



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

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ LEHKÉHO KAMENIVA NA BÁZI
PĚNOVÉHO SKLA PRO VÝROBU NOVODOBÝCH
STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ**

POSSIBILITIES OF UTILIZATION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE BASED ON FOAM GLASS FOR NEW-
AGE INSULATION MATERIALS PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Bubeník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Bubeník
Název	Možnosti využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu novodobých stavebních materiálů
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNY, I.; STERNOVÁ, Z. Stavební 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: VUTUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] Kießl, K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Essen 1983.
- [5] Künzel, H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [6] Směrnice WTA; 2-9-04/D Sanační omítkové systémy. 1. Vyd. Blansko, 2008. 17 s. ISBN 978-80-02-02103-2.
- [7] Vaněk, L. Vývoj pokročilých tepelně izolačních omítek s možností uplatnění jako sanační omítky dle WTA, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014.
- [7] Rajchot, V. Vývoj tepelně izolačních a sanačních omítek pro památkovou péči, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2013.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce se bude věnovat možnostem pojení lehkého kameniva na bázi odpadní skleněné moučky do podoby lehkých tepelně izolačních deskových výrobků. V rámci práce bude zpracována rešerše možných pojivových složek a dalších vhodných druhotných surovin, které je možné pro tuto aplikaci využít. Dále bude, na základě provedené literární rešerše, navržena optimální technologie pojení lehkého kameniva do podoby izolačních desek. Bude provedeno teoretické zhodnocení jednotlivých technologií pojení kameniva a bude vybrána technologie a pojivo s největším potenciálem. Na minimálně jedné vybrané receptuře bude provedeno laboratorní ověření návrhu. Proběhne výroba zkušebních vzorků, na kterých budou stanoveny vybrané klíčové vlastnosti (tepelně technické, mechanické vlastnosti, a pod.). Závěrem práce bude provedeno celkové vyhodnocení a posouzení konkurenceschopnosti navrženého izolantu na stavebním trhu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Teoretická část bakalářské práce se zabývá možnostmi využití kameniva na bázi pěnového skla ve stavebnictví. Součástí práce je popis výroby, suroviny pro výrobu, a především vlastnosti kameniva. Práce se zaměřuje na možnosti pojení kameniva na bázi pěnového skla a výsledné vlastnosti výrobků. Také je popsána problematika tepelné techniky a řešení kritických detailů objektů. V praktické části je ověřena možnost pojení lehkého kameniva na bázi pěnového skla cementem a stanovení požadovaných vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pěnové sklo, lehký mezerovitý beton, pórovité kamenivo, izolace soklu

ABSTRACT

Theoretical part of bachelor work is concerned with possibilities about utilization of gravel based on foamed glass in civil engineering. Another part is description of production, materials for production and mainly gravel properties. The work focuses on ways of bonding gravel based on foamed glass and final properties of products. Also heat technology issues are described and solution to critical details of objects as well. Possibility of bonding light gravel based on foamed glass with cement and determination of required properties are verified in practical part.

KEYWORDS

Foam glass, lightweight concrete, porous aggregates, insulation of the plinth

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

BUBENÍK, J. *Možnosti využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu novodobých stavebních materiálů*. bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních dílců. 2017. 60 s., 2 s. příloh. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Zach Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 19. 5. 2017

Jan Bubeník
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ÚVOD	12
2 SKLO	13
2.1 Výroba skla.....	13
2.2 Technologie výroby.....	13
2.3 Vlastnosti skla.....	14
3 KAMENIVO NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA	15
3.1 Výroba kameniva na granulačním talíři.....	16
3.1.1 Vlastnosti kameniva	16
3.1.2 Použití kameniva.....	17
3.1.3 Výrobci granulovaného pěnového skla	17
3.2 Výroba deskového pěnového skla	17
3.2.1 Vlastnosti kameniva z pěnového skla	19
3.2.2 Použití kameniva na bázi pěnového skla	21
3.2.3 Výrobci a sortiment výrobků z pěnového skla	23
4 Mezerovitý lehký beton	24
4.1 Pojiva	25
4.1.1 Anorganická pojiva	25
4.1.2 Organická pojiva	27
4.2 Alternativní pojiva	28
4.2.1 Pucolány.....	28
4.3 Vlákna do betonu.....	30
4.4 Kamenivo	30
4.4.1 Granulometrie kameniva.....	31
4.4.2 Pórovité kamenivo do betonu	31
5 Tepelná ochrana budov	32
5.1 Zateplování a související úpravy	33
5.2 Izolace soklového zdiva.....	33

5.2.1	Požadavky na sokl.....	33
5.2.2	Funkce tepelné izolace soklu	34
5.2.3	Hlavní výrobci soklových desek na trhu	34
5.2.4	Typy správného osazení izolačních desek soklu	35
II	PRaktická část	38
6	CÍL PRÁCE	38
7	METODIKA PRÁCE	38
7.1	Technologie pojení kameniva pro výrobu těles	39
7.2	Zkušební tělesa	40
7.3	Návrh vstupních surovin.....	40
7.3.1	MURAPLAST FK 19	41
7.3.2	Vláknna z recyklovaného papíru (F 8000).....	41
7.3.3	Vláknna z recyklovaných PET lahví (Namflex)	42
7.4	Zkušební receptury.....	43
7.5	Zkoušení čerstvého betonu.....	44
7.5.1	Stanovení konzistence sednutí kužele.....	44
7.5.2	Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu.....	44
7.6	Zkoušení ztvrdlého betonu	45
7.6.1	Stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu	45
7.6.2	Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles	46
7.6.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	47
8	Vyhodnocení	48
8.1	Diskuze výsledků.....	53
8.2	Konkurenceschopnost na trhu	55
9	Závěr	56
10	LITERATURA	57
	seznam příloh	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Tetraedrická struktura křemičitého sodnovápenatého skla [1]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2: Kamenivo z pěnového skla vyrobené na granulačním talíři [3].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3: Pec pro tepelné zpracování skleněné moučky na rounu nebo ve formách [7].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 4: Kamenivo z pěnového skla vyrobené na rounu [7].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 5: Izolace základové desky [15].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 6: Izolace bazénu [15].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 7: Izolace kleneb [15].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 8: Termovizní snímek v oblasti soklu při venkovní teplotě - 15 °C a vnitřní + 20 °C [37].....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 9: Zateplení soklu s nezatepleným obvodovým pláštěm [39].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 10: Zateplení soklu se zatepleným obvodovým pláštěm [39].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 11: Zateplení soklu bez výkopu kolem základu [39].....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 12: Zhotovení zkušebních těles.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 13: Vlákna z recyklovaného papíru.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 14: Vlákna z recyklovaných PET lahví.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 15: Uložení vzorku v lisu a detail porušení zrn po provedení zkoušky.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 16: Nadměrné množství cementového tmele u první receptury.....</i>	<i>54</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Technologie výroby výrobků ze skla [1]</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2: Vlastnosti skla [1].....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 3: Vlastnosti kameniva na bázi pěnového skla [6] [7].....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 4: Třídy lehkého betonu dle objemové hmotnosti [20].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 5: Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken [30].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 6: Konkurenční izolační soklové desky [38].....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 7: Receptury na 1 m³ betonu</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 8: Receptury na 39 litrů betonu.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 9: Vlastnosti čerstvého betonu dle daných receptur.....</i>	<i>48</i>

<i>Tabulka 10: Vlastnosti ztvrdlého betonu dle daných receptur</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 11: Vlastnosti deskových vzorků po vysušení na 103 °C.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 12: Zavedená veličina pro zjištění poměru vlastností</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 13: Cena 1 m³ výrobku podle receptury 4.....</i>	<i>55</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Závislost objemové hmotnosti [kg/m³] ČB na recepturách.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf 2: Závislost objemové hmotnosti [kg/m³] ZB na recepturách</i>	<i>51</i>
<i>Graf 3: Závislost pevnosti v tlaku [N/mm²] na recepturách.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 4: Závislost tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] na recepturách.....</i>	<i>52</i>

I TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

V dnešní době nepřetržitě roste celosvětová produkce odpadů. Vyskytuje se otázka, jak využít odpad, který se vyváží na skládky, pro výrobu něčeho nového. Tohle je typický případ výrobků na bázi pěnového skla, kterými se tato práce zabývá. Při recyklaci skleněných výrobků vzniká velké množství skla, které se už nedá použít ve sklárnách. Z tohoto důvodu započaly první výroby pěnových skel, které využívají pro výrobu i ty nejmenší skleněné střepy a tím pádem se ukončilo vyvážení skla na skládky.

Pěnové sklo je vysoce porézní materiál, který se vyznačuje velice nízkou objemovou hmotností a skvělými tepelně izolačními vlastnostmi. Vyrábí se podrcením skleněných střepů, které se již nedají využít ve sklárnách, na skleněnou moučku, která díky tepelnému zpracování v peci a napěňovacím přísadám zvětší svůj objem a získá konečné vlastnosti pěnového skla.

Cílem této bakalářské práce je zkusit navrhnout recepturu pro výrobu tepelně izolačních deskových prvků, které by měly výborné tepelně izolační vlastnosti a zároveň dobrou mechanickou odolnost. Úkolem je teoreticky vyhodnotit nejvhodnější pojivo z hlediska výroby, výsledných vlastností, ale i ceny. V práci zhodnotíme možnost použití vláken do námi určené receptury betonu.

Vzhledem k tomu, že poslední vývoj ve stavebnictví vede k výstavbě energeticky úsporných domů se kladou větší nároky na provedení jednotlivých detailů budov a eliminace tepelných mostů. Jedním ze zásadních detailů je soklová část staveb. Izolační materiály používané na izolaci soklu musejí vykazovat určité parametry. V praktické části si navrhne receptury, ze kterých vyrobíme vzorky pro odzkoušení požadovaných vlastností a porovnáme s tradičními materiály, které se na izolaci soklu používají.

2 SKLO

Tento materiál patří k významným silikátovým hmotám, který se ve stavebnictví používá nejčastěji k zasklívání oken. Sklo je anorganický amorfní materiál vyrobený tavením vstupních surovin a jejich následným ochlazováním. Ztuhnutí není způsobeno krystalizací, která u většiny materiálů nastává při ochlazování taveniny, ale plynulým růstem viskozity na tak vysokou hodnotu, že se materiál stane pevný. [1]

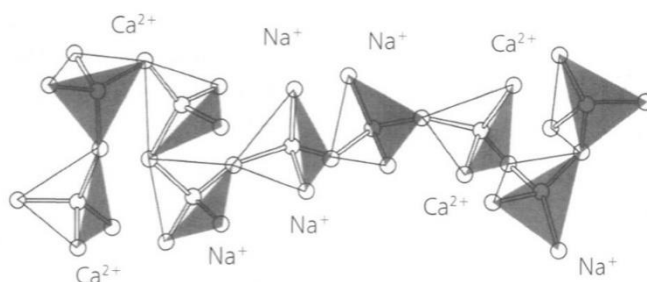
2.1 Výroba skla

Pro výrobu skla se používá sklářský kmen, čeřiva a skleněné střepy. Získaná tavenina se ještě v tekutém stavu tvaruje do požadované podoby. Sklářský kmen se skládá z různých oxidů. Největší zástupce je sklotvorný SiO_2 doplněný nejčastěji CaO , Na_2O a K_2O . [1] [2]

2.2 Technologie výroby

Při výrobě skla se postupuje dle čtyř dílčích technologických postupů (příprava vsázky a její dávkování, tavení, tvarování a chlazení). Suché a namleté suroviny se zhomogenizují v mísících zařízeních a poté se taví ve sklářských pecích při teplotě v rozmezí 1400 až 1600 °C. [1] [2]

Při tavení v peci vzniká makromolekulární struktura složená z tetraedrů $(\text{SiO}_3)^{2-}$, jejichž záporný náboj vyrovnávají kladně nabitě ionty (např. solné či vápenaté). Když se sklo tvaruje (litím, válcováním, foukáním, lisováním nebo tažením) se využívá závislosti viskozity na teplotě. Během tvarování nesmí dojít ke krystalizaci, to zajistíme složením skla. Skleněnými výrobky pro stavební účely se zabývá norma ČSN EN 572-9. [1] [2]



Obrázek 1: Tetraedrická struktura křemičitého sodnovápenatého skla [1]

Tavenina se chladí ve speciálních pecích většinou v intervalu 700 až 400 °C, čímž ve výrobku zabráníme vzniku nevhodně rozloženého vnitřního pnutí. Chlazení neslouží pouze k eliminaci vnitřního pnutí, ale při vnesení vhodně rozloženého napětím může výrazně zvýšit pevnost skla (tvrzení skla). Po vychladnutí může docházet k dalším úpravám skla (leptání, pískování, leštění, broušení). [1]

Tabulka 1: Technologie výroby výrobků ze skla [1]

Název technologie	Název výrobku
tažení, lití, válcování	ploché sklo
Foukání	duté sklo
Lisování	skleněné tvarovky, tašky, předměty
Rozfoukávání	skleněná vlákna
Odstředování	krátkovláknenná skleněná vlákna

2.3 Vlastnosti skla

Volbou složek a jejich poměrného množství se dají ovlivnit vlastnosti skla. Hustota skla závislá na složení skla se pohybuje od 2200 kg/m³ u čistě křemenných skel, do 6000 kg/m³ u olovnatých skel. Nejběžnější sodnovápenatá skla mají hustotu okolo 2500 kg/m³. Pevnost skla výrazně ovlivňuje vlastnost povrchu, opracování hran, tloušťka skla. Tvrdost závisí na chemickém složení skla. Nejtvrdší jsou boritokřemičitá skla a křemičitá skla a mezi nejměkčí patří olovnaté druhy skel. [1]

Tabulka 2: Vlastnosti skla [1]

Vlastnost	Hodnota
Hustota	2200–3600 kg/m ³
Pevnost v tlaku	700–1200 N/mm ²
Pevnost v tahu	30–90 N/mm ²
Pevnost v ohybu	40–190 N/mm ²
Modul pružnosti	50–90 MPa N/mm ²
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	6 až 9.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti	0,6 – 0,9 W/(m·K)
Poissonův součinitel	0,14 – 0,32 (-)
Tvrдость podle Moshovy stupnice	6–7 (odpovídá tvrdosti křemene a živce)

3 KAMENIVO NA BÁZI PĚNOVÉHO SKLA

Pěnové sklo je progresivní stavební materiál vyskytující se na trhu v posledních deseti letech. Jedná se o umělé kamenivo vyráběné recyklací z odpadního skla. Pro výrobu pěnového skla se používají skleněné střepty, které se nedají využít ve sklárnách. Z důvodu velkého množství jemných střeptů nepoužitelných pro sklárny se zvyšovalo množství skla na skládkách. Tím bylo zapříčiněno zamyšlení se nad využitím malých střeptů a začátek výroby pěnového skla u nás. [1]

Štěrk z pěnového skla je vysoce porézní a lehký materiál vhodný pro řadu stavebních účelů. Základní surovina je z 90 % odpadní sklo, výroba je příznivá k životnímu prostředí a výrobek je ekologicky čistý a zdravotně nezávadný stavební materiál. Vzhledem k omezené zásobě surovin pro výrobu energií potřebných k životu je nutné využívat obnovitelné zdroje a zároveň snížit energetickou náročnost při výrobě. Z hlediska výroby existují 2 způsoby výroby. Jedním způsobem je výroba sbalků na granulačním talíři a druhým, výroba desek na rounu nebo ve formách. [1]

3.1 Výroba kameniva na granulačním talíři

Recyklované sklo se vytřídí od nečistot a jemně pomele. Výsledná skleněná moučka se mísí s určitou dávkou vody, pojící přísadou a expandujícím činidlem. Připravená směs se dávkuje na granulační talíř, kde probíhá sbalkování směsi do kuliček požadovaných velikostí. Sbalky se nechají odležet a poté v rotační peci při 900 °C expandují a získávají výsledné vlastnosti. Po ochlazení se vzorky prosévají skrz síta, aby se rozdělily na jednotlivé frakce. Nakonec se kontroluje kvalita a rozměry výsledných kuliček kameniva. Kamenivo se dodává v pytlech o objemu 55 litrů, velkorozměrových pytlech typu Big Bag o objemu 1,5 m³ a 2,5 m³ nebo jako volně ložené v cisternách a silech. [3]



Obrázek 2: Kamenivo z pěnového skla vyrobené na granulačním talíři [3]

3.1.1 Vlastnosti kameniva

Kamenivo vyrobené na granulačním talíři je vysoce kvalitní výrobek s vynikajícími vlastnostmi. Při objemové hmotnosti 190 až 530 kg /m³ má kamenivo pevnost v tlaku od 1,4 do 2,8 N/mm². Dobré tepelně izolační vlastnosti se podle objemové hmotnosti pohybují ve vysušeném stavu od $\lambda=0,07$ do 0,096 W/(m · K). Kamenivo absorbuje zvuk, je nehořlavé (třída reakce na oheň A1) a v ohni neuvolňuje žádné škodlivé plyny. Zdravotní nezávadnost, odolnost vůči mrazu, teplu, stárnutí, bakteriím, vlhkosti, hmyzu a hlodavcům jsou další kladné vlastnosti tohoto materiálu. [3]

3.1.2 Použití kameniva

Nejčastější použití tohoto druhu kameniva je na suché maltové směsi, izolační omítky, lehké betony, lepidla, plnicí směsi, panelové systémy, dekorativní materiál a spoustu dalších. Izolační vrstvy podlah, stropů, zásypy bazénů a výkopů. [3]

3.1.3 Výrobci granulovaného pěnového skla

Firma ESOLIT s.r.o., působí na trhu pod jménem LIAVER. Liaver se zabývá výrobou granulátu z expandovaného skla, který se dodává v sedmi frakcích od velikosti 0,1 mm až do velikosti 16 mm. Kamenivo se nejčastěji používá do suchých malt, lehčených omítek, izolačních betonů, násypů a na mnoho dalších stavebních prací. Dalším produktem jsou zvukově izolační desky. Při tepelném zpracování je granulát přetaven a vznikají desky, které díky otevřené porézní struktuře mají výborné akustické vlastnosti, jsou odolné proti vlhkosti, nehořlavé, recyklovatelné a mají dobré mechanické vlastnosti. [4]

Společnost Dennert Poraver GmbH, která na trhu působí pod jménem PORAVER. Společnost Poraver se věnuje výrobě a výzkumu skleněného pěnového granulátu. Vyrábí podobný typ kameniva jako Liaver, ale dosahují frakcí v rozmezích 0,04 až 4 mm. Poraver vyrábí i granulát z metakaolínu, který se využívá jako aktivní plnivo v systémech na bázi vápna nebo cementu. V poslední řadě vyrábí hasící prostředek z expandovaného skleněného granulátu použitelný pro hašení a prevenci požárů. [3]

3.2 Výroba deskového pěnového skla

Výchozí materiál je sklo z různých zdrojů, odlišných kvalit (nápojové láhve, potravinářské láhve, okenní tabule). Zdrojem skla bývají firmy pracující se sklem, ale i kontejnery na sklo, jejíž obsah se přiváží právě do výroben pěnového skla. Sklo se nasype do zásobníku, ze kterého se sype na dopravní pás se sítí, kde pracovníci ručně zbavují sklo nečistot (beton, kámen, hlíny) a vytřídí se větší střepy (používají se na výrobu skla ve sklárnách). Na výrobu pěnového skla se používají pouze střepy, které se už nedají zpracovat ve sklárnách. Sklo se drtí v kulovém mlýnu na skleněnou moučku s velikostí zrna 10 až 90 mikrometrů. Barva skleněné moučky je vždy šedobílá, nezáleží na barvách drcených skel. [5][6]

Při výrobě kameniva na bázi pěnového skla se moučka smíchá s pěnícími přísadami. Nejčastěji se mísí s uhlíkovým prachem (šedá barva) nebo glycerinem (bílá barva). Následně se nanese vrstva asi 10 centimetrů na rouno, které jede do pece o teplotě okolo 800 °C, kde dojde k expanzi. Při východu z pece dojde k tepelnému šoku a dojde k samovolnému rozpadu na kamenivo frakce 10 až 60 mm. Výroba jedné dávky (100 kg) trvá cca 50 minut. [5][6]



Obrázek 3: Pec pro tepelné zpracování skleněné moučky na rounu nebo ve formách [7]

Při výrobě deskových dílců se skleněná moučka po smíchání s nadouvadly rozprostře do ocelových forem. Formy procházejí tunelovou pecí při teplotě 1000 °C. Při této teplotě dojde k opětovnému roztavení skleněného prášku a k současné oxidaci částic uhlíku CO_2 . Tento plyn vytváří malé bublinky, které až dvacetinásobně zvětší svůj objem směsi a vyplní tak celou formu. Po napěnění je vyrobený blok pěnového skla pozvolně ochlazován z 1000 °C na 20 °C. [5][6]



Obrázek 4: Kamenivo z pěnového skla vyrobené na rounu [7]

Pro zlepšení vlastností se používají i tavící přísady: Uhličitan vápenatý, oxid manganičitý, boritan sodný, uhličitan sodný, nitrid hliníku, oxid uhličitý a další.

Uhličitan vápenatý – Při použití pěnové sklo vykazuje vynikající vlastnosti, nízkou sypanou hmotnost, vysokou pórovitost a mechanické pevnosti. [8]

Oxid manganičitý – Při použití vznikají póry stejných velikostí, tudíž se snižuje výsledná hustota. Výsledné vzorky vykazují dobré mechanické vlastnosti. [9]

Boritan sodný – Při použití zároveň s CaCO_3 a vysokým obsahem popílku výrazně zvyšuje mechanické vlastnosti a zvyšuje pórovitost. [10]

Oxid uhličitý – Při použití sazí o různé velikosti částic dochází k nehomogenní distribuci pěny. Optimální velikost částic sazí je 0,15 mm. [11]

Uhličitan sodný – Při použití probíhá reakce mezi skleněnými střepy a nadouvadlem velmi rychle, což vede ke snížení teploty skelného přechodu. [12]

Nitrid hliníku – Při přidání 4 % AlN se získávají optimální vlastnosti jako je sypaná hmotnost a mechanické vlastnosti. Pěnidlo se používá v kombinaci s vysokopecní struskou. [13]

3.2.1 Vlastnosti kameniva z pěnového skla

Kamenivo z pěnového skla je složeno z mnoha pevně spojených skleněných můstků, díky kterým vznikají velmi malé uzavřené prostory. Tyhle místa zamezují rychlému šíření tepelného toku v materiálu. Měrná hodnota součinitele tepelné vodivosti je $\lambda=0,078 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. [6] [7]

Uzavřené buňky zvyšují zvukotěsnost, díky těmto vlastnostem je časté využití v protihlukových stěnách. Další vlastností je, že buňky nepropouští vodu, tudíž je zamezeno vzniku kapilár. Pěnové sklo se považuje za mrazuvzdorný materiál. Velký počet skleněných můstků zajišťuje na tepelně izolační materiál vysokou pevnost v tlaku. Únosnost se pohybuje v rozmezí 0,63-1,01 N/mm^2 a současně má vysokou tuhost a je prakticky nestlačitelné. [6] [7]

Pěnové sklo nevylučuje žádné látky. Nemá žádný vliv na životní prostředí a je odolné vůči mechanickému i chemickému namáhání. Nenapadají ho žádné plísňe, houby, hmyz či hlodavci a je zdravotně nezávadné. Pěnové sklo je vyráběno z recyklovaného skla, tudíž je kdykoliv opět recyklovatelné a dá se znovu použít. Je to jeden z mála tepelně izolačních materiálů, který se dá snadno recyklovat a přepracovat na plnohodnotný izolační materiál. Kamenivo z pěnového skla nepodléhá žádné degradaci, je odolné vůči stárnutí. Možnost opakovaného použití. Tepelná roztažnost je srovnatelná s ocelí nebo betonem, proto ho lze celoplošně

lepit k materiálům a nevyžaduje vytváření dilatačních vrstev. [6] [7]

Vnitřní nasákavost zrn kameniva je 0 %. Celková nasákavost zrn se pohybuje okolo 19 %. Při použití uhlíku jako pěnidla má výsledný produkt 1,5krát větší nasákavost než u pěnidel uhličitanových. Nasákavost pěnového skla nám určuje počáteční složení skla, typ pěnidla a charakter tepelného zpracování. Při stanovení objemové hmotnosti musíme zohlednit, že většinu objemu materiálu zaujímá vzduch, nacházející se uprostřed skleněných buněk, tudíž je hodnota objemové hmotnosti nízká a pohybuje se kolem 150 kg/m³. [6] [7]

Kamenivo na bázi pěnového skla se vyrábí jen z anorganických složek (skla a uhlíku). Materiál je považovaný za nehořlavý. Bod měknutí se vyskytuje nad 700 °C. Dle normy ČSN 73 0802 je tento materiál zařazen do kategorie A1. (Extrudovaný polystyren má kategorii C1). Díky neprodyšnosti pěnové sklo nepropouští kyslík nutný k hoření sousedních materiálů. Při požáru nevytváří žádný kouř ani jiné toxické zplodiny. Kamenivo je v celém svém objemu vodotěsné a nenasákavé pro všechny kapaliny, tudíž nepodléhá žádným objemovým změnám a nemění se jeho tepelné vlastnosti. Pěnové sklo je zcela parotěsné pro všechny plyny včetně vodní páry a radonu. Je neprodyšné jako třeba tabulové sklo a koeficient difúzního odporu se blíží nekonečnu. [6] [7]

Tabulka 3: Vlastnosti kameniva na bázi pěnového skla [6] [7]

Vlastnost	Hodnota	Jednotky
Sypná hmotnost	140–460	kg/m ³
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,07 – 0,095	W/(m·K)
Měrná tepelná kapacita	840	J/(kg·K)
Faktor difúzního odporu	Nekonečno	-
Pevnost v tlaku	0,63 – 1,01	N/mm ²
Pevnost v ohybu	0,3 – 0,6	N/mm ²
Modul pružnosti	800–1500	N/mm ²
Součinitel lineární teplotní roztažnosti	$8,3 \cdot 10^{-6}$ – $9,0 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹
Maximální teploty použití	od -260 do +430	°C
Reakce na oheň (dle ČSN 73 0802)	A1	-

3.2.2 Použití kameniva na bázi pěnového skla

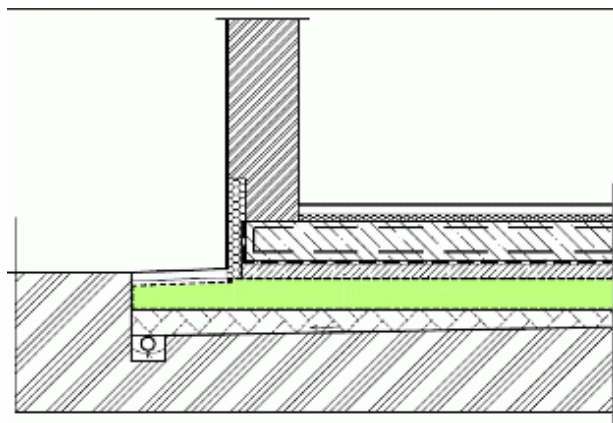
V pozemních stavbách se využívá jako izolant ve střešní konstrukci, podlahách, stěnách a podhledech. Jelikož má vysokou mechanickou odolnost, můžeme jej využít i do pochůzných nebo pojízdných střeš. Ve srovnání s jinými tepelně-izolačními materiály má docela vysokou cenu, tudíž jeho konkurenceschopnost na méně náročnější aplikace je velmi malá. Avšak při izolování za extrémních teplot je nenahraditelné, jelikož může být vystaveno teplotám v rozmezí od -260 do +430 °C. Desky pěnového skla se celoplošně lepí do asfaltu, styčné spáry a povrch se zalévají asfaltem. Díky asfaltu vzniká zároveň hydroizolační vrstva. [6] [7]

Pěnové sklo se používá i na průmyslové izolace potrubí, kde kolují média o extrémních teplotách, základy pod průmyslové nádrže, izolace průmyslových komínů. Díky nízké hygroskopičnosti pěnové sklo neztrácí své vlastnosti v podmačeném prostředí, a proto se používá na regulaci teplotního režimu půd. Pěnové sklo se využívá do sendvičových panelů. Pevnost sendvičových bloků je závislá především na pevnosti betonových dílů nebo dílů z lehčeného betonu. [6] [7] [14]

Štěrky z pěnového skla můžeme využít například na izolaci stěn, izolaci pod základové desky, izolaci podlah při rekonstrukcích, jímek, izolaci okolo bazénů, zasypy kleneb (pěnové sklo je velmi lehké), terasy, sklepy, pochozí střechy, zelené střechy, pozemní stavby, tunely, silnice, do gabionů protihlukové stěny, v zahradní architektuře, drenážní materiál. [15]

3.2.2.1 Izolace základové desky

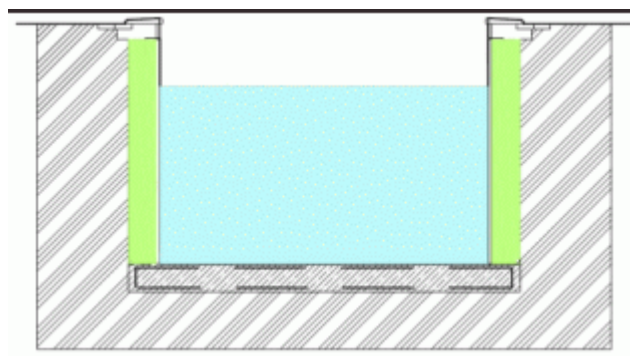
Štěrk z pěnového skla lze použít jako hutnou vrstvu pod základovou deskou s vyhovující únosností a zároveň tepelně izolační schopností. Po celé ploše základové desky štěrk eliminuje vznik tepelných mostů a zamezí vztlínivosti vlhkosti do základových konstrukcí. [15]



Obrázek 5: Izolace základové desky [15]

3.2.2.2 Izolace bazénů

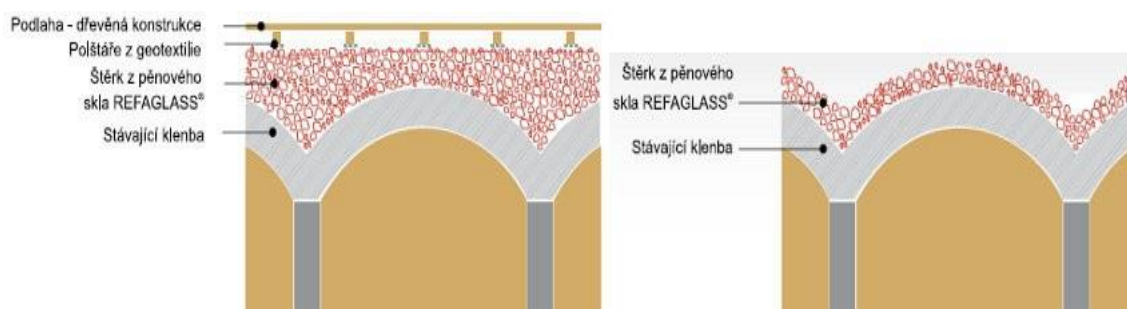
Při výstavbě bazénu se musí dbát na důkladné odizolování od terénu. Tepelné ztráty u hladiny se pohybují v rozmezí 60 až 75 % tepla. Štěrk z pěnového skla díky své tepelněizolační vlastnosti, mechanické odolnosti, snadné manipulaci a objemové hmotnosti je ideální izolační materiál pro izolace bazénů. [15]



Obrázek 6: Izolace bazénu [15]

3.2.2.3 Izolace kleneb

U kleneb štěrku z pěnového skla můžeme vidět u stabilizace nadložní vrstvy klenboví, nízká objemová hmotnost zaručuje nulovou deformaci klenby, po uložení je možné po štěrku chodit i bez konstrukce podlahy, výplň mezistupních prostor při rekonstrukcích historických budov místo tradiční škváry, vynikající náhrada za keramzit, který má vyšší objemovou hmotnost a je náchylný k nasáknutí vodou a tím pádem i mění svůj objem. [15]



Obrázek 7: Izolace kleneb [15]

3.2.3 Výrobci a sortiment výrobků z pěnového skla

Americká společnost PITTSBURGH CORNING, která na českém trhu působí pod reklamním jménem FOAMGLASS. Sortiment společnosti je rozsáhlý, jejich desky z pěnového skla se dají použít pro ploché střechy, fasády, vnitřní izolace, podlahy, podhledy, izolace základových desek či heliporty (pojízdné střechy). Zabývají se i řešením lepidel pro kotvení desek, povrchovými vrstvami na desky jako jsou stěrky, omítky, povrchové tmely. Dále se pomocí systému FOAMGLAS dá vytvořit spádová vrstva střech pomocí spádových desek. [16]

Firma Ecotechnic s.r.o., která na trhu působí pod jménem GEOCELL. Sortiment téhle firmy se týká pouze granulátu z pěnového skla, které se využívá jako tepelná izolace podlahových vrstev, izolační vrstvy pod umělými kluzišti, sanace podlah budov a jiné. Granulát se vyrábí ve frakci 10 až 60 mm. [17]

Firma A-GLASS Recycling s.r.o., která působí pod jménem A-GLASS. Podobně jako u Geocell se sortiment zabývá pouze granulátem z pěnového skla o frakci 10 až 60 mm. Využívá se především na izolace základových desek či pásů, rekonstrukce podlah, rekonstrukce mezistupních prostor a kleneb, izolace plochých střech a izolace nádrží a bazénů. [6]

Společnost REFAGLASS s.r.o., která působí pod jménem REFAGLASS. Sortiment obsahuje šterk z pěnového skla dostupný ve čtyřech frakcích (0-63 mm; 16-32 mm; 4-16 mm; 0-4 mm), použití šterku podobné jako u granulátu A-GLASS. Dále jsou vyráběny desky z pěnového skla vyráběné v tloušťkách od 40 do 120 mm. Použití pro izolace plochých střech (možnost vytvoření spádové vrstvy z desek). Poslední produkt je skelná moučka, která se dá využít v různých průmyslových odvětvích, například pro výrobu pěnového skla, výroba skelné vaty, pojivo pro pryskyřice, přísada do barev a lepidel, přísada pro výrobu cihel a tašek, pyrotechnický a kosmetický průmysl. [7]

Firma GLAPOR, která vystupuje na trhu od roku 2007 jako výrobce izolačních materiálů vyrobené ze 100 % recyklovaného skla. Firma GLAPOR se zaměřuje na výrobu šterku z pěnového skla ve frakcích (0-16 mm; 16-32 mm; 32-63 mm; 0-63 mm). Použití šterku je obdobné jako u předchozích značek. Jako další produkt vyrábí desky z pěnového skla výpalem ve formách o standartních rozměrech 800 · 600 mm a tloušťkách 40 až 140 mm, které se používají pro izolace plochých střech, podlah a základových desek. [18]

4 MEZEROVITÝ LEHKÝ BETON

Lehké betony jsou definovány dle ČSN EN 206-1 jako kompozitní materiály, jejichž objemová hmotnost ve vysušeném stavu dosahuje hodnot v rozmezí 800 kg/m³ až 2000 kg/m³. Vylehčení se provádí nahrazením hutného kameniva pórovitým kamenivem. Vlastnosti kameniva se zkouší podle technických norem ČSN EN 1097 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva a ČSN EN 13055-1(2) Pórovité kamenivo do betonu, malty a izolační malty. Použití je rozmanité od snížení hmotnosti konstrukce až po zlepšení tepelně izolačních vlastností. Mezerovitý beton vzniká při omezení jemných frakcí kameniva a menšího množství cementového tmele, kdy v čerstvém betonu záměrně vznikají mezery pro další vylehčení a zlepšení tepelně izolačních vlastností betonu. Zrna jsou obalena cementovým tmelem a spojena pouze v místě dotyku. Takhle navržená betonová směs se nazývá lehký mezerovitý beton. [19] [20]

Tabulka 4: Třídy lehkého betonu dle objemové hmotnosti [20]

Třída	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Objemová hmotnost [kg/m ³]	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000

4.1 Pojiva

Lehké kamenivo na bázi pěnového skla můžeme pojit řadou anorganických i organických pojiv. Z hlediska dostupnosti a zpracovatelnosti se jako anorganické pojivo nabízí cement. U organických pojiv se nejčastěji setkáme s asfalty či pojivy na bázi polymerů. Cílem práce bude vybrat jedno konkrétní pojivo, které splní veškeré požadavky na výrobek a zároveň bude cenově přijatelné.

4.1.1 Anorganická pojiva

Látky, které se zpravidla vyrábí tepelným zpracováním přírodních surovin vhodného složení. Pojiva mají schopnost samovolného zpevňování, tím spojují zrnité materiály v kompaktní celek. [21]

4.1.1.1 Hydraulická pojiva

Pojiva, která po smíchání s vodou jsou schopna tuhnout i tvrdnout na vzduchu i pod vodou. Mezi největší zástupce patří cement a hydraulické vápno. [21]

Cement

Cement je hydraulické práškové pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po zamíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku hydraulické reakce tuhne a tvrdne na vzduchu i pod vodou při zachování pevnosti a stability. Cement se vyrábí společným výpalem vápence s jíly při teplotě 1450 °C v rotačních pecích. Takto vypálený slínek se mele na požadovaný měrný povrch. Cement dělíme dle ČSN EN 197-1 na pět skupin podle složení.

CEM I – portlandský cement

CEM II – portlandský cement směsný

CEM III – vysokopecní cement

CEM IV – pucolánový cement (v současné době se v České republice nevyrábí)

CEM V – směsný cement

Cementy se dělí i podle pevnostních tříd na 32,5; 42,5; 52,5 N/mm². Dále se cementy dělí podle času náběhu pevnosti na normální (N) a rychlovazné (R). V praxi se používají i speciální cementy, které jsou určeny na dané typy konstrukcí. [22] [23]

Hydraulické vápno

Pojivo připravené pálením vápenců, dolomitů nebo vápnitých slínů a slínovců pod mez slnutí na teplotu 1250 °C. Případně se může pomlít vzdušné vápno s vhodnými přísadami (umělé hydraulické vápno). Podle obsahu hydraulických složek se dělí na slabě hydraulická a silně hydraulická vápna. Minimální obsah hydraulických oxidů (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) je 10 %. [21]

4.1.1.2 Vzdušná pojiva

K vytvrzování dochází pouze na vzduchu. I po dokonalém vytvrzení nejsou tato pojiva zcela odolná proti vodě. Mezi nejčastější zástupce patří sádra a vzdušné vápno. [21]

Sádra

Základem sádry a ostatních typů síranových pojiv jsou různé formy síranu vápenatého (CaSO_4). Sádra je anorganické práškové pojivo získané tepelným zpracováním přírodního nebo umělého sádrovce. Patří k nejstarším pojivům, používaná od raného středověku. Sádra hydratuje různou rychlostí podle toho, jak byla připravena. Mezi její význačné vlastnosti patří schopnost pohlcovat vlhkost. Použití na omítky v obytných místnostech pro regulaci vlhkosti. Negativní vlastností je pokles pevnosti ve vlhkém prostředí. [21]

Vzdušné vápno

Typický představitel vzdušných pojiv. Vzdušné vápno je technický název pro oxid vápenatý CaO s různým podílem oxidu hořečnatého MgO . Vyrábí se pálením čistých nebo dolomitických vápenců pod mez slnutí na teploty 1000 až 1250 °C. Podle obsahu MgO vápno dělíme na vápno vzdušné bílé (obsah pod 7 %) a dolomitické vzdušné vápno (obsah nad 7 %). [21]

4.1.2 Organická pojiva

Organická pojiva jsou látky, které jsou vyrobeny buď z přírodních surovin (živočišné, kaseinové, bitumenové a jiné) nebo jako syntetické (polykondenzační, polymerizační, polyadiční) [24]

4.1.2.1 Asfalty

Jsou podskupina živic, definované jako černá nebo černohnědá polotuhá až tuhá látka o hustotě (980–1100 kg/m³), která při zvyšující se teplotě měkne, až dojde k přechodu do kapalného stavu. Asfalty dělíme na přírodní a ropné. Přírodní se vyskytují na různých místech zemského povrchu. Ropné asfalty u nás tvoří téměř 100 % surovinovou základnu. Ropné asfalty jsou upravované destilační zbytky při destilaci ropy v rafineriích. Podle úpravy dělíme ropné asfalty na tuhé (oxidované) a polotuhé (polofoukané). [25]

Vlastnosti asfaltů se liší podle způsobu zpracování, úpravy suroviny při výrobě a podle složení suroviny, ze které jsou vyrobeny. Asfalty mají dobrou rozpustnost ve většině organických rozpouštědlech. Některé vlastnosti se dají upravovat pomocí přísad. Nejčastěji se zlepšují vlastnosti jako přilnavost, zvýšení bodu měknutí, zmenšení sklonu k zápalnosti apod. Po chemické stránce je asfalt směsí mnoha sloučenin, které nejčastěji obsahují uhlík, vodík a v menším množství síru, kyslík a dusík. Nejčastější použití je při výstavbě silnic, ale díky teplotě tání 70 až 100 °C je jeho použití rozmanité. Například pro laky, nátěry, emulze a suspenze. [25]

Mechanické namáhání a změny teploty jsou pro nás důležitými faktory při výběru asfaltových prvků ve stavební praxi. Tyhle vlastnosti materiálů nazýváme strukturní a dělí se na tři skupiny: [26]

- Reologické vlastnosti
- Koloidní vlastnosti
- Teplotní citlivost [26]

4.1.2.2 Epoxidová pryskyřice

Je polymerní materiál syntetického původu. Patří mezi pryskyřičné látky s více než jednou epoxidovou vazbou tzv. reaktoplasty. Mají velmi dobrou přilnavost k široké škále materiálů a po vytvrzení mají další důležité vlastnosti. Vysoká chemická odolnost, tvarová stálost (včetně malého smrštění při vytvrdnutí), dobrá tepelná odolnost a tvrdost. [27]

4.2 Alternativní pojiva

Jedním z mnoha důvodů vyhledávání alternativních surovin je snížení spotřeby cementu. V budoucích letech je prioritou snížení slínkového faktoru cementu a používání většího množství příměsí při jeho výrobě. Při výrobě cementu vzniká velké množství CO_2 , které zatěžuje životní prostředí.

4.2.1 Pucolány

Od dávných dob se do vápenných malt používaly tzv. pucolány, např. pálené jíly, drcené sklo a strusky. Jedná se o křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, které nejsou schopny se vázat, ale v přítomnosti hydroxidu vápenatého a vody reagují na sloučeniny. Sloučeniny mají výborné pojivové schopnosti a jsou stálé i ve vodním prostředí. [28]

Pucolány jsou vyráběny pálením montmorillonitického nebo kaolinitického jílu při nízkých teplotách a po ochlazení se jemně melou. Mezi největší zástupce patří kaolín, který po vypálení na $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ přechází v silně porézní amorfni metakaolin. [28]

V posledních letech se zkoumají vlastnosti páleného kaolinu, jehož hlavní minerál je kaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Tento minerál při teplotě $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ s izotermní výdrží 1 až 4 hodiny uvolňuje vodu. Při uvolnění veškeré vody se z kaolinitu stává metakaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, který je rentgenoamorfni a má pórovitou strukturu. [28]

4.2.1.1 Metakaolin

Metakaolin je materiál pucolánově aktivní s širokým uplatněním v průmyslu. S přidavkem metakaolinu se zvyšuje pevnost betonu v tlaku a mírně roste i pevnost v tahu za ohybu. Metakaolin je žáruvzdorný, tepelně a chemicky odolný, ekologicky nezávadný s nízkým obsahem těžkých kovů a škodlivin. [28]

Kaolin, který je surovinou pro výrobu je nejvíce zastoupený v jílových zeminách. Kaolín vzniká přetvořením několika druhů krystalických a amorfni skel jako je živec a sopečný popel. Za normálních podmínek je chemicky stabilní. Hodnota měrného povrchu (metoda N_2 BET) čistého kaolinu se pohybuje od $15\,000\text{ m}^2/\text{kg}$. [28]

Po zahřátí na $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ kaolin ztrácí až 14 % hydroxylové vody a tím dochází k přeměně na metakaolin, ve kterém se původní vrstevnaté uspořádání změnilo na amorfni formu. [28]

V České republice má výroba metakaolinu už patnáctiletou tradici. Zdroje surovin pro výrobu metakaolinu jsou u nás poměrně rozsáhlé. V komerčních metakaolinech jsou dnes používány plavené a jemně tříděné kaolinity, případně i upravené jílovce (metalupky). Metakaolín není druhotná surovina, ale cíleně vyráběný produkt. Několik českých výrobců dnes nabízí mineralogicky i technologicky odlišné typy metakaolinů. [28]

4.2.1.2 Popílek

Popílký jsou nerostné zplodiny, které vznikají při spalování tuhých paliv. Paliva jsou v jemně mleté formě a vznikají malé kuličky křemičitého skla. V moderních elektrárnách odpadávají ve velkém množství v usazovacích komorách, cyklonech a elektrostatických filtrech. [29]

Popílký řadíme mezi druhotné suroviny při spalování tuhých paliv. Mají pucolánové a další příznivé vlastnosti. Významnou vlastností je nízká objemová hmotnost, jejíž hodnoty ve volně sypaném stavu mezi 550 až 900 kg/m³. Zrna popílků, vzniklé z taveniny dostatečně tekuté, mají tvar kuliček o průměru 0,001 až 0,1 mm. Specifický povrch dle Blaina je 200 až 300 m²/kg. Kuličky mohou být duté či plné, průhledné i neprůhledné. Sklovina má obvykle nažloutlou nebo našedlou barvu. Sklovité kuličky se skládají převážně ze SiO₂, díky kterému je popílek pucolánově aktivní. [29]

Pucolánové vlastnosti popílku se tradičně zkouší podle množství vápna, které na sebe popílek během určité doby dokáže navázat. Nový způsob zjištění pucolanity popílku spočívá ve srovnání snížení alkality roztoku hydroxidu vápenatého s teoretickou maximální možnou hodnotou určenou titračně. [29]

Mezi základní požadavky na popílký určené pro výrobu maltovin a neautoklávovaných betonů obyčejných i lehkých se uvádí minimální obsah SiO₂ (40 %) a malý obsah MgO (méně než 2 %). Popílek je v zásadě odpadní surovinou a jako každý odpadní materiál se u něj mohou vyskytovat odchylky v chemickém, mineralogickém i granulometrickém složení, které závisí na způsobu spalování, odlučování, druhu uhlí a typu topeniště. Odebírané popílký musí být pravidelně kontrolovány. Jejich použití do stavebních malt a betonů určuje norma ČSN 72 2072-2. [29]

4.3 Vlákná do betonu

Vlákná se do betonu přidávají za účelem zlepšení vlastností betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu. Mezi nejčastější funkce vláken patří omezení vzniku trhlin v počátečním stavu a zvýšení pevnosti betonu v tahu. Podle funkce, kterou vlákna v betonu plní, dělíme vlákna do dvou základních skupin, na vlákna protismršťovací a konstrukční.

Vlákná pro vláknobetonu můžeme dělit podle materiálu, ze kterého jsou vyrobena do následujících skupin: [30]

- Vlákná ocelová
- Vlákná polymerová (syntetická)
- Vlákná skleněná
- Vlákná přírodní
- Vlákná azbestová

Tabulka 5: Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken [30]

vlákna	průměr [mm]	měrná hmotnost [kg/m ³]	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [N/mm ²]	přetvoření [%]
ocelová	0,15 - 1,0	7840	200	345 - 2100	0,5 - 3,5
polymerová (PP)	0,015 - 1,0	900	5 - 77	500 - 750	8
polymerová (uhlíková)	0,007 - 0,018	1600 - 1950	30 - 390	600 - 2700	0,5 - 2,4
Skleněná	0,009 - 0,015	2540	72	3500	4,8
celulózová (přírodní)	0,02 - 4,5	500 - 600	10	125 - 500	-
azbestová	0,0001	2600	196	700	-

4.4 Kamenivo

Kamenivo je přírodní nebo umělá, většinou anorganická látka, určená pro stavební účely s maximální velikostí zrna 63 mm. Kamenivo zaujímá asi 75 až 80 % objemu betonu. Kamenivo se dělí dle petrografie, objemové hmotnosti, vzniku a frakce. Těžená kameniva vznikají přirozeným rozpadem hornin a jsou zaoblena po transportu. Drcená kameniva vznikají drcením větších kusů v lomech.

Podle Evropské normy dělíme kamenivo dle velikosti zrna (D = horní a d = dolní síto frakce kameniva):

- a) Hrubé kamenivo, $D > 11,2$ mm a $D/d > 2$ nebo $D < 2$
- b) Směs kameniva (štěrkopísek, štěrkodrt), $D < 63$ mm a $d = 0$ mm
- c) Drobné kamenivo (písek), $D < 4$ mm a $d = 0$ mm
- d) Filery jsou zrna kameniva do velikosti 0,125 mm [31]

Evropské normy definují základní požadavky na kamenivo dle ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu. Stanovuje požadavky na vlastnosti přírodních, umělých i recyklovaných kameniv do betonu. ČSN EN 13055-1 Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Kamenivo přírodní, umělé, recyklované s objemovou hmotností do 1200 kg/m³. [31]

4.4.1 Granulometrie kameniva

Zrnitost kameniva vyjadřuje tvar a velikost zrn. Velikost zrn a podílové zastoupení se vyjadřuje sítovým rozbořem. Podíl zrn zachycen na síti se nazývá frakce. Normová základní sada sít se čtvercovými otvory (poměry velikosti otvorů 1:2): 0,063—0,125—0,5—1—2—4—8—16—32—63—125 mm. Pro zastoupení většiny zrn se používají plynulé křivky zrnitosti. Máme několik typů ideálních křivek zrnitosti: dle Fullera, Empa I, Empa II. [31]

4.4.2 Pórovité kamenivo do betonu

Požadavky na pórovité kamenivo se zabývá norma, která má dvě části ČSN EN 13055-1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty a ČSN EN 13055-2: Pórovité kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové úpravy a pro nestmelené a stmelené aplikace. Tahle norma se zabývá vlastnostmi pórovitého kameniva či fileru jako kameniva, získaného úpravou přírodních, umělých nebo recyklovaných materiálů a směsi těchto kameniv pro použití v betonu, maltě, injektážní maltě v různých typech staveb. Tato norma se zabývá pórovitým kamenivem anorganického původu, které má objemovou hmotnost menší než 2000 kg/m³ (2,0 Mg/m³) nebo sypanou objemovou hmotnost menší jak 1200 kg/m³ (1,2 Mg/m³).

Norma zahrnuje:

- a) přírodní kamenivo;
- b) kamenivo vyrobené z přírodních materiálů, nebo z vedlejšího produktu při průmyslovém procesu;
- c) vedlejšího produktu při průmyslovém procesu;
- d) recyklované kamenivo. [32] [33]

Mezi přírodní pórovitá kameniva patří tufy, tufity, přírodní pemza, spongility, diatomity a lehká láva. Za průmyslově vyráběná pórovitá kameniva uvažujeme keramzit, cihloporit, kavitit, expandit, vermikulit a perlit. [32] [33]

5 TEPELNÁ OCHRANA BUDOV

V posledních letech se řeší snížení spotřeby energií na provoz objektů, čímž se zabývá vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov. Nízká úroveň tepelně technických vlastností stavebních konstrukcí (střešní a obvodové pláště, otvorové výplně) u stávajících staveb je důvodem vzniku tepelných ztrát. Tepelné mosty se značně podílí na zvyšování spotřeby energií na vytápění. Díky snižování teploty vnitřního vzduchu během zimní sezóny na úroveň blíží se 20 °C, může docházet k hygienickým nedostatkům. Tyto problémy se nejčastěji vyskytují v místech tepelných mostů, v koutech styků stavebních konstrukcí a nejčastěji v posledním podlaží budov. Vytápěním bytů i ostatních účelových místností pozemních staveb se zajistil nárůst vnitřní povrchové teploty tak, že překročila teplotu rosného bodu. Přetápěním vnitřních místností se zvyšují tepelné ztráty a spotřeba energie na vytápění. [34] [48]

Zvýšením tepelně izolačních schopností stavebních konstrukcí můžeme předejít nebo odstranit možné hygienické nedostatky (plísň) a snížit tím spotřebu energií na vytápění. Provedení dodatečné tepelně izolační ochrany stavebních konstrukcí a úprav souvisejících s ní má pozitivní vliv na: [34]

- odstranění hygienických nedostatků
- zlepšení tepelné pohody
- architektonický vzhled budov
- životní prostředí (snižování škodlivých látek v ovzduší)
- snižování spotřeby energií při užívání budov

5.1 Zateplování a související úpravy

Zateplení stavebních konstrukcí a budov je dodatečnou tepelnou ochranou, která vykonává soubor různých opatření. Zateplení se nejčastěji provádí na vnější straně stavebních konstrukcí přídavnými vrstvami. Zásadní je tepelně izolační vrstva. Zateplení se provádí pomocí zateplovacích systémů. [34]

Zateplovací systém je soubor na sebe přiléhajících stavebních materiálů a doplňkových prvků, které při správném provedení zajišťují požadované tepelné technické vlastnosti stavebních konstrukcí bez negativních vlivů na funkci objektu. Zateplovací systémy se navrhují individuálně podle místa použití a složitosti stavebních konstrukcí. Tloušťka tepelně izolační vrstvy a zateplovacího systému se navrhuje s ohledem na požadavky dle normy ČSN 73 0540-2. [34] [35]

5.2 Izolace soklového zdiva

Energeticky úsporné stavby, tzn. stavby s kvalitním zateplením jsou dnes předmětem častých diskuzí, a to hlavně ve spojitosti s úsporami energií a snížení nákladů na vytápění. Důležitá otázka pro investora je, zdali je pro něj dostačující tepelně izolační obálku dimenzovat na úroveň nízkoenergetických domů se spotřebou max. do 50 kWh/(m²·a), či je pro něj výhodnější zainvestovat do nemovitosti vzhledem k nárůstu cen energií a izolační obálku nadimenzovat na úroveň tzv. pasivního domu se spotřebou do 15 kWh/(m²·a). U těchto staveb je důležité řešení jednotlivých detailů konstrukcí a tím eliminace tepelných mostů. Jedním z detailů je řešení zateplení soklové části budovy. [36] [48]

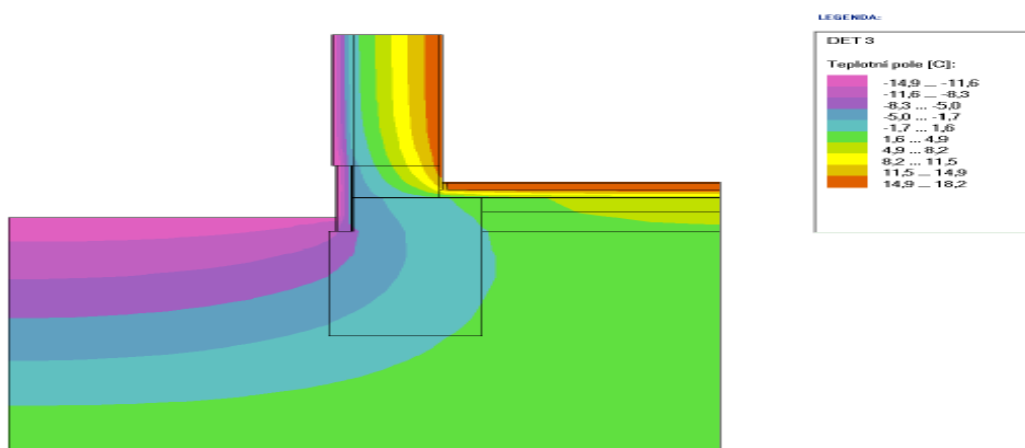
5.2.1 Požadavky na sokl

Požadavky na sokl jsou logické, ale jejich splnění často nebývá jednoduché. V posledních letech je u soklu vyžadována tepelná izolace, která při správném osazení splňuje řadu funkcí. [36]

- dostatečná pevnost
- odolnost proti působení vody (vzlínající i odstříkující)
- odolnost proti působení mrazu odolnost proti agresivnímu prostředí
- možnost mechanického čištění
- dostatečná tepelně izolační schopnost celého detailu
- ekonomické řešení s optimálním poměrem cena/výkon

5.2.2 Funkce tepelné izolace soklu

- nedochází k promrzání obvodových základů a částí terénu pod stavbou
- zvýšení vnitřní povrchové teploty detailu a tím zamezení vzniku plísní
- výrazné omezení kondenzace v detailu napojení základu na zdivo
- prodloužení životnosti základové části díky umístění v nezamrzné oblasti
- zamezení vzlínivosti vlhkosti do vyšších částí nad terénem
- umožnění souvislého omítnutí pod úroveň terénu
- umožnění spolehlivého a jednoduchého detailu ukončení hydroizolace [36]



Obrázek 8: Termovizní snímek v oblasti soklu při venkovní teplotě - 15 °C a vnitřní + 20 °C [37]

5.2.3 Hlavní výrobci soklových desek na trhu

Konkurence je obrovská, tudíž jsem vybral nepoužívanější izolační desky, které se používají na izolaci soklové části staveb.

Isover EPS Sokl 3000: Desky z expandovaného polystyrénu se vyznačují nízkou nasákavostí, vysokou mechanickou odolností, využívá se nejčastěji na izolace soklu nad terénem a jejich přiléhající části pod terénem až do hloubky 3 m. Obě strany desky jsou opatřeny vaflovou strukturou pro lepší přídržnost tmelů a lepidel. [38]

Isover EPS Perimetr: Desky z expandovaného polystyrénu se vyznačují minimální nasákavostí, mrazuvzdorností a výbornými mechanickými vlastnostmi. Používají se při přímém styku izolačních desek s vodou a vysokém zatížení. Standardně se vyrábí s polodrážkou. [38]

Styrodur 2800 C: Na rozdíl od předchozích desek jsou vyrobeny z extrudovaného polystyrenu. Jsou opatřeny vaflovitým povrchem. Vhodný pro izolace tepelných mostů, pod obkladačky. [38]

STYROFOAM IB: Desky vyrobené z extrudovaného polystyrenu se vyznačují vysokým a trvalým tepelným odporem, minimální nasákavostí a nulovou kapilaritou, vysokou odolností proti zmrazovacím cyklům a dlouhodobou pevností v tlaku. Použití desek jsou veškeré tepelné izolace vyžadující předešlé požadavky. [38]

Tabulka 6: Konkurenční izolační soklové desky [38]

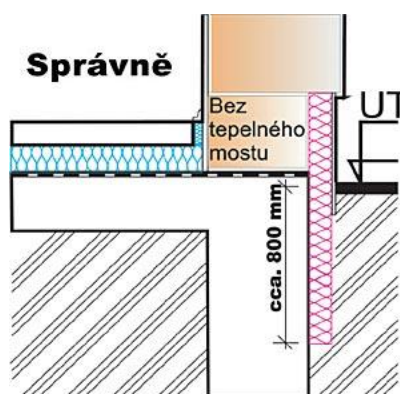
Parametr	Isover EPS Sokl 3000	Isover EPS Perimetr	Styrodur 2800 C	STYROFOAM IB
Tloušťky desek d [mm]	20 až 200	30 až 200	20 až 200	25 až 150
Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)]	0,035	0,034	0,031 až 0,04	0,033
Objemová hmotnost [kg/m ³]	23 až 28	28 až 32	33	28
Nasákavost [%]	3	3	0	1
Pevnost v tlaku [kPa]	150	200	200 až 300	250
Třída reakce na oheň	E***	E***	E***	E***
Faktor difúzního odporu μ [-]	30 až 70	40 až 100	80 až 200	100
Cena za 1 m ³ (s DPH 21 %) [Kč]	4930	4660	5690	6540

5.2.4 Typy správného osazení izolačních desek soklu

Kvalitní tepelná ochrana stavby závisí především na důkladném řešení detailů. Jedním z důležitých detailů je sokl budovy, tedy návaznost mezi základovou a obvodovou konstrukcí. V případě podsklepených budov vazba mezi suterénním a obvodovým zdivem. [39]

5.2.4.1 Nezateplený obvodový plášť

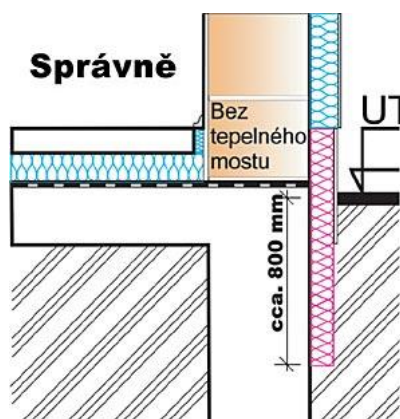
Jednoduché řešení tepelné izolace soklu u jednovrstvých stěnových konstrukcí. Izolace zamezuje vznik obvyklých tepelných mostů a možnost vzlinutí vlhkosti. Zároveň se celá základová konstrukce dostává do chráněné nezamrzné oblasti, díky které se prodlužuje její životnost. [39]



Obrázek 9: Zateplení soklu s nezatepleným obvodovým pláštěm [39]

5.2.4.2 Zateplený obvodový plášť (napojení na zateplovací systém)

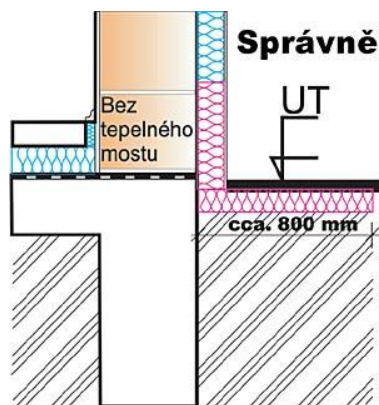
Kvalitní řešení pro domy se zatepleným obvodovým pláštěm. Tepelná izolace je protažena pod úroveň terénu a chrání konstrukci i základy. [39]



Obrázek 10: Zateplení soklu se zatepleným obvodovým pláštěm [39]

5.2.4.3 Zateplený obvodový plášť (nemožnost výkopu kolem základu)

Položení desek pod nášlapnou vrstvu chodníku nám jednoduše a efektivně pomáhá vyřešit tepelný most a ochranu základů proti mrazu. Tohle řešení se využívá nejčastěji u rekonstrukcí, kdy není možné provést výkop v blízkosti objektu. [39]



Obrázek 11: Zateplení soklu bez výkopu kolem základu [39]

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem práce je možnost pojení lehkého kameniva na bázi odpadní skleněné moučky do podoby lehkých tepelně izolačních deskových výrobků. V rámci práce je zpracována rešerše možných pojivových složek a dalších vhodných druhotných surovin, které je možné pro tuto aplikaci využít. Dále byla na základě provedené literární rešerše, navržena optimální technologie pojení lehkého kameniva do podoby izolačních desek. Bylo provedeno teoretické zhodnocení jednotlivých pojiv kameniva a vybráno pojivo s největším potenciálem. Na navržených recepturách bylo provedeno laboratorní ověření návrhu. Proběhla výroba zkušebních vzorků, na kterých byly stanoveny vybrané klíčové vlastnosti (tepelně technické, mechanické vlastnosti apod.). Závěrem práce bude provedeno celkové vyhodnocení a posouzení konkurenceschopnosti navrženého izolantu na stavebním trhu.

7 METODIKA PRÁCE

V rámci teoretické části bakalářské práce byla provedena rešerše ohledně možných pojiv, použitelných pro pojení kameniva na bázi pěnového skla. Po zohlednění všech pozitivních i negativních vlivů jsme pro naši aplikaci na výrobu zkušebních těles použili cement. Nejprve jsme si laboratorně museli stanovit množství cementu pro vytvoření rovnoměrně rozmístěných mezer v čerstvém betonu, které nám zajistily rovnoměrné vlastnosti v celém objemu betonu. Po namíchání každé receptury jsme provedli zkoušku konzistence (sednutím kužele). Tato zkouška nebyla příliš vhodná, jelikož konzistence čerstvého betonu byla ve formě zvlhlé směsi, tudíž sednutí nebylo ve většině směsí žádné. Při ukládání čerstvého betonu do forem jsme dbali na řádné hutnění a vyplnění zejména rohů forem. Pro dokonalost povrchů jsme použili vibrační stůl v kombinaci s mírným přitlakem navlhčenou deskou. Rovinnost povrchů a rovnoměrnost uložení jsou zásadní vlivy pro stanovení součinitele tepelné vodivosti a pevnosti v tlaku. Na všech vyrobených zkušebních vzorcích jsme stanovili objemovou hmotnost v čerstvém stavu.

Po namíchání čtyř receptur s různým množstvím cementu jsme se rozhodli zavést do betonu vlákna a sledovat jejich vliv na směs v čerstvém a zatvrdlém stavu. Použili jsme vlákna z recyklovaných PET lahví a vlákna z recyklovaného

novinového papíru od firmy CIUR. Vlákná s PET lahví jsme přidali do směsi kameniva a cementu, kde se rovnoměrně rozmístila po celé suché směsi a následně se přidala voda. U vláken z recyklovaného papíru jsme museli nejdříve vlákna rozmístit ve vodě, protože kdybychom postupovali jako u vláken z recyklovaných PET, tak by se vlákna správně nerozmístila a vytvářela by shluky. Po rozvláknění ve vodě se přidala do čerstvého betonu v míchačce. Pro ideální rozmístění jsme museli směs déle míchat. I přes delší míchání se ve směsi tvořili shluky vláken, které jsme museli ručně oddělit pro rovnoměrné rozmísení.

Kvůli křehkosti zkušebních těles jsme odformování prováděli po 7 dnech, kdy už tělesa měla určitou pevnost. Kvůli pozdějšímu odformování a výrobkům z mezerovitého betonu museli být použity ocelové rozebíratelné formy. Po 28 dnech od zamíchání jsme na zkušebních tělesech provedli stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, pevnosti v tlaku a stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou desky-měřidlem tepelného toku.

7.1 Technologie pojení kameniva pro výrobu těles

Cílem práce je možnost pojení lehkého kameniva na bázi odpadní skleněné moučky do podoby lehkých tepelně izolačních deskových výrobků. Na základě teoretické rešerše a zhodnocení vlastností jednotlivých pojiv se stanovila optimální technologie pro pojení kameniva do formy deskových vzorků. Pro pojení kameniva na bázi pěnového skla lze použít pojiva organická (asfalty, pryskyřice) nebo anorganická (cement, vápno). Pro námi navržená tělesa byl jako pojivo vybrán cement. Při použití cementu jako pojiva jsme museli zajistit jeho dostatečné množství ve směsi, aby byla všechna zrna dokonale obalena cementovou maltou. Zároveň jsme ale nemohli dát velké množství, jelikož by nám při zrání těles segregoval přebytečný cementový tmel ke dnu a struktura těles by byla nerovnoměrná.

Pro míchání směsi jsme použili laboratorní míchačku s nuceným oběhem, ve které jsme nejdřív zamíchali všechny suché složky. Po řádném promísení suchých složek (kamenivo, cement) jsme přidali předem určené množství vody se superplastifikační přísadou. Množství přidané vody jsme museli korigovat z důvodu různé vlhkosti použitého kameniva.

Pro ukládání do forem jsme zvolili metodu vibrolisování, jelikož pouhá vibrace by směs důkladně nezhutnila. Přiléhající tlak na povrch vzorku jsme museli navrhnout tak, aby nedocházelo k drcení jednotlivých zrn kameniva a byla zachována kvalita povrchu vzorků. Po namíchání byly vzorky 7 dní ve formě a poté odformovány a dalších 21 dní zrály ve vlhkém prostředí klimatizační komory.

7.2 Zkušební tělesa

Před mícháním jsme museli zajistit důkladnou přípravu zkušebních forem, přesné zvážení potřebných surovin a nachystání všech pomůcek. Po zamíchání surovin v míchačce jsme vizuálně zhodnotili konzistenci a obalení všech zrn kameniva cementovým tmelem. Poté se za intenzivní vibrace a mírného tlaku ukládala směs do forem. Byly vytvořeny 3 krychle z každé receptury, které zrály v klimatizační komoře a následně na nich byly provedeny zkoušky pro stanovení mechanických vlastností (pevnost v tlaku, objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu). Dále byly od každé receptury vytvořeny 2 desky, na kterých se po vysušení do konstantní hmotnosti stanovoval součinitel tepelné vodivosti. Kostky i desky byly díky svému křehkému charakteru odformovány po 7 dnech zrání ve formách.

Příprava zkušebních vzorků každé receptury:

- krychle 150·150·150 mm, 3 ks
- deska 300·300·60 mm, 2 ks



Obrázek 12: Zhotovení zkušebních těles

7.3 Návrh vstupních surovin

Na základě provedené teoretické rešerše, kde je zhodnocena výroba, vlastnosti a použití kameniva na bázi pěnového skla se hledalo nejlepší pojivo pro spojení jednotlivých zrn. Pro splnění všech požadavků na výsledný produkt (pevnost, odolnost proti vlhkosti či škůdcům) jsme jako pojivo zvolili cement CEM I 42,5 R z Mokré, který je nositelem pevnosti zkušebních těles a zároveň je stabilní i ve vlhkém prostředí oproti alternativním pojivům. Kamenivo bylo použito od firmy REFAGLASS frakce 4-16 mm, které nám zajistí optimální mezerovitost, tepelněizolační i mechanické vlastnosti zkušebních těles. Dále byla použita plastifikační přísada MURAPLAST FK 19 a recyklovaná vlákna od firmy CIUR, viz níže.

7.3.1 MURAPLAST FK 19

MURAPLAST FK 19 je superplastifikační přísada zpomalující tuhnutí betonu. Přísada se vyznačuje snížením vody díky silné plastifikaci, mírným zpomalením tuhnutí, dobrou homogenitou betonové směsi a dalšími vlastnostmi. Používá se pro transportbetony, silniční betony a masivní konstrukce. Přísada je vhodná pro použití v kombinaci se všemi normovými cementy. Přidává se do betonu po přidání záměsové vody nebo přímo s ní. Veškeré vlastnosti najdeme v technickém listě v příloze A této práce. [40]

7.3.2 Vlákna z recyklovaného papíru (F 8000)

Základním krokem pro výrobu vláken je sběr použitých papírů a kartónů. V Evropě roste množství sběrného papíru, který dodávají společnosti sbírající odpady. Tyto společnosti začínají chápat, že třídění papíru je pro ni ekonomický výhodné, tím se snižuje množství zbytečného odpadu, který končí na skládkách. [41]

Druhým krokem výroby je takzvané "rozvlákňování". Papír se máčí a míchá ve vlažné vodě. Po vzniku kaše obsahující různé kovové předměty, jako sponky a svorky. Pomocí magnetu se tyto kovové prvky vyjmou a čistá kaše může jít k dalšímu zpracování. [41]

V poslední fázi je třeba odstranit inkoust a barvy z papírové kaše. To se koná probubláváním vzduchu "kaší", přitom se na bublinkách usadí nežádoucí látky. Tímto procesem vzniká další odpad (obarvená pěna), která se likviduje ve spalovnách. Nakonec se odsuší voda a vzniknou suchá vlákna. [41]



Obrázek 13: Vlákna z recyklovaného papíru

7.3.3 Vlákna z recyklovaných PET lahví (Namflex)

Recyklace PET lahví se dnes stává nutností, z důvodu velkého nárůstu produkce a použití nápojových lahví. Tyhle obaly patří do skupiny nevratných obalů, čímž vzniká potřeba využití PET lahví jako druhotnou surovinu. K těmto krokům nás nutí ekonomická stránka, ale i ekologické dopady na životní prostředí.

Základ je opět sběr PET lahví a jejich třídění. Vytříděné plasty se lisují do balíků a odváží se na recyklační linky. Recykluje se dvěma způsoby, a to fyzikální a chemickou recyklací.

Vlákna se vyrábí fyzikální mokrou recyklací. V podstatě se zalisované balíky zbaví nečistot pomocí speciálního rotačního třídícího systému, společně s vodou se PET láhve drtí společně s vodou. Po drcení dojde k oddělení etiket a papírků pomocí frikční pračky, kde dochází k rozvláknění etiket a k rozpuštění lepidel. Následující krok je flotace, při které se vyplavují poslední nečistoty. Čistý PET recyklát je ve formě vloček odstředěný do výsledné vlhkosti max. 1,5 %. Takto vyrobená vlákna se plní do Big bagu k expedici nebo se dále zpracovávají. [42]



Obrázek 14: Vlákna z recyklovaných PET lahví

7.4 Zkušební receptury

Po určení cementu jako nejvhodnějšího pojiva jsme si stanovili, že namícháme čtyři receptury s jeho různým množstvím. Minimální množství jsme stanovili na 130 kg na 1 m³ betonu z důvodu dokonalého obalení všech zrn a minimálního přebytku cementového tmele. Po zjištění minimálního množství cementu jsme v páté a šesté záměsi přidali do betonu vlákna. Celkově jsme v experimentální části bakalářské práce namíchali 6 receptur u kterých porovnáváme mechanické a tepelněizolační vlastnosti.

Tabulka 7: Receptury na 1 m³ betonu

Vstupní složka			Receptura					
			1	2	3	4	5	6
			1 m ³					
Cement CEM I 42,5 R Mokrý		[kg]	250	200	150	130	130	130
Kamenivo	4–16 mm REFAGLASS	[l]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Voda		[l]	106	61	56,9	53	66	53
Plastifikační přísada MURAPLAST FK 19		0,8 % z m _c [kg]	2	1,6	1,2	1,2	1,2	1,2
Vlákna	F 8000	0,5 % z m _c	-	-	-	-	0,65	-
	Namflex	[kg]	-	-	-	-	-	0,65
Vodní součinitel		[-]	0,42	0,31	0,4	0,41	0,51	0,41

Tabulka 8: Receptury na 39 litrů betonu

Vstupní složka			Receptura					
			1	2	3	4	5	6
			39 l					
Cement CEM I 42,5 R Mokrý		[kg]	9,75	7,8	5,85	5,07	5,07	5,07
Kamenivo	4–16 mm REFAGLASS	[l]	39	39	39	39	39	39
Voda		[l]	4,10	2,42	2,22	2,07	2,57	2,07
Plastifikační přísada MURAPLAST FK 19		0,8 % z m _c [g]	78	62	47	41	41	41
Vlákna	F 8000	0,5 % z m _c	-	-	-	-	0,254	-
	Namflex	[kg]	-	-	-	-	-	0,254
Vodní součinitel		[-]	0,42	0,31	0,4	0,41	0,51	0,41

7.5 Zkoušení čerstvého betonu

7.5.1 Stanovení konzistence sednutí kužele

Stanovení konzistence bylo provedeno metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – část 2: Zkouška sednutím.

Pomůcky:

Abramsův kužel ($h = 300 \text{ mm}$, $d_s = 200 \text{ mm}$, $d_h = 100 \text{ mm}$), propichovací tyč ($d = 16 \text{ mm}$, $L = 600 \text{ mm}$), násypka, pravítko 0–300 mm, stopky s přesností 1 s, podkladní deska (nenasákavá, tuhá, rovná), nádoba na promíchání, lopata pravoúhlého tvaru.

Postup:

Desku, formu i násypku jsme navlhčili. Formu jsme přišlápli k podkladu, připevnili násypku a plnili jsme ve 3 vrstvách. Každá vrstva byla zhutněna 25 vpichy tyčí. Druhou a třetí vrstva byla zhutněna přes celou výšku tak, aby vpichy zasahovaly jen do předchozí vrstvy. Poslední vrstvu jsme plnili nad okraj. Po odstranění násypky jsme zarovnali povrch betonu otáčením a příčným pohybem tyče. Svislým pohybem jsme formu oddělili od betonu, doba zvedání formy byla 2–5 s. Odečetli jsme rozdíl výšek nejvyššího bodu sednutého kužele a formy se zaokrouhlením na 10 mm. Celá zkouška od plnění formy až po zvednutí probíhala do 150 s. [43]

7.5.2 Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu

Stanovení objemové hmotnosti 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), plnicí nástavec, zhutňovací zařízení: vibrační stůl, váhy s přesností 0,1 % hmotnosti betonu, srovnávací pravítko (ocelové, min. o 100 mm delší, než je největší vnitřní rozměr nádoby), lopatka, dvě zednické lžíce, nádoba na promíchání, lopata, palička.

Postup:

Zvážili jsme prázdnou nádobu, poté jsme ji naplnili vodou. Opět jsme ji zvážili a vypočítali objem vody. Nádobu jsme naplnili betonem a zhutnili na vibračním stole. Přebytný beton jsme odstranili ocelovým pravítkem. Nádobu s betonem jsme zvážili a vypočítali jeho objemovou hmotnost. [44]

Objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde:

$D_{\check{B}}$ – objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³]

m_1 – hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 – hmotnost naplněné nádoby [kg]

V – objem nádoby [m³]

7.6 Zkoušení ztvrdlého betonu

7.6.1 Stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu

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

Pomůcky:

Posuvné měřítko, pravítko, váhy, nádoba s vodou/sušárna

Postup:

Tělesa jsme zvážili s přesností 0,01 % a změřili jejich rozměry v mm s přesností na dvě desetinná místa. Z naměřených hodnot jsme vypočítali jejich průměrný objem a z něj objemovou hmotnost. [45]

Objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

$$D = \frac{m}{b \cdot l \cdot h} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde:

D_{ZB} – objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m³]

m – hmotnost zkušebního tělesa [kg]

b, l, h – rozměry zkušebních těles [mm]

7.6.2 Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles

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

Pomůcky:

Zkušební lis, spároměrky, úhelník, posuvné měřítko

Postup:

Změřili jsme rozměry zkušebních těles s přesností na dvě desetinná místa v mm a vypočítali jsme velikost tlačené plochy. Očistili jsme povrch tlačných desek a těleso středově uložili s přesností $\pm 1 \%$. Tělesa byla ukládána do lisu kolmo na směr hutnění. Zatěžovali jsme konstantní rychlostí (0,2 – 1,0 MPa/s), plynule bez rázu do porušení tělesa. Zaznamenali jsme maximální zatížení F (N). Poté jsme vypočítali pevnost v tlaku se zaokrouhlením 0,1 N/mm². [46]

Pevnost v tlaku se vypočítá dle vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$

kde:

f_c – pevnost v tlaku [N/mm²]

F – maximální síla při porušení vzorku [N]

A – tlačná plocha [mm²]



Obrázek 15: Uložení vzorku v lisu a detail porušení zrn po provedení zkoušky

7.6.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti se provádí dle ČSN 72 7012-3: Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky – část 3: Metoda měřidla tepelného toku nebo dle ISO 83 02.

Princip zkoušky:

Ve zkušebním vzorku je třeba vyvodit ustálený teplotní stav a na základě průměrných hodnot elektrického příkonu topného elementu měrné desky, účinné plochy topné desky, teploty vztažené plochy teplého povrchu vzorku, teploty vztažené plochy chladného povrchu vzorku a tloušťky vzorku, lze výpočtem určit hodnotu součinitele tepelné vodivosti vzorku. U metody měřidla tepelného toku je hodnota součinitele tepelné vodivosti vyjádřena z hustoty. [47]

Postup zkoušení:

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti byl použit přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet. Před zkoušením byly vzorky změřeny a vysušeny při 65 °C a poté při teplotě 105 °C. [47]

Hustota tepelného toku q_d :

$$q_d = U \cdot k_m$$

kde:

U – průměrná hodnota napětí na obou měřidlech hustoty tepelného toku [V]

k_m – kalibrační konstanta [W/m²]

Součinitel tepelné vodivosti λ_{sam} : [47]

$$\lambda_{sam} = \frac{U \cdot k_m \cdot d_m}{\theta_{hd} - \theta_{cd}}$$

kde:

λ_{sam} – hodnota součinitele tepelné vodivosti [W/(m·K)]

d_m – průměrná hodnota tloušťky zkušební vzorku [m]

θ_{hd} – výpočtová hodnota povrchové teploty teplé strany zkušební vzorku [°C]

θ_{cd} – výpočtová hodnota povrchové teploty chladné strany zkušební vzorku [°C]

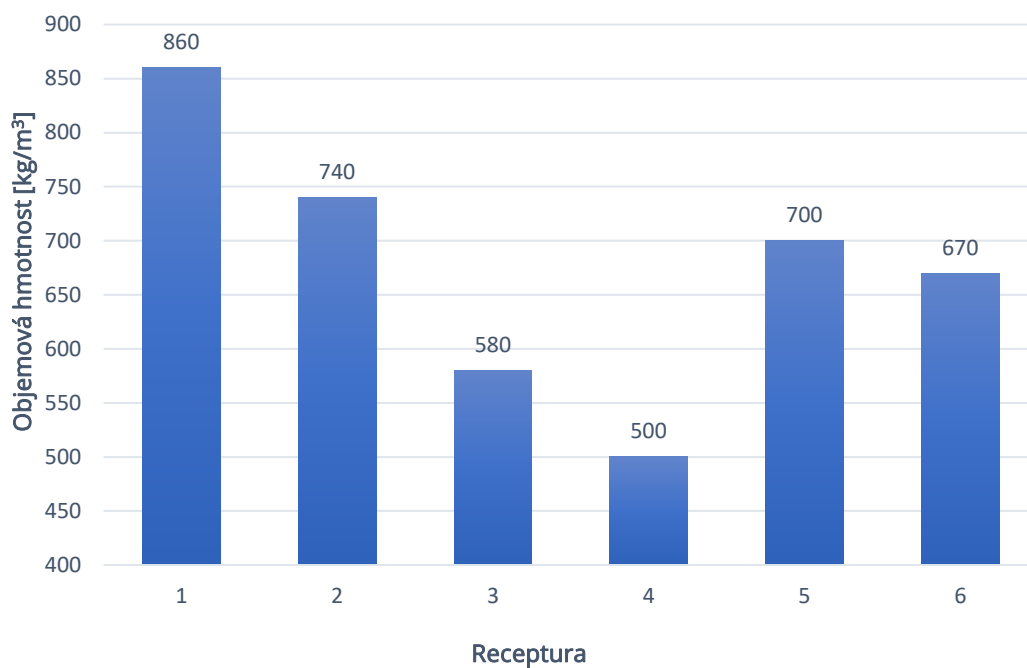
8 VYHODNOCENÍ

Na navržených recepturách jsme provedli zkoušky konzistence sednutím kužele a stanovili objemovou hmotnost v čerstvém stavu.

Tabulka 9: Vlastnosti čerstvého betonu dle daných receptur

Receptura	Ozn. Tělesa	sednutí ČB [mm]	Hmotnost ČB [kg]	D _{čb} [kg/m ³]	průměr D _{čb} [kg/m ³]	Receptura	Ozn. Tělesa	sednutí ČB [mm]	Hmotnost ČB [kg]	D _{čb} [kg/m ³]	průměr D _{čb} [kg/m ³]
1	K1	20	2,84	840	860	2	K1	0	2,5	740	740
	K2		2,91	860			K2		2,37	700	
	D3		4,6	850			D3		4,14	770	
	D4		4,79	890			D4		4,08	760	
3	K1	0	1,93	570	580	4	K1	0	1,76	520	500
	K2		1,95	580			K2		1,67	490	
	K3		1,93	570			K3		1,62	480	
	D1		3,13	580			D1		2,71	500	
	D2		3,22	600			D2		2,65	490	
5	K1	0	2,39	710	700	6	K1	0	2,28	680	670
	K2		2,38	710			K2		2,29	680	
	K3		2,33	690			K3		2,24	660	
	D1		3,77	700			D1		3,67	680	
	D2		3,6	670			D2		3,6	670	

Graf 1: Závislost objemové hmotnosti [kg/m^3] ČB na recepturách



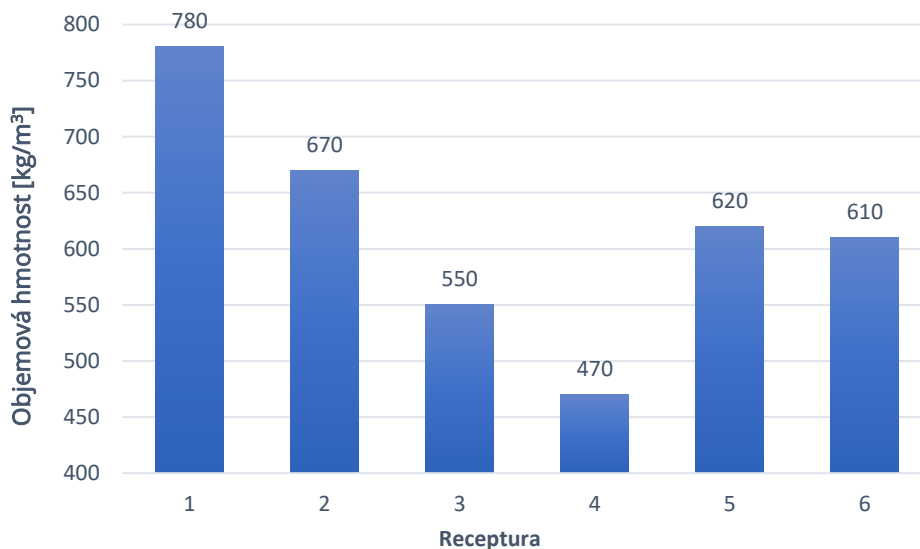
Zkouška sednutím kužele se projevila pouze na první receptuře, kde sednutí bylo 20 mm. Bylo to z důvodu většího vodního součinitele v receptuře. Objemová hmotnost v čerstvém stavu nám podle očekávání s větším množstvím cementu roste. Vlákná z recyklovaného papíru si odebrala velké množství vody, proto je u páté receptury hodnota objemové hmotnosti vyšší než u šesté.

Na zkušebních tělesech ve formě kostek se po 28 dnech prováděly zkoušky mechanických vlastností. Kostky zrály při zvýšené vlhkosti a konstantní teplotě 23 °C v klimatizační komoře a následně na nich provedeno stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu a zkouška pevnosti v tlaku.

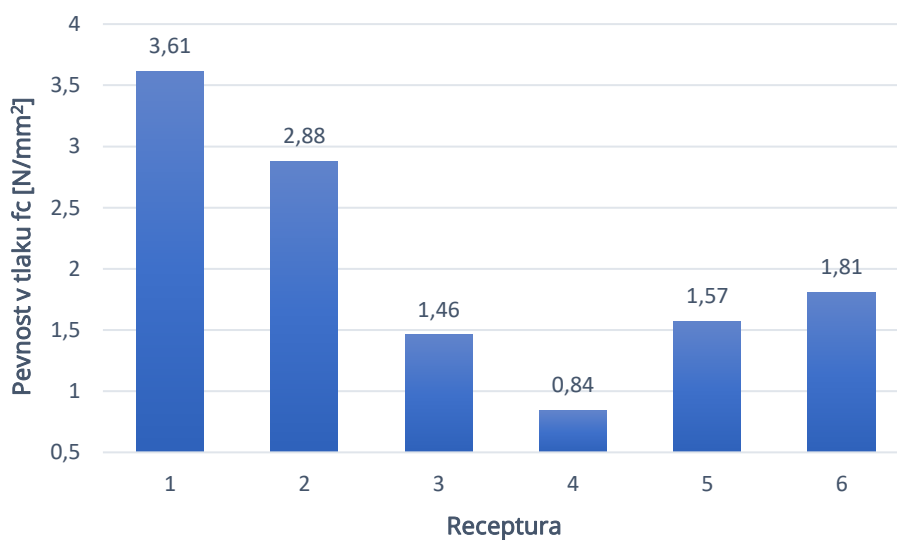
Tabulka 10: Vlastnosti ztvrdlého betonu dle daných receptur

Receptura	Rozměry tělesa [mm]			Hmotnost ZB [kg]	D _{ZB} [kg/m ³]	Průměr D _{ZB} [kg/m ³]	Síla [kN]	Pevnost f _c [N/mm ²]	Průměr. pevnost f _c [N/mm ²]
	b	h	L						
1	149,77	152,83	149,43	2680	780	780	85	3,71	3,61
	150,04	152,44	149,83	2643,4	770		80	3,5	
2	149,72	152,37	149,82	2177,4	640	670	70	3,07	2,88
	149,34	150,15	149,35	2326	690		60	2,68	
3	150,58	149,98	150,64	1855,9	550	550	31,5	1,39	1,46
	149,96	150,3	150,4	1878,4	550		34,8	1,54	
	150,5	151,83	150,37	1862,7	540		33	1,44	
4	151,14	152,5	150,73	1595,4	460	470	17,5	0,76	0,84
	151,92	151,26	150,04	1546,4	450		16,5	0,72	
	151,31	151,7	150,84	1697,9	490		24	1,05	
5	150,73	151,31	150,49	2150,2	630	620	38	1,67	1,57
	152,22	150,24	150,1	2118,1	620		35	1,53	
	151,11	153,02	150,13	2093,2	600		35	1,51	
6	150,63	151,13	150,58	2070,5	600	610	42	1,84	1,81
	151,25	150,87	150,26	2112,6	620		39	1,71	
	151,84	151,59	150	2056,9	600		43	1,87	

Graf 2: Závislost objemové hmotnosti [kg/m³] ZB na recepturách



Graf 3: Závislost pevnosti v tlaku [N/mm²] na recepturách



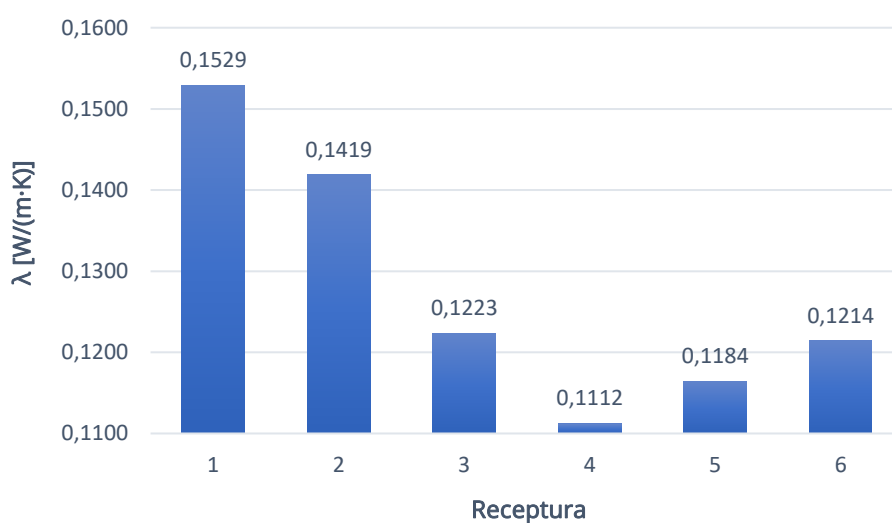
Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu odpovídala podobně jako u čerstvého stavu množství cementu ve směsi. U pevností to bylo podobné, kdy s větší objemovou hmotností rostla pevnost v tlaku. U páté a šesté receptury si můžeme všimnout velkému nárůstu pevností v tlaku po přidání vláken. Můžeme vidět, že větší vliv na pevnost mají vlákna z recyklovaného plastu, kde jsme zaznamenali nárůst o více než 100 %.

Desková tělesa pro stanovení součinitele tepelné vodivosti byla pro zkoušku vysušena do konstantní hmotnosti při teplotě 103 °C.

Tabulka 11: Vlastnosti deskových vzorků po vysušení na 103 °C

Receptura	m [g]	Rozměry [mm]			D [kg/m³]	Průměr D [kg/m³]	λ [W/(m·K)]			průměr λ [W/(m·K)]
		b	l	h						
1	3524,14	296	300	64,28	617,42	630	0,1505	0,1476	0,1448	0,1529
	3660,3	298	300	64,08	638,96		0,1603	0,1578	0,1562	
2	3332,8	298	300	66,0	565,64	570	0,1463	0,1421	0,1415	0,1419
	3329,3	299	299	65,07	572,27		0,1431	0,1391	0,1391	
3	2780,16	299	299	63,37	490,72	500	0,1226	0,1201	0,1193	0,1223
	2848,34	300	300	63,13	501,36		0,1254	0,1237	0,1227	
4	2416,02	298	302	66,12	406,00	410	0,1147	0,1124	0,1116	0,1112
	2368,11	300	300	63,28	415,84		0,1109	0,1093	0,1083	
5	2918,36	300	300	65,17	497,55	490	0,1197	0,1211	0,1217	0,1184
	2791,79	300	300	65,30	475,01		0,1164	0,1165	0,1164	
6	2956,21	300	301	65,16	502,39	500	0,1209	0,1201	0,1192	0,1214
	2913,02	299	301	64,91	498,64		0,1228	0,1227	0,1227	

Graf 4: Závislost tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] na recepturách



Objemová hmotnost se po vysušení výrazně snížila a s její rostoucí hodnotou rostla i tepelná vodivost. Vlákna neměla na tepelnou vodivost významný vliv.

8.1 Diskuze výsledků

V rámci praktické části bakalářské práce jsme na zkušebních tělesech provedli potřebné zkoušky pro vyhodnocení důležitých vlastností vyrobeného materiálu. Na čerstvém betonu jsme provedli zkoušku sednutí kužele, která nebyla pro námi navrženou směs vhodná, jelikož směs byla sušší. Hodnota sednutí byla nenulová pouze u receptury první, kde beton poklesl o 20 mm.

U stanovení objemových hmotností čerstvého betonu nám hrálo zásadní množství cementu ve směsi. Z tohoto důvodu má největší objemovou hmotnost čerstvého betonu první receptura $D_{\check{C}B} = 860 \text{ kg/m}^3$ a nejmenší čtvrtá $D_{\check{C}B} = 500 \text{ kg/m}^3$, zajímavé hodnoty mají receptury s přidáním vláken, protože i přes malé přidání množství se hodnoty objemových hmotností výrazně zvýšily na 700 kg/m^3 u páté receptury a 670 kg/m^3 u šesté. Důvodem může být, že si vlákna do sebe nasákla větší množství vody nebo se mohla vyskytnout chyba při vážení forem.

Na ztvrdlém betonu jsme provedli zkoušky objemových hmotností, které byly stejně jako u čerstvého betonu ovlivněny množstvím cementu v receptuře. Největší objemovou hmotnost ztvrdlého betonu měla první receptura $D_{ZB} = 780 \text{ kg/m}^3$ a nejmenší čtvrtá $D_{ZB} = 470 \text{ kg/m}^3$. U páté a šesté receptury byla hodnota podobná, $D_{ZB} = 620 \text{ kg/m}^3$ u páté a $D_{ZB} = 610 \text{ kg/m}^3$ u šesté receptury. S objemovou hmotností úzce souvisí pevnost v tlaku, která s klesající objemovou hmotností klesala. Největší hodnotu jsme naměřili u první receptury a to $f_c = 3,61 \text{ N/mm}^2$ a nejmenší u čtvrté $f_c = 0,84 \text{ N/mm}^2$. Po přidání vláken se hodnoty zvedly, ale vliv na to má určitě větší objemová hmotnost. U páté receptury se $f_c = 1,57 \text{ N/mm}^2$ a u šesté $f_c = 1,81 \text{ N/mm}^2$. Můžeme říct, že větší vliv na pevnost v tlaku měla vlákna z recyklovaných PET lahví.

U stanovení součinitele tepelné vodivosti hodnoty odpovídají objemovým hmotnostem, takže největší hodnotu má první receptura $\lambda = 0,1529 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a nejnižší čtvrtá $\lambda = 0,1112 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. U páté receptury se $\lambda = 0,1184 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a u šesté $\lambda = 0,1214 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Pozitivnější vliv na tepelnou vodivost mají vlákna z recyklovaného papíru. Pro zjištění optimální receptury si zavedeme veličinu x , která bude vykazovat poměr mezi pevností v tlaku a součinitelem tepelné vodivosti. Čím větší bude výsledek, tím vyšší potenciál pro daný výrobek je, ale nemůžeme opomenout, že při dostačující pevnosti v tlaku zvolíme raději recepturu s nižším součinitelem tepelné vodivosti.

Pro stanovení receptury o optimálních vlastnostech si zavedeme veličinu:

$$x = \frac{f_c}{\lambda}$$

kde:

x – zavedená veličina $[(\text{N/mm}^2)/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))]$

f_c – pevnost v tlaku $[\text{N/mm}^2]$

λ – součinitel tepelné vodivosti $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$

Tabulka 12: Zavedená veličina pro zjištění poměru vlastností

Receptura	Průměr pevnost f_c [N/mm ²]	Průměr λ [W/(m·K)]	x [(N/mm ²)/(W/(m·K))]
1	3,61	0,1529	23,61
2	2,88	0,1419	20,29
3	1,46	0,1223	11,93
4	0,84	0,1112	7,55
5	1,57	0,1184	13,26
6	1,81	0,1214	14,91

Největší potenciál by podle námi zvolené metody měla první a druhá receptura, ale podle vizuálního zhodnocení, kdy u obou receptur byl sedimentován cementový tmel na dno těles, nejsou ekonomicky výhodné. Tudíž největší potenciál do budoucna mají receptury 5 a 6, které měly výborný poměr vlastností.



Obrázek 16: Nadměrné množství cementového tmele u první receptury

8.2 Konkurenceschopnost na trhu

Pro porovnání vyrobených desek na trhu si následně spočítáme cenu našeho výrobku. Do ceny musíme zahrnout všechny použité suroviny, náklady na výrobu a expedici. Zvolili jsme recepturu 4 z důvodu nejmenšího součinitele tepelné vodivosti.

Tabulka 13: Cena 1 m³ výrobku podle receptury 4

Materiál	jednotka	množství na 1 m ³	cena [kč]
Cement 42,5 R	kg	130	500
Kamenivo REFAGLASS 4/16 mm	l	1000	1780
Voda	kg	53	2
Muraplast FK 19	kg	1,2	120
cena celkem	kč	-	2402

Když si určíme, že cena materiálu je 50 % celkové ceny, můžeme usuzovat, že naše výsledná cena se bude pohybovat kolem 5000 Kč/m³. V teoretické části jsou porovnány největší konkurenti na trhu, u kterých se cena pohybuje mezi 5 a 6 tisíci na kubík materiálu. Pokud jsou předpoklady o ceně nákladů na výrobu a expedici správné, tak můžeme konstatovat, že naše výrobky jsou plně konkurenceschopné na trhu tepelněizolačních soklových desek.

9 ZÁVĚR

Pěnové sklo je vyráběno ze skelného recyklátu, který je nepoužitelný ve sklářském průmyslu. Teoretická část práce se zaměřuje na způsob výroby a vlastnosti kameniva z pěnového skla. V dalších letech lze předpokládat, že tento materiál bude stále častěji používán. Kamenivo na bázi pěnového skla má vysoký potenciál do budoucna z důvodu, že je vyráběn z druhotné suroviny, a to ze skleněného odpadu, šetří tak místo na skládkách a není nepříznivý k životnímu prostředí. Mezi hlavní vlastnosti kameniva patří velmi nízká objemová hmotnost a poměrně nízký součinitel tepelné vodivosti. Vyráběné produkty z pěnového skla jsou především tepelně izolační desky, které najdou uplatnění při zateplování jak svislých, tak vodorovných konstrukcí. Vzhledem k jejich vysoké ceně se zatím ve stavebnictví moc nepoužívají. Nejčastější použití kameniva z pěnového skla je na podsypy pod základové desky nebo jako drenážní vrstvy. Vyráběné kamenivo z pěnového skla se díky svým vlastnostem nabízí jako vhodné kamenivo pro vyrábění mezerovitých a lehkých betonů. Díky velké ceně tepelněizolačních desek vyráběných z pěnového skla je snaha, použít pro výrobu tepelněizolačních desek kamenivo na bázi pěnového skla s vhodným pojivem. V teoretické části jsou požadavky na izolaci soklu objektů a důvody proč izolovat soklovou část zdiva.

V praktické části jsme vytvořili zkušební vzorky z kameniva z pěnového skla a cementu a zkoušely jsme na nich mechanické a tepelněizolační vlastnosti. Námi vyrobené desky splňují veškeré podmínky pro tepelněizolační desky pro izolaci soklové části objektu. Součinitel tepelné vodivosti sice nevykazuje tak nízké hodnoty jako u konkurenčních izolačních materiálů, ale oproti konkurentům mají desky mnohem vyšší pevnost v tlaku a jsou například nehořlavé. Oproti tradičním izolačním materiálům se vlastnosti znatelně liší. S konkurenceschopností na trhu podle ceny se pohybujeme v podobných hodnotách jako u nejpoužívanějších izolačních materiálů.

Do budoucna je ve výrobě tepelněizolačních desek z kameniva na bázi pěnového skla velký potenciál díky jejich jedinečným vlastnostem a šetření životního prostředí. V následujících letech můžeme očekávat velký nárůst výrobků z pěnového skla a jejich použití ve stavebnictví.

10 LITERATURA

- [1] SVOBODA, Luboš. *Stavební Hmoty*. 3. Praha: Jaga group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [2] O skle – ASOCIACE SKLÁŘSKÉHO A KERAMICKÉHO PRŮMYSLU ČR. *ASOCIACE SKLÁŘSKÉHO A KERAMICKÉHO PRŮMYSLU ČR* [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.askpcr.cz/o-skle/>
- [3] Das innovative Blähglasgranulat aus Recyclingglas | Poraver®. Leichtzuschlag für Ihre Produkte | Poraver® [online] [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.poraver.com/poraver-blaehglasgranulat/>
- [4] Liaver aplikace | Liaver. Liaver [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.liaver.cz/liaver.php>
- [5] Proces výroby penového skla | Penové sklo. Penové sklo - tepelnoizolačný stavebný materiál [online]. Dostupné z: <http://www.penove-sklo.com/proces-vyroby-penoveho-skla.html>
- [6] Pěnové sklo A-GLASS. Pěnové sklo A-GLASS [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.a-glass.cz/penove-sklo/>
- [7] Pěnové sklo REFAGLASS. Pěnové sklo REFAGLASS [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.refaglass.cz/charakteristika/>
- [8] BO, Chen, Wang KEQIANG a Chen XINGJUN. Study of Foam Glass with High Content of Fly Ash Using Calcium Carbonate as Foaming Agent. *WEB OF SCIENCE* [online]. 2012, 263-265 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [9] LONG, Wu a Zhao YIHONG. Effect of Manganese Dioxide on Structure and Compressive Strength of Foam Glass. *WEB OF SCIENCE* [online]. 2014, 94-97 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [10] SHUJIANG, Liu a Fu GUIZHEN. Impact of H₃BO₃ on foaming action of CaCO₃ in borosilicate foam glasses. *WEB OF SCIENCE* [online]. 2012, 400-401 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [11] XIU-LEI, Jiang a Liu TAO. *Effects of crystal structure on the foaming of isotactic polypropylene using supercritical carbon dioxide as a foaming agent* *WEB OF SCIENCE* [online]. 2009, 165-175 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do

- [12] RASMUS R., Petersen a Koniq JAKOB. *Effect of Na₂CO₃ as foaming agent on dynamics and structure of foam glass melts* WEB OF SCIENCE [online]. 2014, 1-5 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [13] HUAN, Shi a Feng KE-QIN. Influence of aluminium nitride as a foaming agent on the preparation of foam glass-ceramics from high-titanium blast furnace slag. *WEB OF SCIENCE* [online]. 2016, 595-600 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [14] SEDLMAJER, Martin, Jiří ZACH a Václav ŠENBAUER. Možnosti využití lehkého kameniva na bázi recyklovaného skla v betonu. *IMateriály* [online]. 2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/moznosti-vyuziti-lehkeho-kameniva-na-bazi-recyklovaneho-skla-v-betonu_43687.html
- [15] Pěnové sklo - izolace z recyklovaného skla- drť | E-shop Přírodní stavba. Přírodní stavba, EKO a BIO materiály [online]. Dostupné z: <http://www.prirodnistavba.cz/penove-sklo-izolace-z-recyklovaneho-skla-drt-sterk-big-bag-3-m3-4732.html>
- [16] FOAMGLAS® Pittsburgh Corning. FOAMGLAS® Pittsburgh Corning [online]. Dostupné z: <http://www.foamglas.com/>
- [17] Pěnové sklo GEOCELL®, Pěnové sklo GEOCELL® [online]. Dostupné z: <http://www.penove-sklo.cz/>
- [18] Produkty z pěnového skla Glapor. Produkty z pěnového skla Glapor [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.penovesklo.de/>
- [19] HELA, Rudolf. Studijní opora pro komb. st. - Modul BJ04 – M01 Technologie betonu I. Brno, 2005. 110 s. Elektronická opora
- [20] ČSN EN 206 Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2014, 87 s.
- [21] Anorganická pojiva. Anorganická pojiva [online]. [cit. 07.05.2017] Dostupné z http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html
- [22] Cement | eBeton - Specialista na beton. eBeton | eBeton - Specialista na beton [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>
- [23] ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: Český normalizační institut, 2013, 25 s.
- [24] Organická pojiva, Česká zemědělská univerzita v Praze ČZU. [online]. 2017 Česká zemědělská univerzita v Praze [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <https://www.czu.cz/cs/>

- [25] 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
- [26] ADÁMEK, Jiří. Studijní opora pro komb. St. – Modul BI01-BI05 Stavební látky. Brno 2010, 31 s. Elektronická opora
- [27] Epoxidová pryskyřice – Wikipedie. [online]. [cit. 07.05.2017] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice
- [28] *Sborník příspěvků semináře METAKAOLIN 2007*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno 2007, 137 str. ISBN 978-80-214-3339-7
- [29] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P., *Lehké stavební látky*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno 2006, 203 str.
- [30] BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. Fibre reinforced cementitious composites. London: Spon press Taylor & Francis Group, 1990. 451 s. ISBN 1-85166-393-2.
- [31] ČSN EN 12620+A1 – Kamenivo do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2008, 51 s.
- [32] ČSN EN 13055-1 – Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Praha: Český normalizační institut, 2004, 28 s.
- [33] ČSN EN 13055-2 – Pórovité kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové úpravy a pro nestmelené a stmelené aplikace. Praha: Český normalizační institut, 2004, 29 s.
- [34] HALAHYJA, M.; CHMÚRNY, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [35] ČSN 73 0540-2 – Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2011, 41 s.
- [36] Tepelná izolace soklu. ISOVER: tepelné izolace, zvukové izolace a protipožární izolace [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/aktuality/tepelna-izolace-soklu>
- [37] Články | Izolace.cz. | Izolace.cz [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.isolace.cz/clanky/detail/3401-sokl-rizikovy-detail>
- [38] Vlastnosti izolačních materiálů: izolace info [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.isolace-info.cz/>
- [39] RYDLO, Pavel. Spolehlivý sokl-přání každé stavby. *Stavebnictví3000*. 2005.
- [40] MC-Bauchemie - Inovácia v stavebnej chémii [online]. [cit. 19.05.2017]. Dostupné z: <http://www.mcbauchemie.sk/storage/app/media/products/Muraplast%20FK%2019/Muraplast%20FK%2019.pdf>

- [41] Proces recyklace papíru. ASSMANN & SYN odpady, s.r.o. [online]. [cit. 19.05.2017]. Dostupné z: <http://www.assmann.cz/blog-proces-recyklace-papiru-detail-14>
- [42] Nakládání a recyklace se starými PET lahvemi, znovuvyužití. | Ecoservis. ECOSERVIS - komplexní nakládání s odpady a likvidace nebezpečných odpadů [online]. [cit. 19.05.2017]. Dostupné z: <http://www.ecoservis.eu/recyklace-pet-lahvi>
- [43] ČSN EN 12350-2 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Český normalizační institut, 2000, 9 s.
- [44] ČSN EN 12350-6 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Český normalizační institut, 2009, 10 s.
- [45] ČSN EN 12390-7 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2001, 10 s.
- [46] ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2002, 18 s.
- [47] ČSN 72 7012-3 – Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku. Praha: Český normalizační institut, 1994, 8 s.
- [48] Vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov, sbírka zákonů s. 738, 2013, 16 s.

SEZNAM PŘÍLOH

- A. Technický list plastifikační přísady Muraplast FK 19