



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ ZDICÍHO SYSTÉMU PRO JEDNODUCHOU VÝSTAVBU VNITŘNÍCH DĚLICÍCH KONSTRUKCÍ

DEVELOPMENT OF MASONRY SYSTEMS FOR SIMPLE CONSTRUCTION OF INTERNAL
MASONRY STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Klára Lidmilová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Klára Lidmilová
Název	Vývoj zdicího systému pro jednoduchou výstavbu vnitřních dělicích konstrukcí
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNY, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] Vaverka, J.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] ČSN EN 1745 Zdivo a výrobky pro zdivo - Metody stanovení návrhových tepelných hodnot
- [5] ČSN 73 0532 Akustika. Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách. Požadavky
- [6] R.J.M. Craik, R. Wilson, Sound transmission through masonry cavity walls, Journal of Sound and Vibration, Volume 179, Issue 1, 1995, Pages 79-96, ISSN 0022-460X,
- [7] Emeritus A.W Hendry, Masonry walls: materials and construction, Construction and Building Materials, Volume 15, Issue 8, 2001, Pages 323-330, ISSN 0950-0618

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce se bude zabývat vývojem nového zdicího systému pro jednoduchou výstavbu vnitřních dělicích konstrukcí. Cílem bude návrh zdicích prvků pro jednoduchou a přesnou výstavbu s možností zdění tzv. suchým způsobem (buď na lepidlo pro tenké spáry nebo na zdicí PUR pěnu). Součástí práce bude také návrh systému zdění z těchto prvků, včetně návrhu finálních úprav povrchu konstrukce. Vyvinutý systém v rámci diplomové práce by měl umožnit snadnou a efektivní výstavbu s minimalizací mokrých procesů. Dále pak by výsledná konstrukce měla vykazovat srovnatelné vlastnosti, jako ostatní typy zděných konstrukcí běžně využívaných pro výstavbu v ČR, měla by umožnit jednoduché provádění rozvodů a instalací a jednotlivé zdicí prvky by měly být snadno dělitelné. V rámci diplomové práce by mělo být také provedeno ekonomické zhodnocení navrženého zdicího systému a zhodnocení z pohledu dopadu tohoto zdicího systému na životní prostředí (EPD). (Rozsah práce 50-60 stran)

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vývojem nového zdicího systému, pro jehož výrobu by mohl být využit cihelný recyklát jako druhotná surovina. V oblasti literární rešerše se práce věnuje způsobům výstavby svislých konstrukcí, možnostem vylehčení betonu, životnímu cyklu stavebních materiálů a využití druhotných surovin ve stavebnictví.

V praktické části byl na základě průzkumu trhu v oblasti vnitřních nenosných zděných konstrukcí a požadavků na tyto konstrukce navržen zdicí systém. Aby bylo dosaženo těchto vlastností, jako materiál pro jeho výrobu byl zvolen beton, kde byl použit cihelný recyklát jako alternativní kamenivo. Jelikož má jít o systém pro přesné zdění, materiál byl zhutňován vibrolisováním. Na počátku byly navrženy receptury, na kterých se ověřily základní vlastnosti betonu: objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu, poté se na vylepšených recepturách zkoušely i další vlastnosti jako je součinitel tepelné vodivosti a činitel zvukové pohltivosti. Pro dosažení optimálních vlastností bylo upravováno vylehčení a rozměrové moduly. Na to navázal návrh způsobu zdění a povrchové úpravy stěny. Na závěr bylo vyhodnoceno ekonomické a ekologické hledisko zdicího systému.

KLÍČOVÁ SLOVA

cihelný recyklát, zdivo, zdicí prvek, druhotná surovina, životní cyklus, environmentální prohlášení o produktu

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the development of a new masonry system, for the production of which recycled brick could be used as a secondary raw material. In the field of literary research, the work deals with the methods of construction of vertical structures, the possibilities of lightening concrete, the life cycle of building materials and the use of secondary raw materials in construction.

In the practical part, a masonry system was designed based on market research in the field of internal non-load-bearing masonry structures and requirements for these structures. In order to achieve these properties, concrete was chosen as the material for its production, where recycled brick was used as an alternative aggregate. As it is supposed to be a system for precise masonry, the material was compacted by vibrocompression. At the beginning, recipes were designed to verify the basic properties of concrete: density of hardened concrete, compressive strength and tensile bending strength, then other properties such as thermal conductivity and sound absorption coefficient were tested on improved recipes. Lightening and dimensional modules have been modified to achieve optimal properties. This was followed by a proposal for the method of masonry and surface treatment of a wall. Finally, the economic and environmental aspects of the masonry system were evaluated.

KEYWORDS

recycled brick, masonry, masonry unit, secondary raw material, life cycle, environmental product declaration

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Klára Lidmilová *Vývoj zdicího systému pro jednoduchou výstavbu vnitřních dělicích konstrukcí*. Brno, 2021. 75 s., 31 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vývoj zdicího systému pro jednoduchou výstavbu vnitřních dělicích konstrukcí* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Klára Lidmilová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph. D. za rady, připomínky a podněty při vypracování diplomové práce.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Janu Bubeníkovi a Ing. Vítězslavu Novákovi, Ph. D. za pomoc při realizaci praktické části.

V neposlední řadě děkuji rodině za podporu při studiu a nezbytné zázemí a Ladislavu Lidmilovi za cenné připomínky a nekonečnou ochotu.

OBSAH

TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1. ÚVOD.....	10
2. SVISLÉ KONSTRUKCE.....	11
2.1. <i>MONOLITICKÉ KONSTRUKCE</i>	12
2.2. <i>PREFABRIKOVANÉ KONSTRUKCE</i>	13
2.3. <i>ZDĚNÉ KONSTRUKCE</i>	13
2.3.1. Spojovací hmoty.....	16
3. LEHKÉ BETONY.....	17
3.1. <i>MEZEROVITÝ BETON</i>	17
3.2. <i>BETON S PÓROVITÝM KAMENIVEM</i>	18
3.2.1. Pórovité kamenivo.....	18
3.3. <i>PÓROBETON</i>	19
3.4. <i>PĚNOBETON</i>	20
4. ŽIVOTNÍ CYKLUS PRODUKTU.....	21
4.1. <i>ENVIRONMENTÁLNÍ PROHLÁŠENÍ O PRODUKTU (EPD)</i>	23
4.2. <i>VYUŽITÍ DRUHOTNÝCH SUROVIN VE STAVEBNICTVÍ</i>	24
4.3. <i>STAVEBNÍ ODPAD</i>	25
4.3.1. Staveništní odpad.....	26
4.4. <i>RECYKLACE</i>	26
4.4.1. Omezení recyklace odpadů.....	26
4.4.2. Cihelný recyklát.....	27
PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
5. CÍL.....	29
6. METODIKA.....	29
6.1. <i>PRŮZKUM TRHU V OBLASTI ZDĚNÝCH PŘÍČEK</i>	30
6.2. <i>NÁVRH VSTUPNÍCH SUROVIN</i>	32
6.2.1. Cement CEM I 42,5 R Mokrý.....	32
6.2.2. Superplastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035.....	33
6.2.3. Cihelný recyklát.....	33
6.3. <i>RECEPTURY</i>	33
6.4. <i>ZKUŠEBNÍ TĚLESA</i>	36
6.5. <i>ZKOUŠENÍ CIHELNÉHO RECYKLÁTU</i>	37
6.5.1. Sytná hmotnost volně sypaného kameniva.....	37
6.6. <i>ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU</i>	38
6.6.1. Objemová hmotnost v čerstvém stavu.....	38
6.7. <i>ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU</i>	38
6.7.1. Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu.....	38
6.7.2. Pevnost v tlaku.....	39
6.7.3. Pevnost v tahu za ohybu.....	39
6.7.4. Součinitel tepelné vodivosti.....	40
6.7.5. Činitel zvukové pohltivosti.....	41
7. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ.....	42
7.1. <i>SYTNÁ HMOTNOST FRAKČÍ CIHELNÉHO RECYKLÁTU A JEJICH SMĚSÍ</i>	42
7.2. <i>MEZEROVITÝ CIHLOBETON S RŮZNÝM MNOŽSTVÍM CEMENTU A RŮZNÝMI SMĚSMI FRAKČÍ</i>	47
7.3. <i>MEZEROVITÝ CIHLOBETON S RŮZNÝMI SMĚSMI FRAKČÍ</i>	49
7.3.1. Vlastnosti mezerovitého cihlobetonu v čerstvém stavu.....	50
7.3.2. Vlastnosti mezerovitého cihlobetonu ve ztvrdlém stavu po 7 dnech.....	51

7.3.3.	Vlastnosti mezerovitého cihlobetonu ve ztvrdlém stavu po 28 dnech.....	53
7.4.	VYHODNOCENÍ MATERIÁLU.....	58
8.	NÁVRH ZDICÍHO SYSTÉMU	61
8.1.	ZPŮSOB ZDĚNÍ	61
8.2.	ÚPRAVA ROZMĚROVÝCH MODULŮ A MÍRY VYLEHČENÍ.....	62
8.3.	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	65
8.4.	POVRCHOVÁ ÚPRAVA.....	65
8.5.	EKOLOGICKÉ ZHODNOCENÍ	66
9.	ZÁVĚR	67
	ZDROJE	69
	SEZNAMY.....	74

POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY

EPD	environmentální prohlášení o produktu
t	tloušťka prvku
v	výška prvku
v_m	výškový modul prvku
d	délka prvku
t_s	tloušťka ložné spáry
R	pevnost v tlaku prvku
$\lambda_{10,dry,unit}$	součinitel tepelné vodivosti prvku v suchém stavu při průměrné teplotě 10 °C
U	součinitel prostupu tepla
R_w	vážená laboratorní neprůzvučnost
m'	plošná hmotnost
ρ_s	sypaná hmotnost volně sypaného kameniva
$m_{\check{C}B}$	hmotnost čerstvého betonu
V	objem nádoby
D_{max}	maximální jmenovitá horní mez frakce kameniva
$D_{\check{C}B}$	objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu
D	objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu
m	hmotnost tělesa
b	šířka tělesa
h	výška tělesa
l	délka tělesa
f_c	pevnost v tlaku
$f_{ct,fl}$	pevnost v tahu za ohybu
α	činitel zvukové pohltivosti
f	frekvence
A'/A	vylehčení prvku
A	plocha prvku
D_{dry}	objemová hmotnost ve vysušeném stavu
$f_{c,unit}$	pevnost v tlaku prvku
U_{mas}	součinitel prostupu tepla konstrukce

TEORETICKÁ ČÁST

1. ÚVOD

Využití druhotných surovin je v dnešní době důležitou otázkou v mnoha průmyslových odvětvích včetně stavebnictví. Často se lze setkat například s náhradou přírodního kameniva kamenivem recyklovaným nebo s částečnou náhradou cementu latentně hydraulickými příměsmi (např. struska) nebo pucolány (popílek, křemičité úlety apod.). To vede k šetrnějšímu chování k životnímu prostředí, jelikož část primárních surovin nahradíme surovinami druhotnými, které by jinak skončily jako odpad. Ten díky tomu můžeme smysluplně využít namísto toho, abychom ho nákladně skládkovali a znečišťovali tak okolní krajinu [1].

Díky využití druhotných surovin lze šetřit suroviny primární a jejich zdroje, například rudy, kámen, písek, dřevo, ropu atd. Kromě toho mohou také usnadnit technologii výroby, kdy například skleněné střepy ve sklářském kmenu ulehčují průběh tavení. Jako zdroje druhotných surovin lze využít vedlejší produkty z výroby, nezpracované suroviny po těžbě, výrobky po konci životnosti, využitelné odpady (ty je potřeba upravit, aby splňovaly požadavky na vstupní suroviny do výrobního procesu) [2].

Jedním z materiálů, které jsou v dnešní době brány jako druhotná surovina, je cihelný recyklát ať už ze stavby, který je navíc znečištěn maltou a tepelnou izolací, tak i přímo z výroby keramických zdicích prvků. Cihelný recyklát je možné využít jako podklad pro méně zatížené vozovky (např. příjezdová cesta), kamenivo do betonu, zásyp pro zemní práce, frakce 0–4 mm lze použít jako plnivo do zdicí malty. Tato malta má lepší tepelně izolační vlastnosti než malta s kamenivem přírodním, jelikož cihelný recyklát je pórovitější než běžně používané kamenivo [3].



Obr. 1 Cihelný recyklát frakce 0–4 mm [4]

Práce má za cíl vyvinout nový zdicí systém, pro jehož výrobu bude místo běžného kameniva použit cihelný recyklát z výroby, z něhož bude vytvořena tvarovka z lehkého betonu. Beton bude vylehčen 2 způsoby: lehkým kamenivem a zvýšenou mezerovitostí. Tento zdicí systém by měl mít srovnatelné vlastnosti jako zdicí systémy, které fungují na českém trhu, proto budou vlastnosti výrobku porovnány s jinými běžnými systémy na trhu. Výrobek by měl umožnit co nejjednodušší výstavbu a měl by se vyznačovat snadnou dělitelností. Na závěr bude systém zhodnocen ekonomicky a ekologicky, aby byla vidět jeho konkurenceschopnost a šetrnost k životnímu prostředí.

2. SVISLÉ KONSTRUKCE

Svislé nosné konstrukce slouží k přenosu zatížení z vodorovných konstrukcí, schodišť a střešních do základů. Nenosné svislé konstrukce nesou pouze vlastní hmotnost, a mají proto výplňovou funkci. Dle tvaru se svislé konstrukce dělí na stěny (tloušťka výrazně menší než výška a šířka), sloupy (výrazná výška oproti šířce a tloušťce) a pilíře (označovány jako masivní sloupy). Dle způsobu výstavby dělíme svislé konstrukce na monolitické, prefabrikované neboli montované a zděné. Další možností rozdělení svislých konstrukcí je dle půdorysného uspořádání na vnitřní nosné, nenosné (příčky), schodišťové, obvodové, ztužující a protipožární a dle výškového uspořádání na základové, nadzákladové, podkrovní, nadstřešní a atiku [5] [6] [7].

Dle vyhlášky č. 268/2009 Sb. jsou na konstrukci kladeny technické požadavky, a to:

- mechanická odolnost a stabilita,
- požární bezpečnost,
- ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí,
- ochrana proti hluku,
- bezpečnost při užívání,
- úspora energie a tepelná ochrana [8].

Tyto požadavky musí konstrukce splňovat při běžné údržbě i při působení běžně předvídatelných vlivů po dobu plánované životnosti stavby [8].

Na svislé konstrukce působí především tlakové napětí. Při statickém posuzování se hodnotí mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti [7].

Tepelně izolační funkce konstrukcí spočívá v oddělení prostor s rozdílnou teplotou. Tepelně izolační vlastnosti svislých konstrukcí musí splňovat požadavky dle ČSN 73 0540-2. Dobrých tepelně izolačních vlastností lze dosáhnout například vylehčením konstrukce, jelikož součinitel tepelné vodivosti je u zdicích prvků se stejným vnitřním uspořádáním nepřímo úměrný objemové hmotnosti (závisí však i na jiných faktorech). Na druhou stranu tepelná akumulace se s rostoucí objemovou hmotností zvyšuje, proto není vždy nízká objemová hmotnost žádoucí, zejména v případě, kdy požadujeme vyšší teplotní setrvačnost konstrukce [7] [9].

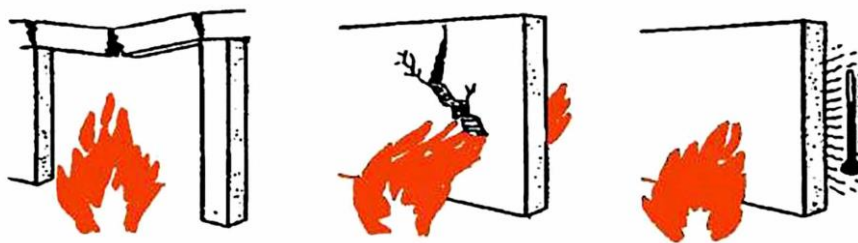
Z hlediska akustické izolace hodnotíme svislé konstrukce na základě hodnot vážené stavební vzduchové neprůzvučnosti (místnosti, které mají společnou plochu stěny, příčky nebo stropu), vážené laboratorní neprůzvučnosti (vnitřní dveře) a váženého normalizovaného rozdílu hladin (místnosti bez společné dělicí konstrukce). Požadavky na akusticky izolační funkci jsou uvedeny v ČSN 73 0532 [7][10].

Požární bezpečnost se hodnotí dle ČSN EN 13501-2 podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení, a to v oblasti požární odolnosti stavebních konstrukcí, kdy rozlišujeme mezní stav:

- nosnosti „R“ (schopnost odolávat po určitou dobu vlivu požáru bez ztráty konstrukční stability),

- celistvosti „E“ (schopnost odolávat vlivu požáru bez přenosu požáru na neohřívanou stranu vlivem průniku plamenů nebo horkých plynů),
- izolace „I“ (schopnost odolávat vlivu požáru bez přenosu požáru na neohřívanou stranu vlivem přestupu tepla z ohřívané strany, nesmí dojít ke vznícení neohřívané strany),
- radiace „W“ (schopnost odolávat požáru tak, aby se snížila pravděpodobnost přenosu požáru v důsledku postupu sálavého tepla).

Tyto mezní stavy jsou udávány v minutách, kdy je konstrukce schopna odolávat účinkům požáru, aniž by došlo k narušení funkce. Z pohledu materiálu hodnotíme reakci stavebních materiálů a výrobků na oheň dle ČSN EN 13501-1, kdy materiál zatřídí do tříd A1, A2, B, C, D, E a F [7] [11] [12].



Obr. 2 Požární odolnost: mezní stav nosnosti, celistvosti a izolace [4]

Dle technologie provádění se svislé konstrukce dělí na:

- monolitické, kdy je konstrukce sestavena z jednotlivých předvyrobených konstrukčních prvků neboli stavebních dílců,
- prefabrikované, kdy je prvek vyroben a ošetřován na jiném místě, než kde je nakonec použit (většinou výroba ve výrobně, případně zhotovení na místě),
- zděné, kdy se jedná o soustavu zdicích prvků uložených podle stanoveného uspořádání a spojených maltou [5] [7] [13] [14].

2.1. MONOLITICKÉ KONSTRUKCE

Jedná se o betonovou směs litou přímo do bednění, které se po ztvrdnutí směsi odstraní, nebo ponechá v konstrukci (tzv. ztracené bednění). Tento typ konstrukcí je znám již z antiky. Novodobý typ této konstrukce se začal používat od první poloviny 19. století. Pro svislé konstrukce namáhané pouze tlakem se používá prostý beton. U konstrukcí namáhaných kombinací ohybu a tlaku se uplatňuje železobeton, což je konstrukce tvořena ocelovými pruty, které zachycují tahové napětí, zalitými betonovou směsí, která odolává tlakovému napětí. Významnou nevýhodou monolitických konstrukcí jsou špatné tepelně izolační vlastnosti, které je potřeba řešit zateplením konstrukce. Při výrobě monolitické železobetonové konstrukce se nejdříve připraví bednění, do kterého se uloží

předem připravená výztuž. Následuje výroba betonové směsi, která se v případě potřeby dopraví na místo stavby, následně se uloží do bednění a zhutní. Poté se beton ošetřuje, aby nedošlo k jeho poškození. Při použití tradičního bednění se po dosažení požadovaných pevností betonu toto bednění odstraní. Naopak při použití ztraceného bednění zůstává bednění součástí konstrukce [15].

2.2. PREFABRIKOVANÉ KONSTRUKCE

Prefabrikované konstrukce jsou konstrukce složené z předem vyrobených celoplošných nebo tyčových dílců, které se spojí stykováním. Tento typ konstrukcí vyšel z potřeby přemístit výrobu mimo místo staveniště. Co se týká materiálu, mohou být z keramiky, hutného nebo vylehčeného betonu, oceli, dřeva, případně je možné použít kombinaci těchto materiálů. Díky této předvýrobě se značně zrychlí samotná výstavba hrubé stavby, jelikož se jedná pouze o montáž jednotlivých dílů a odpadá nám zde mokrá proces, který výstavbu značně zpomaluje. U spojů jednotlivých dílců jsou kladeny vysoké nároky na provedení, a to z hlediska statiky, kdy konstrukce musí přenést tlakové, tahové a smykové namáhání, tepelně izolačních vlastností, kdy musíme zamezit vzniku tepelných mostů, a akusticky izolačních vlastností, kdy je potřeba zamezit vzniku akustických mostů. Mezi nevýhody tohoto typu konstrukce patří nutnost přepravy dílců, která může být mnohdy velmi náročná, a menší tuhost ve spojích dílců. Právě přeprava vymezuje největší možné rozměry dílců. Naopak výhodou je v téměř neomezené škále variant dílců, které se liší tvarově i velikostí [15].

2.3. ZDĚNÉ KONSTRUKCE

Zděné konstrukce patří k nejstarším typům konstrukcí. Předcházelo jim používání kamene, ten byl však v některých oblastech nedostatečný, proto se přešlo k použití umělého staviva, kterým jsou například i cihly. Zdivo je tvořeno zdicím prvkem, spojovací hmotou (maltou), případně může být doplněna výztuží. Pro statickou stabilitu je nutná vazba jednotlivých zdicích prvků. Mezi hlavní výhody při stavbě zděných konstrukcí patří široké konstrukční uplatnění, relativně jednoduchý návrh, doba výstavby, příznivá cena, široký sortiment, tradice a zkušenosti, materiálová dostupnost, odolnost proti atmosférickým vlivům, minimální údržba, dobré tepelně izolační vlastnosti a v neposlední řadě tvarová variabilita [5] [6].

Zdicí prvky se dle ČSN EN 1996-1-1+A1 dělí na:

- pálené zdicí prvky (ČSN EN 771-1)
 - zdicí prvek vyrobený z jílu nebo z jiných hlinitých materiálů s příměsí písku, nebo bez něj, s případně přidanými přísadami, který je vypálen na dostatečně vysokou teplotu, aby bylo dosaženo keramické vazby,

- dělíme je na prvky P, které jsou určeny pro použití v chráněném zdivu, a prvky U, které jsou určeny pro použití v nechráněném zdivu [16],
- vápenopískové zdicí prvky (ČSN EN 771-2)
 - zdicí prvky zhotovené především z vápna a křemičitých materiálů, které tvrdnou vlivem vodní páry a vysokého tlaku [17],
- betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem (ČSN EN 771-3)
 - zdicí prvek složený z cementového pojiva, kameniva a vody s možností přidání příměsí, přísad a barvicích pigmentů, případně jiných hmot, které se přimíchávají během přípravy výrobní směsi, během výroby prvku, nebo po jeho zhotovení,
 - dělí se na zdicí prvky obyčejné, které jsou určeny pro uložení ve zdivu a jsou ze všech stran omítnuté, lícové, které jsou určeny pro uložení ve zdivu a jedna nebo více ploch zůstává neomítnutá, může být vystavena působení vnějšího prostředí, a lícové pro vnější stěny, které jsou vždy vystaveny působení vnějšího prostředí, nejsou omítnuté ani jinak chráněné [18],
- pórobetonové tvárnice (ČSN EN 771-4)
 - zdicí prvky složené z hydraulických pojiv (např. cement nebo vápno), která jsou smíchaná s jemnými silikátovými materiály, látkami vytvářejícími póry a vodou, následně jsou propařovány pod vysokým tlakem a teplotou v autoklávu [19],
- zdicí prvky z umělého kamene (ČSN EN 771-5)
 - zdicí prvky s nejméně jednou nechráněnou lícovou plochou, které mají uzavřenou strukturu, jsou vyrobeny z jedné nebo více homogenních směsí kameniva, cementového pojiva a jiných materiálů, jsou zpracovány s použitím tlaku a/nebo vibrace, případně může být použit jiný způsob zpracování, který je určen k napodobení přírodního kamene a použití jako jeho alternativa [20],
- zdicí prvky z přírodního kamene (ČSN EN 771-6) [21].

Tab. 1 Seznam zkoušených vlastností jednotlivých zdicích prvků dle [16] [17] [18] [19] [20] [21]

vlastnost/typ zdicího prvku	pálené zdicí prvky	vápenopískové zdicí prvky	betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem	pórobetonové tvárnice	zdicí prvky z umělého kamene	zdicí prvky z přírodního kamene
rozměry	X	X	X	X	X	X
rozměrové tolerance						X
tvárové uspořádání	X	X	X			X
rovinnost ložných ploch	X	X	X	X	X	
rovnoběžnost rovin ložných ploch	X	X	X	X	X	
rovinnost povrchů					X	
objemová hmotnost materiálu	X			X	X	
objemová hmotnost prvku	X			X	X	
objemová hmotnost		X	X			X
pevnost v tlaku	X	X	X	X	X	X
pevnost v ohybu						X
pevnost v tahu za ohybu			X	X		X
přidrženost ve smyku	X	X	X	X	X	X
otevřená pórovitost						X
nasákavost		X	X	X	X	X
odolnost proti zmrazování a rozmrazování		X				X
tepelné vlastnosti		X	X		X	X
tepelný odpor	x					
propustnost vodních par	X		X		X	X
reakce na oheň	X		X		X	X
vlhkostní přetvoření	X	X	X	X	X	
nebezpečné látky	X	X				

Spáry se dle umístění ve svislé konstrukci dělí na ložné a styčné. Ložné spáry se vždy vyplňují, styčné jsou buď vyplněné stejným materiálem jako spáry ložné, nebo se nahrazují systémem pero-drážka. Tloušťka ložné spáry má vliv na pevnost zdiva v tlaku. Pokud je to potřeba, je možné ložné spáry vyztužit. Skutečnost, zda je styčná spára promaltovaná či ne, má vliv na pevnost zdiva ve smyku [22] [23].

Pálené zdicí prvky se dělí dle funkce na:

- výrobky pro vnější zdivo (objemová hmotnost 600–900 kg/m³, součinitel tepelné vodivosti 0,06–0,17 W/(m·K), pevnost v tlaku 8–15 MPa),
- tvárnice pro vnitřní nosné stěny (objemová hmotnost 650–1000 kg/m³, součinitel tepelné vodivosti 0,10–0,28 W/(m·K), pevnost v tlaku 8–15 MPa),

- tvárnice pro vnitřní nenosné stěny (objemová hmotnost 650–800 kg/m³, součinitel tepelné vodivosti 0,12–0,30 W/(m·K), pevnost v tlaku 8–10 MPa),
- tvárnice pro akustické zdivo (objemová hmotnost 800–1100 kg/m³, součinitel tepelné vodivosti 0,20–0,35 W/(m·K), pevnost v tlaku 8–20 MPa) [7].

S ohledem na hmotnost a manipulovatelnost se jednotlivé zdicí prvky vyrábí v různých výškových a délkových modulech. Jejich používání vede ke sjednocení rozměrů stavebních prvků, aby bylo možné kombinovat různé prvky v rámci jedné konstrukce (zdivo, okna, dveře apod.). Zároveň se tím minimalizuje potřeba řezat zdicí prvky. Pro modulovou koordinaci se používá norma ČSN 73 0005 [24].

Rozměry se dělí na:

- koordinační – skutečný rozměr prvku se spárou,
- základní – rozměr prvku s nulovými odchylkami,
- skutečné – výrobní rozměr prvku [24].

V následující tabulce jsou uvedeny běžně používané rozměrové moduly pro jednotlivé materiály zdicích prvků. Prvky se vyrábí v různých délkách v závislosti na tloušťce tak, aby byla respektována mezní hmotnost prvku (obvykle do 20 kg) kvůli manipulovatelnosti prvku.

Tab. 2 Výškové a délkové moduly vnitřních nenosných zdicích prvků dle materiálu

materiál	moduly výška x délka [mm]
keramika	250x375
	250x500
	250x333
	250x250
pórobeton	250x500
	250x600
	200x500
vápenopísek	200x333
beton	250x500
beton s pórovitým kamenivem	250x375

2.3.1. Spojovací hmoty

Spojovací hmoty se dělí dle materiálu a použití na malty, lepidla a pěny. Jejich funkce po vytvrdnutí jsou spojení zdicích prvků do celku, přenos zatížení mezi vrstvami, vyrovnání místních rozdílů zatížení, roznos soustředných tlaků, zamezení přístupu atmosférických vlivů do konstrukce, zabránění větrání, zlepšení nepropustnosti, zvukotěsnosti a tepelně izolačních vlastností [22] [23] [25].

Malta lze definovat jako směs pojiva (vzdušné či hydraulické vápno nebo cement), plniva (písek, struska, škvára, popílek) a vody. Malta se dle složení a použití dělí na obyčejnou, pro tenké spáry a lehkou. Požadavky na malty jsou uvedeny v ČSN EN 998-2 [22] [23] [25].

Zdění lepidlem je modernější způsob. Jedná se o tenkovrstvé lepidlo, proto je také úspornější. Zdění na pěnu je časově méně náročné. Je možné ji použít do -5 °C. Není potřeba nic míchat, jelikož je v nádobě připravená přímo k použití [26].

3. LEHKÉ BETONY

ČSN EN 206+A2 definuje lehký beton jako beton, který má po vysušení s sušárně objemovou hmotnost větší než 800 kg/m^3 a zároveň menší než 2000 kg/m^3 . Většina surovin, které vstupují do výroby obyčejných betonů, má objemovou hmotnost nad 2000 kg/m^3 , proto je potřeba pro dosažení nízké objemové hmotnosti vylehčení materiálu. Pro vylehčování betonů existuje více způsobů vylehčení. Dle způsobu vylehčení dělíme lehké betony na:

- mezerovitý beton, který se vylehčuje pomocí vzduchových mezer ve struktuře betonu,
- beton s pórovitým kamenivem, což je nepřímý způsob vylehčování,
- pórobeton, kdy se jedná o přímý způsob vylehčování tím, že se vytvoří póry přímo v materiálu betonu,
- pěnobeton, kdy jde o vylehčení pomocí pěny.

Zároveň je možné tyto způsoby vylehčování kombinovat (např. liaporbeton, který kombinuje mezerovitý beton s vylehčením pórovitým kamenivem), čímž lze dosáhnout jedinečných vlastností [27] [28] [29].

3.1. MEZEROVITÝ BETON

Mezerovitý beton je kompozitní materiál vyrobený ze stejnozrnného betonu s velkým objemem mezer, tvoří ho frakce hrubého kameniva, drobného kameniva, cement, voda a v případě potřeby přísady. Jeho kostra je tvořena frakcemi hrubého a drobného kameniva, zatímco cement (pojivo), voda a přísady vytváří maltu, která obalí a spojí jednotlivá zrna kostry z hrubého kameniva. Vylehčení betonu se dosáhne vynecháním drobné frakce kameniva a zároveň snížením obsahu cementového tmelu. Hrubá zrna kameniva se obalí tenkou vrstvou cementové malty, čímž se zrna spojí pouze v místě dotyku [28] [30].



Obr. 3 Mezerovitý beton [31]

Díky svým drenážním vlastnostem se mezerovitý beton používá především jako podkladní vrstva vozovek. Na druhou stranu nemůže mezerovitý beton poskytnout dostatečnou ochranu výztuže před korozí, proto by se neměly

vyztužovat. Pro výrobu mezerovitého betonu lze použít cement CEM I 32,5 nebo CEM I 42,5. Je doporučeno použít plastifikační a provzdušňovací přísady. Na mezerovitý beton používaný jako podkladní vrstva jsou kladeny požadavky v oblasti pevnosti v tlaku na krychli o hraně 150 mm, kde musí splňovat min. hodnotu 8 MPa, dále pak objem mezer, který se má pohybovat mezi 20 a 25 %. Objem mezer se stanovuje na ztvrdlém vzorku, který se ponechá ve formě 150x150x150 mm, na něj se nalije voda tak, aby zaplnila formu po okraj. Objem vody nalité do formy se vzorkem se rovná objemu mezer [28] [30].

3.2. BETON S PÓROVITÝM KAMENIVEM

Cementový tmel může mezery mezi zrny kameniva zcela vyplnit, čímž vznikne hutný beton z pórovitého kameniva, nebo může cementový tmel zrna kameniva spojit pouze bodově, tím dostaneme mezerovitý beton z pórovitého kameniva [28].

Výroba těchto betonů probíhá obdobně jako u obyčejného betonu s tím rozdílem, že kamenivo má v tomto případě vysokou nasákavost, čímž odebírá záměsovou vodu určenou pro hydrataci cementu. Tím dojde ke zhoršení zpracovatelnosti a čerpatelnosti betonové směsi. Doporučuje se proto kamenivo předem namočit. Nízká objemová hmotnost kameniva může vést k vyplavení kameniva a tím k rozmísení betonové směsi. Dále pak jsou znemožněny některé způsoby zhutnění, např. pěchování nebo dusání, jelikož by z důvodu nízké pevnosti kameniva mohlo těmito způsoby hutnění dojít k jeho poškození [28].

3.2.1. Pórovité kamenivo

Pórovité kamenivo je zrnitý materiál nerostného původu, které má objemovou hmotnost do 2000 kg/m³ nebo sypanou hmotnost do 1200 kg/m³. Pórovité kamenivo se používá mimo jiné pro výrobu lehkých betonů s pórovitým kamenivem, což je nepřímý způsob vylehčování. Dle původu se pórovité kamenivo dělí na anorganické kamenivo a organické kamenivo. Obě skupiny se dále dělí na přírodní a umělé. Pórovité kamenivo se řídí normou ČSN EN 13055, kde jsou uvedené normy pro zkoušení jednotlivých vlastností lehkého kameniva [29] [32].

Tab. 3 Dělení pórovitého kameniva dle původu [29]

anorganické kamenivo	přírodní		vulkanické tufy tufity přírodní pemza vápenný tuf spongility diatomity
	umělé	průmyslové odpady	škvára popílek cihelná drť odpadní pěnová skla
		odpady upravené	zpěněná struska popílkový agloporit
		vlastní umělé kamenivo	cihloporit kavitit keramzit vermikulit perlit experlit
organické výplně	přírodní		piliny pazdeří sláma
	umělé		pěnový polystyren

3.3. PÓROBETON

Pórobeton je materiál vyrobený z hydraulických pojiv (např. cement nebo vápno), která jsou smíchaná s jemnými silikátovými materiály, látkami vytvářejícími póry, vodou a jsou následně propařovány pod vysokým tlakem a teplotou v autoklávu [19].

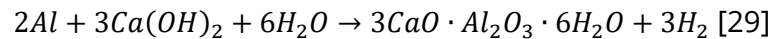


Obr. 4 Pórobetonové tvárnice [33]

Mezi základní složky pórobetonu patří:

- maltoviny: vápno, cement,
- křemičité složky: písek, popílek,
- plynotvorné látky: hliníkový prášek,
- pomocné suroviny: sádra, sádrovec, klíč, mazlavé mýdlo, vodní sklo, CaCl_2 [29].

Hliník se přidává se formě prášku nebo pasty, má kypřicí účinek, jelikož při jeho reakci s Ca(OH)_2 dochází k uvolňování vodíku:



Výroba pórobetonu probíhá obecně tak, že se nejprve pomelou křemičité látky, k nimž se přidají maltovinové složky. V případě suchého mletí se maltovinové složky přidávají už do mlýna, aby došlo k lepší homogenizaci. Poté se surovinová směs míchá s vodou v míchačkách, dokud nedostaneme tekutou kaši, která se následně nalije do forem, kde dojde k nakypření a zatuhnutí. Zatuhlá směs se nařeže a vytvrdí v autoklávu [29].

Výztuž v pórobetonu podléhá korozi snadněji než v obyčejném betonu z důvodu vysoké pórovitosti betonu, jeho snížené alkality, vyšší vlhkosti a střídání vlhkosti a vyššímu obsahu rozpustných solí. Proto je nutné přistoupit k ochraně výztuže, která může být přímá (ochranné povlaky výztuže) nebo nepřímá (inhibitory koroze, povrchová úprava pórobetonu) [29].

Při autoklávování pórobetonu dochází k hydrotermální reakci, jejíž podmínky jsou:

- nasycená vodní pára,
- teplota 174–193 °C,
- tlak 0,8 – 1,2 MPa [29].

Existuje více technologií výroby, které se liší použitými surovinami, způsobem mletí, řezáním a autoklávováním. Jedná se o technologie UNIPOL, SIPOREX, CALSILOX, YTONG a HEBEL [29].

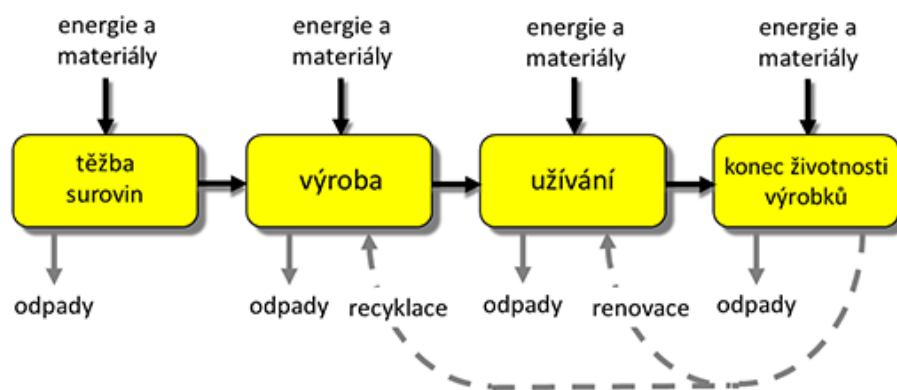
3.4. PĚNOBETON

Pěnobeton se vyznačuje dutou strukturou, která je tvořena velkým množstvím uměle vytvořených dutin, které jsou rovnoměrně rozložené v materiálu. Jeho složky jsou cement, voda, pěnotvorná nebo plynotvorná činidla, lze přidat jemné kamenivo a přísady. Pěnobeton musí splňovat následující požadavky:

- objemová hmotnost po čerpání $640 \pm 50 \text{ kg/m}^3$,
- objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu $490 \pm 40 \text{ kg/m}^3$,
- pevnost v tlaku po 28 dnech alespoň 1,4 MPa,
- pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech alespoň 0,17 MPa,
- nasákavost do 25 %,
- ztráta plynu po čerpání do 4,5 % [34].

4. ŽIVOTNÍ CYKLUS PRODUKTU

Nástrojem pro posuzování produktů z hlediska dopadu na životní prostředí je LCA (Life Cycle Assessment). Jedná se o analytickou metodu sloužící k hodnocení environmentálních dopadů výrobků, služeb a technologií během celého životního cyklu. Hodnocení probíhá podle posouzení vlivu materiálových a energetických toků, které jsou vyměňovány mezi daným produktovým systémem a životním prostředím. LCA metoda neposuzuje reálné, nýbrž potenciální dopady produktu na životní prostředí a nejsou zde hodnocena rizika. Tento způsob hodnocení se neustále vyvíjí. Je možné využít celou řadu databází a softwarů [35].

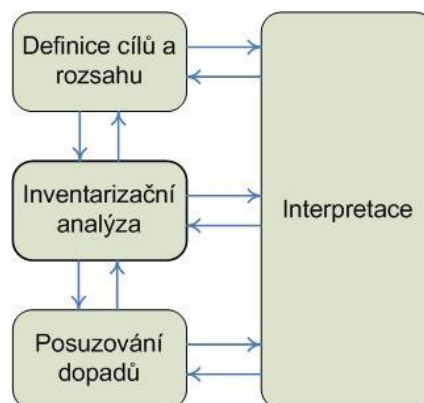


Obr. 5 Životní cyklus výrobku [36]

Životní cyklus produktu lze rozdělit do několika fází:

- získávání obnovitelných a neobnovitelných surovin a energetických zdrojů z prostředí,
- výroba potřebných materiálů a výroba produktů,
- využívání produktu spotřebitelem,
- odstranění produktu [35].

LCA má 4 fáze – definice cílů a rozsahu, inventarizační analýza, posuzování dopadů a interpretace. Jednotlivé fáze jsou mezi sebou provázané a reagují na poznatky z ostatních fází [35] [37].



Obr. 6 Schéma fází LCA [38]

Podle posuzovaného období životního cyklu produktu se LCA dělí na:

- od kolébky do hrobu (cradle-to-grave) – hodnotí všechny fáze životního cyklu počínaje těžbou surovin a likvidací konče,
- od kolébky po bránu (cradle-to-gate) – jde o hodnocení od těžby surovin po moment, kdy výrobek opustí továrnu, tedy před transportem ke spotřebiteli, toto hodnocení se používá k environmentálnímu prohlášení o produktu (EDP), jsou zde vyloučeny fáze užívání a odstranění,
- od kolébky ke kolébce (cradle-to-cradle nebo také open loop production) – jedná se o výrobu v otevřené smyčce, tento typ posouzení je používán, pokud na konci životnosti produktu dochází k recyklaci, díky které vznikají nové výrobky,
- od brány po bránu (gate-to-gate) – sleduje pouze jeden proces s přidanou hodnotou v celém výrobním řetězci, tyto typy posouzení mohou být v dalším kroku propojeny ve výrobním řetězci, a vytvoří tak kompletní vyhodnocení typu od kolébky po bránu,
- od zdroje po kola (well-to-wheel) – při přepravě pohonných hmot a vozidel, bývá používáno k posouzení celkové spotřeby energie nebo účinnosti přeměny energie [35] [39].

Výhodou metod je, že jsou velmi komplexní, na druhou stranu jsou díky tomu také velmi pracné a finančně náročné, jelikož je potřeba posbírat velké množství dat. Nevýhodou je geografické omezení studií, jelikož v různých oblastech mohou být výrazné místní odlišnosti (např. energetický mix, tj. poměr mezi primárními a sekundárními zdroji použitými pro výrobu elektrické energie). Dále není vždy možné studii vypracovat/prezentovat, jelikož některá data si výrobci, případně jejich dodavatelé velmi střeží [35].

Dalším úskalím je technické pochopení všech technologií, které vstupují do LCA. Je nutné, aby zpracovatel studií měl chemicko-technologické vzdělání, ani tak není zcela možné obsáhnout každou oblast [35].

Hranice systému slouží k určení procesů, které vstupují do posuzování životního cyklu produktu. Proces je operace, kdy dochází k přeměně vstupů na výstupy. Procesy podílející se na jednotlivých fázích životního cyklu produktu vytváří jeden celek, který se nazývá produktový systém. Stanovené hranice systému mají vliv na náročnost a výsledky studie [35].

Tab. 4 Modulové informace pro různé fáze posuzování budovy dle [40]

INFORMACE Z POSUZOVÁNÍ BUDOVY														
informace o životním cyklu													doplňující informace nad rámec životního cyklu	
výrobní fáze			fáze výstavby		fáze užívání					fáze konce životního cyklu				přínosy a náklady za hranicemi systému
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
dodání nerostných surovin	doprava	výroba	doprava	procesy výstavby – instalace	užívání	údržba	oprava	výměna	rekonstrukce	demolice/dekonstrukce	doprava	zpracování odpadu	odstranění	potenciál opětovného použití, využití a recyklace
					B6	provozní spotřeba energie								
					B7	provozní spotřeba vody								

4.1. ENVIRONMENTÁLNÍ PROHLÁŠENÍ O PRODUKTU (EPD)

Environmentální prohlášení o produktu slouží jako prohlášení o vlastnostech výrobku pro zákazníka. Jsou zde uvedeny dopady výrobku na životní prostředí, nejde ale o označení produktu za šetrný k životnímu prostředí, zákazník však může na základě informací zde uvedených porovnat výrobky podle ekologického hlediska [41].

Jde o soubor měřitelných informací o vlivu daného výrobku na životní prostředí v průběhu jeho celého životního cyklu. Informace zde použité musí být ověřeny třetí stranou. Prohlášení má být veřejně přístupné a údaje v něm ověřitelné. Tvorba EPD probíhá na základě ČSN ISO 14025 a je založena na metodice LCA [41] [42].

Celkovým cílem tohoto prohlášení je objektivní porovnání výrobků na základě jejich environmentálních vlastností a tím zvýšit nabídku a poptávku produktů, které vyvolávají menší tlak na životní prostředí, cestou sdělování ověřitelných, přesných a nezavádějících informací [42] [43].

Mezi jednotlivé cíle EPD patří:

- poskytnutí informací založených na LCA a doplňkových informací o environmentální stránce produktu,
- srovnání produktů dle doložených informací,
- zlepšovat environmentální stránku produktů,
- poskytování informací pro posouzení environmentálních dopadů produktů během jejich životního cyklu [43].

Dále je zde norma ČSN EN 15804, která doplňuje již zmíněnou normu ČSN ISO 14025. V této doplňující normě jsou definovány základní postupy při tvorbě EPD v oblasti stavebních výrobků. Zpracování EPD je založeno na:

- zpracování podrobných schémat výroby,
- definici jednotkových procesů na potřebných úrovních,
- definici deklarované/funkční jednotky produktu,
- definici míst v jednotkových procesech, kde lze získat data (sledování vstupů/výstupů),
- dokumentování cesty ke všem použitým datům [42].

Posuzování dopadů probíhá v následujících kategoriích vč. jednotek:

- úbytek zdrojů surovin (fosilních) [MJ], výhřevnost],
- úbytek zdrojů surovin (prvků) [kg Sb ekv.],
- acidifikace půdy a vody [kg SO₂ ekv.],
- úbytek ozonu [kg CFC 11 ekv.],
- globální oteplování [kg CO₂ ekv.],
- eutrofizace [kg (PO₄)³⁻ ekv.],
- tvorba fotochemického ozonu [kg Ethene ekv.] [44].

4.2. VYUŽITÍ DRUHOTNÝCH SUROVIN VE STAVEBNICTVÍ

Primární surovina je přírodní látka anorganického nebo organického původu, která je určena k dalšímu použití. Druhotnou surovinou rozumíme movitou věc, která vznikla při výrobě, primárním cílem není výroba či získání této věci, avšak nejedná se o odpad, jelikož je zajištěno její další využití. Kvůli výraznému ekonomickému rozvoji roste objem odpadů a druhotných surovin, což je problém hlavně v oblasti ochrany životního prostředí. Druhotné suroviny a recykláty se v dnešní době využívají jako částečná či úplná substituce běžně používaných materiálů v oblasti stavebnictví, výrazné je jejich použití v dopravním stavitelství. Díky snižování ekologické zátěže a snížení nákladů na výrobu jsou vítanou možností [45] [46] [47].

Náhrada primárních zdrojů surovin druhotnými surovinami a vedlejšími produkty vede ke snížení ekologické zátěže. Sníží se tím i nutnost dovozu surovin, což vede ke snížení nákladů na dopravu a ke zkrácení výrobního řetězce. Ve stavebnictví by například snížení používání cementu značně snížilo uhlíkové emise spojené s jeho výrobou. Využití odpadních materiálů navíc vede k omezování skládek, což šetří místo, peníze i životní prostředí. K dosažení tohoto je ale potřeba většího propojení jednotlivých odvětví [48].

Při rozhodování, jak naložit s odpadem, bychom se měli řídit dle hierarchie nakládání s odpady:

1. předcházení vzniku odpadu,
2. příprava k opětovnému použití,
3. recyklace,
4. jiné využití, např. energetické,
5. odstranění [49].

4.3. STAVEBNÍ ODPAD

Stavební odpad má velký podíl na celkovém objemu odpadů. Životní prostředí je zatěžováno stavebnictvím ve více oblastech, a to:

- výroba stavebních hmot – náročnost na spotřebu energie a těžbu surovin,
- dopravní náročnost – výrazná hmotnost přepravovaných materiálů i celých staveb,
- z lokálního a krátkodobého hlediska vlastní staveniště – zejména hluchost, prašnost, stavební odpady,
- z dlouhodobého hlediska užívání stavby – energeticky náročné vytápění [47].

Na druhou stranu ale stavebnictví životnímu prostředí částečně odlehčuje tím, že spotřebovává průmyslové a stavební odpady tak, že jimi nahradí primární suroviny. Touto cestou se snižuje potřebné množství primárních surovin. Dále využití stavebních odpadů snižuje zaplněnost skládek, které jsou určeny hlavně pro nevyužitelné odpady, obzvláště komunální odpad [47].

Stavební odpad se dle původu a složení dělí na:

- výkopovou zeminu (nepojenou zeminu),
- materiál z demolic vozovek (materiál z dopravních ploch bez zeminy, převážně asfalty a živice),
- demoliční stavební minerální suť,
- odpady ze stavenišť [47].

Využití stavebního a demoličního odpadu má řadu výhod. Kromě již zmíněného předcházení skládkování, šetření primárních zdrojů surovin a ochrany životního prostředí je to dále plné využití materiálového potenciálu výrobku a šetření energie potřebné pro získání nových surovin [50].

Mezi nejčastější materiály tvořené stavebním a demoličním odpadem patří beton, asfalt, cihelný střep, sádra, dřevo, sklo, ocel, kovy, plasty a další materiály, které je možné recyklovat [50].

4.3.1. Staveništní odpad

Výrazné množství odpadů vzniká přímo na staveništi. Zdroje odpadních stavebních materiálů dělíme na 3 kategorie:

- poškozené a zničené materiály,
- nadbytečný materiál, který byl dovezen na staveniště, jeho opětovné zpracování se však nevyplatí,
- meziprodukty a polotovary, které se ztratily při zpracování [47].

4.4. RECYKLACE

Pojem recyklace značí znovuvyužití, znovuuvedení do cyklu. Kvalita recyklátu závisí na kvalitě demoličních prací a na kvalitě třídění materiálů z demolice v místě vzniku. Pokud je to možné, ideální je zachování a znovupoužití celých stavebních dílců a prvků. To však ve většině případů není možné, je ale nutné důkladné třídění, aby mohl být demoliční odpad dále využit. Třídění přímo na stavbě je daleko efektivnější a levnější než třídění až v místě recyklace. To je způsobeno tím, že při demolici je oddělení cizorodých látek z minerální suti jednodušší než v případě netříděné suti vzniklé při neohleduplné demolici [47].

4.4.1. Omezení recyklace odpadů

Existuje několik faktorů, které recyklaci do jisté míry omezují, nebo ji dokonce přímo znemožňují. Tyto faktory dělíme na:

- materiálové
 - vychází ze zákona o zachování hmotnosti a energie, který říká, že úplný a uzavřený koloběh látek a energie není možný, jelikož dochází ke ztrátám energie,
 - k dosažení technických parametrů musí být obvykle použita část primárních surovin,
 - cizorodé látky v odpadech mohou mít vliv na budoucí využití,
- technické
 - jsou dány poznatky o schopnosti zpracování odpadů, nedostatkem zpracovatelských a úpravárenských zařízení nebo neznalostí efektivního způsobu přeměny odpadu na surovinu,
- ekonomické
 - cena má výrazný vliv na rozhodování o recyklaci,
 - na cenu má vliv stálý odbyt, proto je nutné zajistit stálou dodávku pro odběratele,
- ekologické
 - recyklaci je účelné využít za předpokladu, že je méně škodlivá než výroba a odstraňování odpadu,
- legislativní
 - je dáno zákony a vyhláškami,

- organizační
 - recyklace není organizována na úrovni státu, je tedy závislá na dohodě mezi jednotlivými zúčastněnými subjekty,
- psychologické
 - je nutná osvěta, že výrobky z odpadů mohou dosahovat stejné kvality jako ty z primárních surovin [45].

4.4.2. Cihelný recyklát

Cihelný recyklát můžeme získat recyklováním cihelného zlomu z výroby (zdicích či stropních prvků nebo střešních dílců), nebo zdiva z demolice. V druhém případě se tedy nejedná o čistě keramické zdicí prvky, ale recyklát obsahuje i další materiály, např. maltu, omítku nebo v případě zateplení zdiva izolaci. V současné době se recyklované keramické zdicí prvky používají převážně jako kamenivo pro násypy a obsypy inženýrských sítí a jako zásypový materiál pro stabilizaci podkladů u nestmelených vrstev vozovek. Lze je ale také použít jako podklad příjezdových cest, příměs do betonu, zásyp pro zemní práce nebo v případě frakce 0–4 mm jako příměs do zdicí malty. Tato malta se vyznačuje lepšími tepelně izolačními vlastnostmi oproti maltě, do které použijeme přírodní kamenivo [3] [50] [51].

Výroba kameniva z cihlové suti probíhá ve třech stupních:

1. první třídění – dochází k oddělení nežádoucích materiálů, které mohou být v cihlové suti obsaženy, např. železo, dřevo, trubky,
2. drcení – je realizováno v drtičích čelistových či odrazových,
3. třídění dle frakcí – příliš velké frakce jsou vráceny do druhého kroku, pro cihelný recyklát se používají frakce 0–8 mm, 8–32 mm a 32–85 mm [3].



Obr. 7 Hrubý recyklát ze staveništního odpadu [52]

Vlastnosti cihelného recyklátu jsou velmi závislé na surovinách, které byly použity při výrobě recyklátu, obecně se ale vyznačuje malou odolností proti otluku, je proto nevhodný do konstrukčních vrstev, a nasákavostí cihel, která s sebou nese výrazné riziko roztrhání mrazem. Na druhou stranu je zde velká výhoda v podobě příznivější ceny oproti přírodnímu a umělému kamenivu [3].

Pokud se cihelný recyklát použije jako náhrada kameniva, sledují se u něj vlastnosti jako u pórovitého kameniva dle ČSN EN 13055, a to:

- nasákavost,
- objemová hmotnost,
- sypná hmotnost volně sypaná,
- sypná hmotnost v setřeseném stavu,
- frakce,
- odpor při stlačování,
- stlačitelnost a pevnost v tlaku,
- tepelná vodivost [32].

V případě použití pro výrobu konstrukčních prvků je nutné sledovat kvalitu, na kterou může mít vliv např. druhová různorodost, rozdíl v granulometrii, znečištění atd. Tyto vlivy mají mít dopad na velkou proměnlivost vlastností recyklátu. Proto jsou kladeny specifické požadavky na přípravu směsí, vytváření prvků a ošetřování. Nejdůležitějším požadavkem je nenarušení procesu tvrdnutí pojiva, abychom dostali dostatečně kvalitní konstrukční prvky. Z tohoto důvodu je potřeba se věnovat výběru nevhodných částí zdiva, např. z komínů, napadené houbami či plísnění atd [53].

Cihelný recyklát je možné použít pro výrobu cihlobetonu. Recyklované cihelné kamenivo je nejslabším článkem cihlobetonu. Na jeho vlastnosti má vliv objemová hmotnost drcených cihel, podíl malty a granulometrie. Lze pozorovat lineární závislost mezi množstvím použitého cihelného recyklátu a absorpcí vody, pevností v tlaku, pevností v tahu za ohybu a statickým modulem pružnosti. Nasákavost má značný vliv na zpracovatelnost čerstvé směsi, je tedy nutné cihelný recyklát nejdříve namočit nebo zvolit vysoký vodní součinitel (až okolo 1). Plná náhrada kameniva cihelným recyklátem vede ke značnému snížení mrazu-vzdornosti. Vhodná je proto částečná náhrada kameniva cihelným recyklátem. Optimální náhrada je 10 %, jelikož vede ke zlepšení pevností, ale nedojde k výraznějšímu zhoršení zpracovatelnosti. I tak je lepší použít superplastifikační přísadu pro snížení vlivu cihelného recyklátu na zpracovatelnost. Takto lze dosáhnout pevností až 40 MPa a více [53] [54] [55].

PRAKTICKÁ ČÁST

5. CÍL

Práce má za cíl navrhnout nový keramický zdicí systém pro jednoduchou výstavbu vnitřních nenosných dělicích konstrukcí se zaměřením na příčky. Bude se zabývat návrhem zdicích prvků pro jednoduchou a přesnou výstavbu s možností zdění tzv. suchým způsobem (buď na lepidlo pro tenké spáry, nebo na zdicí PUR pěnu). Součástí práce bude také návrh systému zdění z těchto prvků včetně návrhu finálních úprav povrchu konstrukce. Systém vyvinutý v rámci diplomové práce by měl umožnit snadnou a efektivní výstavbu s minimalizací mokrých procesů. Dále by pak výsledná konstrukce měla vykazovat srovnatelné vlastnosti jako ostatní typy zděných konstrukcí běžně využívané pro výstavbu v ČR, měla by umožnit jednoduché provádění rozvodů a instalací a jednotlivé zdicí prvky by měly být snadno dělitelné.

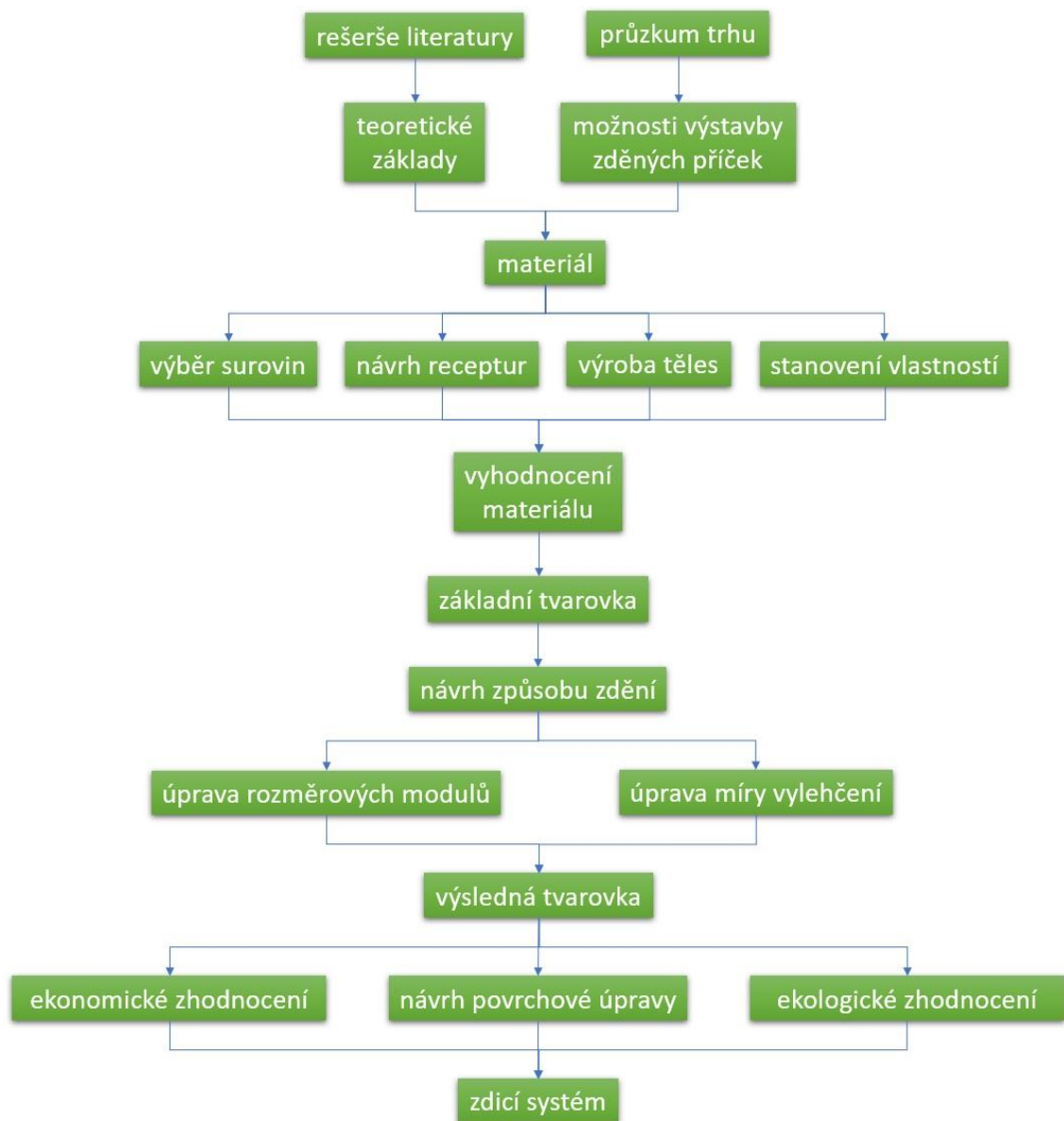
V rámci diplomové práce bude provedeno ekonomické zhodnocení navrženého zdicího systému a zhodnocení z pohledu dopadu tohoto zdicího systému na životní prostředí.

6. METODIKA

Teoretická část diplomové práce se věnuje rešerši literatury v oblasti svislých konstrukcí, využití druhotných surovin ve stavebnictví, lehkým betonům a hodnocení produktu z pohledu dopadu na životní prostředí.

V praktické části naváže průzkum trhu, který má za cíl uvést způsoby výstavby zděných příček. Po provedení tohoto průzkumu trhu budou vyhodnoceny způsoby zdění příček.

Z rešerše literatury a průzkumu trhu vyplynou trendy v oblasti výstavby příček. V návaznosti na to bude navržena nová možnost výstavby příček, která má za cíl zjednodušit tuto výstavbu a přitom se vyrovnat výrobkům na trhu z hlediska tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností. V případě příznivých výsledků bude tato možnost dále rozvíjena a vylepšována, aby konvergovala k optimálnímu výsledku. Na závěr bude provedeno zhodnocení navrženého zdicího systému jak ekonomické, tak z pohledu dopadu na životní prostředí.



Obr. 8 Vývojový diagram metodiky

6.1. PRŮZKUM TRHU V OBLASTI ZDĚNÝCH PŘÍČEK

Cílem bylo najít možnosti výstavby zděných příček z evropského trhu se zaměřením na keramické zdicí prvky, pórobetonové tvárnice, vápenopískové zdicí prvky a betonové tvárnice s pórovitým kamenivem. Jmenovitě se jedná o výrobce:

- Wienerberger [56],
- Heluz [57],
- Leier [58],
- Schlagmann Poroton [59],
- Pezinské tehelne [60],
- Britterm [61],
- Thermopor [62],
- Danesi [63],
- Fornaci DCB [64],
- LEIPFINGER-BADER [65],
- T2D [66],
- Erbersdobler [67],
- Grupo Díaz Redondo [68],
- Decorus ITALY [69],
- Porfix [70],
- Xella [71] [72],
- Liapor [73].

U jednotlivých zdicích prvků byly hledány rozměry, tloušťka ložné spáry, pevnost v tlaku, součinitel tepelné vodivosti (který byl dále přepočítán na základě tloušťky prvku na součinitel prostupu tepla), vzduchová neprůzvučnost, objemová a plošná hmotnost, charakteristika prvku, zda se jedná o broušený prvek a vyplnění izolantem nebo maltou/betonem.

Požadavky na dělicí zdivo jsou popsány ve vyhlášce č. 268/2009 Sb., která dále odkazuje na normové požadavky. V oblasti akustiky je požadavek alespoň 43 dB (požadavek 40 dB pro všechny ostatní obytné místnosti téhož bytu, korekce na vedlejší cesty 2 dB pro těžké dělicí stěny a 1 dB rezerva, např. kvůli zaokrouhlování), tento požadavek nesplňuje většina výrobků z pórobetonu a některé výrobky z keramiky s příliš nízkou tloušťkou. Co se týká součinitele prostupu tepla, je zde dána hraniční hodnota $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pro vnitřní stěny mezi prostory s rozdílem teplot do $5 \text{ }^\circ\text{C}$ včetně. Tu splňují téměř všechny výrobky kromě 4 keramických prvků určených pro vyplnění betonem nebo maltou, které se používají jako akustické zdivo, mají proto vyšší objemovou hmotnost, která dává dobré hodnoty vzduchové neprůzvučnosti, ale zvyšuje součinitel prostupu tepla nad přípustnou hodnotu. Minimální hodnoty pevnosti v tlaku jsou 5 MPa pro vápenopískové zdící prvky a 1,5 MPa pro pórobetonové tvárnice, těmto požadavkům vyhovují všechny zdící prvky, pro ostatní materiály není pevnost definována [8] [9] [10] [17] [19].

Tabulky hodnot pro vyhodnocení průzkumu trhu jsou uvedeny v příloze 1 Průzkum trhu.

Z provedeného průzkumu trhu vzešly cesty, kterými se ubírá výroba zděných příček z výše uvedených materiálů. Jedná se o následující typy výrobků:

1) **maloformátové zdící prvky s nízkou mírou vylehčení**

- řada Mattone firmy Danesi nebo prvek Schallschutzziegel Rd. 1,8 od firmy LEIPFINGER-BADER
- tento typ zdiva se hodí při použití jako akustické zdivo kvůli vyšší objemové a plošné hmotnosti, není proto vhodné pro oddělení prostor s vyššími rozdíly teplot

2) **příčně děrované zdící prvky**

- např. výrobky firem Wienerberger, Heluz, Leier, Schlagmann Poroton
- jedná se o nejpoužívanější výrobek
- dobré vlastnosti ve všech oblastech: pevnost, tepelná izolace, akustická izolace

3) **podélně děrované zdící prvky**

- některé výrobky firem Danesi, Fornaci DCB, T2D a Grupo Díaz Redondo
- vhodné pro oblasti se zvýšenou seismickou aktivitou z důvodu prostorové tuhosti

4) **keramické tvarovky pro ztracené bednění**

- řada THERMOPOR PFz firmy Thermopor, tvárnice pro akustické zdivo firmy Grupo Días Redondo a další
- díky vyplnění maltou/betonem dosahuje vyšších pevností a má dobré akusticky izolační vlastnosti, na druhou stranu jde však o špatné tepelné izolanty

5) **nepálené keramické zdicí prvky**

- výrobek Heluz NATURE Energy 12/25
- výrobek z přírodního materiálu s vysokou tepelnou akumulací
- nutnost chránit proti vodě

6) **pórobetonové tvárnice a panely**

- výrobky firem Porfix a Xella (Ytong a Hebel)
- snadná výstavba z důvodu nízké hmotnosti prvků
- dobré tepelně izolační vlastnosti, špatné akusticky izolační vlastnosti

7) **vápenopískové zdicí prvky**

- výrobky Silka firmy Xella
- vysoká pevnost a tepelná akumulace, vhodné pro akustické zdivo

8) **betonové tvárnice s pórovitým kamenivem**

- výrobky firmy Liapor
- dobré tepelně izolační vlastnosti, výrobky AKU dobré zvukově izolační vlastnosti, snadná manipulovatelnost

Na základě provedeného průzkumu trhu a požadavků vyhlášky č. 268/2009 Sb. byly stanoveny požadavky na nový zdicí systém vyvíjený v rámci této práce:

- pevnost v tlaku by měla dosahovat hodnoty min. 2 MPa,
- součinitel tepelné vodivosti ve vysušeném stavu max. 0,35 W/(m·K),
- součinitel prostupu tepla max. 1,8 W/(m²·K),
- vzduchová neprůzvučnost by měla být alespoň 43 dB,
- hmotnost jedné tvarovky nejvýše 21,0 kg.

6.2. NÁVRH VSTUPNÍCH SUROVIN

Dle rešerše a průzkumu trhu byl vybrán cihelný recyklát jako náhrada kameniva v betonu. Jako pojivo byl zvolen portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý. Dále byla použita superplastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035.

6.2.1. Cement CEM I 42,5 R Mokrý

Portlandský slínek tvoří hlavní složku tohoto cementu, doplňující složky se v něm vyskytují v množství maximálně 5 %. Charakteristické vlastnosti tohoto cementu jsou rychlý nárůst pevností, vysoká počáteční i konečná pevnost, rychlý vývin hydratačního tepla a vyšší celkové hydratační teplo. Dle výrobce jej lze použít pro výrobu betonů běžných i vyšších pevnostních tříd, betony s rychlým nárůstem pevností, betony předpínané, suché omítkové směsi a malty atd. Další informace o tomto cementu jsou uvedeny v příloze 2 Technický list portlandského cementu CEM I 42,5 R [74].

6.2.2. Superplastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035

Jedná se o univerzální a vysoce účinnou superplastifikační přísadu na bázi polykarboxylátů. Je vhodná především pro výrobu transportbetonu. Vyznačuje se rychlou adsorpcí na povrch cementových zrn. Kombinuje sterický a elektrostatický způsob. Díky této superplastifikační přísadě lze dosáhnout požadované konzistence betonu i s nízkým vodním součinitelem, což vede ke zvýšení jeho soudržnosti, hutnosti, snížení nasákavosti a dosažení vyšších pevností, a účinného ztekucení betonu, což umožňuje jeho snadnou pokládku. Tento výrobek neobsahuje chloridy ani jiné látky podporující korozi výztuže, je tedy vhodný pro výrobu betonu vyztuženého a předpjatého. Více informací se nachází v příloze 3 Prohlášení o vlastnostech superplastifikační přísady Sika ViscoCrete 1035 [75].

6.2.3. Cihelný recyklát

Pro výrobu mezerovitého cihlobetonu byl použit tepelně izolační zdicí prvek Porotherm T od firmy Wienerberger. Tento zdicí prvek je vyplněn minerální vatou.

Pro získání cihelného recyklátu byla postavena stěna z tohoto zdicího prvku, která byla následně zbourána. Cihelné kusy byly podrceny v čelistovém drtiči, poté byly síty rozděleny do frakcí 1–2 mm, 2–4 mm a 4–8 mm. Kromě čistého keramického materiálu obsahuje dodaný vzorek i již zmíněnou minerální vatu a maltu pro tenké spáry Porotherm Profi.



Obr. 9 Fotografie cihelného recyklátu frakce 1-2 mm, 2-4 mm a 4-8 mm

6.3. RECEPTURY

V rámci diplomové práce byl návrh receptur rozdělen do 3 částí, kdy byly nejprve zjišťovány sypané hmotnosti výše uvedených frakcí a jejich směsí, poté byly navrženy a zkoušeny obecné receptury pro odladění množství pojiva a poměru frakcí cihelného recyklátu. Na tělesech z těchto receptur byla zkoušena pevnost v tlaku a v tahu za ohybu. Na základě poznatků při míchání těchto receptur a zkoušení těles z nich vytvořených byla vybrána optimální receptura, která byla dále rozpracována. Při následujícím míchání se receptury mezi sebou lišily poměry frakcí cihelného recyklátu. Tyto receptury sloužily ke stanovení klíčových vlastností: pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, součinitel tepelné vodivosti a činitel zvukové pohltivosti.

Nejprve bylo namícháno celkem 9 receptur, kde číslo značí směs frakcí cihelného recyklátu a písmeno množství cementového tmelu. Následně byly vyrobeny 3 trámečky od každé receptury pro ověření pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

Tab. 5 Přehled receptur na 1 m³ pro stanovení optimálního množství cementu a směsi frakcí

vstupní složka	jednotka	receptura								
		1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
cement CEM I 42,5 R Mokrý	[kg]	200	150	100	200	150	100	200	150	100
voda na cement	[kg]	100	75	50	100	75	50	100	75	50
vodní součinitel	[-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
cihelný recyklát	[kg]	753	753	753	815	815	815	877	877	877
poměr frakcí	4-8 mm	80	80	80	60	60	60	0	0	0
	2-4 mm	20	20	20	30	30	30	70	70	70
	1-2 mm	0	0	0	10	10	10	30	30	30
voda na kamenivo	[kg]	174	174	174	174	174	174	174	174	174
voda celkem	[kg]	274	249	224	274	249	224	274	249	224
plastifikační přísada ViscoCrete 1035	1 % z m _c [kg]	2	1,5	1	2	1,5	1	2	1,5	1

Množství cihelného recyklátu se odvíjí od sypné hmotnosti použité směsi frakcí. Množství vody potřebné na omočení kameniva bylo voleno dle chování první receptury, kdy byla k cihelnému recyklátu nalévána voda, dokud ji recyklát pojímal a nehromadila se na dně míchací nádoby. Pro ostatní receptury byla voda na omočení kameniva volena ve stejném množství, aby bylo možné receptury mezi sebou porovnat a do porovnávání nevstupovala další proměnná.



Obr. 10 Čerstvá směs s poměrem frakcí 80:20:0 s cementem v množství 200 kg a 150 kg

Při poměru frakcí 80:20:0 (sada receptur 1) měla receptura 1-A s 200 kg cementu přebytek vody, v případě 150 kg cementu (receptura 1-B) bylo množství vody optimální, receptura 1-C se 100 kg cementu byla na pohled sušší. Dle vizuálního posouzení čerstvých směsí se v rámci sady receptur 1 jeví jako nejlepší receptura 1-B.



Obr. 11 Čerstvá směs s poměrem frakcí 60:30:10 s cementem v množství 200 kg, 150 kg a 100 kg

Pro poměr frakcí 60:30:10 (sada receptur 2) se čerstvé směsi chovají jinak. Receptury s 200 kg cementu (receptura 2-A) a se 150 kg cementu (receptura 2-B) byly na pohled podobné, receptura 2-A byla mírně vlhčí, receptura 2-C se 100 kg cementu byla suchá.



Obr. 12 Čerstvá směs s poměrem frakcí 0:70:30 s cementem v množství 150 kg a 100 kg

Sada receptur 3 s poměrem frakcí 0:70:30 pokračovala v tendenci předchozích směsí, tedy receptura 3-A s 200 kg cementu byla optimální, receptury 3-B se 150 kg cementu a 3-C se 100 kg cementu byly suché.

Na těchto recepturách byla zkoušena objemová hmotnost v čerstvém stavu, objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu a pevnost v tlaku a v tahu za ohybu. U všech receptur bylo vidět příliš malé množství frakce 1–2 mm, která by směs více provázala. Proto byly pro míchání pro stanovení klíčových vlastností (pevnost

v tlaku a v tahu za ohybu, součinitel tepelné vodivosti a činitel zvukové pohltivosti) zvoleny receptury s větším zastoupením této frakce.

Tělesa se 150 kg a 100 kg cementu na 1 m³ čerstvé směsi dosahovala výrazně nižších pevností v tlaku i v tahu za ohybu, proto bylo množství cementu pro následující míchání zvoleno 200 kg na 1 m³ čerstvé směsi.

Na základě výsledků předchozího míchání byly namíchány 3 receptury, které se lišily poměry frakcí cihelného recyklátu.

Tab. 6 Přehled receptur na 1 m³ pro stanovení klíčových vlastností

vstupní složka	jednotka	receptura		
		REC 4	REC 5	REC 6
cement CEM I 42,5 R Mokrý	[kg]	200	200	200
voda na cement	[kg]	100	100	100
vodní součinitel	[-]	0,5	0,5	0,5
cihelný recyklát	[kg]	877	804	855
poměr frakcí	4-8 mm	0	0	0
	2-4 mm	70	30	50
	1-2 mm	30	70	50
voda na kamenivo	[kg]	174	174	174
voda celkem	[kg]	274	274	274
plastifikační přísada ViscoCrete 1035	1 % z m _c [kg]	2	2	2

Bylo vyrobeno celkem 14 těles od každé receptury – 9 trámečků, 3 desky a 2 válce. Na vyrobených tělesech byly následně stanovovány klíčové vlastnosti: objemová hmotnost v čerstvém stavu, objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku po 7 dnech pro ověření, objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku po 28 dnech, součinitel tepelné vodivosti a činitel zvukové pohltivosti.

6.4. ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Pro optimální přípravu zkušebních těles je potřeba co nejlépe připravit formy. Směsi se do forem ukládaly vibrolisováním (receptury s různým množstvím cementu a různými směsmi frakcí pro následující větší míchání) a lisováním (receptury pro stanovení klíčových vlastností).

Rozměry a počty zkušebních těles:

- receptury pro stanovení optimálního množství cementu a směsi frakcí: trámečky 40x40x160 mm, 3 ks
- receptury pro stanovení klíčových vlastností: trámečky 40x40x160 mm, 9 ks
desky 200x200x35 mm, 3 ks
velký válec Ø 100 mm, výška 40 mm, 1 ks
malý válec Ø 30 mm, výška 40 mm, 1 ks



Obr. 13 Zkušební tělesa receptur 5, 6 a 7 po odformování

Tělesa byla odformována 5 dní po namíchání receptur, kdy se předpokládala dostatečná manipulační pevnost těles. Poté byly na tělesech stanoveny objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu (vše ve stáří 28 dnů od namíchání), součinitel tepelné vodivosti a číselník zvukové pohltivosti.

6.5. ZKOUŠENÍ CIHELNÉHO RECYKLÁTU

6.5.1. Sypná hmotnost volně sypaného kameniva

Stanovení sypné hmotnosti volně sypaného kameniva bylo provedeno dle ČSN EN 1097-3: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva.

Pomůcky:

válcová nádoba, váhy, lopatky, pravítko, sušárna

Postup:

Nejdříve se zváží prázdná nádoba, která se následně naplní kamenivem. Poté se odstraní přebytečné kamenivo pomocí pravítka a zváží se plná nádoba. Z naměřených hodnot se stanoví sypná hmotnost volně sypaného kameniva dle vzorce:

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

kde: ρ_s ...sypná hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m³]

m_1 ...hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 ...hmotnost nádoby naplněné volně sypaným kamenivem [kg]

V ...objem nádoby [m³]

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva se pro pórovité kamenivo zaokrouhlí na celé číslo [76].

6.6. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU

6.6.1. Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Stanovení objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu bylo provedeno dle ČSN EN 12350-6: Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.

Pomůcky:

nádoba (vodotěsná, tuhá, kovová, horní okraj a dno rovnoběžné, nejmenší rozměr $\geq 4 \cdot D_{\max}$, min. ale 150 mm a min. objem 5 l); vibrační stůl; váhy s přesností 0,1 % hmotnosti betonu; srovnávací pravítko (ocelové, min. o 100 mm delší než největší vnitřní rozměr nádoby); lopatka; hladítko; nádoba na promíchání; lopata; palička

Postup:

Nejdříve se zváží prázdná nádoba, poté se nádoba naplní vodou, zváží a na základě toho se vypočítá objem nádoby. Následně se nádoba naplní betonem a zhutní na vibračním stole. Přebytečný beton se odstraní pravítkem a nádoba se naposledy zváží. Z naměřených a vypočítaných hodnot se stanoví objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu dle vzorce:

$$D_{\check{C}B} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

kde: $D_{\check{C}B}$...objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu [kg/m^3]

m_1 ...hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 ...hmotnost nádoby naplněné zhutněným betonem [kg]

V ...objem nádoby [m^3]

Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 [77].

6.7. ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU

6.7.1. Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu

Stanovení objemové hmotnosti betonu ve ztvrdlém stavu bylo provedeno dle ČSN EN 12390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Pomůcky:

posuvné měřítko; pravítko; váhy

Postup:

Tělesa se zváží s přesností na 1 g hmotnosti tělesa a změří se jejich rozměry v mm s přesností na 2 desetinná místa. Z naměřených hodnot se stanoví objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu dle vzorce:

$$D = \frac{m}{b \cdot h \cdot l}$$

kde: D ...objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu [kg/m^3]

m ...hmotnost zkušební tělesa [kg]

b, h, l ...rozměry zkušební tělesa [mm]

Objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 [78].

6.7.2. Pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku bylo provedeno dle ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Pomůcky:

zkušební lis; posuvné měřítko

Postup:

Změří se rozměry zkušebních těles v mm s přesností na 2 desetinná místa, na základě čehož se vypočítá velikost tlačné plochy. Povrch tlačných desek se očistí a těleso se centricky uloží do zkušebního lisu. Tělesa se vkládají do lisu ve směru kolmém na směr hutnění. Zkušební tělesa se zatěžují konstantní rychlostí $0,6 \pm 0,2$ MPa/s do porušení tělesa. Následně se zaznamená dosažené maximální zatížení. Z naměřených hodnot se stanoví pevnost v tlaku dle vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde: f_c ...pevnost v tlaku [MPa]

F ...maximální zatížení při porušení [N]

A_c ...průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa [79].



Obr. 14 Porušení tělesa při stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech

6.7.3. Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno dle ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

Pomůcky:

zkušební lis; posuvné měřítko

Postup:

Změří se rozměry zkušebních těles v mm s přesností na 2 desetinná místa. Otřou se všechny dotykové plochy lisu a těleso se centricky uloží do zkušebního lisu. Tělesa se vkládají do lisu ve směru kolmém na směr hutnění. Zkušební tělesa se zatěžují konstantní rychlostí 0,04 – 0,06 MPa/s do porušení tělesa. Následně se zaznamená dosažené maximální zatížení. Z naměřených hodnot se stanoví pevnost v tlaku dle vzorce:

$$f_{ct,fl} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2}$$

kde: $f_{ct,fl}$...pevnost v tahu za ohybu [MPa]

F ...maximální zatížení [N]

L ...vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

b, h ...rozměry příčného řezu [mm]

Pevnost v tahu za ohybu se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa [80].

6.7.4. Součinitel tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno dle ČSN EN 12667: Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla toku dle ISO 8301.

Princip:

Metoda spočívá ve vyzovávání ustáleného teplotního stavu. Součinitel tepelné vodivosti se vypočítá dle průměrných hodnot elektrického příkonu měrné desky, účinné plochy topné desky, tloušťky vzorku a teplot ploch teplého a chladného povrchu vzorku. Při použití metody měřidla tepelného toku se hodnota součinitele tepelné vodivosti stanoví na základě hustoty tepelného toku, teplotního spádu a tloušťky zkušebního tělesa.

Postup:

Nejdříve se zkušební tělesa změří, poté se pomocí přístroje Fox 200 Vacuum výpočtem stanoví součinitel tepelné vodivosti zkušebních těles. V prvním kroku se spočítá hustota tepelného toku dle vzorce:

$$q_d = U \cdot k_m$$

kde: q_d ...hustota tepelného toku [W/m²]

U ... napětí na obou měřidlech hustoty tepelného toku [V]

k_m ...kalibrační konstanta [W/(V·m²)]

Následně se vypočítá součinitel tepelné vodivosti dle vzorce:

$$\lambda = \frac{q_d \cdot d_m}{\theta_{hd} - \theta_{cd}}$$

kde: λ ...součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]

d_m ...průměrná tloušťka zkušebního tělesa [m]

θ_{hd} ...povrchová teplota teplé strany tělesa [°C]

θ_{cd} ...povrchová teplota chladné strany tělesa [°C] [81]

6.7.5. Činitel zvukové pohltivosti

Stanovení činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno dle ČSN ISO 10534-1: Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny.

Princip:

Vzorek je upevněn do uzavíratelného konce impedanční trubice. Na opačném konci trubice je reproduktorem buzena sinusová zvuková vlna. Skládáním dopadající vlny a odrážející se vlny od vzorku vznikne v trubici stojatá vlna. Vyhodnocení probíhá na základě akustického tlaku v tlakových minimech a maximech.

Pomůcky:

impedanční trubice; držák vzorku; mikrofonní sonda; zařízení pro pohyb a umístění mikrofonní sondy; zařízení pro zpracování mikrofonního signálu; reproduktor; generátor signálu; pohltivý uzávěr impedanční trubice



Obr. 15 Kundtova impedanční trubice

Postup:

Po upevnění vzorku do držáku se na přístroji nastaví požadovaná frekvence. Poté se akustickou sondou jezdí ke vzorku a od něj, čímž se na přístroji mění hodnota akustického tlaku. Pohybem akustické sondy se hledá minimum a maximum akustického tlaku. Z naměřených hodnot se stanoví činitel zvukové pohltivosti dle vzorce:

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2}$$

kde: α ...činitel zvukové pohltivosti [-]

ΔL ...rozdíl hladin akustického tlaku mezi tlakovým minimem a tlakovým maximem [dB] [82]

7. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

Výsledky a vyhodnocení jsou rozděleny do tří částí dle toho, jak probíhalo zkoušení a stanovování vlastností cihelného recyklátu a mezerovitého cihlobetonu. První část představuje cihelný recyklát a stanovení sypné hmotnosti frakcí a jejich směsí. Na to navazuje druhá část, kterou tvoří návrh a zkoušení mezerovitého cihlobetonu s různým množstvím cementu a různými směsmi frakcí (oranžově označené směsi v tabulkách 7 a 8). Zde bylo stanoveno množství cementu, které se už v další fázi neměnilo, a optimální směs frakcí (směs č. 16 z tabulky 8), která byla ve třetí části dále rozvíjena a vylepšována (zeleně označené směsi v tabulce 8).

7.1. SYPNÁ HMOTNOST FRAKČÍ CIHELNÉHO RECYKLÁTU A JEJICH SMĚSÍ

Sypná hmotnost kameniva má vliv na jeho mezerovitost. Pro určení optimální sypné hmotnosti byla nejdříve stanovena sypná hmotnost jednotlivých frakcí cihelného recyklátu. Jednalo se o frakce 4–8 mm, 2–4 mm a 1–2 mm. Poté byly frakce míchány v objemovém poměru, kdy se k hrubé frakci (4–8 mm) postupně přidávaly jemné frakce (2–4 mm a 1–2 mm). V některých směsích byla hrubá frakce úplně vynechána a míchaly se pouze jemné frakce. Sypná hmotnost byla stanovována dle ČSN EN 1097–3.

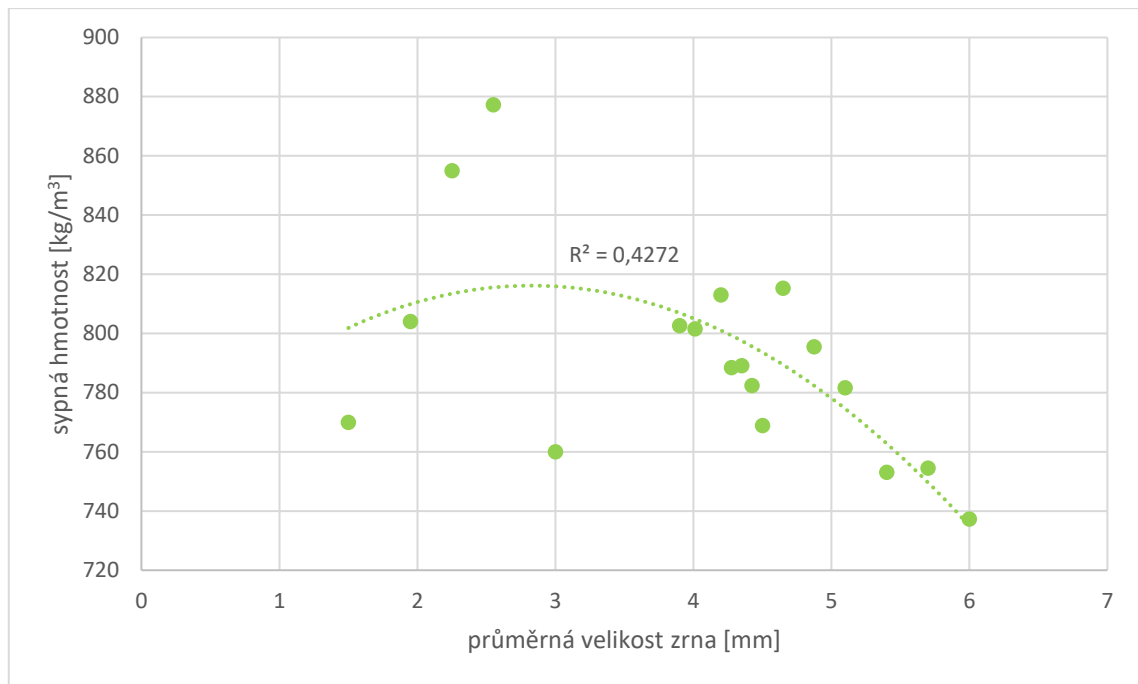
Tab. 7 Sypná hmotnost čistých frakcí a jejich směsí část 1

frakce/směs	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4-8 [mm]	100	0	0	90	80	70	70	60	50
2-4 [mm]	0	100	0	10	20	30	15	30	50
1-2 [mm]	0	0	100	0	0	0	15	10	0
ρ_s [kg/m ³]	737	760	770	755	753	782	796	815	769

Tab. 8 Sypná hmotnost čistých frakcí a jejich směsí část 2

frakce/směs	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4-8 [mm]	50	50	50	50	45	40	0	0	0
2-4 [mm]	45	40	35	30	32,5	40	70	50	30
1-2 [mm]	5	10	15	20	22,5	20	30	50	70
ρ_s [kg/m ³]	782	789	788	813	802	803	877	855	804

Aby bylo možné porovnat hodnoty sypné hmotnosti, byla vypočítána průměrná velikost zrna každé frakce a směsi cihelného recyklátu podle procentuálního zastoupení jednotlivých frakcí. Z těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti sypné hmotnosti frakcí cihelného recyklátu a jejich směsí na průměrné velikosti zrna.



Graf 1 Závislost sypné hmotnosti frakcí cihelného recyklátu a jejich směsí na průměrné velikosti zrna

Lze vidět spojitost mezi sypnou hmotností frakcí cihelného recyklátu a jejich směsí a mezi průměrnou velikostí zrna. Závislost je možné popsat jako polynom 2. stupně. Hodnoty sypné hmotnosti se nejvíce blíží proložené křivce při průměrné velikosti zrna nad 3,5 mm. Pod touto hodnotou se sypné hmotnosti vzdalují od proložené křivky.

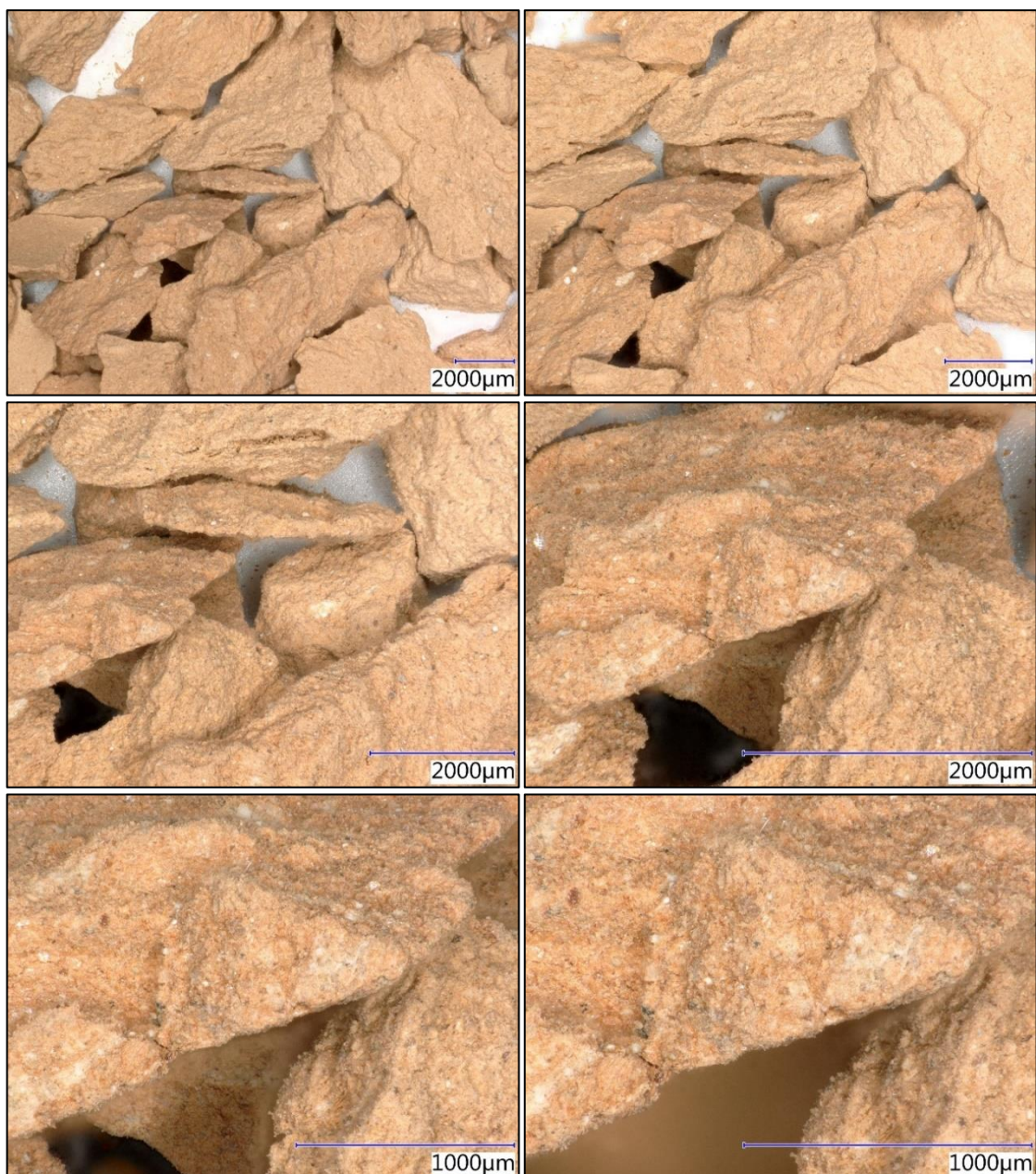
Pro vytvoření mezerovitého cihlobetonu byly vybrány 3 směsi frakcí tak, aby bylo pokryto celé spektrum od velmi hrubé směsi s nižší sypnou hmotností č. 5, přes směs se zastoupením všech frakcí č. 8, po relativně jemnou směs č. 16. Byly voleny směsi frakcí se sypnou hmotností spíše nad 800 kg/m³, jelikož při nízké sypné hmotnosti se předpokládají nízké hodnoty pevností betonu. Nebyla zvolena směs s převahou nejjemnější frakce, protože se předpokládala velmi nízká mezerovitost. Byly proto zvoleny směsi frakcí (od největší frakce) 80:20:0, u které se předpokládala největší pevnost z důvodu vysokého obsahu frakce 4–8 mm, dále poměr 60:30:10, kde se předpokládalo o něco větší zaplnění mezer, a nakonec poměr 0:70:30, kde by mezerovitost měla být nejmenší, jelikož zrna frakce 1–2 mm vyplní mezery mezi zrny frakce 2–4 mm.

Struktura frakcí cihelného recyklátu byla zkoumána pomocí mikroskopu, konkrétně se jednalo o digitální optický mikroskop VHX-950F. Byly pořízeny snímky frakcí 4–8 mm, 2–4 mm a 1–2 mm se zvětšením 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x.



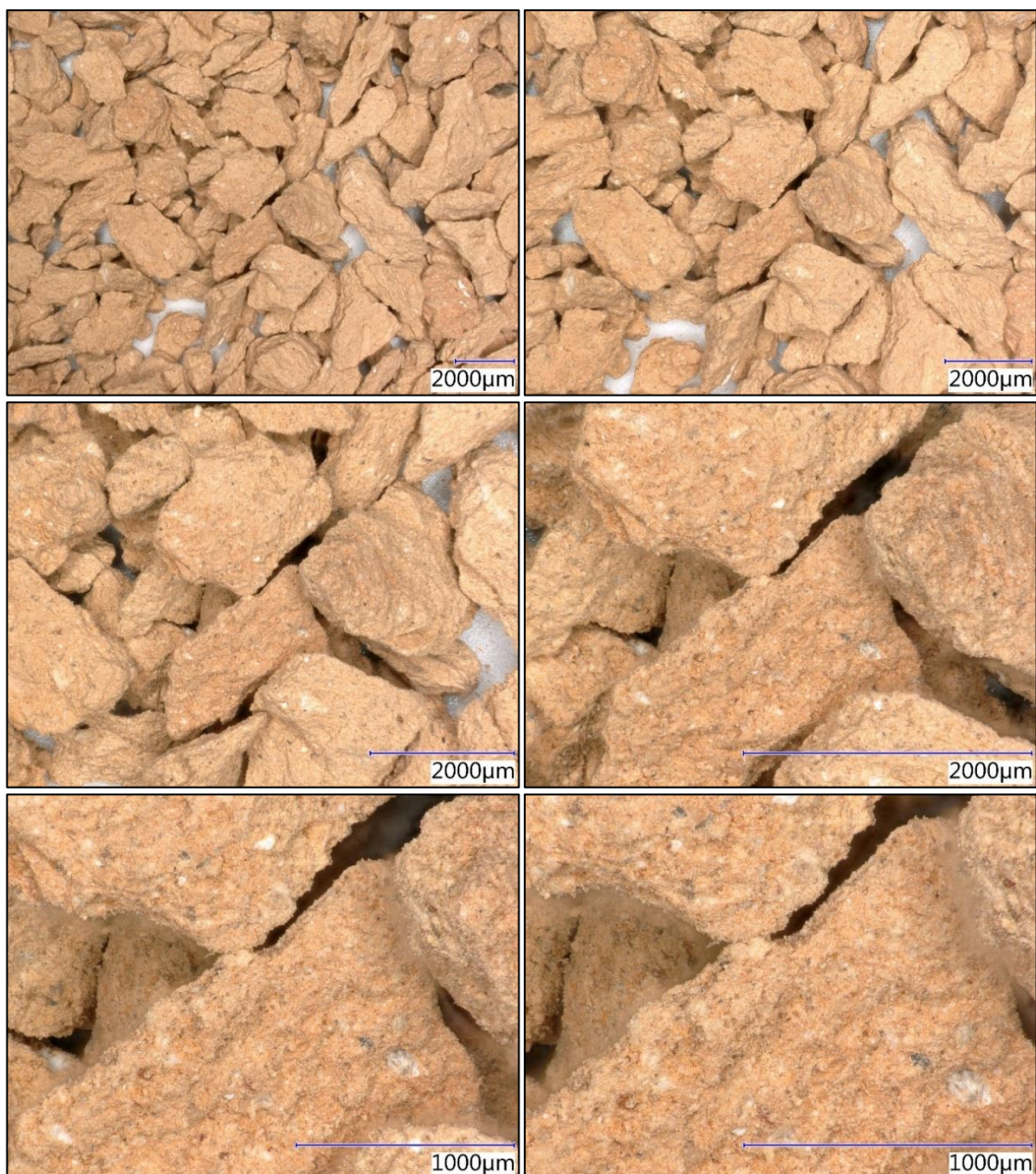
Obr. 16 Cihelný recyklát frakce 4-8 mm - zvětšení 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x

Z fotografie z mikroskopu je patrné, že cihelný recyklát kromě samotné cihly obsahuje i tepelnou izolaci a lepidlo použité při spojování cihel. Tyto materiály mohou mít za následek zhoršení vlastností výsledného mezerovitého cihlobetonu, na druhou stranu toto složení odpovídá realitě, jelikož cihelný recyklát může být získáván jak přímo ve výrobě (čistá keramika), tak i z demolic budov, kde nelze tyto materiály efektivně odseparovat.



Obr. 17 Cihelný recyklát frakce 2-4 mm - zvětšení 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x

Zrna na první pohled nesplňují tvarový index pro klasický beton, v tomto případě však podlouhlá zrna přispívají k tvorbě mezer mezi nimi. Jeden výrazně převažující rozměr zrn zhoršuje zatřídění do frakce, jelikož je velký rozdíl mezi největším a nejmenším rozměrem zrn. Zrna sice propadnou sítím, protože jsou úzká, ale jejich největší rozměr je výrazně větší, proto by měla být zrna zařazena do vyšší frakce.



Obr. 18 Cihelný recyklát frakce 1-2 mm - zvětšení 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x

Zrna jsou opět výrazně podlouhlá, proto pro ně platí stejné zákonitosti jako pro zrna frakce 2-4 mm.

Pro všechny frakce platí, že při manipulaci s cihelným recyklátem dochází k jeho otěru. Tím vzniká cihelný prach, který v betonu působí jako pucolán, předpokládá se tedy zlepšení vlastností zejména mechanických.

Dále byly z vybraných směsí frakcí cihelného recyklátu vytvořeny receptury, které se lišily množstvím cementu, aby bylo zjištěno, jaký to má vliv na vlastnosti mezerovitého cihlobetonu. Z těchto receptur bude vybrána ta s nejlepšími vlastnostmi a bude dále rozpracována.

7.2. MEZEROVITÝ CIHLOBETON S RŮZNÝM MNOŽSTVÍM CEMENTU A RŮZNÝMI SMĚSMI FRAKČÍ

Nejprve byly navrženy receptury pro stanovení optimálního množství cementu pro každou směs frakcí cihelného recyklátu. Na těchto recepturách byl ověřován předpokládaný vliv směsí frakcí na vlastnosti mezerovitého cihlobetonu.

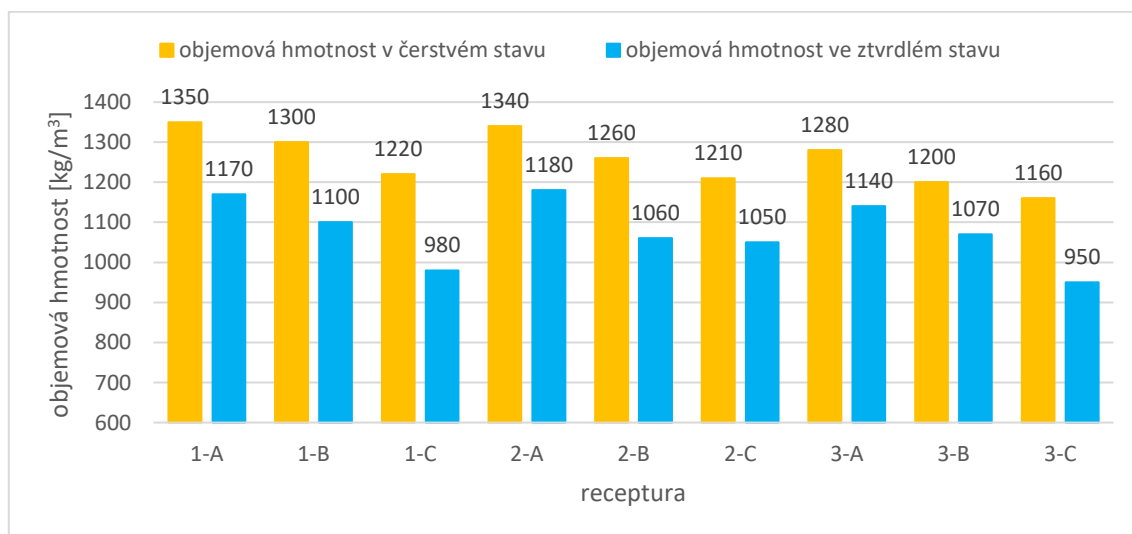
Receptury jsou značeny pomocí čísel a písmen, kdy číslo značí směs frakcí cihelného recyklátu (1 je poměr 80:20:0, 2 poměr 60:30:10 a 3 poměr 0:70:30) a písmeno množství cementu (A značí 200 kg cementu na 1 m³, B 150 kg cementu na 1 m³, C 100 kg cementu na 1 m³). Jako sada receptur jsou označovány receptury se stejnou směsí frakcí, a tedy se stejným číslem.

Z každé receptury byly vyrobeny 3 trámečky 40x40x160 mm, které byly hutněny ručním vibrolisováním. Na těchto tělesech byla zjišťována objemová hmotnost v čerstvém a ve ztvrdlém stavu, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu.

Nejdříve byla stanovována na zkušebních trámečcích 40x40x160 mm objemová hmotnost v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350-6, poté objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu dle ČSN EN 12390-7.

Tab. 9 Objemová hmotnost sad receptur 1, 2 a 3 v čerstvém stavu a ztvrdlém stavu

receptura	m _{čb} [kg]	V [m ³]	D _{čb} [kg/m ³]	D [kg/m ³]
1-A	1,04	0,0008	1350	1170
1-B	1,00	0,0008	1300	1100
1-C	0,94	0,0008	1220	980
2-A	1,03	0,0008	1340	1180
2-B	0,97	0,0008	1260	1060
2-C	0,93	0,0008	1210	1050
3-A	0,98	0,0008	1280	1140
3-B	0,92	0,0008	1200	1070
3-C	1,14	0,0008	1160	950



Graf 2 Objemové hmotnosti sad receptur 1, 2 a 3

Objemová hmotnost v čerstvém stavu s rostoucím množstvím cementu roste, naopak s rostoucí sypanou hmotností cihelného recyklátu klesá. Hodnoty objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu se pohybují od 1160 kg/m³ do 1350 kg/m³.

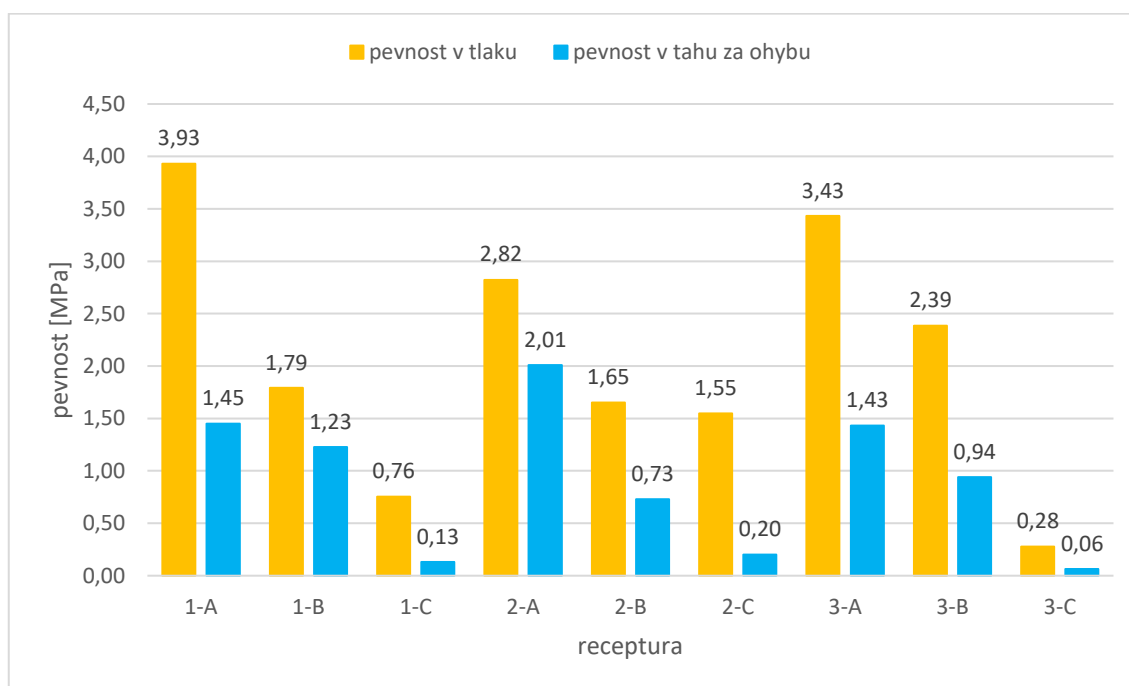
Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu stoupala s rostoucím množstvím cementu. Hodnoty se pohybují v rozmezí 950 kg/m³ až 1180 kg/m³.

Při porovnání objemových hmotností v čerstvém a ztvrdlém stavu lze vidět, že objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu je vždy o něco nižší oproti té v čerstvém stavu, jelikož z materiálu vyšla část záměsové vody.

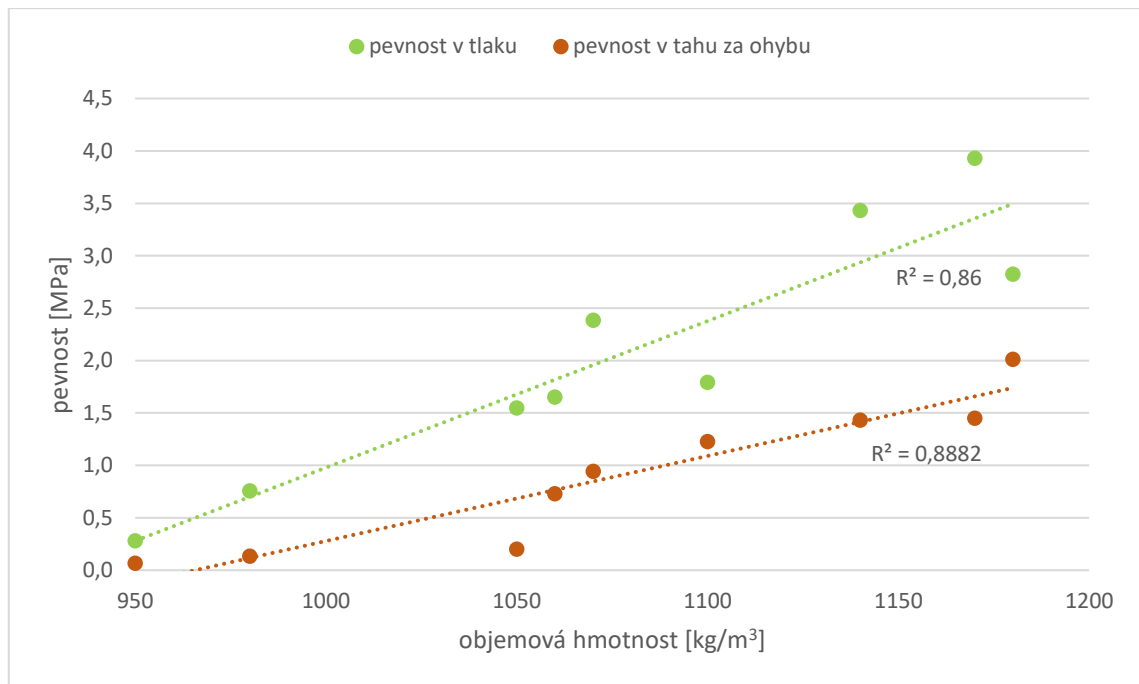
Dále byla zkoušena pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 12390-5 na trámečcích 40x40x160 mm a pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 na zbytcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu.

Tab. 10 Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku sad receptur 1, 2 a 3

vlastnost/receptura	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
množství cementu [kg/1 m ³]	200	150	100	200	150	100	200	150	100
sypaná hmotnost směsi frakcí [kg/m ³]	753	753	753	815	815	815	877	877	877
pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1,45	1,23	0,13	2,01	0,73	0,20	1,43	0,94	0,06
pevnost v tlaku [MPa]	3,93	1,79	0,76	2,82	1,65	1,55	3,43	2,39	0,28



Graf 3 Pevnosti sad receptur 1, 2 a 3



Graf 4 Závislost pevností sad receptur 1, 2 a 3 na objemové hmotnosti

Dle předpokladu pevnost v tlaku i v tahu za ohybu roste s rostoucí objemovou hmotností. S rostoucím množstvím cementu v recepturách koreluje růst pevností. Pevnost v tahu za ohybu se pohybuje od 0,06 MPa do 2,01 MPa.

Co se týká pevnosti v tlaku, u všech množství cementu dochází k většímu rozptylu hodnot v rámci stejné dávky cementu oproti pevnosti v tahu za ohybu. Hodnoty pevnosti v tlaku se pohybují od 0,28 MPa do 3,93 MPa.

Tělesa ze sady receptur 1 (největší obsah frakce 4–8 mm) sice vykazovala nejvyšší pevnosti, ale naproti tomu se i nejvíce drolila. Tomu by bylo možné zabránit zvýšením množství cementového tmelu, což by ale na druhou stranu zvýšilo objemovou hmotnost. Sada receptur 3 (pouze frakce 1–2 mm a 2–4 mm) dosahovala pouze nepatrně nižších hodnot pevností, ale tělesa byla daleko kompaktnější a při manipulaci se nedrolila. Proto byla směs frakcí použita v těchto recepturách stanovena jako výchozí pro návrh dalších receptur. Dle předpokladu vykazovaly receptury s 200 kg cementu na 1 m³ betonu nejvyšší pevnosti, navíc tělesa se opět méně drolila, protože byla více obalena cementovým tmelem, proto se už dále množství cementu neupravovalo a ponechalo se i u dalších receptur na této hodnotě.

7.3. MEZEROVITÝ CIHLOBETON S RŮZNÝMI SMĚSMI FRAKČÍ

Dle vyhodnocení vlastností a chování předchozích receptur byla receptura 3-A dále rozvíjena. Byla rozdělena na 3 nové receptury, na kterých jsou stanovovány klíčové vlastnosti. Všechny receptury obsahují cement v dávce 200 kg na 1 m³ betonu a liší se směsmi frakcí cihelného recyklátu. Frakce 4–8 mm je zde zcela vynechána, jelikož vytváří až příliš velké mezery a cihlobeton se drolí. Receptury jsou značeny pomocí čísel, kdy receptura 4 má poměr frakcí 2–4 mm

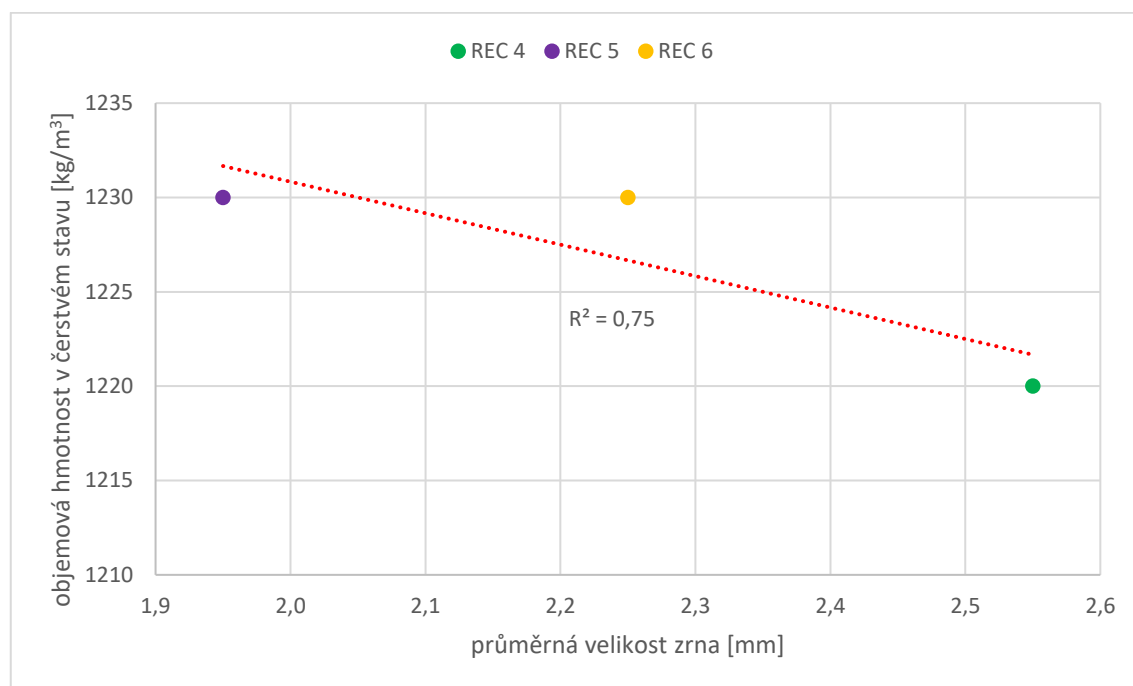
a 1–2 mm 70:30, receptura 5 má poměr frakcí 30:70 a receptura 6 má poměr frakcí 50:50. Z každé z těchto receptur bylo vyrobeno 9 trámečků 40x40x160 mm, 3 desky 200x200x35 mm, válec o průměru 100 mm a výšce 40 mm a válec o průměru 30 mm a výšce 40 mm. Všechna tělesa byla hutněna ručním lisováním. Na těchto tělesech byla zjišťována objemová hmotnost v čerstvém a ve ztvrdlém stavu, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, součinitel tepelné vodivosti a činitel zvukové pohltivosti. Z receptury s nejlepšími vlastnostmi bude následně navržena tvarovka.

7.3.1. Vlastnosti mezerovitého cihlobetonu v čerstvém stavu

V čerstvém stavu byla stanovována pouze objemová hmotnost na trámečcích 40x40x160 mm dle ČSN EN 12350–6.

Tab. 11 Objemová hmotnost receptur 4, 5 a 6 v čerstvém stavu

těleso	$m_{\text{čB}}$ [kg]	V [m ³]	$D_{\text{čB}}$ [kg/m ³]
REC 4 K	0,935	0,0008	1220
REC 5 K	0,941	0,0008	1230
REC 6 K	0,945	0,0008	1230



Graf 5 Závislost objemové hmotnosti v čerstvém stavu receptur 4, 5 a 6 na průměrné velikosti zrna směsi cihelného recyklátu

Objemová hmotnost v čerstvém stavu je závislá na sypané hmotnosti směsi cihelného recyklátu a na průměrné velikosti zrna, s oběma rostoucími hodnotami roste i objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu. Nabývá hodnot od 1220 kg/m³ do 1230 kg/m³.

7.3.2. Vlastnosti mezerovitého cihlobetonu ve ztvrdlém stavu po 7 dnech

Pro ověření průběžných hodnot zejména mechanických vlastností byla po 7 dnech stanovována objemová hmotnost a pevnost v tahu za ohybu na trámečcích 40x40x160 mm a pevnost v tlaku na zbytcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu.

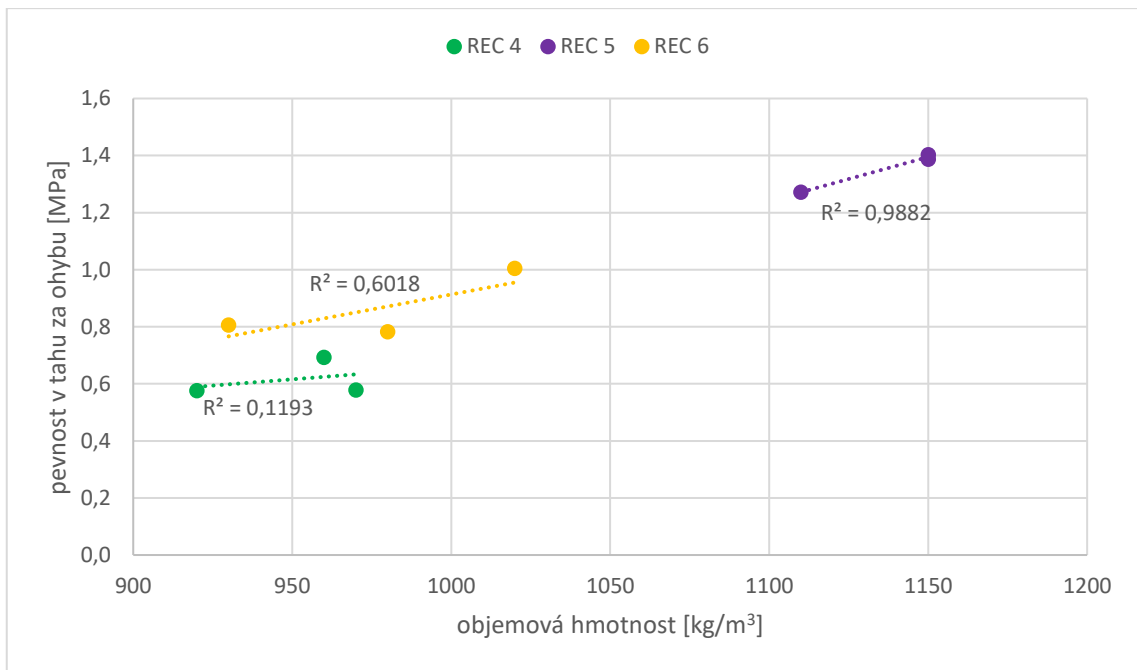
Tyto vlastnosti jsou z velké části ovlivněny kvalitou zhutnění, jelikož materiál byl hutněn ručně, a tudíž nestejně.

V prvním kroku byla stanovena objemová hmotnost dle ČSN EN 12390-7. V dalším kroku byla stanovena na trámečcích 40x40x160 mm pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 12390-5 a pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 na zbytcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu.

Tab. 12 Objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku po 7 dnech receptur 4, 5 a 6

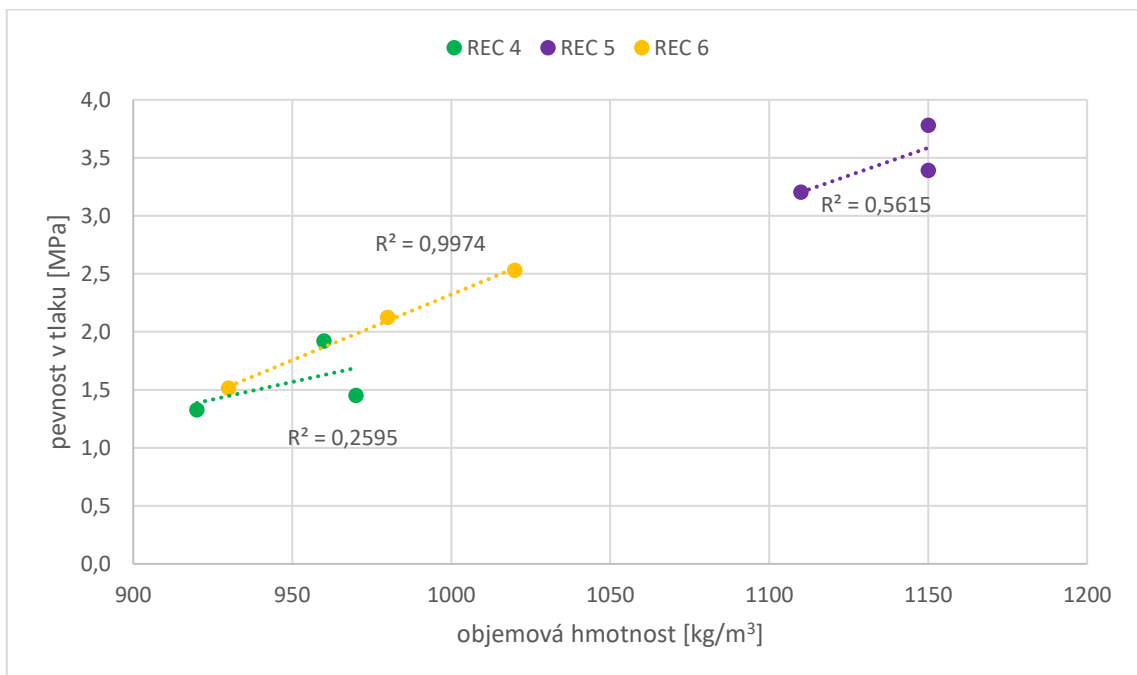
těleso	m [g]	D [kg/m ³]	ØD [kg/m ³]	f _{ct,fl} [MPa]	Ø f _{ct,fl} [MPa]	f _c [MPa]	Ø f _c [MPa]
REC 4 T1	238,30	920	950	0,6	0,6	1,3	1,6
REC 4 T2	251,79	970		0,6		1,5	
REC 4 T3	247,15	960		0,7		1,9	
REC 5 T1	296,91	1150	1140	1,4	1,4	3,4	3,5
REC 5 T2	297,67	1150		1,4		3,8	
REC 5 T3	287,30	1110		1,3		3,2	
REC 6 T1	262,89	980	980	0,8	0,9	2,1	2,1
REC 6 T2	273,67	1020		1,0		2,5	
REC 6 T3	242,12	930		0,8		1,5	

Při porovnání objemových hmotností v čerstvém a ztvrdlém stavu po 7 dnech lze vidět, že objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu je vždy o něco nižší oproti té v čerstvém stavu, jelikož z materiálu vyšla část záměsové vody. Avšak hodnoty objemové hmotnosti po 7 dnech nejsou vůči sobě ve stejném poměru jako hodnoty objemové hmotnosti v čerstvém stavu. To může být způsobeno rozdílnou nasákovostí jednotlivých frakcí a jejich směsí. Hodnoty objemové hmotnosti po 7 dnech se pohybují od 920 kg/m³ do 1150 kg/m³. Nejnižších hodnot dosahují tělesa z receptury 4.



Graf 6 Závislost pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti

Pevnost v tahu za ohybu je závislá na objemové hmotnosti betonu. Její hodnoty se pohybují od 0,6 MPa do 1,4 MPa. U receptury 5 je závislost nejvíce viditelná.



Graf 7 Závislost pevnosti v tlaku po 7 dnech receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti

Pevnost v tlaku je také závislá na objemové hmotnosti jako pevnost v tahu za ohybu, je zde však rozdíl v tom, že největší závislost je nyní u receptury 6. Pevnost v tlaku nabývá hodnot 1,3 MPa až 3,8 MPa.

Trámečky z receptury 5 mají nejvyšší objemovou hmotnost po 7 dnech, dosahují proto i nejvyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku.

Při manipulaci s tělesy se ta z receptury 4 drojí, jelikož zde převažuje frakce 2–4 mm a mezery mezi těmito zrny nejsou dobře vyplněny frakcí 1–2 mm a cementovým tmelem. Tělesa z receptury 6 se drojí pouze mírně, jelikož obsahují větší množství frakce 1–2 mm, a struktura je zde tedy více provázaná. Tělesa z receptury 5 jsou v pořádku, protože zde je nejvyšší obsah frakce 1–2 mm, dochází tak k většímu stmelení a obalení zrn.

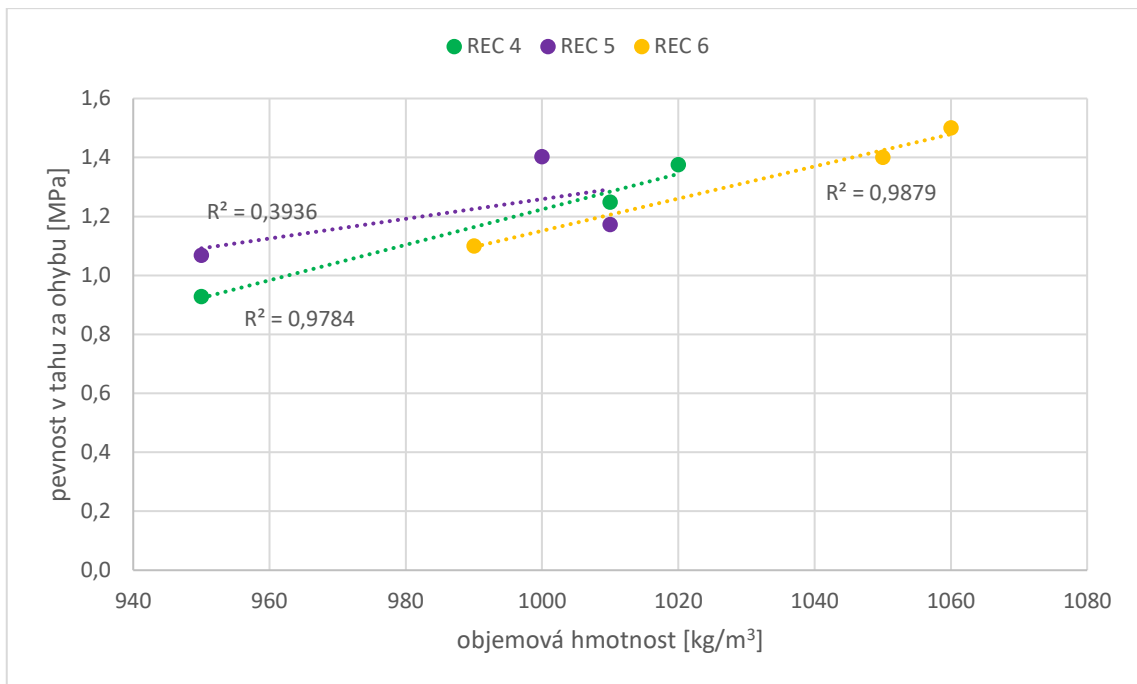
7.3.3. Vlastnosti mezerovitého cihlobetonu ve ztvrdlém stavu po 28 dnech

Ve stáří 28 dní byly kromě objemové hmotnosti a pevností v tahu za ohybu a v tlaku stanoveny také součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu a činitel zvukové pohltivosti.

Nejdříve byla na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm stanovena objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu dle ČSN EN 12390–7 a pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 12390–5 a na zbytcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu byla stanovována pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390–3.

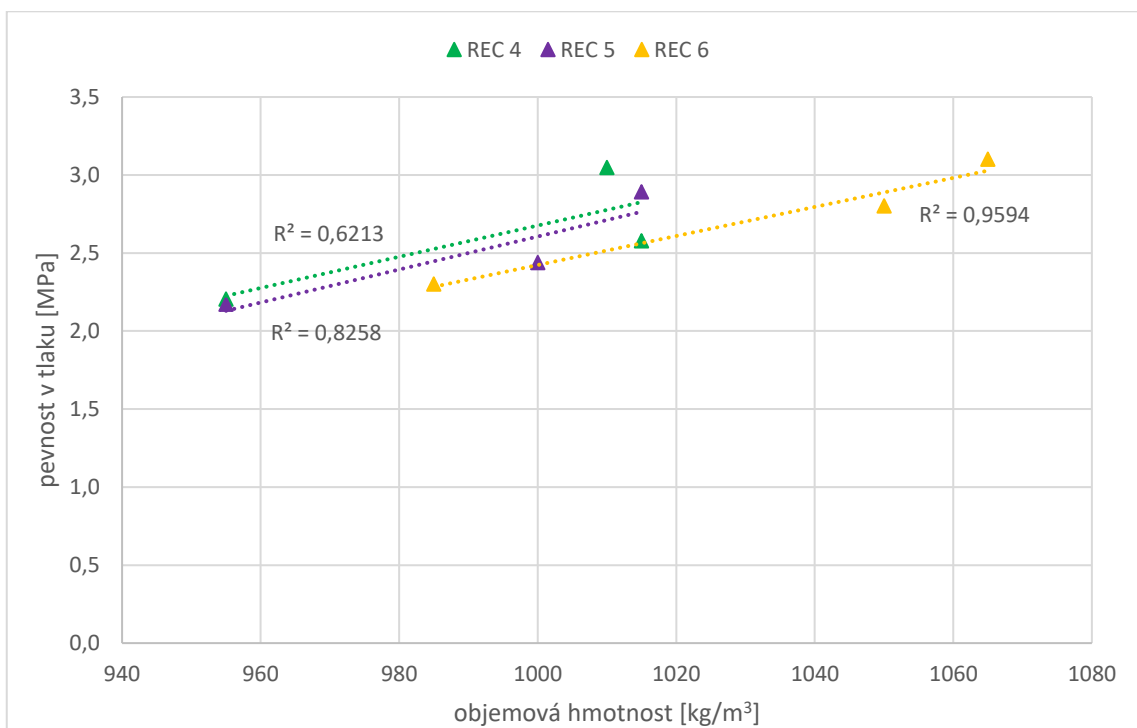
Tab. 13 Objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku receptur 4, 5 a 6

těleso	m [g]	D [kg/m ³]	ØD [kg/m ³]	f _{ct,fl} [MPa]	Ø f _{ct,fl} [MPa]	f _c [MPa]	Ø f _c [MPa]
REC 4 T7	266,38	1010	990	1,2	1,2	3,0	2,6
REC 4 T8	260,52	1020		1,4		2,6	
REC 4 T9	246,08	950		0,9		2,2	
REC 5 T7	255,68	1000	990	1,2	1,2	2,4	2,5
REC 5 T8	258,53	1010		1,4		2,9	
REC 5 T9	243,08	950		1,1		2,2	
REC 6 T7	254,82	1060	1030	1,5	1,3	3,1	2,7
REC 6 T8	271,28	990		1,1		2,3	
REC 6 T9	273,37	1050		1,4		2,8	



Graf 8 Závislost pevnosti v tahu za ohybu receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti

Pevnost v tahu za ohybu roste s rostoucí objemovou hmotností. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu se pohybují od 0,9 MPa do 1,5 MPa.

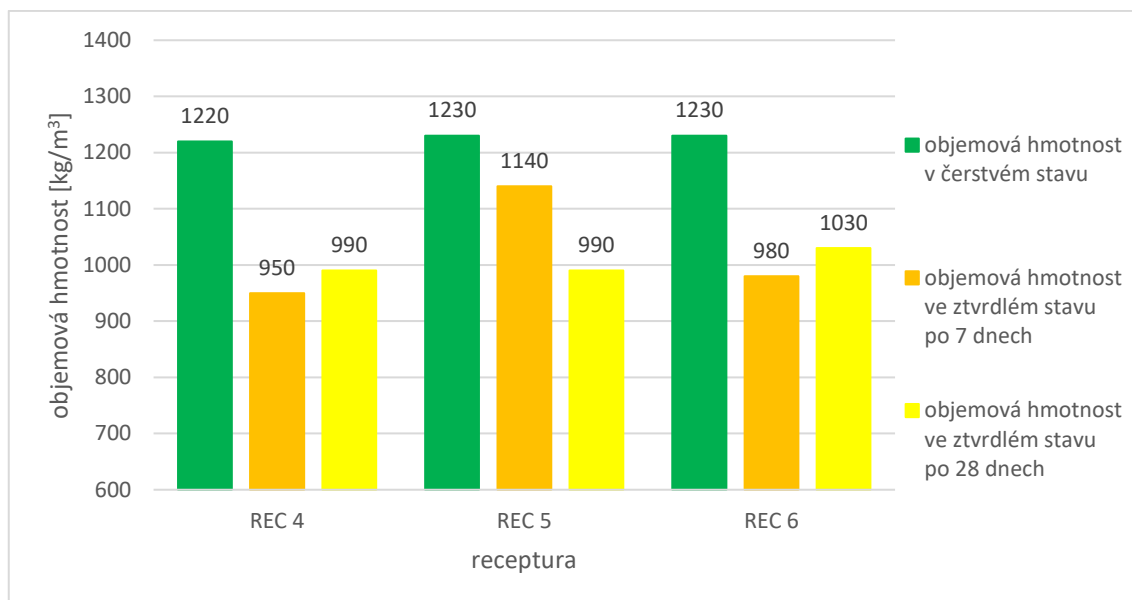


Graf 9 Závislost pevnosti v tlaku receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti

Pevnost v tlaku zkoušená na zbytcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu je u všech receptur závislá na objemové hmotnosti. Hodnoty pevnosti v tlaku se pohybují od 2,2 MPa do 3,1 MPa.

Pro lepší porovnání jsou všechny objemové hmotnosti těles z receptur s různými směsmi frakcí uvedeny v jednom grafu. Jedná se o tyto objemové hmotnosti:

- objemová hmotnost v čerstvém stavu,
- objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu po 7 dnech,
- objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu po 28 dnech.



Graf 10 Objemové hmotnosti receptur 4, 5 a 6

Při porovnání objemových hmotností v čerstvém stavu a ve stáří 7 a 28 dní dochází k poklesu objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu oproti té v čerstvém stavu z důvodu odchodu části záměsové vody. Nejnižší objemové hmotnosti jsou u receptury 4, nejvyšší u receptury 6 kromě výkyvu v objemové hmotnosti receptury 5 ve stáří 7 dní.

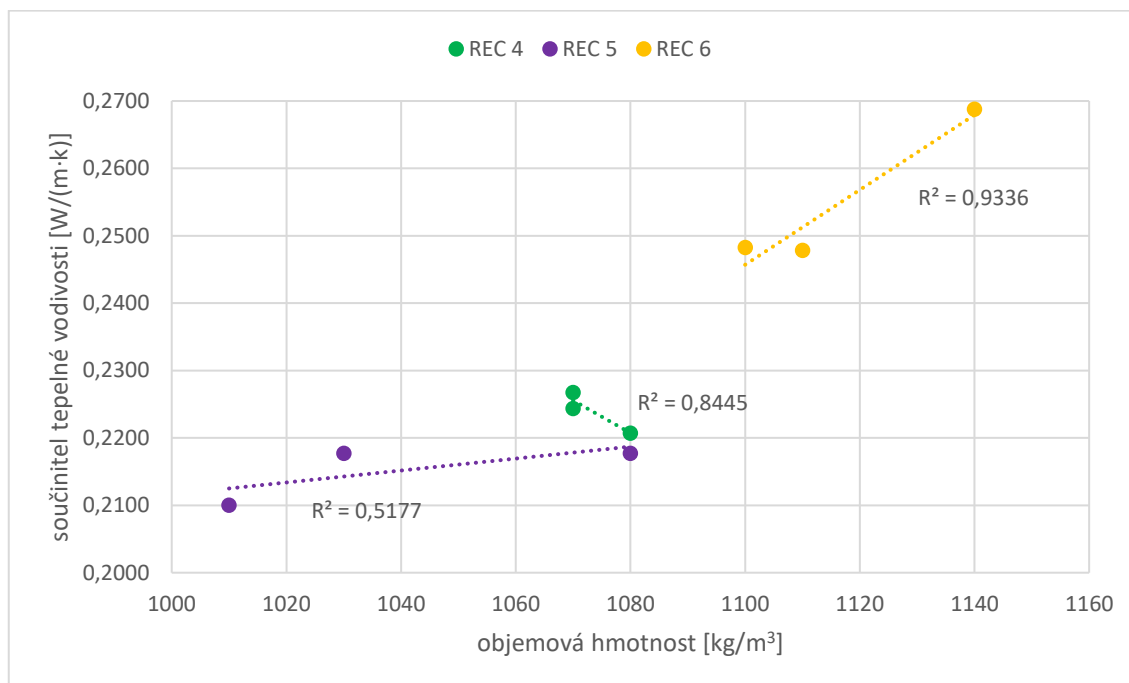
Kromě receptury 5 je objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu po 28 dnech vyšší než při zkoušení ve stáří 7 dní, což je způsobeno nestejným zhutněním.

Dále byl stanovován součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu dle ČSN EN 12667 metodou tepelného toku dle ISO 8301 na deskách o rozměrech 200x200x35 mm.

Tab. 14 Objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu receptur 4, 5 a 6

těleso	D_{dry} [kg/m³]	ϕD_{dry} [kg/m³]	$\lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]			$\phi \lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]	$\phi \lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]
REC 4 D1	1080	1070	0,2208	0,2207	0,2207	0,2207	0,2240
REC 4 D2	1070		0,2244	0,2243	0,2244	0,2244	
REC 4 D3	1070		0,2267	0,2268	0,2268	0,2268	
REC 5 D1	1030	1040	0,2178	0,2177	0,2177	0,2177	0,2152
REC 5 D2	1010		0,2100	0,2100	0,2101	0,2100	
REC 5 D3	1080		0,2178	0,2177	0,2177	0,2177	

těleso	D_{dry} [kg/m ³]	$\emptyset D_{dry}$ [kg/m ³]	$\lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]			$\emptyset \lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]	$\emptyset \lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]
REC 6 D1	1100	1120	0,2483	0,2482	0,2483	0,2483	0,2550
REC 6 D2	1110		0,2478	0,2478	0,2479	0,2478	
REC 6 D3	1140		0,2689	0,2687	0,2688	0,2688	



Graf 11 Závislost součinitele tepelné vodivosti v suchém stavu receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti v suchém stavu korespondují s hodnotami objemové hmotnosti těles, tzn. s rostoucí objemovou hmotností roste součinitel tepelné vodivosti. Nejlépe vychází receptura 5, která má průměrnou hodnotu 0,2152 W/(m·K). Receptura 4 má v průměru hodnotu 0,2240 W/(m·K), receptura 6 pak hodnotu 0,2550 W/(m·K). Celkově se součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu pohybuje od 0,2100 W/(m·K) do 0,2689 W/(m·K).

Jako poslední byl stanovován činitel zvukové pohltivosti dle ČSN ISO 10534-1 na válcích s výškou 40 mm a průměrem 30 mm pro frekvence 100–1000 Hz a s průměrem 100 mm pro frekvence 1250–6300 Hz.

Tab. 15 Tloušťka vzorků pro zjištění činitele zvukové pohltivosti

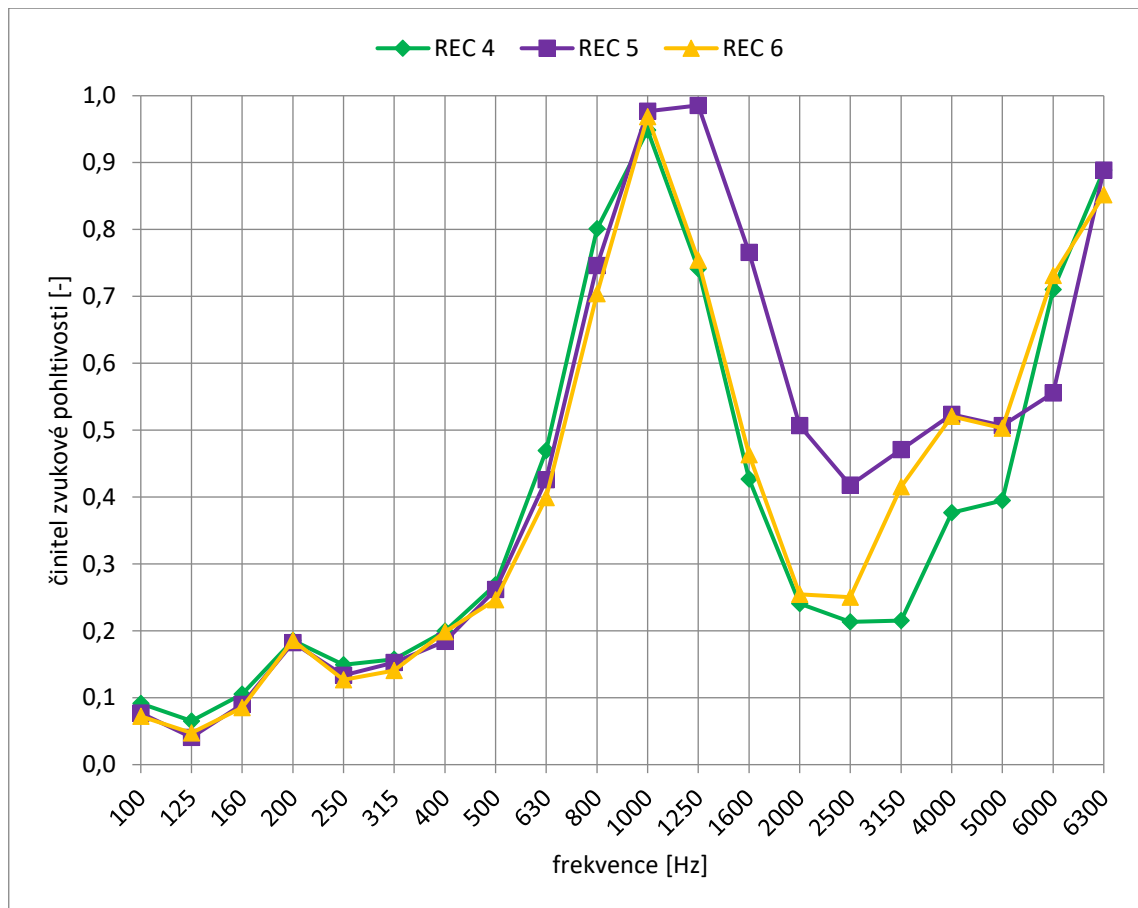
frekvence	tloušťka vzorku [mm]		
	REC 4	REC 5	REC 6
100-1000 Hz	42,12	40,22	40,56
1250-6300 Hz	41,01	40,12	41,09



Obr. 19 Zkušební tělesa pro stanovení činitele zvukové pohltivosti

Tab. 16 Činitel zvukové pohltivosti receptur 4, 5 a 6

f [Hz]	REC 4		REC 5		REC 6	
	n [-]	α [-]	n [-]	α [-]	n [-]	α [-]
100	41,7	0,09	50,0	0,08	53,5	0,07
125	0,0	0,07	95,8	0,04	82,2	0,05
160	35,9	0,11	42,5	0,09	45,0	0,09
200	19,5	0,19	19,9	0,18	19,5	0,19
250	24,8	0,15	27,9	0,13	29,4	0,13
315	23,3	0,16	24,2	0,15	26,4	0,14
400	18,0	0,20	19,7	0,18	18,1	0,20
500	12,8	0,27	13,2	0,26	14,2	0,25
630	6,4	0,47	7,3	0,43	7,9	0,40
800	2,6	0,80	3,0	0,75	3,4	0,70
1000	1,6	0,95	1,4	0,98	1,4	0,97
1250	3,1	0,74	1,3	0,99	3,0	0,75
1600	7,2	0,43	2,9	0,77	6,5	0,46
2000	14,5	0,24	5,7	0,51	13,6	0,25
2500	16,7	0,21	7,4	0,42	13,9	0,25
3150	16,5	0,22	6,3	0,47	7,5	0,42
4000	8,5	0,38	5,5	0,52	5,5	0,52
5000	8,0	0,40	5,7	0,51	5,8	0,50
6000	3,3	0,71	5,0	0,56	3,2	0,73
6300	2,0	0,89	2,0	0,89	2,3	0,85



Graf 12 Závislost činitele zvukové pohltivosti receptur 4, 5 a 6 na frekvenci

Do 1000 Hz nabývají jednotlivé receptury přibližně stejných hodnot činitele zvukové pohltivosti. Dále však je na tom výrazně lépe receptura 5, která se pohybuje ve vyšších hodnotách než ostatní receptury. V oblasti 1000–1250 Hz vykazuje receptura 5 lepší hodnoty činitele zvukové pohltivosti než zbývající dvě receptury, což je způsobeno lepším vyplněním mezer mezi zrny frakce 2–4 mm menšími zrny frakce 1–2 mm.

7.4. VYHODNOCENÍ MATERIÁLU

V praktické části byly provedeny zkoušky pro stanovení důležitých vlastností mezerovitého cihlobetonu, kde je jako alternativní kamenivo použit cihelný recyklát.

Nejdříve bylo provedeno míchání s různým množstvím cementu a různými směsmi frakcí cihelného recyklátu pro zjištění základních vlastností: objemová hmotnost v čerstvém a ve ztvrdlém stavu, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu.

Nejlepších hodnot pevností dosahuje dle předpokladu cihlobeton s 200 kg cementu na 1 m³ betonu. Jako nejlepší byla vyhodnocena sada receptur 3 s poměrem frakcí 0:70:30, která má při množství 200 a 150 kg cementu výborný poměr mezi pevností v tlaku s objemovou hmotností a vykazuje nejlepší vyplnění

a nejméně se při manipulaci drolí. Proto byla tato směs frakcí cihelného recyklátu vybrána jako výchozí při návrhu dalších receptur.

Na základě těchto zjištění byly navrženy další receptury, kde bylo množství cementu pro všechny receptury 200 kg na 1 m³ betonu. Měnil se zde poměr frakcí, kdy frakce 4–8 mm u všech receptur zcela chyběla a poměr frakcí 2–4 mm a 1–2 mm byl u receptury 4 70:30, u receptury 5 30:70 a u receptury 6 50:50.

Tab. 17 Souhrnná tabulka hodnot mezerovitého cihlobetonu s různými směsmi frakcí

vlastnost	jednotka	stáří [dny]	REC 4	REC 5	REC 6
D_{čB}	kg/m ³	0	1220	1230	1230
D	kg/m ³	7	950	1140	980
f_{ct,fl}	MPa	7	0,6	1,4	0,9
f_c	MPa	7	1,6	3,5	2,1
D	kg/m ³	28	990	990	1030
f_{ct,fl}	MPa	28	1,2	1,2	1,3
f_c	MPa	28	2,6	2,5	2,7
D_{dry}	kg/m ³	28	1070	1040	1120
λ_{10,dry}	W/(m·K)	28	0,2240	0,2152	0,2550

U těchto receptur není objemová hmotnost v čerstvém stavu závislá na sypné hmotnosti kameniva, což může být způsobeno různou mírou zaplnění mezer frakcí 1–2 mm a cementovým tmelem. Pro ověření průběžných hodnot pevností a objemové hmotnosti byla u těles zjišťována objemová hmotnost po 7 dnech a příslušné pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Je zde patrná závislost mezi objemovou hmotností a pevností v tlaku i v tahu za ohybu. Nejlepších hodnot dosahovala receptura 5, i když to bylo za cenu vyšší objemové hmotnosti.

Při zkoušení těles po 28 dnech se hodnoty objemové hmotnosti pohybují okolo 1000 kg/m³. U receptury 6 je objemová hmotnost mírně vyšší – 1030 kg/m³. Pevnosti korespondují s hodnotami objemové hmotnosti: pevnost v tahu za ohybu je 1,2 MPa u receptur 4 a 5, u receptury 6 je to 1,3 MPa. Pevnost v tlaku se u všech receptur pohybuje okolo 2,6 MPa. Pokud porovnáme poměry mezi pevností v tlaku a objemovou hmotností, nejlepší hodnot dosahuje receptura 5.

Objemová hmotnost desek, na kterých se stanovovala objemová hmotnost v suchém stavu a příslušný součinitel tepelné vodivosti, je vyšší než objemová hmotnost trámečků. Je to z důvodu vyšší míry zhutnění desek. Nejnižších hodnot objemové hmotnosti, a tudíž i součinitele tepelné vodivosti v suchém stavu dosahují tělesa z receptury 5. Pokud bychom pro lepší porovnatelnost hledali poměr mezi převrácenou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a objemovou hmotností, nejlépe je na tom opět receptura 5.

Co se týká činitele zvukové pohltivosti, nejlepších hodnot dosahuje receptura 5. Do 1000 Hz jsou receptury srovnatelné, poté dosahují tělesa z receptury 5 lepších hodnot než zbývající dvě receptury. Jediný výkyv u receptury 5 nastává při frekvenci 6000 Hz, při této frekvenci dosahuje receptura 5 nižší

hodnoty než zbývající dvě receptury. Tato frekvence je však vysoko nad frekvencí lidského hlasu, proto by u žádné receptury neměl být problém při běžném hluku.

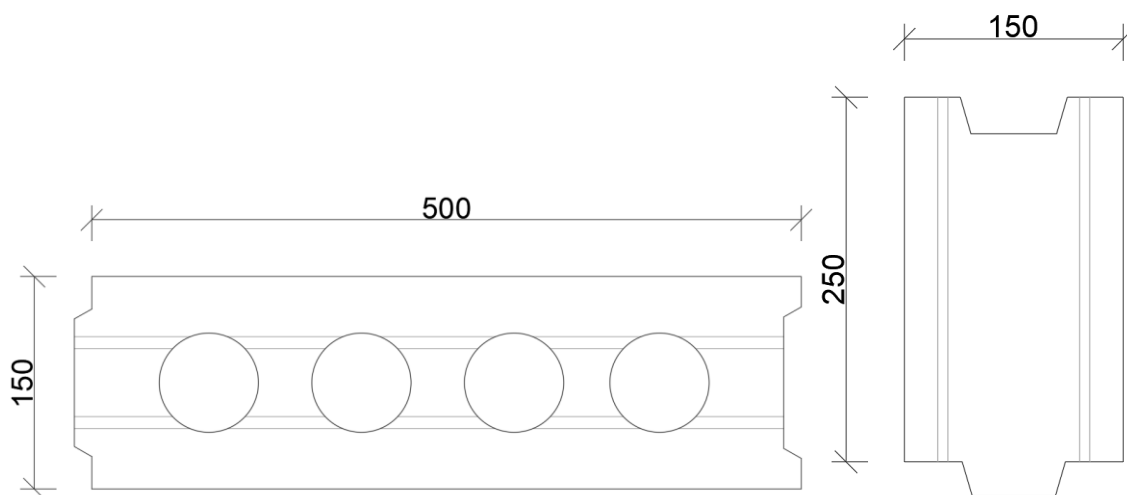
Z toho všeho tedy vyplývá, že receptura 5 dosahuje výborných absolutních hodnot jednotlivých vlastností, ale i skvělého poměru mezi těmito hodnotami, a byla proto vybrána pro návrh tvarovky.

8. NÁVRH ZDICÍHO SYSTÉMU

Na základě návrhu receptur, jejich zkoušení a vyhodnocení vyšla jako nejlepší receptura 5, která má poměr frakcí 2–4 mm a 1–2 mm 30:70. Z tohoto materiálu byla navržena tvarovka v několika rozměrových modulech a s různou mírou vylehčení (na obr. 20 zobrazena tvarovka o rozměrech 150x250x500 mm s vylehčením 20 %).

Tvarovka byla navrhována tak, aby zjednodušila výstavbu. Způsoby, jak toho lze dosáhnout, jsou jednak zvětšení rozměrů, což urychlí výstavbu, jednak zvýšení míry vylehčení, čímž se zlepší manipulovatelnost.

Tvarovka má zámky jak v podélném, tak ve svislém směru, dojde tedy ke spojení pero-drážka ve dvou směrech. Jsou zde 4 svislé otvory sloužící k vylehčení, případně k manipulaci s tvarovkou. Pokud by byly otvory dobře umístěné, mohly by být ve svislém směru průběžné, tím by umožňovaly vedení rozvodů s malým průměrem. Vedení větších rozvodů je možné realizovat zasekáním jako např. u pórobetonových tvárnic nebo keramických zdicích prvků. Jelikož se materiál po zásahu tvrdým předmětem značně drolí, nebude problém s vysekáváním. To umožňuje i snadnou dělitelnost tvarovky, která zjednoduší práci na stavbě.



Obr. 20 Tvarovka – pohled shora a zepředu

8.1. ZPŮSOB ZDĚNÍ

Existují 2 typy zdění: mokrý způsob, kdy se nanáší zdicí malta na nebroušené prvky v tlustší vrstvě (okolo 12 mm), a suchý způsob, kdy je spojovací materiál nanášen v tenké vrstvě (do 5 mm).

Suchý způsob zdění má výhody v rychlosti a jednoduchosti zdění, čistotě staveniště, možnosti zdění do teploty až $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, absenci tepelných mostů ve spárách, rychlosti nabytí pevnosti spojení a rovinnosti zdiva, což tvoří dobrý základ pro aplikaci omítky. Aby se jednalo o suchý způsob zdění, je zde možnost volit mezi zděním na lepidlo, což je zdicí malta pro tenkou spáru, nebo na zdicí PUR pěnu.

Jelikož se v tomto případě jedná o zdivo pro přesnou výstavbu s ložnou spárou do 1 mm, je navrženo zdění na PUR pěnu v ložné spáře, styčná spára bude

bez výplně spojována na sraz. Vzhledem k nízké tloušťce ložné spáry bude nutné zdící prvky vyrábět s vysokou rozměrovou přesností. Zdění na PUR pěnu je rychlé a minimalizuje mokrý proces během výstavby. Díky jejímu použití dojde ke zlepšení tepelně izolačních vlastností zdícího systému.

8.2. ÚPRAVA ROZMĚROVÝCH MODULŮ A MÍRY VYLEHČENÍ

Je navrženo několik rozměrových modulů s různou mírou vylehčení, které budou mezi sebou dále porovnány na základě pevnosti v tlaku, laboratorní vzduchové neprůzvučnosti a součinitele tepelné vodivosti, resp. součinitele prostupu tepla. Jako tloušťka prvku byly uvažovány hodnoty 100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm a 200 mm. Délka nabývá hodnot 250 mm, 375 mm a 500 mm. Výška je 250 mm, nebo 500 mm. U vylehčení bylo počítáno s hodnotami 0 %, 10 %, 20 % a 30 %. Při upravování rozměrových modulů a míry vylehčení tvarovek bylo použito následující značení:

- první číslo značí tloušťku prvku v mm,
- druhé číslo značí délku prvku v dm,
- třetí číslo značí výšku prvku v dm,
- čtvrté číslo značí míru vylehčení v %.

Vlastnosti upravených tvarovek vychází z receptury 5 a její objemové hmotnosti 990 kg/m^3 , pevnosti v tlaku 2,5 MPa a součinitele tepelné vodivosti $0,2152 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Tvar a vnitřní uspořádání vychází z tvarovky na obr. 20.

Pro přepočítání pevnosti v tlaku materiálu, který má u receptury 5 hodnotu 2,5 MPa, byl použit vzorec dle [5]:

$$f_{c,unit} = f_c - \frac{A'/A}{100} \cdot f_c$$

kde: $f_{c,unit}$...pevnost v tlaku zdícího prvku [MPa]

f_c ...pevnost v tlaku materiálu [MPa]

A'/A ...vylehčení prvku [%]

Laboratorní vzduchová neprůzvučnost byla vypočítána z objemové hmotnosti 990 kg/m^3 na základě ČSN EN ISO 717-1 pomocí porovnávací metody v třetinooktávních pásmech dle [83] ze vztahu:

$$R_w = 20 \cdot \log(m'f) - 47,5$$

kde: R_w ...laboratorní vzduchová neprůzvučnost [dB]

m' ...plošná hmotnost [kg/m^2]

f ...frekvence [Hz]

Ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti byla vypočítána jako vážený průměr součinitele tepelné vodivosti materiálu v suchém stavu receptury 5, která dle ČSN EN 12667 činí $0,2152 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, a součinitele tepelné vodivosti vzduchu, který byl vypočítán z tepelného odporu vzduchu s hodnotou $0,18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ dle ČSN EN ISO 6946, na základě míry vylehčení. Součinitel prostupu tepla byl následně vypočítán ze součinitele tepelné vodivosti s přepočtem na vlhkost prvku 3 % objemová dle ČSN EN ISO 10456 [84] [85] [86].

Na základě provedeného průzkumu trhu a požadavků vyhlášky č. 268/2009 Sb. byly stanoveny požadavky na nový zdicí systém vyvíjený v rámci této práce:

- pevnost v tlaku by měla dosahovat hodnoty min. 2 MPa,
- součinitel tepelné vodivosti ve vysušeném stavu max. 0,35 W/(m·K),
- součinitel prostupu tepla max. 1,8 W/(m²·K),
- vzduchová neprůzvučnost by měla být alespoň 43 dB,
- hmotnost jedné tvarovky nejvýše 21,0 kg [8] [9].

Požadované pevnosti v tlaku nedosahují varianty s vylehčením 30 %. Požadavek na součinitel tepelné vodivosti splňují všechny varianty, stejně tak i stanovenou hodnotu součinitele prostupu tepla. Vzduchová neprůzvučnost nevyhovuje u variant s tloušťkou 100 mm a vylehčením 30 %. U některých variant s většími rozměry je hmotnost vyšší než stanovených 21,0 kg.

Tab. 18 Varianty rozměrových modulů a míry vylehčení vyhovující požadavkům

vlastnost	t	d	v	A'/A	m	m'	D	f _{c,unit}	R _w	λ _{10,dry,unit}	U _{mas}
varianta/jedn.	mm	mm	mm	%	kg	kg/m ²	kg/m ³	MPa	dB	W/(m·K)	W/(m ² ·K)
100-5-2,5-0	100	500	250	0	12,4	99,0	990	2,5	46,0	0,2152	1,49
100-2,5-2,5-0	100	250	250	0	6,2	99,0	990	2,5	46,0	0,2152	1,49
100-2,5-5-0	100	250	500	0	12,4	99,0	990	2,5	46,0	0,2152	1,49
100-3,75-2,5-0	100	375	250	0	9,3	99,0	990	2,5	46,0	0,2152	1,49
100-3,75-5-0	100	375	500	0	18,6	99,0	990	2,5	46,0	0,2152	1,49
100-5-2,5-10	100	500	250	10	11,1	89,1	890	2,3	45,1	0,2094	1,46
100-2,5-2,5-10	100	250	250	10	5,6	89,1	890	2,3	45,1	0,2094	1,46
100-2,5-5-10	100	250	500	10	11,1	89,1	890	2,3	45,1	0,2094	1,46
100-3,75-2,5-10	100	375	250	10	8,4	89,1	890	2,3	45,1	0,2094	1,46
100-3,75-5-10	100	375	500	10	16,7	89,1	890	2,3	45,1	0,2094	1,46
100-5-2,5-20	100	500	250	20	9,9	79,2	790	2,0	44,1	0,2165	1,49
100-5-5-20	100	500	500	20	19,8	79,2	790	2,0	44,1	0,2165	1,49
100-2,5-2,5-20	100	250	250	20	5,0	79,2	790	2,0	44,1	0,2165	1,49
100-2,5-5-20	100	250	500	20	9,9	79,2	790	2,0	44,1	0,2165	1,49
100-3,75-2,5-20	100	375	250	20	7,4	79,2	790	2,0	44,1	0,2165	1,49
100-3,75-5-20	100	375	500	20	14,9	79,2	790	2,0	44,1	0,2165	1,49
125-5-2,5-0	125	500	250	0	15,5	123,8	990	2,5	47,9	0,2152	1,29
125-2,5-2,5-0	125	250	250	0	7,7	123,8	990	2,5	47,9	0,2152	1,29
125-2,5-5-0	125	250	500	0	15,5	123,8	990	2,5	47,9	0,2152	1,29
125-3,75-2,5-0	125	375	250	0	11,6	123,8	990	2,5	47,9	0,2152	1,29
125-5-2,5-10	125	500	250	10	13,9	111,4	890	2,3	47,0	0,2112	1,27
125-2,5-2,5-10	125	250	250	10	7,0	111,4	890	2,3	47,0	0,2112	1,27
125-2,5-5-10	125	250	500	10	13,9	111,4	890	2,3	47,0	0,2112	1,27
125-3,75-2,5-10	125	375	250	10	10,4	111,4	890	2,3	47,0	0,2112	1,27
125-3,75-5-10	125	375	500	10	20,9	111,4	890	2,3	47,0	0,2112	1,27
125-5-2,5-20	125	500	250	20	12,4	99,0	790	2,0	46,0	0,2217	1,32
125-2,5-2,5-20	125	250	250	20	6,2	99,0	790	2,0	46,0	0,2217	1,32
125-2,5-5-20	125	250	500	20	12,4	99,0	790	2,0	46,0	0,2217	1,32

vlastnost	t	d	v	A'/A	m	m'	D	f _{c,unit}	R _w	λ _{10,dry,unit}	U _{mas}
varianta/jedn.	mm	mm	mm	%	kg	kg/m ²	kg/m ³	MPa	dB	W/(m·K)	W/(m ² ·K)
125-3,75-2,5-20	125	375	250	20	9,3	99,0	790	2,0	46,0	0,2217	1,32
125-3,75-5-20	125	375	500	20	18,6	99,0	790	2,0	46,0	0,2217	1,32
150-5-2,5-0	150	500	250	0	18,6	148,5	990	2,5	49,5	0,2152	1,14
150-2,5-2,5-0	150	250	250	0	9,3	148,5	990	2,5	49,5	0,2152	1,14
150-2,5-5-0	150	250	500	0	18,6	148,5	990	2,5	49,5	0,2152	1,14
150-3,75-2,5-0	150	375	250	0	13,9	148,5	990	2,5	49,5	0,2152	1,14
150-5-2,5-10	150	500	250	10	16,7	133,7	890	2,3	48,6	0,2129	1,13
150-2,5-2,5-10	150	250	250	10	8,4	133,7	890	2,3	48,6	0,2129	1,13
150-2,5-5-10	150	250	500	10	16,7	133,7	890	2,3	48,6	0,2129	1,13
150-3,75-2,5-10	150	375	250	10	12,5	133,7	890	2,3	48,6	0,2129	1,13
150-5-2,5-20	150	500	250	20	14,9	118,8	790	2,0	47,6	0,2264	1,18
150-2,5-2,5-20	150	250	250	20	7,4	118,8	790	2,0	47,6	0,2264	1,18
150-2,5-5-20	150	250	500	20	14,9	118,8	790	2,0	47,6	0,2264	1,18
150-3,75-2,5-20	150	375	250	20	11,1	118,8	790	2,0	47,6	0,2264	1,18
175-2,5-2,5-0	175	250	250	0	10,8	173,3	990	2,5	50,9	0,2152	1,02
175-3,75-2,5-0	175	375	250	0	16,2	173,3	990	2,5	50,9	0,2152	1,02
175-5-2,5-10	175	500	250	10	19,5	155,9	890	2,3	49,9	0,2144	1,02
175-2,5-2,5-10	175	250	250	10	9,7	155,9	890	2,3	49,9	0,2144	1,02
175-2,5-5-10	175	250	500	10	19,5	155,9	890	2,3	49,9	0,2144	1,02
175-3,75-2,5-10	175	375	250	10	14,6	155,9	890	2,3	49,9	0,2144	1,02
175-5-2,5-20	175	500	250	20	17,3	138,6	790	2,0	48,9	0,2308	1,07
175-2,5-2,5-20	175	250	250	20	8,7	138,6	790	2,0	48,9	0,2308	1,07
175-2,5-5-20	175	250	500	20	17,3	138,6	790	2,0	48,9	0,2308	1,07
175-3,75-2,5-20	175	375	250	20	13,0	138,6	790	2,0	48,9	0,2308	1,07
200-2,5-2,5-0	200	250	250	0	12,4	198,0	990	2,5	52,0	0,2152	0,92
200-3,75-2,5-0	200	375	250	0	18,6	198,0	990	2,5	52,0	0,2152	0,92
200-2,5-2,5-10	200	250	250	10	11,1	178,2	890	2,3	51,1	0,2158	0,92
200-3,75-2,5-10	200	375	250	10	16,7	178,2	890	2,3	51,1	0,2158	0,92
200-5-2,5-20	200	500	250	20	19,8	158,4	790	2,0	50,1	0,2348	0,98
200-2,5-2,5-20	200	250	250	20	9,9	158,4	790	2,0	50,1	0,2348	0,98
200-2,5-5-20	200	250	500	20	19,8	158,4	790	2,0	50,1	0,2348	0,98
200-3,75-2,5-20	200	375	250	20	14,9	158,4	790	2,0	50,1	0,2348	0,98

Byla hledána taková varianta, která by byla pro všechny tloušťky stejná, aby nebylo nutné vyrábět pro každou tloušťku jinou rozměrovou variantu. Tato varianta má vést ke zjednodušení výstavby, čehož lze dosáhnout zvětšením rozměrů a tím se urychlí výstavba. Na základě těchto úvah vyšly jako nejlepší varianty tx500x250 mm s vylehčením 20 %. Díky relativně vysoké míře vylehčení mají nízkou hmotnost, bude se proto s nimi dobře manipulovat. Zároveň však dosahují skvělých hodnot vzduchové neprůzvučnosti a součinitele tepelné vodivosti. V tab. 18 jsou tyto varianty označeny zeleně.

Pokud bychom chtěli vlastnosti této tvarovky srovnat s vlastnostmi tvarovek z průzkumu trhu, lze konstatovat, že tvarovka vyvíjená v rámci této práce dosahuje srovnatelných, někdy až nadprůměrných hodnot, obzvláště v oblasti součinitele tepelné vodivosti. Co se týká zvukové neprůzvučnosti, při tloušťkách 125 mm a 150 mm má vyšší hodnoty než v případě tvarovek z průzkumu trhu, pro tloušťky 175 mm a 200 mm dosahuje srovnatelných hodnot.

8.3. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Cena je jednou z hodnot, na základě které lze porovnat konkurenceschopnost výrobku. V ceně výrobku vyvinutého v rámci této práce jsou zahrnuty náklady na suroviny, výrobu a expedici. Pro zhodnocení byla zvolena receptura 5, jelikož dosahuje nejlepších hodnot.

Cenu cihelného zlomu představují režijní náklady na jeho úpravu, které jsou odhadnuty na 100 Kč na tunu.

Tab. 19 Cena surovin za 1 m³ výrobku receptury 5

surovina	množství na 1 m ³ [kg]	jednotková cena [Kč/kg]	cena [Kč/m ³]
cement CEM I 4,5 R	200	2	400
cihelný recyklát	804	0,1	80
voda	274	0,0852	23
plastifikační přísada ViscoCrete 1035	2	130	260
celková cena			764

Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že suroviny tvoří 50 % celkové ceny. Byly vybrány 3 výrobky: Liapor KM 175, Ytong Klasik 150 P2-500 a Silka HM 150 (20-2,0), u nichž byla na základě prodejní ceny odhadnuta cena výroby, kdy odhad ceny výroby je založen na předpokladu, že výroba tvoří 50 % ceny. Tato cena byla brána jako cena výroby tvarovky z mezerovitého cihlobetonu. Dále byla spočítána cena surovin potřebných pro výrobu tvarovky z mezerovitého cihlobetonu receptury 5 o rozměrech 150x500x250 mm s vylehčením 20 %. Při přepočtu celkové ceny na 1 m² je cena přibližně 305 Kč. Největším konkurentem je pórobeton, pro porovnání byl vybrán výrobek Ytong Klasik 150 P2-500, jehož cena se pohybuje okolo 100 Kč za kus, za 1 m² je to tedy 550 Kč.

Cena mezerovitého cihlobetonu na 1 m² je téměř o polovinu nižší. Pokud by náklady na pořízení či úpravu cihelného zlomu byly vyšší než předpokládané, stále je možné udržet náklady níž, než jsou náklady konkurence.

8.4. POVRCHOVÁ ÚPRAVA

Tvarovka je navržena pro stavbu zdiva pro přesné zdění jako např. u pórobetonu, proto i povrchová úprava bude řešena jako u tohoto zdicího systému pomocí tenkovrstvé omítky. Ta se skládá ze dvou vrstev: jádrové omítky a štukové omítky. Zdění suchou cestou přináší výhodu v možnosti nanášení povrchové

úpravy po vytvrnutí pojiva, v případě PUR pěny to je do 24 hodin. Na druhou stranu je zde nevýhoda v náročnějším zarovnávání nerovností zdiva. V místech, kde se předpokládá vznik trhlin (rohy otvorů, nehomogenity zdiva), se použije sklovláknitá výztužná tkanina.

8.5. EKOLOGICKÉ ZHODNOCENÍ

Jelikož tvorba EPD je velmi náročný proces, byla pro potřeby diplomové práce zvolena alternativa ve formě obecného srovnání dopadu na životní prostředí tvarovky z mezerovitého cihlobetonu s konkurenčním výrobkem Ytong Klasik 150 P2-500, který byl použit i pro vyhodnocení konkurenceschopnosti na trhu. Výrobky jsou hodnoceny v rámci celého svého životního cyklu ve 4 fázích: výroba, výstavba, užívání a konec životního cyklu [40].

Při výrobě tvarovky z mezerovitého cihlobetonu je použit cihelný recyklát získaný z cihelného zlomu z výroby, který snižuje nejen náklady, ale i dopad na životní prostředí, jelikož není potřeba těžit, dopravit a upravit kamenivo, ale je využita druhotná surovina, která bude dopravována na menší vzdálenosti a její úprava bude méně energeticky náročná. Jelikož byl pro výrobu této tvarovky použit recyklovaný materiál, ponese označení trojúhelníku s obrysovými šipkami. Naproti tomu při výrobě pórobetonu jsou využívány převážně primární zdroje surovin kromě opětovného použití kalu [87].



Obr. 21 Symbol recyklovaného materiálu [87]

Co se týká výstavby, není zde zásadní rozdíl mezi mezerovitým cihlobetonem a pórobetonem. Jednoho i druhého materiálu je použito stejně a oba je možné dělit, přičemž zbytky není možné znovu použít.

V případě užívání tvarovek, resp. staveb z nich postavených je nyní náročné srovnat oba materiály, jelikož mezerovitý cihlobeton je ve fázi vývoje, a jeho životnost je proto možné pouze hrubě odhadovat.

Na to navazuje konec životního cyklu. V případě mezerovitého cihlobetonu je možné ho zrecyklovat a znovu použít ke stejné výrobě. Alternativní využití je nardceny materiál použít pro zásypy méně zatížených komunikací. Pórobeton lze po konci životnosti použít například jako stelivo pro domácí zvířata. Proto dopad na životní prostředí v této fázi životního cyklu je u mezerovitého cihlobetonu menší.

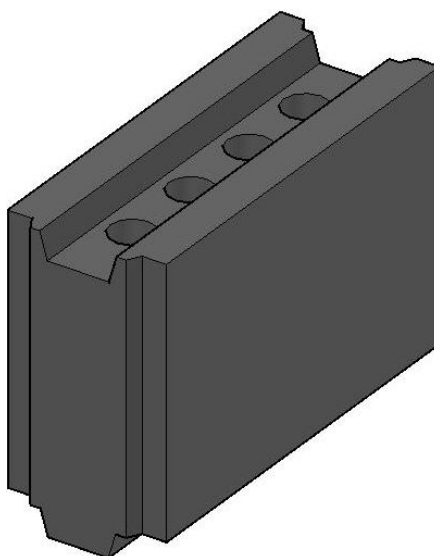
Využití druhotných surovin vede ke snížení dopadu na životní prostředí. V tomto případě je využít cihelný zlom z výroby upravený na cihelný recyklát, díky čemuž jsou dopady mezerovitého cihlobetonu na životní prostředí sníženy oproti konkurenci ve formě pórobetonu.

9. ZÁVĚR

Diplomová práce zpracovává téma využití cihelného recyklátu pro výrobu mezerovitého cihlobetonu, z kterého je následně navržena tvarovka pro jednoduchou výstavbu vnitřních dělicích konstrukcí. Literární rešerše zpracovává témata, která byla dále řešena v praktické části. Jedná se o svislé konstrukce a možnosti jejich výstavby s důrazem na zděné konstrukce, lehké betony a možnosti jejich vylehčování a životní cyklus produktu se zaměřením na využití druhotných surovin a stavebního odpadu. V krátkosti byl také probrán cihelný recyklát, který byl v praktické části použit jako alternativa místo klasického kameniva do betonu.

V praktické části se práce nejprve zabývá průzkumem trhu v oblasti zděných konstrukcí se zaměřením na keramické zdicí prvky, pórobetonové tvárnice, vápenopískové zdicí prvky a betonové tvárnice s pórovitým kamenivem. Jeho cílem bylo najít možnosti řešení výstavby zděných příček z evropského trhu.

Na to navazuje návrh mezerovitého cihlobetonu, kde je jako alternativa za kamenivo použit cihelný recyklát. Nejprve byl zkoušen samotný cihelný recyklát, který byl rozdělen do frakcí 4–8 mm, 2–4 mm a 1–2 mm. U těchto frakcí a jejich směsí v různých poměrech byla stanovována sypaná hmotnost volně sypaného kameniva, jelikož se předpokládaly vyšší pevnosti s vyšší sypanou hmotností. Poté byl navržen samotný mezerovitý cihlobeton s různým množstvím cementu a s různými poměry frakcí. Na základě zkoušení vlastností těchto receptur bylo stanoveno optimální množství cementu 200 kg, jelikož došlo k nejlepšímu provázání zrn cihelného recyklátu, a výchozí směs frakcí v poměru 70:30, která i přes nejvyšší obsah frakce 1–2 mm dosahovala srovnatelných pevností s ostatními recepturami, ale na rozdíl od ostatních se tato tělesa při manipulaci nedrolila. Tyto hodnoty byly použity pro návrh dalších receptur. U nich byl měněn pouze poměr frakcí cihelného recyklátu. Po stanovení klíčových vlastností byla vyhodnocena nejlepší receptura s poměrem frakcí 30:70, jelikož dosahovala skvělých hodnot i poměru mezi těmito hodnotami. Z této receptury byla následně navržena tvarovka.



Obr. 22 3D model tvarovky z mezerovitého cihlobetonu

Tvarovka má spojení pero-drážka v podélném i svislém směru. Uvnitř jsou 4 svislé otvory, které slouží k vylehčení, případně k vedení rozvodů bez nutnosti zasekávání. Dále byl navržen způsob zdění. Tvarovka byla navržena v několika rozměrových modulech a s různou mírou vylehčení. Byly stanoveny požadavky na tyto varianty v oblasti pevnosti v tlaku, součinitele tepelné vodivosti, součinitele prostupu tepla, vzduchové neprůzvučnosti a hmotnosti tvarovky. Tyto hodnoty byly spočítány pro jednotlivé varianty. Následně byla na základě zadaných kritérií vyhodnocena nejlepší varianta tx500x250 mm s vylehčením 20 %. V tab. 20 jsou uvedeny vlastnosti výsledné tvarovky o rozměrech tx500x250 mm s vylehčením 20 %.

Poté byla navržena povrchová úprava a spočítána cena, na jejímž základě byla vyhodnocena konkurenceschopnost tvarovky na trhu. Nakonec byla tvarovka zhodnocena z ekologického hlediska, tj. její dopad na životní prostředí.

Tab. 20 Vlastnosti výsledného výrobku

vlastnost	tloušťka [mm]				
	100	125	150	175	200
m [kg]	9,9	12,4	14,9	17,3	19,8
D [kg/m³]	790	790	790	790	790
f_{c,unit} [MPa]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
R_w [dB]	44,1	46,0	47,6	48,9	50,1
λ_{10,dry,unit} [W/(m·K)]	0,2165	0,2217	0,2264	0,2308	0,2348
U_{mas} [W/(m²·K)]	1,49	1,32	1,18	1,07	0,98

V porovnání se svisle děrovanou keramickou tvarovkou, např. s výrobkem PoroTherm 11,5 Profi Dryfix dosahuje tvarovka tloušťky 100 mm z mezerovitého cihlobetonu lepší hodnoty součinitele tepelné vodivosti a vzduchové neprůzvučnosti a má nižší hmotnost, na druhou stranu nabývá nižší pevnosti v tlaku. Naproti tomu, pokud porovnáme tuto tvarovku s výrobkem YTONG Klasik 100, má pouze nepatrně vyšší hmotnost a horší hodnoty pevnosti v tlaku a součinitele tepelné vodivosti, zato má vyšší hodnotu vzduchové neprůzvučnosti.

Tvarovku z mezerovitého betonu s tloušťkou 100 mm lze vyrábět i ve větším formátu 500x500 mm a stále vyhoví všem požadavkům stanoveným v této práci i normovým požadavkům. Zvětšením formátu tvarovky dojde ke zrychlení výstavby.

Velkou výhodou tohoto zdicího systému je šetrnost k životnímu prostředí. Cihelný zlom z výroby je běžně klasifikován jako odpad, a je proto nákladně skládán. Nyní je možné jej smysluplně využít k výrobě cihelného recyklátu, který je dále použit jako alternativa za kamenivo do betonu.

Na základě výše uvedených informací lze předpokládat, že tvarovka z mezerovitého cihlobetonu by v konkurenci ostatních výrobků dostupných na trhu rozhodně nezapadla.

ZDROJE

- [1] *eBETON* [online]. [cit. 2.12.2021]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/>
- [2] *Politika druhotných surovin České republiky*. [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu. Praha: červenec 2014 [cit. 2.12.2021]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/50488/58195/615530/priloha002.pdf>
- [3] Co je cihelný recyklát? In: *Radílek.cz* [online]. [cit. 27.11.2021]. Dostupné z: <https://www.radilek.cz/slovník-pojmu/cihlovy-cihelny-recyklát/>
- [4] *Časopis stavebnictví* [online]. [cit. 9.12.2021]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/>
- [5] ČSN EN 1996-1-1+A1. *Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené konstrukce*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [6] *Studijni-svet.cz* [online]. [cit. 16.11.2021]. Dostupné z: <https://studijni-svet.cz/svisle-nosne-konstrukce-pozemni-stavitelstvi/>
- [7] ZACH, Jiří. *Optimalizace užití stavebních látek* [přednášky]. Brno: VUT v Brně, zimní semestr 2021/2022.
- [8] ČESKO. *Vyhláška č. 268/2009 Sb., Vyhláška o technických požadavcích na stavby ve znění pozdějších předpisů*. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 15.11.2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-268>
- [9] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [10] ČSN 73 0532. *Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních konstrukcí a výrobků – Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [11] ČSN EN 13501-2. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [12] ČSN EN 13501-1. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [13] ČSN EN 13670. *Provádění betonových konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [14] ČSN 73 2480. *Provádění a kontrola montovaných betonových konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [15] *Svislé nosné konstrukce: Stěny, sloupy, pilíře* [online]. [cit. 17.11.2021]. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/pst/novotny.m/04.svisle_nos.kce.pdf
- [16] ČSN EN 771-1+A1. *Specifikace zdicích prvků – Část 1: Pálené zdicí prvky*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [17] ČSN EN 771-2+A1. *Specifikace zdicích prvků – Část 2: Vápenopískové zdicí prvky*. Praha: Český normalizační institut, 2017.

- [18] ČSN EN 771-3+A1. *Specifikace zdicích prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [19] ČSN EN 771-4+A1. *Specifikace zdicích prvků – Část 4: Pórobetonové tvárnice*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [20] ČSN EN 771-5+A1. *Specifikace zdicích prvků – Část 5: Zdicí prvky z umělého kamene*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [21] ČSN EN 771-6+A1. *Specifikace zdicích prvků – Část 6: Zdicí prvky z přírodního kamene*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [22] PODROUŽKOVÁ, Božena a Rostislav JENEŠ. *Zděné konstrukce: M01 Základy navrhování*. Brno: 2005. Dostupné také z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL06-Zdene%20konstrukce%20\(S\)/MS1-Zaklady%20navrhovani.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL06-Zdene%20konstrukce%20(S)/MS1-Zaklady%20navrhovani.pdf)
- [23] LÍZAL, Petr. *Technologie staveb I: Modul 5 Technologický proces zdění*. Brno: 2005. Dostupné také z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BW01-Technologie%20staveb%20I/M05-Technologicky%20proces%20zdeni.pdf>
- [24] ROZMĚROVÁ KOORDINACE, UNIFIKACE, TECHNICKÁ NORMALIZACE [online]. [cit. 6.12.2021]. Dostupné z: <http://kikinacek.xf.cz/index.htm>
- [25] ČSN EN 998–2. *Specifikace malt pro zdění – Část 2: Malta pro zdění*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [26] ASB-PORTAL.CZ [online]. [cit. 4.12.2021]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/>
- [27] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [28] NOVÁK, Jaroslav. *Nauka o materiálech 10: stavební materiály I*. Praha: ČVUT, 1997, 178 s. ISBN 80-01-01619-6
- [29] DROCHYTKA, Rostislav. *Lehké stavební látky [přednášky]*. Brno: VUT v Brně, zimní semestr 2018/2019.
- [30] ČSN 73 6124–2. *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsi stmelěných hydraulickými pojivy – Část 2: Mezerovitý beton*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [31] HofmannBeton [online]. [cit. 6.12.2021]. Dostupné z: <http://www.hofmannbeton.cz/>
- [32] ČSN EN 13055. *Pórovité kamenivo*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [33] YTONG [online]. [cit. 6.12.2021]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/>
- [34] QUATEST [online]. [cit. 6.12.2021]. Dostupné z: <https://quatest2.com.vn/cs/>
- [35] STRÁNSKÁ, Zuzana. *Hodnocení přírodních a recyklovaných surovin a materiálů v budovách*. Brno, 2018. 119 s., 13 s. příl., příl. CD. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Sedlák, CSc.
- [36] ATELIER DEK [online]. [cit. 6.12.2021]. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/>
- [37] ČSN EN ISO 14040. *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

- [38] WEINZETTEL, Jan. *Ekologie materiálů a procesů* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze. Dostupné z: <https://docplayer.cz/42331762-Posuzovani-zivotniho-cyklu-life-cycle-assessment-lca.html>
- [39] Life-cycle assessment. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006 [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment#Gate-to-gate
- [40] ČSN EN 15978. *Udržitelnost staveb – Posuzování environmentálních vlastností budov – Výpočtová metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [41] Česká informační agentura životního prostředí [online]. [cit. 23.9.2021]. Dostupné z: <https://www.cenia.cz/>
- [42] Environmentální prohlášení o produktu. In: *Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p.* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.tzus.cz/sluzby/certifikace-budov/prohlaseni-epd-lca-analyza/environmentalni-prohlaseni-o-produktu>
- [43] ČSN ISO 14025. *Environmentální značky a prohlášení – Environmentální prohlášení typu III – Zásady a postupy*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [44] ČSN EN 15804+A1. *Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [45] ŽIŽKOVÁ, Nikol. *Ekologie ve stavebnictví* [přednášky]. Brno: VUT v Brně, zimní semestr 2021/2022.
- [46] BOHÁČOVÁ, Jana a Stanislav STANĚK. *Možnosti využití druhotných surovin a recyklátů ve stavebnictví*. In: *Czech Journal of Civil Engineering*. [online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/349358845_MOZNOSTI_VYUZITI_DRUHOTNYCH_SUROVIN_A_RECYKLATU_VE_STAVEBNICTVI
- [47] HELA, Rudolf. *Možnosti využívání odpadních surovin ve stavebnictví*. In: *ASB-PORTAL.CZ* [online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/moznosti-vyuzivani-odpadnich-surovin-ve-stavebnictvi>
- [48] HOSSAIN Uzzal, Dongxing XUAN, Thomas NG a Ben AMOR. Designing sustainable partition wall blocks using secondary materials: A life cycle assessment approach. *Journal of Building Engineering* [online]. Elsevier, 2021, 43, 103035 [cit. 6.12.2021]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103035>. ISSN 2352-7102
- [49] ČESKO. *Zákon č. 541/2020 Sb., Zákon o odpadech*. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 4.12.2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>
- [50] PAVLŮ a kol. *Recyklujeme stavby! – Webový katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin*. [online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z www.recyklujmestavby.cz, ČVUT v Praze UCEEB, Agentura ČAS 2018

- [51] *Recyklace Procházka s. r. o.* [online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://www.recyklace-prochazka.cz/>
- [52] *MRJ s.r.o.* [online]. [cit. 4.12.2021]. Dostupné z: <https://eshop.mrj.global/cs/>
- [53] NOVOTNÝ, Bohumil. *Hodnocení kvality a možnosti využití stavebních recyklátů*. Brno, 2001. 24 str. Teze habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. ISBN 80-214-1137-6. Dostupné též z: https://www.vut.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=762&publikace_id=118
- [54] LIU Xu, Jin WU, Xing ZHAO, Pengpeng YAN a Weiyi Ji. Effect of brick waste content on mechanical properties of mixed recycled concrete. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2021, 292, 123320 [cit. 6.12.2021]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123320>. ISSN 0950-0618
- [55] OLOFINNADE Oluwarotimi a Joshua OGARA. Workability, strength, and microstructure of high strength sustainable concrete incorporating recycled clay brick aggregate and calcined clay. *Cleaner Engineering and Technology* [online]. Elsevier, 2021, 3, 100123 [cit. 6.12.2021]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100123>. ISSN 2666-7908
- [56] *Wienerberger* [online]. [cit. 14.7.2021] Dostupné z: <https://www.wienerberger.cz/>
- [57] *Heluz* [online]. [cit. 19.7.2021]. Dostupné z: <https://www.heluz.cz/>
- [58] *Leier.sk* [online]. [cit. 19.7.2021]. Dostupné z: <http://www.leier.sk/uvodna-stranka>
- [59] *SCHLAGMANN POROTON®* [online]. [cit. 19.7.2021]. Dostupné z: <https://www.schlagmann.de/de/Home>
- [60] *PEZINSKÉ TEHELNE – PANELÁREŇ, a.s.* [online]. [cit. 19.7.2021]. Dostupné z: <https://www.pezinske-tehelne.sk/>
- [61] *BRITTERM* [online]. [cit. 19.7.2021]. Dostupné z: <https://www.britterm.sk/>
- [62] *THERMOPOR®* [online]. [cit. 19.7.2021]. Dostupné z: <http://thermopor.de/>
- [63] *DANESI* [online]. [cit. 20.7.2021]. Dostupné z: <https://www.danesilaterizi.it/>
- [64] *FORNACI DCB, LATERIZI BRANELLA* [online]. [cit. 21.7.2021]. Dostupné z: <http://www.fornacidcb.it/>
- [65] *LEIPFINGER-BADER Ziegelwerke* [online]. [cit. 21.7.2021]. Dostupné z: <https://www.leipfinger-bader.de/>
- [66] *T2D* [online]. [cit. 22.7.2021]. Dostupné z: <https://t2d.it/>
- [67] *Erbersdobler* [online]. [cit. 22.7.2021]. Dostupné z: <https://www.erbersdobler-ziegel.de/>
- [68] *Grupo Díaz Redondo* [online]. [cit. 27.7.2021]. Dostupné z: <http://www.grupodiazredondo.com/en/index.html>
- [69] *Decorus ITALY* [online]. [cit. 27.7.2021]. Dostupné z: <https://www.decorus.it/>
- [70] *Porfix* [online]. [cit. 8.7.2021]. Dostupné z: <https://www.porfix.cz/>
- [71] *YTONG* [online]. [cit. 8.7.2021]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/>
- [72] *Hebel* [online]. [cit. 8.7.2021]. Dostupné z: <https://www.hebel.cz/>
- [73] *Liapor* [online]. [cit. 14.7.2021]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz/>

- [74] Portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý. *ČESKOMORAVSKÝ CEMENT, a.s.* [online]. [cit. 15.10.2021]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>
- [75] Sika ViscoCrete 1035. *Sika CZ, s.r.o.* [online] [cit. 15.10.2021]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/produkty-pro-stavebnictvi/prisady-do-betonu/superplastifikacni-prisady/sika-viscocrete-1035cz.html>
- [76] ČSN EN 1097-3. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva.* Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [77] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.* Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [78] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.* Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [79] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [80] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.* Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [81] ČSN EN 12667. *Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla topného toku dle ISO 8301.* Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [82] ČSN ISO 10534-1. *Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny.* Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [83] ČSN EN ISO 717-1. *Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost.* Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [84] ČSN EN 1745. *Zdivo a výrobky pro zdivo – Metody stanovení tepelných vlastností.* Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [85] ČSN EN ISO 6946. *Stavební prvky a stavební konstrukce – Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtové metody.* Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [86] ČSN EN ISO 10456. *Stavební materiály a výrobky – Tepelně vlhkostní vlastnosti – Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových hodnot.* Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [87] *Organikk* [online]. [cit. 6.1.2022]. Dostupné z: <https://www.organikk.cz/blog/recyklacni-znacky/>

SEZNAMY

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Cihelný recyklát frakce 0–4 mm [4]	10
Obr. 2 Požární odolnost: mezní stav nosnosti, celistvosti a izolace [4].....	12
Obr. 3 Mezerovitý beton [31].....	17
Obr. 4 Pórobetonové tvárnice [33]	19
Obr. 5 Životní cyklus výrobku [36].....	21
Obr. 6 Schéma fází LCA [38]	21
Obr. 7 Hrubý recyklát ze staveništního odpadu [52].....	27
Obr. 8 Vývojový diagram metodiky	30
Obr. 9 Fotografie cihelného recyklátu frakce 1-2 mm, 2-4 mm a 4-8 mm.....	33
Obr. 10 Čerstvá směs s poměrem frakcí 80:20:0 s cementem v množství 200 kg a 150 kg.....	34
Obr. 11 Čerstvá směs s poměrem frakcí 60:30:10 s cementem v množství 200 kg, 150 kg a 100 kg.....	35
Obr. 12 Čerstvá směs s poměrem frakcí 0:70:30 s cementem v množství 150 kg a 100 kg.....	35
Obr. 13 Zkušební tělesa receptur 5, 6 a 7 po odformování	37
Obr. 14 Porušení tělesa při stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech.....	39
Obr. 15 Kundtova impedanční trubice	41
Obr. 16 Cihelný recyklát frakce 4-8 mm - zvětšení 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x	44
Obr. 17 Cihelný recyklát frakce 2-4 mm - zvětšení 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x	45
Obr. 18 Cihelný recyklát frakce 1-2 mm - zvětšení 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x	46
Obr. 19 Zkušební tělesa pro stanovení činitele zvukové pohltivosti.....	57
Obr. 20 Tvarovka – pohled shora a zepředu	61
Obr. 21 Symbol recyklovaného materiálu [87]	66
Obr. 22 3D model tvarovky z mezerovitého cihlobetonu	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Seznam zkoušených vlastností jednotlivých zdicích prvků dle [16] [17] [18] [19] [20] [21]	15
Tab. 2 Výškové a délkové moduly vnitřních nenosných zdicích prvků dle materiálu	16
Tab. 3 Dělení pórovitého kameniva dle původu [29]	19
Tab. 4 Modulové informace pro různé fáze posuzování budovy dle [40]	23
Tab. 5 Přehled receptur na 1 m ³ pro stanovení optimálního množství cementu a směsi frakcí.....	34
Tab. 6 Přehled receptur na 1 m ³ pro stanovení klíčových vlastností	36
Tab. 7 Sypaná hmotnost čistých frakcí a jejich směsí část 1	42

Tab. 8 Sybná hmotnost čistých frakcí a jejich směsí část 2.....	42
Tab. 9 Objemová hmotnost sad receptur 1, 2 a 3 v čerstvém stavu a ztvrdlém stavu	47
Tab. 10 Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku sad receptur 1, 2 a 3.....	48
Tab. 11 Objemová hmotnost receptur 4, 5 a 6 v čerstvém stavu.....	50
Tab. 12 Objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku po 7 dnech receptur 4, 5 a 6	51
Tab. 13 Objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku receptur 4, 5 a 6	53
Tab. 14 Objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti v suchém stavu receptur 4, 5 a 6	55
Tab. 15 Tloušťka vzorků pro zjištění činitele zvukové pohltivosti.....	56
Tab. 16 Číselník zvukové pohltivosti receptur 4, 5 a 6	57
Tab. 17 Souhrnná tabulka hodnot mezerovitého cihlobetonu s různými směsmi frakcí.....	59
Tab. 18 Varianty rozměrových modulů a míry vylehčení vyhovující požadavkům ..	63
Tab. 19 Cena surovin za 1 m ³ výrobku receptury 5	65
Tab. 20 Vlastnosti výsledného výrobku	68

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost sybné hmotnosti frakcí cihelného recyklátu a jejich směsí na průměrné velikosti zrna	43
Graf 2 Objemové hmotnosti sad receptur 1, 2 a 3	47
Graf 3 Pevnosti sad receptur 1, 2 a 3.....	48
Graf 4 Závislost pevností sad receptur 1, 2 a 3 na objemové hmotnosti	49
Graf 5 Závislost objemové hmotnosti v čerstvém stavu receptur 4, 5 a 6 na průměrné velikosti zrna směsi cihelného recyklátu	50
Graf 6 Závislost pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti	52
Graf 7 Závislost pevnosti v tlaku po 7 dnech receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti	52
Graf 8 Závislost pevnosti v tahu za ohybu receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti	54
Graf 9 Závislost pevnosti v tlaku receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti	54
Graf 10 Objemové hmotnosti receptur 4, 5 a 6	55
Graf 11 Závislost součinitele tepelné vodivosti v suchém stavu receptur 4, 5 a 6 na objemové hmotnosti	56
Graf 12 Závislost činitele zvukové pohltivosti receptur 4, 5 a 6 na frekvenci	58

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Průzkum trhu

Příloha 2 Technický list portlandského cementu CEM I 42,5 R

Příloha 3 Prohlášení o vlastnostech superplastifikační přísady Sika ViscoCrete 1035