

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra mechaniky K132



**Lehčené bloky na bázi recyklovaného betonu**  
**Lightweight blocks based on recycled concrete**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

**Bc. Vít Růžička**



## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

#### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Růžička</u>	Jméno: <u>Vít</u>	Osobní číslo: _____
Zadávací katedra: <u>K132 - katedra mechaniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

#### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Lehčené bloky na bázi recyklovaného betonu

Název diplomové práce anglicky: Lightweight blocks based on recycled concrete

Pokyny pro vypracování:

Vypracování řešerše současného stavu problematiky.  
Návrh směsí s využitím recyklovaného betonu.  
Stanovení rozlívových vlastností.  
Stanovení makromechanických vlastností pomocí destruktivních a nedestruktivních metod.

Seznam doporučené literatury:  
databáze WOS a SCOPUS

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 20.2.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucího práce

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

#### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

20.2.17 Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta(ky)

# SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Vít Růžička

Název diplomové práce: Lehčené bloky na bázi recyklovaného betonu

Základní část: Mechanika podíl: 75 %

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Návrh směsi. Nedestruktivní testování. Stanovení základních fyzikálních parametrů.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Podpis vedoucího DP: \_\_\_\_\_

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: Betonové konstrukce podíl: 25 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Josef Fládr, Ph.D., Katedra betonových a zděných konstrukcí

Formulace úkolů: Destruktivní stanovení makromechanických parametrů.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Podpis konzultanta: \_\_\_\_\_

### **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Ing. Pavla Tesárka, Ph.D. a s konzultantem Ing. Josefem Fládrem, Ph.D. z katedry betonových a zděných konstrukcí. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 20. 5. 2017

*Vít Růžička*

.....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady. Dále bych rád poděkoval Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. z Katedry betonových a zděných konstrukcí jako konzultantovi za dohled a odbornou pomoc při provádění destruktivního testování.

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá porovnáním vlastností pěnobetonu (cementového kompozitu vylehčeného pěnотvornou přísadou) s recyklátem. Vlastnosti pěnobetonu byly zkoumány po dobu 28 dní nedestruktivními metodami. Zjištění hodnot dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku bylo provedeno rezonanční metodou. Po 28 dnech jsem ověřil hodnoty dynamického modulu pružnosti pomocí ultrazvukové metody. V průběhu testování byly dále zjištěny termofyzikální vlastnosti – součinitel tepelné vodivosti, měrná objemová tepelná kapacita a tepelná difuzivita a rovněž bylo měřeno podélné smrštění. Po 28 dnech od vylití byly na vzorcích provedeny destruktivní zkoušky a zjištěna pevnost v tlaku a pevnost v tlaku za ohybu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Recyklovaný beton, cementová malta, destruktivní a nedestruktivní zkoušky, mechanické a termofyzikální vlastnosti, pěnobeton, lehčený beton, pěnотvorná přísada, cement, objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu.

## **ABSTRACT**

Thesis discusses the possibility of comparison the properties of foamconcrete (cementitious composite modified by two foaming agents) with recycled concrete. Properties of foamconcrete were investigated for 28 days using non-destructive methods. Testing was performed by resonance method for examined dynamic modulus of elasticity and shear modulus. After 28 day from demoulding was dynamic modulus of elasticity examined by an ultrasonic impulsive method. Thus there were measured thermophysical properties as thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat and longitudinal drying shrinkage was measured also. Destructive test was carried out on samples after 28 day from demoulding and compressive strength and bending strength were investigated.

## **KEY WORDS**

Recycled concrete, cement mortar, destructive and non-destructive testing, mechanical and thermophysical properties, foamed concrete, lightweight concrete, foaming agent, cement, bulk density, compressive strength, bending strength.

1	Úvod	8
2	Přehled současného stavu problematiky	10
2.1	Lehčené betony	14
2.2	Normy na výrobu pěnobetonu	18
2.3	Pěnobeton	19
2.4	Výroba pěnobetonu	22
2.4.1	Metody výroby pěnobetonu	26
2.4.2	Pěna	27
2.4.3	Pěnobeton	29
2.5	Klasifikace zpracovatelnosti pěnobetonu	30
2.5.1	Marsh cone test	30
2.5.2	Stanovení rozlivu směsi – modifikované	31
2.6	Vodní součinitel (v/c)	33
2.7	Všeobecné předpoklady	33
2.8	Předpokládaná pevnost pěnobetonové matrice v tlaku	34
2.9	Základní termofyzikální vlastnosti	34
2.10	Výroba pěny v pěnogenerátorech	37
2.11	Výroba pěny a zjištění vlastností	39
2.12	Ošetření pěnobetonu	40
3	Praktická část	41
3.1	Použité materiály a návrh složení směsi	41
3.2	Zpracovatelnost směsi (zkouška rozlitím)	42
3.3	Měření fyzikálních vlastností matric	45
3.4	Objemová hmotnost	46
3.5	Smrštění vzorků	48
3.6	Zjištění dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou	49
3.7	Zjištění dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou	55
3.8	Měření termofyzikálních vlastností	59
3.9	Pevnost v tahu za ohybu	62
3.10	Pevnost v tlaku	66
4	Závěr	69
5	Citovaná literatura	70
6	Seznam obrázků	79
7	Seznam tabulek	81

# 1 Úvod

Již mnoho let se společnost zabývá recyklací stavebních materiálů. V ČR byla za tímto účelem ustavena Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů, jehož členové ať už právnické či fyzické osoby se věnují recyklaci, pořádají schůze a vydávají svůj věstník, ve kterém publikují jak články z praxe, tak i od odborné veřejnosti, např. pracovníků ČVUT, VUT a dalších zabývajících se touto tematikou.

Na základě environmentálního aspektu probíhají jednání o nakládání a využití recyklátů s jejich následným druhotným využitím. Uvádím citaci ze sborníku přednášek 21. ročníku konference Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice (str. 25–29) nazvaného Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Od roku 2024 dle nařízení EU bude zakázáno skládkování všech odpadů. Recyklát ze stavebně demoličního odpadu se může stát velmi dobře ceněnou surovinou pro stavební trh, ale musí mít odpovídající kvalitu. Na tuto problematiku je třeba se zaměřit již dnes a nehlédět jen na kvantitu, ale hlavně na kvalitu, protože jen v ČR jde o 3 500 000 tun stavebního odpadu ročně [1].

V Evropské unii byl Evropskou komisí přijat v rámci Rámcového programu pro výzkum a inovace program na řešení inertních odpadů v rámci dotačních programů HORIZON 2020. Jedná se o celoevropský program, zaměřený na inertní stavební odpady s celkovým objemem dotací 150 mil. € v rámci celé EU. Hlavní požadavek Evropské komise v rámci tohoto programu je na oběhové hospodářství i ve stavebnictví. Inertní odpady se nebudou ukládat na skládkách, ale zpět využívat pro stavební účely [1].

Ve světle dnešních událostí je recyklace důležitá i z toho důvodu, že v době ekonomické nestability vzrostla vlna válečných konfliktů či teroristických útoků, při kterém jsou kromě ztrát na životech i ztráty v podobě zničené infrastruktury. Navíc ve státech, ve kterých jsou stavební materiály, či jejich přeprava na větší vzdálenosti finančně náročná.

Stavební odpady jsou nadále produkovány ve velkých objemech i kvůli ekonomickým modelům, při kterých musí ekonomika růst. Vyspělé státy tudíž stále produkují a skládkují velké množství betonového odpadu, který bude muset být recyklován a znovu využíván.

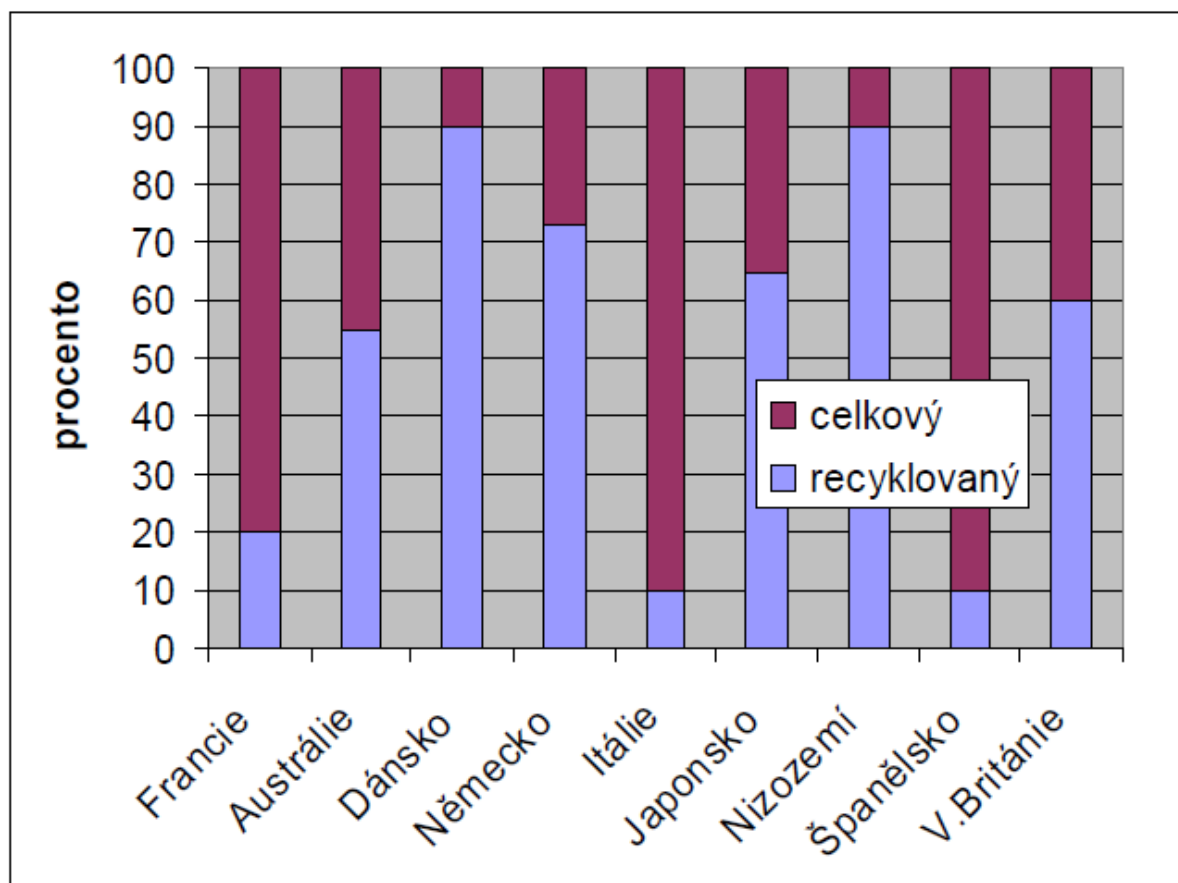
Motivací k napsání této diplomové práce je snaha zhodnotit směsi pěnobetonu tvořené poze vodou, cementem, pěnotvornou přísadou a jemně namletým betonovým prachem. V práci jsem pak zjišťoval a porovnával vliv přidaného jemně namletého betonového prachu na pevnosti v tlaku, pevnosti v tlaku za ohybu a termofyzikální vlastnosti vlastnosti vzorků vyrobených z takového pěnobetonu.



Téma bylo vybráno i s ohledem na fakt, že recyklace stavebních materiálů a hlavně způsob jejich zpětného využití bude v dohledné době nedílnou součástí práce stavebních inženýrů a obdobných profesí zabývajících se stavebními materiály. V dnešní době je také nutno brát zřetel na efektivní, cenově dostupné materiály s co nejnižším teplotním součinitelem a přijatelnou pevností v tlaku např. k výstavbě rodinných domů. Zde se právě nabízí využití lehčených betonů. V práci jsem rovněž uvedl srovnání autoklávovaných betonů s pěnobetonem. Autoklávovaný beton je vhodný pro masovou výrobu s velkým důrazem na kvalitu. Výroba pěnobetonu je levnější, protože použité suroviny jsou dobře dostupné a není nutno spotřebovat tolik energie (výroba bez použití autoklávu).

## 2 Přehled současného stavu problematiky

Vyspělé zahraniční země a celkově společnost se začaly zabývat výzkumem v oblasti využití druhotných surovin již kolem 70–tých let minulého století. Podíl recyklovaného betonu v některých zemích ukazuje Obr. 1. Recyklací stavebních materiálů se intenzivně zabývají Japonsko, Indie a Čína.



**Obr. 1 – Podíl recyklovaného betonu na celkovém betonovém odpadu [2].**

Stavební průmysl každý rok vyprodukuje od 3 do 10 miliard tun stavebního materiálu. Na výrobu betonu se používá příliš velké množství přírodních zdrojů. Každoročně se vytěží 15 miliard tun kameniva, což má negativní vliv na životní prostředí. Z toho až 42 % kameniva je použito v betonářství. Pouze 8 % je později dále recyklováno. Např. demoliční odpad v Evropské unii činí 12–21 %. Dále bych rád zdůraznil, že při výrobě cementu se emituje 5–7 % veškerých emisí CO<sub>2</sub>. Např. při výrobě slínku se uvolňuje 0,85 kg CO<sub>2</sub> na 1 kg slínku [3]. Z důvodu vyšší finanční náročnosti při zpracování demoličního odpadu se recyklovaný odpad, především betonový recyklát v Evropě moc nepoužívá. Popis zpracování demoličního

odpadu zobrazuje obrázek (Obr. 2). K nedobrému stavu při používání recyklátu přispívá rovněž absence norem a předpisů pro navrhování konstrukcí z recyklovaného materiálu.

Vyšší finanční náročnost, které platí v současné době v Evropě nemusí platit v jiných částech světa. (např. Egypt, Sýrie atd.). V těchto zemích může být problematické zajištění dostatku potřebných surovin (cement, písek, kamenivo atd.) finančně i technicky. Využití recyklátu může být jedinou „správnou“ cestou.

Recyklace materiálu se tedy jeví jako nejlepší možné řešení i když je nutno brát v potaz celkovou nehomogenitu recyklátu a s tím spojené problematické zajištění kvality výsledných matric. Pokud nebude recyklát správně roztříděn – bude obsahovat stopy např. přírodních materiálů, tak logicky nemůžeme očekávat kvalitní výstupy. Vlastnosti recyklátu záleží i na objemové hmotnosti použitého materiálu. Nasákavost a stáří recyklovaného betonu také mění výsledné fyzikální vlastnosti. Pokud je použit recyklát např. z vysokopevnostního betonu s menším vodním součinitelem a přidány mikrosilika, tak výsledná směs tohoto recyklátu bude méně porézní [4].

### **Recyklované kamenivo**

Recyklované kamenivo je vyráběno v recyklačních linkách (Obr. 3) z demoličního odpadu. Recyklované kamenivo se však běžně v nosných betonových konstrukcích nepoužívá. Českou normou ČSN EN 206 je recyklované kamenivo definováno jako kamenivo typu A, které musí obsahovat minimálně 90 % hmotnosti drceného betonu a maximálně 10 % hmotnosti ostatních složek jako jsou cihly, malta, omítka a další. Minimální objemová hmotnost kameniva v suchém stavu je  $2100 \text{ kg/m}^3$  [5].

Při výrobě v recyklačních linkách ulpívá na filtrech betonový prach, který je brán jako zbytkový odpad a jako takový není dále používán. Tlak na omezení výroby skleníkových plynů a obecně ekonomickou udržitelnost v podobě nařízení o zakázání skládkování od EU nás tedy nutí zamyslet se a hledat využití i pro tento zbytkový odpad z recyklace betonu.



Obr. 2 – Cyklus recyklace [2].



Obr. 3 – Stacionární recyklační linka [6]

## Betonový prach a jeho využití

Druhotná surovina v podobě jemně mletého betonového prachu vzniká zpracováním betonového inertního odpadu na *kamenivo* a *odprašky*. *Odprašky* (betonový prach) se následně hromadí jako odpad. Jedná se o velmi jemné částice zachycené při zpracování stavebního odpadu na filtrech zamezujících prašnosti produkčních linek. V podstatě se jedná o samotný drcený beton s různou velikostí zrn v rozmezí 0,0005 – 0,1 mm, resp. zrnitost 0 až 0,0128 mm. Avšak právě ostrohranost a proměnlivá velikost zrn komplikuje další zpracování této druhotné suroviny. Materiál lze dále zpracovat vysokorychlostním mletím. Jemnost takto upravené betonové moučky odpovídá jemnosti mletí cementu. Mikromletím docílíme odhalení nezhydratovaných cementových zrn [7].

Z betonového prachu, dosud nevyužívaného a braného jako nepotřebný odpad vytvoříme materiál, který bude moci částečně hydratovat. Ústřední myšlenka využití jemně mletého betonového prachu získaného z recyklátu vychází z předpokladu, že až 10 % cementových zrn v betonu nezhydratovalo (Plachý, 2016). Získáme surovinu lepších mechanických a chemických vlastností (sjednocení jemnosti, zvětšení měrného povrchu, dokonalá homogenizace směsi).

Dle údajů z odborných článků [8], [9], [10] bylo zjištěno, že pro výrobu cementového tmele tvořenou směsí klasického portlandského cementu (70%) a recyklovaného betonového prachu (30%) dosahoval tmel nejlepších výsledků z hlediska pevnosti v tlaku a lze jej srovnat s cementovým tmelem bez recyklátu.

Materiál má funkci jemného aktivního plniva a částečné náhrady pojiva, proto odpadá nutnost použití chemických přísad při zachování požadovaných funkčních vlastností [7].

S jistým zjednodušením si dovolím tvrdit, že mikromletý materiál může v betonu nahrazovat chybějící složku písku, protože jistou podobnost vidíme v objemové hmotnosti i velikosti zrn (0,06 mm), kde samozřejmě závisí na typu písku (kopaný, říční apod). Výhodou betonového prachu je i velký měrný povrch až  $400 \pm 15 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

### Speciální recyklační linky pro betonový prach

V praxi existují dva typy speciálních recyklačních linek pro zpracování betonu v podobě betonové drtě i betonových odprašků na betonový prach – **stacionární** a **mobilní**. Hlavní částí těchto strojů je vysokorychlostní mlýn, který je vybaven patentovanými břity s možností nastavení různého stupně jemnosti mletí.

**Stacionární** linka je vhodná do haly a vnitřního provozu na stálém pracovišti, ale její nevýhodou je nutnost dopravy energií a surovin, včetně problému s menší kvalitou třídění demoličního odpadu. Současné linky jsou konstruované pro práci za standardních teplotních podmínek v Evropě. V případě použití v jiných částech světa bude nutné upravit kalibraci pro místní teplotní podmínky.

**Mobilní** linka je snadno transportovatelná na místo použití a lze ji snadno uvést do provozu přímo na místě stavby. Linku lze převážet v boxech či kontejnerech. Ideálním řešením pro mobilní použití je instalace kompletní linky do standardního 40stopého (12,2m) kontejneru s otevřenou horní částí [11].

## 2.1 Lehčené betony

Lehčené betony můžeme dělit do tří základních skupin:

– první skupinu tvoří **betony mezerovité**, kdy jsou zrna kameniva spojena cementovým tmelem v bodě dotyku a mají tudíž hrubší frakci (8–64 mm) hutného či pórovitého kameniva a menší množství cementového tmelu.

– druhá skupina jsou **betony nepřímo lehčené** kde je plnivem pórovité kamenivo ať už přírodní (tufy, tufity, láva, pemza) či umělé (keramzit).

– třetí skupina jsou **betony přímo lehčené (pórobetony)**, kde jsou póry přímo ve hmotě a tím dochází ke snížení objemové hmotnosti, jejímu vylehčení. Porobetony můžeme dále dělit na **mikroporovité** a **makroporovité**. Nejpoužívanější makroporovité přímo lehčené betony jsou **pěnobeton** a **autoklávovaný beton (plynobeton)** [12].

V další části této diplomové práce se budu zabývat pouze přímo lehčenými betony s důrazem na pěnobeton.

### Autoklávovaný beton

Autoklávovaný beton tvoří směs jemně rozemletého křemenného písku, vápna, cementu, přísad a vody. Směs se naleje do odlévacích forem. Reakcí hliníku v alkalickém prostředí vzniká ve směsi vodík, který směs nakypří a vytvoří v ní velké množství malých pórů. Po zatuhnutí se vyjme z formy surový pórobetonový blok, který se krájí na kráječky pomocí tenkých drátů na výrobky požadovaných rozměrů (vysoká rozměrová přesnost, velká variabilita rozměrů). Nakrájené bloky poté postupují do autoklávů, kde se parou vytvrzují [13].

## **Pěnobeton**

Pěnobeton tvoří směs cementového tmele (cement s vodou) a pěny (pěnotvorná přísada, stabilizační přísada s vodou). Dále mohou být do směsi přidávány plastifikátory, písek, popílek, a to z důvodu snížení objemu cementu, snížení hydratačního tepla a lepší zpracovatelnosti. Pěnobeton obsahuje okolo 300–350 kg/m<sup>3</sup> cementu portlandského nebo portlandského směsného a 70–90 kg/m<sup>3</sup> pěny. Objemová hmotnost klasického lehčeného betonu se pohybuje kolem 500–1600 kg/m<sup>3</sup>.

### **Srovnání pěnobetonu s autoklávovanými betony**

V porovnání s autoklávovanými betony je cena linky na pěnobeton o stejné výrobní škále třetinová až desetinová. Investice do výrobní linky na pěnobeton se pohybuje od 1 000 000 – 18 000 000 Kč. Linka na výrobu pěnobetonu nevyžaduje výrobu stlačeného vzduchu, čímž odpadá potřeba instalace nákladného technologického zařízení. Při výrobě lze vyrábět různé pěnobetony z hlediska objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku (např. ultralehké produkty objemové hmotnosti 200–400 kg/m<sup>3</sup>). V případě nutnosti navýšení kapacity produkce jsou náklady na pěnobetonovou linku ve výši 1/20 nákladů autoklávové linky. Linka na pěnobeton, může být navíc mobilní. Zařízení k mechanickému suchému řezání pěnobetonu je levnější o polovinu než u technologie využívané na výrobu autoklávovaného betonu. Linka na výrobu pěnobetonu je schopná vyrobit od 20 do 80 m<sup>3</sup> za den, autoklávová linka je výkonnější a je schopna vyrobit 160 až 1500 m<sup>3</sup> za den. Na uskladnění pěnobetonu je potřeba mnohem více místa, protože je potřeba minimálně 14 dní (pokud bude ošetřován) než dosáhne požadované pevnosti v tlaku a nesmí se ukládat na sebe (obvykle v balících 1×1×1 m). Narozdíl od pěnobetonu lze autoklávované bloky uskladnit na sebe a hned po autoklávování dosáhnou požadovaných pevností [14]. Ceny jednotlivých surovin používaných k výrobě pěnobetonu jsou uvedené v následujících tabulkách (Tabulka 1, Tabulka 2, Tabulka 3).

**Tabulka 1 – Cena pěnobetonu, objemová hmotnost – 400 kg/m<sup>3</sup> [15].**

Materiály	hmotnost [kg]	cena za tunu [juan/t]	celkem [juan]	cena [Kč]
cement	231	350	81	295
písek	115	60	9	34
pěnotvorná přísada	1	13	13	47
urychlující přísada	4,6	4	18	67
práce a další náklady	-	-	20	73
ostatní	-	-	5	18
<b>celkem</b>			<b>146</b>	<b>534</b>

**Tabulka 2 – Cena pěnobetonu [16].**

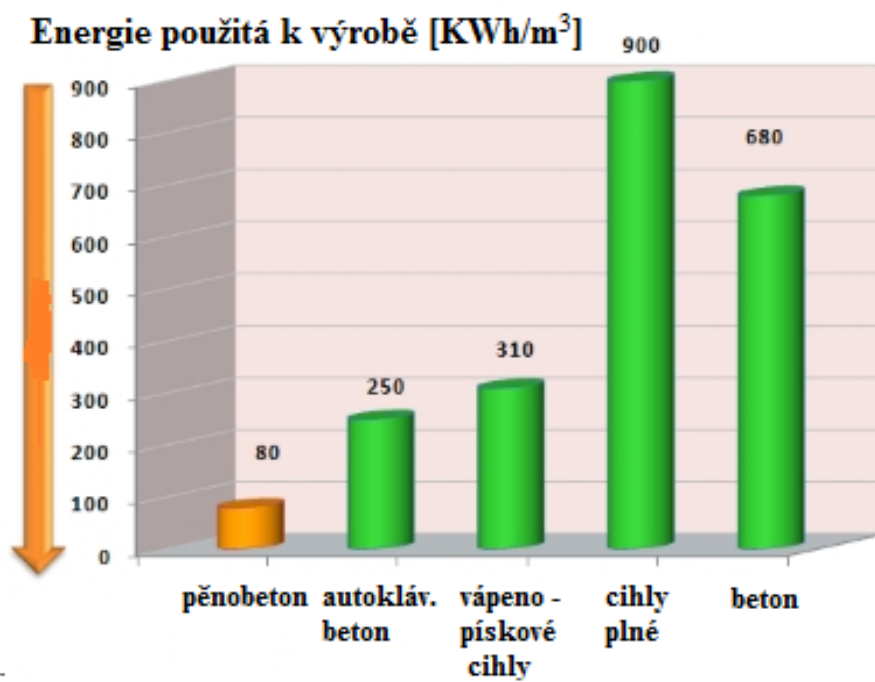
Materiály	hmotnost [kg]	cena za kg [rupie/kg]	celkem [rupie]	cena [Kč]
cement	250	6	1500	577
popílek	1000	1,5	1500	577
pěnotvorná přísada	1,2	200	240	92
práce a další náklady	-	-	400	154
ostatní	-	-	250	96
<b>celkem</b>			<b>3890</b>	<b>1496</b>

**Tabulka 3 – Cena pěnobetonu za 1 m<sup>3</sup> [17].**

Materiál	rozměry [d x š x v]	cena za kus [Kč]	cena za 1 m <sup>3</sup> [Kč]
tvárnice plná	600×300×150 mm	58	2148

Cena pěnobetonu se v ČR pohybuje od 2.000 Kč do 3.000 Kč za 1 m<sup>3</sup> v závislosti na objemové hmotnosti [18]. Z hlediska energetické náročnosti na výrobu stavebních materiálů se jeví, že spotřeba energie k výrobě pěnobetonu je velmi nízká v porovnání s dalšími druhy materiálů ve stavebnictví. Konkrétní porovnání nám ukazuje Obr. 4.





**Obr. 4 – Porovnání potřebného množství energie na výrobu pěnobetonu v porovnání s ostatními materiály [19].**

Z hlediska pevnosti v tlaku dosahuje pěnobeton v závislosti na objemové hmotnosti obecně nižší hodnoty než autoklávovaný (Tabulka 4, Tabulka 5).

**Tabulka 4 – Autoklávovaný pórobeton, fyzikální vlastnosti [20].**

Technické vlastnosti - přesné tvárnice a zdivo						
značka pórobetonu:	P2-400	P2-500	P4-500	P4-550	P6-650	
Pevnost zdicích prvků v tlaku $f_b$ (EN 772-1)	2,6	2,8	4,2	5,0	6,5	[N/mm <sup>2</sup> ]
Objemová hmotnost zdicích prvků v suchém stavu max.	400	500	500	550	650	[kg/m <sup>3</sup> ]
Součinitel tepelné vodivosti (P=50%) $\lambda_{10,DRY}$	0,096	0,130	0,130	0,150	0,170	[W/mK]
Návrhová hodnota součinitele tepelné vodivosti zdiva $\lambda_D$	0,101	0,137	0,137	0,158	0,179	[W/m.K]
Faktor difúzního odporu $\mu$	5/10	5/10	5/10	5/10	5/10	-
Měrná tepelná kapacita $c$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	[kJ/kg.K]
Vlhkost přetvoření, souč. smrštění $\epsilon$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	[mm/m]
Přídržnost	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	[N/mm <sup>2</sup> ]
Charakteristická hodnota vlastní tíhy zdiva (ČSN EN 1991-1-1)	5,0	6,0	6,0	6,6	7,8	[kN/m <sup>3</sup> ]
Charakter. pevnost zdiva v tlaku $f_k$ dle ČSN EN 1996-1-1	1,80	1,92	2,71	3,14	3,93	[N/mm <sup>2</sup> ]

**Tabulka 5 – Složení směsi pěnobetonu (převzato od výrobce Sircontec) na výrobu 1 m<sup>3</sup> pěnobetonu [21].**

<b>PĚNOBETON</b>		<b>PBG 450</b>	<b>PBG 500</b>	<b>PBG 550</b>
<b>objemová hmotnost</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>450</b>	<b>500</b>	<b>550</b>
<b>cement portlandský CEM II – 32,5R</b>	<b>[kg]</b>	<b>340</b>	<b>380</b>	<b>420</b>
<b>záměsová voda (pro cement)</b>	<b>[kg]</b>	<b>185</b>	<b>205</b>	<b>225</b>
<b>pěna</b>	<b>[l]</b>	<b>706</b>	<b>673</b>	<b>640</b>
<b>záměsová voda (pro pěnobetonovou přísadu)</b>	<b>[kg]</b>	<b>41</b>	<b>39</b>	<b>37</b>
<b>pěnotvorná přísada FN1</b>	<b>[kg]</b>	<b>1,6</b>	<b>1,53</b>	<b>1,45</b>
<b>pevnost v tlaku</b>	<b>[MPa]</b>	<b>1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,25</b>

## 2.2 Normy na výrobu pěnobetonu

V současné době neexistuje v ČR norma na pěnobeton. Po osobní konzultaci s pracovníky Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) jsem zjistil, že dosud nebyl podán na vytvoření norem k této problematice žádný požadavek.

Normy zabývající se betonem a jeho zkoušením pouze obsahují větu, že pěnobeton je výjimka a jako takové se na něj nevztahují. Normy na výrobu pěny a její zkoušení sice existují, nicméně se jedná o pěny používané k hašení požárů.

V zahraničí normy na výrobu pěnobetonu již existují. Stručný přehled dostupných informací uvádím níže:

V **Indii** existuje norma na pěnobetonové bloky (preformed foam cellular concrete blocks) IS 2185 (part 4) z roku 2008.

V **Korejské republice** je norma: Korean Standard KS F 4039. Standard Specification for Foamed Concrete for Cast-in-Site; Korean Agency for Technology and Standards (KATS): Seoul, Korea, 2009.

V **Británii**: Foamed Concrete: Composition and Properties, British Cement Association, BCA Ref. 46.042, 1994.

Kompatibilita mezi pěnotvornými přísadami a chemickými přísadami je striktně doporučena na základě normy BS EN 934–2. V zásadě dávka plastifikátoru je doporučena v hodnotě objemu nepřesahujícího 0,2 % hmotnosti cementu [22].

## V USA:

ASTM C 869–91 a ASTM C 796–97, kde zjistíme, jakými parametry a jakými postupy stanovíme stabilitu pěny vytvořené z pěnotvorné přísady a stabilizátoru [22].

Ošetřování je další faktor, který ovlivňuje pevnost v tlaku pěnobetonu. S přihlédnutím k normě ASTM C 796, zabývající se lehkými betony, je doporučeno testovat vzorky pěnobetonu, které budou v místnosti s relativní vlhkostí 100 % minimálně tři dny před zkouškou pevnosti [22].

ASTM C 796–97 poskytuje metody k výpočtu potřebné objemové hmotnosti pěny, k vytvoření cementové kaše známého vodního součinitele ( $v/c$ ) a cílové objemové hmotnosti [23].

Metoda pro stanovení objemové hmotnosti pěnobetonu je popsána v BS EN 12350: část 6: 2000 [22].

ASTM C869/C869 M je norma specifikující pěnotvorné přísady. Navazuje na metody testování dané touto normou ASTM C796/C796M [24].

ASTM (1997). “Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam.” ASTM C 796, Philadelphia [25] což je norma standardních metod pro zkoušky pěnotvorných přísad pro použití v lehčených betonech.

## 2.3 Pěnobeton

Pěnobeton je znám již od roku 1923 kdy byl patentován, avšak nestálost tehdejší pěnotvorné přísady a nemožnost dokázat stejné či obdobné výsledky při výrobě pěny (z hlediska kvality apod.), vedla k tomu, že k rozvoji a rozšíření povědomí o tomto materiálu došlo až později [26]. V následující části uvádím stručný popis prací jednotlivců i kolektivů, jež se problematikou pěnobetonu zabývali.

Rozsáhlou rešerší problematiky pěnobetonu, ze 173 odborných článků, provedli **Amran et al.** [22]. Zjistili, že v nich byl zkoušen pěnobeton jako výsledný produkt. Autoři se nezaměřili na charakteristiku pěn a na to, jak pěna ovlivňuje pevnost výsledné matrice. Konstatovali, že nejsou žádné standardní metody pro stanovení hmotností či objemů potřebných k získání požadované pevnosti v tlaku a stability, a to z toho důvodu, že stabilita pěny závisí na mnoha faktorech (typ pěnotvorné přísady, metoda přípravy v závislosti na velikosti pórů apod.). Dále navrhli několik bodů k dalším studiím na toto téma. Jedním z nich je zaměřit se na dynamický modul pružnosti a Poissonovo číslo.

**Panesar et al.** [27] se zabývali vlivem typu pěnotvorné přísady. Byly zkoušeny pěnotvorné přísady na bázi proteinů a syntetické. Z výzkumu vyplynulo, že na mechanické vlastnosti byl vliv minimální. V případě nasákavosti záviselo na typu a objemu pěny, kdy pěna na bázi proteinů vykazovala nižší nasákavost, než pěna na syntetické bázi. Z hlediska tepelné vodivosti měl nižší součinitel tepelné vodivosti pěnobeton se syntetickou pěnotvornou přísadou. Dále zjistil, že typ pěnotvorné přísady má vliv hlavně na nasákavost a tepelný odpor. Vliv na pevnost v tlaku nebyl tak významný.

**Kuzielová et al.** [28] se zabývali aktivací pěnotvorné přísady na bázi proteinů (FN1) a to s použitím mikrovlnného a ultrafialového záření s následnou výrobou pěnobetonu. Výsledkem bylo snížení objemu pěnotvorné přísady na polovinu při zachování stejných vlastností.

**Hilal et al.** se zabýval rozmístěním a velikostí otevřených pórů v pěnobetonu, protože pórová struktura (gelové póry, kapilární póry a uzavřené či otevřené póry) [29] má vliv na výslednou pevnost v tlaku [30]

**Nambiar et al.**, zjistili, že nízký obsah vody může způsobit zvýšení objemové hmotnosti vzhledem k tomu, že směs bude špatně zpracovatelná a během míchání se zhroutí póry. Obdobně příliš vysoký obsah vody také vede ke zvýšení objemové hmotnosti, protože cementová směs „neudrží“ póry a začne se oddělovat cementová směs a pěna.

**Hrůza** [31] a **Hlubocký** [32] řešili výrobu cementové matrice na bázi recyklovaného betonu bez vylehčení. Zjistili, že je možné takovou matici vyrobit, ale její použití z hlediska únosnosti a velké hmotnosti matric nebude pro masovější výrobu použitelné. Technologií výroby cementových pěnobetonů a jejich vlastnosti byly předmětem zkoumání **Karla Mikulicy** [26]. Technologií výroby tepelně izolačních litých žárovzdorných materiálů na bázi pěnobetonu a jejich vlastnosti byly předmětem zkoumání [33].

Dále si dovoluji uvést přehled autorů, kteří se zabývali pěnobetonem a jeho vlastnostmi (Tabulka 6) a dále Tabulka 7 ve které je uveden vodní součinitel, objemové hmotnosti a pevnost v tlaku po 28 dnech.

**Tabulka 6 – Přehled autorů a zkoumané vlastnosti pěnobetonu [23].**

Tabulation showing literature and properties of foam concrete investigated.

Author(s) (Year)	Ingredients	Fresh state properties	Physical and mechanical properties						Durability	Functional properties
			Shrinkage	sorption	Porosity	Density	Strength	Models		
Valore [1,2]	C/L/CM		✓	✓	✓	✓	✓		Thermal, fire and acoustical properties	
McCormick [38]	CM					✓	✓	✓	Thermal properties, Cryogenic applications	
Hoff [56]	C					✓	✓	✓		
Richard [39,40]	C					✓	✓			
Prim and Wittmann [57]	CM			✓	✓				Optimum acoustical performance design	
Tada and Nakano [58]	CM			✓	✓					
Tada [59]	C					✓	✓	✓		
Tam et al. [60]	CM						✓		Thermal properties	
Regan and Arasteh [25]	LWA		✓			✓	✓			
Karl and Womer [26]	-	✓								
Hunaiti [36,37]	CM						✓		Thermal conductivity	
Kearsley [15,29]	CM		✓				✓	✓		
Kearsley and Mostert [30]	C/CF					✓	✓	✓		
Kearsley and Booyens [61]	-			✓			✓	✓	Energy efficient foundation - thermal analysis	
Durack and Weiqing [19]	CM/ CFM				✓		✓	✓		
Kearsley and Visagie [62]	C/CF				✓ (AV)	✓	✓	✓		
De Ross and Morris [7]	C/CF/L		✓				✓	✓	Fire resistance, use in refractory Thermal protective foam concrete & energy Comparison of Thermal conductivity	
Nehdi et al. [51]	-					✓	✓	✓		
Jones [28]	CM		✓				✓	✓		
Turner [8]	CM	✓							Comparison of acoustical properties	
Kyle [63]	CM						✓	✓		
Kearsley and Wainwright [6,41–43]	C/CF			✓	✓	✓	✓	✓		
Jones and Giannakou [64,65]	-								Comparison of acoustical properties	
Madjoudj et al. [66]	-			✓						
Jones et al. [18]	CM	✓	✓				✓	✓		
Tikalsky et al. [67]	CM							✓	Comparison of acoustical properties	
Kearsley and Mostert [68]	CM/CFM									
Proshin et al. [69]	-									
Jones and McCarthy [5]	CM	✓	✓				✓	✓	Comparison of acoustical properties	
Jones and McCarthy [9]	CM		✓				✓	✓		
Wee et al. [14]	CG					✓(AV)	✓	✓		
Laukaitis and Fiks [70]	CM					✓			Comparison of acoustical properties	
Nambiar and Ramamurthy [20,56,71–74]	CM/CFM	✓	✓	✓	✓(AV)	✓	✓	✓		

CM – cement mortar, C – neat cement, L – lime, CFM – cement fly ash mortar, CF – cement with fly ash replacement, ac – autoclaving, mc – moist curing, LWA – lightweight aggregate, CG – cement with GGBS replacement, and AV – air-void characterization (system).

**Tabulka 7 – Přehled směsí – vodní součinitel, objemové hmotnosti a pevnost v tlaku po 28 dnech [23].**

Autoři	vodní součinitel	objemová hmotnost	pevnost v tlaku [MPa] (28 dní)
	v/c	[kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c</sub>
McCormick (1967)	0,35–0,57	800–1800	1,8–17,6
Tam et al. (1987)	0,6–0,8	1300–1900	1,81–16,72
Regan a Arasteh (1990)	0,45–0,6	800–1200	4–16
Van Deijk (1991)	-	280–1200	0,6–10
ACI523.1R–1992	-	240–640 400–560	0,48–1,72
Hunaiti (1997)	-	1667	12,11
Kearsley a Booyens (1998)	-	1000–1500	2,8–19,9
Durack a Weiqing (1998)	0,61–0,82	982–1185	1–6
	0,47–0,7	541–1003	3–15
Aldridge (2000)		400–1600	0,5–10
Kearsley a Wainwright (2001)	0,6–1,17	1000–1500	2–18
Tikalsky et al. (2004)	0,4–0,45	490–660	0,71–2,07
	0,5–0,57	1320–1500	0,23–1,1
Jones a McCarthy (2005)	0,5	1000–1400	1–2
	1,11–1,57	1000–1400	3,9–7,3
Jones a McCarthy (2006)	0,3	1400–1800	10–26
	0,65–0,83	1400–1800	20–43
Nambiar a Rammamurthy (2006)	-	800–1350	1–19

## 2.4 Výroba pěnobetonu

Pro výrobu pěnobetonu jsou používány tyto suroviny – pěnotvorná přísada, stabilizační přísada, zpevňující, či rychlující přísada, záměsová voda a cement.

### Pěnotvorné přísady

Pěnotvorné přísady rozdělujeme podle druhu na přírodní a syntetické. Mezi přírodní patří pěny z pěnotvorných přísad na bázi zmýdelnatělých pryskyřic, olejů, tuků nebo hydrolyzátů bílkovin. Pro pěnotvorné přísady se nejčastěji používají látky na bázi proteinu (hydrolyzovaný protein stabilizovaný zinečnatou solí) nebo látky na bázi tenzidů a směsi polymerů (na syntetické bázi) [34].

## **Pěnotvorné přísady v ČR**

V České republice jsou dostupné např. tyto průmyslově vyráběné pěnotvorné přísady.

**Sircontec FN1** – pěnotvorný koncentrát Sircontec FN1, který do ČR dodává společnost Sircontec ze Slovenska prostřednictvím firmy TONSTAV – SERVICE.

**Sika SB 2** – tato pěnotvorná přísada dodávaná firmou Sika je vhodná především pro výrobu velmi lehkých malt a lehkých betonů z normálního a lehkého kameniva (dle složení výchozí směsi lze vyrobit malty a betony s objemovou hmotností od 400 kg/m<sup>3</sup> do 2000 kg/m<sup>3</sup>).

**Sika Lightcrete L 500 H** – lze přidat do již namíchané směsi nebo do domíchávače, je zvláště vhodná pro přípravu lehčených směsí s expandovaným polystyrénem (s objemovou hmotností menší než 900 kg/m<sup>3</sup>).

**Cemex CX Isofoam 935** – tato pěnotvorná přísada je distribuována společností Cemex, ale není určena k volnému prodeji, pouze pro použití v závodech společnosti Cemex.

**Mapeplast** – je vodný roztok speciálních organických polymerů se silnou pěnivostí, který byl vyvinut ve firmě Mapei. Její objemová hmotnost činí 1140 ± 20 kg/m<sup>3</sup>.

**Schaumbildner 97** – tuto modrou, na tenzidech založenou homogenní tekutou přísadu vyrábí společnost Ha–Be. Slouží k přípravě pěny, z níž je možné míchat lehčený pórobeton s hustotou 400 až 2000 kg/m<sup>3</sup>.

**Foam GA 285** – je syntetická pěnotvorná přísada od společnosti Basf, která se hodí pro výrobu lehkého betonu a běžné nebo lehké čerstvé malty. Pomocí různého množství pěny lze vyrobit lehké betony objemových hmotností 400–1600 kg/m<sup>3</sup>.

**Darex AE S 45** – tento pěnotvorný koncentrát je dodávaný na trh společností Bauchemia T. B. Je určen k přípravě lehkých malt a betonů o velmi nízké objemové hmotnosti [26].

## **Stabilizační přísady**

Stabilizační přísady slouží ke stabilizaci pěny. Jsou důležité k zachování objemové stálosti tak, aby bylo možno pěnu vmíchat do cementového tmele do předem stanoveného časového limitu. Jako stabilizační přísady můžeme také považovat látky na bázi solí, či cukrů, avšak ty mohou negativně ovlivňovat vlastnosti výsledné směsi (např. vliv na pH, pevnosti apod.) a tudíž nejsou používány. Dále jsou uvedeny některé stabilizační přísady.

**Amorfní křemičitý prach** – komerčně prodávaný křemičitý prach obsahuje také 1,5 % solí a 11 % fyzikálně a chemicky vázané vody. Dle výrobce je velikost měrného porchu  $150 \pm 10 \text{ m}^2/\text{g}$  a objemová hmotnost  $2100 \text{ kg/m}^3$ .

**CAPB** (Amphoteric surfactant cocoamidopropyl betaine) – je přírodní směs získávaná z kokosových ořechů a dimethylaminopropylaminu a byla předmětem zkoumání Lesova et al. [35].

**Hydroxid sodný** – se používá jako stabilizátor, a to v podobě suspenze.

### **Zpevňující, či urychlující přísady**

Jako zpevňující přísady se používá např. síran hlinitý, mravenčan vápenatý. Dále se na zlepšení fyzikálních vlastností využívá mikrosilika. Mikrosilika je používána v souvislosti s vysokopevnostními betony. Snižuje potřebu cementu a díky měrnému povrchu zlepšuje hydrataci cementu a tím zvyšuje konečnou pevnost [36].

### **Chlorid vápenatý ( $\text{CaCl}_2$ )**

Funguje jako katalyzátor a pomáhá hydrataci  $\text{C}_3\text{S}$  a  $\text{C}_2\text{S}$  nebo redukuje alkalitu. Obvyklá dávka je 2 % hmotnosti cementu. Přítomnost  $\text{CaCl}_2$  vede ke korozi výztuže. Pro reaktivní agregáty se přidání  $\text{CaCl}_2$  projevuje snížením alkalické reakce, a to zapříčiní zhoršení kvality betonu.

### **Granulovaný chlorid vápenatý**

Problém při výrobě pěnobetonu s použitím urychlovače chloridu vápenatého jsou nádoby, ve kterých cementová směs tvrdne. Směs by měla být ve stálých podmínkách jak tepelných, tak vlhkostních, aby dosáhla požadovaných pevností v tlaku. Problém vzniká s výkyvy teplot. Proto je požadováno snížit obsah cementu bez ztráty pevnosti a tím se dostat ke snížení cen produktu. Na Ruském trhu je hojně využíván s minimálním použitím přísad, které by zabraňovaly smršťování pěnobetonu.

Přidáním chloridu vápenatého (2 % hmotnosti cementu) redukuje hmotnosti použitých surovin na výrobu směsi o 10 % při stejné pevnosti. Doba tuhnutí se 3x zmenší, což umožní odformovat matrice 3x rychleji. Dále se zvýší jednodenní pevnost matrice až 2x [37].



### **Dusičnan vápenatý**

Optimální dávka dusičnanu vápenatého dle normy ASTM a typem cementu I, je 3,86 % hmotnosti cementu. Dusičnan vápenatý urychluje  $C_3A$  fázi. Aggoun a spol. nicméně upozorňuje, že to, jak se vyplatí použití této přísady závisí na typu cementu, respektive jeho chemickém složení [38].

### **Triethanolamine (TEA)**

Abiad a spol. zjistil, že použití této přísady urychluje setting time pouze při 0,1 % hmotnosti [38].

### **Mravenčan vápenatý**

Singh a Abha zjistili, že mravenčan vápenatý zrychluje hydrataci  $C_3S$ , pokud je použito 0.5–6 % z hmotnosti cementu [38]. Po pokusech, které provedli Narayanan a Ramamurthy [38] s použitím konvenčních akceleratorů zjistili, že – použitím chloridu vápenatého dochází k nestabilitě pěnobetonu. Triethanolamine a dusičnan vápenatý oproti tomu stabilní je, nicméně doba tuhnutí je až po 4–6 hodinách. Při použití lithnatých solí bylo zjištěno, že jejich vliv je tak malý, že jejich použití ve větších dávkách bylo neekonomické.

### **Popílek (fly ash)**

Používá se jako náhrada cementu a také pomáhá redukovat hydratační teplo a tím příznivě ovlivňuje dlouhodobou pevnost. Při použití popílku bylo zjištěno, že jeho použití jako urychlovače tuhnutí je výhodné. Můžeme jím zcela nahradit písek a příslušné směsi prokazují flexibilitu [38].

### **Záměsová voda**

Jako záměsová voda se používá voda, která je specifikována dle ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu [39]. Obecně se v ČR používá voda pitná. Na základě zahraniční normy ACI 523.3R–93 je doporučeno použít vodu čistou, čerstvou a pitnou. Organické nečistoty totiž mají negativní vliv na kvalitu pěnotvorné přísady na bázi proteinů, což může ovlivnit vlastnosti pěnobetonu [22].

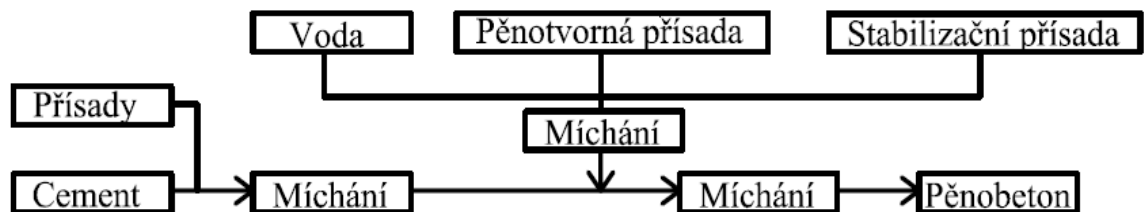
## Cement

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Obsahuje jemně rozemletý křemičitanový slínek a přísady (sádrovec). Dále může obsahovat pucolánové látky, jako granulovanou vysokopecní strusku, popílek, vápencovou moučku, lávu [26].

### 2.4.1 Metody výroby pěnobetonu

#### Metoda přidání pěny do cementového tmelu (pre-foaming method)

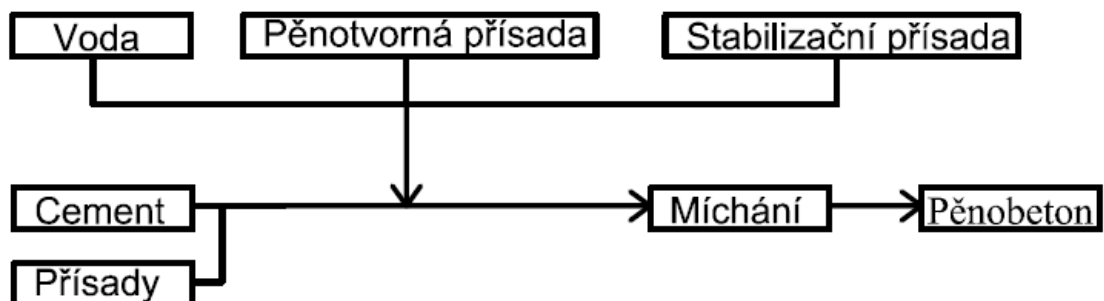
Metoda sestává z výroby cementového tmelu, tj. směsi vody a cementu. Dále se za použití pěnotvorné přísady, stabilizační přísady a vody vytvoří pěna. Pěnobeton se vyrábí vmícháním pěny do cementového tmelu (Obr. 5).



Obr. 5 – Metoda přidání pěny do cementového tmelu.

#### Metoda výroby mixováním směsi (mixed foaming method)

Metoda sestává ze smíchání pěnotvorné přísady, stabilizační přísady, cementu a vody. Po následném zamíchání směsi vznikne pěnobeton (Obr. 6). U této metody však může nastat vyšší spotřeba pěnotvorné přísady až čtyřnásobně [40].



Obr. 6 – Metoda výroby mixováním směsi.

## 2.4.2 Pěna

Pěny dělíme do tří skupin a to

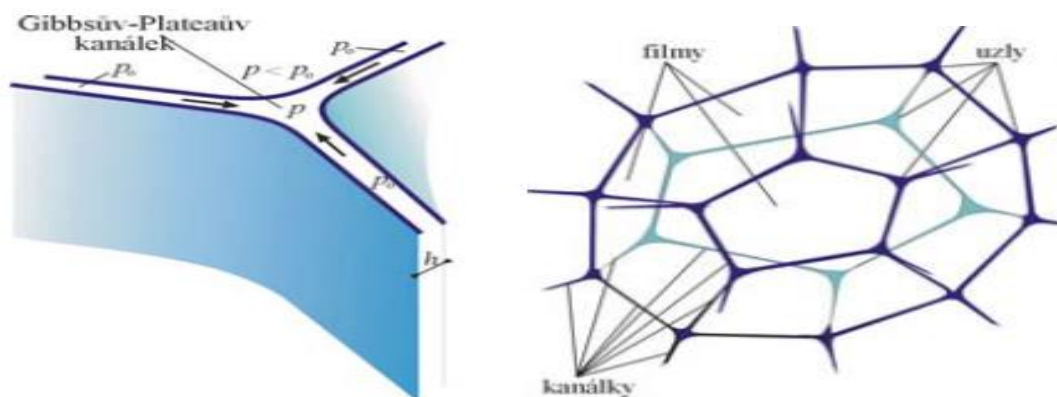
– **málo koncentrované** soustavy jejichž bubliny jsou velmi vzdálené a doba životnosti je krátká.

– **vlhké** pěny, které jsou tvořeny bublinami kulovitěho tvaru

– **suché** pěny u kterých je plynný podíl i více než 90 obj.%. Bubliny mají tvar mnohostěnů, jejichž stěny jsou tvořeny tenkými filmy disperzního prostředí a tvoří spojitou strukturu [41]. V případě pěn použitých k výrobě pěnobetonu se jedná o pěny suché.

### Suchá pěna

Suchá pěna má strukturu plástve – plynem zaplněné polyedrické buňky oddělené tenkými filmy disperzního prostředí. Idealizovaný tvar buněk pětiúhelníkový dvanáctistěn (z prostorových důvodů spíše v reálné pění 14). Tři stěny buněk pěny (svírají úhel  $120^\circ$ ) vytvářejí Gibbsovy–Plateauovy kanálky se složitým konkávním tvarem povrchu, vyplněné disperzním prostředím (Obr. 7).



Obr. 7 – Gibbsovy–Plateauovy kanálky [41].

Gibbsovy–Plateauovy kanálky vytváří kapilární jev: pod zakřiveným povrchem je v kapalině tlak nižší o  $\Delta p$  (Laplaceův tlak)  $\Rightarrow$  odsávání kapaliny z plochých částí do vydutých a v důsledku toho vzniká ve filmu pěny tok kapaliny, samovolné ztenčování přepážek.

Vrcholy sousedních polyedrů vytvářejí uzly, ve kterých se stýkají čtyři kanálky. Kanálky a uzly vytvářejí jedinou rozvětvenou soustavu, po které se může uskutečňovat přenos disperzního prostředí, zejména jeho stékání působením gravitační síly [41].

## Zánik pěn

Při zániku pěn se hovoří o třech základních situacích:

– **ztenčení a protržení filmů** – pěny jsou polydisperzní  $\Rightarrow$  poloměr a tím i tlak uvnitř jednotlivých bublin různý  $\Rightarrow$  napínání přepážek, případně jejich protržení izotermický převod plynu z drobných buněk do buněk větších – (molekulární difuze, Ostwaldovo zrání) – přítomnost povrchově aktivní látky snižuje povrchové napětí, a tudíž rozdíly v tlacích v různých velkých bublinách; adsorbované molekuly povrchově aktivní látky mohou také působit jako stérická zábrana pro difuzi molekul rozhraním

– **vytékání disperzního prostředí** z Gibbsových–Plateauových kanálků působením gravitace vlhké pěny tak přecházejí na méně stabilní suché pěny, u kterých dochází k dalšímu vytékání kapaliny Gibbsovými–Plateauových kanálky (k tzv. *synerezi*) a dalšímu snižování stability. Ve vyšších vrstvách pěny se v Gibbsových–Plateauových kanálkách proti vytékání disperzního prostředí uplatňuje kapilární tlak, takže může vzniknout hydrostaticky rovnovážný stav, charakteristický pro objemné pěny. Vysoce disperzní pěny s velkým poměrným objemem, mohou dokonce na počátku místo vytékání kapalinu naopak nasávat.

– **vypařování disperzního prostředí** z přepážek povrchové vrstvy, které jsou ve styku s vnějším prostředím; rychlost destrukce závisí na hodnotě tenze páry disperzního prostředí nad pěnou (na vlhkosti vzduchu) [41].

## Stabilita pěny

Pěny jsou samy o sobě nestálé a můžeme je rozdělit na statické a dynamické. Statické pěny zmenšují svůj objem, nejsou-li doplňovány příivodem disperzního podílu. U dynamických pěn je disperzní podíl kontinuálně doplňován stejnou rychlostí, jakou se pěna rozpadá.

Stabilita pěn závisí na pevnosti mezivrstviček disperzního prostředí. Při ztenčení mezivrstvy přetéká disperzní prostředí do objemové fáze. Rychlost vytékání je ovlivňována viskozitou disperzního prostředí [41].

Dle americké normy ASTM C 796–97 je minimální objemová hmotnost pěny  $32 \text{ kg/m}^3$ . Stabilita pěny se určuje jako podíl objemu vyrobené pěny k objemu navrženému, který musí být přibližně jedna.

Pro výpočet navrženého objemu pěny lze využít následující vzorce:

$$V_f = 1000V_a \div (1000 - W_{uf}) \quad (\text{I})$$

$$V_a = (0,359 \times W_{tw} + 0,7965W_c) \div R \quad (\text{II})$$

kde  $V_f$  je objem pěny (navržený) [na 1 m<sup>3</sup> cementového tmelu],

$V_a$  je objem vzduchu,

$W_{uf}$  je hmotnost pěny (unit weight of foam),

$W_{tw}$  je celkový objem vody (total weight of water),

$W_c$  je hmotnost cementu,

$R$  je navržená objemová hmotnost [42].

### **Napětí a stabilita pěn vytvořených z pěnotvorných přísad**

Oba typy pěnotvorných přísad (přírodní, syntetické) redukují napětí na povrchu bublin a zlepšují jejich stabilitu. Syntetické pěnotvorné přísady na bázi amfoterních substancí jsou silně hydrofilní a lehce tvoří vzduchové bubliny. Nicméně pokud přimícháme syntetickou pěnotvornou přísadu do betonové kaše, tak tato směs je náchylná na udržení požadovaného stavu směsi. Vše totiž záleží na kompatibilitě povrchu pórů a betonové kaše. Zatímco s použitím přírodní pěnotvorné přísady se tvoří bubliny na základě degradace proteinů. Princip je takový, že čím víc peptidových řetězců molekul (na bázi proteinu) se poruší, tím se vytvoří víc hydrofobních malých molekul. Proces redukuje napětí na povrchu bublin, ale také vodík vázaný mezi shlukem molekul pomáhá udržet póry stabilní. Efektivita pěnotvorné přísady na bázi proteinů je nicméně ovlivněna teplotou a hodnotou pH [27]. Bylo zjištěno, že pěnobeton s použitím pěnotvorné přísady na bázi proteinů má snahu o segregaci vzhledem k nekompatibilitě se superplastifikátory [22].

### **2.4.3 Pěnobeton**

#### **Stabilita pěnobetonu**

Stabilitu pěnobetonu lze určit několika způsoby:

- jako poměr naměřené objemové hmotnosti čerstvé směsi k navrhované objemové hmotnosti (bez „krvácení“ a oddělování směsi), který by měl být roven přibližně jedné,
- na základě porovnání navržené a vyprodukované pěny potřebné k vytvoření směsi o požadované objemové hmotnosti s rozdílem 50 kg/m<sup>3</sup>,

- jako poměr navrženého a skutečného vodního součinitele (w/c ratio),

Rovnice (Tabulka 8), které vypracoval Ramamurthy et al. [23] při zjišťování hodnoty rozlivu směsi v závislosti na použitých surovinách pomohly ke stanovení potřebného objemu vody a vytvoření stabilní směsi. Ve své práci dále zjistili, že pro typické složení směsi vycházelo nejlépe 45 % rozlití směsi (Tabulka 10) [23].

**Tabulka 8 – Rovnice pro získání rozlivu směsi v procentech [23].**

Mix type	Regression equations	R <sup>2</sup> -Value
Without sp (Foam concrete)	$Spread\ Flow\ \% = -266.106 - 0.615*FA + 1010.762*w/s + 2.775*FV - 1.546*FA*w/s + 0.014*FA*FV - 11.561*w/s*FV$	0.94
With sp (Foam concrete)	$Spread\ flow\ \% = -368.277 - 0.593*FA + 1332.2*w/s + 3.904*FV - 0.075*FC*FA + 3.062*FC*sp + 0.126*FC*FV - 1.685*FA*w/s - 0.142*FA*sp + 0.013*FA*FV + 97.805*w/s*sp - 16.376*w/s*FV - 0.263*sp*FV$	0.98
Without sp (Base mix)	$Spread\ flow\ \% = -261.292 + 11.697*FC - 1.388*FA + 948.080*w/s$	0.92
With sp (Base mix)	$Spread\ flow\ \% = -556.384 + 25.743*FC - 2.187*FA + 1685.661*w/s + 101.157*sp$	0.96

Note: *FC*- Filler-cement ratio, *FV*- Foam volume %, *FA*- Fly ash replacement %, *w/s* – Water-solids ratio, *sp* – Superplasticizer %

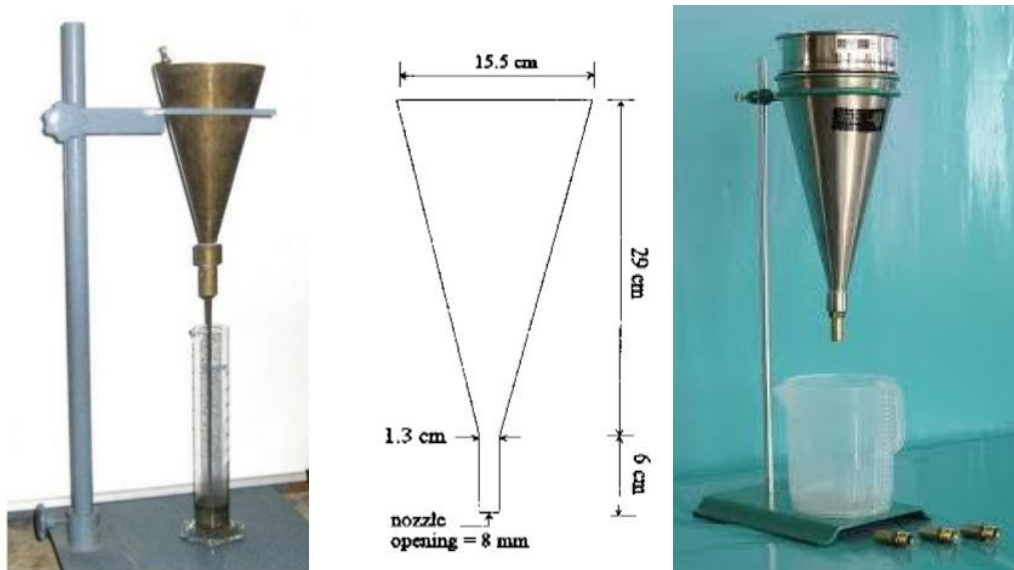
## 2.5 Klasifikace zpracovatelnosti pěnobetonu

Ke klasifikaci zpracovatelnosti betonu lze použít více možností. V případě pěnobetonu je možné využít modifikace tzv. Marsh cone testu (zjednodušeně stanovení viskozity), nebo stanovení zpracovatelnosti na základě rozlivu směsi (taktéž modifikováno).

### 2.5.1 Marsh cone test

Při této metodě se používá kónická nálevka, odměrný válec (Obr. 8) a stopky. Měří se čas potřebný k průchodu 1 litru použité směsi cementu nálevkou s vnitřním průměrem 8 mm. Výsledek měření je tzv. tekutost směsi. Pro tuto metodu je u betonu přesně daný technologický postup výroby směsi. Pro stanovení zpracovatelnosti pěnobetonu se tento postup neuzívá. Směs

se vyrobí a vyzkouší. Zpracovatelnost se posoudí na základě tabulky (Tabulka 9). Vidíme, že směsi s tekutostí (flow time) větší než 1 minuta jsou hůře zpracovatelné.



Obr. 8 – Kónická nálevka [43], [44].

### 2.5.2 Stanovení rozlivu směsi – modifikované

Po naplnění nádoby směsí čerstvého pěnobetonu je měřen rozliv. Ten je následně vyjádřen jako procento průměru půdorysu použité nádoby (Tabulka 10) [45].

Porovnáním stanovení stability pěnobetonu (modifikovaný Marsh cone test) a rozlivu (Obr. 9) označil směsi s rozlivem 40–60 % a tekutostí (flow time) pod 20 sekund jako samozhutnitelné [45].

Tabulka 9 – Klasifikace pěnobetonu založená na stanovení viskozity [45].

Main Class	Description	Sub class	Description
1	1 liter in < 1 min	A*	Constant flow
2	1min<efflux <2 min	B*	Interrupted flow
3	0.5 liter<efflux<1 liters	C	Completion of flow after tamping gently
4	Efflux < 0.5 liters		
5	No flow		

\* Used in main class 1 and 2 only

**Tabulka 10 – Klasifikace pěnobetonu založená na rozlivu směsi [45].**

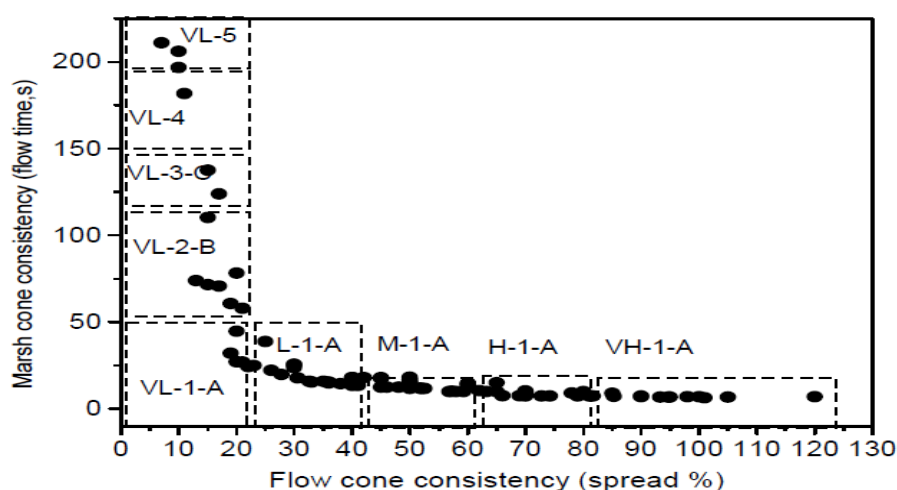
Třída	Hodnoty rozlivu	Popis
VL	0–20 %	velmi nízký
L	20–40 %	nízký
M	40–60 %	střední
H	60–80 %	vysoký
VH	80–120 %*	velmi vysoký

\* některé směsi vyjadřovaly segregaci při tomto rozlivu

Nambiar et al. zjistili, že nízký obsah vody může způsobit zvýšení objemové hmotnosti vzhledem k tomu, že směs bude špatně zpracovatelná a během míchání se zhroutí pěnové póry. Obdobně příliš vysoký obsah vody také vede ke zvýšení objemové hmotnosti, protože cementová směs „neudrží“ pěnové póry a začne se oddělovat cementová směs a pěna [22].

V ČR je v technickém listu výrobce pěnobetonu firmy CEMEX Czech Republic, s.r.o. uvedeno stanovení konzistence směsi (tekutost) a to rozlivovou zkouškou s kónusem s dolní podstavou 100 mm, horní 70 mm a výškou 60 mm na navlhčené podložce. Rozliv směsi s objemovou hmotností větší než 500 kg/m<sup>3</sup> má být menší než 22 cm [46].

Zpracovatelnost pěnobetonu se dá stanovit na základě rozlivu směsi. Doporučuje měřit rozliv směsi ve dvou na sebe kolmých směrech, jako při zkoušce sednutí Abramsova kužele. Průměr naměřených hodnot poté zaokrouhlit na 5 mm [22].



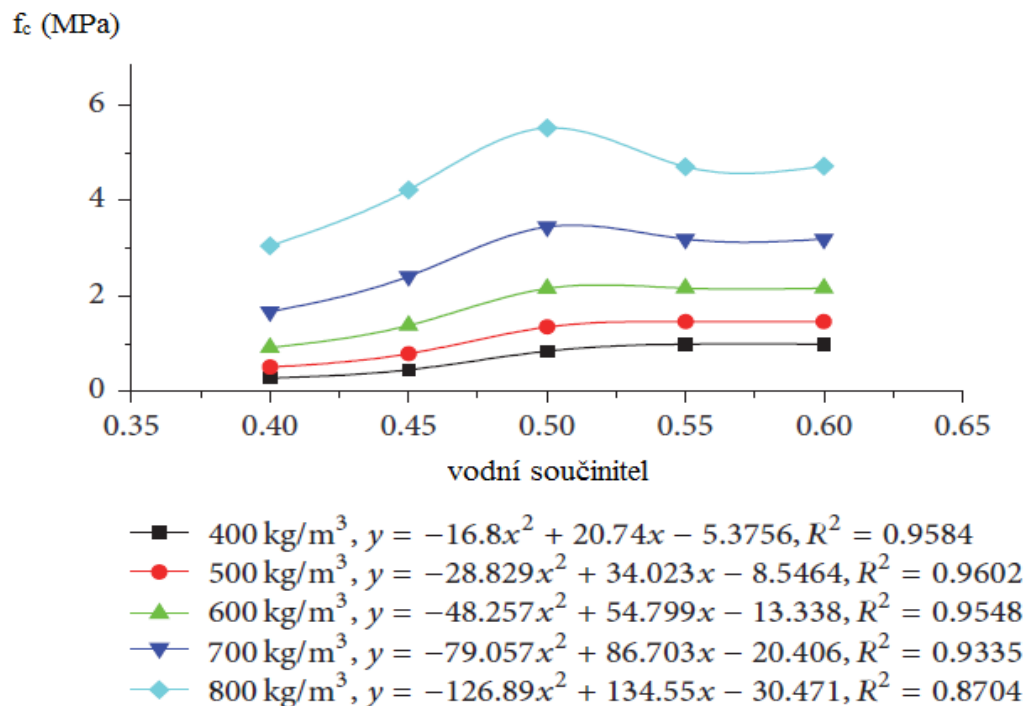
**Obr. 9 – Závislost rozlivu a tekutosti [45].**



## 2.6 Vodní součinitel (v/c)

Dle Kearsleyho je vodní součinitel potřeba volit od 0,4 do 1,25 nebo 6.5 % až 14 % z cílové objemové hmotnosti [47; 48].

V roce 2016 provedli Liu et al. [49] experimenty zaměřené na pórovou strukturu a pevnost v závislosti na vodním součiniteli. Dle výsledků měření k nejvyšší pevnosti docházelo při vodním součiniteli mezi 0,5 a 0,6 (Obr. 10). Při těchto experimentech pracoval s portlandským cementem 42,5R a pěnotvornou přísadou na bázi proteinů.



Obr. 10 – Efekt vodního součinitele na výslednou pevnost pěnobetonu [49].

## 2.7 Všeobecné předpoklady

Základní předpoklad pro splnění požadavků na využití pěnobetonu v praxi a následnou výrobu je, že maximální hmotnost matrice bude 25 kg. Matrice bude vylehčená, a to za použití pěnotvorných, případně stabilizačních přísad. Neuvažují použití písku především z důvodu vyšší finanční náročnosti materiálu a způsobu výroby. Na první pohled se to může zdát jako ignorování dobře dostupného materiálu, avšak musíme brát v potaz i nákladnost dopravy materiálu, a to i s ohledem na země třetího světa.

## 2.8 Předpokládaná pevnost pěnobetonové matrice v tlaku

Pevnost v tlaku bude řádově nižší než pro klasické betonové tvárnice kvůli vylehčení. Její velikost se předpokládá v závislosti na objemové hmotnosti od 0,6 do 1,5 MPa i s ohledem na deklarované výsledky komerčních výrobců (Tabulka 5, Tabulka 11).

**Tabulka 11 – Závislost objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku (Poroflow) [46].**

Obchodní název	Objemová hmotnost	Pevnost v tlaku
	(v suchém stavu)	(po 28 dnech)
<b>POROFLOW F600</b>	<b>600 ± 50 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>&gt; 0,6 MPa</b>
<b>POROFLOW F750</b>	<b>750 ± 50 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>&gt; 0,9 MPa</b>
<b>POROFLOW F900</b>	<b>900 ± 50 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>&gt; 1,5 MPa</b>

Pevnost v tlaku je ovlivněna více objemem pěny, než vodním součinitelem [50], což je logické, proto si můžeme dovolit tvrdit, že s úbytkem objemové hmotnosti klesá pevnost v tlaku. Dále má vliv na pevnost v tlaku i typ použité pěny. Pevnost v tlaku více ovlivňuje pěna na bázi proteinů, než syntetická [51].

## 2.9 Základní termofyzikální vlastnosti

### Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/m×K] vyjadřuje množství tepla, které projde za ustáleného teplotního stavu za časovou jednotku zkoušenou látkou jednotkovou plochou a jednotkové tloušťce při rozdílu povrchových teplot 1 K.

### Měrná objemová tepelná kapacita $\rho_c$

Měrná objemová tepelná kapacita  $\rho_c$  [J/m<sup>3</sup>×K] vyjadřuje, kolik tepla [J] musíme dodat 1 m<sup>3</sup> látky, aby se teplota změnila o 1 K.

### Tepelná difuzivita (součinitel teplotní vodivosti)

Tepelná difuzivita  $a$  [m<sup>2</sup>/s] vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí [52].

$$a = \lambda / (\rho \times c) \quad (III)$$

Dle Wong et al. [53] závisí součinitel tepelné vodivosti hlavně na objemové hmotnosti a objemu pěny viz Tabulka 12. Menší vliv má vodní součinitel, teplota a stáří.

**Tabulka 12 – Tepelná vodivost po 28 dnech [53].**

	Sample	W/C ratio	Actual Wet Specific Gravity	k (W/m.K) Mean temp: 25 °C	k (W/m.K) Mean temp: 35 °C	k (W/m.K) Mean temp: 45 °C	k (W/m.K) Mean temp: 55 °C	Increase of k at 25 °C from 7 days to 28 days	% Increase of k at 25 °C from 7 days to 28 days	Foam Content (%)
Varying w/c ratio	F4	0.35	1.07	0.2509	0.2554	0.2613	0.2653	0.0292	11.65	50
	F1	0.45	1	0.2241	0.2246	0.2258	0.2281	0.0339	15.14	50
	F5	0.55	0.9	0.1934	0.1967	0.199	0.2024	0.0102	5.27	50
Varying foam content	F2	0.45	0.55	0.1576	0.1637	0.1616	0.1637	0.0348	22.09	70
	F1	0.45	1	0.2241	0.2246	0.2258	0.2281	0.0339	15.14	50
	F3	0.45	1.44	0.3707	0.3764	0.39	0.3986	0.0329	8.86	25
Cement paste (varying w/c ratio)	C1	0.45	1.86	0.5345	0.5504	0.5633	0.5714	0.0398	7.44	0
	C2	0.35	1.98	0.5768	0.5809	0.5894	0.5975	0.0197	3.41	0
	C3	0.55	1.76	0.4845	0.4914	0.5015	0.515	0.0257	5.31	0

Ganesan et al. [54] se zaměřil na zjištění tepelných vlastností pěnobetonu. Použil přitom portlandský cement písek, vodu a pěnotvornou přísadu značky Norait PA – 1. Použil 1 podíl cementu na 1,5 podílu písku a vodní součinitel zvolil 0,45. Výsledky (Tabulka 13) ukazují objemovou hmotnost, termofyzikální vlastnosti a pórovitost směsí pěnobetonu.

**Tabulka 13 – Vlastnosti pěnobetonu (objemová hmotnost, termofyzikální vlastnosti a pórovitost) [54].**

Sample	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	Specific Heat Capacity (J/m <sup>3</sup> k)	Percentage of Porosity (%)
Normal FC (NFC-1)	700	0.24	0.39	879	68
Normal FC (NFC-2)	1000	0.49	0.58	845	57
Normal FC (NFC-3)	1400	0.74	0.69	794	35

Mydin [55] se zaměřil na zjištění tepelných vlastností pěnobetonu. Použil přitom portlandský cement písek, vodu a pěnotvornou přísadu značky Norait PA – 1. Dávkoval

2 podíly cementu na 1 podíl písku a vodní součinitel zvolil 0,5. Výsledky (Tabulka 14) ukazují objemovou hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a pórovitost. Dále uvádím závislost objemové hmotnosti pro různé typy použití na pevnost v tlaku po 28 dnech a součiniteli tepelné vodivosti (Tabulka 15).

**Tabulka 14 – Závislost objemové hmotnosti na součiniteli tepelné vodivosti a pórovitosti [55].**

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity, <i>k</i> (W/mK)	Porosity (%)
650	0.23	74
700	0.24	71
800	0.26	64
900	0.28	57
1000	0.31	51
1100	0.34	47
1200	0.39	44

**Tabulka 15 – Závislost objemové hmotnosti na pevnosti v tlaku po 28 dnech a součiniteli tepelné vodivosti [56].**

Type of foamed concrete	Sort of foamed concrete according to average density	Non-autoclave foamed concrete	
		28 day compressive strength MPa**	Thermal Conductivity W/mk
Heat-insulated	D400	1	0.1
	D500	1.4	0.12
Constructional-heat-insulated	D600	3.5	0.14
	D700	5	0.18
	D800	7	0.21
	D1000	10	0.24
Constructional	D1100	14	0.34
	D1200	17	0.38

## 2.10 Výroba pěny v pěnogenerátorech

Výroba pěny je pro výrobu pěnobetonu prováděna v pěnogenerátorech. Pěnogenerátory používané v provozech můžeme rozdělit na dva základní typy, dle druhu vzduchu, kterým je pěna vytvářena (atmosférický či stlačený vzduch).

### Atmosferický pěnogenerátor

Pěnogenerátorová tryska je připojena na vodovodní řad a nádobu s pěnotvornou přísadou, která je vlivem proudící vody nasávána a smíchávána s proudící vodou. Stejným způsobem je o pár milimetrů dále přisáván vzduch, který vzniklý koncentrát napěňuje. Mezi hlavní výhody tohoto řešení patří absence jakékoliv elektroniky u pěnogenerátoru. Problém může nastat při kolísání tlaku ve vodovodním řadu [26].

### Pěnogenerátor na stlačený vzduch

V rozvojovém světě firmy zabývající se výrobou pěnobetonu využívají pěnogenerátory většinou čínské výroby, a to z ekonomických důvodů, např. generátory FM–25 (Obr. 11).



1	násypka	5	vývod
2	pásový dopravník	6	hydraulická pumpa
3	mixér	7	vývod směsi pěnobetonu
4	vodní pumpa	8	řídící panel

Obr. 11 – Pěnogenerátor FM–25 [57].

Dále je možno použít další přístroje, např. ty, které nabízí firma EDAMA [58], nebo přístroj na výrobu pěny s názvem DIY Little Dragon and Foam Injector Kit (Obr. 12).



**Obr. 12 – DIY Little Dragon [59].    Obr. 13 – Vysokotlaká myčka Hecht [60].**

Dále lze použít průmyslové vyráběné zařízení, které nejsou primárně určeny k výrobě pěny do pěnobetonu. Uvedl bych možnost využít elektrickou tlakovou myčku tzv. wapku (Obr. 13), nebo ke kompresoru připojit stříkací pistoli (používanou např. ke stříkání laku na auta apod.). Tento princip je uplatněn u přístroje DIY Little Dragon and Foam Injector Kit, avšak není nutno pořizovat stříkací pistoli, ale pěnotvorný roztok s vodou je vháněn pod tlakem do trubice vyplněné drátěnou houbou tzv. drátěnkou a následným tlakem kompresoru se vytvoří pěna. Ještě uvádím pro přestavu podobu celé linky pro výrobu pěnobetonových tvárnic HB– 5000 (Obr. 14) se specifikací (Tabulka 16).



**Obr. 14 – Linka pro výrobu pěnobetonových tvárnic HB–25000 [57].**

**Tabulka 16 – Specifikace HB–25000 [57].**

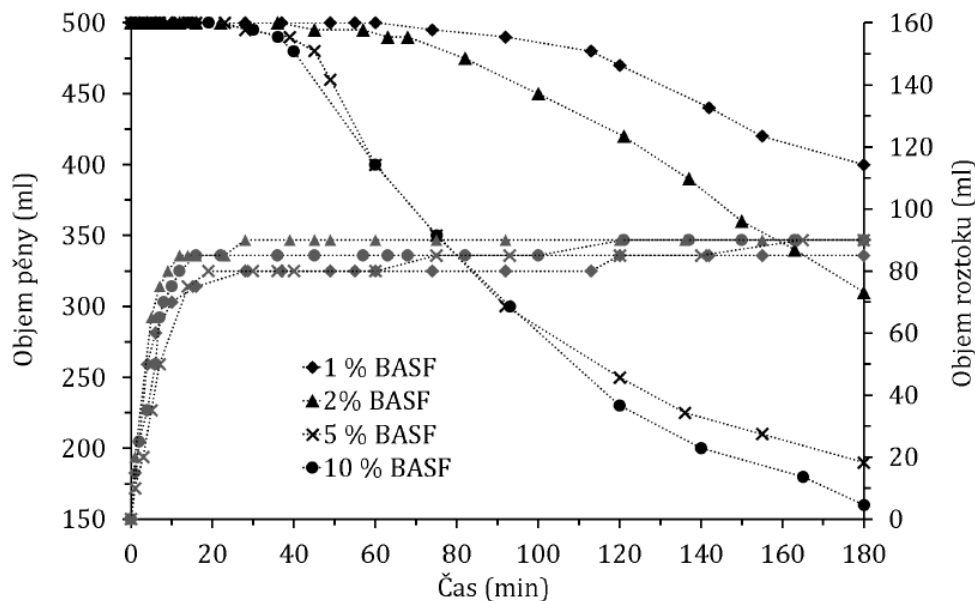
Specifikace výrobků (d × š × v)	Počet forem	Doba trvání	Produktivita
		vylití do formy	[ks/h]
Standardní cihla (240×115×53)	32	24 [s]	4800
Cihla (390×190×190)	5	24 [s]	750

## 2.11 Výroba pěny a zjištění vlastností

Pro výrobu pěny se obvykle používá pěnotvorná přísada, stabilizační přísady, nádoba pro míchání koncentráту, záměsová voda a mixér či pěnogenerátor. Zjišťuje se objemová hmotnost, odloučivost, napěnění a stanovuje stabilita pěny. Dle dizertační práce [33] by doba míchání neměla přesáhnout 10 minut.

### Odloučivost pěny

Hodnotou odloučivosti pěny rozumíme odloučení původního pěnotvorného roztoku z napěněného koncentráту. Vytvořením grafu ke stanovení stability v závislosti na odloučivosti (Obr. 15) se zabýval Novotný [33], kde sledoval chování pěny po dobu 180 minut a zaznamenával hodnoty objemu pěny a roztoku v čase. Nicméně pro použití v praxi se počítá s tím, že pěna by měla být vmíchána do cementového tmelu co nejdříve. Nejlépe hned po napěnění a maximálně do 30 minut od napěnění.



**Obr. 15 – odloučivost pěny [33].**

## Číslo napěnění

Číslo napěnění je bezrozměrné číslo označené jako  $N_f$  a vyjadřuje poměr objemu pěny vytvořené z daného objemu roztoku napěňovací přísady.

Výpočet dle vzorce:

$$N_f = V_f \div V_l \quad (\text{IV})$$

kde:

$N_f$ ...číslo napěnění [-],

$V_f$ ...objem pěny [l],

$V_l$ ...objem tekutiny potřebné k napěnění objemu pěny [l].

## 2.12 Ošetření pěnobetonu

Po vylití pěnobetonu do formy a odformování je možné ovlivnit fyzikální vlastnosti např. ponořením do vody. Což sice zvyšuje pevnost, avšak pro tento materiál kvůli pórovitosti není použití této metody logické. Pro zlepšení makromechanických vlastností lze uchovávat vzorky v plastových sáčcích. Obdobně jako by tomu bylo na stavbě. Pokud necháme palety pěnobetonových tvárnic zabalené v PE folii bude probíhat efekt tzv. zeleného domu (drží vlhkost a teplo z hydratace cementu uvnitř což pomáhá vytvrzování), který pomůže zkrátit dobu potřebnou k ošetření. Folie tedy zabraňuje rapidnímu úbytku vlhkosti a vytváření trhlin [61].

Při výrobě pěnobetonu je nutné dbát i na typ forem. Je rozdíl, pokud uvažujeme vylití přímo do forem o velikosti cihly, nebo pokud uvažujeme jednu velkou formu, která bude nařezána na jednotlivé cihly. Musíme totiž brát v potaz rychlost odformování v závislosti na hydratačním teple.



## 3 Praktická část

Praktická část mé práce je zaměřena na stanovení vybraných makromechanických vlastností pěnobetonového kompozitu s použitím odpadního materiálu – betonových odprašků. Odprašky částečně nahrazují plnivo a částečně hydratují. V práci jsem řešil vliv použití dvou pěn na cementový tmel tvořený cementem s vodou a také použití odpadního materiálu (odprašků).

### 3.1 Použité materiály a návrh složení směsi

Při výrobě vzorků jsem použil portlandský cement CEM I 42,5R z výroby v Radotíně a recyklovaný beton namletý firmou Lavaris z odvodňovacích betonových žlabů s velikostí zrn  $<0,25$  mm. Křivka zrnitosti takto jemně namletého recyklátu odpovídá jemnosti mletí cementu.

Pro výrobu pěny jsem použil dvě pěnotvorné přísady. První pěnotvorná přísada se používá k hašení požárů. Druhá pěnotvorná přísada je průmyslově vyráběná přísada používaná pro stavební aplikace k vylehčování betonu.

Tabulka 17 znázorňuje složení jednotlivých sad. Názvy sad jsem zvolil tak, aby vystihovaly složení směsí. První písmeno odkazuje na to, jestli byl použit pouze cement (C), nebo cement s recyklátem (R) v hmotnostním poměru (0,65:0,35). Číslice v názvu odkazují na součet hmotnosti suché směsi (C+R), tzn. 7,5 znamená 750 g a 10 znamená 1000 g. Zvolil jsem ho proto, že u sad s číslem 7,5 jsem předpokládal nižší hodnoty objemové hmotnosti a nižší hodnoty dalších makromechanických vlastností než u sad s číslem 10. Poslední písmeno naznačuje typ použité pěnotvorné přísady. Pěnotvornou přísadu určenou pro stavební aplikace jsem označil písmenem M a pěnotvornou přísadu určenou k výrobě pěny k hašení požárů jsem označil písmenem H. Sady označené Rref a Cref jsou bez pěnotvorných přísad. Složení vyplývalo hlavně z myšlenky vyzkoušet vliv pěnotvorné přísady na recyklát bez použití dalších přísad či příměsí. Zvolil jsem metodu, při které jsem chtěl docílit u sad s označením 10 co nejvyšší objemové hmotnosti a u sad s označením 7,5 nižší objemové hmotnosti. Pro zamíchání směsi cementového tmelu jsem zvolil dílčí vodní součinitel 0,3. Bez použití plastifikačních přísad byly směsi C stále dobře zpracovatelné. U směsi R se zpracovatelnost zhoršila, nicméně šly stále rozmíchat.

**Tabulka 17 – Složení směsí.**

Směs	cement (C)	recyklát (R)	hmotnost (C+R)	voda k zamíchání	voda přidaná do pěny	záměsová voda	v/c	Pěnotvorná přísada
				cementového tmele (v <sub>1</sub> )	(v <sub>2</sub> )	(v <sub>1</sub> +v <sub>2</sub> )		
<i>jednotky</i>	<i>[g]</i>	<i>[g]</i>	<i>[g]</i>	<i>[g]</i>	<i>[ml]</i>	<i>[ml]</i>	<i>[-]</i>	<i>[ml]</i>
<b>C7,5H</b>	750	0	<b>750</b>	225	75	300	<b>0,4</b>	3,75
<b>C7,5M</b>	750	0	<b>750</b>	225	75	300	<b>0,4</b>	3,75
<b>C10H</b>	1000	0	<b>1000</b>	300	50	350	<b>0,35</b>	2,5
<b>C10M</b>	1000	0	<b>1000</b>	300	50	350	<b>0,35</b>	2,5
<b>R7,5H</b>	487,5	262,5	<b>750</b>	225	75	300	<b>0,4</b>	3,75
<b>R7,5M</b>	487,5	262,5	<b>750</b>	225	75	300	<b>0,4</b>	3,75
<b>R10H</b>	650	350	<b>1000</b>	300	50	350	<b>0,35</b>	2,5
<b>R10M</b>	650	350	<b>1000</b>	300	50	350	<b>0,35</b>	2,5
<b>Cref</b>	1000	0	<b>1000</b>	350	-	350	<b>0,35</b>	-
<b>Rref</b>	650	350	<b>1000</b>	385	-	385	<b>0,385</b>	-

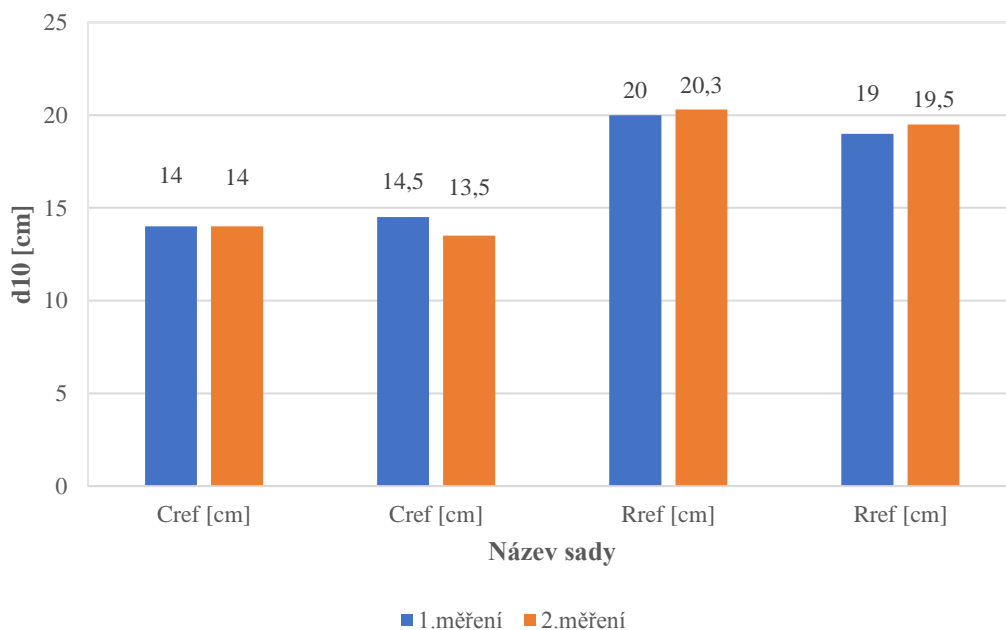
## 3.2 Zpracovatelnost směsi (zkouška rozlitím)

### Výroba cementového tmele pro stanovení zpracovatelnosti

Pro metodu míchání pěnobetonu (pre foaming method) je nejdůležitější, aby směs cementového tmele s vodou šla dobře rozmíchat. Chtěl jsem dosáhnout co nejnižšího vodní součinitele v závislosti na zpracovatelnosti. Pro stanovení zpracovatelnosti jsem použil dva referenční vzorky. U vzorku s recyklátem (Rref) jsem použil vyšší vodní součinitel. Směs jsem připravil smícháním příslušného množství uvedeného materiálu v nádobě s vodou za pomoci vrtačky Bosch a nástavce viz (Obr. 17). Konzistenci čerstvé směsi jsem zjišťoval pomocí zkoušky rozlitím, která zároveň znázorňuje zpracovatelnost. Zpracovatelnost jsem stanovil u dvou referenčních vzorků Cref a Rref. Zkoušku jsem provedl na střešacím stolku dle normy. Před zkouškou jsem očistil vodorovnou skleněnou desku o průměru 300 mm a kovovou formu ve tvaru seříznutého kužele. Forma má výšku  $60 \pm 0,5$  mm. Vnitřní průměr ve spodní části je  $100 \pm 0,5$  mm a vnitřní průměr v horní části  $70 \pm 0,5$  mm. Po očištění zkušební skleněné desky a vnitřního povrchu formy jsem povrchy mírně navlhčil pěnovou houbou. Formu jsem umístil na střed skleněné desky střešacího stolku dle vyznačení pod sklem. Naplnil jsem formu směsí ve dvou vrstvách. Každou vrstvu jsem zhutnil 10 lehkými údery dusadla. Dusadlo bylo z kruhového průřezu o průměru cca 40 mm z nenasákavého materiálu v délce alespoň 20 mm

z celkové délky 200 mm a o hmotnosti  $0,250 \pm 0,015$  kg. Během plnění a hutnění jsem formu přidržel rukou k desce, aby nedošlo nadzvihnutí formy. Po naplnění a zhutnění jsem přebytečnou směs odstranil stěrkou. Po uplynutí 15 s od naplnění formy jsem formu nadzvil kolmo vzhůru. Následně jsem začal střásat. Po 10 střeseních jsem změřil průměr koláče směsi ve dvou na sebe kolmých směrech. Měřil jsem průměr spodní podstavy kužele. Hodnota rozliti se vypočítá jako průměrná hodnota z průměrů koláče ve dvou na sebe kolmých směrech. Výsledná hodnota rozliti je aritmetický průměr hodnot  $d_{10}$  (rozliv po 10 rázech). Musí se provést vždy 2 měření pro každou směs a výsledky se nesmí lišit o více než 10 %. Pokud se výsledky liší více než je stanoveno, je nutné zkoušku opakovat [62; 32].

Porovnáním výsledků rozlivu z referenčních směsí (Obr. 16) bylo zjištěno, že u směsí označených 7,5 a 10 není potřeba pro rozmíchání navyšovat dílčí vodní součinitel. Směs cementového tmele s recyklátem je pro dílčí vodní součinitel dobře zpracovatelná. Proto jsem dále použil u všech směsí dílčí vodní součinitel 0,3.



**Obr. 16 – Hodnoty rozlivu referenčních směsí po 10 setřesech.**

## Pěna

Pro výrobu pěny jsem použil 5 % roztok pěnотvorné přísady s vodou (např. na 50 ml vody použito 2,5 ml pěnотvorné přísady). Roztok jsem míchal v plastové nádobě s pomocí příklepové vrtačky Bosch GSB 21–2 RCT Professional a speciálního příslušenství (metly – Obr. 17). Čas potřebný pro vytvoření pěny bez viditelného odloučeného roztoku jsem stanovil na 30 sekund při nastavení nejnižších otáček (cca  $250 \text{ min}^{-1}$ ).

Stabilitu pěn jsem stanovil na základě pozorování, kde jsem sledoval obě pěny. Vzorky pěny jsem nechal v plastové nádobě po dobu 30 minut. Vykazovaly minimální odloučivost tzn. nezačal se tvořit vodný roztok.



**Obr. 17 – Nástavec na míchání směsi [63] Obr. 18 – Nástavec na míchání pěny.**

V teoretické části jsem popsal celý způsob stanovení stability pěn a zjištění dalších vlastností. Měření nebyla prováděna z toho důvodu, že dle mého názoru není potřeba ověřovat, jestli je z pěnотvorné přísady pro stavební aplikace a pěny od hasičů možno vytvořit pěnu. Dále je určitě podnětné zabývat se stabilitou pěny, ale v případě jejího vmíchání do cementového tmelu stejně záleží na tom, jak bude po vmíchání reagovat. Např. pokud vodný roztok velmi napěním, tak po vmíchání do cementového tmelu může tzv. spadnout a výsledkem je minimální vliv na vylehčení vzorku. Z hlediska odloučivosti a napěnění je problematické s rozumnou přesností změřit tyto veličiny. Uvážím – li, že pěnотvornou přísadu s vodou musím namíchat zvlášť v nádobě a poté pěnu přemístit např. do odměrného válce či nádoby k měření odloučivosti budou tyto hodnoty zkreslené. Dále způsob míchání, tedy použitá metoda vede částečně ke ztrátě roztoku (část roztoku je vlivem odstředivé síly hnána ven z plastové nádoby). Proto byla stabilita pěn zjištěna na základě pozorování.

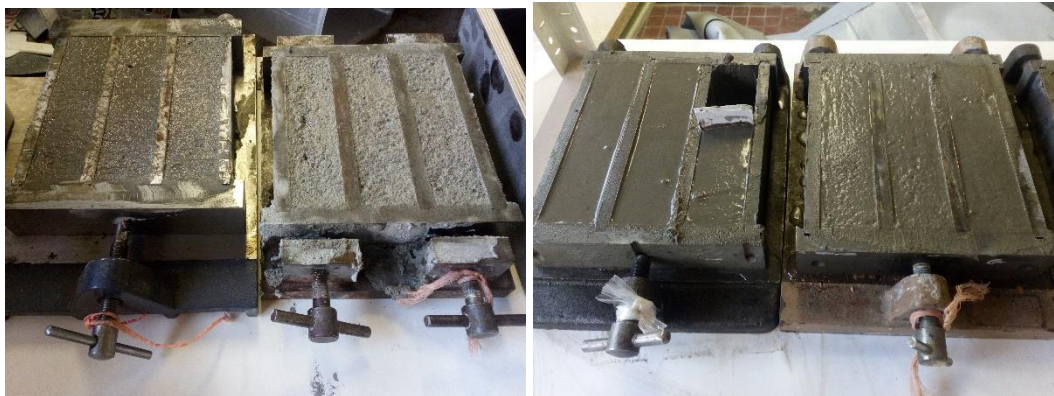
## Míchání směsí

Navázil jsem potřebné suroviny k výrobě pěnobetonu na váze značky T–Scale model S29B–6–MR s minimálním zatížením 20 gramů. Z tohoto důvodu jsem pro odměření objemu pěnotvorné přísady použil jednorázovou injekční stříkačku 2 ml značky Chirana Luer. Popis výroby cementové matrice vylehčené pěnou. V první fázi jsem vždy v plastové nádobě napěnil roztok pěnotvorné přísady s vodou. V druhé fázi jsem zamíchal směs pro výrobu cementového tmele s vodou v další nádobě. K rozmíchání směsi cementového tmele s vodou jsem použil dílčí vodní součinitel 0,3. Což bylo minimální množství vody potřebné k zamíchání směsi bez další přísad např. plastifikátorů. Vodní součinitel jsem počítal jako součet záměsové vody do cementu a vody přidávané k pěnotvorné přísadě.

Poté jsem s pomocí plastové stěrky přemístil pěnu do nádoby s cementovým tmelem. Pomocí vrtačky s nástavcem (Obr. 17) jsem veškerou pěnu vmíchal do cementového tmele. Doba míchání nepřekročila 40 s při nejnižších otáčkách (cca  $250 \text{ min}^{-1}$ ). Doba míchání jsem stanovil vizuálně, dokud nebyla všechna pěna vmíchána.

## Výroba matrice pěnobetonu

Po zamíchání pěny do cementového tmele jsem směs odlil do předem připravených a ošetřených (vymazaných olejem kvůli adhezi) forem (Obr. 19). Následně jsem povrch stáhl ocelovou stěrkou a bez ošetřování ponechal v místnosti s teplotou  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkostí  $45 \pm 2 \%$ . Stejný postup jsem uplatnil pro všechny směsi.



Obr. 19 – Formy s pěnobetonem.

## 3.3 Měření fyzikálních vlastností matric

Po jednom dni od vylití jsem odformoval matrice a následně změřil rozměry a vypočítal objemovou hmotnost a smrštění. Měření jsem prováděl postupně pro 3, 5, 7, 14, 21 a 28 dnů

staré vzorky. Na vybraných vzorcích jsem dále měřil první vlastní frekvence a na jejich základě stanovil výpočtem dynamický modul, dynamický modul pružnosti ve smyku po 3, 5, 7, 14, 21 a 28 dnech od odformování. Po 21 dnech jsem měřil tepelnou vodivost, teplotní vodivost a objemovou měrnou tepelnou kapacitu přístrojem ISOMET 2104. Hmotnost vzorků se výrazně neměnila a vzorky tedy byly dostatečně vysušené. Vlhkost by výrazně ovlivnila výsledky měření. Po 28 dnech jsem na základě ultrazvukové metody vypočítal dynamický modul pružnosti vzorků. a provedl zkoušky ke zjištění pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 28 dnech.

### 3.4 Objemová hmotnost

V průběhu experimentu jsem stanovoval objemové hmotnosti vzorků. Objemovou hmotnost jsem stanovil na matici, jako podíl hmotnosti zjištěné na certifikované váze Bravo B-5026 a objemu matrice dle rovnice V.

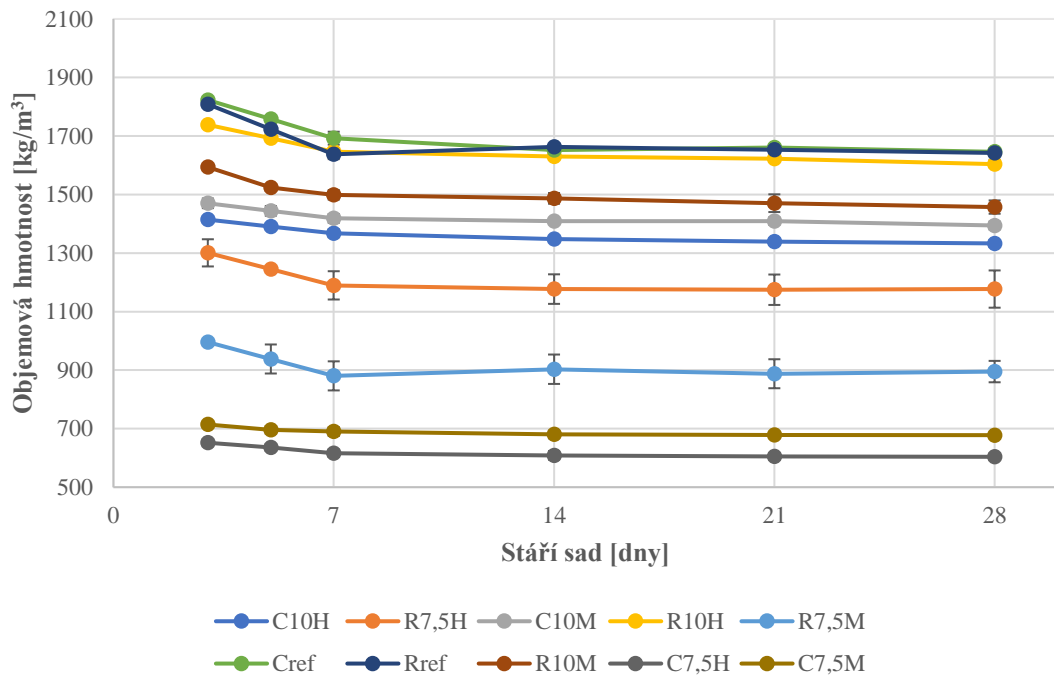
$$\rho = m/V \quad (\text{V})$$

Kde  $\rho$  je objemová hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m$  je hmotnost [ $\text{kg}$ ] a  $V$  je objem vzorku [ $\text{m}^3$ ].

Měření objemu matrice probíhalo tím způsobem, že každý rozměr jsem měřil  $3 \times$  a výsledné rozměry spočítal jako aritmetický průměr. U všech sad jsem počítal i směrodatnou odchylku. Rozměry jsem měřil posuvným digitálním měřítkem s rozsahem 0–200 mm a s přesností 0,01 mm.

Obr. 20 znázorňuje objemové hmotnosti v závislosti na stáří vzorků. Je patrné, že po týdnu od odformování vzorků už se objemová hmotnost prakticky nemění. Výsledné objemové hmotnosti (Tabulka 18) záleží na složení směsí. Nejnižší objemové hmotnosti dosáhla sada C7,5H ( $600 \pm 10$ ) a nejvyšší RefC ( $1650 \pm 10$ ). Z výsledných objemových hmotností vyplývá, že vliv recyklátu ve směsích je prokazatelný. Při porovnání C7,5H a R7,5H je u směsi s recyklátem vyšší objemová hmotnost o 33 %. Při porovnání C7,5M a R7,5M je u směsi s recyklátem vyšší objemová hmotnost o 24 %. Při porovnání C10H a R10H je u směsi s recyklátem vyšší objemová hmotnost o 17 %. Při porovnání C10M a R10M je u směsi s recyklátem vyšší objemová hmotnost o 5 %. Pokud porovnáme objemové hmotnosti referenčních sad (Rref, Cref) tak jsou i přes rozdílný vodní součinitel obdobné. Při míchání směsi cementového tmelu s recyklátem a pěnотvornou přísadou docházelo k viditelnému úniku

vzduchových pórů ze směsi. Konstatují, že přidáním recyklátu do směsi s pěnotvornou přísadou se zvyšují výsledné objemové hmotnosti.



Obr. 20 – Závislost objemové hmotnosti na stáří vzorků.

Tabulka 18 – Objemová hmotnost po 28 dnech.

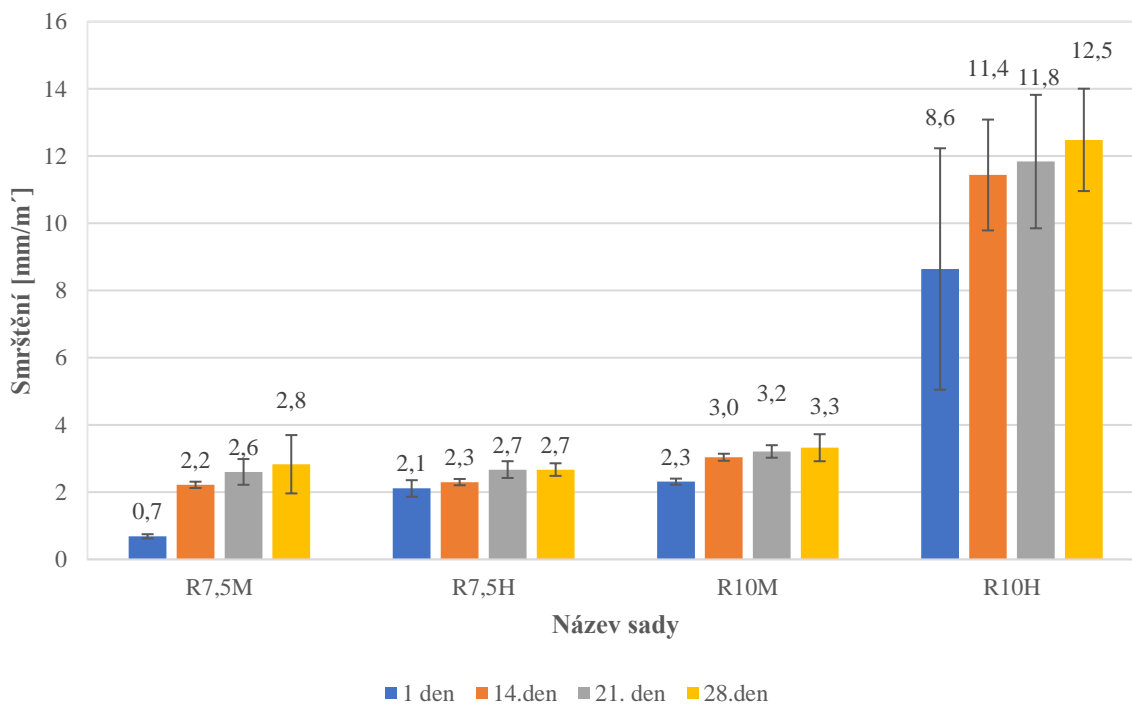
Název sady	Objemová hmotnost v suchém stavu [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>C7,5H</b>	<b>600±10</b>
<b>C7,5M</b>	<b>680±5</b>
<b>R7,5M</b>	<b>900±35</b>
<b>R7,5H</b>	<b>1170±60</b>
<b>C10H</b>	<b>1330±10</b>
<b>C10M</b>	<b>1390±10</b>
<b>R10M</b>	<b>1460±20</b>
<b>R10H</b>	<b>1600±10</b>
<b>Rref</b>	<b>1640±10</b>
<b>Cref</b>	<b>1650±10</b>

### 3.5 Smrštění vzorků

Odformování vzorků proběhlo cca po 24 hodinách tuhnutí a tvrdnutí. Zjišťoval jsem smrštění jednotlivých vzorků. Měření jsem prováděl digitálním posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm. Smrštění jsem počítal jako rozdíl délky sady vzorků a délky formy k daným vzorkům (trámečkům). Zaznamenával jsem hodnoty smrštění po 1, 7, 14, 21 a 28 dnů po odbednění. Výsledné hodnoty smrštění v milimetrech jsem pro přehlednost přepočítal na běžný metr.

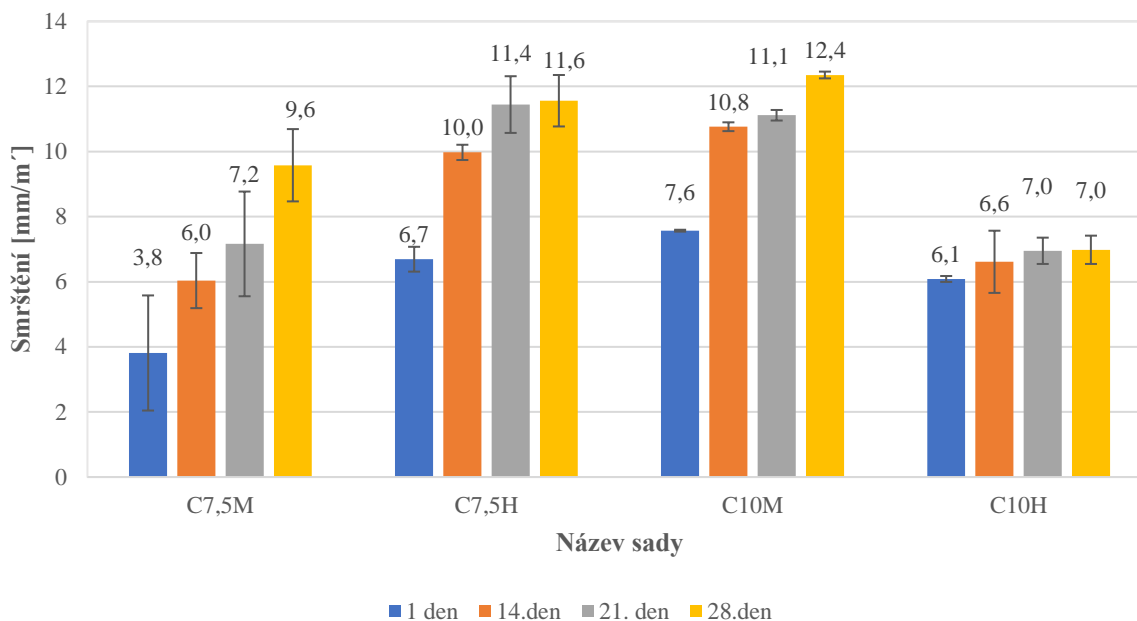
#### Výsledky a diskuze

U většiny vzorků došlo ke zhroucení směsi dovnitř a tím pádem k natlačení směsi do rohů formy. Výsledné hodnoty smrštění tímto mohou být zkresleny. Nicméně po vyhodnocení měření jsem z výsledků konstatoval, že u směsi s recyklátem (Obr. 21) docházelo k menšímu podélnému smrštění než u směsi bez recyklátu (Obr. 22) což odpovídá objemovým hmotnostem a prakticky i vylehčení. Rozdíl mezi smrštěním u sad R k sadám C se v průběhu měření pohybovalo kolem 70 %. Výjimkou byla sada R10H u které došlo většímu podélnému smrštění než u sady C10H, avšak s přihlédnutím k velkým směrodatným odchylkám se přikláním k názoru, že mohlo dojít k chybě měření.



Obr. 21 – Smrštění vzorků s recyklátem v závislosti na stáří vzorků.





**Obr. 22 – Smrštění vzorků bez recyklátu v závislosti na stáří vzorků.**

### 3.6 Zjištění dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou

Dynamický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti ve smyku jsem měřil pomocí rezonanční metody [64] na vzorcích o velikosti  $40 \times 40 \times 160$  mm. Jedná se o nedestruktivní metodu měření. Měřením lze sledovat průběh dynamických modulů pružnosti v čase na stejných vzorcích. Výsledné trendy průběhů mechanických vlastností této metody jsou přesnější než trendy mechanických vlastností zkoumané metodami destruktivními.

#### Metodika měření

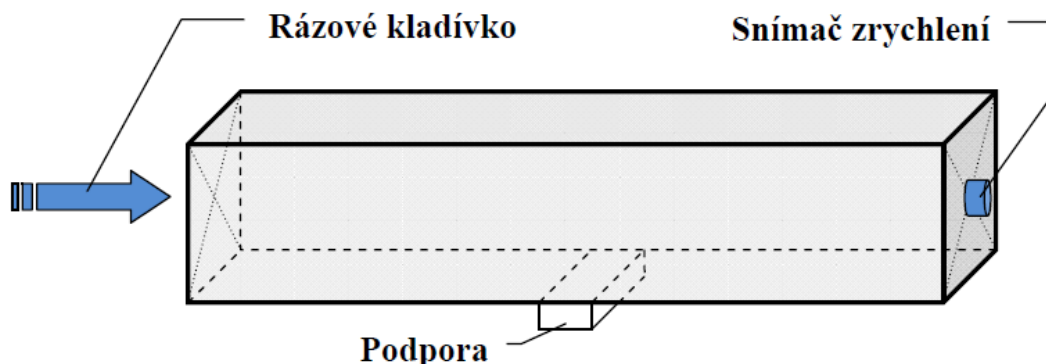
Rezonanční metoda je založena na měření odpovídající první vlastní frekvenci vzorku, rozměrech a objemové hmotnosti vzorku. Měření jsem prováděl s pomocí měřicí sestavy od firmy Brüel & Kjær. Sestává z měřicí stanice Brüel & Kjær typ 3560–B–120, piezoelektrického snímače zrychlení (Brüel & Kjær typ 4519–003) a rázového kladívka (Brüel & Kjær typ 8206) viz Obr. 25. Ke zpracování dat byl použit notebook.

Při zkoušení je nutné mít podpory umístěné tak, aby neomezovaly pohyb vzorků při kmitání v příslušném vlastním tvaru a aby tuhost podepření byla dostatečně nízká oproti tuhosti vzorků. Na podpory byl použit mirelon. Vzorky byly podepřeny vždy v místech uzlových linií základních vlastních tvarů odpovídajících jednotlivým typům kmitání – podélné,

příčné, kroutivé. Po uložení vzorků na podpory jsem na vzorky připevnil piezoelektrický snímač zrychlení v místech maximální amplitudy kmitání daného vlastního tvaru. Pomocí rázového kladívka jsem vnesl budící sílu. Provedl jsem 5 měření každého vzorku v sadě. Měřicí stanice zaznamenala v časové oblasti budící signál a signál odezvy. Program ke zpracování použil rychlou Fourierovu transformaci (dále jen FFT – „Fast Fourier Transform“). Signály se převedly z časové do frekvenční oblasti. Software PULSE LabShop verze 14.0.1 vyhodnotil přenosovou funkci (dále jen FRF – „Frequency Response Function“) jako podíl odezvy a budící síly ve frekvenční oblasti. Maximální amplituda ukazovala, že došlo k rezonanci, ze které se určila vlastní frekvence kmitání vzorku. Ze změřené základní vlastní frekvence příslušného tvaru kmitání, hmotnosti a rozměrů vzorku byl vyhodnocen dynamický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti ve smyku [65]. Určení fyzikálně–mechanických vlastností vzorků je založené na vztazích mezi vlastními frekvencemi kmitání a pružnostními vlastnostmi vzorků. Schéma umístění podpor, snímače zrychlení a místa vnesení budící síly rázovým kladívkem jsou dále uvedeny pro jednotlivé druhy měření základních vlastních frekvencí [64; 32].

### Měření první vlastní frekvence podélného kmitání vzorku

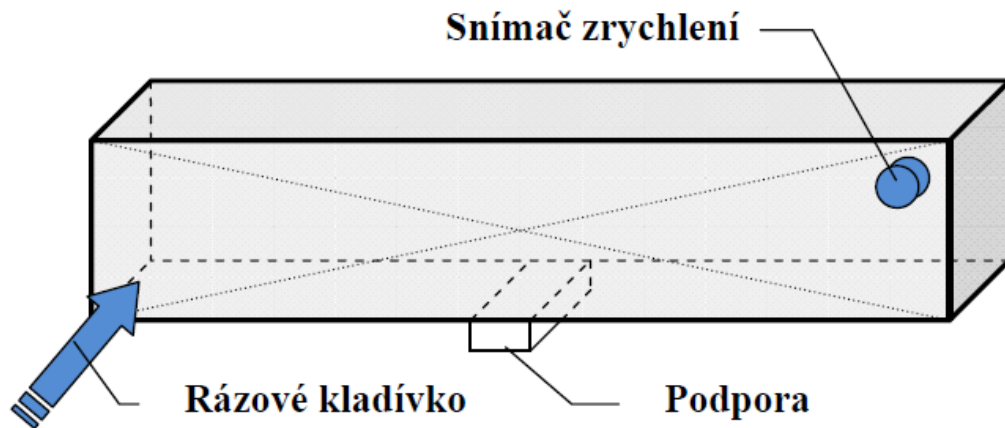
Při měření základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku ve tvaru hranolu je podpora umístěna v polovině své délky. Obr. 23 zobrazuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem. Obr. 25 ukazuje fotografii tohoto měření v praxi. Měřením zjišťujeme první (nejnižší) vlastní frekvenci podélného kmitání vzorku.



Obr. 23 – Měření kmitání podélného [65].

## Měření první vlastní frekvence příčného (ohybového) a krouživého kmitání vzorku

Při měření vlastní frekvence příčného (ohybového) a krouživého neboli torzního kmitání vzorku ve tvaru hranolu je podpora umístěna v polovině své délky. Obr. 24 zobrazuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem.



Obr. 24 – Měření kmitání příčného [65].

## Stanovení dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku z prvních vlastních frekvencí vzorku

Pomocí softwaru PULSE LabShop verze 14.0.1 se vyhodnocuje graf FRF. Z grafu v softwaru jsem vyčetl příslušné základní vlastní frekvence a použil je pro stanovení dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku výpočtem.

Dynamický modul pružnosti byl vypočten z naměřené základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku pomocí vzorce:

$$E_{d,l} = \frac{4 \times l \times m \times f_l^2}{b \times t} \quad (\text{VI})$$

kde  $E_{d,l}$  je dynamický modul pružnosti pro podélné kmitání [Pa],  $l$  je délka vzorku [m],  $m$  je hmotnost vzorku [kg],  $f_l$  je základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku [Hz],  $b$  je šířka vzorku [m] a  $t$  je výška vzorku [m]. Následně jsem dynamický modul pružnosti kontroloval výpočtem z naměřené základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku pomocí vzorce:

$$E_{d,p} = \frac{0,9465 \times l^3 \times m \times f_p^2 \times T_l^1}{b \times t} \quad (\text{VII})$$

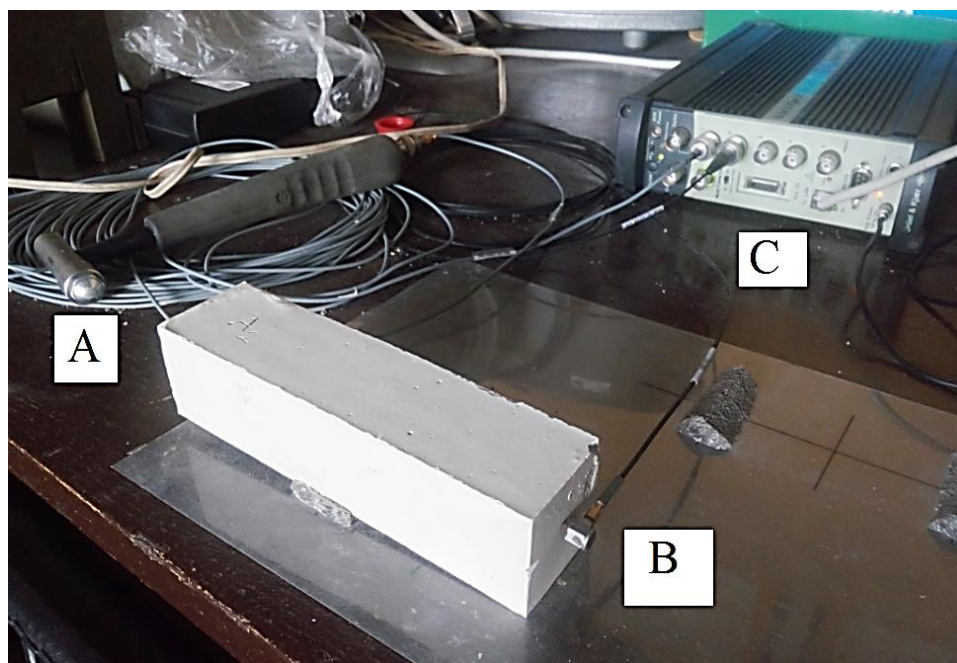
kde  $E_{d,p}$  je dynamický modul pružnosti pro příčné kmitání [Pa],  $l$  je délka vzorku [m],  $m$  je hmotnost vzorku [kg],  $f_p$  je základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku [Hz],  $T_1$  je korekční součinitel zahrnující vliv délky vzorku a Poissonova čísla,  $b$  je šířka vzorku [m] a  $t$  je výška vzorku [m].

Pro výpočet dynamického modulu pružnosti ve smyku byla použita naměřená základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku a byla dosazena do vzorce:

$$G_d = \frac{4 \times l \times m \times f_t^2}{b \times t} \times \frac{B}{1 + A} \quad (\text{VIII})$$

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \times \frac{t}{b} - 2,52 \times (b \times t)^2 + 0,21 \times \left(\frac{t}{b}\right)^6} \quad (\text{IX})$$

kde  $G_d$  je dynamický modul pružnosti ve smyku [Pa],  $l$  je délka vzorku [m],  $m$  je hmotnost vzorku [kg],  $f_t$  je základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku [Hz],  $b$  je šířka vzorku [m],  $t$  je výška vzorku [m],  $A$  je empirický součinitel poměru šířky a výšky vzorku [64; 32; 66].

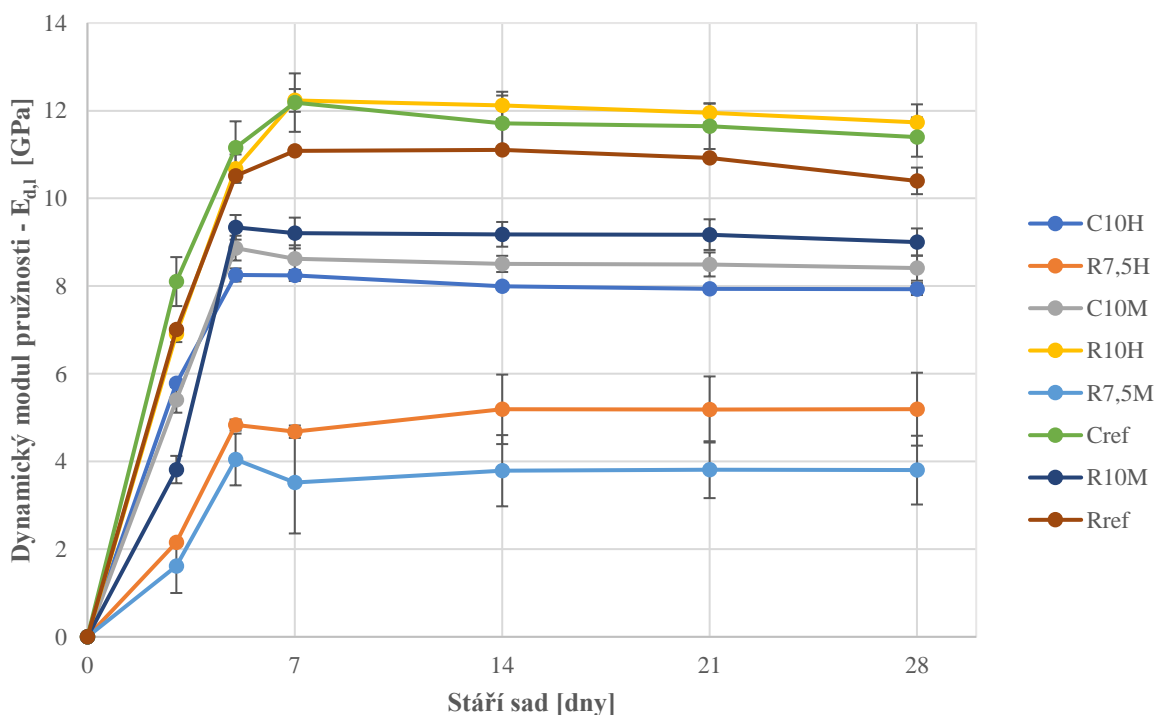


**Obr. 25 – Měřicí sestava Brüel & Kjær (A - rázové kladívko, B - piezoelektrický snímač zrychlení, C - měřicí stanice).**

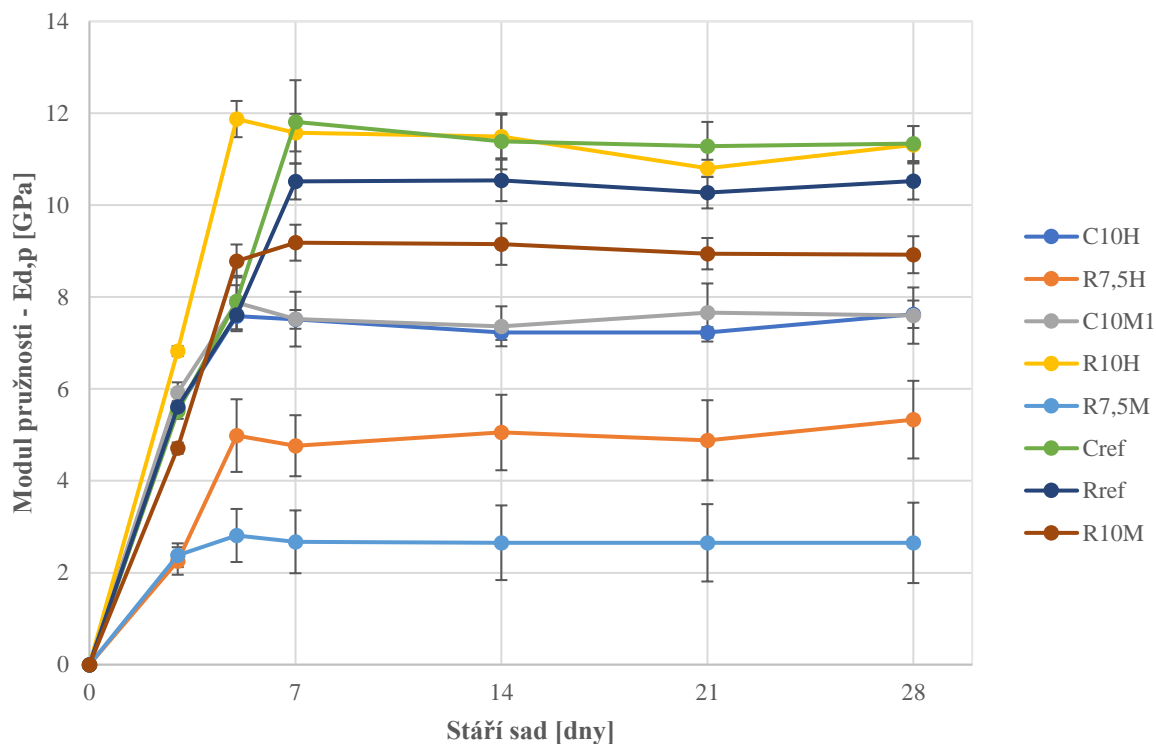
## Výsledky a diskuze

Výsledky jsem zaznamenával v průběhu měření (3., 5., 7., 14., 21., 28. den). Vzhledem ke struktuře materiálu, především pórové struktuře a použité metodě nešlo u části vzorků měření uskutečnit např. Obr. 30, a to i přes očekávané zpevnění vzorků v čase. Při porovnání homogenity vzorků na základě výpočtu modulu pružnosti v podélném směru  $E_{d,l}$  a příčném směru  $E_{d,p}$  jsem zjistil, že u části vzorků rozdíl těchto hodnot přesahuje 0,8 MPa. Vzorky, které se lišily o více než 0,8 MPa jsem do výsledků nezahrnul. Rozdíl v těchto hodnotách odůvodňuji i na základě vizuálního pozorování, kdy jsem na části vzorků pozoroval otevřené póry a celkově necelistvost v příčném směru např. Obr. 31.

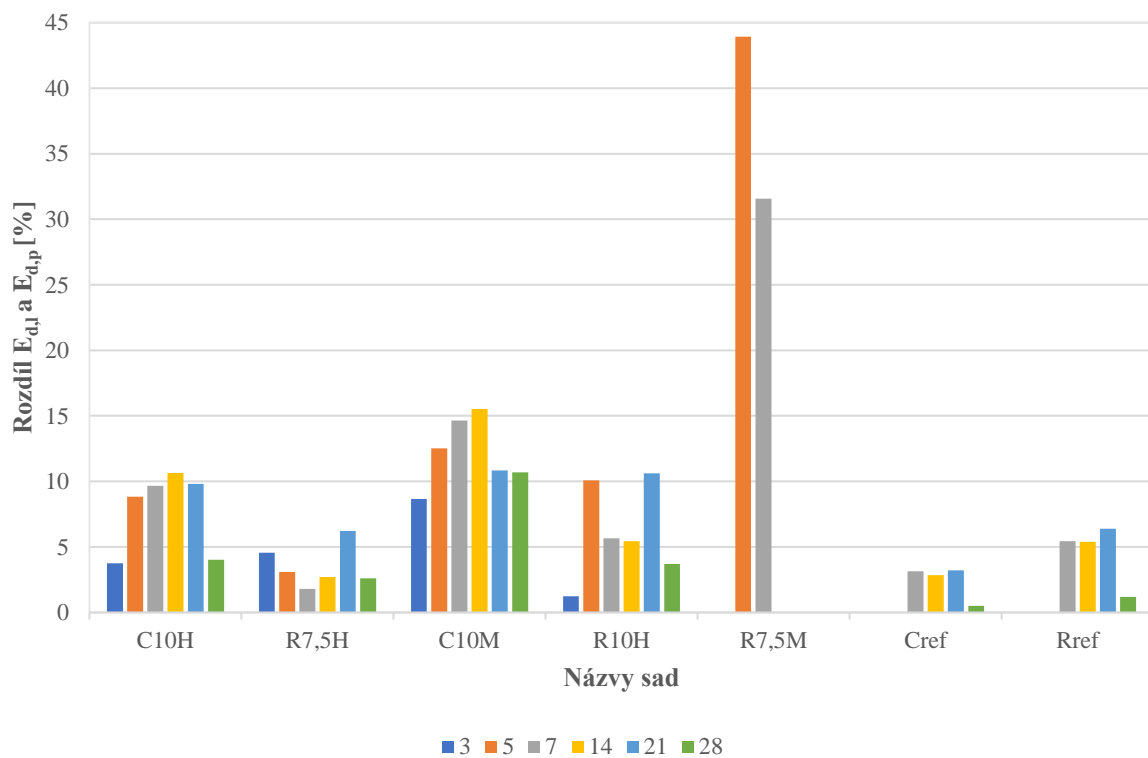
V normě ČSN 73 1372 [67], která prozatím zůstala platná, je uvedeno, že pokud jsou rozdíly měření dynamického modulu v podélném a příčném směru do 10 %, tak je materiál možno považovat za homogenní. Výsledné hodnoty poměrů dynamického modulu pružnosti zjištěného z podélného a příčného kmitání v procentech jsem uvedl v grafu v Obr. 28. Na základě těchto hodnot jsem usoudil, že vzhledem k pórovitostem a necelistvostem povrchu vzorků při měření lze tyto vzorky považovat za homogenní i když došlo u části měření k překročení zmíněných 10 %.



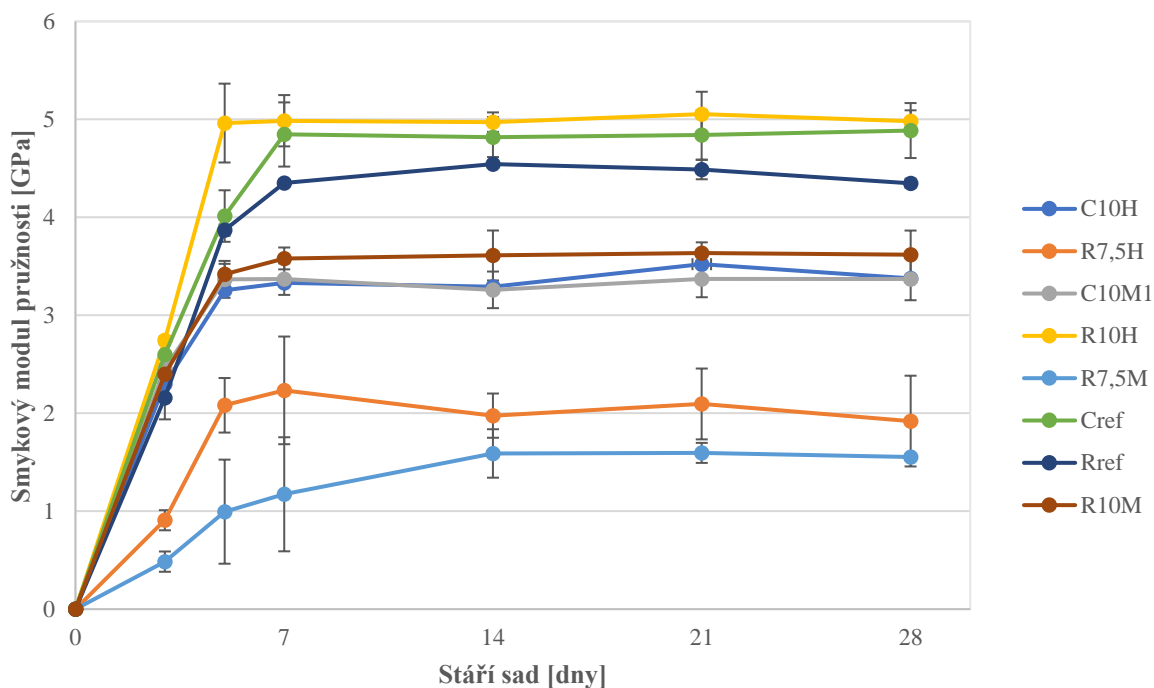
Obr. 26 – Dynamický modul pružnosti  $E_{d,l}$  [GPa].



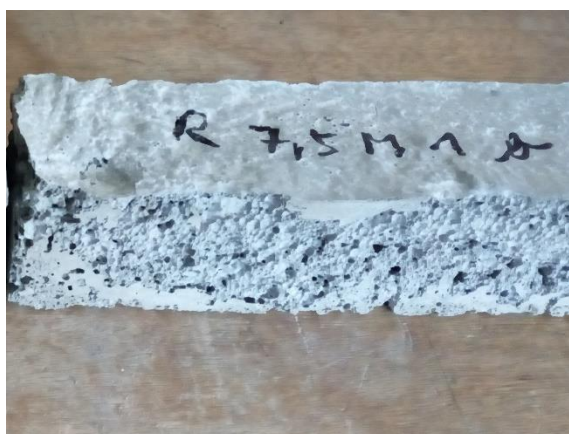
Obr. 27 – Dynamický modul pružnosti  $E_{d,p}$  [GPa].



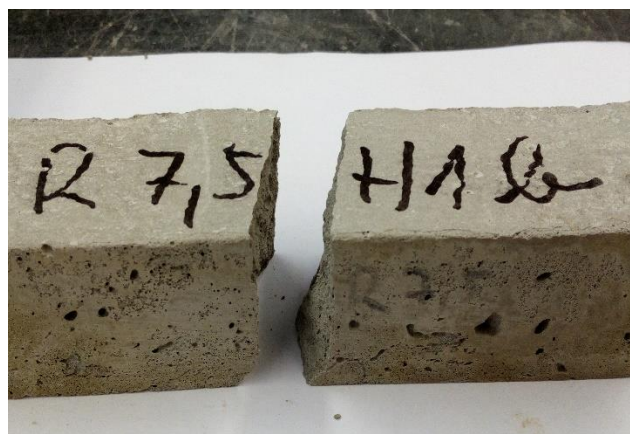
Obr. 28 – Porovnání dynamických modulů pružnosti (rozdíl  $E_{d,l}$  a  $E_{d,p}$  [%]).



Obr. 29 – Dynamický smykový modul pružnosti [GPa].



Obr. 30 – Vzorek ze sady R7,5M.



Obr. 31 – Sada R7,5H.

### 3.7 Zjištění dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou

Metoda se zakládá na stanovení rychlostí šíření ultrazvukového (UZ) vlnění v betonu. Z rychlosti šíření vlnění se určují fyzikální i mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi šířením UZ vlnění a sledovanými vlastnostmi betonu.

Norma ČSN 73 1371 [68] popisuje postup pro hodnocení a zkoušení vlastností obyčejného i hutného betonu. Ostatní druhy betonu a materiály lze zkoušet, nicméně k vyhodnocení je nutno použít těsné korelační vztahy mezi ukazatelem nedestruktivního zkoušení a testováním vlastností.

Doba průchodu  $T_1$  je čas šíření ultrazvukového impulzu vyslaného budičem a přijímaného snímačem při průchodu vloženým betonem.

Rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $V_L$  – rychlost šíření čela svazku vln ultrazvukového vlnění ve zkoušeném betonu.

$$V_L = L/T_1 \quad (\text{X})$$

$T_1$  – čas šíření impulzu podélných UZ vln přes měřící základnu [ $\mu\text{s}$ ]

$L$  – délka měřící základny [mm]

$$E_{cu} = \rho \times V_L^2 \times \frac{1}{k^2} \quad (\text{XI})$$

$E_{cu}$  – dynamický modul pružnosti betonu zjištěný UZ impulzovou metodou [GPa],

$V_L$  – impulzová rychlost [km/s],

$\rho$  – objemová hmotnost materiálu [ $\text{kg/m}^3$ ],

$k$  – součinitel rozměrnosti prostředí ( $k_1, k_2, k_3$ ),

$k_3$  – součinitel rozměrnosti pro trojrozměrné prostředí v závislosti na dynamickém Poissonovu koeficientu ( $\mu_{cu}$ ).

$$k_3^2 = (1 - \mu_{cu}) \div (1 + \mu_{cu}) \times (1 - 2 \times \mu_{cu}) \quad (\text{XII})$$



## Metodika měření

Pro měření byl použit přístroj Pundit Lab+, který vyhovuje požadavkům na zkušební zařízení dle kap. 5 ČSN EN 12504–4:2005 [69]. Přístroj Pundit lab sestává z měřicí stanice (Obr. 32) s automatickým měřením času, budiče a snímače (Obr. 33). Před zahájením měření bylo nutné přístroj zkalibrovat. Budič a snímač (sondy) jsem přiložil k sobě a dle manuálu [70] jsem přístroj zkalibroval. Měření probíhalo za ustálené teploty v požadovaných mezích od 10 do 30 °C. Na sondy jsem pro docílení přiměřeného akustického spojení nanesl mazlavé mýdlo a přiložil sondy k čelům zkoušeného vzorku. Po změření jsem zapisoval čas šíření impulsu podélných vln přes měřicí základnu.



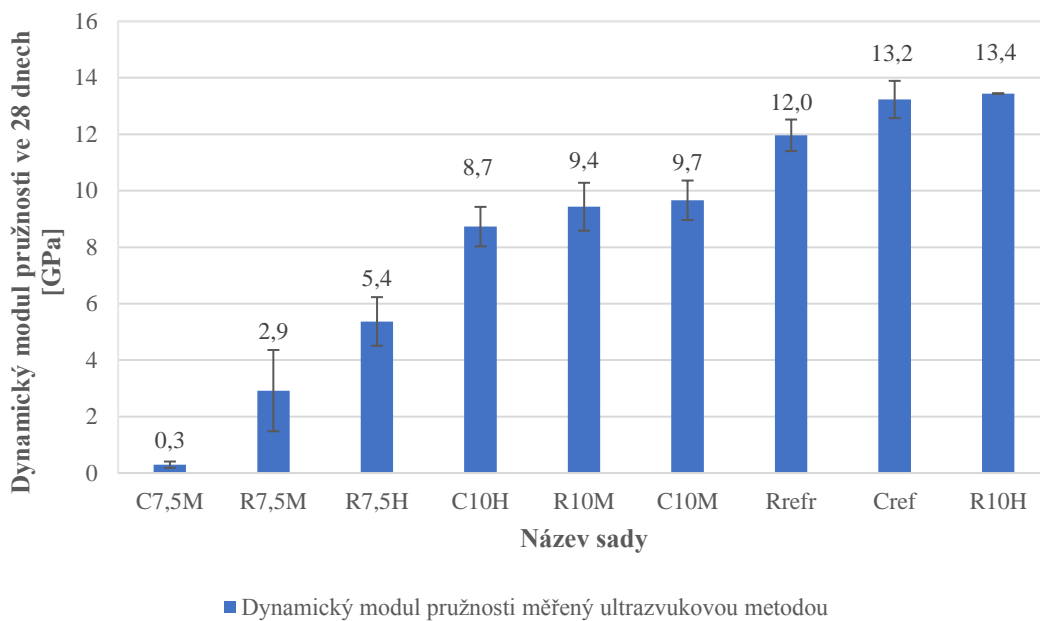
Obr. 32 – Přístroj Pundit Lab+.



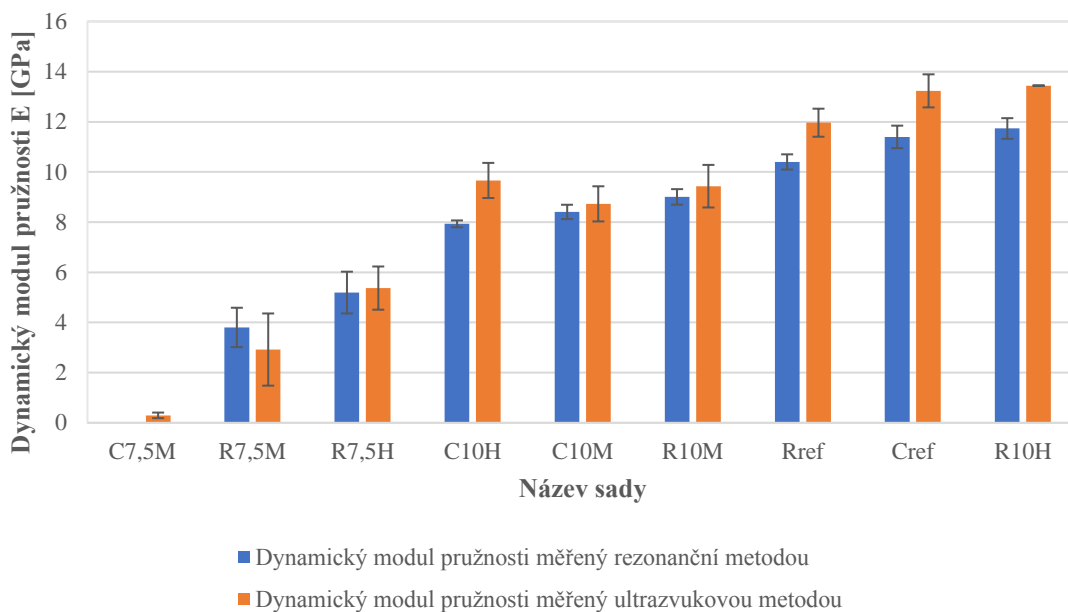
Obr. 33 – Sondy k měření UZ vlnění.

## Výsledky a diskuze

Pomocí ultrazvukové (UZ) metody jsem ověřoval výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti na vzorcích po 28 dnech po odbednění. Výsledné impulzové rychlosti jsem dle normy [67] zaokrouhlil na 0,01 km/s. Použil jsem budič s jmenovitým pracovním kmitočtem 150 kHz. Vzhledem k použité metodě jsem pro výpočet dynamického modulu pružnosti potřeboval hodnotu Poissonova součinitele. Poissonův součinitel jsem spočítal na základě údajů měřených rezonanční metodou. Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou na Obr. 34. Po porovnání výsledků měřených rezonanční a ultrazvukovou metodou po 28 dnech (Obr. 35) jsem došel k závěru, že s přihlédnutím ke směrodatným odchylkám jsou výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti obdobné.



**Obr. 34 – Dynamický modul pružnosti měřený po 28 dnech (UZ metoda).**



**Obr. 35 – Porovnání měření dynamického modulu pružnosti UZ metodou a rezonanční metodou.**

### 3.8 Měření termofyzikálních vlastností

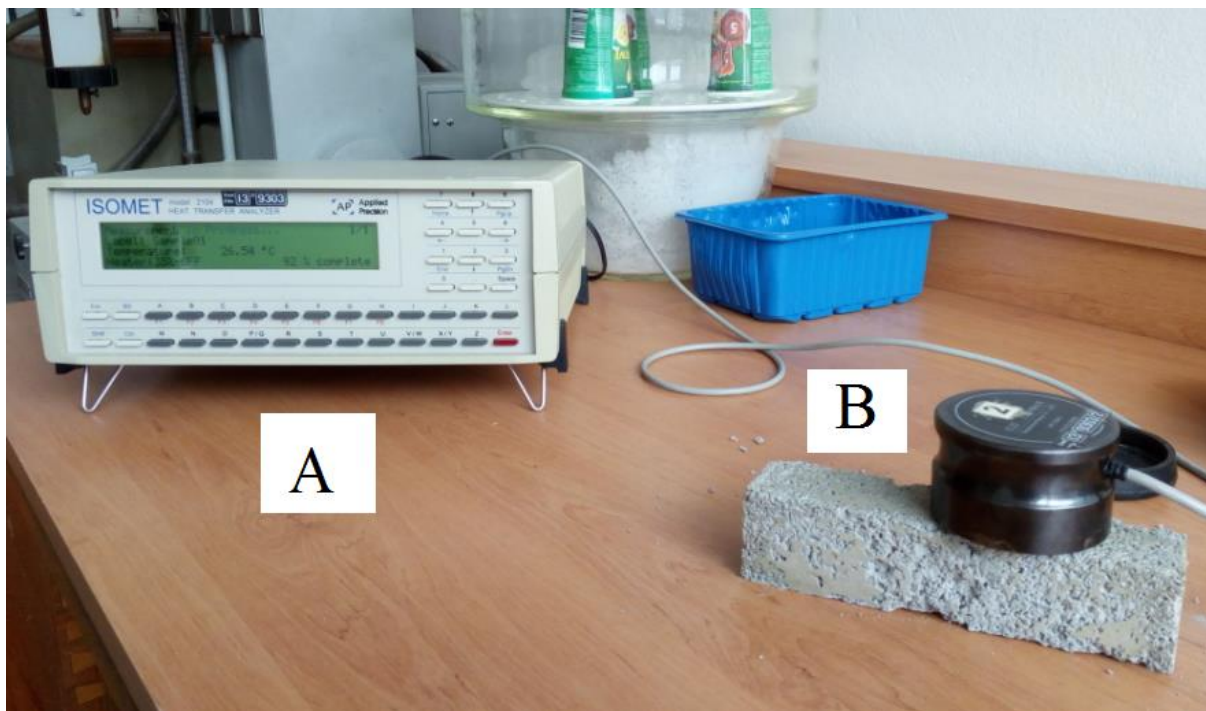
Součinitel tepelné vodivosti, tepelnou difuzivitu a objemovou měrnou tepelnou kapacitu jsem měřil přístrojem ISOMET model 2104 s povrchovou (příložnou) měřicí sondou (Obr. 36) vyrobeného bratislavskou firmou Applied Precision. Přístroj měří na nestacionárním principu tepelnou vodivost, měrnou objemovou tepelnou kapacitu a vypočítá i tepelnou difuzivitu. Jako u všech dynamických metod měření tepelných veličin, přesnost měření je i zde poměrně nízká – odchylka proti metodám stacionárním činí až 15 %. Objekty se mohou nacházet v teplotním intervalu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Povrchová sonda měla rozsah měřicí stupnice od 0,3 do 2,00  $\text{W}/\text{m}\times\text{K}$ . Dokáže změřit i nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Nejnižší hodnotu objemové měrné tepelné kapacity přístroj změřil  $1,48\times 10^6$ . Vzorke s nižší hodnotou měrné tepelné kapacity sonda neměřila.

Měření je založené na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota je vzorkována a jako funkce času přímo vyhodnocena pomocí polynomiální regrese. Koeficienty získané touto regresí jsou použity k výpočtu měřených veličin [71; 72]. Dle sdělení zástupce vedoucího Katedry fyziky na ČVUT FSv doc.Ing. Petra Semeráka, Ph.D. jsou přístroje tohoto výrobce využívající nestacionární měřicí metodu používány minimálně v 80 % laboratoří v ČR.

#### Metodika měření

Postup měření byl následující. Všechny vzorky jsem při měření otočil podstavou vzhůru kvůli zajištění rovinnosti povrchu. U většiny vzorků totiž po ztuhnutí došlo k průhybu vrchní části. Pokaždé jsem důkladně očistil sondu i zkoušený vzorek od jemných částic ze vzorků a zajistil co nejlepší podmínky k měření. Na takto připravený vzorek jsem umístil měřicí sondu. Každé měření trvalo cca 15 minut. Při měření byly v místnosti obdobné tepelné a vlhkostní podmínky. Zkonstatoval jsem, že vzhledem k velikosti styčné plochy měřicí sondy by bylo lepší používat k měření vzorky s minimální plochou  $5\times 5\text{ cm}$ .



**Obr. 36 – Měřicí sestava ISOMET 2104 (A - řídicí stanice, B - měřicí sonda).**

### **Výsledky a diskuze**

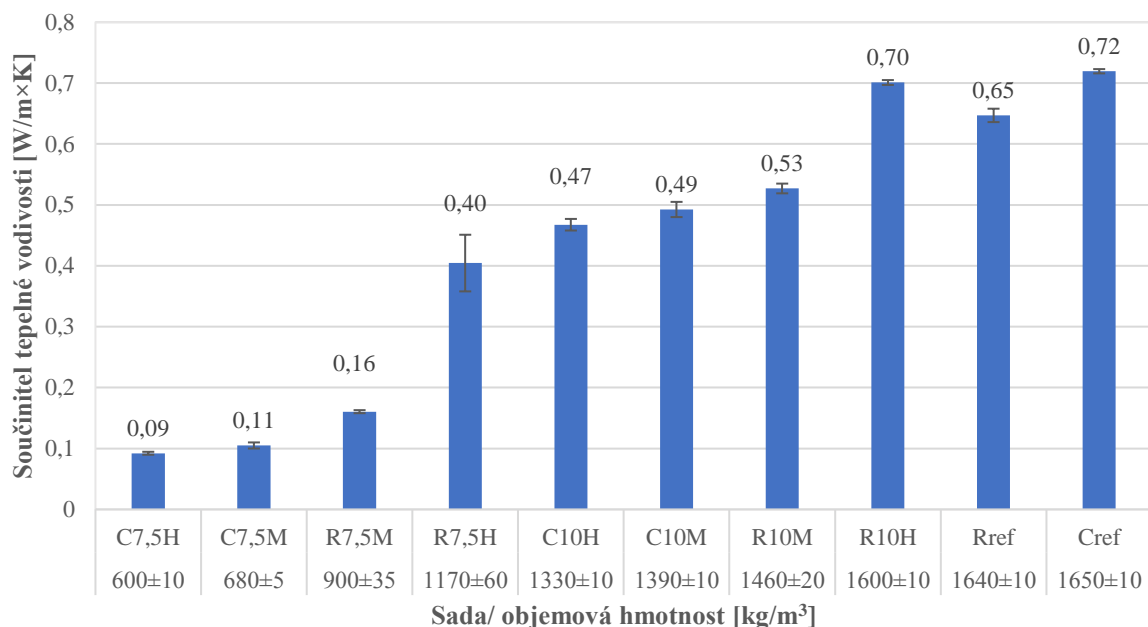
Měření jsem prováděl 21 dní po odformování. V této době se už výrazně neměnila objemová hmotnost vzorků. Z každé sady sady jsem vybral jeden reprezentativní vzorek. Hlavním kritériem byla co největší styčná plocha s měřicí sondou, tedy co možná nejméně viditelných otevřených pórů. Měření na vybraných vzorcích jsem prováděl třikrát.

Rozdíly součinitele tepelné vodivosti se pohybovaly od 1 do 9 %, avšak u vzorků více napěnených (R7,5; C7,5) byl rozptyl větší a to od 22 do 39 %. Konečnou tepelnou vodivost jsem vypočítal jako průměr ze tří měření a vypočítal jsem i směrodatnou odchylku.

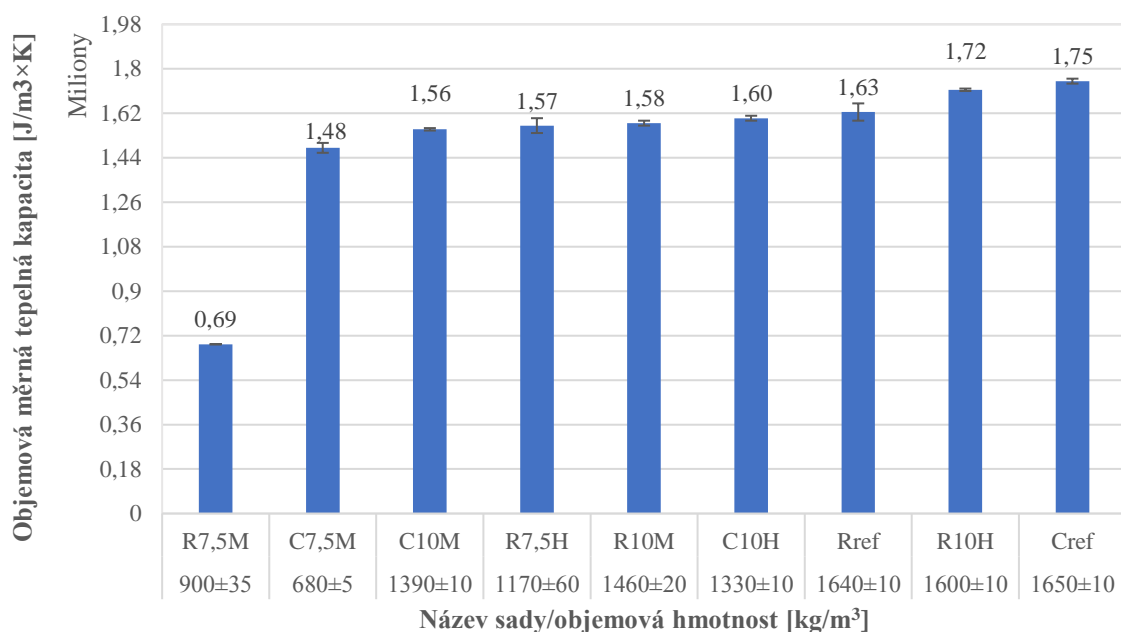
Při měření měrné tepelné kapacity nebyla sondou část vzorků kvůli rozsahu sondy zjištěna. Rozdíly součinitele objemové měrné tepelné kapacity se pohybovaly od 0,6 do 4,4 %. Konečnou objemovou měrnou tepelnou kapacitu (Obr. 38) jsem vypočítal jako průměr ze tří měření a vypočítal jsem i směrodatnou odchylku. Dále jsem zaznamenal tepelnou difuzivitu, která vychází ze součinitele tepelné vodivosti a měrné objemové hmotnosti (Obr. 39).

Porovnáním s výsledky součinitele tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti, které vypracoval Ganesan et al. [54] jsou výsledné hodnoty sad pro obj. hm. 700 kg/m<sup>3</sup> cca o 100 % nižší, pro obj. hm. 1000 kg/m<sup>3</sup> cca o 96 % nižší a pro obj. hm. 1400 kg/m<sup>3</sup> cca o 48 % nižší.

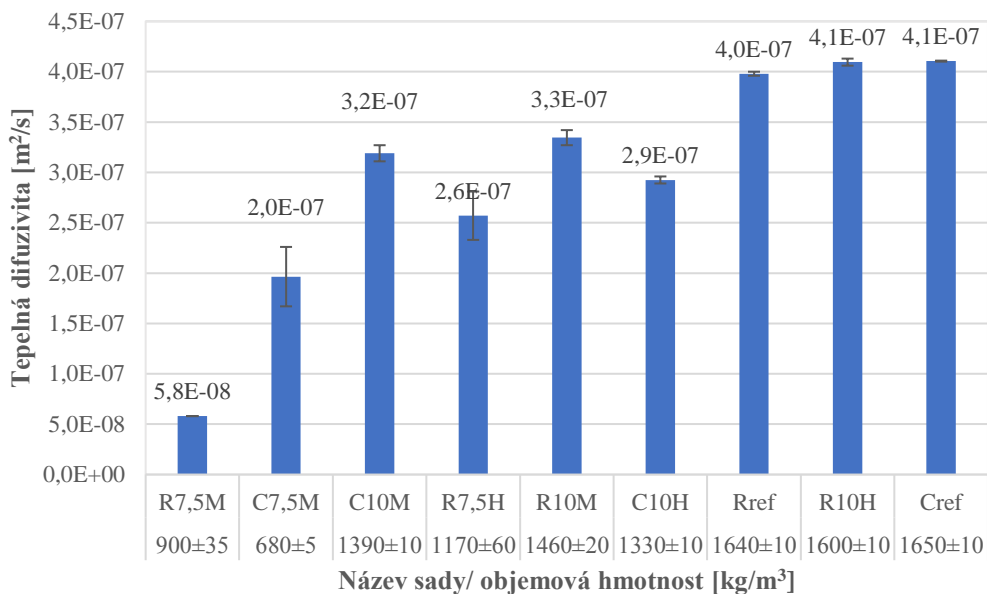
Porovnáním s výsledky součinitele tepelné vodivosti pro cementové směsi bez vylehčení s obdobným vodním součinitelem měly referenční sady vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Sada Cref o 22 % a Rref o 13,84 %.



**Obr. 37 – Součinitel tepelné vodivosti měřený po 28 dnech.**



**Obr. 38 – Měrná objemová tepelná kapacita měřená po 28 dnech.**



**Obr. 39 – Tepelná difuzivita měřená po 28 dnech.**

### 3.9 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu vyjadřuje maximální napětí v průřezu vzorku, které je vyvoláno ohybovým momentem krátce před porušením vzorku. Pevnost v tahu za ohybu vzorků pěnobetonu byla zkoušena destruktivní metodou – tříbodovým ohybem (Obr. 40), a to na vzorcích o velikosti 40 × 40 × 160 mm. Testování proběhlo po 28 dnech od vylití do forem. Zbylé části vzorků jsem použil pro testování pevnosti v tlaku.

#### Metodika měření

Pevnost v tahu za ohybu jsem měřil na měřicím přístroji FP100. Stroj má rozsah zatěžovací síly od 0 kN do 100 kN a pro zatežování jsem zvolil konstantní rychlost posunu 0,5 mm/min. Vzorky jsem zatěžoval kolmo na směr vylití a zatežovací síla působila uprostřed rozpětí vzorku. Vzdálenost nosných podpor zkoušených vzorků byla 100 mm. Vzorky jsem zatěžoval až do úplného porušení. Zaznamenávala se zatěžovací síla, čas a deformace vzorku.

Vzorec pro stanovení ohybového momentu:

$$M = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \text{ [kNm]}, \quad (\text{XIII})$$

kde  $F$  je zatěžovací síla [kN] a  $L$  je rozpětí podpor [m].

Průřezový modul  $W$  [m<sup>3</sup>] pro obdélníkový průřez:

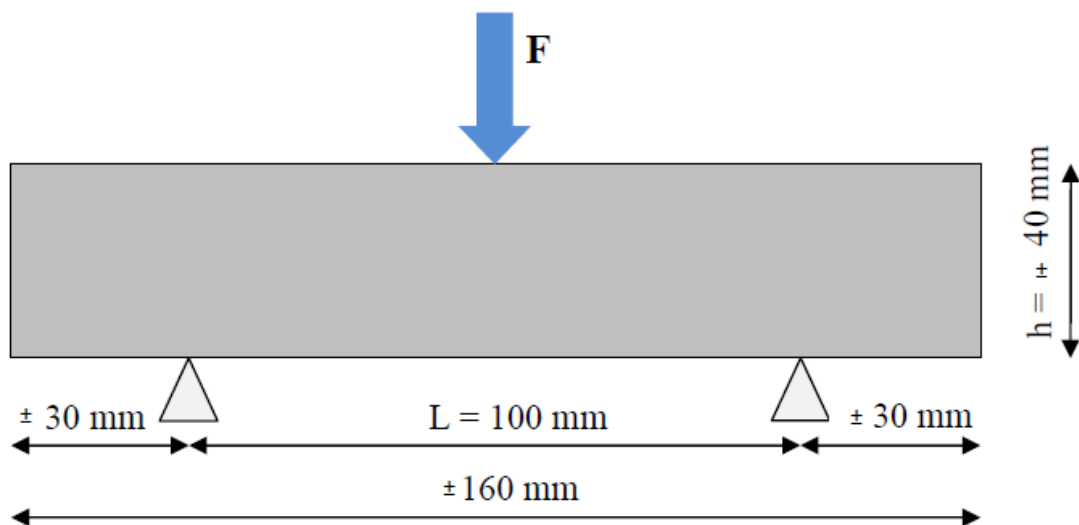
$$W = \frac{1}{6} \times b \times h^2 \text{ [m}^3\text{]}, \quad (\text{XIV})$$

kde  $b$  je šířka zkušební vzorku [m] a  $h$  je výška zkušební vzorku [m].

Pevnost v tahu za ohybu se stanoví ze vzorce pro napětí:

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ [MPa]}, \quad (\text{XV})$$

kde  $M$  je ohybový moment uprostřed rozpětí [kNm],  $W$  je průřezový modul [m<sup>3</sup>] a  $\sigma$  je napětí [MPa]. Výsledná pevnost v tahu za ohybu byla stanovena pro každou sadu vzorků, a to aritmetickým průměrem z daného počtu měření. Dále jsem spočítal směrodatnou odchylku.

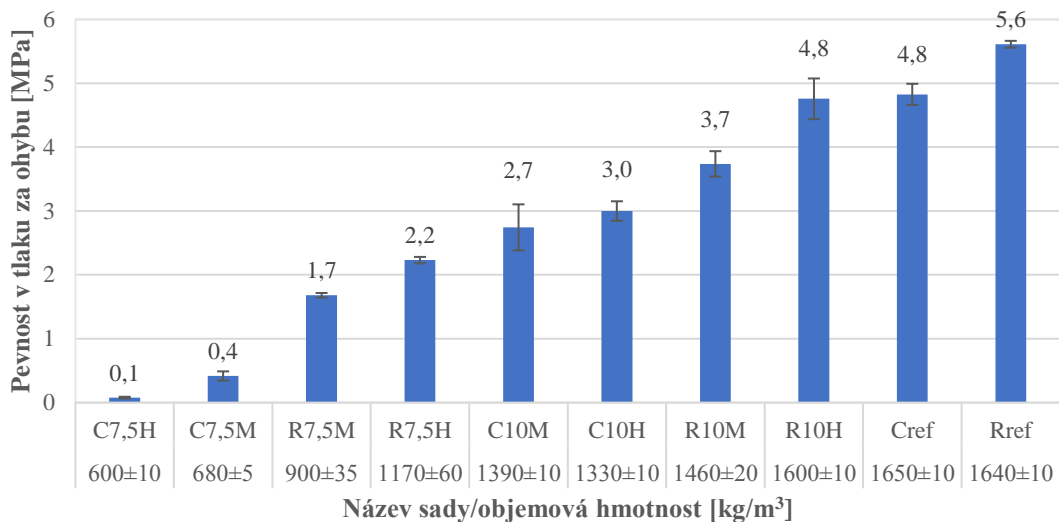


**Obr. 40 – Schéma zatežovací zkoušky pro tříbodový ohyb [32].**

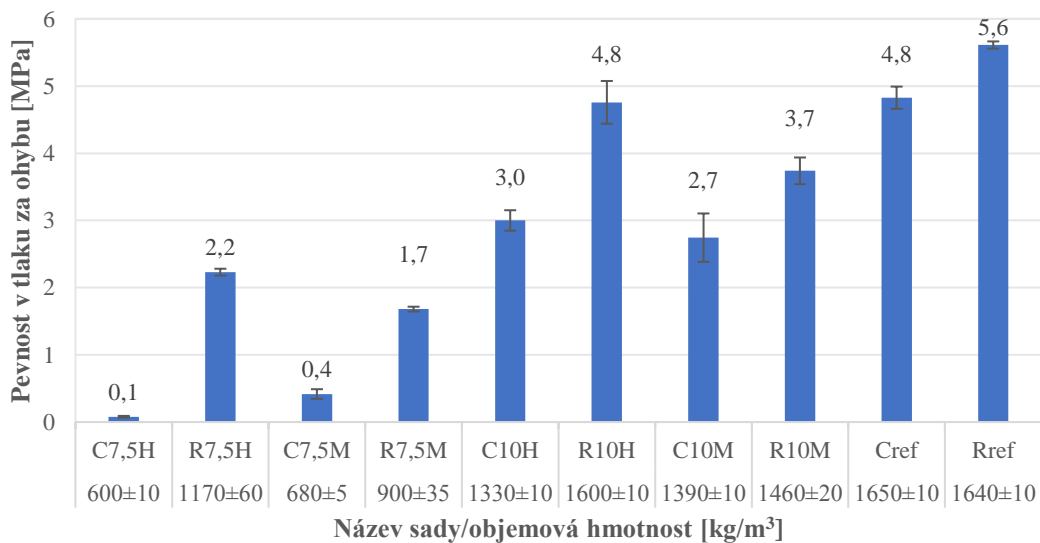
## Výsledky

Vliv na pevnost v tlaku za ohybu má složení směsí. Výsledky zejména závisí na jejich objemové hmotnosti (Obr. 41). Dále porovnávám sady obdobného složení (bez použití recyklátu a s použitím recyklátu) (Obr. 46). Při porovnání sady C7,5H a sady R7,5H je rozdíl pevnosti v tlaku 96 %. Při porovnání sady C7,5M a sady R7,5M je rozdíl pevnosti v tlaku 75 %.

Při porovnání sady C10H a sady R10H je rozdíl pevnosti v tlaku 37 %. Při porovnání sady C10M a sady R10M je rozdíl pevnosti v tlaku pouze 27 %. Při porovnání sady Cref a Rref je rozdíl pevnosti v tlaku 14 %. Po zhodnocení těchto výsledků je zřejmé, že při použití směsi s recyklátem dochází k menšímu vylehčení což má vliv na celkovou pevnost sad za ohybu. Nejnižší pevnosti v tlaku za ohybu dosáhla sada C7,5H (0,1 MPa) a nejvyšší Rref (5,6 MPa).

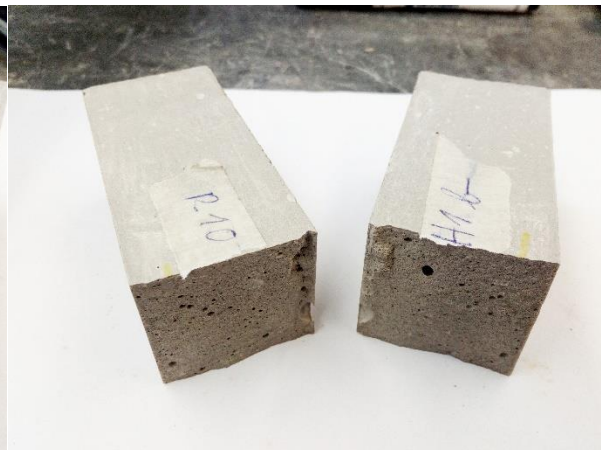
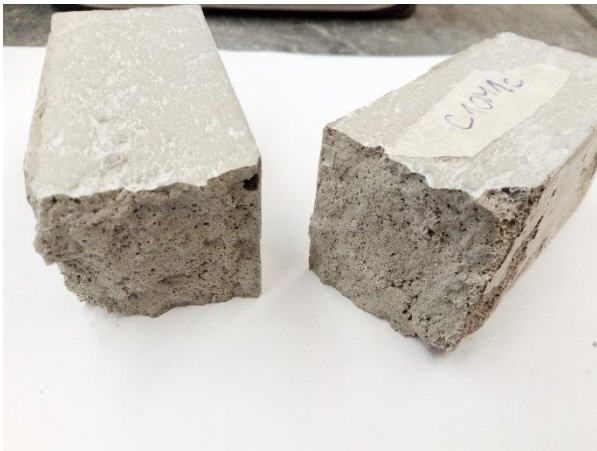


**Obr. 41 – Pevnost v tlaku za ohybu po 28 dnech.**



**Obr. 42 – Pevnost v tlaku za ohybu po 28 dnech (seřazeno dle porovnávaných sad).**







Obr. 43 - Sada R7,5H; C7,5M; R7,5M; R7,5H; C10M; C10H; R10M; R10H; Rref a Cref po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (řazeno dle objemové hmotnosti – vzestupně).

### 3.10 Pevnost v tlaku

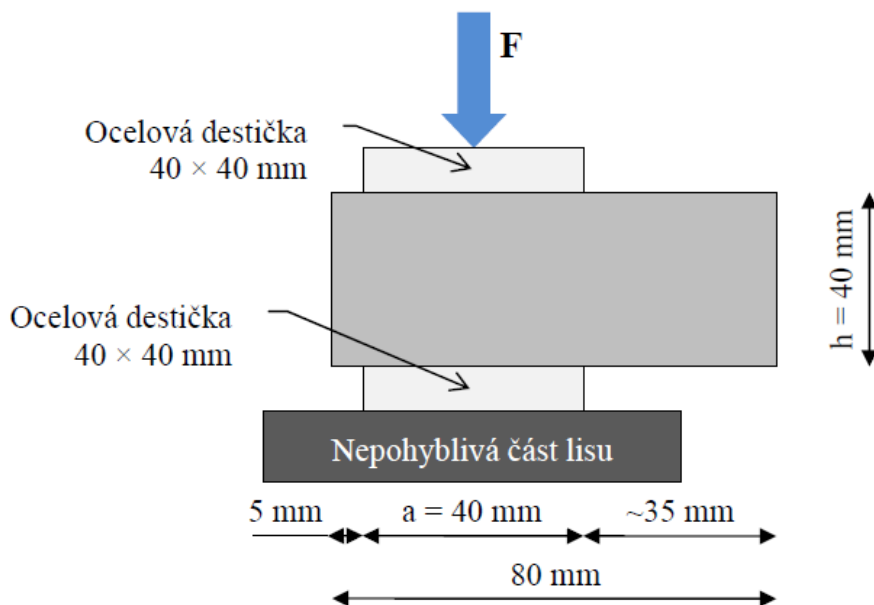
Pevnost v tlaku jsem měřil jednoosou zkouškou pevnosti v tlaku (v normálovém směru) a to na vzorcích o velikosti  $40 \times 40 \times 80$  mm. Stáří vzorků bylo 28 dní od vylití a byly k němu použity vzorky z měření pevnosti v tahu za ohybu.

#### Metodika měření

Pevnost v tlaku jsem měřil na měřicím přístroji FP100 jednoosou zkouškou pevnosti v tlaku. Stroj má rozsah zatěžovací síly od 0 kN do 100 kN a pro zatežování jsem zvolil konstantní rychlost posunu 1 mm/min. Vzorky jsem zatěžoval dle Obr. 44 kolmo na delší rozměr části vzorku, které zbyly ze zkoušení pevnosti v tahu za ohybu. Zatežovací síla působila na vzorek o rozměrech  $40 \times 40$  mm přes ocelovou destičku o rozměrech  $40 \times 40$  mm. Vzorky jsem zatěžoval až do úplného porušení. Zaznamenával se časový průběh zatěžovací síly a svislého posunu. Stanovení pevnosti v tlaku jsem provedl s pomocí vzorce pro napětí v tlaku:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}, \quad (\text{XVI})$$

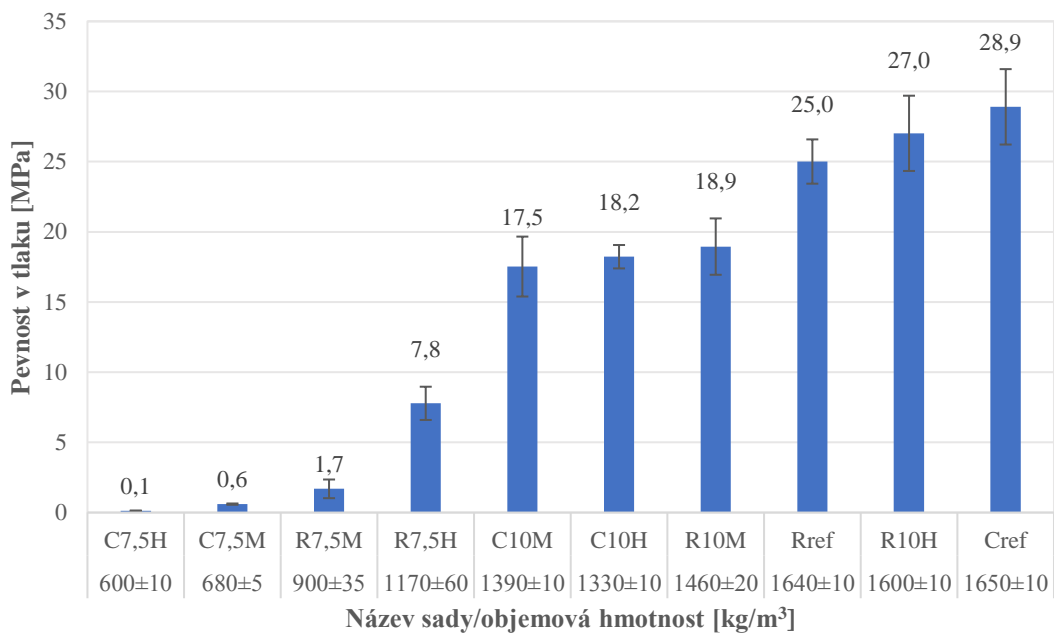
kde  $F$  je zatěžovací síla [kN],  $A$  je zatěžovací plocha (plocha ocelové roznášecí destičky) [m<sup>2</sup>] a  $\sigma$  je napětí v tlaku (pevnost v tlaku) [MPa].



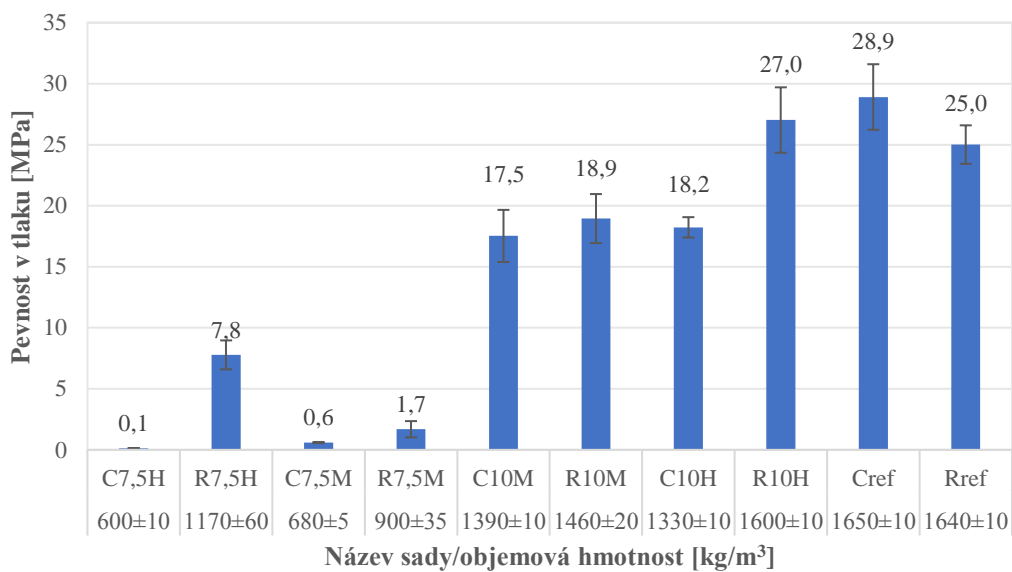
**Obr. 44 – Schéma zatěžování při zkoušce v tlaku [32].**

## Výsledky

Vliv na pevnost v tlaku má složení směsí, zejména závisí na jejich objemové hmotnosti (Obr. 45). Dále porovnávám sady obdobného složení (bez použití recyklátu a s použitím recyklátu) (Obr. 46). Při porovnání sady C7,5H a sady R7,5H je rozdíl pevnosti v tlaku 98 %. Při porovnání sady C7,5M a sady R7,5M je rozdíl pevnosti v tlaku 64 %. Při porovnání sady C10H a sady R10H je rozdíl pevnosti v tlaku 32 %. Při porovnání sady C10M a sady R10M je rozdíl pevnosti v tlaku pouze 7 %. Při porovnání sady Cref a Rref je rozdíl pevnosti v tlaku 15 %. Po zhodnocení těchto výsledků je zřejmé, že při použití směsí s recyklátem dochází k menšímu vylehčení což má vliv na celkovou pevnost sad v tlaku. Nejnižší pevnosti v tlaku dosáhla sada C7,5H (0,1 MPa) a nejvyšší Cref (28,9 MPa).



**Obr. 45 – Pevnost v tlaku měřená po 28 dnech.**



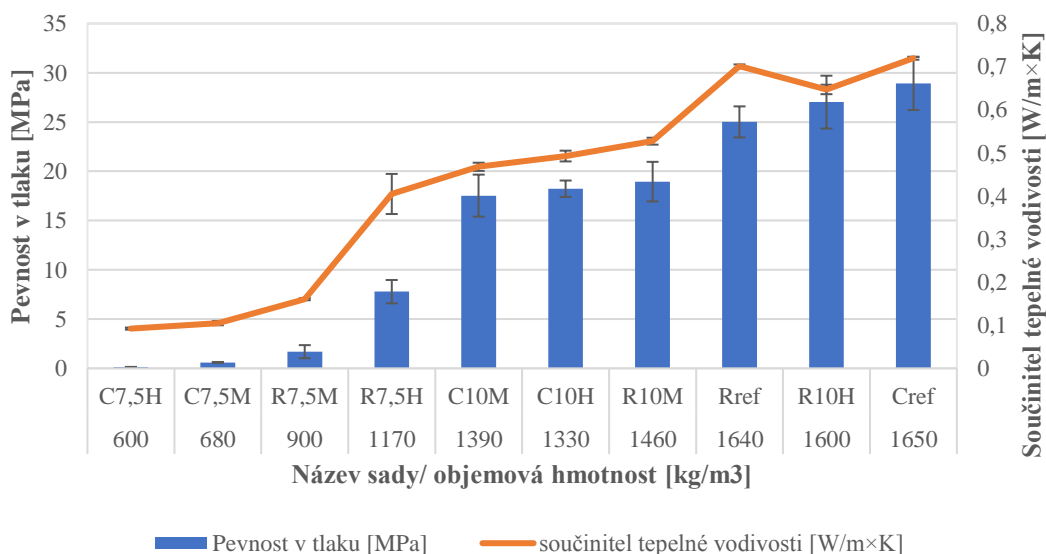
**Obr. 46 – Pevnost v tlaku (seřazeno dle porovnávaných sad).**

## 4 Závěr

Předložená práce měla za úkol posoudit možné využití recyklátu (betonových odprašků) s vylehčením za pomoci pěnotvorných přísad. Ověřoval jsem a porovnával vliv recyklátu z odpadních žlabů na matrice vylehčené dvěma pěnotvornými přísadami s vylehčenými matricemi bez recyklátu. Byla použita přísada používaná ve stavebnictví a přísada k výrobě pěny určené k hašení požárů. Z naměřených hodnot a výsledků lze vyvodit následující závěry:

- pevnost v tlaku závisí hlavně na objemové hmotnosti a u sad s recyklátem jsou hodnoty objemové hmotnosti vyšší. Dále u směsí s recyklátem usuzuji, že čím větší je objem pěny vmíchávané do cementového tmele tím recyklát významněji ovlivňuje pevnost v tlaku a objemovou hmotnost.
- sledované termofyzikální vlastnosti jednotlivých sad závisí hlavně na objemové hmotnosti, tedy jejich vylehčení. Obr. 47 ukazuje pevnost v tlaku a součinitel tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti. U sady C7,5H jsem naměřil hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,09 W/m×K. Konstatuji ale, že použitá metoda může vykazovat odchylky až 15% oproti metodám stacionárním [73].
- smrštění jednotlivých sad závisí na objemové hmotnosti a u sad označených R (s recyklátem) dochází k menšímu smrštění než u sad C (bez recyklátu).

Výsledky a postupy v této práci mohou posloužit v dalším výzkumu vlivu recyklátu na vylehčení matric, lze např. dále upravovat složení přidáváním příměsí a přísad.



**Obr. 47 – Závislost pevnosti v tlaku a součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti.**



## 5 Citovaná literatura

- [1] POLÁK, František a Pavel GORECKY. VÝROBA STAVEBNÍCH PRVKŮ A SMĚSÍ Z INERTNÍCH A DEMOLIČNÍCH ODPADŮ. In: *RECYCLING 2016 - Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. [online] Dostupné z :  
[http://www.arasm.cz/dok/Sbornik\\_RECYCLING\\_2016.pdf](http://www.arasm.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2016.pdf). Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Asociací pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, 2016, s. 28. ISBN 978-80-214-5331-9.
- [2] Kohoutková. *Index of /www/prochja2/YTBK* [online, přednáška]. 2015 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z:  
[http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska\\_10\\_2015.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_10_2015.pdf)
- [3] DE SCHEPPER, Mieke, Ruben SNELLINGS, Klaartje DE BUYSSER, Isabel VAN DRIESSCHE a Nele DE BELIE. The hydration of cement regenerated from Completely Recyclable Concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **60**, 33-41 [cit. 2017-01-30]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.067. ISSN 09500618. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181400230X>
- [4] POON, C.S, Z.H SHUI a L LAM. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials* [online]. 2004, **18**(6), 461-468 [cit. 2017-01-30]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005. ISSN 09500618. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061804000388>
- [5] PAVLŮ, Tereza, Magdaléna ŠEFFLOVÁ a Jan OTÝS. POROVNÁNÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH DOPADŮ BETONŮ Z PŘÍRODNÍHO A RECYKLOVANÉHO KAMENIVA. In: *RECYCLING 2016 - Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. [online] Dostupné z :[http://www.arasm.cz/dok/Sbornik\\_RECYCLING\\_2016.pdf](http://www.arasm.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2016.pdf). Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Asociací pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, 2016, s. 98. ISBN 78-80-214-5331-9.

- [6] Stroje používané pro recyklaci stavebního odpadu: Recyklační linky. In: *Stavební stroje* [online]. Brno, Veverčí: VUT, b.r. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: [http://work.adamna.net/stavebni\\_stroj/images/Prednaska\\_10/Stacionarni\\_Relinka/obr10a-resta.cz1.jpeg](http://work.adamna.net/stavebni_stroj/images/Prednaska_10/Stacionarni_Relinka/obr10a-resta.cz1.jpeg)
- [7] *Vápenocementová malta*. 2016. CZ 29827 U1 Užitiný vzor. Uděleno 5.8.2016. Zapsáno 27.9.2016.
- [8] TOPIČ, Jaroslav, Jan TREJBAL, Tomáš PLACHÝ a Zdeněk PROŠEK. Relationship between Compressive Strength and Young's Modulus of Cement Paste with Recycled Concrete Powder. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 2017, **722**, 254-259. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.254. ISSN 16629795. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.722.254>
- [9] LEDESMA, E.F., J.R. JIMÉNEZ, J.M. FERNÁNDEZ, A.P. GALVÍN, F. AGRELA a A. BARBUDO. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **71**, 289-298 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.080. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814009921>
- [10] EVANGELISTA, L. a J. DE BRITO. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2007, **29**(5), 397-401. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946507000030>
- [11] Betonové odprašky. *Domů | Lavaris* [online]. Lavaris, Libčice nad Vltavou, c2012-2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.lavaris.cz/recyklaclni-linky-na-zpracovani-betonovych-odprasku.html?lang=cs>
- [12] BABÁNKOVÁ, Jaroslava. *Lehké betony: Pórobetony* [online, přednáška]. In: . 2014 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: [15123.fa.cvut.cz/?download=\\_/predmet.mat/6.1\\_lehke-betony\\_m\\_2014.pdf](http://15123.fa.cvut.cz/?download=_/predmet.mat/6.1_lehke-betony_m_2014.pdf)
- [13] *Výrobky, hmoty, materiály: Technologie výroby pórobetonu* [online]. In: . 2009 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: [http://marketing.xella.cz/napsali/2009/Materialy-pro-stavbu\\_6\\_2009.pdf](http://marketing.xella.cz/napsali/2009/Materialy-pro-stavbu_6_2009.pdf)

- [14] Comparison Between AAC Blocks and CLC Blocks. *Consulting Services for AAC Blocks Manufacturing Projects* [online]. 2013 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.aac-india.com/comparison-between-aac-blocks-and-clc-blocks/>
- [15] Foamed Concrete Casting Insulation System. *Trinity China- Foam Concrete Machine Manufacturer* [online]. Čína, b.r. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.foamed.com.cn/cpzsshow.asp?id=29>
- [16] MARUNMALE, AK a AC ATTAR. Designing, developing and testing of cellular lightweight concrete brick (CLC) wall built in rat-trap bond. *Curr Trends Technol Sci.* 2014, 3(4), 331-336. DOI: Dostupné z : <http://www.ctts.in/assets/upload/1596ctts-340117%20vol-3%20iss-4.pdf>.
- [17] Ceník pro tvárnice suchého zdění. *Tvárnice suchého zdění Staleform* [online]. b.r. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.levnetvarnice.cz/cenik>
- [18] BURZA, Marek. Pěnobeton by mohl vyřešit problémy při rekonstrukci domu. In: *Hobby.cz - Rady pro domov, zahradu a volný čas* [online]. 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: [http://hobby.idnes.cz/penobeton-rekonstrukce-0sx-/hobby-domov.aspx?c=A151216\\_084955\\_hobby-domov\\_bma](http://hobby.idnes.cz/penobeton-rekonstrukce-0sx-/hobby-domov.aspx?c=A151216_084955_hobby-domov_bma)
- [19] Energy use of production KWh/m<sup>3</sup>. In: *Advantage of Foam Concrete | Edama Germany* [online]. Gablonzer Str. 23, 76185 Karlsruhe, Germany, b.r. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://edama.de/Edama02/wp-content/uploads/2016/01/energy-of-use.jpg>
- [20] Přesné tvárnice: Technické vlastnosti. In: *Stavební materiál pro stavbu i rekonstrukce | Ytong.cz* [online]. Hrušovany u Brna: Xella CZ, s.r.o., 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.ytong.cz/presne-tvarnice-ytong.php>
- [21] Recipes and the basic properties. *Foam Concrete/Cellular Concrete | Sircontec* [online]. SIRCONTEC, Nova Dubnica, Slovensko, c2005-2010 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: [http://www.sircontec.com/core/download\\_file.php?id=1316](http://www.sircontec.com/core/download_file.php?id=1316)
- [22] AMRAN, Y.H., Nima FARZADNIA a A.A. ABANG ALI. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials.* 2015, 1011, 990-1005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>. ISSN 09500618. Dostupné také z: [//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305328](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305328)



- [23] RAMAMURTHY, K., E.K. KUNHANANDAN NAMBIAR a G. INDU SIVA RANJANI. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009, **31**(6), 388-396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>. ISSN 09589465. Dostupné také z: [//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509000638](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509000638)
- [24] Foaming agents for light weight foam concrete: Standards and Specifications. In: *ConstructionSol* [online]. 2015 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.constructionsol.com/node/21>
- [25] JITCHAIYAPHUM, Khampee, Theerawat SINSIRI a Prinya CHINDAPRASIRT. Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials. *Procedia Engineering* [online]. 2011, **14**, 1157-1164 [cit. 2017-04-08]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.145. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811012227>
- [26] MIKULICA, Karel. *Technologie výroby cementových pěnobetonů a jejich vlastnosti* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2013 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=74749](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=74749). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [27] PANESAR, D.K. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **44**, 575-584 [cit. 2017-01-30]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813002298>
- [28] KUZIELOVÁ, Eva, Ladislav PACH a Martin PALOU. Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **125**, 998-1004 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.122. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181631385X>
- [29] HILAL, Ameer, Nicholas THOM a Andrew DAWSON. On entrained pore size distribution of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2015a, **75**, 227-233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.117>. ISSN 09500618.

Dostupné také z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814011866>

- [30] HILAL, Ameer, Nicholas THOM a Andrew DAWSON. On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives. *Construction and Building Materials*. 2015b, **85**, 157-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.093>. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815003724>
- [31] HRŮZA, Jaromír. *Návrh zdicích prvků s využitím recyklovaného betonu*. Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Dejvice, 2016. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
- [32] HLUBOCKÝ, Lukáš. *Návrh prvků stavebního systému na bázi odpadních materiálů při zpracování kamene*. Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6 Dejvice, 2016. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
- [33] NOVOTNÝ, Radoslav. *TEPELNĚ IZOLAČNÍ LITÉ ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY* [online]. Technická 3058/10, 616 00 Brno, 2016 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/63117/novotny\\_radoslav\\_teze.pdf?sequence=2](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/63117/novotny_radoslav_teze.pdf?sequence=2). Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [34] VETCHÝ ING., Jan. Přísady do betonů a malt III. In: *Mct - beton a betonové výrobky* [online]. 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>
- [35] LESOV, I., S. TCHOLAKOVA a N. DENKOV. Factors controlling the formation and stability of foams used as precursors of porous materials. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, **426**, 9-21. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2014.03.067>. ISSN 00219797. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979714002033>
- [36] Mikrosilika. In: *Abarudovanie proizvodstva pro penobetona, penobeton tehnologija, penobeton mini zavody, formy dlja penobetona. OOO strojmechanika (Пенобетон: оборудование производства пенобетона, пенобетон технология, пенобетон мини заводы. Формы для пенобетона. ООО СтройМеханика)* [online]. b.r. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.penobet.ru/eng/kremnezem.html>

- [37] Setting accelerator UniPell. In: *Foam concrete. Equipment for production foam concrete. Foam concrete mixers and forms. Stroymechanika Ltd* [online]. Rusko, c2004-2009 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.penobet.ru/eng/unipel.html>
- [38] SATHYA NARAYANAN, J. a K. RAMAMURTHY. Identification of set-accelerator for enhancing the productivity of foam concrete block manufacture. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, **37**, 144-152 [cit. 2017-01-30]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.025. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812004941>
- [39] ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Praha: ÚNMZ, 2003.
- [40] Trinity China- Foam Concrete Machine Manufacturer Support. *Trinity China- Foam Concrete Machine Manufacturer* [online]. b.r. [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.foamed.com.cn/cpzsshow.asp?id=10>
- [41] Klasifikace disperzí. *Index of /fch/cz/pomucky/bartovska* [online]. 2016 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/bartovska/10-Disperze-popis.pdf>
- [42] RANJANI, Indu a K. RAMAMURTHY. Relative assessment of density and stability of foam produced with four synthetic surfactants. *Materials and Structures* [online]. 2010, **43**(10), 1317-1325 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1617/s11527-010-9582-z. ISSN 13595997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-010-9582-z>
- [43] Apparatus: Apparatus. In: *Marsh cone test* [online]. 2014 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://image.slidesharecdn.com/marshcone-140921104709-phpapp02/95/marsh-cone-test-5-638.jpg?cb=1411296625>
- [44] Marsh Flow Cone. In: *Home / Reliance Laboratory Equipment* [online]. South Africa: Reliance Laboratory Equipment, 2015 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.reliancelab.co.za/wp-content/uploads/2013/03/Marsh-flow-cone.jpg>
- [45] RAMAMURTHY, K. a E. NAMBIAR. *Fresh State Characteristics of Foam Concrete*. American Society of Civil Engineers, 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:2(111).

- [46] POROFLOW F - technický list. In: *CEMEX - výrobce a dodavatel betonu, betonových směsí a speciálních produktů z betonu* [online]. 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: [http://www.specialni-produkty.cz/userfiles/spec/spec\\_prod/file/Prospekty/poroflow-technicky-list.pdf](http://www.specialni-produkty.cz/userfiles/spec/spec_prod/file/Prospekty/poroflow-technicky-list.pdf)
- [47] KEARSLEY, EP. The use of foamcrete for affordable development in third world countries. *Concrete in the Service of Mankind: Appropriate Concrete Technology*. 2006, **3**, 232.
- [48] KEARSLEY, EP a M VISAGIE. Micro-properties of foamed concrete. In: *Proceedings of international conference on specialist techniques and materials for construction, Thomas Telford, London*. 1999, s. 173-184.
- [49] LIU, Zhongwei, Kang ZHAO, Chi HU a Yufei TANG. Effect of Water-Cement Ratio on Pore Structure and Strength of Foam Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016, **2016**. DOI: 10.1155/2016/9520294. ISSN 16878434. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9520294>
- [50] NEHDI, M., K. LO a Ashfaq KHAN. Development of Deformable Protective System for Underground Infrastructure Using Cellular Grouts. *Materials Journal*. 2002, **99**(5). DOI: 10.14359/12328.
- [51] JONES, M.R. a A. MCCARTHY. Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. In: *Proceedings of the International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*. 2005, s. 61-88. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33645294125&partnerID=40&md5=d42dd50d0337b86c5e16262d9da76b4b>
- [52] VAŠÍČEK, Radek. Termofyzikální vlastnosti. In: *LPG podklady: Termofyzikální vlastnosti - měření pomocí ISOMET* [online]. Praha: ČVUT, 2014 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/220-lpg/tepelne\\_vyber\\_cz.pdf](https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/220-lpg/tepelne_vyber_cz.pdf)
- [53] WONG, Kit. *Thermal Conductivity of foamed concrete* [online]. Singapur, 2007 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/17572>. Diplomová práce.
- [54] GANESAN, Shankar, Md OTHUMAN MYDIN, Mohd MOHD YUNOS a Mohd MOHD NAWI. Thermal Properties of Foamed Concrete with Various Densities and Additives at Ambient Temperature. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech

- Publications, 2015, **747**, 230-233. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.747.230. ISSN 16627482. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMM.747.230>
- [55] MYDIN, MD. Effective thermal conductivity of foamcrete of different densities. In: *ISSR Journals* [online]. Malaysia: Universiti Sains Malaysia, 2011 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.issres.net/journal/index.php/crl/article/view/170/100>
- [56] Foamed concrete (synonym cellular lightweight concrete) – definition and physical characteristics. In: *Foam concrete machines. Cellular lightweight concrete machines. LLC Stroy-Beton*. [online]. Russia: LLC Stroy-Beton, c1999-2012 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://ibeton.ru/english/intro.php>
- [57] Foam concrete fill core machine. In: *Trinity China- Foam Concrete Machine Manufacturer* [online]. China, b.r. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.foamed.com.cn/uploadfile/20100601/20100601220126975.jpg>
- [58] Equipment: Foam generator. In: *Edama Cellular Lightweight Concrete (CLC), Foaming Agent* [online]. Germany: Edama, 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://edama.de/foam-generator/>
- [59] DIY Little Dragon and Foam Injector. In: *Domegaia.com - Home* [online]. 2015 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [http://www.domegaia.com/store/p29/DIY\\_Little\\_Dragon\\_and\\_Foam\\_Injector\\_Plans.html](http://www.domegaia.com/store/p29/DIY_Little_Dragon_and_Foam_Injector_Plans.html)
- [60] Vysokotlaká myčka. In: *Profesionální nářadí do dílen* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [http://www.dovavanik.cz/eshop/foto/536/536638\\_o\\_0.jpg](http://www.dovavanik.cz/eshop/foto/536/536638_o_0.jpg)
- [61] Question 4. In: *Foamed concrete block production plants, production unit, bucket and mixer* [online]. Hanoi, Vietnam, c2009-2013 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://lightconcrete.net/en/q-a/195-to-use-pe.html>
- [62] *ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: ÚNMZ, 2000.
- [63] Míchací nástavec střední. In: *Produkty* [online]. 2003 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/zako1/html/foto/htmobr/p3080014.jpg>
- [64] *ASTM C215 - 02 Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. United States: ASTM Committee C09, 2003.

- [65] TOPIČ, J., Z. PROŠEK, P. TESÁREK, V. NEŽERKA a T. PLACHÝ. Cement based composite with PVA: Development of mechanical properties: Development of mechanical properties. In: *EAN 2014 - 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis*. 2014. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84906258363&partnerID=40&md5=45e02ca4c04491a6fb92c97ca8db3b0a>
- [66] *ASTM E 1876 – 01 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. United States: ASTM Committee E28, 2002.
- [67] *ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [68] *ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [69] *ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: ÚNMZ, 2005.
- [70] Pundit Lab, Operating instructions. In: *Proceq SA / Proceq* [online]. Switzerland, 2014 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms/import\\_data/files/Pundit%20Lab\\_Operating%20Instructions\\_English\\_high.pdf](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20Lab_Operating%20Instructions_English_high.pdf)
- [71] ISOMET: Portable heat transfer analyzer. In: *Applied Precision s.r.o.* [online]. Slovensko: Applied Precision s.r.o., 2011 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.appliedp.com/en/isomet.htm>
- [72] BITTNER, Jiří. *Měření tepelných vlastností materiálů* [online]. Zlín, 2006 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1810/bittner\\_2006\\_bp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1810/bittner_2006_bp.pdf?sequence=1). 1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Petr Urbanec.
- [73] Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005-2009 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [http://vct.tul.cz/prac\\_fyz\\_text4.php](http://vct.tul.cz/prac_fyz_text4.php)

## 6 Seznam obrázků

Obr. 1 – Podíl recyklovaného betonu na celkovém betonovém odpadu [2].	10
Obr. 2 – Cyklus recyklace [2].	12
Obr. 3 – Stacionární recyklační linka [6].	12
Obr. 4 – Porovnání potřebného množství energie na výrobu pěnobetonu v porovnání s ostatními materiály [19].	17
Obr. 5 – Metoda přidání pěny do cementového tmelu.	26
Obr. 6 – Metoda výroby mixováním směsí.	26
Obr. 7 – Gibbsovy–Plateauovy kanálky [41].	27
Obr. 8 – Kónická nálevka [43], [44].	31
Obr. 9 – Závislost rozlivu a tekutosti [45].	32
Obr. 10 – Efekt vodního součinitele na výslednou pevnost pěnobetonu [49].	33
Obr. 11 – Pěnogenerátor FM–25 [57].	37
Obr. 12 – DIY Little Dragon [59].	38
Obr. 13 – Vysokotlaká myčka Hecht [60].	
Obr. 14 – linka pro výrobu pěnobetonových tvárnic HB–25000 [57].	38
Obr. 15 – odloučivost pěny [33].	39
Obr. 16 – Hodnoty rozlivu referenčních směsí po 10 setřesech.	43
Obr. 17 – Nástavec na míchání směsí [63]	44
Obr. 18 – Nástavec na míchání pěny.	
Obr. 19 – Formy s pěnobetonem.	45
Obr. 20 – Závislost objemové hmotnosti na stáří vzorků.	47
Obr. 21 – Smrštění vzorků s recyklátem v závislosti na stáří vzorků.	48
Obr. 22 – Smrštění vzorků bez recyklátu v závislosti na stáří vzorků.	49
Obr. 23 – Měření kmitání podélného [65].	50
Obr. 24 – Měření kmitání příčného [65].	51
Obr. 25 – Měřicí sestava Brüel & Kjær (A – rázové kladívko, B – piezoelektrický snímač zrychlení, C – měřicí stanice).	52
Obr. 26 – Dynamický modul pružnosti $E_{d,l}$ [GPa].	53
Obr. 27 – Dynamický modul pružnosti $E_{d,p}$ [GPa].	54
Obr. 28 – Porovnání dynamických modulů pružnosti (rozdíl $E_{d,l}$ a $E_{d,p}$ [%]).	54
Obr. 29 – Dynamický smykový modul pružnosti [GPa].	55
Obr. 30 – Vzorek ze sady R7,5M.	55
Obr. 31 – Sada R7,5H.	55
Obr. 32 – Přístroj Pundit Lab+.	57

Obr. 33 – Sondy k měření UZ vlnění .....	57
Obr. 34 – Dynamický modul pružnosti měřený po 28 dnech (UZ metoda).....	58
Obr. 35 – Porovnání měření dynamického modulu pružnosti UZ metodou a rezonanční metodou.....	58
Obr. 36 – Měřicí sestava ISOMET 2104 (A – řídicí stanice, B – měřicí sonda). .....	60
Obr. 37 – Součinitel tepelné vodivosti měřený po 28 dnech. ....	61
Obr. 38 – Měrná objemová tepelná kapacita měřená po 28 dnech. ....	61
Obr. 39 – Tepelná difuzivita měřená po 28 dnech. ....	62
Obr. 40 – Schéma zatežovací zkoušky pro tříbodový ohyb [32]. ....	63
Obr. 41 – Pevnost v tlaku za ohybu po 28 dnech. ....	64
Obr. 42 – Pevnost v tlaku za ohybu po 28 dnech (seřazeno dle porovnávaných sad). ....	64
Obr. 43 - Sada R7,5H; C7,5M; R7,5M; R7,5H; C10M; C10H; R10M; R10H; Rref a Cref po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (řazeno dle objemové hmotnosti – vzestupně). ....	66
Obr. 44 – Schéma zatěžování při zkoušce v tlaku [32]......	67
Obr. 45 – Pevnost v tlaku měřená po 28 dnech. ....	68
Obr. 46 – Pevnost v tlaku (seřazeno dle porovnávaných sad).....	68
Obr. 47 – Závislost pevnosti v tlaku a součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti. ....	69



## 7 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Cena pěnobetonu, objemová hmotnost – 400 kg/m <sup>3</sup> [15].	16
Tabulka 2 – Cena pěnobetonu [16].	16
Tabulka 3 – Cena pěnobetonu za 1 m <sup>3</sup> [17].	16
Tabulka 4 – Autoklávovaný pórobeton, fyzikální vlastnosti [20].	17
Tabulka 5 – Složení směsi pěnobetonu (převzato od výrobce Sircontec) na výrobu 1 m <sup>3</sup> pěnobetonu [21].	18
Tabulka 6 – Přehled autorů a zkoumané vlastnosti pěnobetonu [23].	21
Tabulka 7 – Přehled směsí – vodní součinitel, objemové hmotnosti a pevnost v tlaku po 28 dnech [23].	22
Tabulka 8 – Rovnice pro získání rozlivu směsi v procentech [23].	30
Tabulka 9 – Klasifikace pěnobetonu založená na stanovení viskozity [45].	31
Tabulka 10 – Klasifikace pěnobetonu založená na rozlivu směsi [45].	32
Tabulka 11 – Závislost objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku (Poroflow) [46].	34
Tabulka 12 – Tepelná vodivost po 28 dnech [53].	35
Tabulka 13 – Vlastnosti pěnobetonu (objemová hmotnost, termofyzikální vlastnosti a pórovitost) [54].	35
Tabulka 14 – Závislost objemové hmotnosti na součiniteli tepelné vodivosti a pórovitosti [55].	36
Tabulka 15 – Závislost objemové hmotnosti na pevnosti v tlaku po 28 dnech a součiniteli tepelné vodivosti [56].	36
Tabulka 16 – Specifikace HB–25000 [57].	39
Tabulka 17 – Složení směsí.	42
Tabulka 18 – Objemová hmotnost po 28 dnech.	47