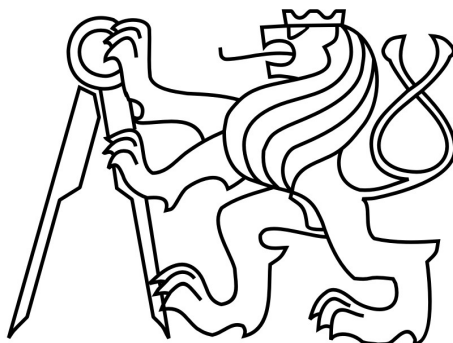


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnost náhrady primárních vápenocementových malt recyklovaným
pórobetonem

The possibilities of replacement of primary raw materials of limestone -
cement mortars by recycled aerated concrete

Studijní program: Budovy a prostředí

Obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Tereza Pavlů, Ph.D.

Bc. Barbora Slezáková

Praha 2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE****I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE**

Příjmení: Slezáková Jméno: Barbora Osobní číslo: 439157
Zadávací katedra: K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: Budovy a prostředí
Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCINázev diplomové práce: Možnost náhrady primárních vápenocementových malt recyklovaným pórobetonemNázev diplomové práce anglicky: The possibilities of replacement of primary raw materials of limestone-cement mortars by recycled aerated concrete

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracování rešerše na téma malt a pórobetonu.
- 2) Návrh směsí s různým poměrem odpadního pórobetonu a experimentální ověření základních materiálových vlastností.
- 3) Ověření mechanických a tepelně technických vlastností a trvanlivosti vybraných směsí.
- 4) Vyhodnocení výsledků s ohledem na využitelnost zkoumaného odpadního materiálu.

Seznam doporučené literatury:

Luboš Svoboda a kolektiv. Stavební hmoty. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007, VÝBORNÝ Jaroslav, Nauka o materiálech 20 (21), Rostislav Drochytka, Pavel Košatka, Dimitrij Pume, Zdeněk Tobolka, 1 vydání, Praha, 1999-12,

Jméno vedoucího diplomové práce: Tereza PavlůDatum zadání diplomové práce: 15.10.2019Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*_____
Podpis vedoucího práce_____
Podpis vedoucího katedry**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“.

Datum převzetí zadání_____
Podpis studenta(ky)



SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Barbora Slezáková

Název diplomové práce: Možnost náhrady primárních vápenocementových malt recyklovaným pórobetonem

Základní část: Teoretická a experimentální část podíl: 60 %

Formulace úkolů: Zpracování rešerše na téma malt a pórobetonu.
Ověření tepelně technických vlastností a trvanlivosti vybraných směsí.
Vyhodnocení výsledků s ohledem na využitelnost zkoumaného odpadního materiálu

Podpis vedoucího DP: Datum:

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

2. Část: Experimentální část podíl: 40 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Vojtěch Pommer, katedra materiálového inženýrství a chemie

Formulace úkolů: Návrh směsí s různým poměrem odpadního pórobetonu a experimentální ověření
základních materiálových vlastností.
Ověření mechanických vlastností

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Prohlašuji,

že předloženou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí práce Ing. Terezy Pavlů, Ph.D. a konzultanta Ing. Vojtěcha Pommera. Všechny citace a použité prameny jsem řádně vyznačila v textu, použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury. Pro názornost provedení experimentů jsem v práci použila vlastní fotografie.

V Praze, dne 5. 1. 2020

Podpis studenta

Poděkování

Ráda bych poděkovala své vedoucí diplomové práce Ing. Tereze Pavlů, Ph.D., a konzultantovi Ing. Vojtěchu Pommerovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Děkuji také své rodině a blízkým, kteří mě plně podporovali po celou dobu studia na fakultě stavební ČVUT a při pracování diplomové práce.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možností náhrady primárních vápenocementových malt recyklovaným pórobetonem. Využitím odpadního stavebního materiálu, který místo uložení na skládku bude recyklován, dojde ke snížení negativních dopadů na životní prostředí. Cílem diplomové práce je zjistit možnost využití recyklovaného pórobetonu – Ytongu, jako náhrada plniva do vápenocementových malt. K dosažení cíle je proveden experimentální výzkum, který ověří základní materiálové vlastnosti, mechanické a tepelně technické vlastnosti a trvanlivosti navržených směsí. Výzkum je proveden na směsích s různým poměrem a velikostí frakce odpadního pórobetonu.

Klíčová slova

Malta, pórobeton, plnivo, recyklace, odpad

ABSTRACT

The diploma thesis describes the possibility of replacing primary lime-cement mortars with recycled aerated concrete. Using waste building material, which will be recycled instead of landfill, will reduce negative environmental impact. The objective of the diploma thesis is to find out the possibility of using recycled aerated concrete – Ytong, as substitute for filler in lime-cement mortars. To achieve this objective experimental research was carried out, which verify basic material properties, mechanical and thermal technical properties and durability of proposed mixtures. Research will be carried out on mixtures with different proportions and sizes of waste aerated concrete fractions.

Keywords

Mortar, aerated concrete, filler, recycling, waste

OBSAH

1	Malta	13
1.1	Dělení malt	13
1.2	Pojivo.....	14
1.3	Plnivo.....	17
1.3.1	Drobné kamenivo do malt	18
1.3.2	Druhy kameniva	19
2	Pórobeton	21
2.1	Historie pórobetonu.....	21
2.2	Technologie výroby pórobetonu.....	22
2.3	Suroviny pro výrobu pórobetonu.....	23
2.4	Ytong	25
2.4.1	Technologie výroby stavebních dílců Ytong	26
2.4.2	Vlastnosti Ytongu	26
3	Experimentální část.....	28
3.1	Cíl práce.....	28
3.2	Měření veličiny a metody měření	28
3.2.1	Zjištění objemové hmotnosti kameniva a Ytongu.....	28
3.2.2	Stanovení sypné hmotnosti kameniva a Ytongu.....	29
3.2.3	Stanovení konzistence čerstvé malty.....	29
3.2.4	Stanovení počátku a konce doby tuhnutí	30
3.2.5	Objemové hmotnosti zkušebních těles.....	31
3.2.6	Transport kapalné vlhkosti.....	31
3.2.7	Rtuťová porozimetrie	32
3.2.8	Nasycení vodou pomocí vakua.....	33
3.2.9	Heliová pyknometrie	34
3.2.10	Pevnost v tahu za ohybu	35
3.2.11	Pevnost v tlaku	36
3.2.12	Přídržnost	37
3.2.13	Tepelná vodivost	38
3.2.14	Tepelná kapacita	39
3.2.15	Stanovení mrazuvzdornosti.....	39
3.3	Materiály pro výrobu směsí	41



3.3.1 Stanovení zrnitosti	44
3.4 Návrh složení maltových směsí	47
3.4.1 Stanovení jednotlivých složek směsi	47
3.4.2 Výsledky pevnosti v tlaku navržených směsí	53
3.5 Výroba zkušebních těles	56
4 Výsledky experimentů	58
4.1 Princip vyhodnocení výsledků pomocí Dean – Dixonova testu	58
4.2 Stanovení objemové a sypané hmotnost kameniva a Ytognu	58
4.3 Počátek a konec doby tuhnutí	59
4.4 Transport kapalné vlhkosti	61
4.5 Rtuťová porozimetrie	65
4.6 Heliová pyknometrie a vakuová saturace	67
4.7 Pevnost v tahu a tlaku	68
4.8 Přídržnost	71
4.9 Tepelná vodivost a tepelná kapacita	72
4.10 Mrazuvzdornost	73
5 Diskuze a shrnutí	81
6 Závěr	83

Seznam použitých symbolů

ρ	[kg/m ³]	objemová hmotnost
ρ_b	[Mg/m ³]	měrná sypaná hmotnost
ρ_w	[kg/m ³]	hustota vody
ρ_{mat}	[kg/m ³]	hustota matrice
m	[kg]	hmotnost
V_h	[m ³]	hladina vody
V	[l]	objem
A_b	[kg/m ² s ^{1/2}]	absorpční koeficient
k	[m ² /s]	součinitel vlhkostní vodivosti
S	[m ²]	plocha
t	[s]	čas
w	[kg/m ³]	obsah
d	[m]	průměr
γ	[N/m]	povrchové napětí
θ	[°]	úhel
p	[Pa]	tlak
ψ	[-]	pórovitost
R	[MPa]	pevnost v tahu za ohybu
F	[MPa]	pevnost v tlaku
l	[mm]	délka
F	[N]	síla
f	[N/mm ²]	přídržnost
A	[mm ²]	plocha
λ	[W/(m.K)]	součinitel tepelné vodivosti
c	[J/kg.K]	měrná tepelná kapacita
T	[K]	teplota
K	[%]	součinitel mrazuvzdornosti
Z	[km/s]	rychlost šíření ultrazvukového impulzu
E	[GPa]	dynamický modul pružnosti
RDM	[%]	relativní dynamický modul pružnosti



Seznam použitých zkratek

atd.	a tak dále
vyd.	vydání
např.	například
USA	United States of America
apod.	a podobně
tzv.	takzvaně
a.s.	akciová společnost
cit.	citace
ČVUT	České vysoké učení technické
tj.	to je
n.l.	našeho letopočtu

Úvod

Současné stavebnictví spotřebovává velké množství surovin a zároveň vyprodukovává velké množství odpadu. Nároky jsou kladeny především na ekonomickou náročnost, dopad na životní prostředí, omezení emisních škodlivin, energetickou nenáročnost a omezení spotřeby neobnovitelných přírodních zdrojů. Možností jak snížit ekonomickou náročnost i negativní vliv na životní prostředí je znovu využití stavebního materiálu jeho recyklací, jako náhradu základních složek. Tématu recyklace, který vede k využití odpadu, je v současnosti věnována zvýšená pozornost a s důrazem na trvale udržitelný rozvoj jeho význam dále poroste. Recyklace odpadu přináší snížení těžby nových surovin, vyžití odpadu místo jeho uložení na skládku a celkové šetření životního prostředí.

Tato práce se zabývá možností náhrady primárních vápenocementových malt recyklovaným pórobetonem - Ytongem. Základní suroviny pro výrobu pórobetonu jsou vápno, cement, písek nebo popílek. Hlavní charakteristikou Ytongu je vysoký podíl pórů a spojení přídatného plniva pomocí hydraulických pojiv. Má dobré tepelně izolační vlastnosti a velmi snadno se s ním díky nízké hmotnosti manipuluje. Práce je zaměřena na využití recyklovaného pórobetonu, jako možnost náhradního plniva do vápenocementových malt. Vlastnosti vápenocementových malt s Ytongem jsou zkoumány tradičními metodami i metodami založených na použití nejmodernějších přístrojů. Měřené veličiny a metody měření jsou popsány v experimentální části práce.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány druhy a vlastnosti materiálů, dělení a složení malt. Dále jsou uvedeny druhy pojiv a plniv, s popisem jejich možností nahrazení. Věnuje se vzniku a vývoji pórobetonu, technologii výroby a surovinám potřebným k jeho výrobě. Podrobněji jsou popsány vlastnosti Ytongu a technologie výroby stavebních dílců. Stěžejní částí práce je část praktická, ve které je proveden experiment možného využití drceného Ytongu, jako náhrada plniva ve vápenocementové maltě. Ověřeny jsou základní materiálové vlastnosti, mechanické vlastnosti, tepelně technické vlastnosti a trvanlivosti navržených směsí. V závěru je uvedeno vyhodnocení výsledků s ohledem na využitelnost zkoumaného odpadního materiálu.

Stavební materiál pórobeton má své počátky ve Švédsku roku 1918. V meziválečném období bylo nutno šetřit se stavebním materiálem a zvyšovala se poptávka po úsporných domech, což vedlo k vývoji nových stavebních materiálů. Pórobeton měl lepší tepelně izolační vlastnosti než v tu dobu používané stavební materiály a šetřil energii na vytápění. Do Československé republiky se pórobeton dostal kolem roku 1958 do Plaveckého Štvrtku (Slovensko), kde byla postavena první zkušební výrobní linka.

Základní složkou malt je cement, který se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi a vysokou pevností. Při jeho výrobě dochází k velké spotřebě energie a vzniku nežádoucích odpadních plynů, které znečišťují životní prostředí. Cenově je velmi nákladný a dochází k velké spotřebě přírodních neobnovitelných surovin. Z tohoto hlediska se v dnešní době stále více uplatňují směsné cementy, kdy je část pojiva nahrazena latentně hydraulickými látkami například popílkem.

Cílem diplomové práce je možnost využití recyklovaného pórobetonu Ytongu, jako náhrada plniva do vápenocementových malt a návrh směsí s různým poměrem a velikostí frakce odpadního pórobetonu. Experimentální ověření základních materiálových vlastností, mechanických vlastností a tepelně technických vlastností a trvanlivosti navržených směsí. Výsledkem práce je vyhodnocení vlastností vápenocementové malty s přidáním nadrceného recyklovaného pórobetonu a zvážení možnosti dalšího využití.

Zadání diplomové práce vzniklo na základě požadavku firmy zabývající se recyklací stavebního odpadu. Firma se v rámci možnosti zvýšení využití odpadního stavebního materiálu zabývala myšlenkou, jak již použitý stavební materiál pórobeton místo likvidace recyklovat, a snížit tak negativní dopad na životní prostředí.

1 Malta

Malta je stavivo připravené ze směsi drobného kameniva, anorganického pojiva, popřípadě s přidáním přísad a příměsí s následným rozmícháním vzniklé granulární směsi s vodou na požadovanou konzistenci. Daným postupem může být malta vyráběna přímo na staveništi, nebo se použije průmyslově předem vyrobená směs anorganických pojiv, plniv, příměsí a přísad, která se na staveništi pouze rozmíchává s vodou. Třetí možností je výroba kompletní malty v centrální výrobě, která je následně na staveniště dopravena jako mokrá maltová směs.¹

1.1 Dělení malt

Podle účelu použití rozdělujeme malty nejčastěji do tří hlavních skupin: malty pro zdění, malty pro venkovní a vnitřní omítky. Malty pro venkovní omítky mají vyšší obsah cementu a malty pro vnitřní omítky mají nižší odolnost vůči povětrnostním vlivům. Maltu můžeme použít také ke kladení dlažeb, lepení obkladů, ke spárování a k výrobě keramických dílců. Důležité jsou též malty stykové, malty použité jako zálivky či sanační a reparační hmoty při úpravě povrchu stavebních konstrukcí.¹

Dělení malty podle složení:

- dle druhu pojiva (hliněné, vápenné a vápnohořečnaté, hydraulické, polymerní, nastavované atd.);
- dle druhu plniva (s říčním pískem, s kopanými písky, se smíšeným plnivem, s druhotnými odpadními hmotami);
- dle druhu přidání přísad (s urychleným nebo prodlouženým tvrdnutím, plastifikované, provzdušněné, hydrofobní).²

Hliněné malty tuhnou a tvrdnou čistě vysycháním, ostatní malty tvrdnou chemickou reakcí, její základ tvoří nejčastěji cement a vápno. Nejjednodušší způsob přípravy malty na staveništi spočívá ve smíchání suchého pojiva a plniva s přidáním

¹ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 165

² GREGEROVÁ, Miroslava. *VZDUŠNÉ MALTY HISTORICKÝCH STAVEB, JEJICH IDENTIFIKACE, PŘÍČINY DEGRADACE A NÁVRH SANACE*. In: Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 1999. Brno 2000. Katedra mineralogie, petrologie a geochemie. PřF. Masarykova universita. Kotlářská 2. 611 37 Brno. Dostupné z: <https://journals.muni.cz/gvms/article/view/5130/4301>

vody na základě požadované konzistence. Vápenné malty jsou hojně využívány při rekonstrukcích stavebních památek, kde záleží na správném výběru pojiva a způsobu zpracování, tj. vyhašení vápna. Pro vyšší vodotěsnost malt se používalo vápno hydraulické, dnes se běžně používají hydraulické směsné pojiva na bázi portlandského slínku. Dále se hojně v maltách používá cement portlandský, struskový a speciální cementy (např. bílý cement). Malty se sádrovým pojivem jsou pak používány v menším rozsahu. Zejména jako malty s čistě sádrovým pojivem nebo malty s kombinací vápeno - sádrovým pojivem.

Plnivo do malt se používá přírodní kamenivo, granulovaná vysokopecní struska, škvára, popílek, teracové drtě, kamenivo vyrobené z přírodních surovin (keramzitové, expandovaný perlit), slévárenský písek, granulovaný expandovaný polystyren nebo další recyklát (např. sklo).³

Diplomová práce se zabývá recyklací pórobetonu Ytognu do malt jako částečná nebo úplná náhrada pojiva z jemného kopaného písku.

1.2 Pojivo

Pojivo je látka organického či anorganického původu, která spojuje menší kousky plniv do větších celků. Přidáním vody je pojivo upraveno do tekuté až kašovitě konzistence. Následně nastává proces zpevňování, který můžeme dělit do dvou fází. První je fáze tuhnutí a pak následuje druhá fáze tvrdnutí.

Pojiva můžeme dělit do dvou skupin, na vzdušná a hydraulická, podle toho zda k procesu zpevňování dochází výhradně na vzduchu nebo i ve vodě. Hydraulická pojiva po počátku zatuhnutí mohou dále tuhnout i tvrdnout pod vodou. Zatímco vzdušná pojiva mohou tvrdnout pouze na vzduchu a po zatvrdnutí jsou málo odolná vůči vodě.⁴

Do konce 19. století se na zdící malty a omítky používaly převážně tři druhy pojiv: hlína, vápno a sádra. Až ve 20 letech 20. století se vápenné omítky a malty začaly modifikovat portlandským cementem nebo se cement uplatňoval jako samostatné pojivo v povrchové vrstvě pemrlovaných betonových omítek a při použití umělého

³ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 165

⁴ Jirásek, J., Vavro, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2008 [vid. 2019-07-24]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

kamene. Následně od 50 let 20. století se vápenocementové omítky aplikují na většinu staveb.⁵

Použití **hlíny** do malt je většinou spojováno s obnovou staveb lidových nebo historických s uplatněním původních ručních postupů výroby malt na stavbě. Proces tuhnutí a tvrdnutí neprobíhá chemicky, ale fyzikálně na principu koloidního vysychání. Kdy trvanlivost ztvrdlých malt je závislá na bobtnání, které může být původem vzniku trhlin a následně způsobuje destrukci omítek. U hliněných malt má funkci pojiva jíla a plniva písek různé frakce. U jílu rozeznáváme tři hlavní minerály, díky kterým se vlastnosti pojiva výrazně liší: kaolinit, montmorillonit a illit. K redukci vzniku smršťovacích trhlin napomáhají neplastické složky v hlínách, které působí jako ostřívo. Přenášejí tahová napětí a zamezují vzniku trhlin u malt (např.: šamot, písek, křemen). Funkci ostřiva pak mohou plnit i přidaná vláknitá plniva jako je sláma, seno, piliny a dříve využívaná řezanka, pazdeří a zvířecí chlupy. Charakteristickou hliněných malt je stálost v suchém prostředí, ve vlhkém prostředí převážně kvůli solím rozpuštěných ve vodě degradují. Při odpařování vody, sůl v hlínách zůstává, krystalizuje a vyvolává tlak na okolní hmotu. Negativní účinky má rovněž vlhkost při nízkých teplotách, kdy může docházet k zamrznutí vody v maltě s následným nárůstem objemu a poškození struktury.⁶

K nejstarším pojivům patří také **sádra**, kterou používali již před několika tisíci lety staří Egypťané a Asyřané. Do Evropy se dostala v době raného středověku. Vyrábí se z přírodních minerálů sádrovce či anhydridu, nebo z uměle vyrobených produktů podobného složení, který vznikají nejčastěji jako odpad z průmyslové výroby.⁷

K tradičním vzdušným pojivům patří **vápno**, které je používáno již od středověku. Na našem území se nejstarší nálezy objevily již v období Velké Moravy ve vápenných omítkách s freskovou výzdobou. První předpisy o výrobě vápna pocházejí přibližně z období 200 let před n. l.⁸

⁵ Rovnaníková, P. *materiály historických omítek*. In: *obnova památek 2004 – omítky historických budov 4. konference s výstavou a exkurzí* [online]. Praha, 23. 3. - 24. 3. 2004. Praha: Masarykova kolej. 2016. [vid. 2019-08- 26]. Dostupné z: <http://www.studioaxis.cz/images/pamatky/rovnanikovapavla.doc>

⁶ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 172

⁷ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 145

⁸ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 152

Vápno se vyrábí pálením vhodně upravených surovin: vápenců, dolomitických vápenců nebo dolomitů při teplotách 1000 – 1250 °C. Výpalem vzniká pálené vápno (nehašené), které je z velké části tvořeno oxidem vápenatým (CaO). S rychlostí výpalu a vyšší teplotou vzrůstá podíl hutnější, méně reaktivní struktury. Produkt je pak označen jako tvrdě vypálené vápno, které se používá pro výrobu autoklávovaného pórobetonu (např. výrobky typu YTONG nebo HEBEL). Na přípravu malt je vhodnější výpal při nižších teplotách, kdy vzniká reaktivnější, pórovitější měkce pálené vápno, které má nižší objemovou hmotnost, větší měrný povrch a větší vydatnost. Po překročení správné teploty výpalu vzniká takzvané mrtvě pálené vápno, které obtížně reaguje s vodou. Dnes se u nás pálené vápno vyrábí nejčastěji kontinuálně v pracujících šachtových pecích. V zahraničí, např. USA se používají rotační pece, které jsou energeticky náročnější.⁹

Specifickým druhem je vápno hydraulické vyrobené buď pálením vápenců, dolomitických vápenců, nebo vápnitých slínů a slínovců pod mez slnutí (maximální teplota při výpalu 1250 °C), či semletím vzdušného vápna s vhodnými přísadami, které obsahují hydraulické oxidy. Minimálně musí obsahovat 10 % hydraulických složek (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃).⁸ Na rozdíl od hašeného vápna má hydraulické vápno vyšší pevnost a odolnost. Zároveň je takto vyrobené vápno, odolné vůči vodě.⁹

Dnes nejpoužívanějším typem pojiva je **cement**. Jedná se o hydraulické pojivo, které si po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost i ve vodě. Základem bývá portlandský případně struskoportlandský cement, který vzniká rozemletím křemičitého slínku se sádrovcem. Hlavní nevýhodou cementu je vysoký difuzní odpor a velmi vysoká cena.⁹

Při kombinaci pojiv vápna, sádry, hlíny apod. označujeme malty jako nastavované, tedy obsahují aspoň dvě pojiva.

⁹ Jirásek, J., Vavro, M.: *Anorganická pojiva – vzdušné vápno*. [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2008 [vid. 2019-08-27]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

1.3 Plnivo

Nejčastěji se jako plnivo používá přírodní kamenivo různých frakcí a druhů. Příkladem plniva do malt může být: přírodní kamenivo, granulovaná vysokopecní struska, expandovaný perlit, slévárenský písek, popílek atd. Rozhodujícím faktorem pro použití určitého typu plniva je zpracovatelnost receptury a splnění požadovaných technických vlastností. V dnešní době je snaha využívat odpadní suroviny, které jsou upraveny tak, aby se mohly použít ve stavebnictví, nebo jiných průmyslových odvětvích.¹⁰ Příkladem využití odpadní suroviny je granulovaná vysokopecní struska a popílek. Granulovaná vysokopecní struska se vyrábí prudkým ochlazením žhavé železné rudy vzduchem nebo pod vodou.¹¹ Popílek je produkt vzniklý ze spalování prašného antracitu, černého či hnědého uhlí, který je zachycován ze spalin tepelných elektráren.¹¹

Dle účelu malty se volí druh a zrnitost nejčastěji přírodního kameniva. Na výrobu keramických dílců a pro stykové malty se používá obvykle frakce kameniva 0/4 mm a 4/8 mm v předem daném poměru. Pro malty na zdění, kladení dlažeb, obklady a pro jádrovou omítku frakce 0/4 mm. Na tenkovrstvé zdění a jemné omítky frakce zrn kameniva 0/1 mm.¹²

K dosažení zvláštních úprav vlastností malt se používají přísady. Malé množství látky přidané do směsi před, nebo během jejího míchání. Podobnou funkci mohou plnit příměsi, které zlepšují vlastnosti, nebo napomáhají k dosažení zvláštních vlastností malt. Příkladem plastifikační přísady je hlína použitá do vápenných malt nebo vápenná kaše do cementových malt. Účelem přísad může být úprava doby zpracovatelnosti, tepelně technických vlastností, zvýšení pevnosti atd.¹²

Voda na výrobu malt musí být nezávadná, nesmí snižovat pevnost a trvanlivost, způsobovat skvrny a výkvěty. Bez zkoušek lze požívat pouze vodu pitnou, ostatní vody je nutné otestovat.¹²

¹⁰ eBeton – Specialista na beton, *Druhotná surovina* [online]. Svaz výrobců betonu ČR [vid. 2019-08- 27]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/druhotna-surovina>

¹¹ Evropská asociace výrobců a zpracovatelů strusky, *Využití strusky ve stavebnictví* [online] Euroslag technický list č.1 [vid. 2019-08-28]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:sbhxUrw7zJ:www.silmos.cz/file.php%3Fid%3D1060+&cd=5&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>

¹² Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2. vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 165

1.3.1 Drobné kamenivo do malt

Kamenivo je přírodní, umělá nebo recyklovaná látka vhodná pro stavební účely. Ve stavební praxi se především používá jako plnivo do malt a betonů. V silničním a železničním stavitelství k vytvoření uměle zhutněných vrstev. Hlavní vlastností kameniva je vytvoření pevné a tlakově odolné kostry, která vzniká vzájemným opřením zrn. Kamenivo redukuje smršťování, snižuje množství trhlin vznikajících vysycháním a při vhodném množství zvyšuje pevnost.¹³

Kamenivo pro malty specifikuje norma (721503) ČSN EN 13139, která uvádí různé frakce kameniva s velikostí zrn do 8 mm. Použité kamenivo ovlivňuje vlastnosti výsledné hmoty, proto je důležité kamenivo specifikovat. V normách jsou uvedené pouze obecné požadavky, je tedy nutné všechny potřebné údaje uvést vždy v dokumentu.

Požadavky můžeme rozdělit na:

- geometrické vlastnosti: frakce kameniva, zrnitost, tvar zrn, obsah schránek živočichů a podíl jemných částic;
- fyzikální vlastnosti: objemová hmotnost zrn, nasákavost vodou, odolnost proti zmrazování a rozmrazování;
- chemické vlastnosti: obsah chloridů, složky obsahující sírany, složky ovlivňující průběh tuhnutí a tvrdnutí malty, požadavky pro umělé kamenivo (látky rozpustné ve vodě, ztráta žíháním atd.).¹⁴

Pro tuto práci jsou důležité především geometrické vlastnosti, použita byla frakce kameniva 0/4 mm. V následující části jsou upřesněny vybrané pojmy, které se této problematice týkají.¹⁴

Frakce kameniva d/D je označena dvojicí sít, uvedených v milimetrech, kde d je označení dolního síta a D horního síta, mezi nimi se nachází převážná část kameniva. Frakce může obsahovat množství zrn, které zůstanou na horním sítu D – tzv. nadsítné a určité množství zrn, které propadnou pod dolní síto d – tzv. podsítné.

¹³ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 101

¹⁴ ČSN EN 13139 (72 1503), *Kamenivo pro malty*, Český normalizační institut, 2004

Přednost se dává především frakcím 0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm, 0/8 mm, 2/4 mm a 2/8 mm.¹⁵

Zrnitost kameniva je stanovena normou EN 933-1 podle hmotnostního propadu specifikovanou sadou sít. Pro stanovení zrnitosti drobného kameniva se používá sada sít o velikosti otvorů 0,063 - 0,125 - 0,25 - 1 - 2 - 4 - 8 mm.¹⁵ Nejčastější metodou pro stanovení zrnitosti je síťový rozbor spočívající v postupném určení propadů, tedy podílů zrn menších, než je velikost ok jednotlivých kontrolních sít sady. Zjištěná zrnitost se vyjadřuje tabulkou nebo grafickým znázorněním jako čára zrnitosti. Jedná se o spojnicový graf, kde na vodorovné ose se vynáší velikost ok použití síťové řady [mm] a na svislé ose je zaznamenán propad daným sítem [% hm.].¹⁶

U hrubého kameniva se tvar zrn posuzuje podle tvarového indexu, jako hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr nejmenšího a největšího rozměru je větší než 3. Kritérium je však obtížné určit u drobného kameniva, zavádějí se další metody hodnocení tvaru tříděním na štěrbínových sítích nebo stanovením sypné hmotnosti nasypáním z určité výšky. U nás se nejčastěji používá drobné vytříděné, případně prané, nebo těžené kamenivo. Použitelné zdroje kameniva však mají omezenou kapacitu a hrozí jejich vyčerpání. Vhodné je i drcené kamenivo, s malým množstvím jemných částic, které zhoršují zpracovatelnost.¹⁶

Rozdíly tvaru zrn se u drobného kameniva v praxi většinou zanedbává. K danému tvrzení se příklání i norma ČSN EN 13139, podle které zrna menší než 4 mm nejsou v běžných případech pro vlastnosti malt významné.¹⁵

1.3.2 Druhy kameniva

Kamenivo lze rozdělit podle původu na přírodní, umělé nebo recyklované. Přírodní anorganické kamenivo získáváme těžbou nebo drcením přírodních hornin (např.: říční, kopané, drcené). Umělé kamenivo anorganického původu, nejčastěji vzniká působením člověka, při použití tepelných procesů (např.: keramzit, expandovaný

¹⁵ ČSN EN 13139 (72 1503), *Kamenivo pro malty*, Česká technická norma, účinnost od 04/2004

¹⁶ Luboš Svoboda a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2 vyd. Praha: Jaga Group, 2007. Str. 101

perlit). Recyklované kamenivo anorganického původu, bylo již dříve ve stavebnictví použito (např.: drcené cihly, beton).¹⁷

Podle objemové hmotnosti lze kamenivo dělit na pórovité (lehké) do 2 000 kg/m³, hutné 2 000 – 3 000 kg/m³ a těžké nad 3 000 kg/m.¹⁷

Velikost zrn u drobného kameniva lze dělit dle následující tabulky, kde z drobného kameniva můžeme vyčlenit i filer. Jedná se o kamenivo s obsahem minimálně 70 % jemných částic pod 0,063 mm.¹⁸

Tabulka 1.1 Velikost zrn u drobného kameniva

Velikost zrn [mm]	Typ kameniva dle velikosti zrn	Příklad
0 – 0,063	Filer	Kamenná moučka
0 – 0,25	Jemné	Moučka, příměsí
0 – 4	Drobné	Písek
4 – 125	Hrubé	Drť, štěrk, štěrkopísek

Zpracování: vlastní

Z hlediska složení kameniva je nejvhodnější použití kopaný maltový písek, který se těží nad hladinou vody. Po smíchání s vodou je mazlavý a dobře se lepí, hlavní výhodou je, že se k němu nemusí přidávat tolik vápna. Písek můžeme dále dělit na jemný tříděný kopaný a netříděný kopaný. Jemný tříděný kopaný písek, který je zbaven jílových částic a je vhodný do maltových směsí. Netříděný kopaný písek s obsahem jílových částic se využívá zejména pro zásypy technické infrastruktury, zpevňování cest a jako podkladový materiál.¹⁹

¹⁷ Jirásek, J., Vavro, M.: *Kamenivo* [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1378-3 [vid. 2019-10-11]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

¹⁸ Transportbeton, *Beton, příručka technologa, suroviny – výroba – vlastnosti*. [online], 1. vyd. HeidelbergCEMENTGroup, 2013, [cit. 2019-10-12], Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>

¹⁹ Vše pro váš dům, *Jaký druh písku a kameniva použít na stavbě?*, [online], 2008-03-27, [cit. 2019-10-12], Dostupné z: <https://www.vseprovasdum.cz/jaky-druh-pisku-a-kameniva-pouzit-na-stavbe.html>

2 Pórobeton

Jedná se o běžný zdící materiál charakteristický snadnou manipulací, zpracovatelností, nehořlavostí a dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Vyrábí se z přírodních surovin: písku, vápna, cementu a vody.

2.1 Historie pórobetonu

Vznik pórobetonu lze datovat do roku 1918, kdy byl ve Švédsku stejně jako jinde v Evropě nedostatek energie. Dostupné bylo dřevo, kterého je pouze omezené množství, a ostatní stavební materiály byly cenově nedosažitelné. Náklady na vytápění u tradičních staveb z masivních zdících prvků bez izolačních schopností jsou obrovské pro každou domácnost. V této situaci byla snaha vyvinout nový stavební materiál, který spoří energii při výrobě i dlouhodobém užívání staveb. Švéd Axel Eriksson udělal roku 1920 významný objev pro rozvoj autoklávovaného pórobetonu, když si nechal patentovat způsob provzdušněné výroby na směsi vápence a zemní břidlice. Vzniká materiál se vzduchovými tepelně izolačními dutinami - pórobeton. První směs pórobetonu obsahovala kamencové břidlice, jejíž spalitelný obsah uhlíku se jevil jako vhodný ve výrobním procesu. Později se zjistilo, že břidlice obsahuje stopové množství přírodního uranu a receptura musela být pozměněna. Nová receptura obsahuje křemenný písek, sádku, vápno, cement, hliníkový prášek a vodu. Toto složení má navíc i přidanou hodnotu, materiál je čistě bílý.²⁰ Masivního rozvoje dosáhla první továrna na pórobeton v roce 1929, nacházející se Yxhults Anghärdade (Švédsko), kde začala sériová výroba. Roku 1940 dostal výrobek svoje první jméno podle místa výroby a názvu technologie Yxhult + Gasbetong = Ytong. Nezůstal však sám, další obchodní značkou je Siporex, který též vznikl ve Švédsku roku 1939. Od té doby se materiál rozšířil na evropské trhy a rozvinul do dnešní podoby.²¹

U nás se první počátky datují do roku 1958, kdy v Plaveckém Štvtku (Slovensko), vznikla první zkušební linka na šedý pórobeton. O rok později byla

²⁰ Jiří Hejhálek, *Pórobeton, Vlastnosti, využití a jak se vyrábí*, [online], 2017-05-07, [cit. 2019-09-09], Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/porobeton-mladsi-bratr-betonu-stejny-rodopis-jine-vlastnosti>

²¹ iMateriály, *Pórobeton – moderna, nebo tradice?* [online]. Business Media One, s. r. o, 2009-09-07 [cit. 2019-09-02]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/porobeton-moderna-nebo-tradice_101480.html

zprovozněna výroba v Zemianských Kostolanech (Slovensko), která se inspirovala Polskou technologií UNIPOL. První pískový pórobeton na cementové bázi se začal vyrábět roku 1963 v Šaštínských Strážích (Slovensko) technologií SIPOREX.²² V 70 letech vznikl v tehdejší Československu nový závod ZK2 podle holandské licence Calsilox, kde je použita nová technologie spočívající v nahrazení části písku elektrárenským popílkem.²³

V současné době je na českém trhu velké množství pórobetonových produktů na bázi popílku a písku. V oblasti tvárnic s popílkem mají největší zastoupení výrobky PORFIX a v oblasti pískových tvárnic výrobky YTONG.

2.2 Technologie výroby pórobetonu

Výroba začíná mletím křemičité látky podle zvolené technologie. Samostatně nebo i společně se velmi jemně melou, mísí a homogenizují s páleným vápnem, nebo cementem případně s dalšími přísadami. Následně se směs rozmísí v míchačkách s vodou, přerostovým kalem a plynotvornou látkou na tekutou kaši. Kypřící látka zajišťuje pórobetonovou strukturu tvořenou malými, rovnoměrně rozdělenými bublinkami. Směs se vylije do forem, kde dojde k nakypření (kynutí) a zatvrdnutí. Dochází k zrání hmoty ve formách, kde se odstraní seříznutím přerost a ztuhlá hmota se rozřeže na požadované tvary, které se autoklávují.²⁴

Autoklávováním se odstartuje hydratační proces, díky němuž se tvoří chemické vazby mezi přítomnými složkami za vzniku nových minerálů, hlavně tobermoritu. Drobné listové krystaly tohoto minerálu vzájemně prorůstají, a vytvářejí tak pevný skelet autoklávovaného pórobetonu. Vzniklé děje v autoklávu připomínají proces tvrdnutí a zrání betonu, jenom jsou extrémně urychleny. Autokláv si můžeme představit jako velký tlakový hrnec, v němž se nastavuje teplota a tlak, aby vznikl

²² SVOBODA Luboš a kolektiv, *Stavební hmoty*, 3 vyd. Praha, 2013, 531 s.

²³ Porfix, *Historie společnosti*, [online], 2019, [cit. 2019-09-09]. Dostupné z: <https://www.porfix.cz/o-spolecnosti/historie-spolecnosti/>

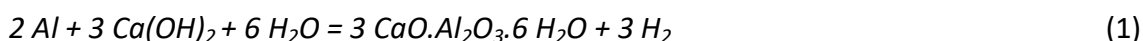
²⁴ VÝBORNÝ Jaroslav, *Nauka o materiálech 20 (21)*, Rostislav Drochytka, Pavel Košatka, Dimitrij Pume, Zdeněk Tobolka, 1 vydání, Praha, 1999-12, 9 s.

potřebný tobermorit. Ten vzniká hydratací křemičitého písku a vápna, při zvýšené teplotě a vlhkosti. Následně vznikají pevné chemické vazby v pórobetonu.²⁵

Autoklávování může podle druhu technologie probíhat buď přímo ve formách, lamelách nebo na roštích či bočnicích. Výrobky je možné po proschnutí použít na stavbě. Neautoklávované plynobetonu je potřeba nechat dostatečnou dobu uzrát na požadovanou pevnost a objemovou stálost.²⁵

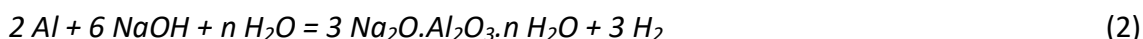
Plynotvorné látky se používá na 1 m³ pórobetonu 0,1 – 2,5 kg prášku z některých kovů podle způsobu technologie. Nejčastěji se používá hliník (0,25 – 0,5 kg), dále pak vápník, zinek, hořčík, baryum a lithium. Ve směsi vzniká plyn vodík, který vyvolává nakypření směsi. Proces můžeme popsat následující rovnicí:²⁶

Reakce hliníku s vodou v alkalickém prostředí.



Při výrobě pórobetonu s použitím cementu je zapotřebí přidat i vápno nebo lépe hydroxid sodný, který zaručí, že se všechen hliníkový prášek využije pro vývoj plynu. Danou reakci můžeme popsat následující rovnicí:²⁶

Reakce hliníku s hydroxidem sodným.



Pro dosažení vhodného pórobetonového výrobku je příznivější, když hliníkový prášek nereaguje ihned, ale začne reagovat přibližně po jedné až dvou minutách. Největší vývoj má pak nastat po osmi až deseti minutách a celkový vývoj má trvat šestnáct až dvacet minut.²⁶

2.3 Suroviny pro výrobu pórobetonu

Na výrobu pórobetonu se používají základní suroviny: pojivem (maltovinou) je vápno a cement, dále jsou přidány křemičité látky, plynotvorné a pěnотvorné látky,

²⁵ Jiří Hejhálek, *Pórobeton. Vlastnosti, využití a jak se vyrábí*, [online], 2017-05-07, [cit. 2019-12-19], Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/porobeton-mladsi-bratr-betonu-stejny-rodopis-jine-vlastnosti>

²⁶ VÝBORNÝ Jaroslav, *Nauka o materiálech 20 (21)*, Rostislav Drochytka, Pavel Košatka, Dimitrij Pume, Zdeněk Tobolka, 1 vydání, Praha, 1999-12, 9 - 10 s.

pomocné suroviny. Hlavním pojivem je čisté vzdušné vápno, které je nehašené a umožňuje využití hydratačního tepla při technologickém procesu.

Použité **vápno** musí mít stejnorodé chemické a mineralogické složení, musí být vyrobeno z jednoho druhu vápence (jedna lokalita). Nesmí obsahovat přepal, pouze středně a tvrdě pálené vápno. Obsah nerozhasitelných součástí nemá být větší než 12 % a obsah celkového oxidu vápenatého (CaO) musí být alespoň 90 % (nejvíce však ve volném stavu). Oxidu hořečnatého (MgO) nesmí být více než 3 % a siřičkové síry více než 0,2 %. Celková ztráta žiháním se má pohybovat od 3 % do 6 %, z toho obsah H₂O nesmí být větší než 3 % a obsah CO₂ nesmí překročit hodnotu 5 %. Teplota hašení musí být minimálně 60 °C po dobu 4 – 12 minut.²⁷

Jakost vápna pro výrobu pórobetonu je u nás předepsána v ČSN EN 459-2 „Vápno pro výrobu pórobetonů“. Normové požadavky na výrobu jsou z hlediska nestálé jakosti vápna velmi přísné.²⁸

Cement se používá výhradně na bázi portlandského slínku. Svou jakostí musí vyhovět požadavkům ČSN P ENV 197-1 „Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití“. Dle normy je pro výrobu pórobetonu dostačující cement třídy 32,5. Z hlediska dodržení výrobního taktu se však většinou používá CEM I 42,5. Musí obsahovat určité množství alkálií v rozpustné formě cca 0,8 – 1,0 % K₂O a 0,2 – 0,5 Na₂O, ty jsou potřebné pro vznik dostatečné alkality a vývoj plynu z hliníkového prášku.²⁸

Křemičitý písek může být různého původu s obsahem SiO₂ nad 90 %. U nás se nejvíce používají písky váté a písky odpadající při plavení kaolinu. Obsah alkálií K₂O + Na₂O ve formě živců a slídy nesmí překročit hodnotu 1,5 %, z toho ve vodě rozpustného Na₂O musí být maximálně 0,2 %, obsah slídy nemá překročit 0,5 %. Mohou se i používat křemičité písky říční, pískové atd. Podstatná je jemnost písku, proto se písek často domlívá, aby se zvětšil jeho měrný povrch a tím se zintenzivnila hydrotermální reakce.²⁸

²⁷ SVOBODA Luboš a kolektiv, *Stavební hmot*, 3 vyd. Praha, 2013, 532 - 533 s.

²⁸ VÝBORNÝ Jaroslav, *Nauka o materiálech 20 (21)*, Rostislav Drochytka, Pavel Košatka, Dimitrij Pume, Zdeněk Tobolka, 1 vydání, Praha, 1999-12, 9 - 10 s.

Jako další křemičitá surovina pro výrobu pórobetonu se může používat **popílek** z tepelných elektráren. Význam spočívá především ve využití velkého množství odpadu. Vyznačuje se vysokou chemickou aktivitou a díky své pórovité struktuře a nízké měrné hmotnosti dosahuje výrobek nižší objemové hmotnosti než při použití písku.²⁹

Jako plynotvorná přísada se přidává **hliníkový prášek**, který je zodpovězený za porézní strukturu. Vniklé bubliny dávají výrobku dobré tepelně – izolační vlastnosti a zároveň přerušují kapiláry ve hmotě a zabraňují kapilárním jevům, které způsobují vlhnutí a promrzání dílců. Hliníkový prášek musí obsahovat nejméně 94 % aktivního hliníku a nemá kolísat více než 1 %. Specifický jemný povrch prášku se má pohybovat mezi 700 a 1200 m²/kg. Částice prášku má mít šupinový tvar, který má reaktivní velkou část povrchu. Nesmí však obsahovat spleené hrudky, zrna větších průměrů a kulovitá zrna s malým reaktivním povrchem. Obsah tuku nemá překročit 1,3 %, aby nedocházelo k potížím při odmašťování. Vlhkosti prášku nemá být větší než 0,2 %.²⁹

Voda používaná při výrobě musí vyhovovat betonářským požadavkům pro záměsovou vodu. Nejčastěji se používá voda pitná, která má neutrální reakci a nízký obsah chloridů. Zpravidla se používá voda ohřátá na 35 – 59 °C podle technologie výroby.²⁹

Pro ovlivnění vlastností se využívá mnoho dalších přísad, které ovlivňují proces tvrdnutí a tvorby minerálů při autoklávování. Nejčastěji se do směsi přidává CaSO₄ ve formě sádrovce, sádry nebo anhydritu. Jeho účelem je zvýšení pevnosti a regulování tuhnutí směsi tím, že zpožďuje hašení vápna. Pro urychlení tvrdnutí směsi a zvýšení pevnosti se používá chlorid vápenatý, jeho použití přináší četné nedostatky, jako je koroze forem a zvětšení smršťování. Hydroxid sodný se používá při výrobě cementového plynobetonu, zvyšuje alkalitu záměsi pro plné využití hliníkového prášku a zkracuje dobu tuhnutí.²⁹

2.4 Ytong

Hlavní charakteristikou stavební hmoty je vysoký podíl pórů a spojení přídatného plniva pomocí hydraulických pojiv. Velmi jemně namletý křemenný písek

²⁹ VÝBORNÝ Jaroslav, *Nauka o materiálech 20 (21)*, Rostislav Drochytka, Pavel Košatka, Dimitrij Pume, Zdeněk Tobolka, 1 vydání, Praha, 1999-12, 12 - 14 s.

se gelovým způsobem naleptá a křemenná zrna se mohou vzájemně spojovat. Z toho následně v autoklávech vzniká pevný vápenný silikát s milióny vzdušných pórů.³⁰

Suroviny základní: cement, vápno, písek nebo popílek (méně používaný)

Suroviny pomocné: hliníkový prášek, výjimečně pasta

2.4.1 Technologie výroby stavebních dílců Ytong

Výroba Ytongu začíná namletím křemenného písku na jemnou moučku a promísením s vápnem, cementem, kypřící látkou a vodou. Směs se odlije do forem, kde se tvoří vodík, který nakypří a vytvoří milióny malých rovnoměrně rozdělených pórů. Během dalších výrobních procesů v pórech zůstane pouze vzduch. Polopevné surové bloky se vyjmou z formy a vyříznou se s velkou přesností, potřebné stavební dílce. Následně se v autoklávu stavební dílce vytvrdí vodní párou při teplotě 200 °C.³¹

2.4.2 Vlastnosti Ytongu

Ytong je lehké, pórovité, lehce zpracovatelné stavivo s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Tvárnice jsou vyráběny v různých třídách pevnosti od 2,2 N/mm² – 6,5 N/mm², a jejich objem tvoří až z 80 % uzavřené póry o průměru 0,5 – 2,5 mm. Uzavřené póry zpomalují nasákavost stavebních dílců než u materiálu s kapilární strukturou. Není vhodný do trvale vlhkého prostředí, do prostorů vystavené sálavému teplu, působení vody, páry, plynů a dynamickým účinkům. Požární odolnost je dle ČSN EN 13501 – 1 stanovena na stupeň hořlavosti A (nehořlavý).³⁰

³⁰ Xella CZ, s.r.o., *Příručka pro projektování Ytong*, [online], 2016-11, [cit. 2019-09-12], Dostupné z: <https://www.ytong.cz/cs/docs/ytong-prirucka-pro-projektovani.pdf>

³¹ Ytong, *Pórobeton Ytong*, [online], Xella Group, [cit. 2019-09-11], Dostupné z: <https://www.ytong.cz/porobeton-ytong.php>

Tabulka 2.1 Vlastnosti materiálu Ytong používaných pro zdící prvky

Vlastnosti materiálu	Jednotka	P2 (300) – P4,4 (700)
May. Průměrná objemová hmotnost v suchém stavu EN 772 - 13	kg/m ³	300 – 700
Normalizovaná pevnost zdících prvků f_b	N/mm ²	2,2 – 6,5
Faktor difuzního odporu μ	-	0,5
Měrná tepelná kapacita c	kJ/(kg.K)	1000
Součinitel tepelného přetvoření α_b	1/K	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Vlhkostní přetvoření ε	mm/m	$\leq 0,20$
Přídržnost f_u	N/mm ²	0,30
Součinitel tepelné vodivosti λ	W/(m.K)	0,077 – 0,180

Zdroj: *Praktická příručka pro navrhování Ytong, Silka, multipor, vydáno 1/2019, vlastní zpracování*

Poznámka: Tabulka s vlastnostmi Ytongu je zjednodušená, jsou zde uvedeny maximální a minimální hodnoty vyráběných stavebních prvků.

Snášelnost Ytongu s prostředím je velmi dobrá, jelikož se hmota skládá z křemenného písku, vápna, cementu a vody. Z jednoho metru krychlového pevné výchozí látky po nakypření vzniká pět metrů krychlových stavební hmoty Ytong. Pro výrobu jednoho metru krychlového stavební hmoty je zapotřebí kolem 1400 MJ primární energie. Ze stavební suti nevznikají žádné zvláštní odpady, plyny nebo látky, které by mohli zatěžovat prostředí.³²

³² Xella CZ, s.r.o., *Příručka pro projektování Ytong*, [online], 2016-11, [cit. 2019-09-12], Dostupné z: <https://www.ytong.cz/cs/docs/ytong-prirucka-pro-projektovani.pdf>

3 Experimentální část

3.1 Cíl práce

Cílem práce je návrh vápenocementových malt s přidáním recyklovaného Ytongu s praktickým provedením základních experimentů, které mohou sloužit pro další výzkum. Vyrobeny a zkoumány jsou vzorky malt s přidáním namletého Ytongu v různých poměrech jako úplná nebo částečná náhrada plniva z drobného kameniva.

V první fázi výzkumu bylo vytvořeno několik sad směsí s různými frakcemi drobného kameniva a Ytongu, s vytvořením různých poměrů těchto plniv a následné vyhodnocení mechanických vlastností.

V další části je vybráno pět různých vzorků (z toho jedna referenční), s nejhodnější velikostí frakce kameniva a Ytongu. Ověřeny jsou základní materiálové charakteristiky, mechanické a tepelně technické vlastnosti a trvanlivosti vybraných vybrané směsi.

Výsledkem práce je vyhodnocení vlastností vápenocementové malty s přidáním nadrceného recyklovaného pórobetonu a zvážení možnosti dalšího využití.

3.2 Měření veličiny a metody měření

Vlastnosti vápenocementových malt s Ytongem jsou zkoumány tradičními metodami i metodami založených na použití nejmodernějších přístrojů. Podrobněji jsou měřené veličiny a metody měření popsány v následující kapitole.

3.2.1 Zjištění objemové hmotnosti kameniva a Ytongu

Objemová hmotnost je definována poměrem hmotnosti zrn vzorku kameniva nebo Ytongu k objemu, který vzorek zaujímá včetně dutin a pórů v zrnech, bez mezer mezi jednotlivými zrny.³³

Objemová hmotnost kameniva byla zjištěna pomocí odměrného válce s vodou, do kterého bylo vsypáno vysušené kamenivo o známé hmotnosti. Z rozdílu hladin před

³³ SVOBODA Luboš a kolektiv, Stavební hmot, 3 vyd. Praha, 2013, 104 s.

vsypání kameniva a po vsypání kameniva do vody zjistíme objemovou hmotnost kameniva. Objemová hmotnost Y_{tongu} je zjištěna stejným způsobem.

Objemová hmotnost se dopočítá dle následující rovnice: ³⁴

$$\rho_v = \frac{m}{(V_h - V_{hw})} \quad (3)$$

kde ρ_v [kg/m^3] je zjištěná objemová hmotnost, m [kg] je hmotnost vysušeného plniva, V_h [m^3] hladina vody po vsypání plniva, V_{hw} [m^3] hladina vody před vsypáním plniva.

3.2.2 Stanovení sypané hmotnosti kameniva a Ytongu

Sypaná hmotnost je definována poměrem hmotnosti zkušební navážky k objemu nádoby. Sypaná hmotnost byla stanovena pomocí nádoby o známém objemu. Nádoba byla zvážena prázdná, suchá a čistá, následně se naplnila zkoušeným materiálem, pomocí lopatky. Převršené kamenivo se odstranilo pravítkem, tak aby nedošlo ke zhuštění materiálu. Naplněná nádoba se zváží a zjistí se její hmotnost. ³⁵

Vztah můžeme vyjádřit následující rovnicí:

$$\rho_b = \frac{(m_2 - m_1)}{V_p} \quad (4)$$

kde ρ_b [Mg/m^3] je měřená sypaná hmotnost kameniva nebo Ytongu, m_2 [kg] je hmotnost nádoby se zkušební navážkou, m_1 [kg] je hmotnost prázdné nádoby, V_p [l] je objem nádoby.

3.2.3 Stanovení konzistence čerstvé malty

Zkušební metodu udává norma ČSN EN 1015-3, kdy podstata zkoušky závisí na hodnotě rozlití a vyjadřuje konzistenci plastických a tekutých směsí. Vypovídá

³⁴ Pavla Kotásková, *Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti kameniva*, [online], Ústav inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny (LDF), [cit. 2019-10-23], Dostupné z: <http://www.utok.cz/sites/default/files/data/USERS/u24/Laborator%206.pdf>

³⁵ ČSN EN 1097-3 (72 1194), *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*, Český normalizační institut, 1999

o zpracovatelnosti směsi a je závislá na vodním součiniteli, přísadách a na jemnosti mletí pojiv apod.

Hodnota rozlití se stanoví pomocí kovového kužele umístěného na normou dané desce střešacího stolu. Deska má průměr 300 mm, zkušební kužel průměr 100 mm ve spodní části a 70 mm v horní části. Obě části musejí být řádně očištěné a natřené minerálním olejem, následně se kužel plní maltou ve dvou vrstvách do úplného vyplnění. Přebytečné množství malty se odstraní zednickou lžící, kovový kužel se sejme vzhůru a po patnácti rázech s frekvencí jedné vteřiny se změří rozlitý koláč ve dvou na sebe kolmých směrech. Průměrná hodnota s přesností na 1 mm se zaznamenává jako výsledná hodnota rozlití.

3.2.4 Stanovení počátku a konce doby tuhnutí

Doba zpracovatelnosti směsi se udává počátkem doby tuhnutí. Kašovitá směs v této fázi ztrácí svoji původní zpracovatelnost a začíná nabývat charakteru pevné látky. Stanovuje se dle ČSN EN 196-3 za pomoci ručního nebo automatického Vicatova přístroje.

Vicatův prstenec výšky 40 mm a vnitřního průměru 75 mm se naplní kašovitou směsí, přebytek hmoty se odstraní seříznutím, aby byl horní povrch zarovnaný. Připravená forma se dá do Vicatova přístroje, kde úzká jehla délky 45 mm a průměru 1,13 mm měří počátek a konec doby tuhnutí. U automatického Vicatova přístroje se pro srovnání vniku jehly do vzorku používá vzorková destička, kdy je jehla umístěna těsně nad povrch směsi. V případě ručního Vicatova přístroje musí být na začátku nastaven do nulové polohy za pomoci vzorkové podkladní destičky, která určí nulu pro nastavení stupnice. Po vniku jehly do vzorku a změření hloubky vpichu se jehla zvedne vzhůru nad vzorek. Na základě určených intervalů a velikosti hloubky vpichu do vzorku se určí počátek a konec doby tuhnutí.³⁶ Pro naše zkoumání byl zvolen automatický Vicatův přístroj Vicamatic 2.0

³⁶ ČSN EN 196 – 3 (722100), *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*, Česká technická norma, účinnost od 10/2017

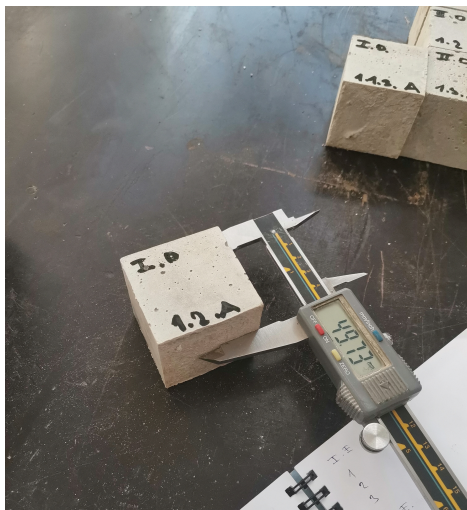
3.2.5 Objemové hmotnosti zkušebních těles

Objemová hmotnost zkušebních těles byla zjištěna gravimetrickou metodou jako poměr hmotnosti k objemu vzorku. Hmotnost vzorku byla stanovena digitální laboratorní váhou TScale QHW 15 s přesností 0,1 g a rozměry posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm. Výsledná objemová hmotnost směsi je určena jako aritmetický průměr ze tří měření.

Vztah můžeme popsat následující rovnicí:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

kde ρ [kg/m³] je objemová hmotnost ztvrdlého vzorku, m [kg] je hmotnost zkušebních těles, V [m³] je objem tělesa.



Obrázek 3.1 Stanovení rozměru posuvným měřítkem



Obrázek 3.2 Stanovení hmotnosti vzorku laboratorní váhou TScale QHW 15

3.2.6 Transport kapalně vlhkosti

Transport kapalně vlhkosti můžeme určit pomocí jednoduché zkoušky prostřednictvím digitální váhy. Na váhu se zavěsí speciální konstrukce, do které se uchytí vzorek, poté se v čase zaznamenávají příbytky hmotnosti tělesa. Vzorek je ponořen přibližně 2 – 3 mm pod hladinu vody. Vážení probíhá v předem nastavených intervalech, které jsou zaznamenávány pomocí počítačového softwaru. Voda se do

vzorku musí dostávat pouze spodní plochou, proto je vzorek po stranách natřen epoxidovým lepidlem.

Z naměřených hodnot můžeme dopočítat absorpční koeficient A_b [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$] a průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti k [m^2/s].^{37, 38}

$$A_b = \frac{\Delta m}{S\sqrt{t}} \quad (6)$$

kde Δm [kg] je hmotnostní přírůstek, S [m^2] je plocha vzorku, t [s] je čas při nasycení.

$$k = \left(\frac{A_b}{w_{\text{sat}}}\right)^2 \quad (7)$$

kde A_b [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$] je absorpční koeficient, w_{sat} [kg/m^3] je obsah nasycené vlhkosti.

3.2.7 Rtuťová porozimetrie

Pro porozumění chování stavebních materiálů je důležité znát velikost a objemové zastoupení pórů ve studovaném materiálu. Experimentálně se hustota zkoumaných směsí zjišťuje rtuťovou porozimetrií, u které se zastoupení velikostí jednotlivých pórů vyjadřuje pomocí distribuční křivky. Hlavní výhodou rtuti je velké povrchové napětí, díky čemuž nedochází ke smáčení u většiny stavebních materiálů. Princip spočívá ve vtlačování rtuti do vzorku pod tlakem, který je úměrný velikosti pórů. Podle naměřeného tlaku a objemu vtháněné rtuti, lze pomocí porozimetru Pascal 140 a 440 od výrobce Thermo Electron určit velikost a objemové zastoupení pórů. Při nižších tlacích můžeme zaznamenat póry mezi 4 – 100 μm , při vyšších tlacích kolem 400 MPa i póry 0,003 μm .³⁷

³⁷ ČERNÝ Robert et al., *Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials and Its Applications*, ČVUT Praha, 2013

³⁸ Vejmelková E. et. al. Free water intake as means of material characterization. *JOURNAL OF BUILDING PHYSICS*. Vol. 33, Issue 1, July 2009, pp. 29 - 44

Washburnovou rovnicí můžeme popsat vztah mezi tlakem a velikostí pórů.³⁹

$$d_p = \frac{-4\gamma \cos \theta}{p} \quad (8)$$

kde d_p [m] je průměr pórů, γ [N/m] povrchové napětí rtuti, θ [°] kontaktní úhel a p [Pa] působící tlak.



Obrázek 3.3 Porozimetry Pascal 140 a 440 od výrobce Thermo Electron



Obrázek 3.4 Vzorek naplněný rtuť

3.2.8 Nasycení vodou pomocí vakua

Princip metody je založený na Archimédovy hmotnosti, kdy jsou póry materiálu plně nasycené vodou. Nejdříve se připravené vzorky vysuší v sušičce, tím se zbaví fyzikálně vázané vody, poté se vzorky zváží m_d [kg] a změří se jejich rozměry. Následně se umístí do exsíkátoru, ze kterého je pomocí vakuové pumpy odsát vzduch. Po odsátí vzduchu jsou vzorky v exsíkátoru ponechány minimálně 24 hodin. Následně jsou vzorky vyjmuty a zváženy na vzduchu m_w [kg] a pod vodou m_α [kg]. Z naměřených hodnot lze vypočítat objem pórů V [m³], kde ρ_w [kg/m³] je hustota vody při dané teplotě. Metodu nelze použít pro hydrofobní materiály.^{40, 41}

³⁹ Jean Rouquerol et al., *Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report)*, Pure and Applied Chemistry, Vol 84, Issue 1, 2011-12-12, [cit. 2019-10-28], Dostupné z: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/i/pac.2012.84.issue-1/pac-rep-10-11-19/pac-rep-10-11-19.pdf>

⁴⁰ Robert Černý et al. *Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials and Its Applications*. ČVUT Praha, 2013

⁴¹ Roels Staf et al., *Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials*, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 27, No. 4 - April 2004, str. 309 - 311

Vztah můžeme popsat rovnicí:

$$V = \frac{m_w - m_\alpha}{\rho_w} \quad (9)$$

Z naměřených hodnot můžeme dopočítat:

$$\text{Otevřenou pórovitost } \psi_o [-] \quad \psi_o = \frac{m_w - m_\alpha}{V \cdot \rho_w} \quad (10)$$

$$\text{Objemovou hmotnost } \rho_d [\text{kg/m}^3] \quad \rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (11)$$

$$\text{Hustotu matrice } \rho_{mat} [\text{kg/m}^3] \quad \rho_{mat} = \frac{m_d}{(1 - \psi_o) \cdot V} \quad (12)$$

3.2.9 Heliová pyknometrie

Pyknometrie stanovuje hustotu pevných látek a kapalin. Klasický pyknometr se provádí pomocí skleněné nádoby s přesně daným objemem a zátkou s kanálkem pro odvod přebytečné kapaliny. Při použití této metody může být problém v rychlosti a dokonalosti vyplnění pórového prostoru pevné látky měřící kapalinou. Z toho důvodu se dnes používá heliová pyknometrie, která jako měřící tekutinu využívá helium a pyknometr je vyroben z korozivzdorné oceli. Helium díky svým vlastnostem snadno a rychle zaplní pórový systém vzorku. Před začátkem testování je zapotřebí zjistit, zda zkoumaný materiál nereaguje s použitým médiem.⁴²

Helium se pro zkoušku používá zejména kvůli velikosti atomů, ty jsou velmi malé, a proto dokážou rychle a snadno proniknout do velmi malých pórů. Vzorek se před zkouškou vysuší, pro rychlost a přesnost měření se rozdrtí. Z hlediska přesnosti je vhodné, aby vzorek byl co největší, následně se umístí do nádoby o známém objemu. Před vlastním měřením je přístroj propláchnut čistým heliem z tlakové láhve a tím dojde k odstranění vzduchu ze systému, včetně vzorku. Nejdříve se heliem naplní referenční komora o známém objemu a změří se tlak v komoře. Následně se otevře

⁴² ČERNÝ Robert et al. *Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials and Its Applications*, ČVUT Praha, 2013

ventil do měřicí komory a z naměřené ustálené hodnoty tlaku a známé teploty je určen objem studovaného vzorku. Po zjištění požadovaných veličin je systém otevřen do atmosféry a cyklus se opakuje několikrát dokola, dokud není dosaženo malého rozdílu mezi výsledky po sobě jdoucích cyklů. Výsledkem zkoušky je hustota studovaného materiálu.⁴³

Vztah můžeme popsat následující rovnicí:

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V_{mat}} \quad (13)$$

kde ρ_{mat} [kg/m³] je výsledná hustota matrice, m_d [kg] je hmotnost vzorku a V_{mat} [m³] je objem matrice.

3.2.10 Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti zatvrdlé malty udává ČSN EN 1015-11, kdy při mezním napětí dochází k porušení trámečku v místě namáhání ohybovým momentem. U třibodového zatěžování je ohybový moment vyvozen osamělou silou působící svisle shora na střed trámečku, v dolní části je vzorek na krajích podepřen. Maximální ohybový moment vzniká ve středu trámečku, kde se první trhлина objeví ve spodní části průřezu. Pokud by se první trhлина objevila v tlačené části průřezu, jednalo by se o stanovení pevnosti v tlaku za ohybu.

Při experimentu byl použit elektromechanický lis MTS Criterion, ve kterém byly zkoušeny trámečky o velikosti 40 x 40 x 160 mm v časovém intervalu po 7, 28 a 90 dnech. Zkušební těleso se umístí na dvě válcové podpory, které jsou od sebe vzdálené 100 mm. Vzorek se do lisu umísťuje vždy kolmo na směr hutnění, tedy pootočen o 90 ° proti pozici ve formě. Třetí válcová podpora se nachází u horního povrchu vzorku v prostřední části. Zatížení působí rovnoměrně rychlostí 10 – 50 N/s tak, aby k porušení trámečku došlo v intervalu 30 - 90 s.

⁴³ ČERNÝ Robert et al. *Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials and Its Applications*, ČVUT Praha, 2013

Pevnost v tahu za ohybu lze vyjádřit následující rovnicí:

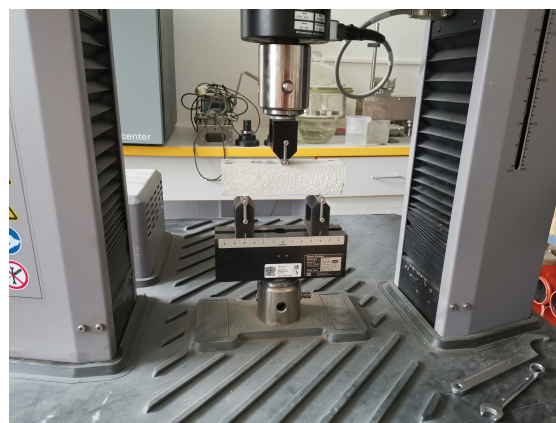
$$R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b^3} \quad (14)$$

kde R_f [MPa] je pevnost v tahu za ohybu, F_f [N] je maximální zatížení působící na střed trámečku, l [mm] vzdálenost mezi podporami, b [mm] strana čtvercového průřezu.

Výsledná hodnota je stanovena jako aritmetický průměr ze tří měření, zaokrouhlená s přesností na 0,01 MPa.



Obrázek 3.5 Trámečky porušené zkouškou pevnosti v tahu za ohybu



Obrázek 3.6 Vzorek v průběhu zkoušky v mechanickém lisu MTS Criterion

3.2.11 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se dle ČSN EN 1015-11 definuje jako mezní napětí, kdy dochází k porušení zkušebního tělesa. Experimentálně zkouška probíhá na zlomených trámečcích zbylých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost každé směsi tedy byla stanovena z celkem šesti těles vždy po 7, 28 a 90 dnech. Trámeček byl umístěn do mechanického lisu kolmo na směr hutnění, kde byl zatěžován plynule rychlostí 50 – 500 N/s, tak aby k porušení tělesa došlo v intervalu 30 – 90 s.

Pevnost v tlaku lze vyjádřit následující rovnicí:

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (15)$$

kde R_c [MPa] je pevnost v tlaku, F_c [N] zatížení při porušení, S [mm²] je plocha na kterou působí zatížení. Výsledek je aritmetický průměr z šesti měření, zaokrouhlený s přesností na 0,01 MPa.



Obrázek 3.7 Vzorek umístěný v lisu před zkouškou pevnosti v tlaku



Obrázek 3.8 Vzorek po ukončení zkoušky pevnosti v tlaku

3.2.12 Přídržnost

Přídržnost je stanovena dle normy ČSN EN 1015-12. Vyjadřuje maximální napětí v tahu [MPa], vyvozené zatížením působící kolmo k povrchu nanesené malty na podklad. Malty se nanesly na pórobetonovou tvárnici a při plastickém stavu se do vzorku vykroužily zkušební kruhy o průměru 5 cm, do hloubky min. 2 mm. Po pěti dnech se lepidlem přilepily zkušební terče, a po vytvrzení lepidla se po následujících dvou dnech provedly odtrhy odtrhoměrem, který vyvozuje tahové napětí. Zkouška přídržnost byla provedena po 7 dnech zrání malt.

Přídržnost můžeme stanovit z následující rovnice:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (16)$$

kde f_u [N/mm²] je zjištěná přídržnou, F_u [N] největší dosažená síla při odtrhu a A [mm²] velikost zkušební plochy.

Podle normy ČSN EN 1015 – 12 mohou při odtržení nastat tři různé způsoby porušení:

- a) porušení přilnavosti mezi maltou a podkladem, výsledkem zkoušky je hodnota naměřená přídržnost;
- b) porušení soudržnosti ve vrstvě malty, výsledek zkoušky je menší než skutečná hodnota přídržnost;
- c) porušení soudržnosti v podkladovém materiálu, výsledek zkoušky je menší než skutečná hodnota přídržnost.

V případě a) můžeme výslednou hodnotu přídržnosti brát jako průměrnou. Při porušení b) a c) lze výslednou hodnotu přídržnosti považovat za minimální hodnotu. Pokud by při zkoušce došlo k odtržení ve vrstvě lepidla mezi kruhovým terčem a maltou, měření by bylo neplatné.

3.2.13 Tepelná vodivost

Jedná se o jednu ze základních tepelně-fyzikálních vlastností stavebních materiálů. Vyjadřuje schopnost látky vést teplo, za podmínek, že v materiálu jsou místa s teplotním gradientem. Částice látky si předávají svou kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů, ty se přenáší z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě látky. Definován je jako tepelný výkon [W], který prochází plochou 1 m² do vzdálenosti 1 m při jednotkovém teplotním gradientu [K]. Pro daný materiál se vyjadřuje jako součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m.K)].⁴⁴

Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m.K)] byl zjištěn nestacionární metodou pomocí přístroje Isomet 2114, který má vyměnitelné sondy. Jehlovou sondu pro sypké, porézní nebo vláknité materiály, a plošnou sondu pro pevné materiály. Při

⁴⁴ PAVLÍKOVÁ Milena, Pavlík Zbyšek a Hošek Jiří. *Materiálové inženýrství I*, 1 vydání, vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 88 s.

experimentu je použita plošná sonda se zabudovanou pamětí, ve které jsou uloženy kalibrační konstanty. Měření je založené na průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsech tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, které jsou spojené s analyzovaným materiálem.

3.2.14 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita materiálu může být vztažena na kg látky, která se označuje jako měrná, nebo na m³ látky, poté se nazývá objemová. Měrná tepelná kapacita je fyzikální veličina, která je definována jako požadované množství tepla pro dodání 1 kg látky, aby došlo k ohřátí o 1 K.

Měrnou tepelnou kapacita lze vyjádřit vztahem:

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right) \quad (17)$$

kde c [J/kg.K] je měrná tepelná kapacita, m [kg] hmotnost látky, Q [J] množství tepla, T [K] teplota.

Může-li při ohřátí látky docházet ke zvýšení objemu materiálu, koná látka při rozpínání práci a je nutné krýt tuto práci dodáním tepla. U pevných látek a kapalin je rozpínavost nepatrná a teplo využitě při změně objemu se zanedbává.⁴⁵

3.2.15 Stanovení mrazuvzdornosti

Mrazuvzdornost malty se stanoví dle normy ČSN 72 2452, střídavým zmrazováním a rozmrazováním zkušebních těles nasycených vodou, požadovaným počtem zmrazovacích cyklů. Zkouška probíhá na trámečcích 40 x 40 x 160 cm po době zrání, tedy po 28 dnech. Pro zkoušku jsou zapotřebí sady zkušebních těles, které projdou opakovaným zmrazováním a rozmrazováním. Pro účel porovnání nám slouží dvě referenční sady. Přesný počet zkušebních těles vychází z počtu zmrazovacích cyklů a způsobu provádění mezilehlých kontrol vlastností. Norma připouští pro průběžné

⁴⁵ PAVLÍKOVÁ Milena, Pavlík Zbyšek a Hošek Jiří. *Materiálové inženýrství I*, 1 vydání, vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 92 s.

sledování změn struktury a vlastností materiálů i nedestruktivní dynamické zkoušky (ultrazvukovou nebo rezonanční).

Ke zkoušce byl zhotoven potřebný počet zkušebních těles s ohledem na počet zmrazovacích etap a potřebu porovnávacích sad vzorků. Zvoleny byly dvě zmrazovací etapy. Před zmrazováním se vzorky nasatí vodou po dobu 24 hodin ponořením do vodní lázně teploty $+ 20 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$, tak aby voda nad povrchem těles byla minimálně 3 cm. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se děje v rámci cyklů, z čehož jeden zmrazovací cyklus se skládá nejméně ze čtyř hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování. Jedna zmrazovací etapa se zpravidla skládá z celkem 25 cyklů. Zmrazovací prostor musí mít regulovanou teplotu do $-20 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$ a tělesa musí zabírat nejvíce třetinu prostoru. Při rozmrazování se tělesa ukládají do vody $+ 15$ až $+ 20 \text{ °C}$. Po ukončení zmrazovací etapy, zpravidla jde o 25 cyklů, se vzorky změří, zváží a zjistí se jejich objemová hmotnost. Následně se trámečky zkouší destruktivně nebo nedestruktivně na tahu za ohybu, přičemž zkouška musí být provedena nejpozději do 30 minut od vytažení těles z vody.

Objemová hmotnost těles a pevnost v tahu za ohybu se určí i u porovnávaných sad vzorků. První sada se zkouší při začátku zmrazování a druhá sada po ukončení zmrazovací etapy.

Zkouška mrazuvzdornosti může být ukončena podle normy ⁴⁶ v případech:

- a) po ukončení předepsaného počtu zmrazovacích cyklů;
- b) po ukončení zmrazovací etapy, při které u vzorků došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o více než 25 %, oproti pevnosti v tahu za ohybu u první porovnávací sady;
- c) po zmrazovacím cyklu, při kterém byl zjištěn pokles dynamického modulu pružnosti E_d větší než 25 % proti hodnotě E_d zjištěného na první porovnávací sadě;
- d) jsou-li zkušební tělesa mrazem zjevně porušena.

⁴⁶ ČSN 72 2452 (722452), *Zkouška mrazuvzdornosti malt*, Československá státní norma, účinnost od 1/1970

Jako výsledek zkoušky se dle normy ⁴⁷ pro každou ukončenou zmrazovací etapu a po ukončení zmrazování uvádí:

- 1) zjištěné úbytky hmotnosti zkoušených trámečků, vyjádřených v procentech;
- 2) naměřené pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku trámů zmrazovaných i porovnávaných;
- 3) změna dynamického modulu pružnosti E_d , při použití rezonanční metody;
- 4) součinitel mrazuvzdornosti malt, který je vyjádřen poměrem aritmetického průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků zmrazovaných k aritmetickému průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků porovnávacích z druhé sady.

Mrazuvzdornost malty se dle normy považuje na počet zmrazovacích cyklů, při kterých úbytek pevnosti zmrazovaných vzorků není větší než 25 % proti pevnosti porovnávacích vzorků.

3.3 Materiály pro výrobu směsí

Při návrhu směsi byl do obyčejné vápenocementové malty přidán recyklovaný pórobeton, jako náhrada plniva z jemného kopaného písku. Jemný kopaný písek frakce 0/2 mm a 0/4 mm, recyklovaný Ytong frakcí 0/1 mm, 0/2 mm, a 0/4 mm. Jako pojivo byl použit vápenný hydrát CL 90-S od firmy Cemix a portlandský cement 42,5 R od firmy Lafarge Cement.

Portlandský cement CEM I 42,5 R je vyráběn v souladu s normou ČSN EN 197 – 1 ed. 2 „Cement – část 1: Složení specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití“. Vyrábí se mletím portlandského slínku se síranem vápenatým, doplňujícími složkami a přísadami. Vyznačuje se, rychlým nárůstem počáteční pevnosti, vysokým vývinem hydratačního tepla a dlouhodobé vysoké pevnosti. Je vhodný na použití do malt, suchých maltových směsí, k prefabrikaci, do samozhutnitelných a vysokohodnotných betonů, vyztužených a předpjatých betonů.⁴⁸

⁴⁷ ČSN 72 2452 (722452), *Zkouška mrazuvzdornosti malt*, Československá státní norma, účinnost od 1/1970

⁴⁸ Lafarge Cement, a.s., *Portlandský cement CEM I 42,5 R*, IZOMAT, [cit. 2019-11-13], Dostupné z: https://www.izomat.cz/out/media/Technicky_list_CEM_I_42_5_R_SPECIAL_PLUS_0.pdf

Tabulka 3.1 Chemické složení portlandského cementu CEM I 42,5 R

Cement	Složení (poměr složek podle hmotnosti)	
	Slínek	Doplňující složky
CEM I	95 – 100 %	0 – 5 %

Zdroj: Hodnoty převzaty z www.izomat.cz

Tabulka 3.2 Technické parametry portlandského cementu udávané výrobcem

Parametr	Jednotka	Požadavek ČSN EN 197 – 1 ed.2	Dosahovaný průměr
Počátek tuhnutí	minuty	min. 60	170 – 220
Počáteční pevnosti (2 dny)	MPa	min. 20	28 – 36
Normalizovaná pevnost (28 dní)	MPa	42,5 – 62,4	54 – 62
Objemová stálost	Mm	max. 10	0 – 2,0
Obsah síranů (např. SO ₃)	%	max. 4,0	3,0 – 3,5
Obsah chloridů	%	max. 0,10	0,03 – 0,07
Měrný povrch	cm ² /g	neuvádí se	3200 - 3800

Zdroj: Hodnoty převzaty z www.izomat.cz

Kopáný písek frakce 0/4 mm je v souladu s ČSN EN 13139 „Kamenivo pro malty“ dodaný firmou CEMEX. Jedná se o jemný kopáný písek vhodný do malt a omítek.

Vápenný hydrát CL 90 – S je bílé vápno hašené, čisté, objemově stálé a velmi jemné, má vlastnosti dle ČSN EN 459 – 1 ED.2 „Stavební vápno – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody“. Výroba začíná výpalem z velmi čistých vápenců, následným podrcením a hydratováním na požadované parametry. Je vhodný na suché omítkové směsi, použití ve stavebnictví a úpravu vod včetně neutralizace odpadních vod.⁴⁹

⁴⁹ LB Cemix, *Vápenný hydrát CL 90 – S*, Kotouč Štramberk, aktualizace 05/2019, [cit. 2019-11-08], Dostupné z: https://www.cemix.cz/data/files/technicky_l_hydrat.pdf

Tabulka 3.3 Chemické a fyzikální vlastnosti vápenného hydrátu CL 90 – S

Vápenný hydrát CL 90 - S	EN 459 – 1 [%]	Dosahovaný průměr [%]
CaO + MgO	≥ 90,0	97,2
z toho MgO	≤ 5,0	1,1
SO ₃	≤ 2,0	< 0,1
CO ₂	≤ 4,0	1,1
Vlhkost	≤ 2,0	0,8
Sypná hmotnost	kg/m ³	440

Zdroj: Tabulka převzata z www.cemix.cz

Odpadní pórobeton (YTONG), byl dodán recyklační firmou a majitelem, který pórobeton skladoval na půdě svého rodinného domu. Při první fázi návrhu směsí, byla použita část drceného recyklátu, která obsahovala z velké části obvodové tvárnice Ytong stáří cca 20 let. Spotřeba materiálu při výrobě vzorků byla příliš velká, a proto bylo zapotřebí vyrobit další várku drceného recyklátu. Ta byla zhotovena z příčkovek Ytong stáří 13 let skladované v suchu na půdě rodinného domu. Vzhledem k tomuto faktu se některé naměřené hodnoty nemusí shodovat. Jedná se hlavně o měřené pevnosti v tlaku u směsí, které byly vyráběny v první fázi výzkumu a z kterých se následně vybírala finální frakce kameniva a Ytongu. Oproti finálním tělesům, kde byla použita druhá várka drceného recyklátu, a na kterých byly testovány vybrané vlastnosti.

Při použití recyklovaného Ytongu ve stáří 20 let a 13 let nebyl zaznamenán rozdíl ve zpracovatelnosti malt. Došlo však ke snížení pevnosti v tlaku u aplikace recyklátu ve stáří 13 let z příčkovek. Využitím recyklátu se dosahuje obtížně stabilních výsledků a musíme s touto skutečností počítat.



Obrázek 3.9 Použitá drtička pro úpravu recyklovaného pórobetonu



Obrázek 3.10 Drcený pórobeton z použité drtičky

Recyklovaný pórobeton byl upraven pomocí laboratorní čelistové drtičky od firmy BRIO Hranice.

3.3.1 Stanovení zrnitosti

U každého druhu kameniva záleží na distribuci zrn, která je ovlivněná původem a způsobem zpracování výchozích surovin. Zrnitost se zjišťuje prosévací zkouškou na sadě zkušebních sít dle ČSN EN 933-2 „Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: stanovení zrnitosti – zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů“. V následující části jsou síta označena pomocí velikosti příslušného oka udané v milimetrech. V případě kruhových ok je udáván průměr oka a u čtvercových ok se velikost používá délka strany oka. Při zkouškách byly použity síta s čtvercovými oky s velikostí: 0,063 – 0,125 – 0,250 - 0,5 – 1 – 2 – 4 mm.

Výsledek prosévací zkoušky je vyjádřen prostřednictvím celkových propadů získaných na jednotlivých zkušebních sítích. Hodnoty propadů se uvádějí jako procentní podíl z celkové hmotnosti prosévaného vzorku. Výsledek se zaznamenává v tabulce a pomocí spojnicového diagramu pojmenovaného jako čára zrnitosti.

Experimentálně byly provedeny vždy tři měření zrnitosti, jejich výsledek je průměr z těchto hodnot.

Tabulka 3.4 Naměřené hodnoty zrnitosti zkušebních navážek – písek 0/4

Experimentální měření zrnitosti na třech zkušebních navážkách				
Celková suchá hmotnost m [g]				1500
Velikost otvorů síta [mm]	1 navážka n_1 [g]	2 navážka n_2 [g]	3 navážka n_3 [g]	Výsledná průměrná hodnota měření $\Sigma n_i / 3$ [g]
4	9,6	9,6	10,8	10
2	107,7	113,1	96,0	105,6
1	225,9	224,5	205,0	218,5
0,5	599,3	597,4	619,3	605,3
0,25	431,7	437,1	433,5	434,1
0,0125	92,2	85,9	94,1	90,8
0,063	25,5	24,6	32,2	27,4
0 (zbytek na dně)	8,1	7,8	9,1	8,3

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.5 Výpočet a vyjádření výsledku zrnitosti - písek 0/4

Zrnitost kameniva – síťový rozbor dle ČSN EN 933 - 1			
Celková suchá hmotnost m [g]			1500
Velikost otvorů síta [mm]	Průměrná hmotnost zachyceného materiálu m_{Ri} [g]	Procento zbytku na sítěch $100 \times m_{Ri} / m$ [%]	Souhrnné procento propadu $100 - \Sigma (100 \times m_{Ri} / m)$ [%]
4	10	0,67	99,33
2	105,6	7,04	92,29
1	218,5	14,57	77,72
0,5	605,3	40,35	37,37
0,25	434,1	28,94	8,43
0,0125	90,8	6,05	2,38
0,063	27,4	1,83	0,55
0 (zbytek na dně)	8,3	0,55	0

Zdroj: ČSN EN 933 – 1 Stanovení zrnitosti – síťový rozbor, účinnost: 07/2012

Tabulka 3.6 Naměřené hodnoty zrnitosti zkušebních navážek – Ytong 0/4

Experimentální měření zrnitosti na třech zkušebních navážkách				
Celková suchá hmotnost m [g]				750
Velikost otvorů síta [mm]	1 navážka n_1 [g]	2 navážka n_2 [g]	3 navážka n_3 [g]	Výsledná průměrná hodnota měření $\Sigma n_i / 3$ [g]
4	0	0	0	0
2	44,6	12,5	13,3	23,5
1	132,2	143,2	125,8	133,7
0,5	230,7	221,1	218,3	223,4
0,25	147,3	163,8	156,5	155,9
0,0125	77,9	89,3	87,4	84,8
0,063	51,4	58,7	70,8	60,3
0 (zbytek na dně)	65,9	61,4	77,9	68,4

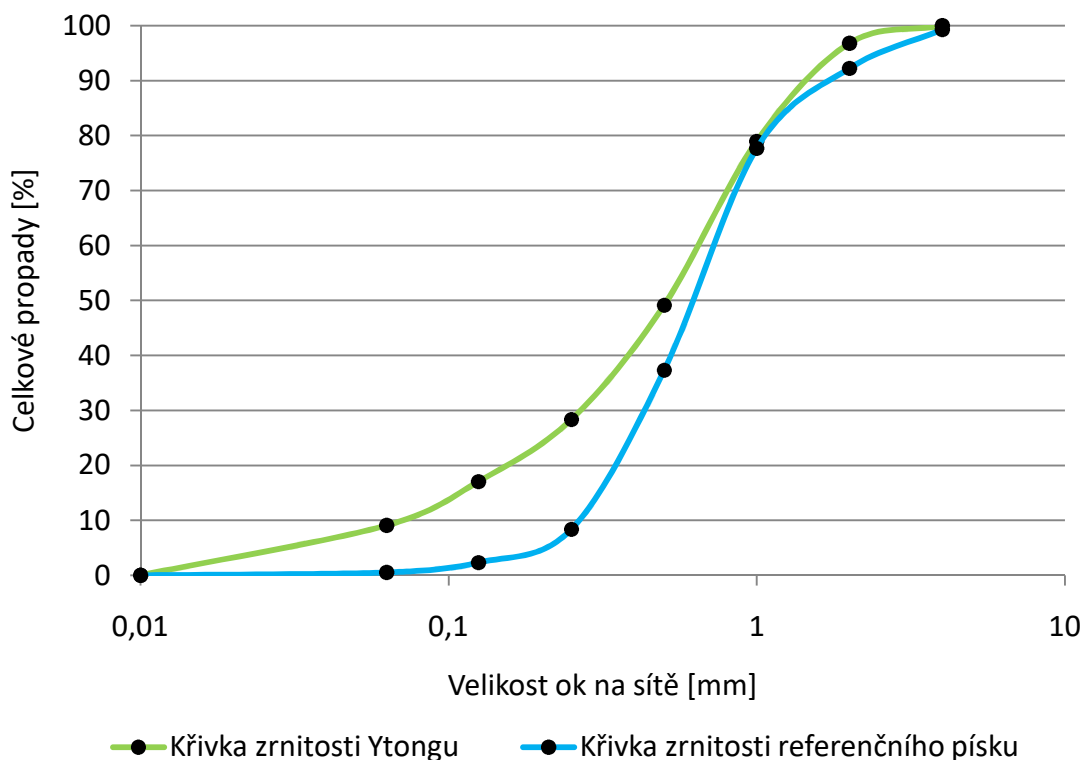
Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.7 Výpočet a vyjádření výsledku zrnitosti - Ytong 0/4

Zrnitost kameniva – síťový rozbor dle ČSN EN 933 - 1			
Celková suchá hmotnost m [g]			750
Velikost otvorů síta [mm]	Průměrná hmotnost zachyceného materiálu m_{Ri} [g]	Procento zbytku na sítěch $100 \times m_{Ri} / m$ [%]	Souhrnné procento propadu $100 - \Sigma (100 \times m_{Ri} / m)$ [%]
4	0	0	100
2	23,5	3,2	96,8
1	133,7	17,8	79,0
0,5	223,4	29,8	49,2
0,25	155,9	20,8	28,4
0,0125	84,8	11,3	17,1
0,063	60,3	8,0	9,1
0 (zbytek na dně)	68,4	9,1	0

Zdroj: ČSN EN 933 – 1 Stanovení zrnitosti – síťový rozbor, účinnost: 07/2012

Graf 3.1 Křivka zrnitosti referenčního písku 0/4 a Ytongu 0/4



Zdroj: ČSN EN 933 – 1 Stanovení zrnitosti – síťový rozbor, účinnost: 07/2012, vlastní zpracování

Z vyhodnocení zkoušky můžeme vidět, že Ytong obsahuje více jemných částic. Křivka zrnitosti je zobrazena v logaritmickém měřítku.

3.4 Návrh složení maltových směsí

Poměr jednotlivých složek směsí byl zvolen s ohledem na tradiční způsob míchání vápenocementové malty v poměru 1:1:3, tedy jeden díl vápna, jeden díl cementu a tři dílky plniva. Vyzkoušen byl i poměr složek 1:1:5, ale zpracovatelnost a pevnostní vlastnosti maltových směsí byly nevyhovující. Jednotlivé směsi se liší v nahrazení určité části plniva z písku recyklovaném Ytongem.

3.4.1 Stanovení jednotlivých složek směsi

V první fázi výzkumu bylo zapotřebí navrhnout směsi s různým poměrem odpadního pórobetonu jako náhrada plniva kopaného jemného písku a ověření zpracovatelnosti a pevnosti v tlaku. Testovány byly směsi s různou frakcí recyklovaného

pórobetonu a jemného písku, kdy výsledek je vždy aritmetický průměr z tří měření. Na základě naměřených pevností byla zvolena příslušná frakce plniv a mohli se ověřit další vybrané vlastnosti.

Množství vody do směsi bylo přidáno na základě hodnoty rozlití dle ČSN EN 1015-2 „ Zkušební metody malt pro zdivo – část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt“. Kdy malta určená ke zkoušení těles musí mít vhodnou konzistenci dle následující tabulky. Potřebný obsah vody se k dosažení této konzistence stanovuje pomocí pokusných záměsí.

Tabulka 3.8 Předepsaná hodnota rozlití dle ČSN EN 1015 – 2 vztahující se na objemovou hmotnost čerstvé malty

Objemové hmotnost čerstvé malty [kg/m ³]	Hodnota rozlití [mm]
> 1200	175 ± 10
> 600 ≤ 1200	160 ± 10
> 300 ≤ 600	140 ± 10
≤ 300	120 ± 10

Zdroj: ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo, účinnost: 11/1999

- Poměr složek maltových směsí: 1 díl vápna, 1 díl cementu, 3 dílky plniva – písek, Ytong.
- Pevnost v tlaku se prováděla dle normy ČSN EN 1015-11 na zkušebních krychlích 50 x 50 x 50 mm.

Označení směsí na základě velikosti frakce použitého plniva:

Směs A	Kopaný písek 0/4, Ytong 0/2
Směs B	Kopaný písek 0/4, Ytong 0/1
Směs C	Kopaný písek 0/4, Ytong 0/0,5
Směs D	Kopaný písek 0/1, Ytong 0/1
Směs E	Kopaný písek 0/2, Ytong 0/2

Navržené poměry plniva ve směsích:

- I. Pouze plnivo z recyklovaného Ytongu
- II. Pouze plnivo z jemného kopaného písku
- III. Plnivo složené z 50 % jemného písku a 50 % Ytongu
- IV. Plnivo složené z 25 % jemného písku a 75 % Ytongu
- V. Plnivo složené ze 75 % jemného písku a 25 % Ytongu



*Obrázek 3.11 Použitá stavební míchačka
na přípravu malt*



*Obrázek 3.12 Příprava vzorků pro zjištění
pevnosti v tlaku*

V následujících tabulkách je návrh poměru suchých složek maltové směsi na 1 000 g a záměsová voda stanovená na požadovanou hodnotu rozlití.

Tabulka 3.9 Množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2)

Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/2					
Směs A	Cement [g]	Vápno [g]	Písek [g]	Ytong [g]	Záměsová voda [ml]
I.	200	200	0	600	767
II.	200	200	600	0	230
III.	200	200	300	300	460
IV.	200	200	150	450	617
V.	200	200	450	150	397

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.10 Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo

Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/2			
Směs A	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Výsledná hodnota rozlití [mm]	Požadavek dle ČSN EN 1015 – 2 [mm]
I.	1342	165	175 ± 10
II.	1966	166	175 ± 10
III.	1554	166	175 ± 10
IV.	1472	168	175 ± 10
V.	1709	168	175 ± 10

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.11 Množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2)

Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/1					
Směs B	Cement [g]	Vápno [g]	Písek [g]	Ytong [g]	Záměsová voda [ml]
I.	200	200	0	600	708
II.	200	200	600	0	230
III.	200	200	300	300	457
IV.	200	200	150	450	572
V.	200	200	450	150	365

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.12 Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo

Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/1			
Směs B	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Výsledná hodnota rozlití [mm]	Požadavek dle ČSN EN 1015 – 2 [mm]
I.	1207	165	175 ± 10
II.	1966	166	175 ± 10
III.	1478	168	175 ± 10
IV.	1290	165	175 ± 10
V.	1552	166	175 ± 10

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.13 Množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2)

Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/0,5					
Směs C	Cement [g]	Vápno [g]	Písek [g]	Ytong [g]	Záměsová voda [ml]
I.	200	200	0	600	739
II.	200	200	600	0	230
III.	200	200	300	300	534
IV.	200	200	150	450	600
V.	200	200	450	150	354

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.14 Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo

Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/0,5			
Směs C	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Výsledná hodnota rozlití [mm]	Požadavek dle ČSN EN 1015 – 2 [mm]
I.	1124	168	175 ± 10
II.	1966	166	175 ± 10
III.	1390	168	175 ± 10
IV.	1193	168	175 ± 10
V.	1583	165	175 ± 10

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.15 Množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2)

Frakce jemného písku 0/1, frakce Ytongu 0/1					
Směs D	Cement [g]	Vápno [g]	Písek [g]	Ytong [g]	Záměsová voda [ml]
I.	200	200	0	600	708
II.	200	200	600	0	250
III.	200	200	300	300	488
IV.	200	200	150	450	623
V.	200	200	450	150	363

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.16 Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo

Frakce jemného písku 0/1, frakce Ytongu 0/1			
Směs D	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Výsledná hodnota rozlití [mm]	Požadavek dle ČSN EN 1015 – 2 [mm]
I.	1207	165	175 ± 10
II.	1856	168	175 ± 10
III.	1442	166	175 ± 10
IV.	1271	168	175 ± 10
V.	1564	165	175 ± 10

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.17 Množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2)

Frakce jemného písku 0/2, frakce Ytongu 0/2					
Směs E	Cement [g]	Vápno [g]	Písek [g]	Ytong [g]	Záměsová voda [ml]
I.	200	200	0	600	708
II.	200	200	600	0	243
III.	200	200	300	300	467
IV.	200	200	150	450	656
V.	200	200	450	150	368

Zdroj: Vlastní zpracování

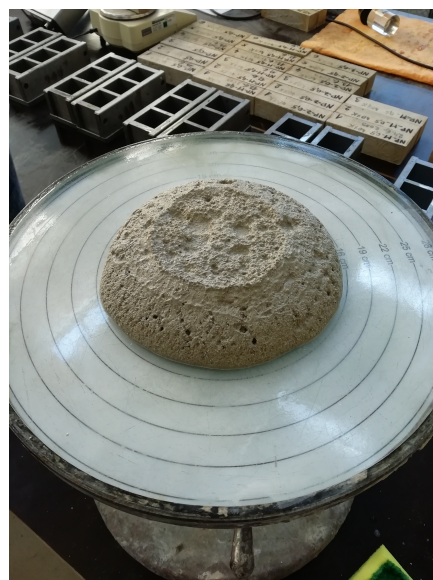
Tabulka 3.18 Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo

Frakce jemného písku 0/2, frakce Ytongu 0/2			
Směs E	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Výsledná hodnota rozlití [mm]	Požadavek dle ČSN EN 1015 – 2 [mm]
I.	1242	165	175 ± 10
II.	1840	165	175 ± 10
III.	1419	166	175 ± 10
IV.	1295	166	175 ± 10
V.	1563	167	175 ± 10

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 3.13 Střásací stolek se vzorkem malty



Obrázek 3.14 Pohled na desku střešacího stolu

3.4.2 Výsledky pevnosti v tlaku navržených směsí

V následujících tabulkách jsou výsledky pevnosti v tlaku směsí s různou frakcí kameniva a Ytongu, kdy hodnota pevnosti je vždy aritmetický průměr z tří měření.

Tabulka 3.19 Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/2

Směs A	Objemová hmotnost[kg/m ³]		Pevnost v tlaku [MPa]	
	7 denní	28 denní	7 denní	28 denní
I.	1374	1342	0,76	1,38
II.	1990	1966	7,85	13,16
III.	1576	1554	3,91	7,11
IV.	1481	1472	1,74	3,91
V.	1744	1709	5,11	8,66

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.20 Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/1

Směs B	Objemová hmotnost[kg/m ³]		Pevnost v tlaku [MPa]	
	7 denní	28 denní	7 denní	28 denní
I.	1470	1207	1,80	3,75
II.	1990	1966	7,85	13,16
III.	1676	1478	5,23	8,21
IV.	1524	1290	2,84	5,08
V.	1774	1552	5,22	9,01

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.21 Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/0,5

Směs C	Objemová hmotnost[kg/m ³]		Pevnost v tlaku [MPa]	
	7 denní	28 denní	7 denní	28 denní
I.	1459	1124	0,76	1,81
II.	1990	1966	7,85	13,16
III.	1628	1390	2,8	5,26
IV.	1498	1193	0,93	2,28
V.	1782	1583	5,78	8,31

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 3.22 Frakce jemného písku 0/1, frakce Ytongu 0/1

Směs D	Objemová hmotnost[kg/m ³]		Pevnost v tlaku [MPa]	
	7 denní	28 denní	7 denní	28 denní
I.	1470	1207	1,80	3,75
II.	1967	1856	9,82	13,91
III.	1661	1442	4,42	7,73
IV.	1485	1271	0,96	1,87
V.	1766	1564	4,77	8,02

Zdroj: Vlastní zpracování

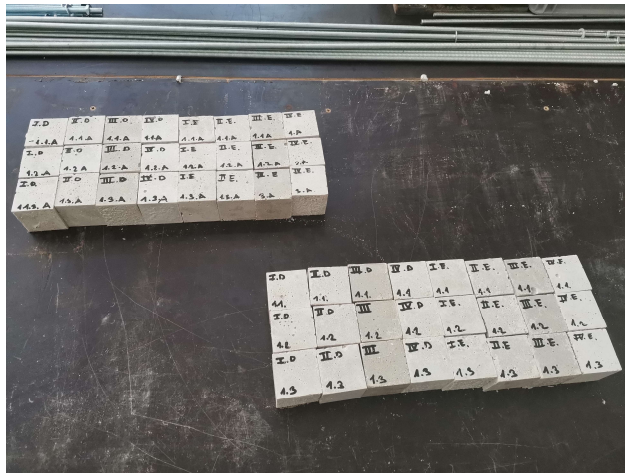
Tabulka 3.23 Frakce jemného písku 0/2, frakce Ytongu 0/2

Směs E	Objemová hmotnost[kg/m ³]		Pevnost v tlaku [MPa]	
	7 denní	28 denní	7 denní	28 denní
I.	1374	1242	0,76	1,38
II.	1954	1840	7,76	11,39
III.	1585	1419	3,81	6,55
IV.	1447	1295	1,06	2,46
V.	1712	1563	5,68	8,65

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 3.15 Vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku směs B a C



Obrázek 3.16 Vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku směs E a D

Z naměřených hodnot pevnosti v tlaku na tělesech 50 x 50 x 50 mm je zřejmé, že nejvyšších hodnot dosahuje směs B. Jemné kamenivo má běžnou frakci 0/4 mm a drcený Ytong frakci 0/1 mm. Při zmenšení frakce na 0/0,5 mm, nebo zvětšení frakce na 0/2 mm vycházejí pevnosti nižší. Testováno bylo také sjednocení frakce kameniva a Ytongu, na frakci 0/1 mm a 0/2 mm, výsledky pevnosti v tlaku byly naměřeny nižší než u směsi B.

Důležitou roli při výběru směsi je i zpracovatelnost malty. U příliš jemné frakce 0/0,5 mm byla směs příliš řídká, málo mastná a pouštěla vodu. U frakce kameniva 0/4 mm a Ytongu 0/2 mm byla směs příliš hustá a hůře se s ní, pracovalo. Ostatní směsi byly ve zpracovatelnosti podobné.

Při použití 100 % náhrady recyklovaného Ytongu za jemný kopaný písek, byla malta při zpracování málo mastná a příliš řídká. Pro požadovanou konzistenci, tedy rozliv 175 ± 10 mm, bylo zapotřebí více vody, kterou směs následně po pár minutách začala pouštět. Z daného hlediska se náhrada celého plniva z jemného kopaného písku recyklovaným Ytongem jeví jako nevhodná.

Překvapivých výsledků dosáhla směs III. Plnivo složené z 50 % jemného písku a 50 % Ytongu. Zpracovatelnost malty byla velmi dobrá a dosažené výsledky pevnosti v tlaku jsou příznivé.

3.5 Výroba zkušebních těles

Vzorky byly vyrobeny v laboratořích katedry Experimentálního centra na fakultě stavební. Pro ověření vybraných vlastností bylo zapotřebí vyrobit několik typů zkušebních těles. Krychličky o rozměru 50 x 50 x 50 mm na zjištění pevnosti v tlaku, nasákavost vzorků a nasycení vodou pomocí vakua. Trámečky o rozměru 40 x 40 x 160 mm pro ověření mrazuvzdornosti, pevnosti v tahu za ohybu a tlaku. Tělesa 100 x 100 x 100 mm ke zjištění tepelně-fyzikálních vlastností. Zkušební tělesa byla vyrobena v laboratorních podmínkách dle ČSN EN 1015 – 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt.

Po namíchání maltové směsi se odebral vzorek do Vicatova prstence a část malty pro stanovení přídržnosti. Naplněný Vicatův prstence se umístil do

automatického Vicatova přístroje, který měří počátek a konec doby tuhnutí maltové směsi. Část maltové směsi byla nanášena v tloušťce cca 1 cm na řádně očištěný a navlhčený pórobetonový podklad v ploše 30 x 20 cm pro zjištění přidržnost malt. Při plastickém stavu se do malty museli vykroužit zkušební kruhy o průměru 5 cm do hloubky minimálně 2 mm pod povrch. Zkouška byla provedena po sedmi dnech, kdy po celou dobu byly vzorky umístěny v konstantním prostředí o teplotě 20 ± 5 °C a relativní vlhkosti 65 ± 5 %.

Na začátku přípravy maltové směsi se do míchačky přililo odměřené množství záměsové vody, do které se v rámci 15 s přidala suchá maltová směs. Míchání probíhalo nízkou rychlostí a dokončilo se v době, kdy jsou všechny složky řádně promísené přibližně v rámci 75 s.⁵⁰ Pokud bylo potřeba setřít maltu ze stěn míchací nádoby, bylo tak provedeno za pomoci zednické špachtle a následně musela být směs znovu promíchána.



Obrázek 3.17 Výroba zkušebních těles



Obrázek 3.18 výroba zkušebních krychlí 50 x 50 x 50 mm

Před samotným plněním se formy musí „vymazat“ olejem, který byl pro jednoduchou aplikaci ve spreji. Připravené formy se plní maltou ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva musí být řádně zhutněna. Hutnění probíhalo ručně a následně se přebytečné množství malty seřízlo zednickou špachtlí. Po dvou dnech se mohly formy odbednit a před každou zkouškou se provedlo gravimetrické měření objemové hmotnosti těles.

⁵⁰ ČSN EN 1015 – 2 (722400), Zkušební metody malt pro zdivo – část 2: Odběr základních vzorků mlt a příprava zkušebních malt, Český normalizační institut, 10. 1999

4 Výsledky experimentů

Pro ověření vybraných vlastností materiálu byla zvolena směs B, která dosahuje nejvyšších pevností v tlaku a její zpracovatelnost se jeví jako nejvhodnější. V následující části jsou sepsány výsledky experimentů a jejich porovnání. Některé výsledky jsou vyhodnoceny pomocí Dean – Dixonova testu.

4.1 Princip vyhodnocení výsledků pomocí Dean – Dixonova testu

Dean – Dixonův test je znám též jako Q – test, slouží k nalezení a vyloučení hodnoty, která je příliš odlehlá od měřených hodnot. Princip spočívá v seřazení hodnot od nejmenší po největší a zjištění rozpětí R mezi hodnotami. Následně se stanoví odlehlost Q krajních hodnot podle vzorců:

$$R = x_n - x_1 \quad (18)$$

$$Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{R} \quad ; \quad Q_n = \frac{(x_n - x_{n-1})}{R} \quad (19)$$

Jestliže zjištěná odlehlost Q některé z krajní hodnoty překročí tabelovanou hodnotu, je vyloučena a test je zopakován na zbylých hodnotách.

Použit byl volně dostupný program DDtest, který slouží k výpočtu směrodatné odchylky a jednouchému provádění Dean – Dixonova testu na souborech o rozsahu tří až devíti měření.⁵¹

4.2 Stanovení objemové a sypané hmotnosti kameniva a Ytognu

Objemová a sypaná hmotnost byla stanovena jednoduchými metodami pomocí odměrného válce. Výsledky z měření jsou uvedeny v následující tabulce.

⁵¹ SVOBODA, Luboš. DDtest. Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra stavebních hmot K 123 [online]. 2009, [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodald/DDtest/>

Tabulka 4.1 Objemová a sypaná hmotnost kameniva a Ytongu

	Kamenivo 0/4	Ytong 0/1
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2360	1620
Sypaná hmotnost [Kg/m ³]	1760	675

Zdroj: Vlastní zpracování

4.3 Počátek a konec doby tuhnutí

Počátek a konec doby tuhnutí úzce souvisí s hodnotou rozlití daných směsí. Hodnota rozlití se pochybuje u směsi B v rozmezí 165 – 168 mm, tento malý rozptyl se vzhledem k dávkování dal očekávat. Počátek tuhnutí je stanoven v čase, kdy vzdálenost mezi jehlou a podložní destičkou je poprvé 6 ± 3 mm. Konec tuhnutí je doba, která uplyne od „nulového času“ do doby, kdy jehla poprvé vnikne do vzorku jen 0,5 mm pod povrch směsi.



Obrázek 4.1 Automatický Vicatův přístroj v průběhu zkoušky



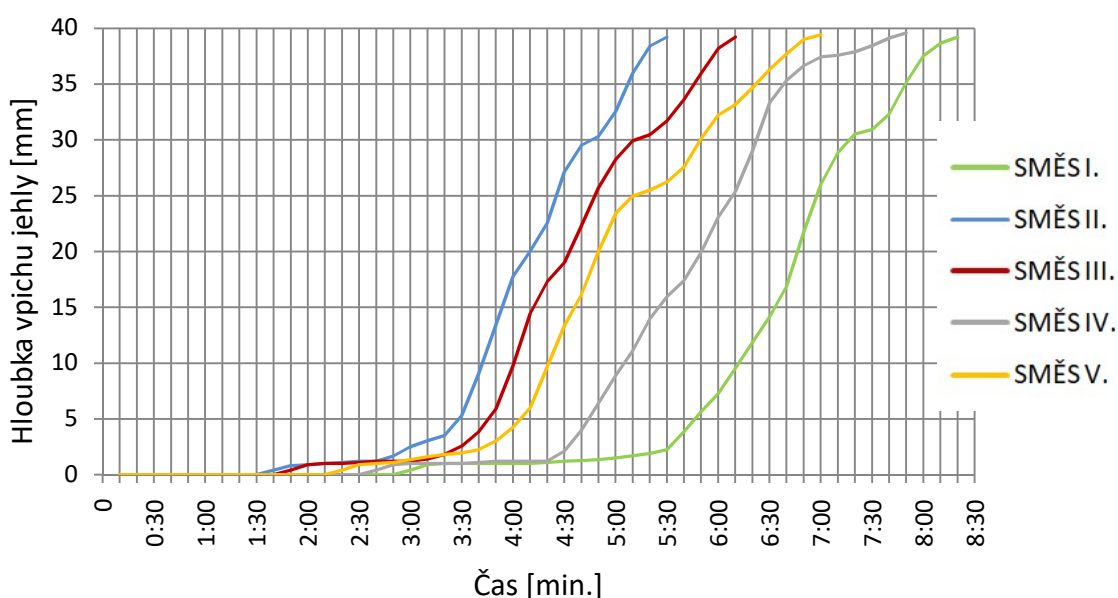
Obrázek 4.2 Vzorky po ukončení zkoušek

Tabulka 4.2 Počátek a konec doby tuhnutí

Směs B	Počátek tuhnutí		Konec tuhnutí		Hodnota rozlití [mm]
	[hod.]	[min.]	[hod.]	[min.]	
I.	5:32	332	8:06	486	165
II.	3:06	186	5:18	318	166
III.	3:28	208	6:02	362	168
IV.	4:34	274	7:36	456	165
V.	3:48	228	6:42	402	166

Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 4.1 Grafické zobrazení počátku a konce doby tuhnutí



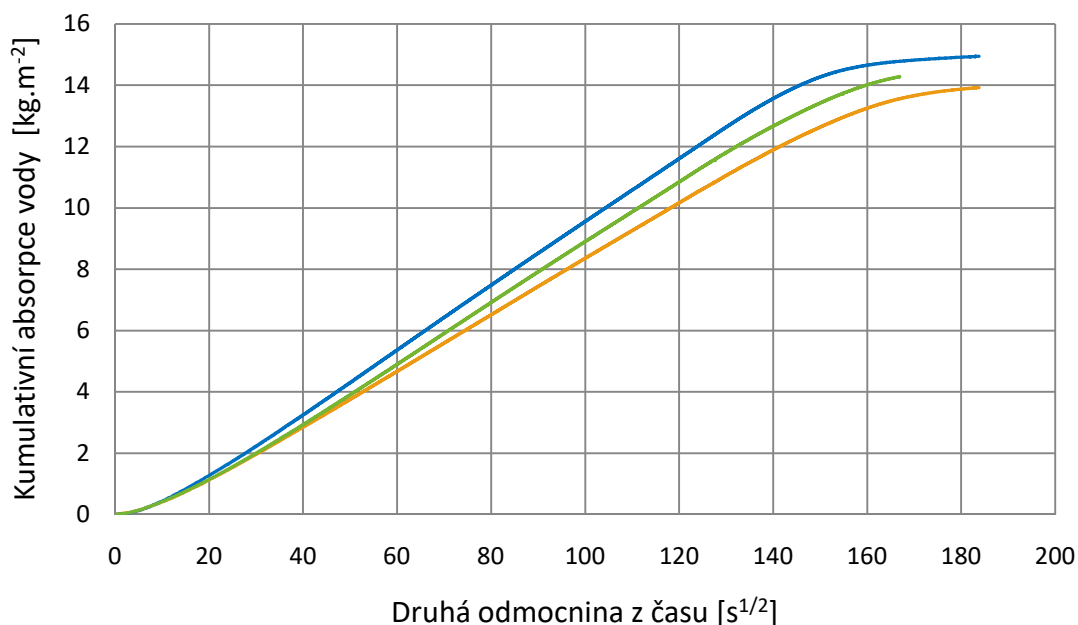
Zdroj: Vlastní zpracování

Počátek doby tuhnutí dle předpokladu nastává nejdříve u vzorku II., kde se nenachází recyklovaný pórobeton. Nejpozději dochází k počátku doby tuhnutí u vzorku I. pouze s plnivem z recyklovaného pórobetonu. U výsledku je patrná závislost mezi množstvím přidaného pórobetonu a počátkem doby tuhnutí, pouze u vzorku III. (50 % plniva je nahrazeno recyklovaným pórobetonem) se počátek doby tuhnutí přibližuje vzorku II.

4.4 Transport kapalně vlhkosti

Hodnoty absorpčního koeficientu vody A [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$] jsou určeny z přímkové počáteční závislosti kumulativního obsahu vody v materiálu na odmocnině z času. Můžeme tedy říct, že se zvyšující se hodnotou koeficientu dochází k rychlejšímu transportu kapalně vlhkosti. Hodnota součinitele vlhkostní vodivosti je vyjádřena symbolem k [m^2/s].⁵²

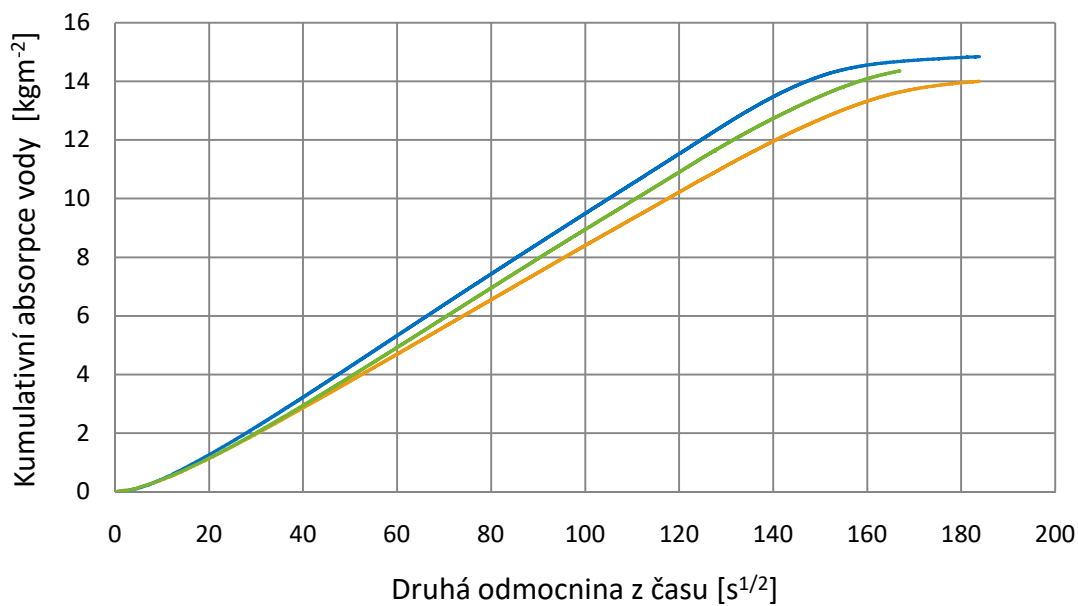
Graf 4.2 Křivka absorpce vody – směs I.



Zdroj: Vlastní zpracování

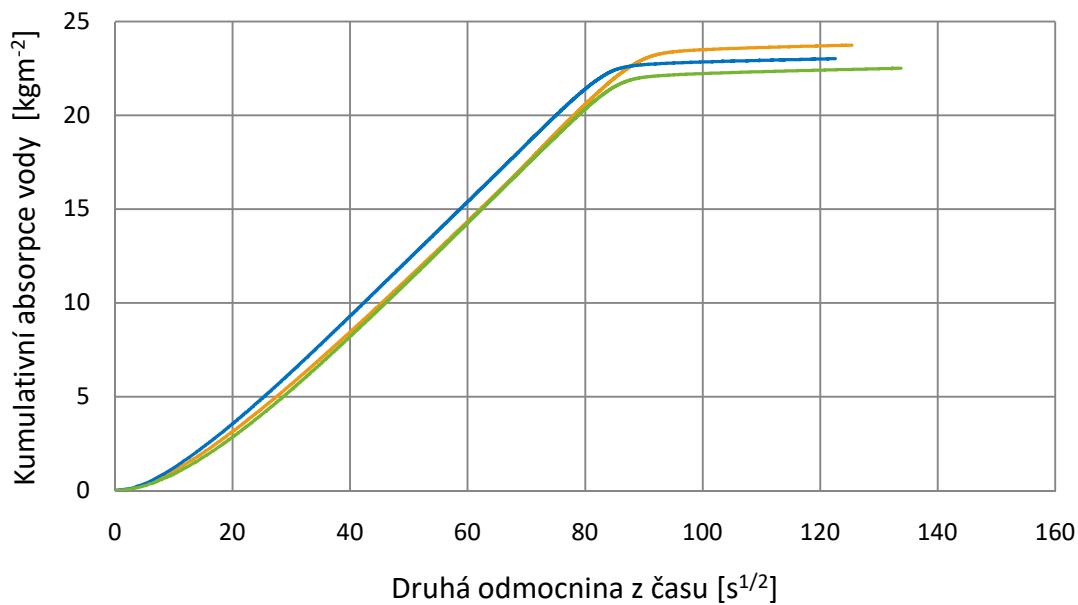
⁵² Katedra materiálového inženýrství a chemie, 123TVVM – transport kapalně vlhkosti, [online], Praha: ČVUT v Praze, [cit. 2019-12-13], Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/voda.pdf>

Graf 4.3 Křivka absorpce vody – směs II.



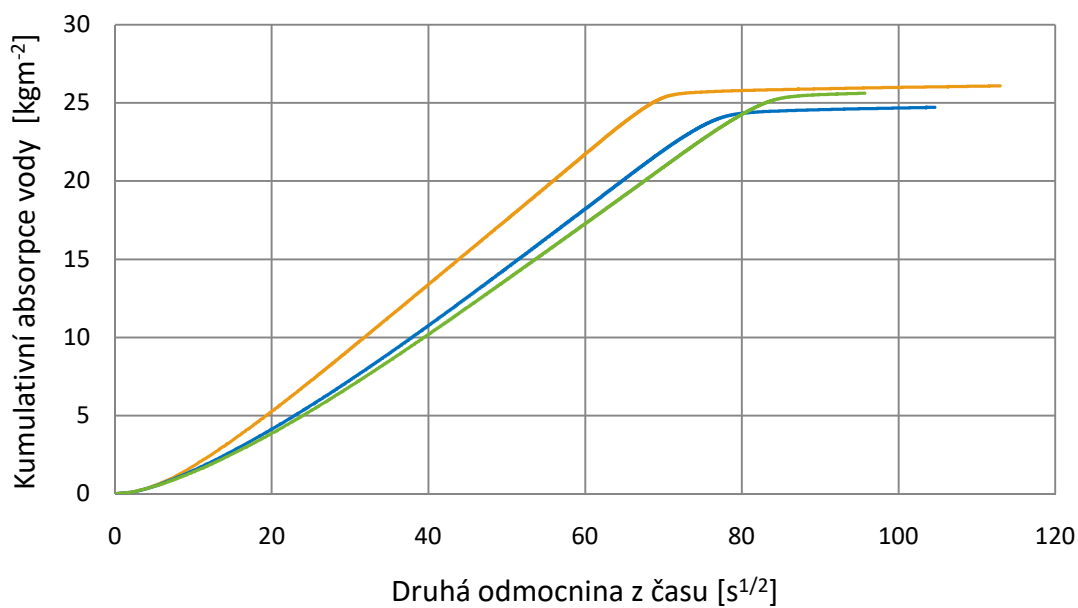
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 4.4 Křivka absorpce vody – směs III.



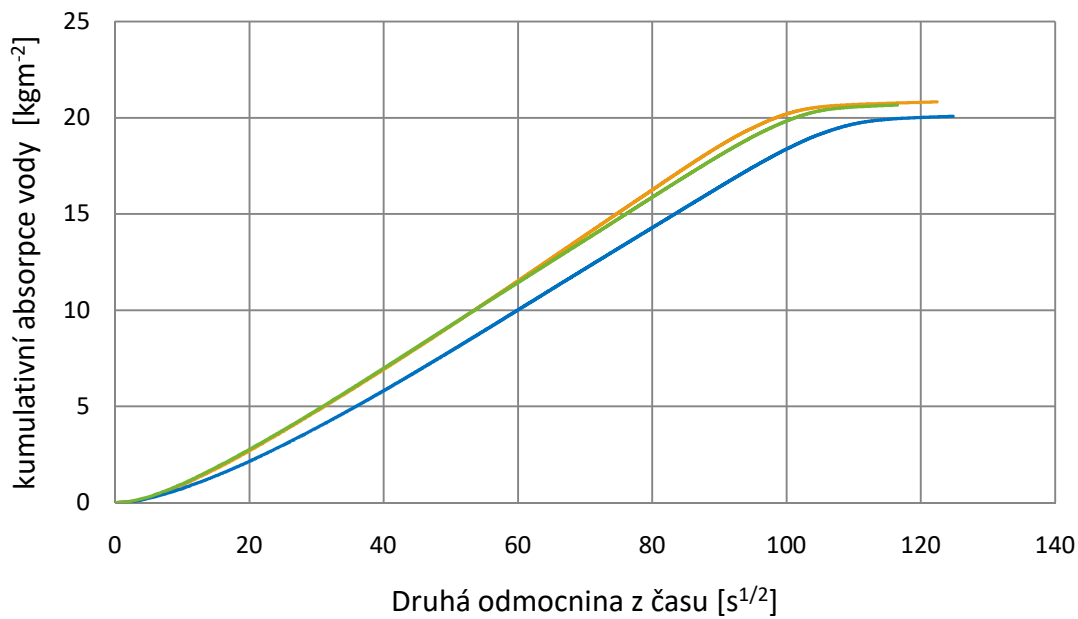
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 4.5 Křivka absorpce vody – směs IV.



Zdroj: Vlastní zpracování

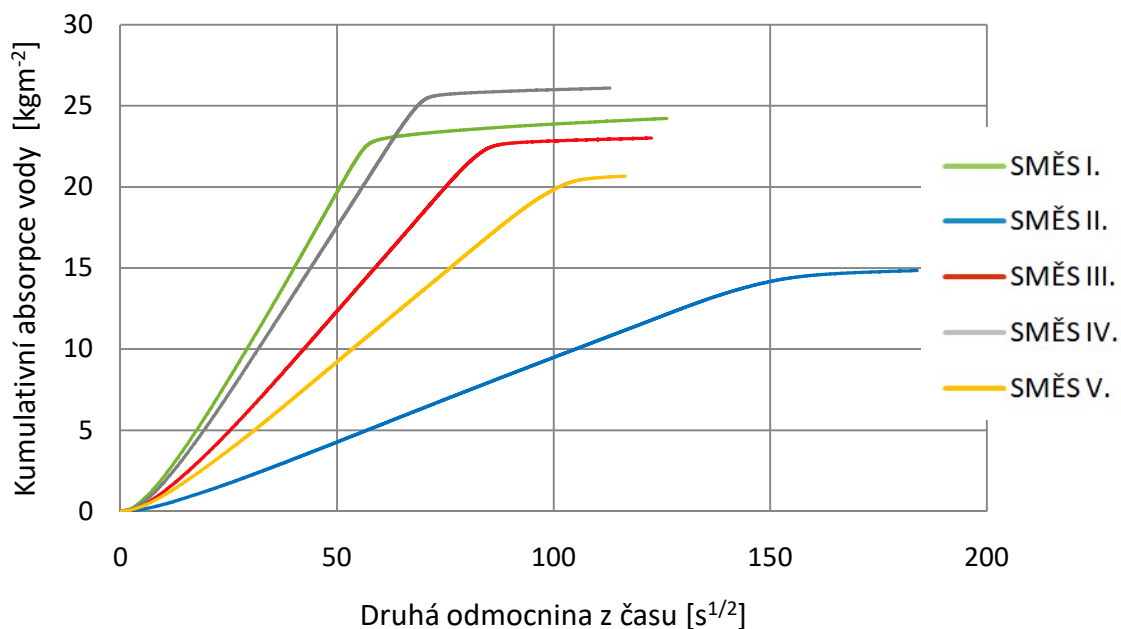
Graf 4.6 Křivka absorpce vody – směs V.



Zdroj: Vlastní zpracování

Pro porovnání transportu kapalné vlhkosti vzorků I., II., III., IV., V., je vždy vybrána jedna typická křivka absorpce vody a křivky jsou společně znázorněny v následujícím grafu.

Graf 4.7 Křivky absorpce vody vzorků I., II., III., IV., V..

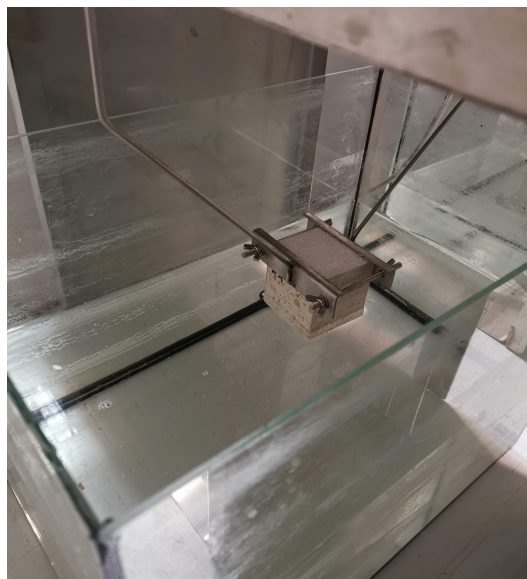


Zdroj: Vlastní zpracování

Z grafického vyjádření transportu kapalné vlhkosti je důležitý sklon a bod zlomu křivky. Ve zlomu křivky se vyhodnocuje absorpční koeficient [kg/m²s^{1/2}] a součinitel vlhkostní vodivosti [m²/s].



Obrázek 4.3 Vzorek zavěšen pomocí speciální konstrukce na digitální váze



Obrázek 4.4 Vzorek ponořen 2 – 3 mm pod hladinou vody

Tabulka 4.3 Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti směsi B

Označení vzorku	Absorpční koeficient [kg/m ² s ^{1/2}]	Součinitel vlhkostní vodivosti [m ² /s]
I.	0,3376	2,61E-07
II.	0,0854	8,83E-08
III.	0,2539	2,42E-07
IV.	0,3244	3,45E-0,7
V.	0,1892	2,04E-07

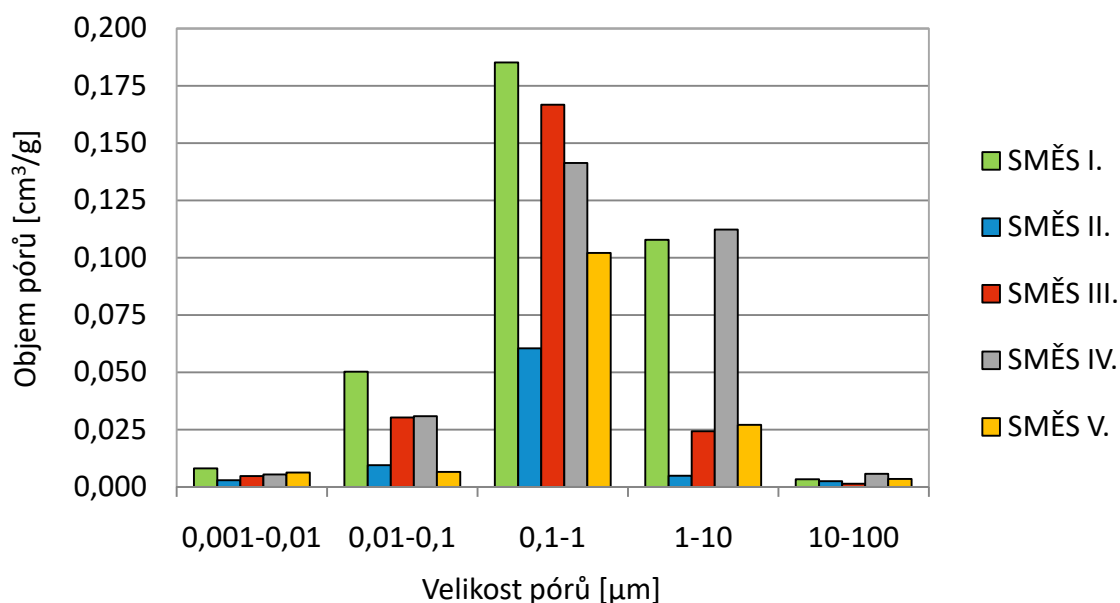
Zdroj: Vlastní zpracování

Absorpční součinitel A [kg/m²s^{1/2}] je nejnižší u vzorku II., kdy došlo k nejpomalejšímu transportu kapalné vlhkosti. Nejvyšší nasákavosti dosáhl vzorek I., z experimentu vyplývá, že přidání recyklovaný pórobeton zvyšuje transport kapalné vlhkosti.

4.5 Rtuťová porozimetrie

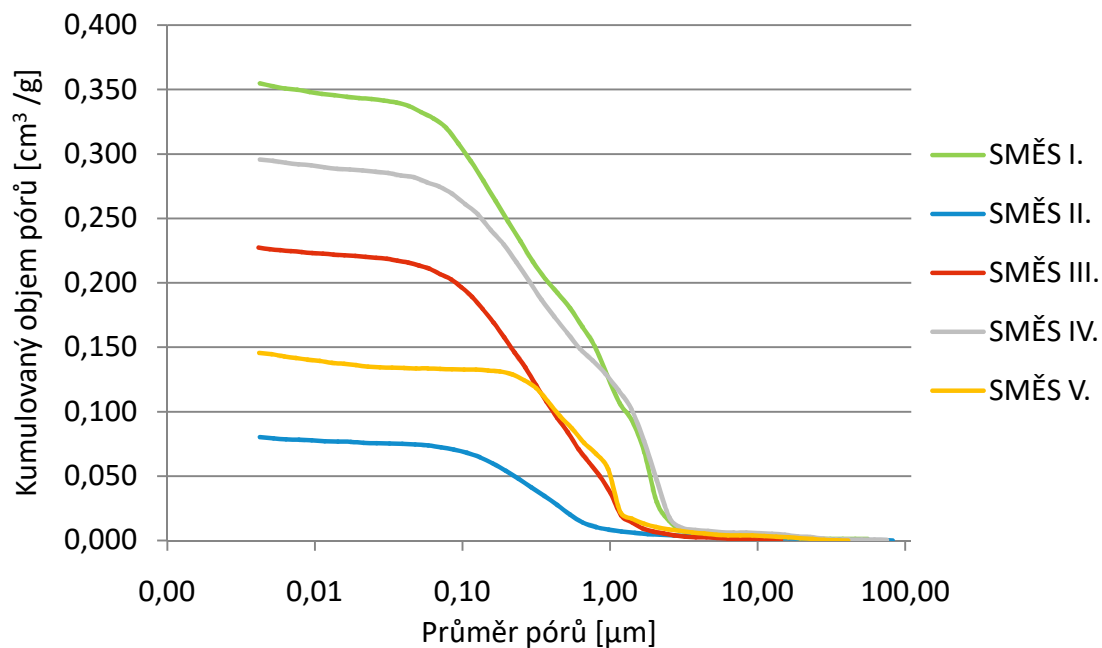
Rtuťovou porozimetrií můžeme vyjádřit objem a velikost pórů v navržených vzorcích. Výsledky z měření můžeme zobrazit pomocí jednoduchého sloupcového grafu a kumulativní a distribuční křivky.

Graf 4.8 Objemové zastoupení pórů v závislosti na jejich velikosti



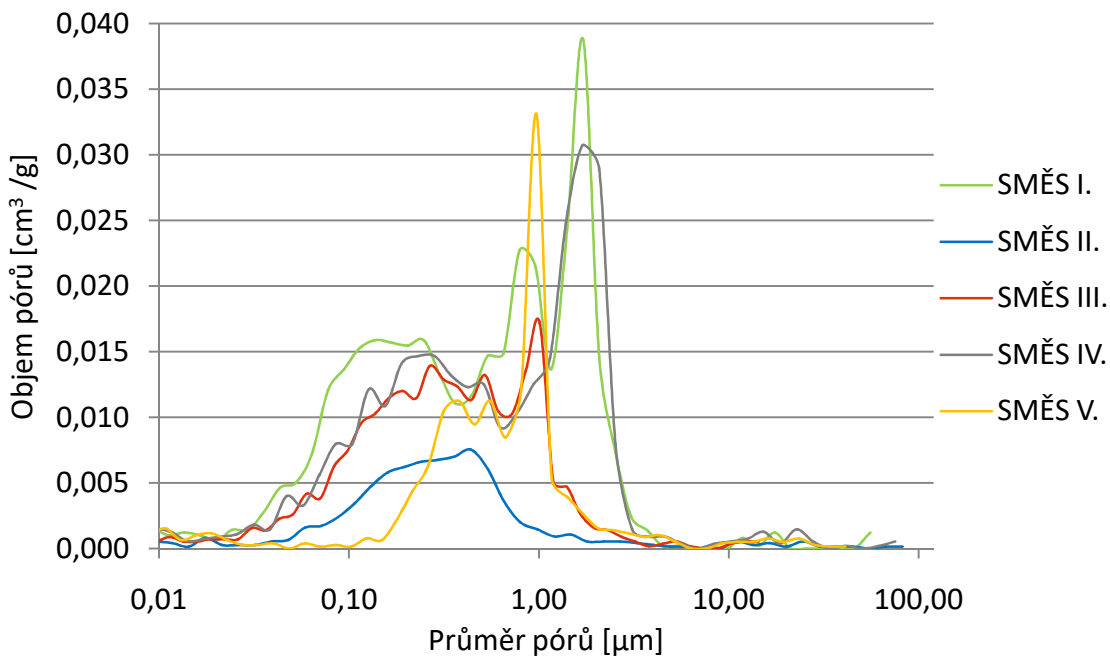
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 4.9 Kumulativní křivka pórů pro směs B



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 4.10 Distribuční křivka pórů pro směs B



Zdroj: Vlastní zpracování

Z grafů můžeme vidět, že největší zastoupení mají póry velikosti 0,1 - 1 μm . Nejvíce pórů je ve vzorku I. a nejméně ve vzorku II. Z grafů je patrná i celková pórovitost navržených vzorků. Samotné měření probíhá na malé části vzorku, a proto může být zkreslené. Pro přesnější vyhodnocení pórovitosti je provedena pyknometrie a vakuové nasycení vodou.



Obrázek 4.5 Vzorek s vtačenou rtuť



Obrázek 4.6 Odebraný vzorek na zkoušku porozimetrie

4.6 Heliová pyknometrie a vakuová saturace

Heliovou pyknometrií a vakuovou saturací může zjistit hustotu matrice a otevřenou pórovitost. Měření bylo provedeno na vysušených vzorcích ve stáří 28 dní.



Obrázek 4.7 Nadrcený vzorek na heliovou pyknometrii



Obrázek 4.8 Vzorky ponořené do vody při vakuové saturaci

Tabulka 4.4 Vyhodnocení hustoty matrice a otevřené pórovitosti směsi pomocí pyknometrie

Označení vzorku	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]
I.	802	2 456	67,4
II.	1640	2 413	32,0
III.	1162	2 432	52,2
IV.	995	2 474	59,9
V.	1328	2 438	45,5

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 4.5 Vyhodnocení hustoty matrice a otevřené pórovitosti pomocí vakuové saturace

Označení vzorku	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]
I.	788	2583	69,5
II.	1650	2504	34,1
III.	1172	2477	52,7
IV.	984	2607	62,3
V.	1394	2495	44,1

Zdroj: Vlastní zpracování

Z naměřených hodnot můžeme vidět, že se zvyšujícím se množstvím recyklovaného pórobetonu klesá objemová hmotnost a roste otevřená pórovitost. Pórovitost vzorku I. a vzorku II. se liší až o 50 %. Hodnoty naměřené jednotlivými metodami jsou velmi podobné, při vyhodnocení se liší přibližně o 5 %.

4.7 Pevnost v tahu a tlaku

Mechanické vlastnosti byly studovány na vzorcích po 7, 28 a 90 dnech. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce včetně směrodatné odchylky. Stanovena byla objemová hmotnost vzorků, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na trámečcích 40 x 40 x 160 mm.

Tabulka 4.6 Vyhodnocení vzorků na 7 denní pevnosti v tahu za ohybu a tlaku

Označení vzorku	7 denní - pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
I.	1360	0,28 ± 0,01	1,74 ± 0,16
II.	1971	2,23 ± 0,21	10,49 ± 0,52
III.	1576	0,76 ± 0,05	2,99 ± 0,15
IV.	1488	0,29 ± 0,02	2,27 ± 0,02
V.	1696	1,14 ± 0,04	4,24 ± 0,07

Zdroj: Vlastní zpracování

Tabulka 4.7 Vyhodnocení vzorků na 28 denní pevnosti v tahu za ohybu a tlaku

Označení vzorku	28 denní - pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
I.	1121	0,53 ± 0,03	2,06 ± 0,07
II.	1874	2,41 ± 0,16	12,93 ± 0,33
III.	1398	1,46 ± 0,06	5,69 ± 0,20
IV.	1270	0,71 ± 0,07	2,69 ± 0,42
V.	1681	1,58 ± 0,05	5,95 ± 0,72

Zdroj: Vlastní zpracování

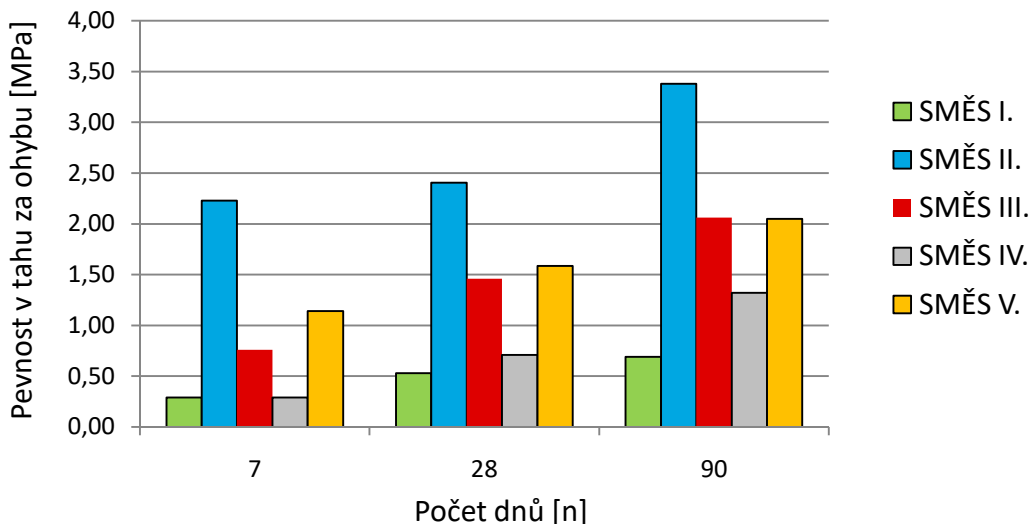
Tabulka 4.8 Vyhodnocení vzorků na 90 denní pevnosti v tahu za ohybu a tlaku

Označení vzorku	90 denní - pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
I.	1095	0,69 ± 0,08	2,63 ± 0,12
II.	1859	3,38 ± 0,21	16,68 ± 0,59
III.	1304	2,06 ± 0,09	6,96 ± 0,74
IV.	1245	1,32 ± 0,10	3,84 ± 0,32
V.	1493	2,05 ± 0,18	8,33 ± 0,50

Zdroj: Vlastní zpracování

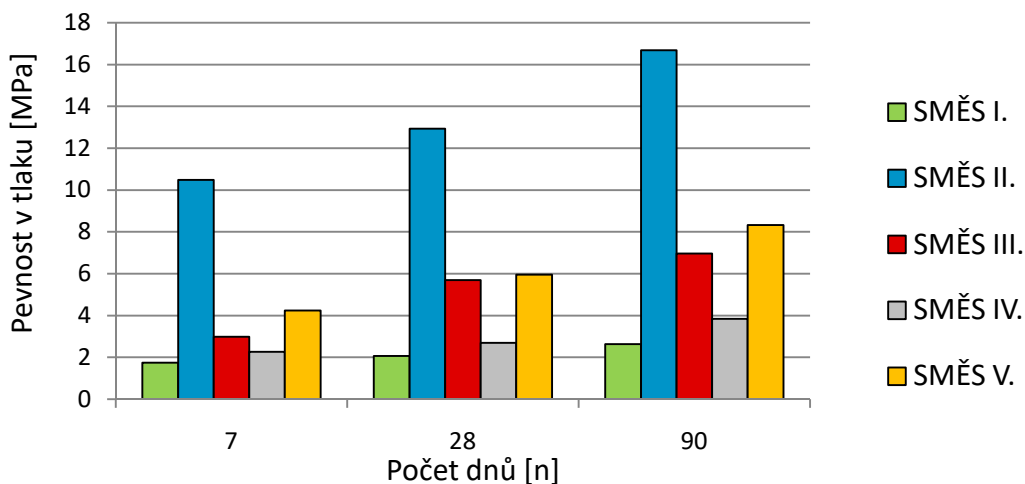
Z naměřených hodnot je patrné, že množství přidaného pórobetonu snižuje výsledné pevnosti v tahu za ohybu a tlaku. Nejvyšších pevnosti dosahuje referenční směs II. bez přidaného recyklovaného pórobetonu. Nejnižších pevnosti směs I., kde je plnivem pouze recyklovaný pórobeton. Pro lepší přehlednost jsou výsledky vyjádřeny grafem.

Graf 4.11 Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu po 7, 28 a 90 dnech



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 4.12 Vyhodnocení pevností v tlaku po 7, 28 a 90 dnech



Zdroj: Vlastní zpracování

4.8 Přídržnost

Naměřená přídržnost byla vyhodnocena ze tří měření, kdy žádné nemuselo být vyřazeno z důvodu nesprávného provedení zkoušky.

Tabulka 4.9 Vyhodnocení přídržnosti směsi B

Označení vzorku	Síla F_p [N]	Porušení			Přídržnost [N/mm ²]
		V přilnavosti [%]	V maltě [%]	V podkladu [%]	
I.	102	98	2	0	0,052 ± 0,2
II.	543	90	10	0	0,276 ± 0,1
III.	345	95	5	0	0,176 ± 0,2
IV.	129	98	2	0	0,066 ± 0,05
V.	186	96	4	0	0,094 ± 0,1

Zdroj: Vlastní zpracování

Navržené malty byly naneseny na navlhčenou pórobetonovou tvárnici, výsledky z naměřených pevností jsou velmi nízké. Převažuje porušení mezi maltou a podkladem, výsledkem zkoušky je hodnota naměřené přídržnosti. Z naměřených hodnot, vyplývá, že recyklovaný pórobeton snižuje přídržnost malty.



Obrázek 4.9 Měření přídržnosti odtrhoměrem OMtest OP ¾



Obrázek 4.10 Ukázka odtrhu směsi III.

4.9 Tepelná vodivost a tepelná kapacita

Tepelné vlastnosti byly změřeny pomocí přístroje Isomet 2114 na vysušených vzorcích o velikosti 100 x 100 x 100 mm.

Tabulka 4.10 Tepelné vlastnosti navržených malt

Označení vzorku	Součinitel tepelné vodivosti [W/m*K]	Měrná tepelná kapacita [J/kg*K]
I.	0,157 ± 0,001	1127,4 ± 2,1
II.	0,867 ± 0,002	864,1 ± 1,6
III.	0,300 ± 0,001	1103,5 ± 1,2
IV.	0,217 ± 0,002	1124,7 ± 2,3
V.	0,541 ± 0,002	1077,3 ± 1,7

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 4.11 Měření tepelné kapacity pomocí přístroje Isomet 2114

Ze zjištěných výsledků je viditelný klesající trend součinitele tepelné vodivosti se zvyšujícím se množstvím recyklovaného pórobetonu. Nejmenší součinitel tepelné vodivosti má vzorek I. 0,157 W/m.K a největší vzorek II. 0,867 W/m.K. Nejnížší tepelnou kapacitu má dle předpokladu směs II. 864,1 J/kg.K, u které pro ohřátí látky o 1 K je zapotřebí dodat nejméně množství tepla. Nejvyšší tepelnou kapacitu má vzorek I. 1127,4 J/kg.K, v kterém se nachází plnivo z recyklovaného pórobetonu. Prodávané vápenocementové malty mají součinitel tepelné vodivosti 0,87 W/m.K a měrnou tepelnou kapacitu 840 J/kg.K. Recyklovaný pórobeton zlepšuje tepelné vlastnosti navržených vápenocementových malt.

4.10 Mrazuvzdornost

Pro provedení zkoušky mrazuvzdornosti bylo vyrobeno celkem 45 trámečků, kdy pro každou směs je potřeba celkem 9 těles z toho 6 trámečků prochází zmrazovacími cykly a 6 trámečků je referenčních. Tři referenční trámečky jsou zkoušeny na začátku první zmrazovací etapy a druhá sada trámečků po skončení všech zmrazovacích etap.

Dle normy je požadovaná nebo předepsaná mrazuvzdornost po 6 – 10, 20 – 50 nebo 100 cyklech, čehož zvolený počet zmrazovacích cyklů tvoří jednu etapu např.: 5, 10, 25, nebo 50 cyklů. Po každé etapě je potřeba jistit změnu strukturu materiálu destruktivně, nebo nedestruktivně. Vzhledem k předpokladu malé mrazuvzdornosti malty bylo zvoleno 50 cyklů, které jsou rozděleny do dvou etap po 25 cyklech. Vzorky se po první etapě zkouší nedestruktivní ultrazvukovou impulzní metodou, po druhé etapě se zkouší destruktivní metodou.

Pro vyhodnocení zkoušky mrazuvzdornosti malt se stanovuje součinitel mrazuvzdornosti. Dle normy ČSN 72 2452 „Zkouška mrazuvzdornosti malty“ se určuje z aritmetického průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků zmrazovaných, k aritmetickému průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečku porovnávacích z druhé sady. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu měla být provedena po druhé zmrazovací etapě. Tělesa byla po druhé zmrazovací etapě příliš porušená a nebylo možné vzorky vyhodnotit. Podle stejného principu můžeme vyhodnotit součinitel mrazuvzdornosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu, který byl naměřen po první zmrazovací etapě.⁵³

Součinitel mrazuvzdornosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, je stanoven z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu na začátku zmrazování a po ukončení zmrazovací etapy.

⁵³ KAŠPAROVÁ Jana, *Ověření využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel*, v Brně, 2017, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Vztah můžeme vyjádřit podle následujícího vzorce:

$$K_{V,i} = \frac{Z_{mraz,n}}{Z_{o,n}} * 100 \quad (20)$$

kde $K_{V,i}$ [%] je součinitel mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů, $Z_{mraz,n}$ [km/s] je aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulsu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech, $Z_{o,n}$ [km/s] je aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulsu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti na začátku termínu zahájení zkoušek.

Součinitel mrazuvzdornosti z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu, můžeme stanovit z dynamického modulu pružnosti naměřeného na začátku zmrazování a po ukončení zmrazovací etapy.

Vztah můžeme vyjádřit podle následujícího vzorce:

$$K_{E,i} = \frac{E_{CU,mraz,n}}{E_{CU0,n}} * 100 \quad (21)$$

kde $K_{E,i}$ [%] je součinitel mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů, $E_{CU,mraz,n}$ [GPa] je aritmetický průměr dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu, zjištěného při zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech, $E_{CU0,n}$ [GPa] je aritmetický průměr dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu, zjištěného na začátku zkoušek mrazuvzdornosti.

Pro stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu byl použit přístroj TICO s vlastní frekvencí sond 150 kHz a kalibrační prvek. Těleso se prozvučí přes celou délku, k dosažení dobré akustické vazby se na příložené části ultrazvuku nanáší indiferentní gel. Měření bylo prováděno do ustálení měřené hodnoty.

Při zkoušení betonu je postup a zpracování výsledků měření stanoven dle normy ČSN 73 1371 „Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu“ a normy ČSN EN 12504 – 4 „Zkoušení betonu – Část 4: Stanovené rychlosti šíření ultrazvukového impulsu“. Uvedené postupy lze použít a při zkoušení malt.

Výsledkem měření ultrazvukovou metodou je čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou. Z hodnot můžeme dle příslušných norem vypočítat následující parametry:

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu Z [km/s]

$$Z = \frac{l}{t} \quad (22)$$

kde l [mm] je délka měřicí základny a t [μ s] je čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu E_{cu} [GPa]

$$E_{cu} = \rho * Z^2 * \frac{1}{k^2} * 10^{-3} \quad (23)$$

kde ρ [kg/m^3] je objemová hmotnost tělesa, Z [km/s] rychlost šíření ultrazvukového impulsu, k součinitel rozměrnosti prostředí – nebyl stanoven, jelikož byl dynamický modul pružnosti určen v trojrozměrném prostředí.

- Relativní dynamický modul pružnosti $RDM_{UPPT,n}$ [%] po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech

$$RDM_{UPPT,n} = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 * 100 \quad (24)$$

kde $t_{s,0}$ [μ s] je doba průchodu ultrazvukového impulsu zkušebních těles na začátku zkoušky mrazuvzdornosti, $t_{s,n}$ [μ s] je doba průchodu ultrazvukového impulsu po n zmrazovacích cyklech.

Pro zkoušku mrazuvzdornosti bylo použito automatické zařízení KD 20, které je určeno pro zkoušky mrazuvzdornosti a povrchové odolnosti stavebních materiálů vůči mrazu dle ČSN a EN. Skládá se z tepelně izolované vany rozměru 1200 x 600 x 400 mm, která tvoří zkušební prostor. Ta je vyhřívána i chlazená pomocí kondenzačního agregátu. V zařízení se nacházejí dva výměníky tepla, jeden ve spodní části pod dnem

a druhý ve víku zkušebního prostoru. Ve spodní části se také nachází nádrž s vodou a čerpadly, které zajišťují cirkulaci, napouštění a vypouštění vody z prostoru. Pro některé typy zkoušek se v nádrži nachází i otopné těleso.⁵⁴



Obrázek 4.12 automatické zařízení KD 20, pro vyhodnocení zkoušek mrazuvzdornosti

Výsledky z měření mrazuvzdornosti malt, čas t [μs], který uplyne při průběhu impulsu měřící základnou, rychlost šíření ultrazvukového impulsu Z [km/s], objemová hmotnost ρ [kg/m^3], dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu E_{cu} [GPa], pevnost v tlaku R_c [MPa], pevnost v tahu za ohybu R_m [MPa].

Tabulka 4.11 Vyhodnocení mrazuvzdornosti malt - u porovnávacích těles v den zahájení zkoušky mrazuvzdornosti

Označení vzorku	$t_{0,i}$ [μs]	$Z_{0,i}$ [km/s]	$\rho_{0,i}$ [kg/m^3]	$E_{cu0,i}$ [GPa]	$R_{c0,i}$ [MPa]	$R_{m0,i}$ [MPa]
I.	119,3	1,341	1523	2,74	2,12	0,156
II.	48,2	3,328	1998	22,13	25,25	1,321
III.	62,0	2,581	1717	11,43	12,45	0,968
IV.	80,9	1,978	1581	6,19	5,63	0,490
V.	57,6	2,778	1826	14,09	17,36	1,209

Zdroj: Vlastní zpracování

⁵⁴ EKOFROST, Automatické zařízení KD 20 pro zkoušky mrazuvzdornosti a povrchové odolnosti stavebních materiálů vůči mrazu dle ČSN a EN, [online], technická příručka, Olomouc, [cit. 2019-12-23], Dostupné z: file:///C:/Users/HP/Downloads/technicka_specifikace.pdf

Tabulka 4.12 Výsledky z měření mrazuvzdornosti malt - u zkušebních těles po 25 cyklech

Označení vzorku	Počet cyklů	$t_{0,i}$ [μ s]	$Z_{0,i}$ [km/s]	$\rho_{0,i}$ [kg/m ³]	$E_{Cu0,i}$ [GPa]
I.	0	120,9	1,323	1499	2,62
	25	-			
II.	0	48,66	3,288	1967	21,26
	25	52,9	3,024	1973	18,04
III.	0	62,8	2,547	1703	11,04
	25	65,4	2,446	1712	10,24
IV.	0	84,6	1,891	1646	5,88
	25	-			
V.	0	59,2	2,702	1862	13,59
	25	-			

Zdroj: Vlastní zpracování

Navržené směsi I, IV a V se po první etapě zmrazování a rozmrazování v automatickém zařízení KD 20 zcela rozpustili. Malty nelze vyhodnotit jako mrazuvzdorné a v dalších tabulkách s nimi již není počítáno. První zmrazovací etapu obstály pouze referenční vzorky, v kterých se nevyskytuje Ytong – směs II a směs III, v které je jemný kopný písek z 50 % nahrazen recyklovaným pórobetonem.



Obrázek 4.13 Vzorky v automatickém zařízení KD 20 v průběhu první zmrazovací etapy
 Obrázek 4.14 Vzorky po ukončení první zmrazovací etapy

Druhou etapu zmrazování, tedy 50 cyklů neobstála ani jedna z navržených malt.



Obrázek 4.15 Trámečky po druhé etapě zmrazování

Tabulka 4.13 Výsledky z měření mrazuvzdornosti malt - u porovnávacích těles v den ukončení zkoušky mrazuvzdornosti

Označení vzorku	$t_{0,i}$ [μ s]	$Z_{0,i}$ [km/s]	$\rho_{0,i}$ [kg/m^3]	$E_{CU0,i}$ [GPa]	$R_{c0,i}$ [MPa]	$R_{m0,i}$ [MPa]
I.	112,8	1,418	1412	2,84	1,94	0,151
II.	48,1	3,319	1969	21,69	25,43	1,321
III.	60,4	2,649	1688	11,84	12,9	0,991
IV.	75,6	2,116	1577	7,06	5,85	0,570
V.	56,7	2,821	1806	14,37	18,2	1,237

Zdroj: Vlastní zpracování

Výsledkem zkoušky pro každou ukončenou zmrazovací etapu a pro ukončení zmrazování je zjištění úbytku hmotnosti zkušebních těles ρ , změna dynamického modulu pružnosti E_{CU} , změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu V a stanovení relativního modulu pružnosti RDM_{UPPT} . Ověřené parametry jsou uvedeny v km/s, pro hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, v GPa pro dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu. Výsledky jsou vyjádřeny i v procentech dané změny.

Tabulka 4.14 Vyhodnocení relativního dynamického modulu pružnosti RDM_{UPPT} [%], změny rychlosti šíření ultrazvukového impulsu Z [km/s] a dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku E_{CU} [GPa] - po 25 zmrazovacích cyklech

Označení vzorku	$\Delta \rho_i$ [kg/m ³]	$\delta \rho_i$ [%]	$RDM_{UPPT,i}$ [%]	ΔZ_i [km/s]	δZ_i [%]	$\Delta E_{CU,i}$ [GPa]	$\delta E_{CU,i}$ [%]
II.	6	0,3	84,61	0,264	8,7	3,22	17,85
III.	9	0,5	92,20	0,101	4,1	0,8	7,81

Zdroj: Vlastní zpracování

Destruktivní zkouška u malt byla plánována po 50 cyklech, tohoto požadavku však žádná z navržených malt nedosáhla.

Součinitel mrazuvzdornosti pro zmrazovací etapu, vycházejí z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu K_V , ze vzorků měřených po ukončení zmrazovací etapy a před zahájením zmrazovací etapy. Stejně můžeme určit součinitel mrazuvzdornosti K_{CU} , který vychází z dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku.

Abychom mohli maltu vyhodnotit za mrazuvzdornou, pro daný počet cyklů, musí hodnota součinitele mrazuvzdornosti být větší než 0,75.

Tabulka 4.15 Hodnoty součinitele mrazuvzdornosti po 25 cyklech

Označení vzorku	K_V [%]	K_{CU} [%]
II.	0,92	0,85
III.	0,96	0,93

Zdroj: Vlastní zpracování

Zkouškou mrazuvzdornosti můžeme vyhodnotit:

U srovnávacích těles po ukončení druhé etapy (po 50 zmrazovacích cyklech) dochází u všech vzorků ke snížení rychlosti ultrazvukového impulsu. U vzorků I., III., IV., V. dochází ke zvýšení dynamického modulu pružnosti a u vzorku II. ke snížení dynamického modulu pružnosti. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu se u vzorků II., III., IV., V., zvyšuje v důsledku delší doby hydratace cementu, kdy byly vzorky uloženy pod vodou. U vzorku I. se pevnost v tlaku a tahu za ohybu snížila, tento jev může být způsoben vyšší nasákavostí tělesa a porušení vnitřní struktury.

U tělesa I., IV., V., podrobených zkouškou mrazuvzdornosti došlo po první zmrazovací etapě k porušení struktury vzorku a nebylo možné dále vzory hodnotit. Vzorky byly pro další testování vyřazeny.

U těles II., III., podrobených zkouškou mrazuvzdornosti po první zmrazovací etapě došlo ke zvýšení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a snížení dynamického modulu pružnosti. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu nebyla po první zmrazovací etapě měřena.

Norma ČSN 72 2452 „Zkouška mrazuvzdornosti malty“ uvažuje s použitím nedestruktivních metod (ultrazvuková a rezonanční metoda), ale není v normě uveden parametr pro vyhodnocení mrazuvzdornosti. Proto byl pro účely diplomové práce stanoven součinitel mrazuvzdornosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu K_V a součinitel mrazuvzdornosti z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu K_{CU} . Výhodou nedestruktivní zkoušky je, že se měření provádí na stejném vzorku před zahájením zkoušky i v průběhu zkoušky mrazuvzdornosti. Vzorky II. a III. lze považovat za mrazuvzdorné pro 25 zmrazovacích cyklů.

Výpočet součinitele mrazuvzdornosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu K_V a součinitele mrazuvzdornosti z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu K_{CU} , byl použit i v bakalářské práci „Ověření využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel“ jejímž autorem je Jana Kašparová.⁵⁵

⁵⁵ KAŠPAROVÁ Jana, *Ověření využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel*, v Brně, 2017, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

5 Diskuze a shrnutí

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na studium vlastností vápenocementových malt s přidáním recyklovaného pórobetonu. Pro zkoušky byl použit recyklovaný pórobeton Ytong.

Na začátku experimentální části bylo zapotřebí stanovit zrnitost Ytongu a navrhnout, jaká frakce Ytongu bude pro malty nejvhodnější. Navrženo bylo celkem pět směsí malt A, B, C, D, E vždy s odlišnou frakcí recyklovaného Ytongu a jemného kopaného písku. Recyklovaný Ytong frakce 0/0,5 mm, 0/1 mm a 0/2 mm, kopaný písek frakce 0/1mm, 0/2 mm a 0/4mm. Pro každou směs bylo navrženo dalších pět různých vzorků, vždy s jiným poměrem plniva z recyklovaného Ytongu a jemného kopaného písku. První vzorek (I.) se skládal pouze z plniva z recyklovaného Ytongu, druhý vzorek referenční (II.) se skládal pouze z plniva jemného kopaného písku, třetí vzorek (III.) z plniva 50 % z jemného kopaného písku a 50 % z recyklovaného Ytongu, čtvrtý vzorek (IV.) z plniva 25 % jemného písku a 75 % z recyklovaného Ytongu, pátý vzorek (V.) z plniva 75 % jemného písku a 25 % z recyklovaného Ytongu. Záměsová voda do malt byla stanovena na základě hodnoty rozlití, která má být dle ČSN EN 1015 - 2 v rozmezí 175 ± 10 mm. Pro další experimentální výzkum byla na základě naměřených pevností v tlaku a z hlediska zpracovatelnosti malty vybrána směs B. Tato směs s frakcí jemného kopaného písku 0/4 mm a recyklovaného Ytongu frakce 0/1 mm dosáhla nejvyšších pevností a její zpracovatelnost byla velmi dobrá.

V druhé části experimentu byly ověřeny základní materiálové vlastnosti, mechanické vlastnosti, tepelně technické vlastnosti a mrazuvzdornost na vybrané směsi B. Začátek a konec doby tuhnutí nastal dle předpokladu nejdříve u referenčního vzorku II., kdy začátek nastal po 186 minutách a konec po 318 minutách. Nejpozději došlo k začátku tuhnutí u vzorku I. (bez kopaného písku) po 332 minutách a konec tuhnutí po 486 minutách. Z vyhodnocení vyplývá, že recyklovaný Ytong oddaluje počátek a konec doby tuhnutí. Přidaný recyklovaný Ytong dle provedeného výzkumu snižuje objemovou hmotnost a přídržnost malty, zvyšuje rychlost transportu kapalně vlhkosti i jejího množství. Další materiálové charakteristiky byly stanoveny rtuťovou porozimetrií, heliovou pyknometrií a vakuovou saturací. Největší zastoupení pórů je od

0,1 až 1 μm ve všech vzorcích a se zvyšujícím množstvím recyklátu v maltě roste i objem pórů. Překvapivé hodnoty byly naměřeny u vzorku III., kde bylo zjištěno podobné zastoupení objemu pórů jako u vzorku I. S objemem pórů souvisí i otevřená pórovitost, ta je nejvyšší u vzorku I. 67,4 % a nejnižší u referenčního vzorku II. bez Ytongu 32,0 %. S množstvím přidaného recyklovaného Ytongu se zlepšují tepelně-fyzikální vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti vyšel u vzorku I. 0,157 W/m.K, hodnota je srovnatelná s perlit-betonem (0,091 – 0,16 W/m.K), který se používá pro izolaci nerovného podlaží, nebo s dřevovláknitou deskou (0,11 – 0,17 W/m.K).⁵⁶ U referenčního vzorku II. vyšel součinitel tepelné vodivosti výrazně vyšší 0,867 W/m.K. Tepelně technické vlastnosti ovlivňuje i měrná tepelná kapacita. Ta je nejnižší u referenčního vzorku II. 864,1 J/kg.K a největší naměřené hodnoty dosáhl vzorek I. 1127,4 J/kg.K. U referenčního vzorku je zapotřebí o 23 % tepla méně pro ohřátí 1 kg látky o 1 °C, než u vzorku I., veličina vyjadřuje akumulární vlastnosti materiálu. Příkladem si můžeme uvést vodu která, v porovnání s jinými látkami, má schopnost akumulovat velké množství tepla 4 180 J/kg.K.⁵⁷ Přidáním recyklovaného Ytongu zvyšujeme akumulární vlastnosti malt. Při zkoušce mrazuvzdornosti vzorky I., IV. a V. neobstály ani první zmrazovací etapu, malty nelze hodnotit jako mrazuvzdorné. Vzorky II. a III. lze považovat za mrazuvzdorné pro 25 zmrazovacích cyklů.

Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny po 7, 28 a 90 dnech, přidaný recyklovaný Ytong snižuje výsledné pevnosti v tahu za ohybu a tlaku. Pevnost v tahu za ohybu vyšla nejvyšší u referenčního vzorku II. 2,41 MPa, druhé nejvyšší pevnosti bylo dosaženo u vzorku V. 1,58 MPa, podobnou pevnost má i vzorek III. 1,46 MPa. Recyklovaný pórobeton snižuje u těchto vzorků výslednou pevnost o 35 – 40 %. S hodnotou pevnosti v tahu za ohybu souvisí i pevnost v tlaku. U referenčního vzorku II. byla naměřena pevnost v tlaku 10,49 MPa, druhé nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek V. 5,95 MPa, podobného výsledku dosáhl vzorek III. 5,69 MPa. U těchto vzorků recyklovaný Ytong snižuje výsledné pevnosti v tlaku přibližně o 45 %.

⁵⁶ TZB – info, *Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů*, [online], Corporate design Topinfo [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>

⁵⁷ Katedra materiálového inženýrství a chemie, *123TVVM – transport kapalné vody*, [online], Praha: ČVUT v Praze, [cit. 2019-12-13], Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/voda.pdf>

6 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na studium vlastností vápenocementových malt s přidáním odpadního materiálu. Recyklací stavebního materiálu dochází ke snížení těžby nových surovin a k využití odpadu místo uložení na skládku. Tím můžeme výrazně přispět k ochraně životního prostředí a trvale udržitelného rozvoje.

V této práci byl recyklován pórobeton Ytong, jako náhrada plniva jemného kopaného písku v poměrech 25, 50, 75 a 100 % do malt. Vyroben byl i referenční vzorek bez recyklovaného pórobetonu, který sloužil pro porovnání a hodnocení experimentálních měření. Z dostupných zdrojů nebyla nalezena žádná práce, zabývající se recyklací pórobetonových tvárnic do malt.

Z výsledku praktické části vyplývá, že přidáním recyklovaného pórobetonu do malt dochází ke zhoršení mechanických vlastností a trvanlivosti, zlepšují se tepelně-fyzikální vlastnosti. Experimentálním měřením byl zjištěn součinitel tepelné vodivosti u malty I. s plnivem z recyklovaného Ytongu 0,157 W/m.K, u referenční malty II. bez přidání recyklátu 0,867 W/m.K. Se součinitelem tepelné vodivosti souvisí i měrná tepelná kapacita, která vyjadřuje akumulární vlastnosti materiálu. S vyšší hodnotou měrné tepelné kapacity roste akumulární vlastnost materiálu. Nejnižší hodnota měrné tepelné kapacity byla naměřena u vzorku II. 864,1 J/kg.K, nejvyšší naměřená hodnota byla zjištěna u vzorku I. 1127,4 J/kg.K. Recyklovaný pórobeton by mohl být v budoucnu využit do výrobků za účelem zvýšení tepelně technických vlastností. Je však zapotřebí provést dodatečný výzkum pro daný výrobek a ověřit jeho vlastnosti a trvanlivost.

Závěrem lze konstatovat, že přidáním recyklovaného Ytongu do malty dochází ke zhoršení mechanických vlastností a trvanlivosti. Zlepšují se tepelně technické vlastnosti. Vzhledem k plánované životnosti staveb není využití recyklovaného pórobetonu do malt příliš vhodné. Jeho využití lze hledat do materiálů za účelem zlepšení tepelně technických vlastností. Další výzkum by mohl vést tímto směrem.

Kniha

SVOBODA Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*, 2 vydání, Praha: Jaga Group, 2007. 400 s. ISBN 978-80- 8076-057-1.

SVOBODA Luboš a kolektiv, *Stavební hmoty*, 3 vydání, Praha: Jaga Group, 2013, 950 s. ISBN 978-80-260-4972-2

VÝBORNÝ Jaroslav, *Nauka o materiálech 20 (21)*, Rostislav Drochytka, Pavel Košatka, Dimitrij Pume, Zdeněk Tobolka, 1 vydání, Praha, 1999-12, 123 s., ISBN 80-01-02063-0

ČERNÝ Robert et al. *Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials and Its Applications*, ČVUT Praha, 2013, ISBN 978-80-01-05208-2

PAVLÍKOVÁ Milena, Pavlík Zbyšek a Hošek Jiří. *Materiálové inženýrství I*, 1 vydání, vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 283 s., ISBN 978-80-01-04263-2

Vejmelková E. et. al. Free water intake as means of material characterization. *JOURNAL OF BUILDING PHYSICS*. Vol. 33, Issue 1, July 2009, pp. 29-44

Webové odkazy

Jirásek, J., Vavro, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1378-3 [vid. 2019-07-24]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

Jirásek, J., Vavro, M.: *Anorganická pojiva*. [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1378-3 [vid. 2019-08-27]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

Jirásek, J., Vavro, M.: *Kamenivo* [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1378-3 [vid. 2019-10-11]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html

GREGEROVÁ, Miroslava. *VZDUŠNÉ MALTY HISTORICKÝCH STAVEB, JEJICH IDENTIFIKACE, PŘÍČINY DEGRADACE A NÁVRH SANACE*. In: Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 1999. Brno 2000. Katedra mineralogie, petrologie a geochemie. PřF. Masarykova universita. Kotlářská 2. 611 37 Brno. Dostupné z: <https://journals.muni.cz/gvms/article/view/5130/4301>

Rovnaníková, P. *materiály historických omítek*. In: *obnova památek 2004 – omítky historických budov 4. Konference s výstavou a exkurzí* [online]. Praha, 23.3. – 24.3.2004. Praha: Masarykova kolej. 2016. [vid. 2019-08- 26]. Dostupné z: <http://www.studioaxis.cz/images/pamatky/rovnanikovapavla.doc>

eBeton – Specialista na beton, *Druhotná surovina* [online]. Svaz výrobců betonu ČR [vid. 2019-08- 27]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/druhotna-surovina>

Evropská asociace výrobců a zpracovatelů strusky, *Využití strusky ve stavebnictví* [online] Euroslag technický list č.1 [vid. 2019-08- 28]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:sbhxUrwx7zIJ:www.silmos.cz/file.php%3Fid%3D1060+&cd=5&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>

iMateriály, *Pórobeton – moderna, nebo tradice?*, [online], Business Media One, s. r. o, 2009-09-07 [cit. 2019-09-02]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/porobeton-moderna-nebo-tradice_101480.html

Porfix, *Historie společnosti*, [online], 2019, [cit. 2019-09-09]. Dostupné z: <https://www.porfix.cz/o-spolecnosti/historie-spolecnosti/>

Rahul Malhotra, *Autoclaved aerated Concrete*, [online], 2013-02-21, [cit. 2019-09-10], Dostupné z: <http://chemistryofmaterials2013.wikidot.com/rahul-malhotra>

Ytong, *Pórobeton Ytong*, [online], Xella Group, [cit. 2019-09-11], Dostupné z: <https://www.ytong.cz/porobeton-ytong.php>

Xella CZ, s.r.o., *Příručka pro projektování Ytong*, [online], 2016-11, [cit. 2019-09-12], Dostupné z: <https://www.ytong.cz/cs/docs/ytong-prirucka-pro-projektovani.pdf>

Vše pro váš dům, *Jaký druh písku a kameniva použít na stavbě?*, [online], 2008-03-27, [cit. 2019-10-12], Dostupné z: <https://www.vseprovasdum.cz/jaky-druh-pisku-a-kameniva-pouzit-na-stavbe.html>

Jean Rouquerol et al., *Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report)*, Pure and Applied Chemistry, Vol 84, Issue 1, 2011-12-12, [cit. 2019-10-28], Dostupné z: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/pac.2012.84.issue-1/pac-rep-10-11-19/pac-rep-10-11-19.pdf>

Transportbeton, *Beton, příručka technologa, suroviny – výroba – vlastnosti*. [online], 1. vyd. HeidelbergCEMENTGroup, 2013, [cit. 2019-10-12], Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>

LB Cemix, *Vápenný hydrát CL 90 – S*, Kotouč Štramberk, aktualizace 05/2019, [cit. 2019-11-08], Dostupné z: https://www.cemix.cz/data/files/technicky_l_hydrat.pdf

Lafarge Cement, a.s., *Portlandský cement CEM I 42,5 R*, IZOMAT, [cit. 2019-11-13], Dostupné z: https://www.izomat.cz/out/media/Technicky_list_CEM_I_42_5_R_SPECIAL_PLUS_0.pdf

SVOBODA, Luboš. *DDtest*. Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra stavebních hmot K 123 [online]. 2009, [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/DDtest/>

TZB – info, *Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů*, [online], Corporate design Topinfo [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>

KOFROST, *Automatické zařízení KD 20 pro zkoušky mrazuvzdornosti a povrchové odolnosti stavebních materiálů vůči mrazu dle ČSN a EN*, [online], technická příručka, Olomouc, [cit. 2019-12-23], Dostupné z: file:///C:/Users/HP/Downloads/technicka_specifikace.pdf

Článek

Willem van Boggelen, *History of autoclaved aerated concrete*. [online]. 2018-01. [cit. 2019-09-09], Dostupné z: <https://www.aircrete.com/wp-content/uploads/2018/10/History-of-AAC.pdf>

Jiří Hejhálek, *Pórobeton. Vlastnosti, využití a jak se vyrábí*, [online], 2017-05-07, [cit. 2019-09-09], Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/porobeton-mladsi-bratr-betonu-stejny-rodopis-jine-vlastnosti>

Pavla Kotásková, *Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti kameniva*, [online], Ústav inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny (LDF), [cit. 2019-10-23], Dostupné z: <http://www.utok.cz/sites/default/files/data/USERS/u24/Laborator%206.pdf>

Katedra materiálového inženýrství a chemie, *123TVVM – transport kapalné vody*, [online], Praha: ČVUT v Praze, [cit. 2019-12-13], Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/voda.pdf>

Článe v časopisu

Roels Staf et al., Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 27, No. 4 - April 2004, str. 325

Bakalářská práce

KAŠPAROVÁ Jana, *Ověření využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel*, v Brně, 2017, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Seznam použitých norem

ČSN EN 13139 (72 1503), *Kamenivo pro malty*, Česká technická norma, účinnost od 04/2004

ČSN EN 933 – 1 (721183), *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*, Česká technická norma, účinnost od 07/2012

ČSN EN 933 – 2 (721183), *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 2: Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů*, Česká norma, účinnost od 05/1997

ČSN EN 459 – 1 ED.2 (722201), *Stavební vápno – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*, Česká technická norma, účinnost od 11/2015

ČSN EN 459 – 2 (722201), *Stavební vápno – Část 2: Zkušební metody*, Česká technická norma, účinnost od 04/2011

ČSN P ENV 197-1 (722101), *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, Česká technická norma, účinnost od 05/2012

ČSN EN 13501 – 1 (730860), *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*, Česká technická norma, účinnost od 03/2010

ČSN EN 1015 – 2 (722400), *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt*, Česká technická norma, účinnost od 11/1999

ČSN EN 1015 – 3 (722400), *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*, Česká technická norma, účinnost od 04/2000

ČSN EN 196 – 3 (722100), *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*, Česká technická norma, účinnost od 10/2017

ČSN EN 1015 – 11 (722400), *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*, Česká technická norma, účinnost od 07/2000

ČSN EN 1015 – 12 (72240), Zkušební metody malt pro zdivo – Část 12: Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu, Česká technická norma, účinnost od 03/2017

ČSN EN 1097-3 (72 1194), *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*, Česká technická norma, 12/1999

ČSN EN 13 139 (721503), *Kamenivo pro malty*, Československá státní norma, účinnost od 05/2004

ČSN EN 73 1371 (731371), *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*, Česká technická norma, účinnost od 10/2011

ČSN EN 12504 – 4 (731303), *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*, Česká technická norma, účinnost od 04/2005

ČSN 72 2452 (722452), *Zkouška mrazuvzdornosti malt*, Československá státní norma, účinnost od 01/1970

Seznam tabulek

Tabulka 1.1	Velikost zrn u drobného kameniva.....	20
Tabulka 2.1	Vlastnosti materiálu Ytong používaných pro zdící prvky.....	27
Tabulka 3.1	Chemické složení portlandského cementu CEM I 42,5 R.....	42
Tabulka 3.2	Technické parametry portlandského cementu udávané výrobcem.....	42
Tabulka 3.3	Chemické a fyzikální vlastnosti vápenného hydrátu CL 90 – S.....	43
Tabulka 3.4	Naměřené hodnoty zrnitosti zkušebních navážek – písek 0/4.....	45
Tabulka 3.5	Výpočet a vyjádření výsledku zrnitosti - písek 0/4.....	45
Tabulka 3.6	Naměřené hodnoty zrnitosti zkušebních navážek – Ytong 0/4.....	46
Tabulka 3.7	Výpočet a vyjádření výsledku zrnitosti - Ytong 0/4.....	46
Tabulka 3.8	Předeepsaná hodnota rozlití dle ČSN EN 1015 – 2 vztahující se na objemovou hmotnost čerstvé malty	48
Tabulka 3.9	Směs A - množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2).....	50
Tabulka 3.10	Směs A -Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo.....	50
Tabulka 3.11	Směs B - množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2).....	50
Tabulka 3.12	Směs B -Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo.....	51
Tabulka 3.13	Směs C - množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2).....	51
Tabulka 3.14	Směs C -Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo.....	51
Tabulka 3.15	Směs D - množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2).....	52
Tabulka 3.16	Směs D -Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo.....	52
Tabulka 3.17	Směs E - množství jednotlivých suchých složek směsi na 1 kg a množství záměsové vody stanovené dle požadované hodnoty rozlití (ČSN EN 1015 – 2).....	52
Tabulka 3.18	Směs E -Výsledná hodnota rozlití a ověření požadavku podle ČSN EN 1015 – 2 Zkušební metody malt pro zdivo.....	53
Tabulka 3.19	Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/2.....	54

Tabulka 3.20	Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/1.....	54
Tabulka 3.21	Frakce jemného písku 0/4, frakce Ytongu 0/0,5.....	54
Tabulka 3.22	Frakce jemného písku 0/1, frakce Ytongu 0/1.....	55
Tabulka 3.23	Frakce jemného písku 0/2, frakce Ytongu 0/2.....	55
Tabulka 4.1	Objemová a sypná hmotnost kameniva a Ytongu.....	59
Tabulka 4.2	Počátek a konec doby tuhnutí.....	60
Tabulka 4.3	Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti směsi B.....	65
Tabulka 4.4	Vyhodnocení hustoty matrice a otevřené pórovitosti směsi pomocí pyknometrie.....	68
Tabulka 4.5	Vyhodnocení hustoty matrice a otevřené pórovitosti pomocí vakuové saturace.....	68
Tabulka 4.6	Vyhodnocení vzorků na 7 denní pevnosti v tahu za ohybu a tlaku.....	69
Tabulka 4.7	Vyhodnocení vzorků na 28 denní pevnosti v tahu za ohybu a tlaku.....	69
Tabulka 4.8	Vyhodnocení vzorků na 90 denní pevnosti v tahu za ohybu a tlaku.....	69
Tabulka 4.9	Vyhodnocení přídržnosti směsi B.....	71
Tabulka 4.10	Tepelné vlastnosti navržených malt.....	72
Tabulka 4.11	Vyhodnocení mrazuvzdornosti malt - u porovnávacích těles v den zahájení zkoušky mrazuvzdornosti.....	76
Tabulka 4.12	Výsledky z měření mrazuvzdornosti malt - u zkušebních těles po 25 cyklech.....	77
Tabulka 4.13	Výsledky z měření mrazuvzdornosti malt - u porovnávacích těles v den ukončení zkoušky mrazuvzdornosti.....	78
Tabulka 4.14	Vyhodnocení relativního dynamického modulu pružnosti RDMUPPT [%], změny rychlosti šíření ultrazvukového impulsu Z [km/s] a dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku ECU [GPa] - po 25 zmrazovacích cyklech.....	79
Tabulka 4.15	Hodnoty součinitele mrazuvzdornosti po 25 cyklech.....	79

Seznam obrázků

Obrázek 3.1	Stanovení rozměru posuvným měřítkem	31
Obrázek 3.2	Stanovení hmotnosti vzorku laboratorní váhou TScale QHW 15.....	31
Obrázek 3.3	Porozimetry Pascal 140 a 440 od výrobce Thermo Electron.....	33
Obrázek 3.4	Vzorek naplněný rtutí.....	33
Obrázek 3.5	Trámečky porušené zkouškou pevnosti v tahu za ohybu.....	36
Obrázek 3.6	Vzorek v průběhu zkoušky v mechanickém lisu MTS Criterion.....	36
Obrázek 3.7	Vzorek umístěný v lisu před zkouškou pevnosti v tlaku.....	37
Obrázek 3.8	Vzorek po ukončení zkoušky pevnosti v tlaku.....	37
Obrázek 3.9	Použitá drtička pro úpravu recyklovaného pórobetonu.....	44
Obrázek 3.10	Drcený pórobeton v použití drtičky.....	44
Obrázek 3.11	Použitá stavební míchačka na přípravu malt.....	49
Obrázek 3.12	Příprava vzorků pro zjištění pevnosti v tlaku.....	49
Obrázek 3.13	Střásací stůl se vzorkem malty.....	53
Obrázek 3.14	Pohled na desku střásacího stolku.....	53
Obrázek 3.15	Vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku směs B a C.....	55
Obrázek 3.16	Vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku směs E a D	55
Obrázek 3.17	Výroba zkušebních těles.....	57
Obrázek 3.18	Výroba zkušebních krychlí 50 x 50 x 50 mm	57
Obrázek 4.1	Automatický Vicatův přístroj v průběhu zkoušky.....	59
Obrázek 4.2	Vzorky po ukončení zkoušek.....	59
Obrázek 4.3	Vzorek zavěšen pomocí speciální konstrukce na digitální váze.....	64
Obrázek 4.4	Vzorek ponořen 2 – 3 mm pod hladinou vody.....	64
Obrázek 4.5	Vzorek s vtlačenou rtutí.....	67
Obrázek 4.6	Odebraný vzorek na zkoušku porozimetrie.....	67
Obrázek 4.7	Nadrcený vzorek na heliovou pyknometrii.....	67

Obrázek 4.8	Vzorky ponořené do vody při vakuové saturaci.....	67
Obrázek 4.9	Měření přídržnost odtrhoměrem OMtest OP ¾.....	71
Obrázek 4.10	Ukázka odtrhu směsi III.....	71
Obrázek 4.11	Měření tepelné kapacity pomocí přístroje Isomet 2114.....	72
Obrázek 4.12	Automatické zařízení KD 20, pro vyhodnocení zkoušek mrazuvzdornosti.....	76
Obrázek 4.13	Vzorky v automatickém zařízení KD 20 v průběhu první zmrazovací etapy.....	77
Obrázek 4.14	Vzorky po ukončení první zmrazovací etapy.....	77
Obrázek 4.15	Trámečky po druhé etapě zmrazování.....	78

Seznam grafů

Graf 3.1	Křivka zrnitosti referenčního písku 0/4 a Ytongu 0/4.....	47
Graf 4.1	Grafické zobrazení počátku a konce doby tuhnutí.....	60
Graf 4.2	Křivka absorpce vody – směs I.....	61
Graf 4.3	Křivka absorpce vody – směs II.....	62
Graf 4.4	Křivka absorpce vody – směs III.....	62
Graf 4.5	Křivka absorpce vody – směs IV.....	63
Graf 4.6	Křivka absorpce vody – směs V.....	63
Graf 4.7	Křivky absorpce vody vzorků I., II., III., IV., V.....	64
Graf 4.8	Objemové zastoupení pórů v závislosti na jejich velikosti.....	65
Graf 4.9	Kumulativní křivka pórů pro směs B.....	66
Graf 4.10	Distribuční křivka pórů pro směs B.....	66
Graf 4.11	Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu po 7, 28 a 90 dnech.....	70
Graf 4.12	Vyhodnocení pevností v tlaku po 7, 28 a 90 dnech.....	70

Seznam rovnic

1.	Reakce hliníku s vodou v alkalickém prostředí.....	23
2.	Reakce hliníku s hydroxidem sodným.....	23
3.	Stanovení objemové hmotnosti kameniva a Ytongu ρ_v	29
4.	Stanovení sypané hmotnosti kameniva a Ytongu ρ_b	29
5.	Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles ρ	31
6.	Stanovení absorpčního koeficientu A_b	32
7.	Stanovení průměrné hodnoty součinitele vlhkostní vodivosti k	32
8.	Washburnova rovnice - stanovení průměru pórů d_p	33
9.	Stanovení objemu pórů V	34
10.	Stanovení otevřené pórovitosti ψ_0	34
11.	Stanovení objemové hmotnosti vysušených těles ρ_d	34
12.	Stanovení hustoty matrice ρ_{mat} – vakuovou saturací	34
13.	Stanovení hustoty matrice ρ_{mat} – heliovou pyknometrií.....	35
14.	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu R_f	36
15.	Stanovení pevnosti v tlaku R_c	37
16.	Stanovení přídržnost f_u	38
17.	Stanovení měrné tepelné kapacity c	39
18.	Stanovení rozpětí mezi hodnotami R	58
19.	Stanovení ohlehlosti Q_n z krajních hodnot	58
20.	Stanovení součinitele mrazuvzdornosti $K_{v,i}$ z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu	74
21.	Stanovení součinitele mrazuvzdornosti $K_{E,i}$ z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu	74
22.	Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu Z	75
23.	Stanovení dynamického modulu pružnosti iv tlaku a tahu E_{cu}	75
24.	Stanovení relativního dynamického modulu pružnosti $RDM_{UPPT,n}$	75