hmotnosti použitím pórovitého kameniva (obrázek 1). Vzduchové póry jsou zde přítomny v menších nebo větších shlucích v zrnech tohoto kameniva, které je prakticky spojeno cementovým tmelem.

Lehké betony navrhujeme za účelem dosažení minimální objemové hmotnosti nebo s cílem dosáhnout co nejvyšší pevnosti při minimální objemové hmotnosti. Objemová hmotnost lehkých hutných betonů se pohybuje od $800 - 2000 \text{ kg/m}^3$, pevnost v tlaku je nepřímo úměrná objemové hmotnosti která se pohybuje v rozmezí $10 - 80 \text{ MPa}$, modul

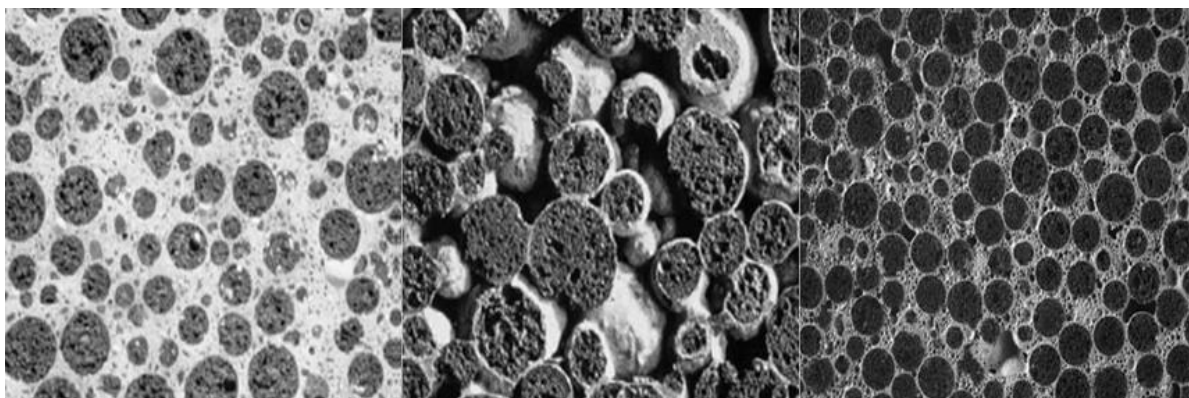
pružnosti 3 - 33GPa, tepelnou vodivost 0,4 - 1,5 W m⁻¹ K⁻¹, smrštění je závislé na objemové hmotnosti hutného lehkého betonu, vlhkosti prostředí a dané tloušťce. Použitím nízkého vodního součinitele, plastifikátorů a mikrosiliky lze také vyrobit vysokohodnotné hutné lehké betony z Liaporu s pevností v tlaku 65-100MPa. Tento druh betonu může být použit jak monolitické konstrukce pozemních a inženýrských staveb, tak pro dílce montovaných staveb.^[1]

1.1.2 Mezerovité betony

Jedná se o lehké betony, u kterých je docíleno malé objemové hmotnosti:

- 1) zvýšenou mezerovitostí kameniva,
- 2) použitím úzké frakce pórovitého kameniva nízkou OH kameniva,
- 3) případně dvou frakcí hrubého kameniva bez obsahu drobné frakce.

U lehkých mezerovitých betonů dochází ke spojení mezi jednotlivými zrny kameniva pomocí malých ploch, které můžeme označit jako spojení bodové. Toto spojení jde vidět na Obrázku 1. Pokud zůstane prostor mezi zrny nevyplněn cementovým tmelem, pak hovoříme o betonu s přirozenou mezerovitou strukturou. Je-li prostor mezi zrny zaplněn provzdušněnou maltou, hovoříme o lehkém betonu s napěněnou strukturou.^{[1] [2][14]}



Obrázek1: Struktura lehkých betonů, (vlevo) hutný beton, (uprostřed) mezerovitý beton,^[13]

1.2 Základní vlastnosti Lehkých betonů

Tato kapitola se zabývá některými vlastnostmi lehkých betonů, konkrétně objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a modulu pružnosti.

1.2.1 Objemová hmotnost

LWC (lehké betony) mají nižší objemovou hmotnost, než běžné betony. Je to beton, u něhož se pohybuje objemová hmotnost po vysušení od 800 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 . Přičemž je možné docílit i hodnot pod 800 kg/m^3 . Hlavním důvodem nízké objemové hmotnosti je nahrazení plniva (kameniva) jinou vstupní surovinou. Jako nejběžnější suroviny se dnes používají expandovaný perlit, Liapor nebo polystyrén. Další možností je vnesení vzduchových pórů do cementové matrice. Norma ČSN EN 206-1^[N1] rozděluje zatvrdlý beton (vysušený v sušárně) podle objemové hmotnosti na lehký ($800 - 2000 \text{ kg/m}^3$), obyčejný ($2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$) a těžký ($>2600 \text{ kg/m}^3$). Kdy jednotlivé lehké betony ještě dělíme podle Tabulky 1 do jednotlivých tříd. ^{[15] [16] [N1]}

Tabulka 1: Třída objemových hmotností lehkých betonů

Třída objemové hmotnosti	LC 1,0	LC 1,2	LC 1,4	LC 1,6	LC 1,8	LC 2,1
$[\text{kg/m}^3]$	≥ 800 a $\leq 1,000$	$\geq 1,000$ a $\leq 1,200$	$\geq 1,200$ a $\leq 1,400$	$\geq 1,400$ a $\leq 1,600$	$\geq 1,600$ a $\leq 1,800$	$\geq 1,800$ a $\leq 2,100$

1.2.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je vyjádřena mírou odolnosti vůči působení vnějšího zatížení a rozděluje betony do jednotlivých tříd. Například lehký beton pevnostní třídy LC 50/55 kde první číslo udává charakteristickou pevnost betonu v tlaku ($f_{ck,cyl}$) stanovenou na válcích o průměru 150 mm a výšce válce 300 mm. Druhé číslo udává charakteristickou pevnost betonu v tlaku ($f_{ck,cube}$) na krychlich s délkou hrany 150 mm. Pevnostní třídy lehkých betonů v tlaku klasifikuje norma ČSN EN 206-1^[N1], které jsou uvedeny v Tabulce 2. ^[4]

Tabulka 2: Pevnostní třídy lehkých betonů dle ČSN EN 206-1^[N1]

Pevnostní třída v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ N/mm ²	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ N/mm ²
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

1.2.3 Modul pružnosti

Modul pružnost je důležitým parametrem pro statické posuzování konstrukcí z lehkých betonů. Pro každou pevnostní třídu je jeho hodnota odlišná. U betonů s pórovitým kamenivem se rovná přibližně 2/3 modulů pružnosti obyčejných betonů stejné pevnosti. Lehké betony mají oproti obyčejným betonům menší součinitel přetvárnosti. Podle normy ČSN EN 1992-1-1^[N2] se hodnota modulu pružnosti, pro lehký beton s pórovitým kamenivem, zjišťuje vynásobením součinitele: ^{[2][N2]}

$$\eta_E = (\rho/2000)^2$$

kde ρ představuje objemovou hmotnost lehkého betonu ve vysušeném stavu.

1.3 Základní složky lehkých betonů

V této části práce budou popsány základní složky lehkých betonů, které svými vlastnosti ovlivňují výsledné vlastnosti daného kompozitu, a to konkrétně cement, voda, kamenivo, liaspor a různé složky příměsy.

1.3.1 Cement

Cement je partikulární polydisperzní anorganická látka, s hydraulickými vlastnostmi, která po smíchání s vodou vytváří kaši, jež v důsledku chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí si zachovává svoji pevnost a stálost jak na vzduchu, tak i ve vodě. Proces tvrdnutí je důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů. Podle ČSN EN 197-1^[N3] jsou cementy rozděleny do 5 základních skupin podle složení:

- 1) CEM I Portlandský cement,
- 2) CEM II Portlandský cement směsný,
- 3) CEM III Vysokopeční cement,
- 4) CEM IV Pucolánový cement,
- 5) CEM V Směsný cement.

Dále dělíme cementy na tři třídy normalizované pevnosti v tlaku 32,5MPa, 42,5MPa a 52,5MPa, které jsou uvedené v normě ČSN EN 197-1^[N3], která obsahuje národní dodatek cement s pevnostní třídou 22,5MPa. Cementy s vysokým počátečním nárůstem pevností se označují písmenem R a s normálním nárůstem pevností N. ^[3]

1.3.2 Voda

Po zamíchání vody s cementem dochází k chemické reakci, která se nazývá hydratace cementu. V betonářské technologii rozdělujeme vodu podle funkce na vodu:

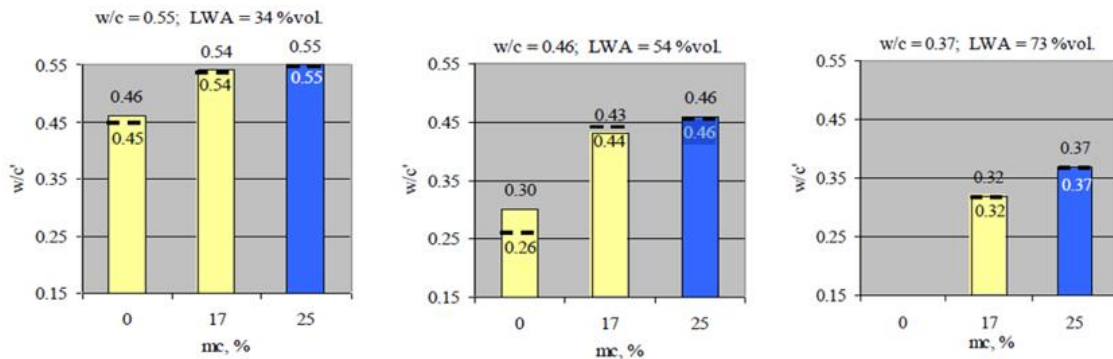
- 1) hydratační, způsobuje hydrataci cementu a spolu s cementem vytváří tuhou strukturu cementového kamene. Minimální potřebné množství vody k hydrataci cementu je přibližně 23 – 25 % z hmotnosti cementu,
- 2) reologickou, vytváří tvárný čerstvý beton ve spojení s jeho složkami. Koheze je zajišťována kapilárními silami a viskozita plastičností čerstvého betonu. ^[4]

Množství záměsové vody (hydratační + reologické) k množství cementu w/c je považován za jeden z nejdůležitějších faktorů mající vliv na reologii, pevnost a trvanlivost betonu. Tuto hodnotu je snadné stanovit v případě, že by kamenivo neabsorbovalo žádnou vodu z čerstvého betonu.

V případě betonu, kde je použito pórovité kamenivo, dochází k nasáknutí záměsové vody kamenivem a skutečný w/c je nižší v porovnání s jeho jmenovitou hodnotou. Existuje několik faktorů mající vliv na skutečný w/c. U betonu, kde je použito lehké pórovité kamenivo, to jsou absorpce vody kameniva za čas, obsah vlhkosti v kamenivu a objem pórovitého kameniva v betonu. Následkem toho se v mnoha případech nechává kamenivo před zpracováním ponořené ve vodě, čímž nedochází k odebrání vody potřebné k hydrataci cementu a zpracovatelnosti směsi. Přesto takové ošetření může vést ke zhoršeným vlastnostem betonu, zvláště betonové trvanlivosti. ^[39]

Ve studii ^[39] sledoval autor hodnotu w/c u cementové malty, který se měnil v závislosti na množství absorbované vlhkosti v kamenivu. Testy byly provedeny na 18-ti různých směsích, které se lišily vlhkostí kameniva, jeho množstvím a počátečním w/c. Jako pojivo byl použit cement CEMI 42,5R. Kamenivo sbalkovaný popílek Pollytag 6/12 mm. Superplastifikátor byl přidáván pro dosažení stejné konzistence u cementové pasty s vodním součinitelem w/c 0,37 a 0,46. Výsledky testů ukázaly, že absorpce vody suchého kameniva v čerstvém betonu odpovídá 65-95 %, v případě předvlhčeného kameniva to bylo 17 %. Pro lepší porovnání redukce záměsové vody, použil autor směs s nasyceným kamenivem s počáteční vlhkostí 25 %, které neabsorbuje žádnou záměsovu vodu. Jak je možné vidět na Obrázku 2 vyšší podíl objemu LWA (lehkého kameniva), a nižší počáteční obsah vlhkosti lehkého kameniva, mělo za následek vyšší snížení w/c. Výsledkem je, že v případě kameniva, které bylo předem navlhčené s obsahem 17 % vody, bylo objemově dosaženo nejnižší redukce záměsové vody.

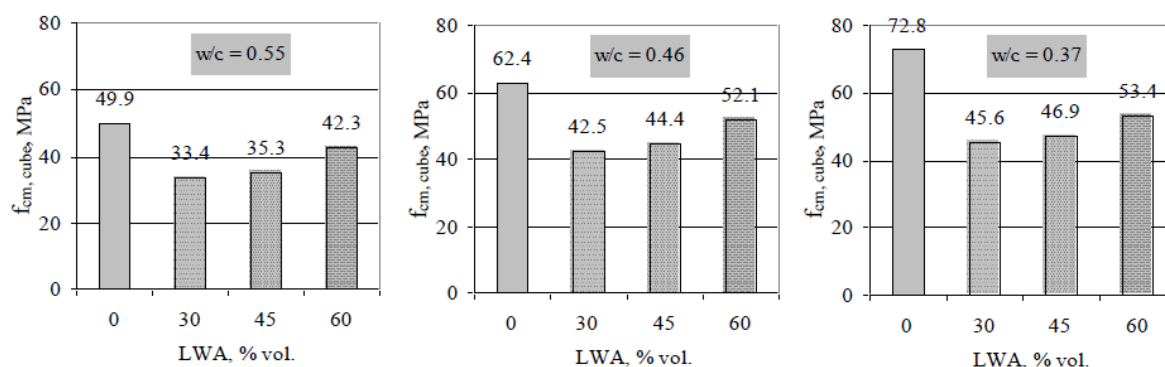
V případě směsí, kde bylo použito suché kamenivo, byl pozorován výrazný pokles poměru w/c a to i při nejnižším uvažovaném objemovém obsahu LWA. Snížení odpovídá 16 - 2 %. Získané výsledky ukazují, že při analýze absorpce vody z čerstvého betonu, v případě použití lehkého kameniva, nelze zanedbat parametry cementové pasty.



Obrázek 2: Skutečný (w/c) pro směsi s tmelící pastou a nominální (w/c), kamenivo lehké kategorie s počátečním obsahem vlhkosti (mc) a objemový podíl LWA^[39]

Účinek snížení vodního součinitele na zatvrdlém lehkém betonu, může vést k viditelnému vlivu na pevnost a trvanlivost betonu. Ve srovnání lehkého betonu s normálním betonem, je vliv poklesu w/c u ztvrdlého lehkého betonu v důsledku absorpce záměsové vody kamenivem složitější. U LWAC (lehkých betonů) se jedná o lehké kamenivo, které je nejslabší složkou kompozitu. Proto by z teoretického hlediska, měl přírůstek obsahu LWA v betonu vést ke snížení pevnosti. Bylo by to v případě, že kamenivo neabsorbuje záměsovou vodu. Přitom, zvýšení obsahu ne zcela navlhčeného kameniva v betonu, umožňuje získat ještě vyšší pevnost, v důsledku kompenzace vyššímu obsahu lehkého kameniva (LWA), ze silnější cementové matrice, která je výsledkem snížení w/c .^[39]

Za účelem ověření výsledků ze studie^[39], provedl autor pevnosti v tlaku na devíti lehkých betonech a třech cementových maltách ve stáří 28 dnů. Komponenty použité pro přípravu betonů jsou stejné, jako byly použity v předcházejícím experimentu.^[39] Navíc byl použit přírodní písek, jako jemného kamenivo, aby nedošlo k ovlivnění absorpce vody v čerstvém betonu. Při stanovení pevnosti, bylo zcela patrné, že při stejném počátečním složení malty měl lehký beton (LWAC), s vyšším celkovým obsahem kameniva, vyšší pevnost. Hodnoty vyšší pevnosti byly způsobeny tím, že kamenivo má vyšší potenciál snížení obsahu vody v matrici. Pevnost je vyšší v případě, že je vyšší počáteční poměr w/c cementové pasty. To je rovno až o 26 %, 33 % a 37 %, v daném pořadí, pro $w/c = 0,37$, 0,46 a 0,55; zobrazené na Obrázku 3.



Obrázek 3: Vztah průměrné pevnosti v tlaku lehkého betonu a obsahu LWA s počáteční vlhkostí 17 %.^[39]

1.3.3 Kamenivo

Kamenivo vytváří v betonu pevnou kostru s minimální mezerovitostí a zaujímá 75-85 % betonu. Nejvhodnější kamenivo do betonu je to, které má plynulou čáru zrnitosti, čili jsou zde zastoupeny všechny frakce. Kamenivo je přírodní nebo umělé, anorganická, zrnitá látka dělicí se podle původu, velikosti zrna, vzniku a podle pórovitosti. Přírodní kamenivo lze rozdělit na těžené kamenivo, které vzniklo transportem zvětralé horniny, u něhož jsou plochy zrn viditelně zaoblené a drcené kamenivo, které vzniklo podrcením lomového kamene. Umělé kamenivo se vyrábí zpracováním jílu nebo břidlic tepelnou expanzí nebo úpravou nerostných surovin. Takto vyrobené kamenivo má nízkou objemovou hmotnost a vysokou pórovitost. Kamenivo do betonu dělíme podle:

- 1) podle velikosti zrn,
- 2) podle objemové hmotnosti,
- 3) podle původu

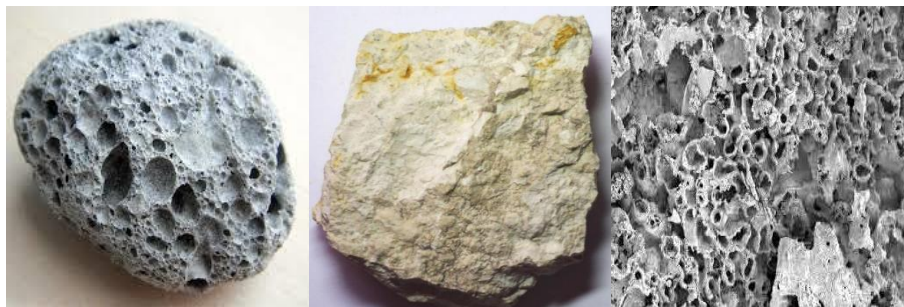
Pórovité kamenivo

Norma ČSN EN-206-1^[N1] rozděluje kamenivo podle objemové hmotnosti na těžké, hutné a pórovité. Pórovité kamenivo považujeme za kamenivo nerostného původu, jehož zrna mají pórovitou strukturu. Jeho objemová hmotnost ve vysušeném musí být menší nebo rovna 2000 kg/m³ a sypaná hmotnost menší nebo rovna 1200 kg/m³.^[18]

Pórovité kamenivo je vedle pojiva a vody hlavním surovinou pro skupinu lehkých betonů a jeho struktura materiálu je tvořena převážně póry. Podle pórovitosti lze hodnotit jednotlivé druhy kameniva. Podle původu dělíme pórovité kamenivo na přírodní a umělé. Dále lze rozdělit umělé kamenivo, které bylo vyrobeno z průmyslových odpadů (cihelná drť, elektrárenský popílek), a které bylo vyrobeno speciálně (agloporit, keramzit, expandovaný perlit). Jelikož jsou vlastnosti těchto pórovitých kameniv jiné, než vlastnosti kameniv hutných, budou rozdílné i fyzikálně mechanické vlastnosti betonů lehkých a hutných.^{[5] [19] [20]}

Přírodní pórovité kamenivo

Pochází čistě z přírodních ložisek a získává se těžebním, drcením hornin nebo horninových odpadů. Z přírodních pórovitých kameniv vhodných pro přípravu lehkého betonu to jsou používány tufy, tufity, lehké lávy, přírodní pemza, diatomit a celá řada dalších kameniv. Základní výhodou použití přírodních pórovitých kameniv je, že toto kamenivo lze požit ihned po natěžení a podrcení. K nepříznivým vlastnostem se řadí mikropórovitá až makropórovitá struktura kameniv, které tvoří spolu navzájem spojené kapiláry, což má za následek vztlínavost, nasákavost a objemové změny.^[2]



Obrázek 4: Přírodní pórovité kamenivo struktur pemzy a diatomitu s elektronickým snímkem mikroskopu.^{[54][55][56]}

Umělé pórovité kamenivo

Umělé pórovité kamenivo je možné vyrábět z přírodních hornin a zemin expandováním v žáru, nebo pomocí technologie sbalkování a následným výpalem. Pro uměle vyráběné kamenivo se používá druhotná surovina z odpadů hutní, chemické

a elektrárenské výroby. Získané kamenivo z průmyslových odpadů je levný stavební materiál, který se využívá nejen při výrobě lehkých či izolačních betonů. Nevýhodou tohoto kameniva je, že nám může jeho nestejnorodé chemické a mineralogické složení negativně ovlivnit kvalitu betonu. Specificky vyráběné pórovité kamenivo je plnivo, které má za úkol zlepšit fyzikální a mechanické vlastnosti betonu. Proces výroby je založen na výpalu přírodních hornin, zemin či elektrárenských popílků. Výpal probíhá přibližně při teplotě 1150 - 1200°C, kdy suroviny s obsahem spalitelných látek zvětšují svůj objem a zároveň dochází k vyhoření organických látek, což má za následek vytvoření pórů v zrnech kameniva. Výsledným produktem je kamenivo, které má až 30% nasákavost a 50% pórovitost. V České republice je jediným uměle vyráběným pórovitým kamenivem Liapor. [2] [19] [20]



Obrázek 5: Uměle vyráběné kamenivo spékány agloporit a expandovaný perlit^{[57][58]}

1.3.4 Liapor

Je velmi lehké, uměle vyráběné keramické kamenivo s téměř kulovitými zrny s vnitřní stejnoměrnou pórovitou strukturou a uzavřeným slinutým povrchem. Vzniká expandováním ze snadněji tavitelných hlín (přírodních jíílů) vhodného chemického a mineralogického složení, které jsou vypáleny při teplotách 1150 – 1200 °C. Při jeho výrobě dochází v první fázi ke slinutí povrchu zrn a následně poté ke zvětšení objemu a vnitřní stejnoměrné pórovité struktuře, která se vytvořila, díky vzlínajícím plynům. Liapor vyniká především fyzikálně chemickými a mechanickými vlastnostmi proto jeho forma umožňuje aplikaci v mnoha oblastech stavebnictví. K základním vlastnostem tohoto stavebního keramického plniva, které mohou ovlivnit vlastnosti cementových kompozitů je objemová hmotnost, pevnost v tlaku, nasákavost, vlhkost a tepelná vodivost, mrazuvzdornost, žáruvzdornost a objemová stálost. [2] [21] 22][23]

Objemová hmotnost

Jedním z hlavních ukazatelů kvality kameniv patří objemová hmotnost. Po vypálení získá každé zrno Liaporu porézní strukturu, která dává tomuto kamenivu velmi nízkou objemovou hmotnost. Tato hodnota je závislá na frakci kameniva, viz Tabulka 3.

Tabulka 3: Fyzikálně mechanické charakteristiky frakcí kameniva Liaporu

Označení	Frakce	Sypná hmotnost (Kg/m ³)	Objemová hmotnost zrna (Kg/m ³)	Pevnost stlačení ve válci (MPa)	Součinitel tepelné vodivosti T (W.m ⁻¹ K ¹)
8 - 16 /275	8 – 16	275	550	0,7	0,09
8 - 16/ 275	8 – 16	600	1100	4,5	0,14
4 - 8/350	4 – 8	350	625	1,1	0,1
4 - 8/450	4 – 8	450	850	2	0,11
4 - 8/650	4 – 8	650	1200	7	0,14
4 - 8/800	4 – 8	800	1500	10	0,19
4 - 8/950	4 – 8	950	1825	12	0,23
1 - 4/500	0 – 4	500	875	4	0,11
1 - 4/625	0 – 4	625	1050	6	0,14
2 - 4/450	0 – 4	450	800	3	0,11
0 - 2/575	0 – 4	575	1050	6	0,12

kde je možno sledovat, že objemová hmotnost zrn Liaporu je u většiny frakcí menší, než objemové hmotnosti vody. Při příliš tekuté konzistenci betonové směsi a nevhodném zpracování může docházet k vyplavování zrn k povrchu betonové směsi (segregaci). U lehkých betonů s maltou výrazně vyšší objemové hmotnosti, než je objemová hmotnost zrn Liaporu, tedy při použití kombinace zrn větší frakce a drobného hutného kameniva, je náchylnost k segregaci vyšší.^{[13][41]}

Ve studii ^[41] se autor pokoušel hodnotit míru segregace přes založenou techniku zpracování obrazu. Příklady a testy hodnocení ukazují, že analýza stejnorodosti může být efektivně aplikována na hodnocení míry segregace kameniva v betonových vzorcích. Míru

segregace lehkého kameniva lze snížit vhodným dávkováním některých příměsí. Viz podkapitola 1.3.4 příměsí.

Pevnost v tlaku

Podle ČSN EN-13055-1^[N4] se stanovuje pevnost zrn u pórovitého kameniva tlakovou zkouškou ve válci o vnitřním průměru válce 150 mm a hloubce 100 mm. Zrna mají kulovitý tvar s pevně slinutým povrchem a porézním jádrem. Tato struktura dává Liaporu i při velmi nízké hmotnosti dobrou pevnost. Pevnost zrna je závislá na objemové hmotnosti a na typu Liaporu.

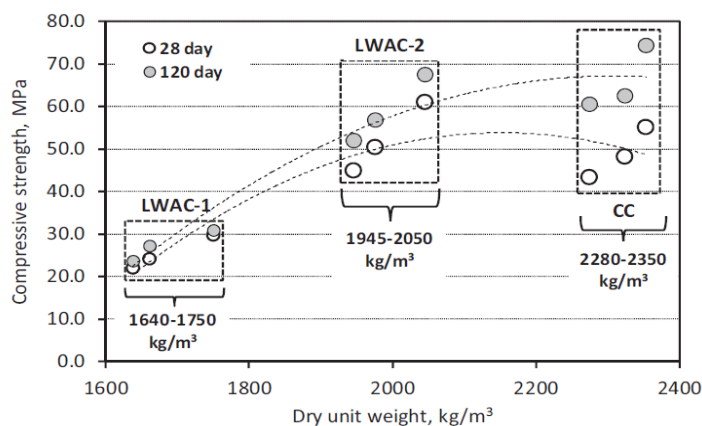
Tuto vlastnost sledoval autor ve studii^[25]. Zde srovnával pevnost lehkého betonu s použitím dvou různě porézních kameniv, které porovnal s betonem obyčejným. Pro výrobu směsi byly použity dva druhy kameniva s různou hustotou a maximální velikostí zrna 16 mm. Pro směsi LWAC-1, která obsahovala kamenivo EC1 a LWAC-2 kamenivo EC2. Na Obrázku je znázorněna rozdílná porézní struktura použitého kameniva.



Obrázek 6: rozdílná porézní struktura zrna Liaporu, (zleva) kamenivo EC1, (zprava) kamenivo EC2, snímek elektronického mikroskopu^[25]

Pevnost v tlaku byla stanovena na vzorcích tvaru válce o průměru 100 a výšce 200 mm. Testy byly provedeny po 28 a 120 dnech. Vzorky byly po dobu zrání uloženy ve vápenné vodě při teplotě 21 °C. Výsledné hodnoty jednotlivých vzorků po vysušení znázorňuje Graf 1. Z kterého vyplývá, že pórovitost zkoušeného kameniva měla velký vliv na výsledné mechanické pevnosti zkoušených vzorků. Za povšimnutí také stojí, že směs LWAC-2 má 28 -denní pevnost v tlaku vyšší, než směs CC. Tato vlastnost je důsledkem

absorpce vody kameniva pórovitého kameniva, která poskytuje lepší vytvrzování materiálu během jeho zrání.



Graf 1: Pevnost v tlaku vysušených vzorků po 28 a 120 dnech^[25]

Vlhkost a nasákavost

Vlhkost Liaporu je závislá na způsobu skladování. U materiálu skladovaného v uzavřených silech se pohybuje vlhkost do 1 % hmotnosti a může být tedy dodáván v dokonale suchém stavu, což je jeho výhodou. Zatímco skladovaný materiál v otevřených skládkách mění svou vlhkost v závislosti na počasí, která se pohybuje v rozmezí 1-25 % hmotnosti. Liapor není hygroskopický, čili nepřijímá vlhkost ze vzduchu.

Samotné zrno Liaporu nemá kapilární strukturu a voda v něm tudíž nevzlíná, pokud je umístěn do konstrukce suchý a je chráněn proti přímému přístupu vody, zůstává dokonale suchý. Pokud se zrno Liaporu dostane do styku s vodou, postupně dochází k jeho absorpci. Průběh nasákavosti je zobrazen v Tabulce 4.^[23]

Tabulka 4: Nasákavost Liaporu

Nasákavost	Hmotnostní	Objemová
Po 30 minutách	2 až 7 %	1 až 4 %
Po 24 hodinách	7 až 19 %	6 až 8 %
Po 48 hodinách	20 až 25%	11 až 13%
Po 120 hodinách	22 až 30%	13 až 16%
Po 180 dnech	30 až 45%	18 až 24%

Efekt předvlhčení pórovitého kameniva na mechanické vlastnosti betonu sledoval autor ^[40]. Jako vstupní suroviny použil CEM I 42,5R ve dvou dávkách 420 kg/m³ a 450 kg/m³, kde se snažil částečně nahradit u směsi 8 a 9 cement popílkem. Bylo použito kamenivo hrubé frakce 14 mm vyrobené z expandovaného jílu se sypnou hmotností 405 kg/m³ a 955 kg/m³. Jemnou složku tvořil písek s objemovou hmotností 2630 kg/m³. Množství obsahu absorbované vody činilo 4,9 % po dobu 30 minut a 5,5 % po dobu 60 minut. Jako referenční směr bylo použité vysušené kamenivo. Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena na krychlích 100 mm po 7, 28 a 90 dnech. Přehled výsledků je zobrazen v Tabulce 5, ze které je možné vidět, že zvýšení množství cementu nemělo významný vliv na pevnosti v tlaku, jelikož mez únosnosti lehkých betonu je závislá na pevnosti lehkého kameniva. Nejvyšších hodnot dosáhl vzorek č. 5 s obsahem cementu 450 kg/m³, který byl předvlhčen po dobu 30 minut, kde došlo k výraznému rozdílu pevností oproti vzorku, kde kamenivo obsahovalo 0% vlhkost. Tento pokles lze přisuzovat absorpci nenasáknutého kameniva, které odebírá potřebnou vodu pro hydrataci cementu, čímž dochází ke snižování meze pevnosti zatvrdlého betonu.

Tabulka 5: Výsledné pevnosti v tlaku po 7, 28 a 90 dnech^[40]

Mix No.	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Pre-wetting time of LWA (min)	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)		
					7-day	28-day	90-day
1	230	420	0	1848	31.33 (86%)	36.41	37.01 (102%)
2	230	420	30	1851	31.84 (83%)	38.58	40.13 (104%)
3	230	420	60	1840	33.10 (88%)	37.59	40.03 (106%)
4	245	450	0	1757	24.31 (83%)	29.19	30.32 (104%)
5	245	450	30	1806	35.88 (84%)	42.95	45.10 (105%)
6	245	450	60	1771	32.01 (82%)	39.04	41.55 (106%)
7	250	450	30	1617	28.21 (90%)	31.22	31.39 (101%)
8	250	382.5	30	1622	26.30 (82%)	32.16	35.75 (111%)
9	250	337.5	30	1630	24.94 (72%)	34.48	39.39 (114%)

Chemické složení

Liapor se získává slinutím expandovaného jílu, který obsahuje minerály jako je křemík, kaolinit nebo ilit. Aby došlo k jeho samotnému nadýmání v žáru, musí splňovat tyto podmínky:

- 1) musí dojít k natavení dostatečného množství látky, aby se póry zaplnily taveninou,
- 2) uvnitř materiálu musí zůstat dostatečně vysoká viskozita taveniny,
- 3) v surovině musí být přítomná látka nebo směs, která uvolní plyny, kdy dojde k natavení povrchu.

Během tepelného procesu se struktura jílu změní a výsledné chemické složení kameniva Liapor je uvedeno v Tabulce 6. ^{[2] [23]}

Tabulka 6: Výsledné chemické složení kameniva Liaporu

Chemické složení Liaporu		Liapor % hm.	Výrobky z Liaporu pojené cementem % hm.
tolerance pro jednotlivé složky je $\pm 5\%$			
Oxid křemičitý	SiO ₂	52	45
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	23	17
Oxid železitý	Fe ₂ O ₃	10	8
Oxid vápenatý	CaO	5	20
Oxid draselný	K ₂ O	2	2
Oxid hořečnatý	MgO	2	2
Oxid titaničitý	TiO ₂	2	1
Oxid fosforečný	P ₂ O ₅	2	1
Ostatní složky		2	4

Mrazuvzdornost, žáruvzdornost

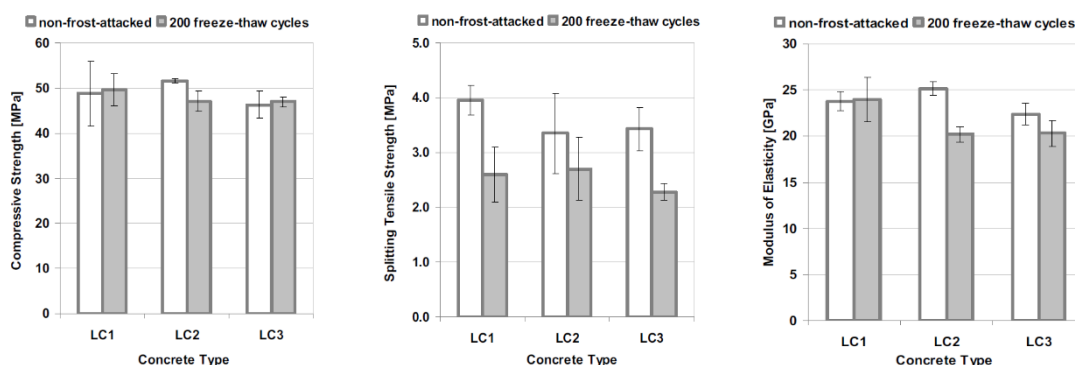
Díky své porézní struktuře zrn, nemá kamenivo schopno vést kapalinu. Obsažená voda se v případě působení mrazu může rozpínat v dutinách a snadno odolávat zmrazování. Lze jej tedy označit za vysoce mrazuvzdorné kamenivo. V případě vystavení vysokých teplot se jedná o žáruvzdorný materiál, který je nehořlavý a objemově stálý do teploty pohybující se kolem 1050°C. Zrno Liaporu je odolné vůči mechanickému a chemickému poškození. V kyselém prostředí nebo ve vodě se nerozpouští, neuvolňuje žádné škodlivé látky a je objemově stabilní. ^[23]

Autoři ^[26,27] prováděli zkoušky mrazuvzdornosti na betonových vzorcích třídy LC35/38 D1,8 na kterých zkoumal mechanické poruchy lehkých betonů vystavených zkouškám mrazuvzdornosti. Tyto zkoušky prováděli autoři na třech druzích směsi, které se lišily pouze v míře nasycení pórovitého kameniva před dávkováním do míchačky.

Kamenivo frakce 4-8 mm, plastifikátor a stabilizátor byli dávkováni objemově, zbylé složky byly navážené.

Jednotlivé směsi se lišily v míře nasycení pórovitého kameniva Liapor před dávkováním do míchačky. Kamenivo použité pro směs LC1 byla před dávkováním vysušená v peci, pro směs LC3 bylo před ponořením do vody vysušené a poté nechané ve vodní lázni po dobu dvou týdnů kde absorbovalo 30 % vlhkosti. Směs LC2 obsahovala kamenivo se skladovací vlhkostí 13 %.

Ihned po odformování byla tělesa uložena do vodního prostředí po dobu 7 dní. Samotná zkouška mrazuvzdornosti se prováděla na dvou sadách zkušebních těles. Každá sada obsahovala 9 vzorků, od každé směsi 3 vzorky o rozměrech 100 x100x400 mm a stáří 28 dní. První test proběhl na vzorcích nenasyčených vodou a byl vystaven periodickému zmrazování a rozmrazování. Jeden zmrazovací cyklus se skládal ze 4h zmrazování a 2h tání při teplotách -20 ± 2 °C a 20°C. Po každém 25 cyklu, byly vzorky uloženy do vodní lázně při teplotě 20 ± 2 °C po dobu 50 hodin. Po každém 25 cyklu došlo k testování vzorků rezonanční a ultrazvukovou nedestruktivní metodou. Pro druhou sadu byly předepsané ošetrovací podmínky. Tělesa byla uložena v laboratoři při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 60 ± 10 % po dobu 100 hodin. Po ukončení zkoušky mrazuvzdornosti byly vzorky testovány destruktivně na třibodovém ohybu. Poté byla z každého vzorku vyřezána dvě tělesa o hraně 100 mm a byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, příčném tahu, modulu pružnosti. Výsledky jsou znázorněny na Obrázku 7.



Obrázek 7: Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku (vlevo), průměrné hodnoty pevnosti v tahu (uprostřed) a průměrné hodnoty modulu pružnosti (vpravo) [26, 27]

Z předložených grafů lze sledovat, že u směsi LC1 nenastaly podstatné rozdíly u pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Výrazný pokles pevnosti nastal v příčném tahu, a to o více než 1MPa. Směs LC2 obsahovala kamenivo se skladovací vlhkostí 13 %.

Zde jsou pozorovatelné rozdíly v pevnostech tlaku, příčném tahu a modul pružnosti, které negativně ovlivnilo cyklické zmrazování. Poslední směs LC3 obsahovala kamenivo s 30 % vlhkostí. U této směsi se neprojevily významné rozdíly v pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Nicméně, průběh zmrazování negativně ovlivnil hodnoty pevnosti v příčném tahu. Cyklické zmrazování a rozmrazování je jedním z mnoha parametrů, které souvisí s trvanlivostí betonu. Trvanlivost LC je závislá na mnoha faktorech, obzvláště na složení dané směsi. V případě špatného návrhu směsi, použitím nízkého vodního součinitele w/c a vysušeného kameniva může mít za negativní vliv, že kamenivo absorbuje vodu, která je potřebná k hydrataci cementu. Tento fakt vede ke vzniku trhlin, které snižují kvalitu betonu. Naopak úplné nasycení pórovitého kameniva vede k oslabení tranzitních zón a může vést ke snížení meze pevnosti a trvanlivosti betonu.

1.3.5 Příměsi

Jsou to mineralogické anorganické práškové látky, které přidáváme do čerstvého betonu za účelem zlepšení, nebo docílení zvláštních vlastností, zvýšení odolnosti proti segregaci, zvýšení pohyblivosti, homogenity aj. v čerstvém a zatvrdlém betonu. Z části se jedná o odpady, které lze využít ve stavebnictví, což se příznivě projeví na ceně.

Podle ČSN EN 206-1^[N1] rozdělujeme příměsi na dva typy:

- 1) Příměs druhu I-Inertní příměsi, tento druh příměsi se neúčastní procesu hydratace, přidáváme ji za účelem zlepšení reologických podmínek, pro dosažení hutnější struktury nebo probarvení betonu. Důležité si je však uvědomit zvýšení spotřeby záměsové vody potřebné ke smáčení povrchu částic.
- 2) Příměs druhu II-aktivní příměsi, jsou to látky, které díky svému složení aktivně přispívají ke zvýšení pevnosti cementového tmele. Podle způsobu působení je dělíme na latentně hydraulické látky a pucolány. Mezi nejvýznamnější latentně hydraulické látky patří jemně mletá vysokopecní struska. Pucolány jsou látky,

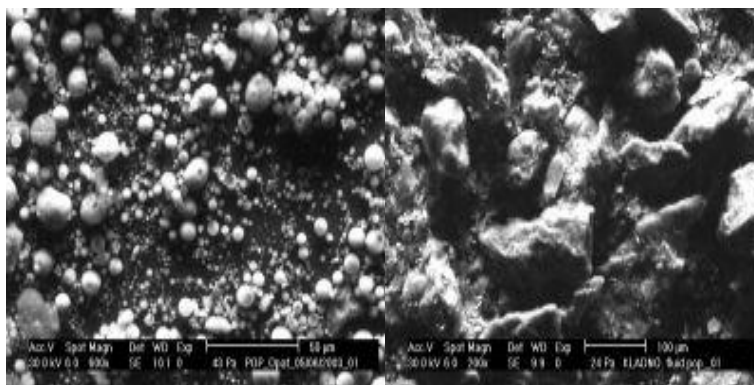
kteře nejsou schopny samovolně tuhnut a tvrdnout ale obsahují amorfni SiO_2 , který má schopnost reagovat s Ca(OH)_2 za vzniku C – S – H gelu.

3) Dále je můžeme dělit podle původu na přírodní (křemelina, tufy, trasy) a umělé (mikrosilika, vysokopecní popílků, jemně mletý cihlářský stěp).^{[8] [28]}

1.4 Příměs druhu II aktivní příměsi

1.4.1 Popílků

Popílek je nejčastěji používanou anorganickou příměsí, která přispívá k optimalizaci granulometrie použitého kameniva jako příměs druhu I a v případě pucolánových vlastností může za definovaných podmínek být použit, jako příměs druhu II. Vzniká při spalování tuhých paliv v tepelných elektrárnách, jako vedlejší produkt při teplotě 700-1600 °C, záleží na druhu spalování. Popílek významně zlepšuje technické parametry betonu. Podle ČSN EN 405-1^[N5] rozlišujeme dva druhy popílků a to buď fluidní, nebo klasický. Fluidní popílků je možné používat omezeně, jelikož obsahují vyšší obsah CaO, který způsobuje vznik etringitu.^{[28] [29] [31]}



Obrázek 8: Detailní snímek elektronického mikroskopu, nepravidelné zrno fluidního popílků (vlevo), zrno klasického popílků (vpravo)^{[57][58]}

1.4.2 Vysokoteplotní popílek

Klasické popílků vznikají při spalování jemně mletého uhlí, při teplotě 1400 - 1600 °C. Toto spalování vyžaduje odsiřování spalin pomocí vápna nebo vápence. Zachytávání popílků probíhá buď na elektrostatických odlučovačích, nebo mechanických

filtrech. Černouhelné popílky mají menší variabilní vlastnosti, a proto jsou vhodnější pro použití do betonu než popílky hnědouhelné. Negativním vliv na použití popílků jako aktivní příměsi je obsah spalitelných látek (ztráta žíháním max. 8 %). Tato reaktivita je dána množstvím SiO_2 ve sklovité fázi. Dále obsah síry 3 % a sulfidické síry (S^{2-}) 0,4 %.

Podle chemického složení rozdělujeme popílky na dva typy:

- 1) Popílek typu F (křemičitý) - vzniká při spalování velmi kvalitního černého uhlí. Celkové složení $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ se pohybuje okolo 70 % a CaO méně než 10 %. Tento druh popílku má pucolánové vlastnosti a reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$,
- 2) Popílek typu C (vápenatý) - vzniká při spalování hnědého uhlí. Složení tohoto typu $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ je okolo 50 % a množství CaO je vyšší než 20 %. Vzhledem k vysokému obsahu CaO má tento typ popílku hydraulické vlastnosti a nepotřebuje aktivátor. ^{[32] [31] [28]}

1.4.3 Nízkoteplotní fluidní popílky

Fluidní popílky vznikají při spalování nadrceného uhlí o velikosti 20 mm a společně se sorbentem se přidává do spalovací komory fluidního kotle. K tomuto účelu se používá mletý vápenec, který zvyšuje obsah CaO v popílku. Samotné spalování probíhá ve fluidním loži, které vzniká proudem vzduchu vhnáným zpod vrstvy popela, vápence při teplotě 700 - 900 °C. Jelikož jsou spalovací teploty nižší, než u klasického popílku, dochází ke vzniku měkce páleného vápna, které je reaktivní. Popílky z fluidního spalování lze rozdělit na:

- 1) ložový popílek je podíl popelu, který při spalování propadá roštem. Částice mají větší rozměr a hmotnost. Díky vysokému obsahu měkce páleného vápna je dobrým nositelem hydraulických vlastností, tuhne a tvrdne při smíchání se samotnou vodou. Krystalická fáze je zastoupena mineralogickými novotvary (popílky) jako je portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, anhydrit CaSO_4 , kalcit CaCO_3 , sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, křemen SiO_2 a další.
- 2) filtrový popílek tvoří malé lehké částice, které jsou při spalování unášeny se spalinami a v komínové části zachytávány na elektrostatických odlučovačích. Jeho morfologie je původního uhelného zrna a částice zakulaceného tvaru se zde vyskytují zřídka. ^[28]
^[32]

Vliv použití popílků na vlastnosti lehkého betonu

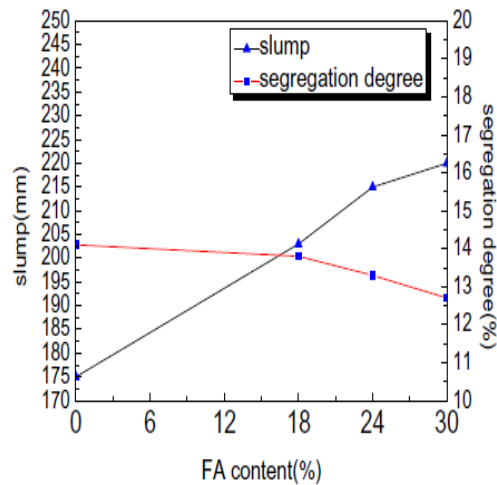
Pokud dojde k částečnému nahrazení cementu popílkem v betonu, dojde ke snížení hydratačního tepla a počátečním nárůstům pevnosti. Výraznější nárůst pevností se projeví až po delší době zrání betonu a jsou vyšší oproti betonu, kde byl použit pouze portlandský cement. K dalším příznivým vlastnostem popílku patří snížení propustnosti zvýšenou hutností nezreágovaného popílku, zlepšení čerpatelnost čerstvého betonu, výsledný povrch betonu a bleeding.

Autor ^[33] se snažil snížit míru segregace přidáním různého množství popílku kombinovaného s různým množstvím NS (bude pojednáno v další kapitole). Pro přípravu směsi použil lehké hrubé kamenivo, drcenou břidlici s objemovou, kterou nechal po dobu 24h nasáknout, jemné kamenivo byl těžký písek, jako pojivo portlandský cement 42.5 R kombinovaný s různým množstvím popílku a NS o měrném povrchu 425 m²/Kg a 170 m²/g, superplastifikátor na bázi naftalenu.

Tabulka 6: Chemické složení popílku a portlandského cementu

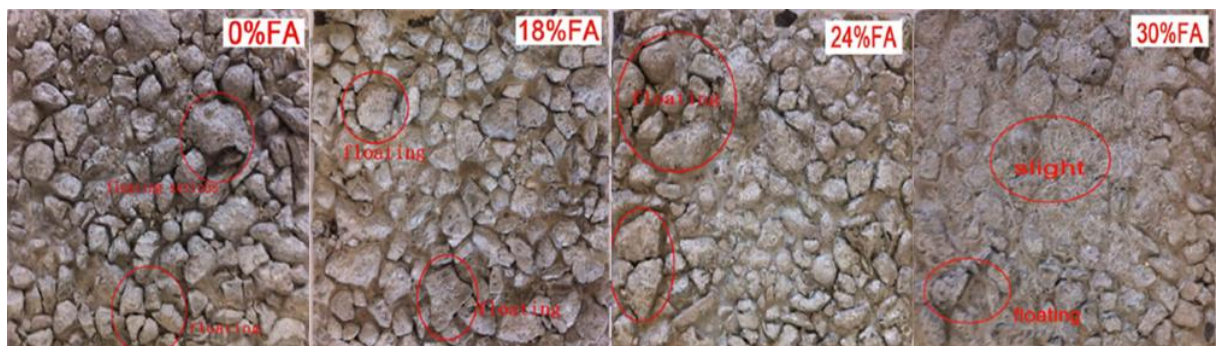
Material	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
OPC	2.41	23.30	2.77	5.41	61.16	2.65	0.68	0.07
FA	0.42	50.25	5.35	34.20	4.50	1.50	1.20	0.80

U čerstvé směsi byla provedena zkouška rozlitím a byla provedena zkouška míry segregace. Graf 2 zobrazuje, že s rostoucím množstvím obsaženého popílku v cementové směsi se stupeň rozlití zvětšuje, naopak stupeň segregace se nepatrně snižuje.



Graf 2: Grafické znázornění míry rozlití a stupeň segregace na množství popílku^[33]

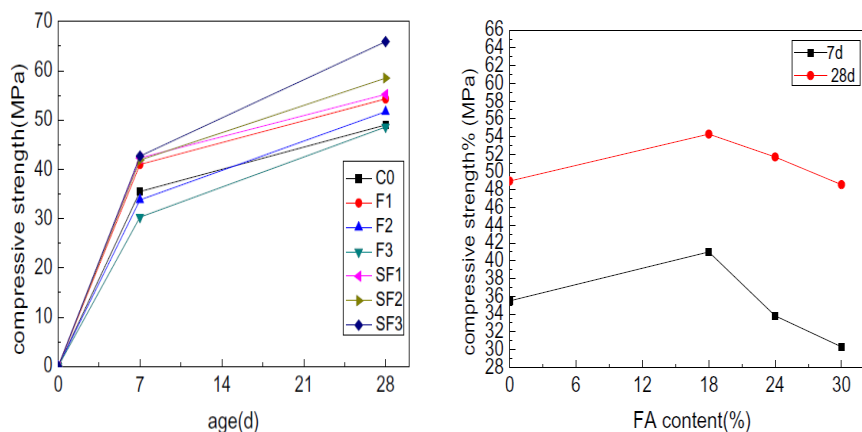
Míru segregace s rozdílným množstvím použitého popílku ukazuje Obrázek 9. Popílek zvyšuje soudržnost betonové směsi a zabraňuje plavení kameniva. Je zřejmé, že stupeň segregace se s rostoucím množstvím popílku snižuje, nicméně se to projevilo negativně na výsledné pevnosti v tlaku po 28 dnech u směsi s 24 a 30 % popílku.



Obrázek 9: snížení míry segregace s rostoucím množstvím popílku^[33]

Zkouška mechanických vlastností proběhla na krychlech velikosti 100 mm po 7 a 28 dnech zrání. Od každé směsi byly testovány 3 vzorky. Největší naměřené pevnosti se projevily u směsi SF3, která obsahovala 18 % popílku a 2 % NS. Nejnižší pevnosti dosáhl vzorek, kde byl cement částečně nahrazen popílkem a to z 30 %. Tento pokles pevnosti má za následek nejvyšší množství použitého popílku a jeho pucolánové vlastnosti, které se podle autora^[28] projevují znatelnějším nárůstem pevností mezi

28 a 90 dnem. Tento nárůst pevností lze očekávat i v Grafu 3, bohužel autor ^[33] prováděl zkoušky jen na 28 denních pevnostech.



Graf 3: Grafické znázornění pevnosti v tlaku na stáří vzorků jednotlivých směsí (vlevo), závislost pevnosti v tlaku na obsahu množství použitého popílku (vpravo)^[33]

1.4.4 Mikrosilika, nanosilika

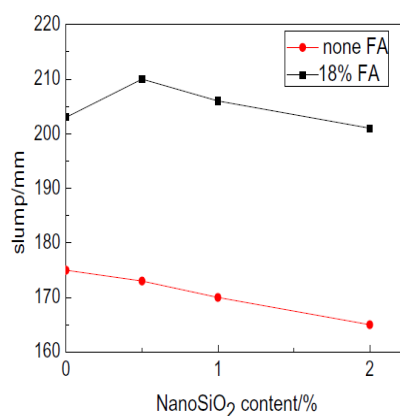
Mikrosilika vzniká jako vedlejší produkt při výrobě prvkového křemíku nebo slitin obsahujících křemík, kde je společně s rudou, uhlím a dřevěnými štěpky pálen v obloukové peci při vysokých teplotách (>2000°C). V peci dochází k redukci křemene, během čehož vzniká plynný SiO₂. Vzniklé částice se zachycují v odlučovacím systému. Křemičité úlety jsou světle až tmavě šedé barvy při měrném povrchu 15000 - 25000 m²/kg a velikosti zrn 0,1 - 0,2 μm. Obsah SiO₂ se pohybuje kolem 90-98 % SiO₂. Díky těmto vlastnostem, má schopnost vyplňovat vzniklé mezery mezi zrny cementu což má za následek zvýšení tranzitní zóny na povrchu kameniva. Zlepšuje vlastnosti čerstvého betonu při jeho čerpání, odmísení (bleedingu) a segregaci kameniva. U zatvrdlého betonu se zvyšuje odolnost proti působení chemického agresivního prostředí, snížení smrštění a následný vznik mikrotrhlin.^[34]

Nanosilika (dále jen NS), je syntetická kyselina křemičitá s obsahem SiO₂ > 99 %. Vyznačuje se o několik řádů menší velikostí částic, v rozmezí 1-50 nm, než mikrosilika. Je charakteristická vysokým měrným povrchem, který způsobuje vysokou reaktivitu a účinnost betonu. Dodává se ve dvou formách a to v suché formě v podobě sbalků,

s měrným povrchem 40 000 m²/kg nebo v podobě koloidních suspenzí s měrným povrchem 80 000 m²/kg. Tato varianta se lépe zpracovává na rozdíl od té první, která se hůř zpracovává a může tím ztratit svůj význam v betonu. NS urychluje hydratační reakce a současně vyplňuje vzniklé mezery mezi cementovými zrny. Přidáním nano-SiO₂ lze výrazně zvýšit pucolánovou aktivitu elektrárenského popílku na dobu 24 dní, místo původních 6 měsíců.

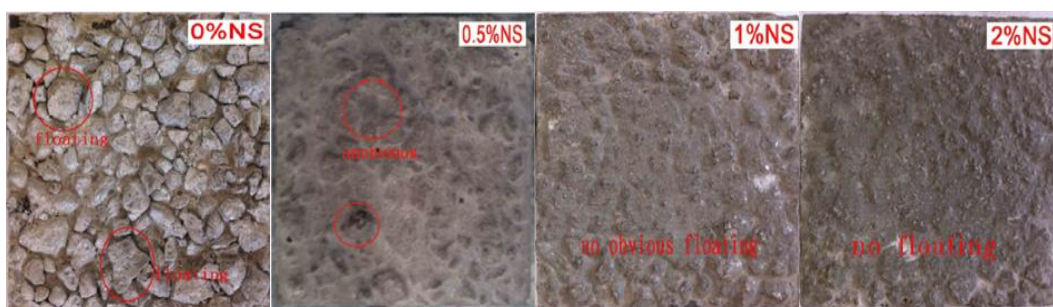
Vliv použití mikro a nanosiliky na vlastnosti lehkých betonů

Vzhledem k vysokému měrnému povrchu se zvýšením přidaného množství snižuje zpracovatelnost čerstvého betonu. To se projevilo u autora [34], který zkoušel vliv přídavku NS na vlastnosti čerstvého betonu. Výsledné hodnoty jsou znázorněny v Grafu 4, kde došlo ke zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu s rostoucím obsahem nano-SiO₂.



Graf 4: Závislost stupně rozlití čerstvého betonu na množství nano-SiO₂

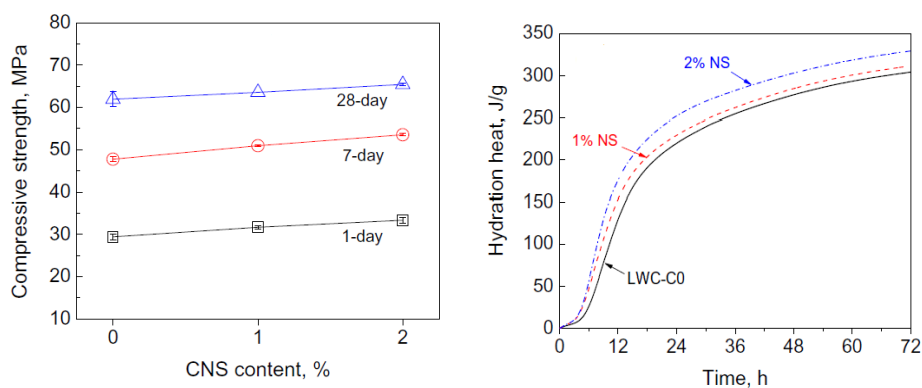
Naopak pozitivní efekt nastal s rostoucím obsahem NS, který se projevil snížením plavení lehkého kameniva a stupni segregace. Nanočástice SiO₂ mají disperzní účinek, vytvoří obal kolem kameniva a při míchaní a tření dochází k nabití stejným elektrickým nábojem. Kamenivo pak má snahu se rovnoměrně rozptýlit namísto plavení na povrchu jak je vidět na obrázku 10.



Obrázek 10: Vliv míry segregace a plavení kameniva s různým obsahem NS

Vliv množství NS na vývin hydratačního tepla sledoval autor^[34]. Kalorimetrickou zkoušku prováděl s přidavkem 1 % a 2 % NS. Výsledek zkoušky je znázorněn v Grafu 5, ze kterého je patrné, že došlo k výraznému nárůstu hydratačního tepla z 1 % na 2 % nano-SiO₂. Také čas na dosažení vrcholu hydratační rychlosti se zkrátil.

Vliv na pevnost v tlaku s obsahem NS zkoušel ten samý autor, kde došlo ke zlepšení mechanických pevností, se zvyšujícím se obsahem NS oproti referenční směsi. Jak znázorňuje graf 18, již během prvního dne se pevnost zvýšila o 13 %. Nicméně tento silový nárůst již nebyl ve stáří 28 dnů tak výrazný a došlo k jeho poklesu, což ukazuje, že výhody NS by mohly vymizet s delší dobou vytvrzování.



Graf 5: Vývin hydratačního tepla a pevnost v tlaku v závislosti na množství přidané NS

1.4.5 Mletá granulovaná vysokopecní struska

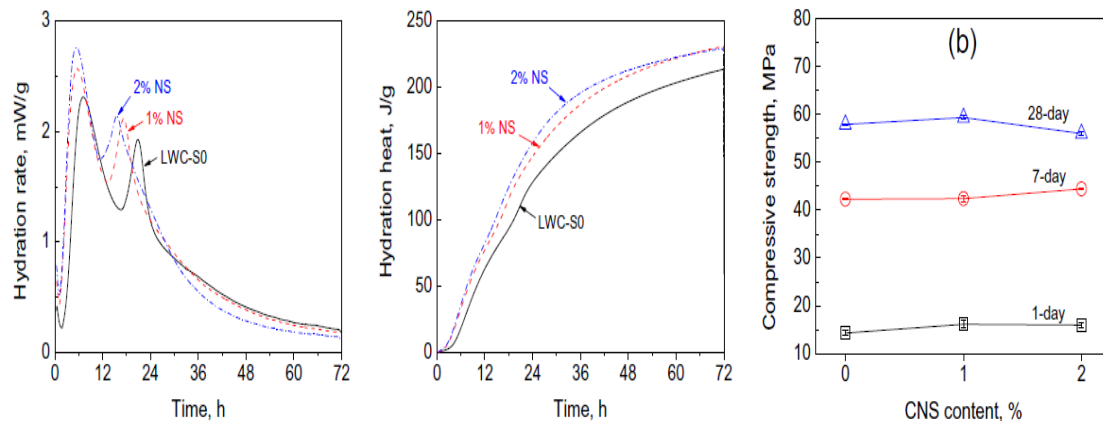
Vysokopecní struska vzniká při tavení železné rudy s přídavkem struskotvorných látek a minerálních podílů pevných paliv při teplotě 1400 - 1600°C. Jedná se o vedlejší produkt s hydraulickými vlastnostmi, který vzniká rychlým ochlazením tekoucí taveniny zásadité strusky. Rychlé ochlazení zabrání její krystalizaci a stabilizuje její sklovitý charakter. Aby bylo dosaženo specifického měrného povrchu, musí se struska pomlít. V ČR se struska dodává zhruba se stejným měrným povrchem jako cement tedy kolem 350-450 m²/kg.

Chemické složení strusky je proměnlivé a závisí na vstupních surovinách. Za normálních okolností je součet všech oxidů ve strusce > 95 %. Důležitým ukazatelem pro použití strusky je poměr zásaditých a kyselých oxidů, tzv. modul zásaditosti.^{[2] [28] [35]}

Vliv použití strusky na vlastnosti lehkých betonů

Jako většina příměsí, tak i vysokopecní struska přináší při jejím použití technologické, ekonomické ale i ekologické výhody. Použitím strusky lze dosáhnout lepší zpracovatelnosti a reologii v betonu. Dále dochází ke snížení hydratačního tepla, což se projeví na prodloužené době tuhnutí a počátečních pevnostech. K nejdůležitějším vlastnostem patří fakt, že při její aplikaci lze zvýšit odolnost proti agresivnímu prostředí.^[35]

Vývin hydratačního tepla sledoval autor^[34], kde se snažil urychlit hydrataci cementu přidáním 1 a 2 % NS, která byla z 60 % nahrazen struskou. Průběh zkoušky je znázorněn v Grafu 6 a je patrné, že přidáním NS mělo pozitivní efekt, který se projevil ve zvýšení vrcholu hydratační rychlosti, ale i čas na její dosažení se zkrátil obzvláště u druhého vrcholu. Nicméně s odstupem času (72 h) nebyl pozorován velký rozdíl ve zvýšení celkového tepla v porovnání s 1 % a 2 % NS.



Graf 6: Průběh hydratační rychlosti (vlevo), celkové teplo (uprostřed) a pevnost v tlaku (vpravo)^[34]

Vliv na pevnost betonu v tlaku provedl ten samý autor se stejnými recepturami. Pevnost v tlaku byla stanovena po 1,7 a 28 dnech. Výrazný nárůst pevností nastal během prvního dne, kde NS pomohla zvýšit pevnosti v tlaku oproti referenčnímu betonu o 12,6 % a 9,7 %. Po 28 dnech se pevnost zlepšila jen okrajově, jak je znázorněno v (grafu 6). Naopak přidání 2 % NS mírně redukovalo pevnosti LWC protože obsah hydroxidu vápenatého je menší, který byl spotřebován amorfním SiO₂.

1.4.6 Přísady

Obecně se jedná o chemické kapalné látky, sloučeniny, které se přidávají do betonu během míchání, za účelem zlepšení vlastností čerstvého a zatvrdlého betonu. Charakteristické jsou především svým malým dávkováním, které je od 0,2-5 % z hmotnosti cementu. Jejich působení na cementovou suspenzi je závislé na druhu cementu a jeho měrném povrchu. S vyšším měrným povrchem dochází k vytvoření větší reakční plochy, která usnadňuje chemickou reakci. Přísady lze rozdělit podle vlastností, které charakterizují jejich hlavní funkce a jsou deklarovány v evropské normě ČSN EN 934-2+A1^[N6]. Tato norma představuje vhodné druhy přísad:

- 1) přísady plastifikační (PL),
- 2) přísady superplastifikační (SP),
- 3) přísady zpomalující tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- 4) přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- 5) přísady provzdušňující,
- 6) přísady stabilizační,

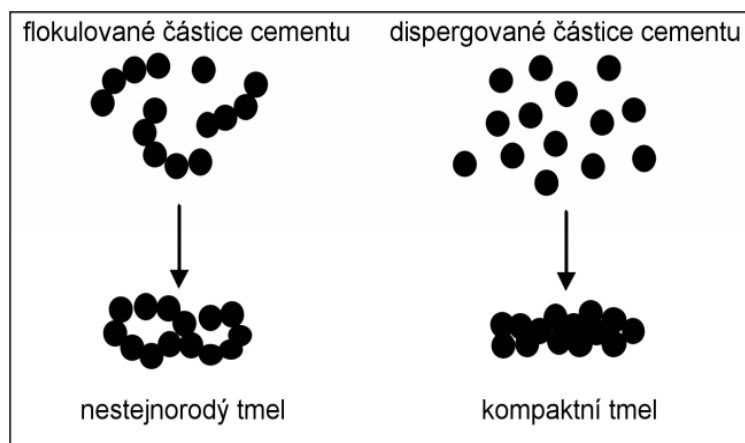
7) přísady hydrofobizační.^{[1][6]}

Plastifikační přísady

Jejich hlavní funkcí je snížit potřebné množství záměsové vody, a to u PL o 10 % a u SP nejméně o 30 %, pro dosažení stejné konzistence a tím redukovat hodnotu vodního součinitele, který má významný vliv na pevnosti zatvrdlého betonu, jeho dotvarování, smrštění, trvanlivost ale i zlepšení vlastnosti čerstvého betonu a dosažení požadované zpracovatelnosti. Z chemického hlediska se jedná o soli nebo deriváty ligninsulfonanů LS, estery polykarboxylátových kyselin PC, sufonované naftalenformaldehydované kondenzáty SNF, sulfanové melaminformaldehydové kondenzáty SMF a kopolymery karboxyakrylové kyseliny CAE.

V čerstvém betonu, kde nebyla použita plastifikační přísada, dochází k tzv. flokulaci částic cementu. Tyto částice nesou na svém povrchu náboj, jenž způsobuje jejich vzájemnou přitažlivost a znemožňují po smíchání s vodou solvataci (vytvoření vodní obálky na zrnek cementu), která ovlivňuje zpracovatelnost čerstvého betonu, kompaktnost a stejnorodost v zatvrdlém betonu.

Při použití PL a SP (obrázek 12) dochází ke změně elektrického potenciálu, dispergaci částic cementu, která vytváří prostorovou ochranou bariéru proti flokulaci. Částice se vzájemně odpuzují a dochází ke smáčení zrn cementu, a tudíž roste i tekutost cementového tmele.^{[1][7]}



Obrázek 11: Vliv charakteru dispergace cementu ve vodě na kompaktnost ztvrdlého tmele ^[7]

1.4.7 Výztuž v betonu

Prostý beton je konstrukční materiál, který je odolný vůči namáhání tlakem, naproti tomu se vyznačuje nízkou pevností v tahu, která se vyznačuje okolo 8 - 10 % pevnosti v tlaku. Prostý beton je tedy vhodný pro konstrukce namáhané v tlaku, což je v dnešní době nedostatkem pro některé druhy konstrukcí. Proto se do míst, kde v betonovém prvku vzniká tahová zóna, vkládá ocelová výztuž, která se při namáhání protahuje méně než beton, a při zatížení je schopna toto tahové napětí zachytit a zamezit vzniku trhlin.

Vyztužení lze provést dvěma způsoby a to povrchově nebo vnitřně. Beton vyztužujeme téměř výhradně vnitřně a to ocelovými pruty, sítěmi, předepjatou výztuží, ale také rozptýlenou výztuží pomocí ocelových SF, polypropylenových PP, skelných a přírodních vláken.

Vyztužování lehkých betonů, kde nastávají větší průhyby a deformace vlivem nižších pevností a modulem pružnosti je nutné zajišťovat dostatečnou ochranou výztuže proti korozi, která zde nastává mnohem snadněji než u obyčejných betonů. ^{[4] [8] [37]}

Koroze výztuže

Schopnost chránit betonářskou ocel před korozi je rozhodující pro trvanlivost konstrukčního lehkého betonu. Koroze výztuže má za následek snížení efektivního průřezu konstrukce, která je způsobená karbonatácí betonu. Nachází-li se výztuž v kontaktu se zrnem lehkého kameniva v zóně napadené karbonatácí, riziko koroze se zvyšuje.

Aby bylo zajištěno, že zrno lehkého kameniva umístěné na povrchu betonu není v kontaktu s ocelovou výztuží, musí být krycí vrstva lehkého betonu alespoň o 5 mm silnější oproti obyčejnému betonu. Extrémní případy rychlé karbonatace jsou způsobené špatnou kvalitou betonu v krycí vrstvě. V případě kvalitně a dobře zhutněného betonu, který měl možnost zrát za dobrých vlhkostních podmínek, je síla krycí vrstvy diskutabilní. Silná krycí vrstva může do jisté míry kompenzovat špatnou kvalitu cementové matrice, kterou je možné použitím mikrosiliky a dalších pucolánových příměsí zkvalitnit. ^[17]

Rozptýlená výztuž

Rozptýlená výztuž nemá za úkol nahradit klasickou ocelovou výztuž v betonu. Ale poskytuje další možnosti uplatnění betonu, které mohou zásadním způsobem zlepšit jeho vlastnosti, a to nejen v oblasti technologie, ale i v oblasti použití. Jako složka by vlákna měla být v betonové matici náhodně prostorově rozmístěna a orientována, jako například hrubá frakce kameniva v betonu.

Rovnoměrné rozptýlení vytváří efekt prostorového působení vláken v matici betonu, čímž ztuhne celou jeho strukturu a dochází ke zlepšení mechanických vlastností betonu, jako je pevnost v tahu, odolnost proti obrusu, zlepšení soudržnosti betonu v detailech konstrukce nebo naopak snížení deformace smrštěním a rozvoj mikrotrhlin při procesu zrání betonu.

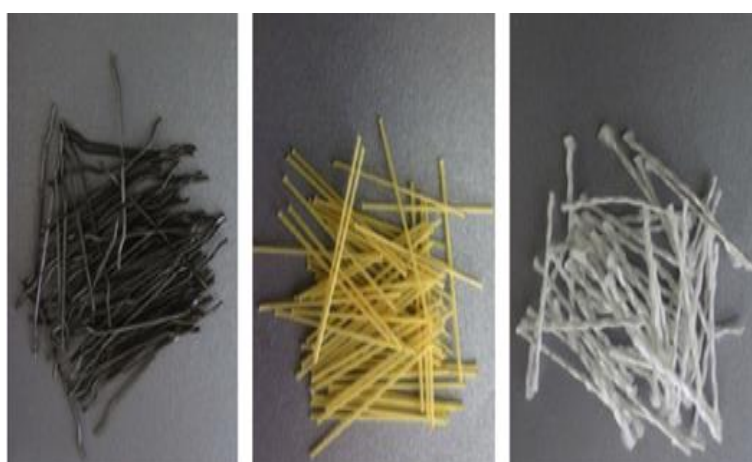
Vlákna do betonu mohou být různého původu, tvaru a rozměru. Podle toho je také můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to podle funkce, kterou zde plní, vlákna konstrukční a protismršťovací. Vlákna pro výrobu vláknobetonu můžeme dále rozdělit podle materiálu na vlákna ocelová, polymerová, skleněná, přírodní

1.4.8 Vláknobetony (FRC)

Pod pojem vláknobeton (FRC) se řadí speciální typ konstrukčního betonu, který má základní strukturu prostého betonu, jenž je ve své struktuře doplněn o náhodně rozptýlená vlákna. Rozptýlená vlákna v betonu musí tvořit takový podíl, aby vznikl homogenní vláknobeton, který významně ovlivní původní charakter prostého betonu. Vlastnosti FC jsou závislé na druhu použitého vlákna. Běžné FC snižují vznik mikrotrhlin způsobené při vysychání, snižují krvácení a permeabilitu betonu. Některé typy vláken

zvyšují houževnatost a odolnost proti nárazu a zlepšují tak trvanlivost betonu. Ovlivňují pevnost v tlaku a modul pružnosti s tím, že pevnost v tlaku se může vlivem vláken i snížit. Naopak pevnost v tahu se zvyšuje a schopnost vláken působit i po vzniku trhliny zvyšuje duktilitu materiálu. Toto zvýšení odolnosti s přidáním vhodného typu vláken, umožňuje použít vláknobetonu jako konstrukční materiál.

Pro přehled fyzikálních a mechanických vlastností jsou jednotlivé druhy vláken seřazeny do Tabulky 7. ^{[4][38]}



Obrázek 12: různé druhy vláken do betonu

Tabulka 7: Přehled fyzikálních a mechanických vlastností jednotlivých vláken ^[4]

Typ vlákna	Měrná hmotnost [Kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Ocelová	7840	210	1500-3600
Polypropylenová (PP)	900	200 - 800	500 - 750
Polyvinilalkoholová (PVA)	1300	40 - 60	1600 - 2500
Skleněná (ARS)	2500	70	1500 - 3800
Uhlíková (vysokopevnostní)	1900	200 - 250	2000 - 3100
Wolframová	1930	414	4200

Vlastnosti vláknobetonů

Vlastnosti konstrukčních vláknobetonů jsou velmi rozdílné a ovlivňovány zejména těmito faktory:

- 1) typ a vlastnosti materiálu vláken,
- 2) geometrický tvar, délka, povrchová a koncová úprava vláken,
- 3) dávka vláken,
- 4) složení betonové směsi,
- 5) soudržnost a mechanické kotvení vláken v matrici,
- 6) rozmístění vláken,
- 7) technologií výroby vláknobetonu

Pozornost je nutné věnovat i složení vlastní betonové směsi a již při jejím návrhu je potřeba počítat s účinky vláken na výsledné vlastnosti betonu. Při výrobě FC musí být zabezpečeno rovnoměrného rozmísení vláken v betonové směsi, a jejich dokonalé obalení cementovým tmelem. Z tohoto důvodu jsou např. polypropylenová vlákna lubrikována, čímž se zvýší smáčivost s cementovým tmelem. U ocelových vláken nejčastěji dochází k tvorbě shluků, tzv. ježků. Aby se tvorbě zabránilo, používá se rozrdužovacích a dávkovacích zařízení, které oddělují spleená vlákna od sebe a postupně je dávkuje do hotové betonové směsi. Rozmístění vláken v čerstvém betonu je možné usměřňovat elektromagnetem, avšak pro konstrukce větších rozměrů je tento způsob nepraktický a finančně nákladný. Podstatný vliv na směr vláken má konzistence vláknobetonové směsi, postup ukládání a zpracování. ^{[9] [10]}

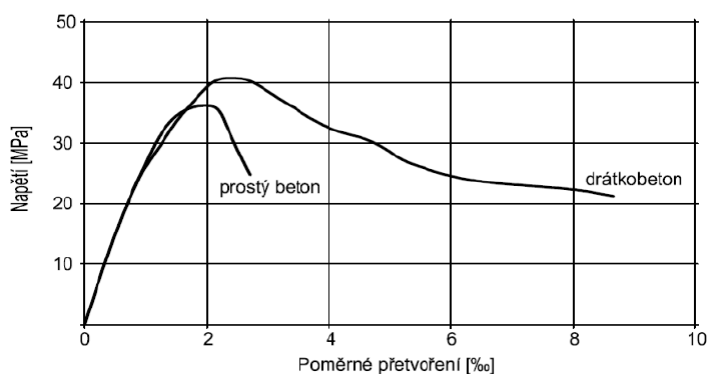
1.5 Vláknobeton s ocelovými vlákny (SFRC)

Též nazývaný jako drátkobeton je nejběžněji používaný pro výrobu vláknobetonu. S výzkumem aplikovat vlákna do betonu se začalo již v 60. letech minulého století, kde byly použity krátká ocelová vlákna. U těchto vláken bylo prokázáno zlepšení tahové pevnosti a to zejména po vzniku makrotrhliny, zvýšení odolnosti proti odštěpení a vysokým teplotám.

1.5.1 Vlastnosti drátkobetonu s ocelovými vlákny

Vlastnosti SFRC jsou ve srovnání s prostým betonem stejného složení ale bez vláken výraznější, než lze dosáhnout u vláknobetonů s ocelovými vlákny. Ocel je jakostnější materiál než beton a přidání ocelových vláken se mnohem více projeví na pevnosti v ohybu než pevnosti v tlaku či prostém tahu. Zvýšení pevnosti v ohybu může ovlivnit několik faktorů, objem použitých vláken, jejich úprava, ale také poměr stran vláken – se zvyšujícím se poměrem se zvyšuje pevnost.

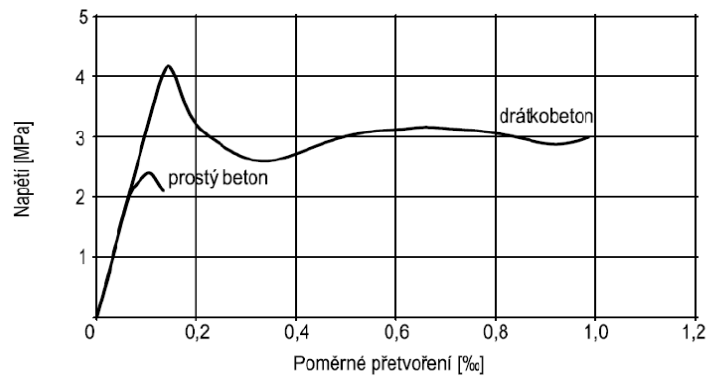
Rozdílné vlastnosti drátkobetonu a prostého betonu můžeme sledovat při porovnání pracovních diagramů obou betonů při namáhání tlakem Graf 7.



Graf 7: Pracovního diagramu při namáhání tlakem drátkobetonu a prostého betonu^[6]

Již při pouhém pohledu se u drátkobetonu výrazně projevuje jeho schopnost plastického přetváření při dosažení maximálního napětí v tlaku. Při poklesu napětí na polovinu má pracovní diagram téměř vodorovný směr a přetváření materiálu má charakter tečení, což je způsobeno aktivací vláken po vzniku trhlin. U betonu bez vláken dochází k porušení křehkými trhlinami vzniklých účinkem hlavních tahových napětím. V praxi je třeba vybrat vhodný typ vláknobetonu pro daný záměr.

Dosažení výraznějšího rozdílu mezi oběma druhy betonu lze sledovat při srovnání pracovního diagramu drátkobetonu a prostého betonu v tahu, zobrazeno na Grafu 8. U drátkobetonu můžeme sledovat nejen vzrůst jeho pevnosti v tahu, která je způsobena oddálením rozvoje mikrotrhlin ve struktuře, ale i schopnost přenášet reziduální napětí po vzniku makrotrhlin a tím nahlížet na drátkobeton jako na houževnatý materiál.



Graf 7: Pracovní diagram při namáhání tahem drátkobetonu a prostého betonu^[6]

1.5.2 Složky drátkobetonové směsi

Stejně jak při návrhu směsi pro obyčejný konstrukční beton, je především požadována pevnost betonu v tlaku, tak i při návrhu složení drátkobetonové směsi, bude tato pevnost výchozím požadavkem rozšířena o požadovanou pevnost drátkobetonu, který bude přenášet tahová napětí na mezi vzniku trhliny, ale i po jejím vzniku. Při jejím návrhu se vychází z požadavku hutné betonové směsi s eliminací nakypření kameniva drátky. Drátkobeton je z následujících složek: ^[9]

Cement, voda

Při návrhu a výrobě SFRC lze plně aplikovat, co se týká cementu a přísad, všechny poznatky z oblasti navrhování a výroby obyčejných betonů. Jediný rozdíl lze sledovat v množství záměsové vody, tj v poměru w/c který by měl dosahovat v rozmezí 0,4 – 0,5, čímž se sníží pravděpodobnost tvorby shluků drátků. ^{[1] [9]}

Přísady

Přítomnost vláken má za následek snížení pohyblivosti a zpracovatelnosti čerstvých betonů. Proto se doporučuje pro snadnější zpracování přidání ztekucujících a superplastifikačních přísad, zejména při požadavku na vyšší pevnosti betonu. Použití ostatních přísad lze aplikovat stejně jako u obyčejných druhů betonů. ^{[1] [9]}

Kamenivo

Mají-li drátkobeton plnit funkci konstrukčního betonu, jsou požadavky na kamenivo, zejména pokud jde o hrubou frakci, obdobné jako u osvědčených

konstrukčních betonů. Jak bylo popsáno výše, je z pohledu zpracovatelnosti dosažení co nejhutnější struktury, což při použití drátků s dostatečnou ohybovou tuhostí dochází k nakypření objemové jednotky. Tento vliv může být proměnný, především na množství a velikosti zrn hrubé frakce. Možností je eliminace množství hrubého kameniva a tudíž výroba jemnozrnných drátkobetonů, což není velmi vhodné, v případě konstrukčních drátkobetonů. Absence hrubého kameniva vede ke snížení pevnosti a zvýšení ceny betonu, a proto je nutné při návrhu drátkobetonové směsi brát ohled na třídění kameniva podle frakcí. ^{[1] [9]}

Ocelová vlákna

Ocelová vlákna dělíme do několika základních skupin, a to podle použitého základního materiálu pro jejich výrobu a podle základního tvaru průřezu. Vlákna pro aplikaci do betonu mají nejčastěji kruhový průřez, který je upraven kotvícími konci, nebo kotvením v celé délce průřezu vytvořeným profilováním průřezu. Pro tento typ vláken obecně platí, že mají lepší soudržnost s cementovým kamenem, než drátky hladké. Další odlišnosti geometrie jednotlivých výrobků můžeme sledovat v rozměrech průřezů i délkách, z čehož vyplívají štíhlosti jednotlivých vláken. Tento poměr délky a průměru vlákna se doporučuje pro nosné konstrukce volit:

- 1) $L/d = 60$ až 100 u rovných vláken,
- 2) $L/d = 45$ až 80 u tvarovaných vláken

Ocel použitá pro výrobu vláken se vyznačuje vysokou pevností, vysokým modulem pružnosti a značnou ohybovou tuhostí, čímž lze docílit zlepšení pevnosti v tahu až o 100 %.

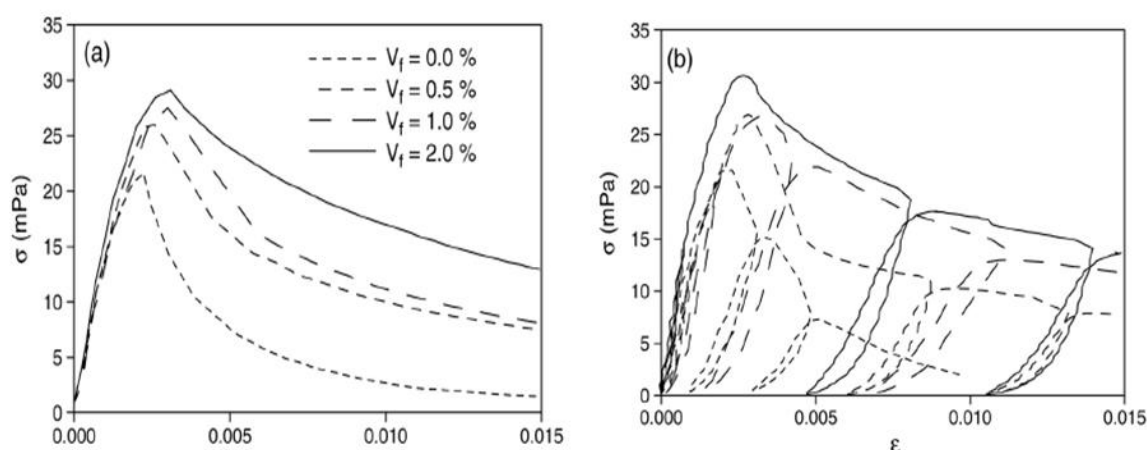
1.6 Vliv dávky vláken na vlastnosti lehkého betonu

Dávkování ocelových vláken se pohybuje v rozmezí od 20 do 100 kg/m³ nebo 0,5 až 2 % z hmotnosti objemu lehkého betonu. Vliv dávky ocelových vláken na vlastnosti lehkých betonů bylo provedeno několik experimentálních výzkumů.

Ve studii ^[41] použil autor délku vláken 35 mm při dávce 20 a 40 kg/m³ a s poměrem štíhlosti L/d 70. Pro výrobu směsi bylo použito hrubé kamenivo Liapor s obsahem vlhkosti 14 %, jemný písek a Portlandský cement (CEM I 42,5N). Pro vyhodnocení mechanických

vlastností byly použity zkoušky vytrhávání (Pull-out) podle směrnic RILEM, pevnost v tlaku podle ASTM C-39 a pevnost v ohybu podle ASTM C496 a ASTM C1609 pro všechny směsi. Ve zkoušce vytrhávání selhaly všechny zkoušené vzorky. Výsledné hodnoty ukazují, že obsah vláken neměl pozitivní vliv na pevnost v tlaku, a jsou nižší oproti referenční směsi. Jediný pozitivní efekt nastal u pevnosti v ohybu při dávce 40 kg/m^3 , kde se zvýšila mez pevnosti na 62 %.

Nižší míru zlepšení v soudržnosti vláken a betonu sledoval autor ^[42]. Použité dávky ocelových vláken byla 0,5 1,0 a 2,0 % typu DRAMIX délky 30 mm se zahnutými konci a poměrem štíhlosti 60. Jako kamenivo použil předem navlhčený expandovaný jííl. Pevnost v tlaku sledoval na válcových vzorcích průměru 100 mm a výšce 200 mm pod monotóním a cyklickým zatížením jak je vidět v (grafu 10). Přítomnost vláken zvýšila maximální silové hodnoty zvláště po dosažení meze pevnosti vrcholu a poddajnosti zatvrdlého betonu.

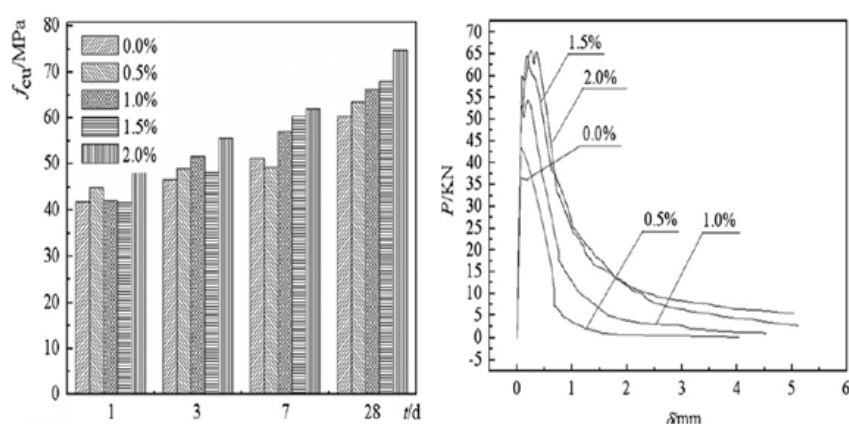


Stress–strain curves in compression: (a) monotonic; (b) cyclic.

Graf 8: Průběh křivek monotónního a cyklické zatížení ^[42]

Ve studii ^[43] sledoval autor vliv dávky ocelových vláken a statické a dynamické vlastnosti lehkých betonů s procentem obsahem vláken, 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % a 2,0 % a délkou 32 mm a 50 mm. Celkem bylo navrženo 5 druhů směsí, kde byl použit cement 42,5R. Hrubé a jemné kamenivo v podobě expandované břidlice a říčního písku. Vlhkost kameniva nebyla nijak upravována. Vodní součinitel byl konstantní a množství superplastifikační přísady se měnil z 0,5 % na 1 % hmotnosti cementu tak, aby byla udržena stejná zpracovatelnost pro všechny dávky vláken.

28 denní pevnost v tlaku, referenčního vzorku byla 60,4MPa s objemovou hmotností 1963 kg/m³. Mechanické vlastnosti vzorků byly testovány zkouškami pevnosti v tlaku, příčném tahu, pevnost v tahu za ohybu. Z Obrázku 13., lze sledovat, že pevnost v tlaku se s rostoucím věkem zvyšuje. Což je dáno použitým typem cementu s rychlým náběhem počátečních pevností. Nicméně konečné pevnosti referenčního vzorku po 28 dnech ve srovnání se vzorky, kde byla použita vlákna, lze sledovat nižší míru zvýšení pevnosti v tlaku.



Obrázek 13: Vztah mezi pevností v tlaku a objemový poměr ocelového vlákna (vlevo) chování lehkého betonu při pevnosti v tahu ohybem (vpravo)^[43]

Naopak přidání vláken se pozitivně projevilo při zkoušení vzorku v příčném tahu, kde se pevnost zvýšila z 3,99MPa na 7,6MPa což je 92,5 %.

Obrázek 13. prezentuje výsledné ohybové pevnosti LWC a SFLW s použitou dávkou vláken 0.5%, 1.0%, 1.5% a 2.0% v tomto pořadí. Výsledné křivky představují průměr tří výsledků testů ze stejné směsi. Lze konstatovat, že s rostoucím přídatkem vláken došlo nejen ke vzrůstu pevnosti v tahu, která je způsobena oddálením rozvoje mikrotrhlin, ale i po jejím překonání, kdy má schopnost přenášet reziduální napětí po vzniku makrotrhlin.

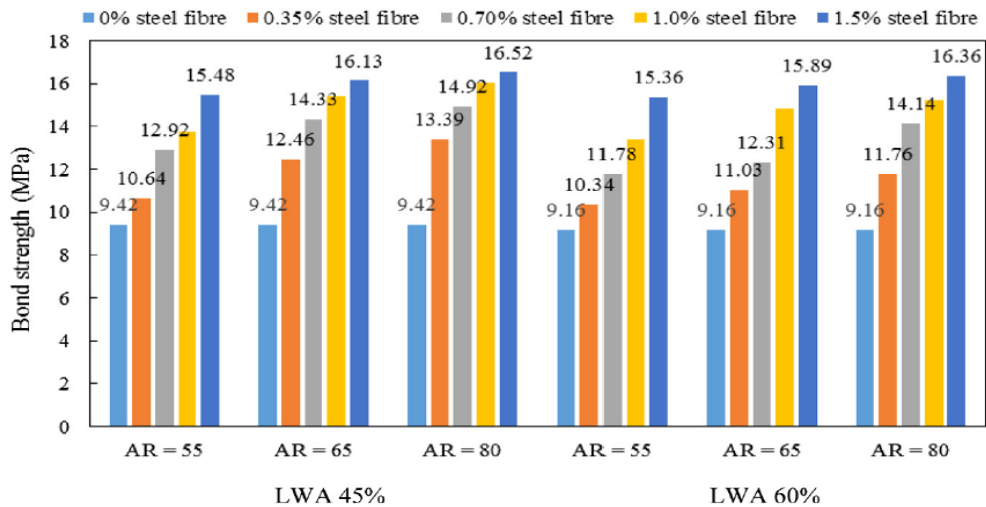
1.7 Vliv délky vláken na vlastnosti lehkého betonu

Účinek dávky a délky ocelových vláken na mechanické vlastnosti betonu s uměle vyráběným kamenivem sledoval autor^[44]. Vlákna byla dávkována v množství 0,35 %,

0,70%, 1,0 % a 1,50 % na objemovou hmotnost betonu. Autor použil celkem tři typy vláken délky 60 a 30 mm typu Dramix 80/60, 65/60 Dramix ZP305. Účinnost délky, dávky a objem frakce lehkého kameniva sledoval po 28 dnech zrání. Jako vstupní suroviny použil Portlansdský cement CEM I 42,5R - hrubé kamenivo ve formě sbalkovaného popílku, které nechal nasáknout pod dobu 30 sekund a jemné kamenivo, kterým byl rozdrčený vápencový písek.

Dávka superplastifikátoru byla upravena během míchání, aby se dosáhlo požadované konzistence. Celkem bylo vyrobeno 26 různých betonových směsí prostého a vyztuženého betonu s obsahem lehkého kameniva 45 a 60 %. Stanovení konzistence čerstvé směsi bylo provedeno stupněm sednutí. Pro dávky vláken do 1 % se pokles pohyboval v rozmezí 15 ± 2 cm a pro dávky >1 % 8 ± 2 cm. Každá směs se skládala ze tří krychlí 150 mm, které obsahovaly armovací tyč průměru 16 mm, pro testování soudržnosti vláken a betonu. Pevnost betonu byla stanovena s ohledem na RILEM RC6.

Výsledné silové pevnosti lehkého betonu bez vláken s obsahem lehkého kameniva 45 % a 60 % dosahovaly pevnosti 9,42MPa a 9,16MPa v tomto pořadí. Zde bylo sledováno snížení pevností, v důsledku zvýšením obsahu lehkého kameniva. Rostoucí dávka ocelových vláken se štíhlostním poměrem L/d 55, 65 a 80 při dávce až do 1,5 % měla za následek zvýšení pevnosti spoje až 67,7%, 73,5% a 78,6% pro beton s obsahem kameniva 45 %, v uvedeném pořadí. Přičemž dávka se stejnými poměry 64,3 %, 71,2 % a 75,5 % pro beton s obsahem lehkého kameniva 60 %. Výsledné pevnosti jsou zobrazeny v Grafu 9.

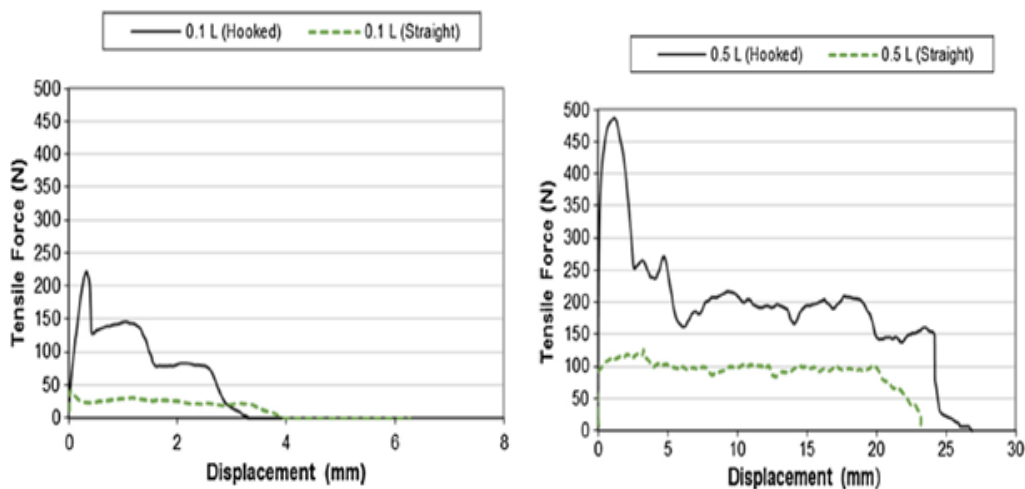


Graf 9: Efekt přidání ocelového vlákna na pevnost vazby ocelových vláken a sbalkovaného popílku s obsahem 45 a 60 %^[44]

1.8 Vliv tvaru vlákna na vlastnosti lehkého betonu

Koncová úprava ocelových vláken se provádí za účelem mechanického ukotvení vláken v betonové matrici, což příznivě ovlivňuje chování vláknobetonového prvku v oblasti trhliny.

Sledování dopadu zahnutých konců ocelových vláken na mechanické chování v betonu sledoval autor^[45]. Ocelová vlákna Dramix délky 50 mm s průměrem 0,75 mm a pevností v tahu 1100MPa, byla zabetonována do předem připravených forem. Celkem bylo připraveno pět skupin vzorků s použitím zahnutých a přímých vláken, která se ještě lišila hloubkou zapuštění do betonu. Jestliže L byla celková délka zahnutého vlákna, pak hloubka zapuštění pro jednotlivé vzorky byla 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L a 0,5L.

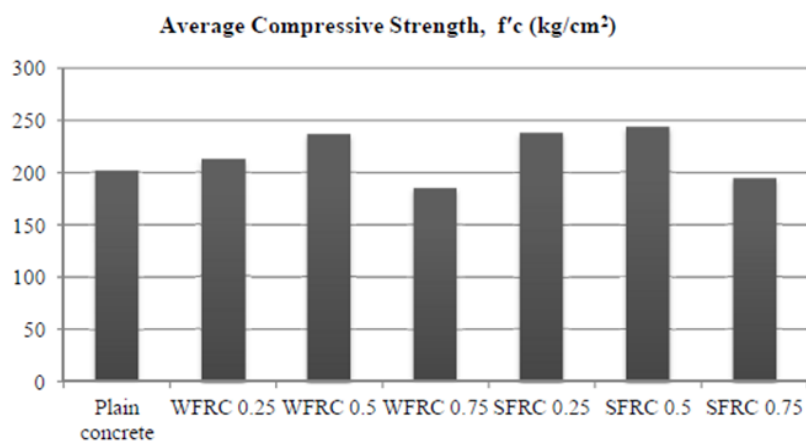


Obrázek 14: Vývoj pevností zahnutého a přímého vlákna při zapuštění 0,1L (vlevo) a 0,5L (vpravo)^[45]

Výsledky experimentálního textu ukázaly pozoruhodný rozvoj ve výkonu ocelového vlákna, při použití sofistikovaného tvaru ocelového vlákna typu DRAMIX, při jehož použití se spoj mezi vláknem a betonem zvýšil 4 až - 5 krát ve srovnání s vláknem rovným.

V poslední době se naskýtá možnost použití různých odpadních vláken do betonu, a to jak z ekologických důvodů tak, i z finančních. Tímto se zabývala studie ^[46], která byla zaměřena na vyšetřování mechanických vlastností lehkého konstrukčního betonu s použitím ocelových vláken z recyklované odpadní oceli. Pro experimentální výzkum byl použit portlandský cement, kamenivo perlit s maximální velikostí zrna 5 mm a to z důvodu jeho lehké objemové hmotnosti 93 kg/m^3 , jemné kamenivo, kterým byl křemičitý písek. Jako příměs byl použit typ silikagelu s konstantní dávkou 8 % z hmotnosti cementu. Pro porovnání výkonosti odpadních vláken byl použit typ vlákna se zahnutým koncem. Pro srovnatelné byly využity obdobné velikosti vláken. Délka ocelových vláken se zahnutými konci byla 50 mm s průměrem 1,2 mm, přičemž délka odpadních vláken se pohybovala v rozmezí $50 \pm 10 \text{ mm}$ o stejném průměru jako předchozí typ. Procento vyztužení všech vzorků činilo 0,25 %, 0,5 % a 0,75 %. Po namíchání vzorků a vytvrdnutí byly uloženy do vodní lázně po dobu 28 dní.

Tlaková zkouška byla stanovena na 21 krychlích o rozměrech 100 mm při konstantním zatížení 0,15MPa/s. Graf 11 zobrazuje dosažené výsledky pevnosti v tlaku s použitím WRFC (vyztužený beton s odpadním ocelovým vláknem), SFRC (vyztužený beton s ocelovým vláknem) a LWC (lehkým betonem). Lze pozorovat, že zvýšení dávky odpadních vláken do 0,25 % se projevila ve zvýšení pevnosti v tlaku u WRFC a SFRC o 5 a 18 % v porovnání s lehkým betonem. Je tedy zřejmé, že průmyslově vyráběná vlákna mají vyšší účinek, než vlákna recyklovaná. Nicméně tlaková pevnost WRFC a SFRC se snížila přibližně o 8 a 3 % v tomto pořadí, když došlo ke zvýšení dávky z 0,5 % na 0,75 %. Což znamená ještě nižší pevnosti prostého lehkého betonu.



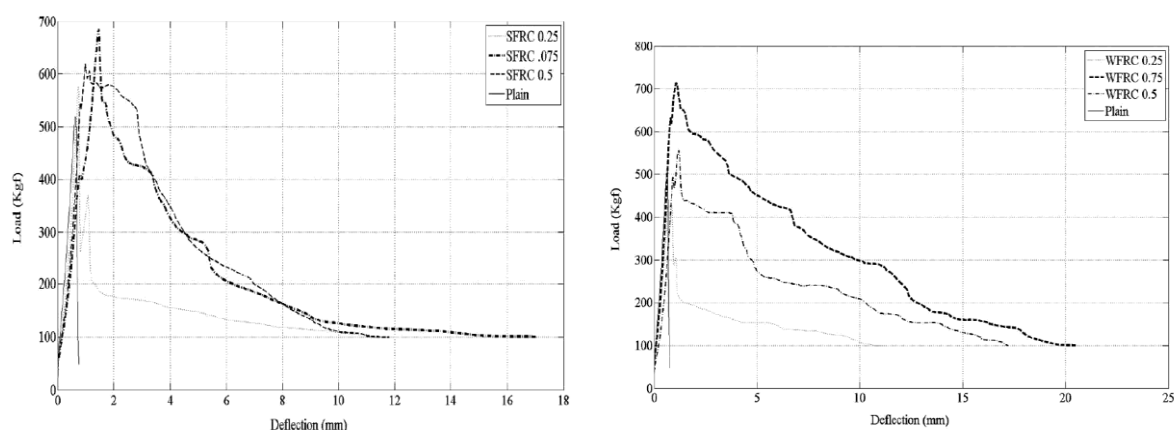
Graf 9: výsledné pevnosti LWC, SFRC a WRFC ve stáží 28 dnů^[46]

Zkouška tříbodového ohybu byla provedena na 21 hranolových vzorcích o rozměrech 500 x 100 x 100 mm, v souladu s ASTM C1018-97 s. Během experimentu byl zaznamenáván středový průhyb vzorků. Míra zatížení uprostřed trámce byla upravena na 0,1 mm/min. Poté byly deformační křivky vyneseny a zaznamenány.

Tabulka 8: Průměrná pevnost WFRC, SFRC, LWC vzorků v kg/cm^2

Specimen code	V_f (%)	First-crack strength (kg.f)	First-crack deflection (mm)	Toughness indices			Residual strength factors	
				I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
Plain	0	535.266	0.642	-	-	-	-	-
WFRC0.25	0.25	605.508	0.853	2.58	4.14	6.56	31.2	24.2
WFRC0.5	0.5	662.478	1.087	4.26	7.31	11.47	61	41.6
WFRC0.75	0.75	749.090	0.946	4.13	7.28	11.91	63	46.3
SFRC0.25	0.25	703.033	0.855	2.29	3.61	5.85	26.4	22.4
SFRC0.5	0.5	658.945	1.005	4.65	8.09	12	68.8	39.1
SFRC0.75	0.75	688.081	1.480	3.42	4.95	6.67	30.6	17.2

Výsledky ohybových testů jsou zobrazeny v Tabulce 9. Každý výsledek je průměrná hodnota zaznamenaná z trojice testů. Výsledky ukazují, že pevnosti v tahu vzorků s vlákny jsou při vzniku první trhliny vyšší, než vzorky bez vláken. V pracovním diagramu Grafu 10 jsou vyneseny průměrné hodnoty zatížení pro různé obsahy vláken. Podle zatěžovací čáry a chování vzorků pod zatížením může být jejich chování rozděleno na dvě části. Vzorky bez vláken selhaly, jakmile bylo dosažené nejvyšší zatížení. Odlišné chování lze sledovat u vzorků, které byly vyztuženy různým procentem vláken. Tyto vzorky ukázaly ohebné chování mezi vláknem a betonem přes prasklou část, která je odolná proti náhlým poruchám. Při pozorování zatěžovací křivky, je vidět, že po vzniku první trhliny následuje ostrý pokles ohybové únosnosti. Experimentální výsledky znázorňují, že konečná odchylka WFRC a SFRC vzorků, s přidáním vláken 0,75 %, je asi 32 a 26,5 krát větší oproti prostému betonu.



Graf 10: Pracovní diagram SFRC (vlevo), pracovní diagram WFRC (vpravo)

V předchozích studiích, kde byla sledována dávka, délka a koncová úprava vláken a jejich dopad na mechanické vlastnosti lehkých betonů, plynou tyto závěry. Dávkování vláken se pohybovalo v rozmezí 0,5-0,2 % z objemové hmotnosti betonu, přičemž některé dávky neměli pozitivní efekt na výsledné vlastnosti betonu.

Pokud se dávka vláken blížila ke 2,0 % z hmotnosti objemu, docházelo ke špatnému zpracování směsi, což v některých případech ^{[41],[46]} mělo za následek pokles betonu v tlaku, oproti referenční směsi. Se zvyšující se dávkou vláken, je podle autora ^[47] potřeba pro zachování zpracovatelnosti směsi použít i vyšší dávku superplastifikační přísady, a brát ohled na tvar hrubého kameniva. Vyšší dávky ocelových vláken se projeví i na výsledné objemové hmotnosti. Což potvrdila studie ^[48], ve které došlo při zvýšení obsahu vláken k růstu objemových hmotností, což je další nežádoucí vliv u lehkých betonů.

Dávka ocelových vláken se projevila pozitivně ve studiích ^{[43][44]}, kde došlo ke zvýšení mechanických pevností a to zejména při zkoušce v příčném tahu a pevnosti v tahu za ohybu. Autor ^[49] se zabýval pevností v tahu a prohlásil, že přidání ocelových vláken má malý účinek na stoupající část zatěžovací křivky pracovního diagramu, oproti části sestupné, která je základní klíčový prvek v nelineární analýze vláknobetonu pod tlakovým zatížením.

Z pohledu tvaru a délky vláken je lepší volit podle autora ^[45] delší vlákna s upravenými konci zahnutím. Což dokazuje předchozí studie ^[44].

1.9 Zkoušení lehkého konstrukčního vláknobetonu

Zkoušení lehkého konstrukčního vláknobetonu je možné provádět stejnými postupy, jako u betonu obyčejného s tím, že lehký vláknobeton je dalším kompozitním materiálem se širokou řadou modifikací. Vyznačuje se rozdílnými vlastnostmi, které je třeba prokázat zkouškami, ze kterých by se daly potřebné charakteristiky odvodit. ^{[50][53]}

1.9.1 Zkoušky čerstvého lehkého vláknobetonu

Účelem zkoušení čerstvého vláknobetonu je poskytnout údaje vypovídající o vlastnostech specifického materiálu, který se chová odlišně od prostého betonu. Proto

se vlastnosti čerstvého vláknobetonu ověřují standardizovanými zkušebními postupy, shodnými pro zkoušky obyčejného betonu, dle souboru norem ČSN EN 12350^[N15]. Na tuto normu navazuje i nově vydaná přednorma ČSN P 73 2451^[N7] zkoušení čerstvého vláknobetonu. Z těchto metod bude pravděpodobně nejvhodnější ČSN EN 12350-5^[N8] „Zkouška rozlítím“. Vyplývá to z působení vláken ve struktuře betonu, která ji stabilizují a brání přirozenému tečení, s kterým se počítá při zkoušce sednutím kužele. ^{[50] [51]}

Zkoušku sednutí kužele provedl autor ^[52], ve které učinil závěr, že přidání vláken do betonu sníží jeho zpracovatelnost, což se projeví na velikosti sednutí kužele. Což nedoporučuje autor ^[9], jelikož při hutnění ocelovou tyčí dochází k násilné deformaci drátků a jejich vzájemnému proplétání. Tím uvnitř kužele vzniká skelet, který podstatně ovlivňuje její směsi. Dále uvedl, že pro měření zpracovatelnosti bude vyhovovat metoda, která se obejde v největší míře bez zásahu lidského činitele. Takovou metodou je ČSN EN 12350 4^[11] „stupeň zhutnitelnosti“.

1.9.2 Zkoušení zatvrdlého lehkého vláknobetonu

Zkoušky zatvrdlého lehkého vláknobetonu se provádějí rovněž standardizovanými postupy podle norem řady ČSN EN 12390 a dalšími dosud nestandardizovanými zkušebními metodami pro ověření mechanických vlastností vláknobetonu, jakou je např. zkouška ohybem. Pro tuto zkoušku vyšla nová přednorma ČSN P 73 2452 Zkoušení zatvrdlého vláknobetonu. Tato norma zavádí nové metody zkoušení, které se u prostého betonu neprovádí. ^{[51][53]}

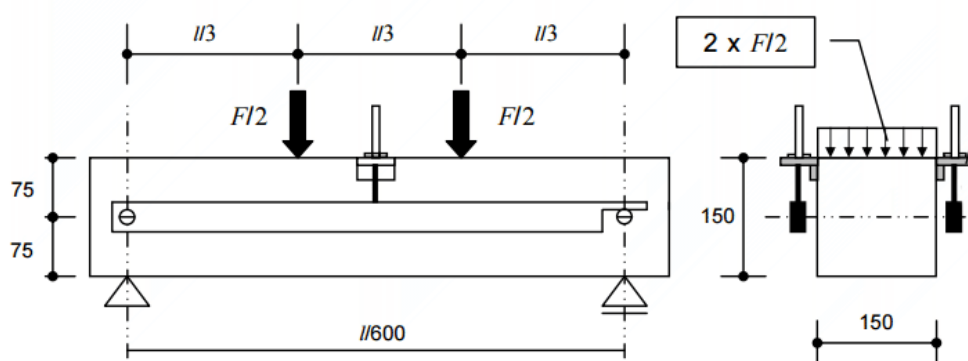
Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku se provádí dle ČSN EN 12390-3^[N12] na zkušební krychli, nebo válci. Třída betonu se proto označuje oběma charakteristickými hodnotami těchto pevností např. (LC 35/38). Pro obyčejné betony byl zaveden poměr mezi charakteristickými hodnotami pevností získaných z měření na válcích a na krychlích $\alpha_{fc} = f_{c,cyl}/f_{c,cub} = 0,8$. V tom je zahrnuta i skutečnost, že při zkoušce je válec zatěžován ve směru hutnění betonu a krychle kolmo na směr hutnění. Z dlouhodobého hlediska se ukazuje, že pro konstrukční vláknobeton s ocelovými vlákny lze tento poměr změnit na poměr $\alpha_{fc} = f_{c,cyl}/f_{c,cub} = 0,9$.

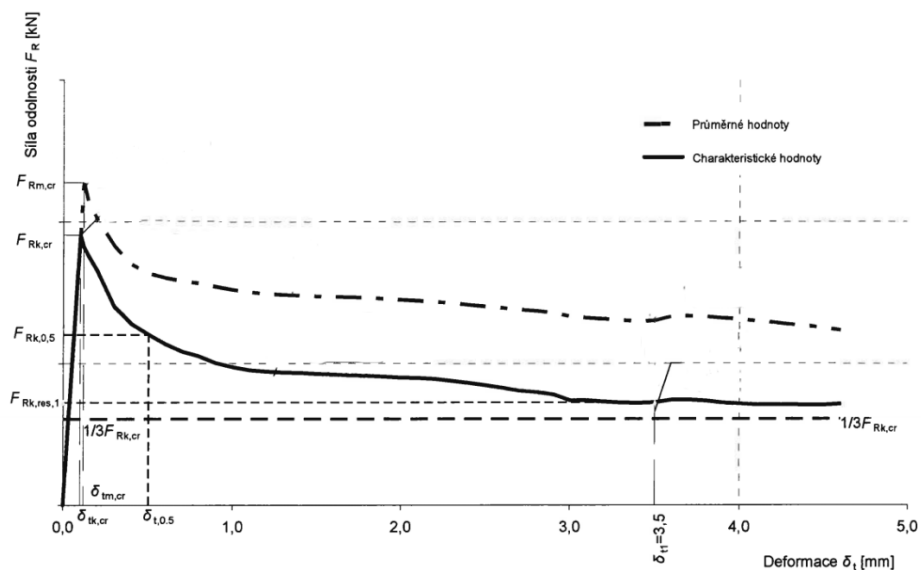
Pevnost v tahu

U kompozitních materiálů, kterým vláknobeton bezesporu je, by zkouška ohybem měla odhalit nejslabší průřez na zkoušeném trámku v odolnosti vůči ohybovému namáhání. Pro zkoušení vláknobetonů ohybem jsou užívány tři varianty sestavy zkoušek, které se liší postupem zatěžování tělesa, oproti postupu zatěžování normálního betonu. ^[51]

Podle ČSN P 73 2452^[N13] pro zkoušení zatvrdlého vláknobetonu, je zkouška definována čtyřbodovým ohybem s tělesem 150 x 150 x 700 mm s rozpětím 600 mm, kde není předem definovaný průřez, ve kterém má vzniknout kritická trhлина. Zatěžování zkušebních těles musí probíhat ve zkušebním zařízení, na kterém lze řídit sílu zatížení. Zatěžování musí probíhat rovnoměrnou rychlostí tak, aby průhyb uprostřed trámce rostl při zatěžování rovnoměrně s časem tj. $(0,2 \pm 0,05)$ mm/min. Průhyb musí být zaznamenáván s přesností na 0,01 mm a v těchto krocích rovněž graficky znázorněn v diagramu odolnosti. Po ukončení zkoušky se zaznamená poloha makrotrhliny (v mm). Makrotrhлина vznikne ve střední třetině zkušebního trámce a její místo vzniku ovlivní hodnotu pevnosti vláknobetonu při dohodnutém mezním průhybu.



Obrázek 15: Uspořádání zkoušky ohybem podle ČSN P 73 2452^[N13]



Obrázek 16: Charakteristický diagram odolnosti vláknobetonu podle ČSN P 73 2452^[N13]

Výsledkem zkoušky jsou charakteristické hodnoty pevností vláknobetonu v tahu za ohybu, kde je lze přepočítat je na charakteristické hodnoty pevností v prostém tahu. Podle ČSN P 73 2452^[N13] jsou důležité tyto hodnoty:

- 1) pevnost při průhybu při průhybu 0,5 mm,
- 2) pevnost v tahu při průhybu trámce 3,5 mm.^[53]

Pro zkoušení vláknobetonů v tahu ohybem jsou dostupné tyto varianty:

- 1) v ČR dle ČSN EN 73 2452^[N13],
- 2) v SRN dle DVB Merkbalt,
- 3) v Rakousku dle Richtline Faserbeton,
- 4) v Evropě pro zkoušení pouze stříkaného vláknobetonu dle ČSN EN 14488-3^[N14].

U těchto uvedených postupů se liší velikost zkušebního tělesa, vzdálenosti podpor, vzdálenost břemen a rychlost zatěžování.

Tabulka 9: Porovnání jednotlivých zkoušek

	rozměry těles	vzdálenost podpor	vzdálenost břemen	rychlost zatěžování
	b x h x l	l [mm]	h [mm]	[mm/min]
ČSN P 73 2451	150 x 150 x 700	600	200	0,2 ± 0,05 mm konstantně
DVB Merkblat	150 x 150 x 700	600	150	průměrně 0,2
Richtline Faserbeton	150 x 150 x 600 až 700	450	150	0,2 ± 0,03
ČSN EN 14488-3	75 x 125 x 500 a více	375	125	0,25± 0,05 do průhybu 0,5 mm dále do průhybu 4 mm nebo do zalomení

II. Praktická část

Cílem praktické části bylo navrhnout dvě receptury lehkých betonů ve dvou pevnostních třídách a to LC 35/38 a LC 45/50 ve třídě objemové hmotnosti D1,8 konzistence S3. Zvolit vhodný typ vláken délky 50 a 60 mm, a sledovat jejich dopad na vývoj pracovního diagramu a pevnosti v tlaku. Návrhy receptur byly konzultovány a upraveny vedoucím práce.

2 Použité suroviny

V této kapitole budou postupně popsány jednotlivé suroviny navržených směsí, a to cement, voda, popílek, kamenivo, vlákna a superplastifikační přísada.

2.1 Cement

Pro obě dvě navržené směsi, byl použit cement CEM I 42,5R od společnosti Českomoravský cement a. s. ze závodu Mokrý u Brna. Cement splňuje normové požadavky ČSN EN 197-1^[N3]. Vybrané vlastnosti tohoto cementu zobrazuje Tabulka 10.

Tabulka 10: Vybrané vlastnosti CEM 42,5R

vlastnost	hodnota	jednotka
pevnost v tlaku po 7 dnech	51	Mpa
pevnost v tlaku po 28 dnech	61	Mpa
pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech	8	Mpa
pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	9	Mpa
měrný povrch	375	m ² /kg
měrná hmotnost	3110	kg/m ³

2.2 Voda

Pro namíchání směsí bylo použito pitné vody z vodovodu v laboratořích ústavu THD. Dávka vody splňuje požadavky normy ČSN EN 1008^[N16].

2.3 Popílek

Použitý popílek pocházel z černouhelné elektrárny s vysokoteplotním spalováním Třebovice. Jedná se o popílek zachytávaný na elektrostatických odlučovačích, který se shromažďuje ve výsypkách.

2.4 Kamenivo

Kamenivo bylo použito ve dvou frakcích 0-4 a 4-8 mm. Pro frakci 0-4 byl použitý písek těžný písek Žabčice. Hrubá frakce byla zastoupena pórovitým kamenivem z expandovaného jílu Liapor 4-8/600, ze závodu Lias Vintřov, které splňuje požadavky ČSN EN 13055-1. Vybrané vlastnosti tohoto kameniva jsou zobrazeny v Tabulce 11.

Tabulka 11: Vybrané vlastnosti kameniva Liapor

Sypná hmotnost kg/m^3	600
objemová hmotnost zrna	1150
tolerance objemové hmotnosti (%)	± 15
nasákavost w_5 (%hm, max)	2
nasákavost w_{30} (%hm, max)	4
nasákavost w_{60} (%hm, max)	5
nasákavost w_{120} (%hm, max)	6

2.5 Vlákna

Směsi obsahovaly rozptýlenou výztuž, ocelová vlákna od společnosti DM KrampeHarex v délce 50 a 60 mm s průměrem 0,8 s upravenými konci zahnutím, znázorněny na Obrázku 17. Jejich pevnost v tahu je $1200 \text{ MPa} \pm 15 \%$.



Obrázek 17: Ocelová vlákna KrampeHarex délky 50 a 60 mm, se zahnutými konci

2.6 Superplastifikační přísada

Pro zajištění požadované konzistence byla použita superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátu CHRYSO®Fluid OPTIMA 208 o objemové hmotnosti při 20 °C $1,045 \pm 0,02 \text{ g / cm}^3$.

3 Receptury

Celkem byly navrženy dvě receptury a to tak, aby bylo dosaženo pevnostních tříd LC 35/38 a LC 45/50 s objemovou hmotností D 1,8, při dávce ocelových vláken 25 a 30 kg/m³ po 28 dnech zrání betonu. Třetí, referenční směs bez vláken, sloužila pro posouzení vlivu dávky a délky vláken, na mechanické vlastnosti předchozích dvou receptur.

Před mícháním navržených směsí, byla frakce 4 - 8 mm lehkého kameniva Liapor, ponořena na dobu 24 hodin do vodní lázně, a to z důvodu, aby nedocházelo během procesu míchání, ke snížení konzistence směsi a odebírání potřebné vody pro hydrataci cementu. Jemná frakce těžného kameniva 0 - 4 mm byla až na pro poslední dvě směsi, pokaždé vysušena. Složení jednotlivých směsí je zobrazeno v tabulce 3. pro směs LC1 35/38 D 1,8 v Tabulce 12. pro směs LC2 45/50 D 1,8.

Tabulka 12: složky jednotlivých směsí pro pevnostní třídu LC 35/38

receptura/ složka	CEM I 42,5R	Písek 0-4 mm	Liapor 4- 8/600	Popílek Třebovice	Voda	super. přísada	vlákna dávka/ délka
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[l]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[l]	[kg/m ³]
LC1 35/38 D1,8 25/50	420	900	280	100	190	5	25/50
LC1 35/38 D1,8 30/50	420	900	280	100	190	5	30/50
LC 35/38 D1,8 25/60	420	900	280	100	190	5	25/60
LC1 35/38 D1,8 30/60	420	900	280	100	190	5	30/60
LC1 REF 35/38	420	900	280	100	190	5	/

Před dávkováním do míchačky bylo nutné odstranit přebytečnou vodu z povrchu zrn Liaporu. Což se provedlo pomocí prosévacího síta. Postup dávkování jednotlivých složek byl následující. Jako první se dávkovalo kamenivo frakce 4 - 8 mm a poté 0 - 4 mm. Došlo ke společnému promíchání. Následně byl nadávkován cement s popílkem a společně smíchání s kamenivem. Nakonec byla přidána část záměsové vody a superplastifikační přísada. Po homogenizaci směsi došlo k nadávkování ocelových vláken ručně. Směs se pak nechala po dobu 1,5 minuty promíchat.

Následně byla provedena zkouška sednutím, ze které bylo pozorováno, že přidáním vláken do betonu se snížila konzistence směsi oproti směsi referenční, což se projevilo ve zvýšení dávky záměsové vody. Od každé směsi byly vyrobeny tři zkušební tránce 150 x 150 x 700. Zhutňování proběhlo ve dvou vrstvách na vibračním stole. Nakonec se vzorky zvážili, aby mohla být stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu. Odformování vzorků proběhlo po dvou dnech a byly uloženy do vodního prostředí, vyjímaje posledních 6 vzorků, které byly ošetřovány v předepsaném prostředí s relativní vlhkostí vzduchu. Po 28 dnech zrání byly provedeny na zkušebních tělesech pevnosti v tlaku a zkouška v čtyřbodovém tahu za ohybu podle německé normy DIN 1045^[N]. Výše uvedený postup zpracování, a zkoušení proběhl i u směsi LC2 45/50 D 1,8.

Tabulka 13: složky jednotlivých směsí pro pevnostní třídu LC 45/50

Receptura/složka	CEM I 42,5R	Písek 0-4 mm	Liapor 4-8/600	Popílek Třebovice	Voda	sup. přísada	Vlákna dávka/ délka
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[l]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[l]	[kg/m ³]
LC2 45/50D1,8 25/50	470	920	240	100	200	5	25/50
LC2 45/50D1,8 30/50	470	920	240	100	200	5	30/50
LC2 45/50D1,8 25/60	470	920	240	100	200	5	25/60
LC2 45/45D1,8 30/60	470	920	240	100	200	5	30/60
LC2 REF 45/50	470	920	240	100	200	5	/

3.1 Provedené zkoušky a výsledky

3.1.1 Zkoušky čerstvého betonu

Stanovení konzistence čerstvé betonové směsi byla provedena podle ČSN EN 12350-2^[N10]. Zkouška sednutím se provádí pomocí abramsova kužele s průměrem spodní podstavy 200 mm a horním naplňovacím otvorem 100 mm, výškou 300 mm. Před začátkem zkoušení, se musí podložka a kužel navlhčit. Plnění probíhá ve třech vrstvách, z nichž každá vrstva se hutní 25 vpichy propichovací tyčí. Následně se povrch kužele zarovná a kužel se plynulým tahem zvedne. Pokud dojde při zvedání kužele k jeho zborcení, je zkouška neplatná.

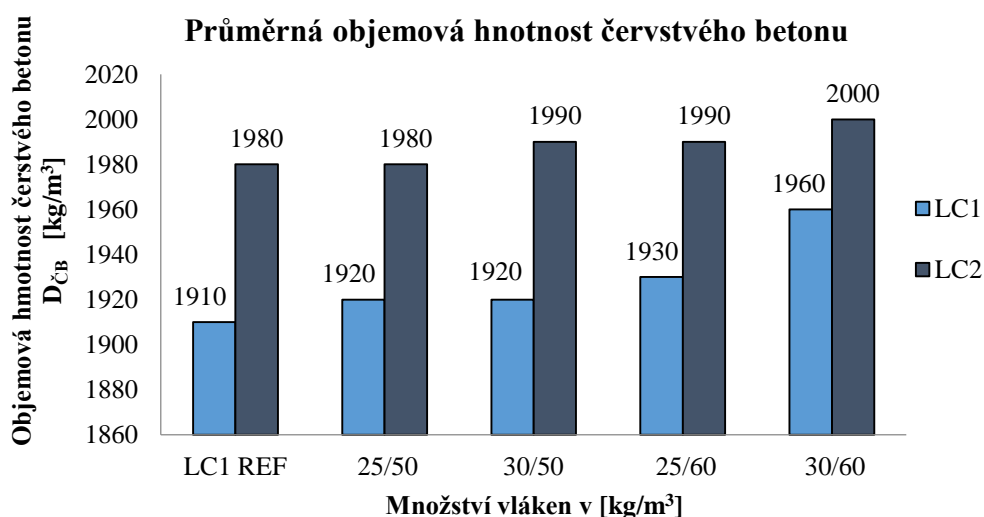
Výsledkem zkoušky je rozdíl mezi nejvyšším bodem sednutého betonu a výškou abramsova kužele zaokrouhlený na 10 mm.



Obrázek 18 Vyhodnocení zkoušky sednutí

3.1.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovena podle ČSN EN 12350-6^[N2]. Kde byly předem zváženy hmotnosti prázdné formy a poté plné formy. Následně po jejich odečtení se získala hmotnost čerstvého betonu, který se podělil objemem forem, čímž se získala výsledná objemová hmotnost čerstvého betonu.



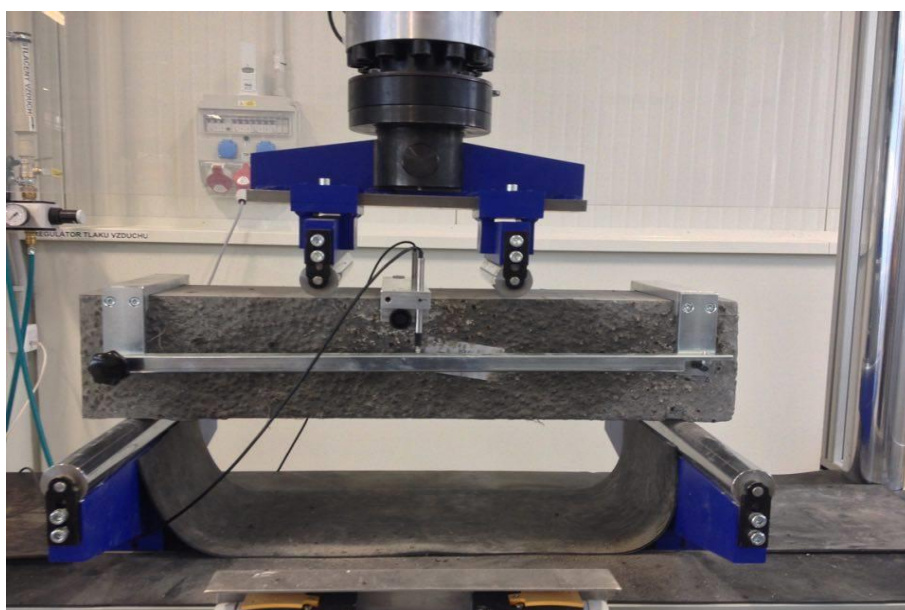
Graf 11: Průměrná objemová hmotnost čerstvého betonu

Zvýšena objemová hmotnost čerstvého betonu je dána množstvím předem nasáklé vody pórovitým kamenivem. S tímto faktem se musí počítat při návrhu lehkých betonů, kde směs v čerstvém stavu musí vykazovat asi o $100 - 120 \text{ kg/m}^3$ navíc. Během zrání betonu, se z kameniva uvolňuje nasáklá voda a tvoří tak funkci vnitřního ošetřování betonu.

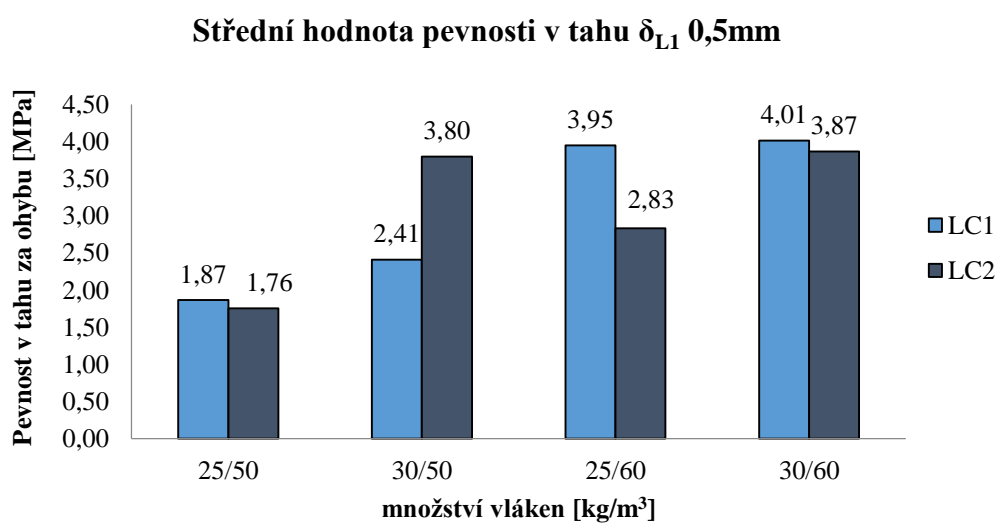
Stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu nebylo provedeno, takže nelze posoudit, o jaký pokles objemové hmotnosti došlo.

3.1.3 Zkoušky zatvrdlého betonu

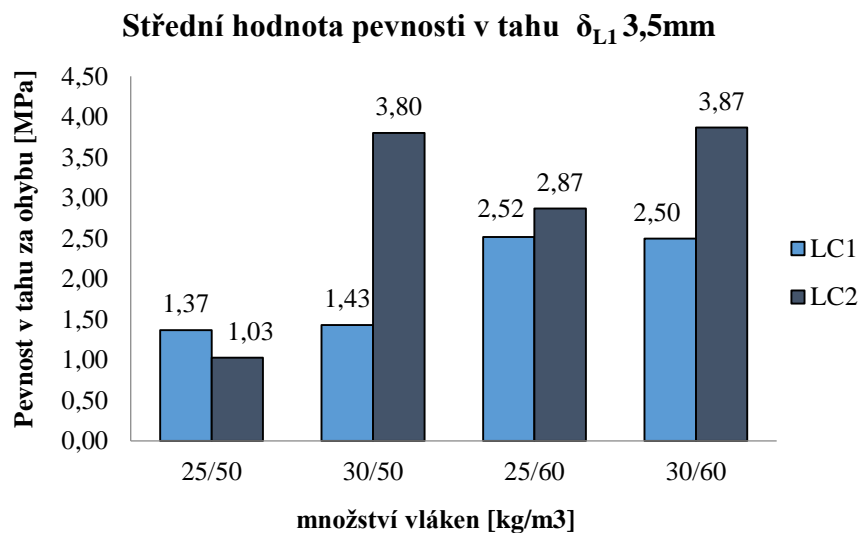
Stanovení pevnost v tahu za ohybu lehkého vláknobetonu proběhlo ve výzkumném ústavu AdMaS fakulty Stavební v Brně. Zkouška ohybem byla provedena na normalizovaných trámcih $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$. Zkoušení proběhlo podle německé normy DIN ^[N]. Zkouška byla provedena zkušební postupem s řízenou deformací, kde zkušební zařízení musí mít takovou tuhost, aby bylo zabráněno negativnímu ovlivnění, sledovaného průhybu ve středu rozpětí, po vzniku makrotrhliny. Vzdálenost rozpětí normalizovaných trámců byla $l=600 \text{ mm}$, což je vzdálenost mezi podpěrnými válečky. Horní zatěžovací válečky jsou umístěny v osové vzdálenosti $l/3 = 200 \text{ mm}$. Ještě před začátkem zatížení, se na trámec musí upevnit zařízení pro měření průhybu. Zatěžování trámců se provádí kolmo na směr hutnění. Během testu v ohybu nesmí být ohýbací rychlost větší, než $0,1 \text{ mm/min}$. Jakmile je dosaženo deformace $0,75 \text{ mm}$, zvýší se deformační rychlost na $0,3 \text{ mm/min}$. Zatěžování probíhá až do vzniku $3,5 \text{ mm}$. Výsledkem zkoušky je deformační křivka, ze které se odečte pevnost v tahu při průhybu trámce $0,5 \text{ mm}$, pevnost v tahu při průhybu trámce $3,5 \text{ mm}$. Výsledné deformační křivky jsou součástí přílohy^[1].



Obrázek 19: uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu pro normalizovaný trámec



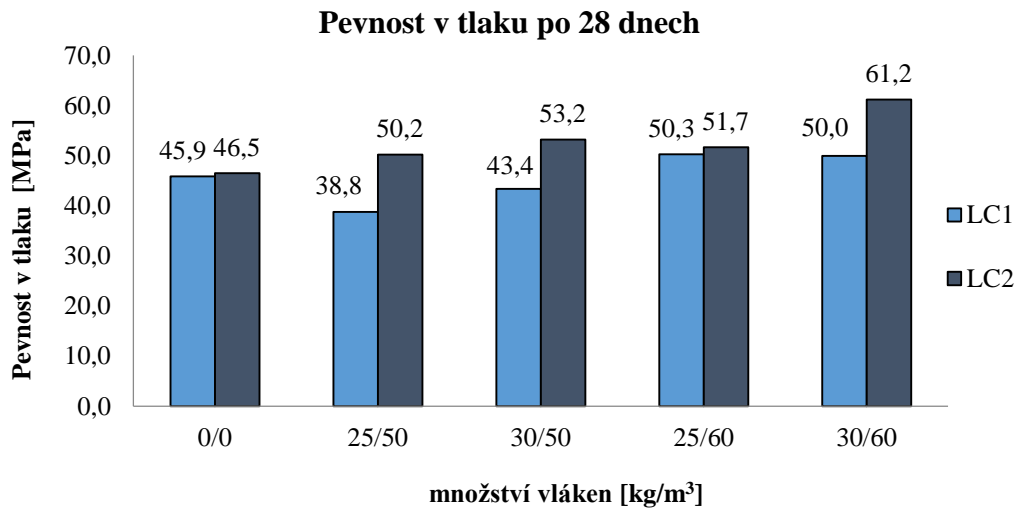
Graf 12: Střední hodnota pevnosti v tahu při průhybu trámce δ_{L1} 0,5mm



Graf 13: Střední hodnota pevnosti v tahu při průhybu trámce δ_{L1} 3,5mm

3.1.4 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušena dle normy ČSN EN 12390-3^[N3]. V případě trámců se musí provést nejprve zkouška pevnosti v tahu, ze které se získají dva zkušební vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku do předem definovaných „čelistí“, s plochou 150x150 mm do kterých se vloží konec trámce, který je zatěžován kolmo na směr hutnění, výsledná hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 MPa.



Graf 14: průměrné dosažené pevnosti v tlaku po 28 dnech

Při stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech bylo vyzorováno, že u směsi LC1 při délce ocelových vláken 50 mm a dávky 25 a 30 Kg/m³ došlo ke snížení pevnosti v tlaku oproti referenční směsi. U dávky 25 Kg/m³ ocelových vláken došlo ke snížení zhruba o 17 % a u dávky 30 Kg/m³ ke snížení o 5,5 %. U délky ocelových vláken 60 mm ve směsi LC1 bylo vyzorované, že u obou dávek 25 Kg/m³ a 30 Kg/m³ došlo ke zhruba stejnému zvýšení o 9,8 % oproti referenční směsi.

U směsi LC2 při délce ocelových vláken 50 mm a dávky 25 a 30 Kg/m³ došlo ke zvýšení v obou případech. U dávky 25 Kg/m³ ocelových vláken došlo ke zvýšení zhruba o 7 % a u dávky 30 Kg/m³ ke zvýšení o 15 %. U délky ocelových vláken 60 mm ve směsi LC2 bylo vyzorované, že u obou dávek 25 Kg/m³ a 30 Kg/m³ došlo také k nárůstu. U dávky 25 Kg/m³ ocelových vláken došlo ke zvýšení o 9,8 % a u dávky 30 Kg/m³ došlo k nejvyššímu zvýšení z celého pozorování a to o 13,5 %.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo Studium vlivu složení lehkých vláknobetonů na fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Teoretická část bakalářské práce byla věnována studiu lehkých betonů spolu s jeho vlastnostmi v kombinaci s ocelovými vlákny v různých dávkách, délkách a dopadem na fyzikální a mechanické vlastnosti

V praktické části bakalářské byly navrženy dvě směsi s pevnostními třídami LC 35/38 (LC1) a LC 45/50 (LC2). Každá ze směsí obsahovala dvě různé dávky ocelových vláken (25 a 30 kg/m³) a dvě různé délky vláken (50 a 60 mm) se zahnutými konci. Třetí směs byla referenční, která neobsahovala ocelová vlákna. Celkem bylo namícháno třicet zkušebních vzorků (trámců) 150x150x700 mm. Pro kontrolu konzistence byla stanovena zkouška sednutím a objemová hmotnost čerstvého betonu. Po 28 dnech byla provedena zkouška pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu čtyřbodovým ohybem.

Při stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech bylo vyzorováno, že u směsi LC1 a délky ocelkových vláken 50 mm došlo jako u jediných dvou provedených měření ke snížení pevnosti v tlaku. U dávky 25 Kg/m³ ocelových vláken došlo ke snížení zhruba o 17 % a u dávky 30 Kg/m³ ke snížení o 5,5 %. Ocelová vlákna mají obecně tendenci nakypřovat betonovou strukturu, což mělo za následek daný pokles pevnosti tlaku v betonu. Naopak k nejvyššímu zvýšení pevnosti v tlaku nastalo u směsi LC2 s délkou ocelových vláken 60 mm a dávky 30 Kg/m³ o 13,5 % oproti referenční směsi.

Při stanovení pevnosti v tahu za ohybu byly získány diagramy odolnosti normalizovaného trámce z lehkého vláknobetonu, kde byly stanoveny síly při protažení δ_{L1} 0,5 mm a δ_{L1} 3,5 mm. Následně byly vypočítány střední hodnoty při protažení δ_{L1} 0,5 mm a δ_{L1} 3,5 mm pro každou pevnostní třídu. Na základě výsledků pracovního diagramu je možné zařadit vláknobeton do příslušné pevnostní třídy a určit vhodnost zkoušeného vzorku pro použití v nosných konstrukcích. Tyto pevnostní třídy pro lehký vláknobeton zatím neexistují, a proto není možné jejich zařazení do příslušných pevnostních tříd a tím zjistit jejich využitelnost v praxi.

4 Seznam použitých zdrojů

- [1] HELA, Rudolf. *Technologie betonu II*. Brno: Vysoké učení technické: Fakulta stavební, 2007, 183 s.
- [2] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky*. Brno. Vysoké učení technické: Fakulta stavební, 2006, 203 s.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [4] HELA, Rudolf. *Technologie betonu*. Vysoké učení technické: Fakulta stavební, 2005, 110 s.
- [5] ADÁMEK, J. *Stavební látky. Modul BI01 - M01: Struktura a vlastnosti stavebních látek*. Brno: VUT, Fakulta stavební, 47s.
- [6] HELA, Rudolf, Radomír SOKOLÁŘ. *Zkušebnictví a technologie – technologie betonu, stavební keramika*. Brno. Skriptum. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [7] TERZIJSKI, Ivailo. *Polyfunkční přísady do betonu - principy a možnosti návrhu podle požadavku konkrétní aplikace: Multifunctional admixtures for concrete - principles and possibilities of their design according to demands of actual application : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru konstrukce a dopravní stavby*. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4331-0.
- [8] PROCHÁZKA, Jaroslav a Jiří ŠMEJKAL. *Betonářská výztuž: trendy výroby a spojování*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04260-1.
- [9] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití : směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. Praha: Informační centrum České komory

autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-863-6400-3.

- [10] KOLÍSKO, Jiří. *Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů: Influence of short randomly distributed polypropylene micro and macro fibres on properties of cement mortars and concrete*. V Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04072-0.
- [11] FEČKO, Peter. *Popílky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0327-5
- [12] BENSCHIEDT, N. a Rudolf HELA. *Příručka Popilek v betonu: základy výroby a použití*. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.
- [13] *Cemex příručka Liaporbeton* [online]. 2006. Dostupné z: http://www.betonserver.cz/Katalogy/Readymix/Prirucka_liapor.pdf
- [14] VETCHÝ, Jan. *Lehké betony a malty* [online]. 2015 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://www.mct.cz/soubor/lehke-betony-a-malty/>
- [15] Dostupné z: <http://www.transbeton.com/o-betonu/technologicky-slovník/lehke-betony>
- [16] [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/lehky-beton>
- [17] HUBERTOVÁ, michaela. TRVANLIVOST LEHKÉHO KONSTRUKČNÍHO BETONU. *BETONTKS*. Beton TKS, s. r. o., 2013, **2013**(6). ISSN 121 331 16.
- [18] [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/porovite-kamenivo>
- [19] [online]. Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/zvlastni-druhy-betonu>
- [20] [online]. [cit. 2016-01-3]. Dostupné z: <http://ireferaty.cz/306/2867/Porovite-kamenivo>
- [21] *Technická příručka stropní systém Liastrop podklady pro navrhování* [online]. 2011 Dostupné z: http://www.liastrop.cz/dokumenty/prirucka_stropy_2011.pdf

- [22] *Vliv lehkého kameniva (Liapor) na mechanické vlastnosti betonu* [online]. VŠB - Technická univerzita ostrava, fakulta stavební, 2005 [cit. 2016-01-8]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/svoc/svoc2005/prace/3_zdenka_dockalkova.pdf
- [23] [online]. [cit. 2016-01-8]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/zakladni-vlastnosti-kameniva>
- [24] [online]. [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html#umelek>
- [25] DILLI, Murat Emre, Hakan Nuri ATAHAN a Cengiz ŞENGÜL. *A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates: Lecture Notes from the 2nd ERCOFTAC Summerschool held in Stockholm, 10-16 june, 1998*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.080. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.080. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815305018>
- [26] KUCHARCZYKOVÁ, B., Z. KERŠNER, O. POSPÍCHAL, P. MISÁK a T. VYMAZAL. *Influence of freeze–thaw cycles on fracture parameters values of lightweight concrete: the origin, evolution, and impact of doi moi*. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.104. ISBN 10.1016/j.proeng.2010.03.104. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705810001050>
- [27] KUCHARCZYKOVÁ, B., Z. KERŠNER, O. POSPÍCHAL, P. MISÁK, P. DANĚK a P. SCHMID. *The porous aggregate pre-soaking in relation to the freeze–thaw resistance of lightweight aggregate concrete*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.067. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.067. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811007574>
- [28] HELA, Rudolf. Příměsi do betonu. *BETON TKS*. 2015, **2015**(2), 10.
- [29] Fly Ash Australia: What is fly ash [online]. Dostupné z: <http://www.flyashaustralia.com.au/whatisflyash.aspx>

- [30] *Popílek* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/popilek>
- [31] Svaz výrobců cementu -Publikace. Svaz výrobců cementu –Úvod [online].©2008-2012 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z:
http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf
- [32] LEDEREROVÁ, Jaroslava. Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. Časopis stavebnictví[online]. © 2008, č. 4 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-prumyslovych-odpadnich-materialu-pri-vyrobe-stavebnich-hmot_N753
- [33] GAO, Yingli a Chao ZOU. Experimental study on segregation resistance of nanoSiO₂ fly ash lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **93**, 64-69 [cit. 2016-03-04]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.102. ISSN 09500618. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815006157>
- [34] DU, Hongjian, Suhuan DU a Xuemei LIU. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2015, **82**, 114-122. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.026. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815001737>
- [35] ÖZBAY, Erdoğan, Mustafa ERDEMİR a Halil İbrahim DURMUŞ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials*. 2016, **105**, 423-434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815308254>
- [36] *Ebeton.cz: pojmy/plastifikacni-prisady* [online]. [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/plastifikacni-prisady>
- [37] *Pojmy/betonarska-ocel* [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/betonarska-ocel>

- [38] *BETON TKS* [online]. Praha 5: Libertas a.s., 2010 [cit. 2016-04-14]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2010-02.pdf
- [39] DOMAGAŁA, Lucyna. The Effect of Lightweight Aggregate Water Absorption on the Reduction of Water-cement Ratio in Fresh Concrete. *Procedia Engineering*. 2015, **108**, 206-213. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.139. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815010930>
- [40] LO, T.Y., H.Z. CUI a Z.G. LI. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete. *Waste Management*. 2004, **24**(4), 333-338. DOI: 10.1016/j.wasman.2003.06.003. ISSN 0956053x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X03001661>
- [41] ALI, Ahsan, Shahid IQBAL, Klaus HOLSCHEMACHER a Thomas A. BIER. Effect of Fibers on Bond Performance of Lightweight Reinforced Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2016, **60**(1), 97-102. DOI: 10.3311/PPci.8080. ISSN 05536626. Dostupné také z: <http://pp.bme.hu/ci/article/view/8080>
- [42] CAMPIONE, G., C. CUCCHIARA, L. LA MENDOLA a M. PAPIA. Steel–concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions. *Engineering Structures*. 2005, **27**(6), 881-890. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.01.010. ISSN 01410296. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029605000544>
- [43] GÜNEYISI, Erhan, Mehmet GESOĞLU a Süleyman İPEK. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*. 2013, **47**. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.059. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813004571>
- [44] GÜNEYISI, Erhan, Mehmet GESOĞLU a Süleyman İPEK. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*. 2013, **47**, 358-365. DOI:

- 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.059. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813004571>
- [45] KHABAZ, Amjad. *Monitoring of impact of hooked ends on mechanical behavior of steel fiber in concrete*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.142. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.142. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816304469>
- [46] AGHAEI, K., YAZDIM M. a K. TSAVDARIDIS. Mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires. Magazine of Concrete Research. ISSN 0024-9831. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1680/mac.14.00232>
- [47] CAMPIONE, G., N. MIRAGLIA a M. PAPIA. *Mechanical properties of steel fibre reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates*. DOI: 10.1007/BF02480589. ISBN 10.1007/BF02480589. Dostupné také z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF02480589>
- [48] KAYALI, O, M.N HAQUE a B ZHU. *Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete*. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00016-1. ISBN 10.1016/S0958-9465(02)00016-1. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946502000161>
- [49] LIBRE, Nicolas Ali, Mohammad SHEKARCHI, Mehrdad MAHOUTIAN a Parviz SOROUSHIAN. *Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181000588X>
- [50] VODIČKA, Jan. *Zkoušky konstrukčního vláknobetonu*. In: BETON. 2. vyd. Praha: Beton TKS, 2010, s. 43-47.
- [51] HANZLOVÁ, Hana, Vladimír VESELÝ a Jan VODIČKA. *Nové české normy pro vláknobeton*. BETON TKS. Praha 5: Beton TKS s. r. o., 2016, **2016**(2), 3-6

- [52] TOPÇU, İlker Bekir a Mehmet CANBAZ. *Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.026. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.026. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006180600153X>
- [53] VESELÝ, Vladimír, Jan VODIČKA, Jitka VAŠKOVÁ a Jiří KRÁTKÝ. Zkoušky konstrukčního vláknobetonu. *BETON TKS*. Praha 4, 2010, **2010**(2), 38-42. ISSN 12133116s
- [54] *Pemza kamení.jpg* [online]. Dostupné z: <http://finesell.ru/images/articles/pripodnie-kamni/pemza-kamenj.jpg>.
- [55] *Diatomit (křemelina)* [online]. Dostupné z: <http://fotoarchiv.geology.cz/show/photo/17414/g800.jpg>
- [56] *Speleotémy* [online]. Dostupné z: <http://audy.speleo.cz/Chimanta/obr/Sinice3.jpg>
- [56] *Keramzit* [online]. Dostupné z: <http://www.ru.all.biz/img/ru/catalog/middle/1274270.jpeg>
- [57] *Suroviny pro přípravu POP betonu Keramzit* [online]. Dostupné z: http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/fotogalerie/01_suroviny_pro_pripravu_pop_betonu/3_fluidni_popilek_800.jpg
- [58] *Suroviny pro přípravu POP betonu Keramzit* [online]. Dostupné z: http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/fotogalerie/01_suroviny_pro_pripravu_pop_betonu/1_hnedouhelny_popilek_cz_800.jpg

5 Seznam použitých norem

- [N1] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*
- [N2] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*
- [N3] ČSN EN 197-1 ed. 2. *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cement pro obecné použití*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [N4] ČSN EN 13055-1 *Pórovité kamenivo - Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty*
- [N5] ČSN EN 450-1+A1. *Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [N6] ČSN EN 934-2+A1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha: ÚNMZ
- [N7] ČSN P 73 2451 *Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu*
- [N8] ČSN EN 12350-5 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*
- [N9] ČSN EN 12350-2 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*
- [10] ČSN EN 12350 – 6. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [N12] ČSN EN 12390 – 3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušební těles*. Praha: Český normalizační institut, 2012. *betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [N13] ČSN P 73 2452 *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*
- [N14] ČSN EN 14488-3 *Zkoušení stříkaného betonu - Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*

6 Seznam příloh

- Příloha 1: Výsledné hodnoty Pevností v tahu při průhybu trámce $\delta_{L1\ 0,5\text{mm}}$, $\delta_{L1\ 3,5\text{mm}}$, při maximální dosažené síle F_{max} po 28 dnech, Pevnosti v tlaku [MPa]
- Příloha 2: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-1 25/50D1,8
- Příloha 3: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-2 25/50D1,8
- Příloha 4: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-2 25/50D1,8
- Příloha 5: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-1 30/50D1,8
- Příloha 6: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-2 30/50D1,8
- Příloha 7: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-2 25/50D1,8
- Příloha 8: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu LC1 25/60D1,8
- Příloha 9: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu vzorek LC1 30/60D1,8
- Příloha 10: Pracovní diagram lehkého betonu vzorek LC1REF D1,8
- Příloha 11: Pracovní diagram lehkého betonu směs LC1REF D1,8
- Příloha 12: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 25/50D1,8
- Příloha 13: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 30/50D1,
- Příloha 14: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 25/60D1,8
- Příloha 15: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 30/60D1,8

6.1 Seznam grafů

- Graf 1: Pevnost v tlaku vysušených vzorků po 28 a 120 dnech^[25] 14
- Graf 2: Grafické znázornění míry rozlití a stupeň segregace na množství popílku^[33] 23
- Graf 3: Grafické znázornění pevnosti v tlaku na stáří vzorků jednotlivých směsí (vlevo), závislost pevnosti v tlaku na obsahu množství použitého popílku (vpravo)^[33] 24
- Graf 4: Závislost stupně rozlití čerstvého betonu na množství nano-SiO₂..... 25
- Graf 5: Vývin hydratačního tepla a pevnost v tlaku v závislosti na množství přidané NS 26
- Graf 6: Průběh hydratační rychlosti (vlevo), celkové teplo (uprostřed) a pevnost v tlaku (vpravo)^[34] 28
- Graf 7: Pracovní diagram při namáhání tahem drátkobetonu a prostého betonu^[6] 35
- Graf 8: Průběh křivek monotónního a cyklické zatížení^[42] 37

Graf 9: výsledné pevnosti LWC, SFRC a WRFC ve stáží 28 dnů	42
Graf 10: Pracovní diagram SFRC (vlevo), pracovní diagram WRFC (vpravo).....	43
Graf 11: Průměrná objemová hmotnost čerstvého betonu	54
Graf 12: Střední hodnota pevnosti v tahu při průhybu trámce $\delta L1$ 0,5mm.....	56
Graf 13: Střední hodnota pevnosti v tahu při průhybu trámce $\delta L1$ 3,5mm.....	57
Graf 14: průměrné dosažené pevnosti v tlaku po 28 dnech.....	58

6.2 Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura lehkých betonů, (vlevo) hutný beton, (uprostřed) mezerovitý beton, ^[13] 3	
Obrázek 2: Skutečný (w/c) pro směsi s tmelící pastou a nominální (w/c), kamenivo lehké kategorie s počátečním obsahem vlhkosti (mc) a objemový podíl LWA ^[39]	8
Obrázek 3: Vztah průměrné pevnosti v tlaku lehkého betonu.....	9
Obrázek 4: Přírodní pórovité kamenivo struktur pemzy a diatomitu s elektronickým snímkem mikroskopu. ^{[54][55][56]}	10
Obrázek 5: Uměle vyráběné kamenivo spěkaný agloporit a expandovaný perlit ^{[57][58]}	11
Obrázek 6: rozdílná porézní struktura zrna Liaporu, (zleva) kamenivo EC1, (zprava) kamenivo EC2, snímek elektronického mikroskopu ^[25]	13
Obrázek 7: Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku (vlevo), průměrné hodnoty	18
Obrázek 8: Detailní snímek elektronického mikroskopu, nepravidelné zrno fluidního popílku (vlevo), zrno klasického popílku (vpravo) ^{[57][58]}	20
Obrázek 9: snížení míry segregace s rostoucím množstvím popílku ^[33]	23
Obrázek 10: Vliv míry segregace a plavení kameniva s různým obsahem NS	26
Obrázek 11: Vliv charakteru dispergace cementu ve vodě na kompaktnost ztvrdlého tmele ^[7]	30
Obrázek 12: různé druhy vláken do betonu	32
Obrázek 13: Vztah mezi pevností v tlaku a objemový poměr ocelového vlákna (vlevo) chování lehkého betonu při pevnosti v tahu ohybem (vpravo) ^[43]	38
Obrázek 14: Vývoj pevností zahnutého a přímého vlákna při zapuštění 0,1L (vlevo) a 0,5L (vpravo) ^[45]	41
Obrázek 15: Uspořádání zkoušky ohybem podle ČSN P 73 2452 ^[N13]	46

Obrázek 16: Charakteristický diagram odolnosti vláknobetonu podle ČSN P 73 2452 ^[N13] ..	47
Obrázek 17: Ocelová vlákna KrampeHarex délky 50 a 60 mm, se zahnutými konci	50
Obrázek 18 Vyhodnocení zkoušky sednutím	54
Obrázek 19: uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu pro normalizovaný trámec.....	56

6.3 Seznam tabulek

Tabulka 1: Třída objemových hmotností lehkých betonů	4
Tabulka 2: Pevnostní třídy lehkých betonů dle ČSN EN 206-1 ^[N1]	5
Tabulka 3: Fyzikálně mechanické charakteristiky frakcí kameniva Liaporu.....	12
Tabulka 4: Nasákavost Liaporu.....	15
Tabulka 5: Výsledné pevnosti v tlaku po 7, 28 a 90 dnech ^[40]	16
Tabulka 6: Chemické složení popílku a portlandského cementu	22
Tabulka 7: Přehled fyzikálních a mechanických vlastností jednotlivých vláken ^[4]	32
Tabulka 8: Průměrná pevnost WFRC, SFRC, LWC vzorků v kg/cm ²	43
Tabulka 9: Porovnání jednotlivých zkoušek	48
Tabulka 10: Vybrané vlastnosti CEM 42,5R.....	49
Tabulka 11: Vybrané vlastnosti kameniva Liapor.....	50
Tabulka 12: složky jednotlivých směsí pro pevnostní třídu LC 35/38.....	52
Tabulka 13: složky jednotlivých směsí pro pevnostní třídu LC 45/50.....	53

6.4 Seznam použitých zkratk

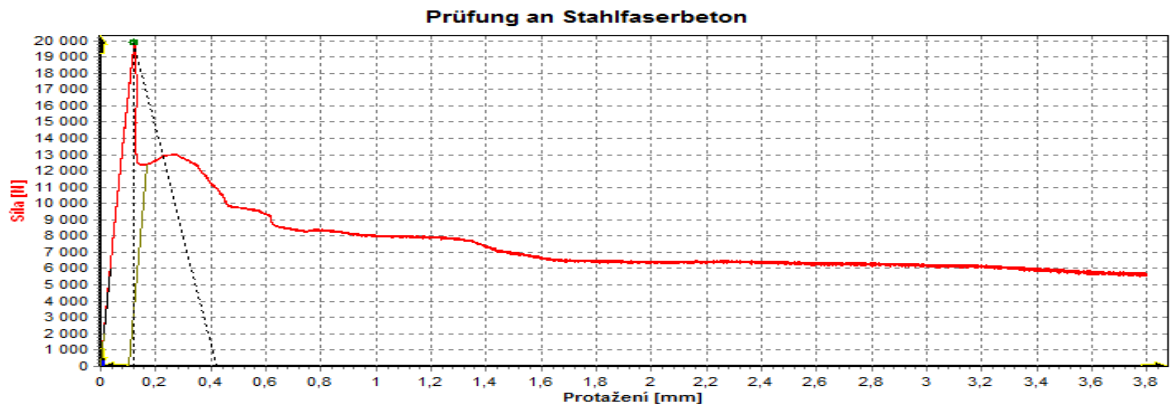
LWC	lehký beton
SRFC	vláknobeton vyztužený ocelovými vlákny
WRFC	vláknobeton s ocelovými recyklovanými vlákny
NS	nanosilika

Přílohy

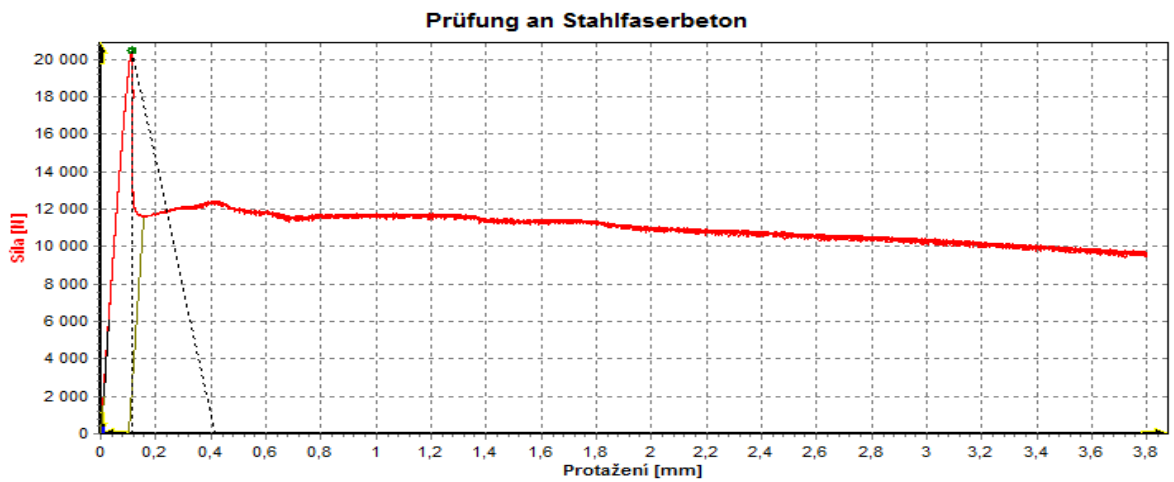
Příloha 1: Výsledné hodnoty Pevností v tahu při průhybu trámce $\delta_{L1\ 0,5mm}$, $\delta_{L1\ 3,5mm}$, při maximální dosažené síle F_{max} po 28 dnech, Pevnosti v tlaku [MPa]

Receptura	pevnost v tahu při průhybu	pevnost v tahu při průhybu	maximální dosažená síla	pevnost v tlaku	Receptura	pevnost v tahu při průhybu	pevnost v tahu při průhybu	maximální dosažená síla	Tlak
	trámce δ_{L1}	trámce δ_{L1}				trámce δ_{L1}	trámce δ_{L1}		
	0,5mm	3,5mm				0,5mm	3,5mm		
	[MPa]	[MPa]	[KN]	[MPa]		[MPa]	[MPa]	[KN]	[MPa]
LC1 35/38 D1,8 25/50	1,7	1,1	19 923	34,7	LC2 45/50 D1,8 25/50	2,24	0,9	24 401	51,0
	2,1	1,8	20 479	40,4		3,03	2,18	30 870	49,5
	1,8	1,2	18 498	40,9		/	/	/	/
LC1 35/38 D1,8 30/50	2,7	1,7	19 994	44,4	LC2 45/50 D1,8 30/50	4,4	4,4	30 021	51,7
	2,7	1,4	20 587	42,2		4,6	4,6	28 679	52,5
	1,9	1,2	19 352	43,7		2,4	2,4	25 438	55,4
LC1 35/38 D1,8 25/60	4,2	3,3	22 864	49,9	LC2 45/50 D1,8 25/60	3,6	3,6	22 442	52,2
	4,5	2,6	25 665	50,2		2,5	2,6	14 555	50,1
	3,1	1,7	24 102	51,0		2,4	2,4	18 890	52,5
LC1 35/38 D1,8 30/60	3,1	1,9	28 335	49,0	LC2 45/50 D1,8 30/60	3,2	3,2	18 790	51,5
	4,2	3,1	25 513	49,0		4,2	4,2	24 576	78,4
	4,7	2,5	25 120	52,0		4,2	4,2	24 041	53,9
LC1 REF	/	/	18 905	43,8	LC2 REF	/	/	18 787	45,15
	/	/	18 257	46,7		/	/	17 601	46,2
	/	/	18 905	47,8		/	/	17 781	48,0

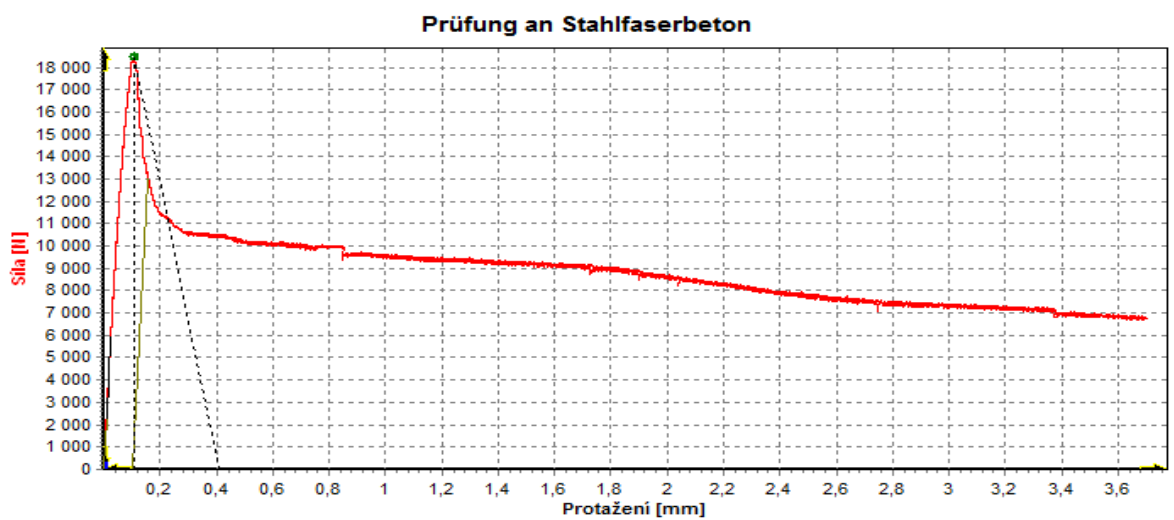
Výsledné hodnoty měření pevnosti v tahu za ohybu



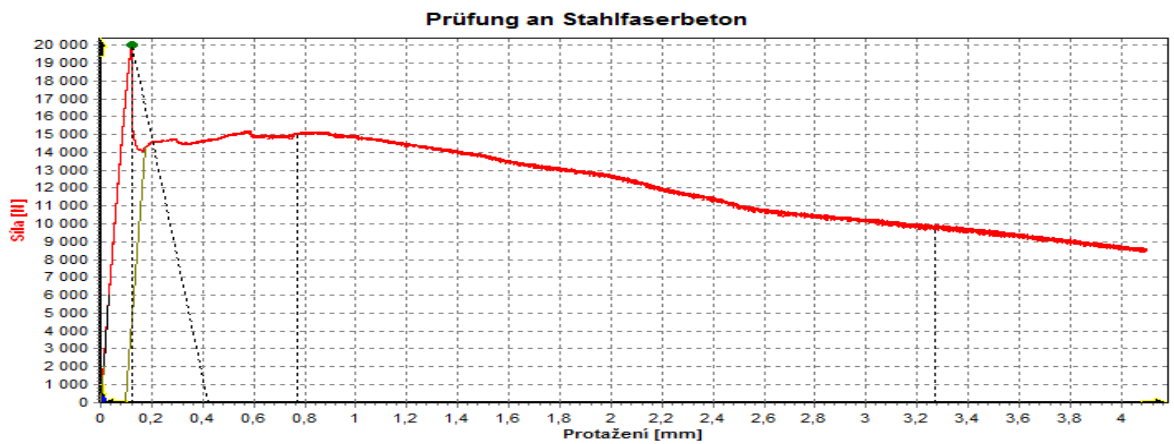
Příloha 2: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LCI-1 25/50D1,8



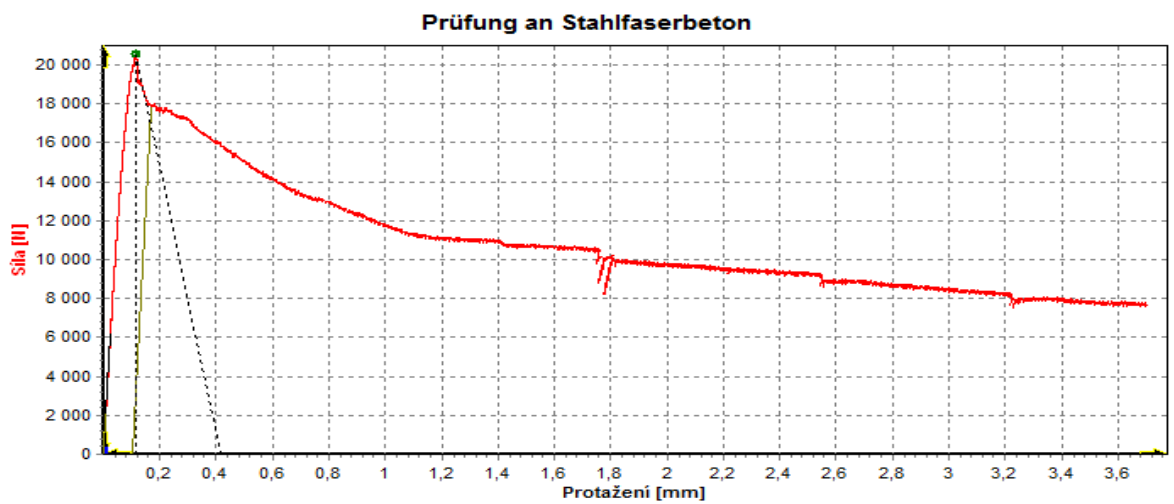
Příloha 3: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LCI-2 25/50D1,8



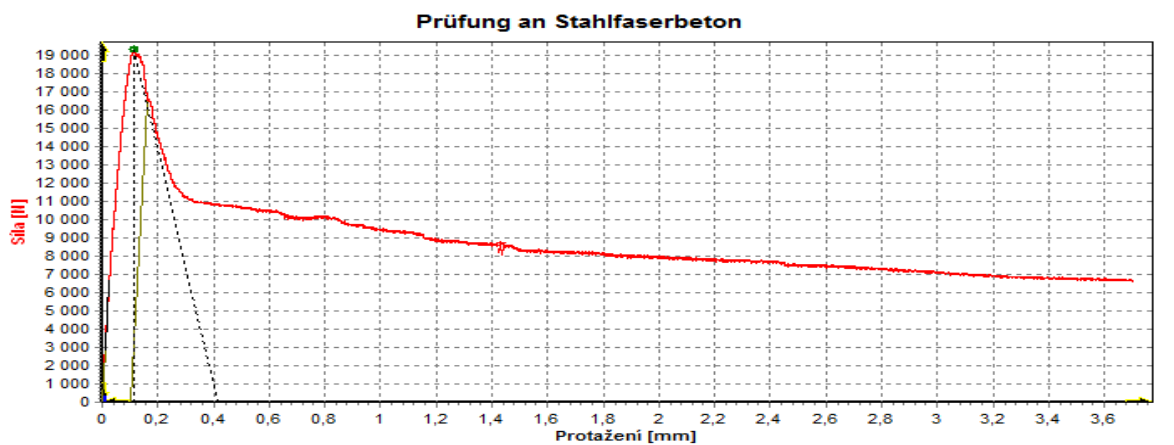
Příloha 4: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LCI-2 25/50D1,8



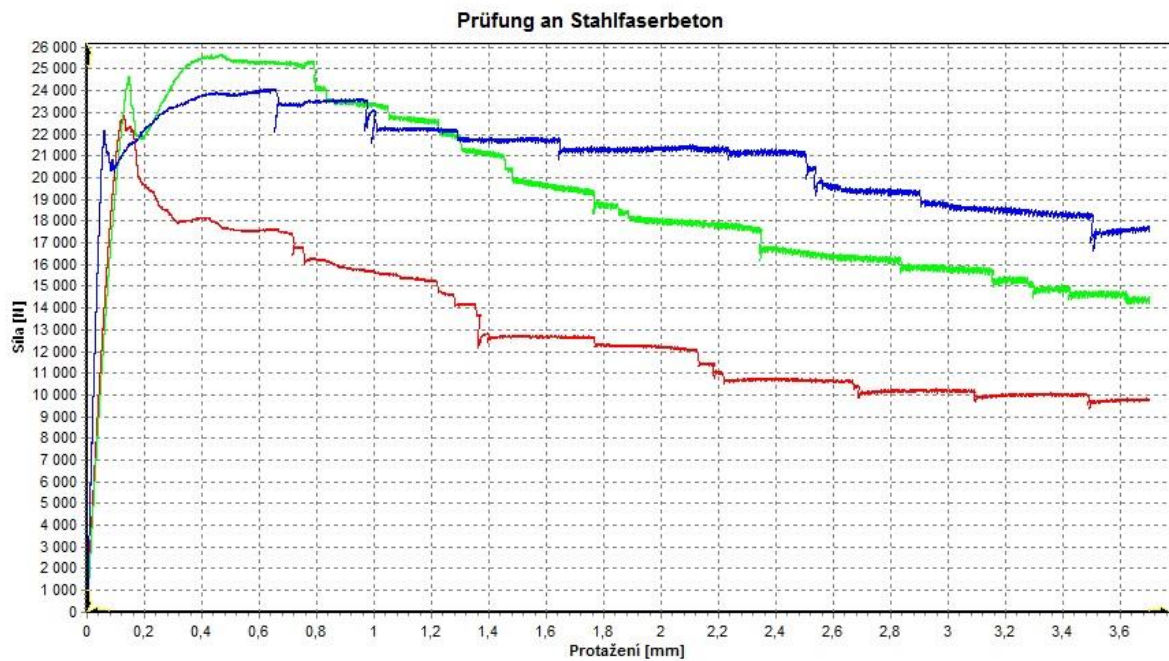
Příloha 5: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-1 30/50D1,8



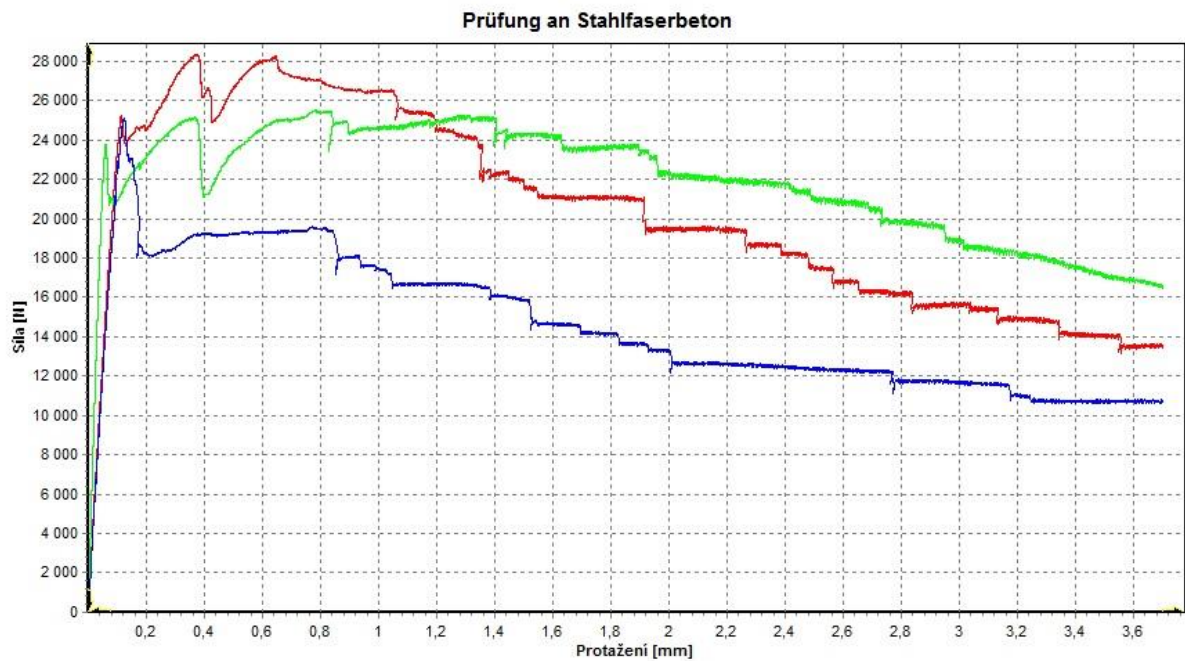
Příloha 6: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-2 30/50D1,8



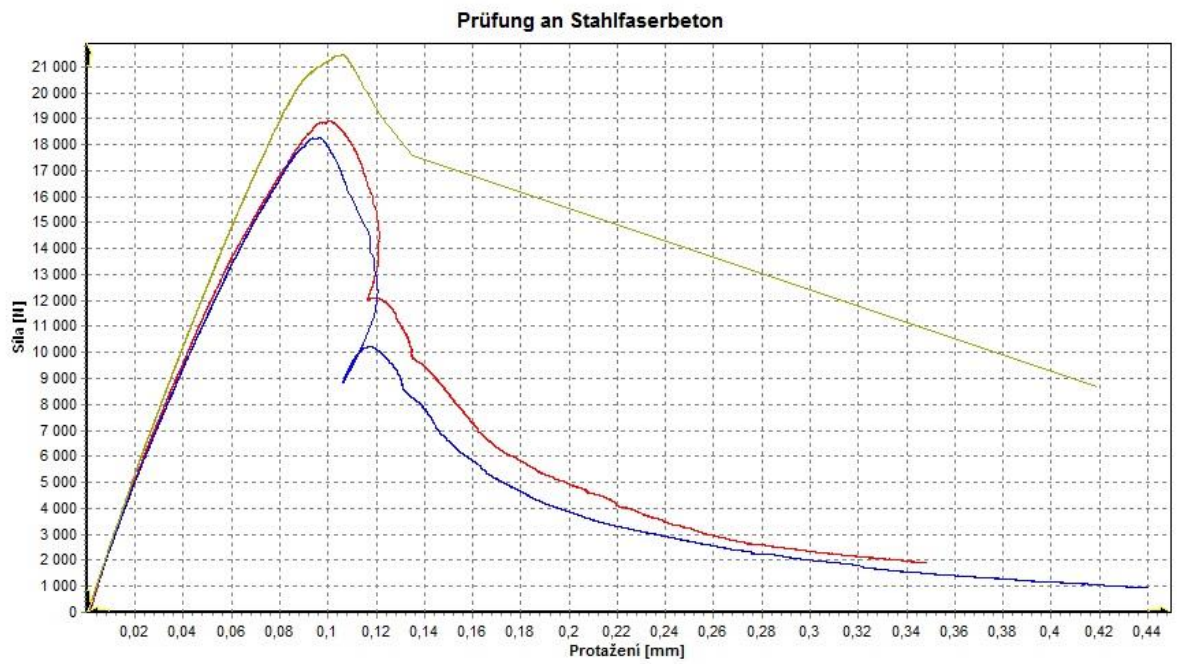
Příloha 7: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs/vzorek LC1-2 25/50D1,8



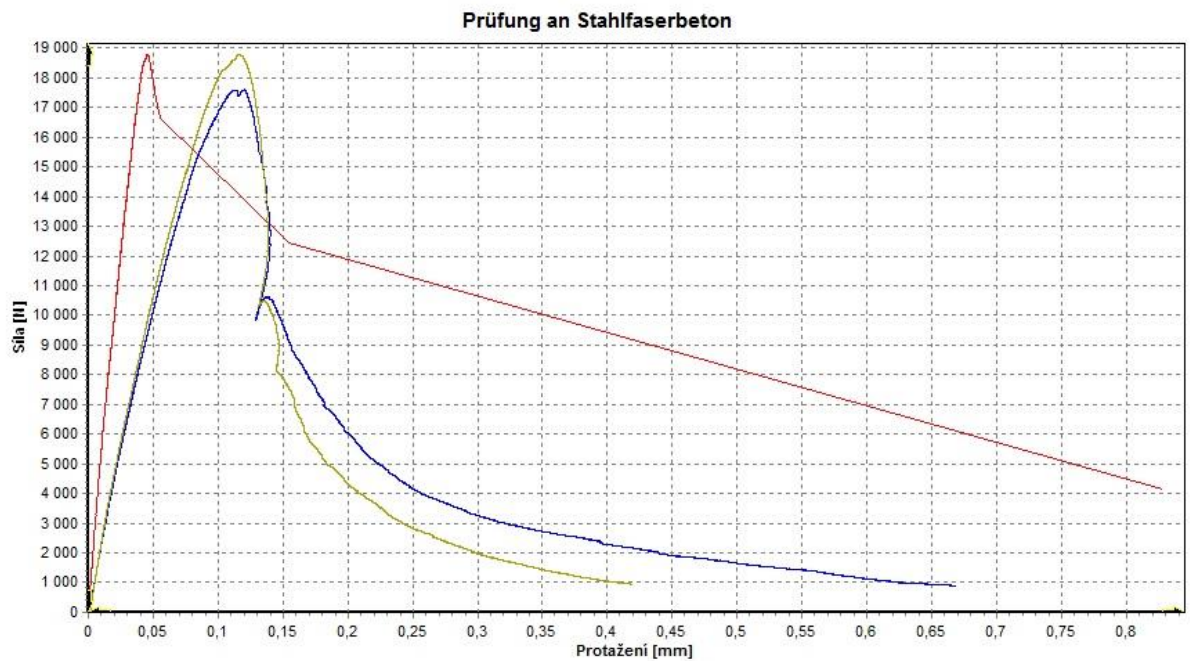
Příloha 8: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu LCI 25/60D1,8



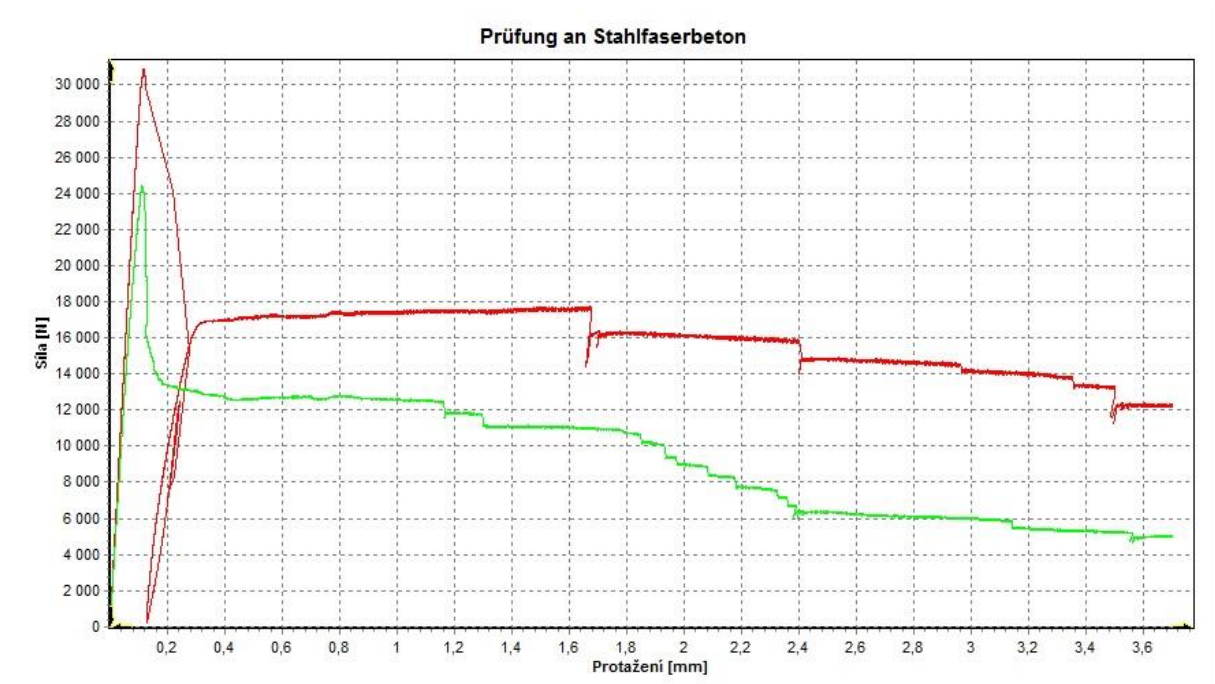
Příloha 9: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu vzorek LCI 30/60D1,8



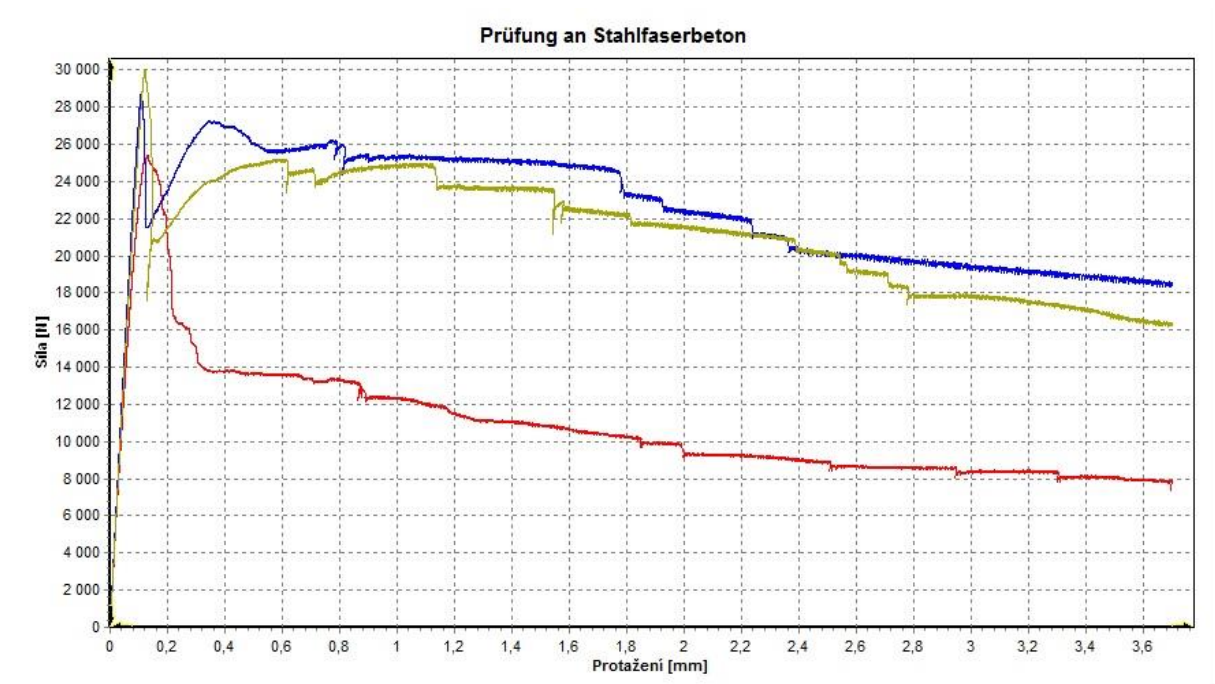
Příloha 10: Pracovní diagram lehkého betonu vzorek LC1REF D1,8



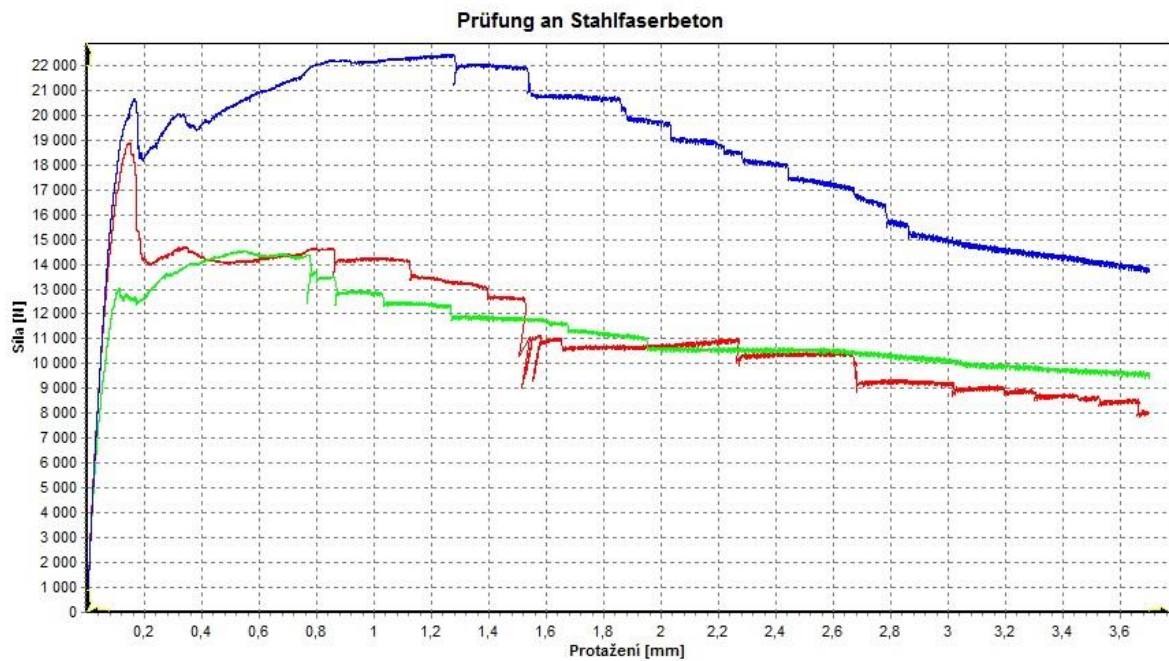
Příloha 11: Pracovní diagram lehkého betonu směs LC1REF D1,8



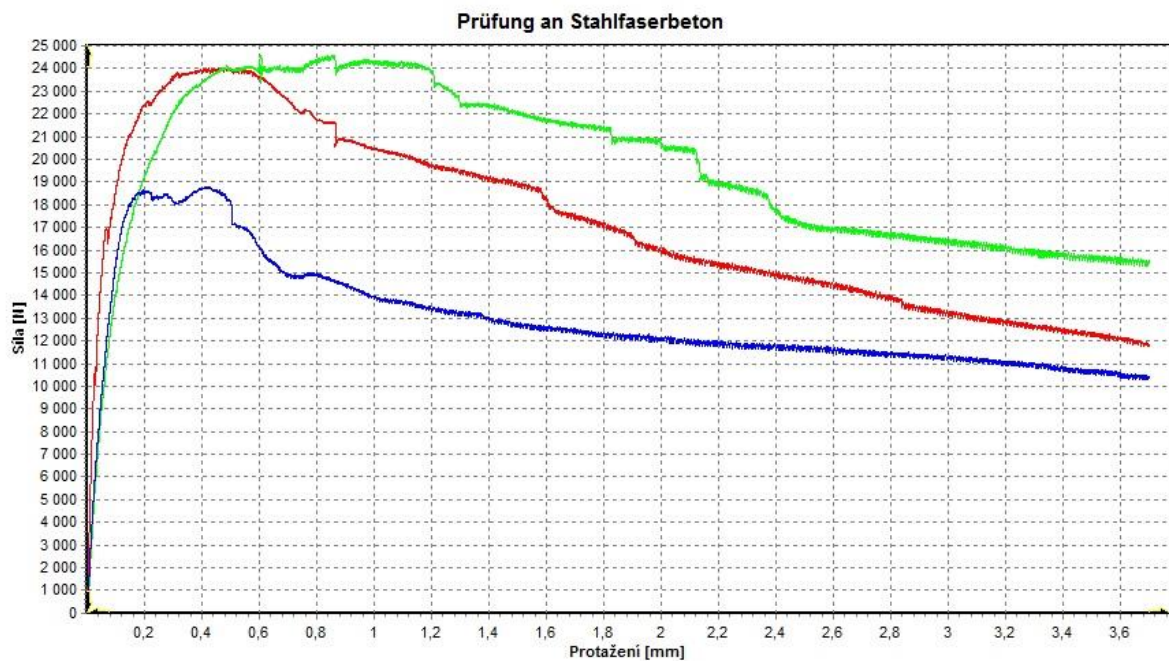
Príloha 12: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 25/50D1,8



Príloha 13: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 30/50D1,



Príloha 14: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 25/60D1,8



Príloha 15: Pracovní diagram lehkého vláknobetonu směs LC2 45/50 30/60D1,8